



DGK Ausschuss Geodäsie (DGK)
der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C

Dissertationen

Heft Nr. 975

Laura Janina Balangé

**Geometrische Qualitätssicherung
für kernlose Faserverbundsysteme**

München 2026

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München

ISSN 0065-5325

ISBN 978-3-7696-5387-8



Geometrische Qualitätssicherung für kernlose Faserverbundsysteme

Von der Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

M.Sc. Laura Janina Balangé

aus Stuttgart Bad-Cannstatt

München 2026

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München

Adresse des Ausschusses Geodäsie (DGK)
der Bayerischen Akademie der Wissenschaften:



Ausschuss Geodäsie (DGK) der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Alfons-Goppel-Straße 11 • D – 80 539 München

Telefon +49 – 89 – 23 031 1113 • Telefax +49 – 89 – 23 031 - 1283 / - 1100

e-mail post@dgk.badw.de • <http://www.dgk.badw.de>

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Volker Schwieger

Mitberichterin: Prof. Dr. Corinna Harmening

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Peter Middendorf

Tag der mündlichen Prüfung: 13. Oktober 2025

Diese Dissertation ist auf dem Server des Ausschusses Geodäsie (DGK)
der Bayerischen Akademie der Wissenschaften unter <http://dgk.badw.de/>
sowie auf dem Publikationsserver der Universität Stuttgart unter
<https://doi.org/10.18419/opus-17875> elektronisch publiziert

© 2026 Ausschuss Geodäsie (DGK) der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München

Alle Rechte vorbehalten. Ohne Genehmigung der Herausgeber ist es auch nicht gestattet,
die Veröffentlichung oder Teile daraus zu vervielfältigen.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	XIII
Abstract	XV
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Umfeld	1
1.2 Ziel der Arbeit	3
1.3 Aufbau der Arbeit	4
2 Qualität in Bauprozessen und Grundlagen der kernlosen Faserverbundsysteme	5
2.1 Qualität in Bauprozessen	5
2.1.1 Definition Qualität	5
2.1.2 Qualitätsmanagementsystem und Qualitätssicherungskonzept	6
2.1.2.1 Qualitätsmodell	7
2.1.2.2 Qualitätsfortpflanzung für Qualitätsparameter	8
2.1.2.3 Qualitätsbeurteilung	9
2.1.3 Qualitätssicherung im Bauprozess	9
2.1.4 Software und Dokumente zur Qualitätssicherung im Bau	10
2.2 Grundlagen der Faserverbundsystemen	11
2.2.1 Verwendung von Faserverbundsystemen in der Architektur	11
2.2.2 Fertigungsprozess von Bauteilen aus kernlosen Faserverbundsystemen	13
3 Grundlagen	17
3.1 Messtechnische Grundlagen	17
3.1.1 Flächenhafte 3D-Erfassung mittels photogrammetrischer Systeme	17
3.1.1.1 Structure from Motion	19
3.1.1.2 Streifenprojektionssystem	19
3.1.2 Flächenhafte 3D-Erfassung mittels Laserscanner	20
3.1.2.1 Winkelmessung	21
3.1.2.2 Distanzmessung	21
3.1.2.3 Geometrische Kenngrößen und radiometrische Informationen	22
3.1.2.4 Unsicherheiten und Fehlerquellen	26
3.1.2.5 Punktwolkenvorverarbeitung	27
3.2 Mathematische Grundlagen und Ausgleichungsrechnung	27
3.2.1 Koordinatentransformation	28
3.2.2 Varianz-Kovarianzfortpflanzungsgesetz	28
3.2.3 Schätzverfahren	29
3.2.3.1 Gauß-Markov-Modell	30
3.2.3.2 Gauß-Helmert-Modell	30
3.2.3.3 Hauptkomponentenanalyse	31
3.2.3.4 Linienschätzung im 3D-Raum	32
3.2.4 Berechnung des nächsten Punktes von mehrerer windschiefen Geraden im Raum	32

3.3	Methoden der Segmentierung	33
3.3.1	K-Means	35
3.3.2	DBSCAN	36
3.3.3	Hough-Transformation	37
3.4	Methoden der Graphentheorie	41
3.5	Bestimmung der Form und Fläche von Objekten im 2D-Raum	43
3.5.1	Konvexe Hülle	43
3.5.2	Alpha-Shapes	44
4	Aufbau eines Qualitätssicherungskonzeptes für Faserverbundsysteme	47
4.1	Identifikation der technischen Qualitätsanforderungen und Definition der Kontroll- und Entscheidungspunkte	47
4.2	Geometrische Qualitätssicherung	53
4.2.1	Datenaufnahme	54
4.2.1.1	Wahl des Messverfahrens	54
4.2.1.2	Voruntersuchungen für die Auswahl des TLS, Einfluss der Messkonfiguration und des Material auf Vollständigkeit, Korrektheit und Genauigkeit	54
4.2.1.3	Wahl des Laserscanners	63
4.2.1.4	Messkonzept	64
4.2.1.5	Referenzmessungen mittels Streifenprojektionssystem zur Analyse hinsichtlich der Vollständigkeit, Korrektheit und Genauigkeit der Punktwolke	66
4.2.1.6	Vergleich der Messergebnisse aus TLS und Streifenlichtprojektionssystem:	68
4.2.2	Datenvorverarbeitung	72
4.2.3	Zusammenfassung der benötigten Schritte für die Messung und Datenvorverarbeitung	73
4.2.4	Auswertealgorithmus	74
4.2.4.1	Segmentierung	75
4.2.4.2	Bestimmung der Schnittpunkte und Netzgenerierung, sowie die Analyse hinsichtlich der Korrektheit und Vollständigkeit	82
4.2.4.3	Netzgenerierung und Analyse hinsichtlich der Vollständigkeit und Korrektheit der Liniensegmentierung	85
4.2.4.4	Bestimmung der Form und Fläche der Faserquerschnitte und Analyse hinsichtlich der Vollständigkeit und Korrektheit	88
4.2.4.5	Varianz-Kovarianzfortpflanzung	89
4.2.4.6	Zusammenfassende Darstellung der Schritte des Auswertealgorithmus	90
5	Testobjekte und Demonstratoren	93
5.1	Simulation	93
5.1.1	Datensätze	93
5.1.2	Analyseziel	94
5.2	Einfache Strukturen mit Referenzmessungen	94
5.2.1	Datensätze	94
5.2.2	Analyseziel	95
5.3	Strukturen unterschiedlicher Komplexität mit Messungen im Fertigungsrahmen	96
5.3.1	Datensätze	96
5.3.2	Analyseziel	97
5.4	Messungen im Fertigungsprozess	97
5.4.1	Datensätze	97
5.4.2	Analyseziel	102
5.5	Demonstrator - Hybrid Flax Pavillion	102
5.5.1	Datensatz	102
5.5.2	Analyseziel	103

6	Analyse der Ergebnisse	105
6.1	Simulierte Datensätze	105
6.1.1	Simuliertes Testobjekt S1	105
6.1.2	Simuliertes Testobjekt S2	107
6.1.3	Simuliertes Testobjekt S3	109
6.1.4	Vergleich der berechneten Querschnittsflächen für simulierte Testdatensätze . . .	111
6.1.5	Zusammenfassung der Ergebnisse der simulierten Testdatensätze	113
6.2	Einfache Strukturen mit Referenzmessungen	114
6.2.1	Vergleich der Ergebnisse des 8-Element mit und ohne Scanningspray	114
6.2.1.1	Einfluss der Wahl des Parameters des Liniendurchmessers auf die Schätzung	114
6.2.1.2	Vergleich der berechneten Querschnittsflächen aus unterschiedlichen Messdaten	115
6.2.2	Vergleich des X-Element mit und ohne Scanningspray	117
6.2.2.1	Betrachtung der Vollständigkeit der Erfassung und Auswertung für ATOS- und TLS-Messungen	118
6.2.2.2	Vergleich der berechneten Schnittpunktkoordinaten aus ATOS- und TLS-Messungen	119
6.2.3	Zusammenfassung der Ergebnisse für die einfachen Strukturen mit Referenzmessungen	120
6.3	Strukturen unterschiedlicher Komplexität mit Messungen im Fertigungsrahmen	120
6.3.1	Untersuchung des Einflusses des Fertigungsrahmens auf die Qualität der Messung	120
6.3.2	Untersuchung der Anwendung des Algorithmus auf komplexere Testobjekte . . .	121
6.3.3	Einfluss der Ankerpunkte auf die Schätzung	123
6.3.4	Vergleich der Querschnittsflächen mit alternativen Messmethoden	125
6.3.5	Zusammenfassung der Ergebnisse für die Strukturen unterschiedlicher Komplexität mit Messungen im Fertigungsrahmen	126
6.4	Messungen im Fertigungsprozess	126
6.4.1	Ergebnisse der Liniensegmentierung und Schnittpunktberechnung	126
6.4.1.1	Besondere Herausforderungen für die Segmentierung	128
6.4.2	Ergebnisse der Netzgenerierung	128
6.4.2.1	Besonderheiten bei der Netzgenerierung mit zwei Robotern	129
6.4.3	Zusammenfassung der Ergebnisse für die Messungen im Fertigungsprozess . . .	130
6.5	Demonstrator - Hybrid Flax Pavillion	131
6.5.1	Untersuchung der Vollständigkeit der erfassten Punktwolke	131
6.5.2	Untersuchung der Ergebnisse eines Ausschnitts des Bauteils	133
6.5.2.1	Analyse hinsichtlich der Komplexität	133
6.5.2.2	Analyse hinsichtlich der Verwendung von Naturfasern	134
6.5.3	Betrachtung der Ergebnisse für das gesamte Bauteil	135
6.5.4	Zusammenfassung der Ergebnisse für das Reale Bauteil - Hybrid Flax Pavillion .	138
6.6	Zusammenfassung der Qualitätsparameter	138
6.7	Laufzeitvergleich	139
7	Fazit und Ausblick	141
7.1	Erreichte Ziele des entwickelten Qualitätssicherungssystems	141
7.2	Grenzen des entwickelten Qualitätssicherungssystems	143
7.3	Ausblick hinsichtlich zukünftiger möglicher Erweiterungen	143

Literatur	XVII
Abkürzungsverzeichnis	XXIX
Anhang	
A Anhang	XXXI
A.1 Testmessungen bei variierenden Einfallswinkeln und Laserscannern	XXXI
B Anhang	XXXV
B.1 Darstellung der berechneten Querschnittsflächen für die simulierten Datensätze S2 und S3	XXXV
B.2 Ergebnisse der Auswertung für die Messungen in der Fertigung	XXXVI
Lebenslauf	XLVII

Tabellen

2.1	Beispiele für mögliche Qualitätsmerkmale, -parameter und -kriterien	8
3.1	Niedrigste und höchste Auflösung verschiedener Laserscanner	23
3.2	Spotgrößen und Strahldivergenz verschiedener Laserscanner mit dem Impulslaufzeitverfahren und dem Phasenvergleichsverfahren zur Streckenmessung aus den Herstellerangaben	24
4.1	Technische Qualitätsmerkmale im Planungs- und Fertigungsprozess.	48
4.2	Qualitätsmerkmale, -parameter und -kriterien am Entscheidungspunkt 1 (DP1).	49
4.3	Qualitätsmerkmale, -parameter und -kriterien am Entscheidungspunkt 2 (DP2).	51
4.4	Qualitätsmerkmale, -parameter und -kriterien am Kontrollpunkt 1 (CP1).	51
4.5	Qualitätsmerkmale, -parameter und -kriterien am Entscheidungspunkt 3 (DP3).	52
4.6	Qualitätsmerkmale, -parameter und -kriterien am Kontrollpunkt 2 (CP2).	52
4.7	Relevante Laserscannerspezifikationen aus den Datenblättern der Hersteller, sowie aus persönlicher Kommunikation	55
4.8	Punktzahl am Objekt	57
4.9	Punktzahl am Objekt	60
4.10	Beurteilung der Qualitätsmerkmale für die Wahl des Laserscanners.	63
4.11	Verwendete Standpunktkonfigurationen.	64
4.12	Systemeigenschaften des ATOS Triple Scansystems	66
4.13	Mittelwert, Standardabweichung des Mittelwerts, Korrelation und Rank-Korrelation für die Einzelscans sowie die registrierte Punktwolke und deren Signifikanz für die Messungen ohne Spray.	70
4.14	Mittelwert, Standardabweichung des Mittelwerts, Korrelation und Rank-Korrelation für die Einzelscans sowie die registrierte Punktwolke und deren Signifikanz für die Messungen mit Spray.	71
4.15	Beurteilung der Qualitätsmerkmale für die Wahl des Messkonzepts.	72
4.16	Mittelwert und Standardabweichung der berechneten Schnittpunktkoordinaten mit vorheriger K-Means Clusterung aus 1000 Durchläufen	78
6.1	Gewählte Werte der Stellgrößen für die durchgeführten Auswertungen	105
6.2	Abweichung der geschätzten Schnittpunktkoordinaten von den Soll-Koordinaten der Schnittpunkte für das Testobjekt S1.	106
6.3	Abweichung der geschätzten Schnittpunktkoordinaten von den Soll-Koordinaten der Schnittpunkte für das Testobjekt S2.	108
6.4	Abweichung der geschätzten Schnittpunktkoordinaten von den Soll-Koordinaten der Schnittpunkte für das Testobjekt S3.	110
6.5	Anzahl der segmentierten Schnittpunkte und Liniensegmente für die 12 Testobjekte vor und nach der Netzgenerierung.	118
6.6	Abweichung der geschätzten Schnittpunktkoordinaten für das Testobjekt S2 aus der Schätzung einer Punktwolke mit und ohne den Bereich der Ankerpunkt.	124
6.7	Abweichung der geschätzten Schnittpunktkoordinaten für das Testobjekt S3 aus der Schätzung einer Punktwolke mit und ohne den Bereich der Ankerpunkt.	124

6.8	Vergleich der bestimmten Faserquerschnitte aus unterschiedlichen Messverfahren.	125
6.9	Zusammenfassung der bestimmten Qualitätsparameter für die berechneten Liniensegmente und Schnittpunkte	139
6.10	Zusammenfassung der bestimmten Qualitätsparameter für die berechneten Querschnitts- flächen	139

Abbildungen

1.1	Darstellung der Idee des Co-Design und den daraus resultierenden parallelen und interdisziplinären Entwicklungen von Methoden, Prozessen und Systemen	2
1.2	Exemplarische Darstellung eines Bauteils aus Faserverbundsystemen	3
2.1	Struktur des Qualitätssicherungskonzeptes mit dem Qualitätsmodell sowie der Qualitätsbeurteilung	7
2.2	Toleranzen in Bauprozessen	10
2.3	Monsanto Haus der Zukunft. Eine Attraktion im Disneyland Kalifornien, die demonstrieren sollte, wie das Wohnen in der Zukunft aussehen könnte	11
2.4	Darstellung verschiedener Bauwerksdemonstratoren im Bereich des Bauens mit Faserverbundsystemen.	12
2.5	Exemplarischer Fertigungsaufbau für die Fertigung von Bauteilen aus kernlosen Faserverbundsystemen	13
2.6	Mögliche Variation der Fertigungsplattform	14
2.7	Fabrikationssetup	14
3.1	Zusammenhang zwischen Bildpunkt und Objektpunkt im vereinfachten Fall, dass die Bildebene parallel zur Objektebene verläuft	18
3.2	Messgrößen beim terrestrischen Laserscanner.	20
3.3	Form des Laserspots bei unterschiedlichen Auftreffwinkeln	23
3.4	Darstellung des Verhaltens dreier Messstrahlen bei unterschiedlichen Auflösungen beim Auftreffen auf eine Kante.	24
3.5	Vergleich des Verhaltens beim Umgang mit unvollständigen Laserspots bei Laserscannern mit dem Impulsvergleichsverfahren und dem Phasenvergleichsverfahren.	25
3.6	Beispiel zur Bestimmung des Punktes mit dem minimalen Abstand dreier Geraden im Raum.	32
3.7	Darstellung der Ergebnisse der K-Means Clusterung nach unterschiedlichen Iterationsschritten.	36
3.8	Darstellung des Ergebnisses einer Clusterung nach dem DBSCAN Verfahren	37
3.9	Schematische Darstellung der grundlegenden Idee der Hough-Transformation	38
3.10	Repräsentation zweier Geraden im Pixelbild und nach Durchführung der Hough-Transformation	38
3.11	Darstellung der Linienrepräsentation nach Roberts.	40
3.12	Darstellung unterschiedlicher Tesselierungsschritte des Ikosaeder.	41
3.13	Darstellung der unterschiedlichen Arten an Graphen.	42
3.14	Konstruktionsschritte für die Erstellung einer konvexen Hülle.	43
3.15	Bedeutung des alpha-Parameters für die Konstruktion der Alpha-Shapes.	44
3.16	Konstruktionsschritte für die Erstellung der Alpha-Shapes.	44
3.17	Vergleich der Bestimmung der äußeren Geometrie durch eine konvexe Hülle oder Alpha-Shapes	45
4.1	Co-Design Mess- und Fertigungsprozess mit der Zuordnung der Kontroll- und Entscheidungspunkte	47

4.2	Koordinatensysteme des Fertigungsprozess	50
4.3	Vergleich der unterschiedlichen Detaillierungsgrade im Planungs- und Fertigungsprozess	53
4.4	Begriffsdefinition für die Unterteilung der einzelnen Abschnitte der Fasergeometrie.	54
4.5	Testsetup für den Vergleich der unterschiedlichen Laserscanner	55
4.6	Punktwolke des Testobjektes aus Messungen des Leica HDS7000 und die zusätzlichen sichtbaren Punktwolken, die durch den Mixed-Pixel-Effekt erzeugt werden	56
4.7	Scans eines Standpunktes des Testobjektes aus den Messungen der Laserscanner Leica HDS7000, Trimble X7 und Riegl VZ2000 mit und ohne Verwendung eines Scanningsprays in der 0°-Position	58
4.8	Scans eines Standpunktes des Testobjektes aus den Messungen der Laserscanner Leica HDS7000, Trimble X7 und Riegl VZ2000 mit und ohne Verwendung eines Scanningsprays in der 50°-Position	59
4.9	Punktwolke des Testobjekts mit den beiden ausgewählten Ausschnitten 1 und 2.	60
4.10	Punktwolkenausschnitte des Testobjektes zum Vergleich der Intensitäten aus den Messungen des Trimble X7 und Riegl VZ2000 mit und ohne Scanningspray	61
4.11	Vergleich der Messungen des Hintergrundes des Objektes für den Trimble X7 mit und ohne Scanningspray	63
4.12	Messaufbau zur Bestimmung einer idealen Messkonfiguration.	64
4.13	Die für die Evaluierung des Messkonzeptes verwendeten Probekörper in den jeweiligen Messhalterungen montiert.	65
4.14	Darstellung der Punktwolke des 8-Elements nach der Registrierung der unterschiedlichen Messkonfigurationen.	65
4.15	Darstellung der Punktwolke des X-Elements nach der Registrierung der unterschiedlichen Messkonfigurationen.	65
4.16	Aufnahmekonfiguration für die Messungen mit dem ATOS Triple Scansystem.	67
4.17	Projiziertes Streifenmuster des ATOS Triple Scansystems auf das Messobjekt.	68
4.18	Frontalansicht der betrachteten TLS Punktwolken mit und ohne Scanningspray.	68
4.19	Frontalansicht des C2M-Vergleichs der TLS Punktwolken mit dem aus ATOS-Messungen generierten Mesh mit und ohne Scanningspray.	69
4.20	Georeferenzierung der Testobjekte im Fertigungsrahmen für tachymetrische Messungen und TLS-Messungen.	72
4.21	Ablaufdiagramm der benötigten Schritte für die Messung und Datenvorverarbeitung.	74
4.22	Schritte des Auswertealgorithmus für die Extraktion der geometrischen Kenngrößen	75
4.23	Vergleich der Ergebnisse des K-Means Algorithmus bei der Verwendung unterschiedlicher Vorinformation	76
4.24	Mittelwert und Streuung der berechneten Schnittpunktkoordinaten aus 1000 Durchläufen.	77
4.25	Einfluss der Filterung nach parallelen Linien auf das Segmentierungsergebnis.	79
4.26	Einfluss des Distanzkriteriums auf das Segmentierungsergebnis.	80
4.27	Aufteilung der Liniensegmente an den Schnittpunkten bei mehreren Schnittpunkten für eine Linie.	84
4.28	Bestimmung der Schnittpunkte zwischen zwei Clustern.	84
4.29	Verbindung der geschätzten Liniensegmente zwischen zwei Clustern.	85
4.30	Wahl des nachfolgenden Liniensegments bei mehreren potentiellen Kandidaten.	86
4.31	Konstruktion mittels Informationen aus Vorepochen.	87
4.32	Konstruktion fehlender Liniensegmente ohne Vorinformation.	87
4.33	Darstellung der Einteilung der Punktwolke eines Liniensegmentes in Untersegmente sowie die Projektion auf die zugehörigen Ebenen	88
4.34	Vergleich der Ergebnisse der Erstellung der Flächenpolygone mittels konvexer Hülle und Alpha-Shape.	89
4.35	Ablaufdiagramm der einzelnen Schritte des Auswertealgorithmus.	91

5.1	Darstellung der drei simulierten Testobjekte.	93
5.2	Darstellung der einfachen Testobjekte	94
5.3	Fertigungsrahmen der Testobjekte im Fertigungsumfeld.	95
5.4	Fertigungssetup der Testdatensätze unterschiedlicher Komplexität	96
5.5	Messaufbau für die Testobjekte unterschiedlicher Komplexität	97
5.6	Mess- und Fertigungsaufbau für die Testdatensätze mit Messungen in der Fertigung . . .	98
5.7	Darstellung der Punktwolken für das Testobjekt 1 in der Fertigung	99
5.8	Darstellung der Punktwolken für das Testobjekt 2 in der Fertigung	100
5.9	Darstellung der Punktwolken für das Testobjekt 3 in der Fertigung	101
5.10	Innenansicht des Hybrid Flax Pavillon mit Sicht auf die Naturfaserkomponenten.	102
5.11	Punktwolke des Testobjektes des Hybrid Flax Pavillon.	103
5.12	Standpunkte für die Messungen des Demonstratorbauteils	103
6.1	Ergebnisse des Auswertealgorithmus für die simulierte Punktwolke des Testobjektes S1.	106
6.2	Ergebnisse des Auswertealgorithmus für die simulierte Punktwolke des Testobjektes S2.	107
6.3	Ergebnisse des Auswertealgorithmus für die simulierte Punktwolke des Testobjektes S3.	109
6.4	Farblich codierte berechnete Querschnittsflächen für das simulierte Testobjekt S1.	111
6.5	Berechnete Querschnittsflächen mittels konvexer Hülle und Alpha-Shapes, sowie die Sollfläche für das simulierte Testobjekt S1.	112
6.6	Beispiel für fehlerhafte Querschnittsflächen in den Bereichen der Schnittpunkte.	112
6.7	Berechnete Querschnittsflächen mittels konvexer Hülle und Alpha-Shapes, sowie die Sollfläche für das simulierte Testobjekt S1.	113
6.8	Vergleich des Verhalten der Querschnittsflächenberechnungen bei lückenhaften Segmentierungen.	113
6.9	Einfluss der Stellparameter des Algorithmus auf das Segmentierungsergebnis.	115
6.10	Vergleich der berechneten Querschnittsflächen aus ATOS- und TLS-Messungen mittels konvexer Hülle.	116
6.11	Vergleich der berechneten Querschnittsflächen aus ATOS und TLS-Daten mittels Alpha-Shapes.	116
6.12	Vergleich der berechneten Querschnittsflächen für gefilterte TLS-Daten bei der Berechnung mittels konvexer Hülle und Alpha-Shape.	117
6.13	Darstellung des Bereichs der Schnittpunktregion für das X-Element.	119
6.14	Vergleich der Vollständigkeit der Punktwolke für die Messungen im Fertigungsrahmen und der Messhalterung.	121
6.15	Ergebnisse des Auswertealgorithmus für die gemessene Punktwolke des Testobjektes S2.	122
6.16	Ergebnisse des Auswertealgorithmus für die gemessene Punktwolke des Testobjektes S3.	122
6.17	Ergebnisse des Auswertealgorithmus für die gemessene Punktwolke ohne den Bereich der Ankerpunkte des Testobjektes S2.	123
6.18	Ergebnisse des Auswertealgorithmus für die gemessene Punktwolke ohne den Bereich der Ankerpunkte des Testobjektes S3.	124
6.19	Ergebnisse des Auswertealgorithmus für die gemessene Punktwolke des Testobjektes 1, Epoche 5.	127
6.20	Ergebnisse des Auswertealgorithmus für die gemessene Punktwolke des Testobjektes 2, Epoche 3.	128
6.21	Beispielhafte Ergebnisse der Netzgenerierung.	129
6.22	Darstellung der Punktwolken für das Testobjekt 2 und 3 in der Fertigung mit generiertem Fasernetz	130
6.23	Schnitt durch die Punktwolke des Testobjektes des Hybrid Flax Pavillon.	131
6.24	Punktwolke des Testobjektes des Hybrid Flax Pavillon.	132
6.25	Punktwolke des Testobjektes des Hybrid Flax Pavillon.	133

6.26	Ergebnisse des Auswertalgorithmus für einen Ausschnitt der gemessenen Punktwolke des Bauteils.	134
6.27	Geschätzte Schnittpunktkoordinaten der gemessenen Punktwolke des Bauteils.	136
6.28	Geschätzte Linien und zugeordnete Punktcluster der gemessenen Punktwolke des Bauteils.	137
A.1	Scans eines Standpunktes des Testobjektes aus den Messungen der Laserscanner Leica HDS7000, Trimble X7 und Riegl VZ2000 mit und ohne Verwendung eines Scanningsprays in der 10°-Position	XXXI
A.2	Scans eines Standpunktes des Testobjektes aus den Messungen der Laserscanner Leica HDS7000, Trimble X7 und Riegl VZ2000 mit und ohne Verwendung eines Scanningsprays in der 20°-Position	XXXII
A.3	Scans eines Standpunktes des Testobjektes aus den Messungen der Laserscanner Leica HDS7000, Trimble X7 und Riegl VZ2000 mit und ohne Verwendung eines Scanningsprays in der 30°-Position	XXXIII
A.4	Scans eines Standpunktes des Testobjektes aus den Messungen der Laserscanner Leica HDS7000, Trimble X7 und Riegl VZ2000 mit und ohne Verwendung eines Scanningsprays in der 40°-Position	XXXIV
B.1	Farblich codierte berechnete Querschnittsflächen für die simulierten Testobjekte S2 und S3.	XXXV
B.2	Geschätzte Schnittpunktkoordinaten für die gemessenen Punktwolke des Testobjekt 1 in der Fertigung	XXXVI
B.3	Geschätzte Schnittpunktkoordinaten für die gemessenen Punktwolke des Testobjekt 2 in der Fertigung	XXXVII
B.4	Geschätzte Schnittpunktkoordinaten für die gemessenen Punktwolke des Testobjekt 3 in der Fertigung	XXXVIII
B.5	Geschätzte Linien und zugeordnete Punktcluster für die gemessenen Punktwolke des Testobjektes 1 in der Fertigung	XXXIX
B.6	Geschätzte Linien und zugeordnete Punktcluster für die gemessenen Punktwolke des Testobjektes 2 in der Fertigung	XL
B.7	Geschätzte Linien und zugeordnete Punktcluster für die gemessenen Punktwolke des Testobjektes 3 in der Fertigung	XLI
B.8	Ergebnisse der Netzgenerierung für die gemessenen Punktwolke des Testobjektes 1 in der Fertigung	XLII
B.9	Ergebnisse der Netzgenerierung für die gemessenen Punktwolke des Testobjektes 2 in der Fertigung	XLIII
B.10	Ergebnisse der Netzgenerierung für die gemessenen Punktwolke des Testobjektes 3 in der Fertigung	XLIV

Kurzfassung

Durch das globale Bevölkerungswachstum ist die Nachfrage nach Wohnraum eine der zentralen Herausforderungen der aktuellen Zeit. Um den dadurch benötigten Bedarf zu decken, ist eine nachhaltige und ressourcenschonende Bauweise notwendig, die gleichzeitig für die unterschiedlichsten Gebäudetypen anpassbar ist. Diese Herausforderungen werden im Exzellenzcluster „Integrative Computational Design and Construction for Architecture“ (IntCDC) an der Universität Stuttgart betrachtet. Eines der in IntCDC untersuchten Baukonzepte sind dabei die kernlosen Faserverbundsysteme. Diese bestehen aus unterschiedlichen Faserarten, wie beispielsweise Karbon- oder auch Naturfasern, die mit einem Epoxidharz imprägniert werden. Die nassen Fasern werden dann innerhalb einer Rahmenkonstruktion zu einer Netzstruktur gewickelt. Durch die Kreuzung einzelner Faserstränge kommt es dabei zur Faser-Faser-Interaktion, die die Stabilität des Bauteils maßgeblich beeinflusst. Da es durch die Interaktion zusätzlich zu einer Verformung der einzelnen Faserstränge kommt, sind auch die Form und Größe der Faserquerschnitte relevant für die Stabilität des Bauteils. Um eine hohe Qualität des Bauteils gewährleisten zu können, ist daher neben einer präzisen Vorhersage der geometrisch relevanten Kenngrößen der Bauteile, auch die Möglichkeit einer Bestimmung dieser nach der Fertigung von großer Bedeutung.

Aus diesem Grund soll nun ein Qualitätssicherungskonzept für die Fertigung der Bauteile aus Faserverbundsystemen erstellt werden. Ein besonderer Fokus liegt hierbei auf der Geometrie der einzelnen Bauteile. Dabei sind neben Lage und Orientierung der einzelnen Faserstränge auch deren Schnittpunkte von großer Bedeutung, da durch sie ein direkter Einfluss auf die Tragfähigkeit des Bauteils besteht. Zusätzlich werden die Möglichkeiten der Bestimmung der Querschnittsflächen betrachtet.

Die in dieser Arbeit durchgeführte Qualitätssicherung basiert dabei auf Messungen mittels eines terrestrischen Laserscanners. Um eine möglichst hohe Qualität der Messergebnisse zu erreichen, wurden dabei zunächst unterschiedliche Laserscanner hinsichtlich ihrer Eignung und Interaktion mit dem Material der Probekörper untersucht und anschließend eine möglichst effiziente und adaptierbare Messkonfiguration bestimmt, um die Vermessung unterschiedlichster Probekörper durchführen zu können. Aus den gemessenen Punktwolken werden anschließend die einzelnen Liniensegmente mittels einer 3D-Hough Transformation segmentiert und eine Geradenschätzung durchgeführt. Damit dabei fehlerhaft auftretende Linien gefiltert werden können, werden zusätzliche Randbedingungen eingeführt, um die Qualität der Ergebnisse zu steigern. Um neben den einzelnen Geraden der Fasersegmente auch die Koordinaten der Faserschnittpunkte zu erhalten, werden die Schnittpunkte, oder, da durch die Schätzung zumeist windschiefe Geraden im Raum entstehen, der minimale Abstand zweier Geraden bestimmt, um dann die Schnittpunktkoordinaten zu erhalten. Diese Schnittpunkte werden durch die geschätzten und angepassten Geraden der Liniensegmente verbunden und bilden so die Netzstruktur des Objektes. Zuletzt werden noch die Faserquerschnitte bestimmt. Dafür werden die einzelnen Fasersegmente in Abschnitte unterteilt und alle Messpunkte eines Abschnittes auf eine Ebene projiziert, die den Richtungsvektor der zugehörigen Geraden als Normalenvektor hat. Für diese projizierten Punkte werden nun die konvexe Hülle und eine Alpha-Shape bestimmt. Durch die definierten Randpunkte kann die Querschnittsfläche mittels der Gauß'schen Flächenformel bestimmt werden. Damit kann abschließend eine getrennte Qualitätsbeurteilung des Bauteils, sowie der Auswertung erfolgen.

Das hier dargestellte Mess- und Auswertekonzept wird auf in ihrer Größe und Komplexität, unterschiedliche Testdatensätze angewendet. Dafür werden sowohl simulierte Datensätze als auch Datensätze mit vorhandenen Referenzmessungen verwendet. Die Erkenntnisse daraus werden dann auf Datensätze aus Fertigungen ohne Referenz und zusätzlich auf die geometrische Qualitätskontrolle in der Fertigung angewandt. Zuletzt werden die entwickelten Mess- und Auswertekonzepte an realen Bauteilen erprobt. Zunächst zeigt sich dabei, dass eine Erfassung der Testobjekte mittels terrestrischem Laserscanning gut möglich, die Wahl des Laserscanners allerdings entscheidend für die Qualität des Messergebnisses, ist. Die durchgeführten Untersuchungen zeigten dabei, dass ein Laserscanner, der das Impulslaufzeitverfahren für die Streckenmessung verwendet und zusätzlich eine möglichst kleine Spotgröße aufweist, für diesen Anwendungsfall am besten geeignet ist. Für die Bestimmung der geometrischen Kenngrößen zeigt sich, dass dies aus Laserscanner Punktwolken sehr gut möglich ist und sowohl Liniensegmente, Schnittpunkte wie auch Querschnittsflächen bestimmt werden können. Für die betrachteten

Testobjekte zeigt sich dabei, dass eine vollständige Segmentierung aller Liniensegmente und Schnittpunkte immer dann möglich war, wenn eine Netzgenerierung für die betrachtete Struktur durchgeführt werden konnte. Für die Querschnitte zeigte sich, dass diese mit Abweichungen unter 1 mm zu Referenzmessungen aus ATOS-Messungen und alternativen Mikroschliffbildern sehr gute Ergebnisse liefern. Auch zeigt sich, dass die Qualität der Ergebnisse weniger von der Größe des Bauteils, sondern vielmehr von dessen Komplexität abhängt.

Abstract

Due to global population growth, the demand for living space is one of the key challenges of our time. To meet the resulting demand, a sustainable and resource-saving construction method, that can be adapted to a wide variety of building types, is required. These challenges are being addressed in the Cluster of Excellence „Integrative Computational Design and Construction for Architecture“ (IntCDC) at the University of Stuttgart. One of the design approaches investigated in IntCDC are the fibre reinforced polymers. These consist of different types of fibres, such as carbon or natural fibres, which are impregnated with epoxy resin. The wet fibres are then wound into a net structure within a frame construction. The intersection of individual fibre bundles results in fibre-fibre interaction, which significantly influences the stability of the component. As the interaction also leads to deformation of the individual fibre bundles, the shape and size of the fibre cross-sections are also relevant for the stability of the component. To be able to achieve a high-quality component, it is important to be able to precisely predict the specific geometric characteristics of the components and to determine them after production. For this reason, a quality assurance concept needs to be developed to produce fibre composite components. A particular focus here lies on the geometry of the individual components. In addition to the position and orientation of the individual fibre bundles, their intersections are also of crucial importance, as they have a direct influence on the physical properties of the component. In addition, the possibilities of determining the cross-sectional areas are considered.

The quality assurance carried out in this work is based on measurements using a terrestrial laser scanner. To achieve the high quality of the measurement results, different laser scanners were first analysed regarding their suitability and interaction with the specimen material. The most efficient and adaptable measurement configuration was then determined to measure a wide variety of specimens. The individual line segments are then segmented from the measured point clouds using a 3D Hough transformation. Furthermore, a straight-line estimation is carried out. Additional boundary conditions are introduced to improve the quality of the results by filtering out incorrect lines. To obtain the coordinates of the fibre intersection points in addition to the individual straight lines of the fibre segments, the intersection points or, since the estimation usually results in skewed straight lines in space, the minimum distance between two straight lines is determined to obtain the intersection point coordinates. These intersection points are connected by the estimated and adjusted straight lines of the line segments and thus form the network structure of the object. Finally, the fibre cross-section areas are determined. For this purpose, the individual fibre segments are divided into sections, and all measuring points of a section are projected onto a plane that has the direction vector of the associated straight line as a normal vector. The convex hull and an alpha-shape are now determined for these projected points. The cross-sectional area can be determined by means of the Gaussian area formula using the defined boundary points. Finally, the quality of the component and the evaluation can be assessed.

The measurement and evaluation concept presented here is applied to test data sets of varying size and complexity. For this purpose, simulated data sets as well as data sets with existing reference measurements are used. The findings are then applied to data sets from production processes without a reference and to geometric quality control during production. Finally, the measurement and evaluation concepts developed are applied to real components. Firstly, it is shown that it is possible to capture the test objects using terrestrial laser scanning. However, the choice of laser scanner is crucial for the quality of the measurement result. The investigations carried out showed that the choice of a laser scanner that uses the time-of-flight method for distance measurement (impulse scanner) and has the smallest footprint is the most suitable for this application. For the reconstruction of the geometry, it was shown that the determination of the geometric parameters from laser scanner point clouds is very well possible and that line segments, intersection points as well as cross-sectional areas can be determined. For the analysed specimens, it was shown that a complete segmentation of all line segments and intersections was always possible if a network could be built for the specimen considered. For the cross-sections, it was shown that the results obtained were highly satisfactory with deviations of less than 1 mm compared to reference measurements from ATOS measurements and alternative microsection measurements. It also shows that the quality of the results depends less on the size of a component and more on its complexity.

1 Einleitung

1.1 Motivation und Umfeld

Weltweit lässt sich in den letzten Jahrzehnten ein rasantes Bevölkerungswachstum feststellen. So hat sich die Weltbevölkerung in den letzten 70 Jahren fast verdreifacht und bis zum Jahr 2080 ist mit einer Weltbevölkerung von 10,3 Milliarden Menschen zu rechnen (Röck et al. 2020; UN 2025). Dieses Wachstum führt auch zu einer immer höheren Nachfrage nach Wohnraum, der in Städten schon heute knapp wird. Mit diesem prognostizierten Wachstum müsste die verfügbare Wohnfläche in den nächsten 30 Jahren verdoppelt werden und es müssten somit über 30 Jahre lang pro Stunde 65 000 m² Wohnfläche gebaut werden (UN 2014; UN 2025). Allerdings steht die Baubranche schon heute vor der Herausforderung, dass 40% des weltweiten Energie- und Ressourcenverbrauchs und sogar 50% des weltweiten Abfallaufkommens auf die Baubranche zurückzuführen sind (UN 2022). Von der ökonomischen Seite her betrachtet, ist die Baubranche allerdings sowohl weltweit als auch in Deutschland die größte Branche, weshalb die erhöhte Nachfrage nach Wohnraum hier ein enormes Wachstumspotential in Aussicht stellt. Aber auch die sozio-kulturellen Gesichtspunkte dürfen an dieser Stelle nicht außer Acht gelassen werden, da ein Mensch ca. 87% seines Lebens in Gebäuden verbringt und diese somit einen wichtigen kulturellen Beitrag leisten. Doch trotz der enormen Nachfrage und der enormen Rolle der Baubranche sind digitale Technologien hier bislang wenig verbreitet und die Einführung neuer Technologien erfolgt nur langsam und schrittweise (Statistisches Bundesamt 2017). Im Vergleich zu anderen Branchen zeigt sich dabei, dass die Baubranche, die am wenigsten digitalisierte Branche ist und noch weit hinter der Land- und Forstwirtschaft im Digitalisierungsindex zu finden ist (Barbosa et al. 2017).

Allerdings ist neben einer produktiveren Baukultur auch die Ressourceneinsparung beim Bau ein wichtiges Thema um dem globalen Bedarf gerecht zu werden, weshalb auch das nachhaltige Bauen berücksichtigt werden muss. Aus diesem Grund stehen fünf der 17 Sustainable Development Goals (SDGs), die die Basis der Agenda 2030 für eine nachhaltige Entwicklung darstellen (UN 2015), in direktem Zusammenhang mit nachhaltigem Bauen. Zu den für das Bauen relevanten Ziele gehören dabei bezahlbare und saubere Energie (SDG 7), nachhaltige Städte und Gemeinden (SDG 11), nachhaltiger Konsum und Produktion (SDG 12), Maßnahmen zum Klimaschutz (SDG 13) und das Leben an Land (SDG 15).

Um die Digitalisierung voranzutreiben und neue ressourcenschonendere Baumethoden zu entwickeln, startete 2019 das Exzellenzcluster Integrative Computational Design and Construction for Architecture (IntCDC) an der Universität Stuttgart mit dem Ziel, das Bauen neu zu denken. Im Zentrum dieser Entwicklung steht dabei das Co-Design mit dem Ziel, den bislang linearen Bauprozess aufzubrechen und in einen zirkulären Prozess zu überführen. Dieser Co-Design-Ansatz ermöglicht dabei die gleichzeitige Entwicklung von Methoden, Prozessen und Systemen in einem interdisziplinären Umfeld (vgl. Abbildung 1.1). Dabei werden sowohl Designansätze, Fertigungsmethoden, sowie auch Messsysteme gleichzeitig entwickelt, um direkte Anpassungen in Planung und Fertigung vornehmen zu können. Ziel dabei ist es durch die gleichzeitige Entwicklung aller relevanten Bausteine, und somit unter Berücksichtigung aller benötigten Disziplinen, nachhaltige und ressourcenschonende Bausysteme zu entwickeln (Knippers et al. 2021). Dabei soll vor allem auf das Potential der digitalen Technologien zurückgegriffen werden und mittels computergestützter Design- und Konstruktionsmethoden eine Integration dieser in den gesamten Bauablauf ermöglicht werden. Zusätzlich sollen Prozesse mittels cyber-physikalischen, robotischen Herstellungsmethoden optimiert werden und somit eine Steigerung der Produktivität erreicht werden. Außerdem sollen effiziente und digitale Material- und Gebäudesysteme entwickelt werden, um ein nachhaltigeres Bauen zu ermöglichen. Um dieses Ziel zu erreichen, wird dabei in einem interdisziplinär geprägten Umfeld aus Architektur, Bauingenieurwesen, Bauphysik, Ingenieurgeodäsie, Fertigung und Systemtechnik, Informatik und Robotik, sowie den Geistes- und Sozialwissenschaften gearbeitet, um neue Ansätze für das Bauen der Zukunft zu entwickeln und somit zu einer nachhaltigeren Baukultur beitragen zu können (Knippers et al. 2021).

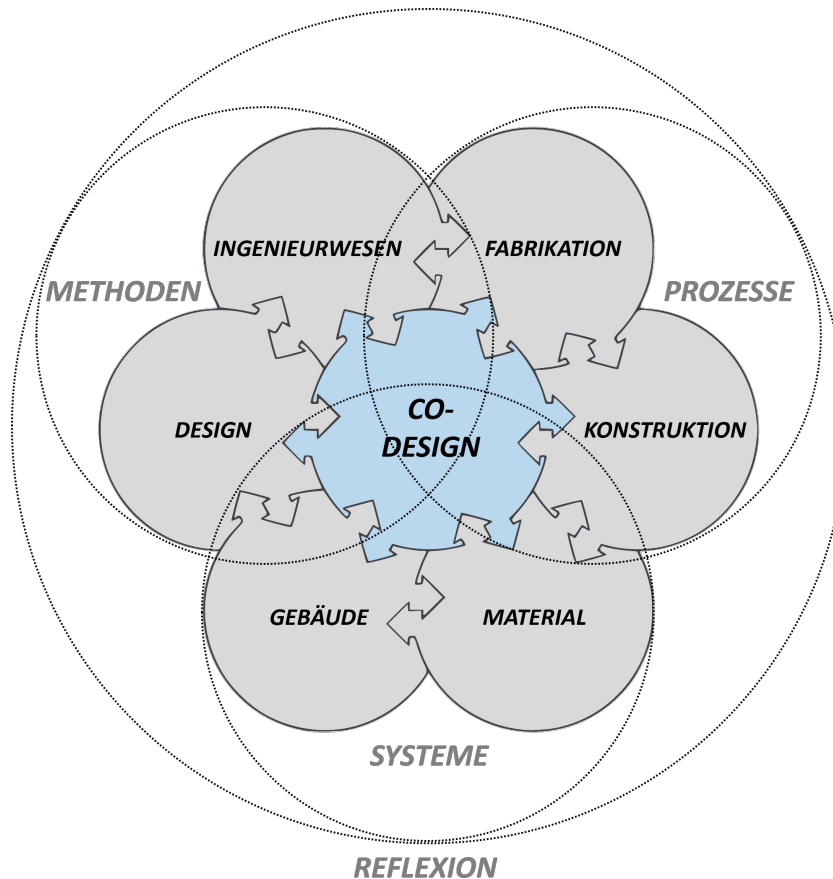


Abb. 1.1: Darstellung der Idee des Co-Design und den daraus resultierenden parallelen und interdisziplinären Entwicklungen von Methoden, Prozessen und Systemen (in Anlehnung an Knippers et al. (2021))
©ICD/ITKE, Universität Stuttgart.

Dafür stehen dabei neben den klassischen Baustoffen wie Holz, oder auch Beton, die im Rahmen des Clusters für neuartige Fertigungsverfahren verwendet werden (Knippers et al. 2021), auch Baustoffe zur Verfügung, die in der Architektur bislang selten, bis gar nicht zum Einsatz kommen, sich aber in anderen Disziplinen bereits bewährt haben. Zu diesen Materialien zählen auch die Faserverbundsysteme, die in der Automobilindustrie und Luftfahrt bereits eine lange Tradition besitzen, im Bauen aber eine bislang zu vernachlässigende Rolle spielten. Die Entwicklung eines Co-Design-Ansatzes für die Verwendung von Faserverbundsystemen in der Architektur ist dabei einer der Forschungsschwerpunkte von IntCDC (Zechmeister 2024).

Mit der Entwicklung neuer Bausysteme und Fertigungsverfahren entstehen somit auch neue Herausforderungen für die Qualitätssicherung. Waren in der klassischen Baubranche zumeist Toleranzen im Bereich einiger Millimeter bis zu wenigen Zentimetern bislang akzeptabel (DIN 18202 2019), so sind die Anforderungen an die Qualität durch den Einzug der industriellen Fertigungs- und Montagesysteme nun deutlich gestiegen und liegen im Bereich der Anforderungen der industriellen Fertigung von einigen Millimetern bis hin zum Submillimeterbereich (Schmitt und Dietrich 2023). Damit ergeben sich nicht nur erhöhte Anforderungen an Fertigung und Montage, sondern auch die Vermessung steht vor der Herausforderung, dass bisherige Verfahren für die Bauvermessung mit ihren Genauigkeiten nicht mehr ausreichend sind und die Methoden der industriellen Messtechnik zum Einsatz kommen müssen. Eine weitere Herausforderung besteht darin, dass es sich bei den gefertigten Bauteilen um individuelle Einzelstücke handelt, im Gegensatz zu einer Serienproduktion, wie sie beispielsweise in der Automobilbranche anzutreffen ist. Daher muss sich auch die Vermessung der Bauteile flexibel an unterschiedliche Strukturen anpassen können. Zusätzlich sollte die Qualitätssicherung ortsunabhängig stattfinden können und somit aus einem portablen und flexiblen System bestehen. Auch ist die Größe der

Bauteile, und damit verbunden das benötigten Messvolumen, für eine effiziente Vermessung zu beachten. Für die Vermessung ist dabei zusätzlich die Geometrie der Objekte eine Herausforderung. Da die einzelnen Faserbündel, je nach Bauteil, eine Stärke im Bereich von 5 mm bis 20 mm haben, ist auch die Erfassung und die spätere Auswertung eine große Herausforderung. Eine beispielhafte Struktur ist in Abbildung 1.2 dargestellt. Hierbei zeigt sich neben der feinen Struktur der Faserstränge auch eine glänzende, schwarze Oberfläche, die für die weiteren Betrachtungen, wie die Wahl des Messsystems und Messaufbaus, relevant sind.



Abb. 1.2: Exemplarische Darstellung eines Bauteils aus Faserverbundsystemen (Gil Pérez et al. 2021).

Für die geometrische Qualitätskontrolle ist allerdings kein klassischer Vergleich der Planungsdaten mit den Messdaten möglich. Dies liegt daran, dass sich die Datengrundlage, die für die Auswertung zur Verfügung steht, stark von den klassischen CAD-Modellen, wie sie sonst zur Überprüfung der geometrischen Qualität verwendet werden, unterscheidet. Für die geometrische Qualitätssicherung bedeutet dies, dass Planungs- und Messdaten zunächst in einem unterschiedlichen Detaillierungsgrad vorliegen. Die Planungsdaten liegen dabei als abstrahiertes Linienmodell vor, wohingegen die Messdaten eine 3D-Punktwolke bilden, die je nach Messsystem unterschiedlich dicht ist. Dadurch ist ein direkter Vergleich der Daten nicht möglich. Um die Vergleichbarkeit der Daten herstellen zu können, müssen die Punktwolkendaten dahingegen prozessiert werden, dass die Punktwolke in einzelne Segmente unterteilt wird und für diese dann geometrische Elemente wie Linienparameter oder auch die Querschnitte der einzelnen Segmente geschätzt werden.

Ähnliche Problemstellungen lassen sich beispielsweise auch bei der Überwachung von Tunneln (Wang et al. 2015) oder auch bei der Schätzung von Biomasse, genauer bei der Bestimmung der Durchmesser von Baumstämmen, (Eto et al. 2020) finden. In diesen Fällen werden ebenfalls Messungen durchgeführt und anschließend die Querschnittsflächen der Objekte aus Punktwolken ermittelt. Der größte Unterschied hierbei besteht in der Dimension der Querschnitte. Die oben genannten Beispiele weisen dabei einen Durchmesser von mehreren Dezimetern bis Metern auf, während die in dieser Arbeit betrachteten Objekte eine Größenordnung von etwa 5 mm bis 20 mm aufweisen. Eine andere Anwendung, bei der es um die Bestimmung von Querschnitten in derselben Größenordnung, wie in der hier vorliegenden Arbeit geht, lässt sich in der Medizintechnik finden. Dabei werden mittels Computertomographie Aufnahmen von Organen durchgeführt und deren Form anschließend bestimmt (Kokab und Urbanic 2019). Auch bei der Bestimmung der Fläche von Pflanzen lassen sich vergleichbare Problemstellungen finden (Dupuis et al. 2016).

1.2 Ziel der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Qualitätssicherungskonzeptes für die Fertigung von kernlosen Faserverbundsystembauteilen. Dabei soll zunächst der grundlegende Arbeitsablauf betrachtet werden und die in der Fertigung relevanten Punkte, welche einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität der Bauteile haben, herausgearbeitet werden. In einem nächsten Schritt ist dann die messtechnische Erfassung der Objekte im

Zentrum der Untersuchungen. Dabei sollen unterschiedliche Messsysteme hinsichtlich ihrer Eignung für den hier vorliegenden Anwendungsfall untersucht werden. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der Verwendung von terrestrischen Laserscannern zur Vermessung und dabei auf dem Vergleich der unterschiedlichen Messverfahren und deren Eignung für den hier vorliegenden Anwendungsfall. Da es sich bei den zu messenden Objekten um glänzende, schwarze Objekte handelt, die im Allgemeinen als nicht trivial für die Vermessung mit terrestrischen Laserscannern gelten, wird zusätzlich der Einfluss des Materials betrachtet. Nach der Wahl des Messsystems soll dann ein Messkonzept entwickelt werden, das sich einfach an unterschiedliche örtliche Gegebenheiten anpassen lässt.

Der zweite Teil der Arbeit beschäftigt sich dann damit, wie aus den gemessenen Punktwolken die geometrischen Kenngrößen im Detaillierungsgrad der Planungsdaten bestimmt werden können. Ziel dabei ist es, die Punktwolke automatisiert in die einzelnen relevanten Komponenten des Bauteils zu segmentieren und anschließend eine Schätzung der geometrischen Elemente durchzuführen. Aus diesen geschätzten Größen soll dann eine durchgängige Geometrie des gesamten Objektes sowie der Querschnitt der einzelnen Faserstränge bestimmt werden. Für die Durchführung der Schätzung sollen dabei auch die entstehenden Unsicherheiten aus der Auswertung berücksichtigt werden.

1.3 Aufbau der Arbeit

Um die Zielsetzung der Erstellung eines Qualitätssicherungskonzeptes für die technische Qualität mit dem Fokus auf der geometrischen Qualitätssicherung für die Fertigung von Faserverbundsystembauteilen realisieren zu können, werden in Kapitel 2 zunächst zum einen die grundlegenden Begriffe und Konzepte der Qualitätsmodellierung sowie deren Fortpflanzung und Anwendung im Bauwesen betrachtet. Zum anderen wird hier die grundlegende Vorgehensweise bei der Fertigung von Faserverbundsystemen, deren Verwendung in der Architektur, sowie die Besonderheiten der kernlosen Faserverbundsystembauteile betrachtet. Im folgenden Kapitel, Kapitel 3, werden dann die Grundlagen, die für diese Arbeit notwendig sind, aufgearbeitet. Dazu gehören die verschiedenen Messmethoden, sowie deren Charakteristika, die mathematischen Zusammenhänge, insbesondere die Ausgleichungskonzepte und die unterschiedlichen Segmentierungsmethoden. Anschließend wird in Kapitel 4 das in dieser Arbeit entwickelte Qualitätssicherungs- und Auswertekonzept vorgestellt. Dabei liegt der Fokus zunächst auf den relevanten Punkten im Planungs- und Fertigungsprozess, an denen eine Qualitätssicherung notwendig ist. Danach werden die verwendeten Messkonzepte und Messinstrumente betrachtet und analysiert, bevor der entwickelte Algorithmus detailliert betrachtet wird. Nachdem nun alle Grundlagen und Konzepte erläutert wurden, erfolgt anschließend der Übergang des Auswertekonzeptes auf die Anwendung realer Datensätze. Dabei thematisiert Kapitel 5 zunächst die verwendeten Datensätze, sowie die Hintergrundinformationen über die zu Grunde liegenden Fertigungsverfahren, Messungen und Besonderheiten der unterschiedlichen Datensätze. Zusätzlich werden hier die Analyseziele der Datensätze herausgearbeitet, die diese für die nachfolgende Auswertung haben sollen. Die Auswertung der Datensätze mittels des entwickelten Algorithmus wird in Kapitel 6 dargestellt. Dabei erfolgt auch die Analyse der Ergebnisse hinsichtlich der im vorherigen Kapitel definierten Analyseziele der Datensätze. Im letzten Kapitel, Kapitel 7, werden die erreichten Ziele dieser Arbeit zusammengefasst, sowie die Grenzen des entwickelten Qualitätssicherungskonzeptes dargelegt. Zudem werden mögliche Weiterentwicklungen des Konzeptes diskutiert.

2 Qualität in Bauprozessen und Grundlagen der kernlosen Faserverbundsysteme

In diesem Kapitel wird nun zum einen die Verwendung des Begriffes der Qualität und die sich daraus ableitende Erstellung eines Qualitätssicherungskonzepts dargestellt. Zum anderen werden die Besonderheiten des Bauens mit Faserverbundsystemen genauer betrachtet, sowie die generellen Planungs- und Fabrikationsprozesse genauer erläutert, welche für die spätere Entwicklung des Qualitätssicherungskonzeptes von besonderer Bedeutung sind.

2.1 Qualität in Bauprozessen

Bauprozesse stellen komplexe und, durch die technischen Entwicklungen der letzten Jahre, stark interdisziplinär geprägte Prozesse dar. Um einen strukturierten Bauablauf gewährleisten zu können, ist daher die Erfassung und Überprüfung der Qualität von enormer Bedeutung. Die Qualität des Bauens ist auch in der Gesellschaft ein präsent Thema und wird dabei meistens eher negativ, aufgrund von Kostensteigerung, nicht eingehaltenen Zeitplänen, oder Baumängeln, betrachtet. Diese treten nicht nur bei privaten Bauprojekten auf, sondern sind vor allem bei Großbauprojekten auch häufig in den Medien präsent (Helmus und Offergeld 2012). Um die Wirtschaftlichkeit und Qualität von Bauprozessen zu steigern, wurde daher 2012 vom Bundesministerium für Arbeit und Soziales die Offensive „Gutes Bauen“ innerhalb der Initiative Neue Qualität der Arbeit (INAQ) ins Leben gerufen, um die Ursachen dieses negativen Erscheinungsbilds der Baubranche zu untersuchen.

Die Evaluierung der Bauqualität ist dabei stark von der Perspektive des Betrachters abhängig, da die unterschiedlichen Sichtweisen ein unterschiedliches Verständnis darüber haben, was unter guter Qualität im Bau zu verstehen ist. Durch diese Interdisziplinarität müssen sowohl ökonomische, ökologische, soziale, wie auch technische Aspekte des Bauprozesses betrachtet werden (Zhang et al. 2020). Auch können hier die Auswirkungen der Wechselbeziehungen zwischen einzelnen Disziplinen im Bau beobachtet werden, so dass die grundlegende Zielsetzung eines Bauprojektes zu Beginn festgelegt werden muss.

In den folgenden Abschnitten wird nun zunächst ein kurzer Einblick in die Bedeutung der Qualität allgemein, sowie die Struktur und Komponenten des in dieser Arbeit verwendeten Qualitätsmodells gegeben. Anschließend werden die Möglichkeiten der Qualitätsbeurteilung sowie der Qualitätsfortpflanzung näher betrachtet. Zusätzlich werden die in der Praxis gebräuchlichen Qualitätssicherungskonzepte im Bau dargestellt.

2.1.1 Definition Qualität

Der Begriff Qualität wird im Alltag in vielen verschiedenen Zusammenhängen verwendet. So wird beispielsweise von der Qualität von Produkten gesprochen, bei denen das Produkt eine bestimmte Eigenschaft erfüllt. Oftmals wird mit dem Begriff Qualität auch direkt eine positive Eigenschaft assoziiert. Vielfach wird die Qualität im Alltag auch als Synonym für die Güte eines Produktes oder einer Ware verwendet und es wird so unterschieden, ob ein Produkt als gut oder schlecht betrachtet wird. Aber nicht nur Produkte können eine gewisse Qualität aufweisen, sondern auch die Qualität von Prozessen ist im Rahmen des Qualitätsmanagements in vielen Unternehmen von zentraler Bedeutung.

Die Vielzahl von Anwendungen des Begriffes Qualität führt auch dazu, dass verschiedenen Definitionen des Begriffes existieren. Betrachtet man zum einen die Wortherkunft, so leitet sich der Begriff Qualität aus dem lateinischen vom Wort *qualitas* ab und bedeutet übersetzt in etwa Beschaffenheit, Eigenart oder auch Zustand. Diese Wortherkunft spiegelt sich auch in der Definition nach der DIN EN ISO 9000 (2015) wider, in der es heißt: „Qualität ist das Maß in dem ein Satz inhärenter Merkmale erfüllt wird.“. Um die Qualität eines Produktes oder Prozesses zu beurteilen, können zum einen Checklisten verwendet werden, anhand derer überprüft werden

kann, ob ein Produkt oder Prozess die vorgegebenen Eigenschaften erfüllt oder nicht. Zum anderen existieren aber auch noch weitere nicht direkt messbare Qualitätsdefinitionen, welche mit einer bestimmten Erfahrung und der damit einhergehenden Erwartungshaltung verknüpft sind. Ein Beispiel hierfür ist der Slogan „Made in Germany“ mit welchem ein qualitativ hochwertiges Produkt verknüpft wird, was allerdings nur mittels eines entsprechenden Vorwissens verstanden werden kann (Strauss 2017). Bei dieser Art des Qualitätsverständnis handelt es sich allerdings nicht um eine Qualitätsdefinition im Sinne des Qualitätsmodells, weshalb diese in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet werden.

Um in einem durchgeführten Prozess, oder auch für ein erstelltes Produkt, einen zuvor definierten Qualitätsstandard zu erreichen, ist die Qualitätssicherung ein zentraler Bestandteil des Qualitätsmanagements, der sich bereits beim Bau der Pyramiden im alten Ägypten (Brüggemann und Bremer 2020), oder auch bei der Überwachung lebensnotwendiger Güter im Mittelalter (Pfeifer und Schmitt 2021) zeigte. Mit Beginn des 20. Jahrhunderts entwickelte sich das Qualitätsmanagement von einer reinen Qualitätskontrolle des Endproduktes, immer mehr zu einem umfassenden Qualitätsmanagement, welches auch im Prozess integriert angewandt werden kann, und somit zu einer kontinuierlichen Verbesserung, und damit zu einer Produktions- und Effizienzsteigerung beitragen kann (Brüggemann und Bremer 2020). Das Qualitätsmanagement betrachtet damit nicht mehr nur einen einzelnen Aspekt eines Produktes oder Produktionsprozesses, sondern auch die gegenseitige Beeinflussung verschiedener Aspekte (DIN EN ISO 9000 2015). Das Ziel dabei ist es, neben der direkten Qualitätssteigerung auch eine kontinuierliche Verbesserung von Prozessen ermöglichen zu können.

Der Begriff der Qualität ist somit seit jeher ein wichtiger Baustein in vielen Lebensbereichen und lässt sich auf alle Prozesse, Abläufe oder Produkte anwenden. Auch in der Ingenieurgeodäsie ist der Qualitätsbegriff von zentraler Bedeutung (Kuhlmann et al. 2013; Wieser et al. 2016). Dazu gehören beispielsweise die Auseinandersetzung mit der Qualität einer Messung oder die Analyse von Abweichungen und Fehlern auch im Zusammenhang mit der Statistik und Ausgleichsrechnung. Dabei ist meistens die Genauigkeit eines der wichtigsten Qualitätsmerkmale, die zur Anwendung kommen. Weitere Bereiche, in denen die Qualität eine wichtige Rolle spielt, werden in Abschnitt 2.1.2.1 betrachtet.

2.1.2 Qualitätsmanagementsystem und Qualitätssicherungskonzept

Die Qualitätssicherung gilt als „Teil des Qualitätsmanagements, der auf das Erzeugen von Vertrauen gerichtet ist, dass Qualitätsanforderungen erfüllt werden“ (DIN EN ISO 9000 2015). Das Ziel des Qualitätsmanagementsystems ist dabei die kontinuierliche Verbesserung der Qualität von Prozessen und Produkten (DIN EN ISO 9001 2015). Dies bedeutet eine Verbesserung der Produkte, Prozesse und Arbeitsabläufe (Bruhn 2019; Imai 1998; Sihn et al. 2016). Ein häufiges Verfahren für das Qualitätsmanagement in Unternehmen ist der sogenannte PDCA-Zyklus (Kamiske 2015). Dieser steht für die durchgeführten Schritte: Plan, Do, Check, Act und basiert somit auf dem Prinzip der kontinuierlichen Verbesserung, da diese vier Schritte zyklisch durchlaufen werden und so eine kontinuierliche Qualitätssteigerung durchgeführt werden kann. Eine solche Qualitätssicherung kommt in vielen verschiedenen Anwendungsbereichen zum Einsatz und reicht von der Qualitätssicherung in Unternehmen im Bau (Chung 1999; Chan 1996; Rinke et al. 2017), bis zur Beurteilung der Luftqualität (Larssen und Helms 1998) oder auch in medizinischen Einrichtungen wie Krankenhäusern (Selbmann und Pietsch-Breitfeld 1990). Die Qualitätssicherung nach DIN EN ISO 9000 (2015) entspricht ihrer Form nach einem Metastandard, der regelt, was für eine erfolgreiche Qualitätssicherung umgesetzt werden muss, nicht aber wie dies umgesetzt werden soll (Pfeifer und Schmitt 2021). Um eine Umsetzung der Qualitätssicherung zu realisieren, kann ein Qualitätssicherungskonzept bestehend aus einem Qualitätsmodell und einer Qualitätsbeurteilung aufgebaut werden (Zhang und Schwiager 2011; Schweitzer et al. 2012; Zhang et al. 2020). Dabei legt das Qualitätsmodell fest, was bewertet werden soll und auch welche Anforderungen erfüllt werden müssen, während bei der Qualitätsbeurteilung das Produkt oder der Prozess hinsichtlich der Anforderungen evaluiert werden. Diese Evaluierung kann dabei zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Planungs- und Fertigungsprozess durchgeführt werden (Zhang et al. 2020). Ein genereller Aufbau eines solchen Qualitätssicherungskonzepts, das im Rahmen dieser Arbeit verwendet wird, ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Der Aufbau des Modells und der Qualitätsbeurteilung ist hierbei nach Zhang et al. (2020) dargestellt. Dieser Aufbau kann generell unabhängig von einem Anwendungsszenario verwendet werden.

und lässt sich auch auf unterschiedliche Disziplinen anwenden (Frost et al. 2022; Haag et al. 2024). Je nach Anwendungsfall können sich unterschiedliche Anforderungen an das Modell ergeben, wodurch auch die Art der Qualitätsbeurteilung unterschiedlich ausfallen kann. Die Anforderungen können sich dabei aus Normen oder anerkannten Regeln der Technik ableiten lassen oder auch persönliche Präferenzen des Auftraggebers sein.

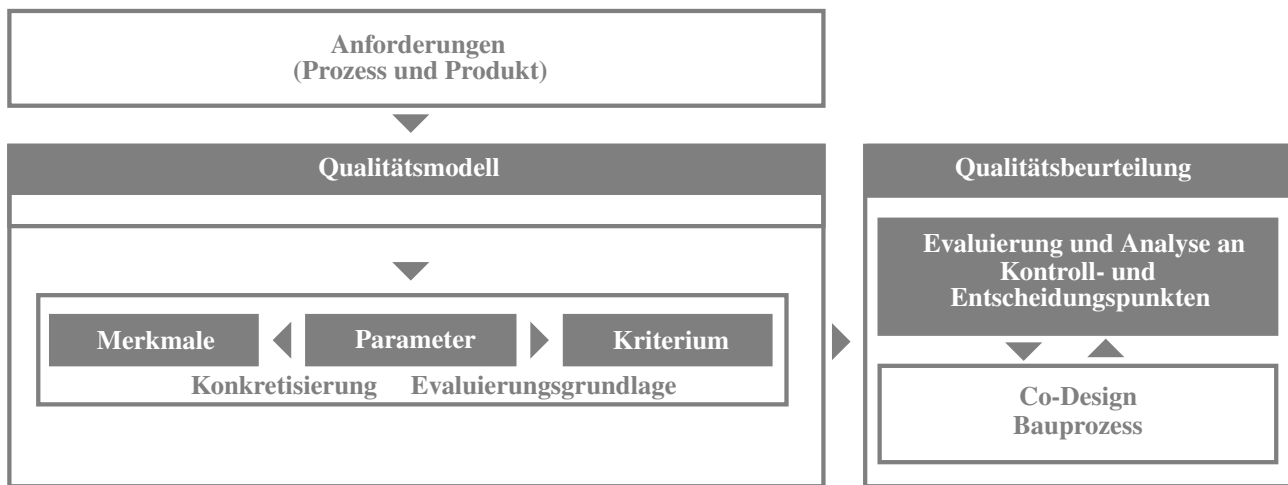


Abb. 2.1: Struktur des Qualitätssicherungskonzeptes mit dem Qualitätsmodell sowie der Qualitätsbeurteilung (in Anlehnung an Zhang et al. (2020)).

Im Folgenden werden nun die Bestandteile Qualitätsmodell und Qualitätsbeurteilung des Qualitätssicherungskonzeptes genauer betrachtet. Die Anforderungen an das Modell unterscheiden sich je nach Anwendungsfall und werden deshalb an dieser Stelle nicht weiter betrachtet.

2.1.2.1 Qualitätsmodell

Qualitätsmodelle lassen sich in vielen verschiedenen Disziplinen finden. Beispielsweise betrachtet Ortega et al. (2003) die Möglichkeit der Erstellung eines Qualitätsmodells für die Evaluierung der Qualität einer Software. Auch die Datenqualität, beispielsweise für Verkehrsanwendungen (Wiltshko 2004; Laufer 2011) spielt eine wichtige Rolle im Alltag. In der klassischen Ingenieurgeodäsie lassen sich Qualitätsmodelle in der Netztheorie finden (Niemeier 2008). Qualitätsmodelle lassen sich aber nicht nur auf Produkte, sondern auch auf Prozesse anwenden (Rinke et al. 2017; Gösseln 2017). Auch wenn sich all diese Modelle in ihrer Form unterscheiden, so basieren letzten Endes doch alle auf einer strukturierten Darstellung der jeweiligen Anforderungen. Ein grundsätzlicher Aufbau eines Qualitätsmodells wird in Schweitzer und Schwieger (2011) unter der Verwendung von Qualitätsmerkmalen und Qualitätsparametern dargestellt. In Zhang et al. (2020) wurde dieses Modell noch um die Qualitätskriterien erweitert. Eine einfache Struktur des Qualitätsmodells ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Hierbei zeigt sich, dass das Modell maßgeblich von den gestellten Anforderungen beeinflusst wird. Aus diesen leiten sich dann die weiteren Bestandteile ab. Auch zeigt sich hier, dass das Modell aus den drei Kategorien Qualitätsmerkmal, Qualitätsparameter und Qualitätskriterium besteht. Dabei werden die Merkmale als erste Ebene des Modells von den Parametern konkretisiert. Die Kriterien wiederum bilden die Evaluierungsgrundlage für die Qualitätsbeurteilung. Im Folgenden werden die drei Bestandteile des Qualitätsmodells näher betrachtet.

Qualitätsmerkmale Wie bereits in 2.1.1 dargestellt geht es bei der Beurteilung der Qualität um die Erfüllung von Merkmalen, sogenannten Qualitätsmerkmalen. Diese gelten als inhärente Merkmale für einen Prozess oder ein Produkt, auf das sich eine Anforderung bezieht (DIN EN ISO 9000 2015).

Qualitätsparameter Um die Qualität eines Produktes oder Prozesses messen und beurteilen zu können, ist es notwendig die Eigenschaften in eine messbare Größe umzuwandeln und so die Qualität greifbar zu machen. Qualitätsparameter beschreiben und konkretisieren somit die Qualitätsmerkmale. Bei Qualitätsparametern handelt es sich um eine messbare Größe, welche den Merkmalen zugeordnet werden kann. Dabei kann ein Qualitätsmerkmal mit mehreren Qualitätsparametern beschrieben werden.

Qualitätskriterien Um zusätzlich zur Beschreibung und Messung der Anforderungen auch eine Evaluierung zu ermöglichen, werden Qualitätskriterien benötigt. Diese geben die jeweilige Zielgröße oder auch die Mindestanforderung an einen Qualitätsparameter an.

Die Erstellung des jeweiligen Qualitätsmodells ist dabei immer anwendungsbezogen. Allerdings können für ähnliche Produkte und Prozesse in vielen Fällen die Struktur der Merkmale und Parameter übernommen werden und es müssen somit nur entsprechend die Kriterien angepasst werden. Einige beispielhafte Qualitätsmerkmale mit zugehörigen Qualitätsparametern und Qualitätskriterien sind in 2.1 dargestellt. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Definitionen der Qualitätsmerkmale und Qualitätsparameter beziehen sich dabei auf die in Schweitzer und Schwieger (2011) verwendeten Definitionen.

Tab. 2.1: Beispiele für mögliche Qualitätsmerkmale, -parameter und -kriterien.

Qualitätsmerkmal	Qualitätsparameter	Qualitätskriterium
Genauigkeit	Standardabweichung	Kleiner als 1 cm / Minimierung
Korrektheit	Toleranz	Toleranz eingehalten
Vollständigkeit	Anzahl fehlender Elemente	Soll 0 sein / Minimierung
Zeiteinhaltung	Dauer eines Prozesses	Soll geplante Dauer nicht überschreiten
Verfügbarkeit	$\frac{\text{Anzahl der vorhandenen Elemente}}{\text{Anzahl der benötigten Elemente}} [\%]$	$\geq 100\%$
Prozesskorrektheit	Übereinstimmung mit definiertem Prozess	muss erfüllt sein
Tragfähigkeit	Grenzzustand der Tragfähigkeit	Grenzwert eingehalten / Maximierung

2.1.2.2 Qualitätsfortpflanzung für Qualitätsparameter

Um die Qualität eines Prozesses abbilden zu können und damit auch Vorhersagen über die Qualität des Endzustands bereits in der Fertigung treffen zu können, ist die Qualitätsfortpflanzung ein wichtiger Punkt. Dabei müssen verschiedenen Szenarien der Qualitätsfortpflanzung unterschieden werden. Ist der funktionale Zusammenhang zwischen Eingangsgrößen und Ausgangsgrößen bekannt, so kann die Qualität der Zielgröße mittels Varianz-Kovarianzfortpflanzung, beispielsweise für das Qualitätsmerkmal der Genauigkeit, bestimmt werden (vgl. Abschnitt 3.2.2). Ist der funktionale Zusammenhang nicht gegeben, oder die Eingangsgrößen folgen einer beliebigen Verteilung, so kann die Qualität der Zielgrößen mittels Monte-Carlo Simulation bestimmt werden. Eine weitere in der Baubranche gebräuchliche Qualitätsfortpflanzung ist die Toleranzkette. Dabei ergibt sich die Toleranz einer Konstruktion aus mehreren Komponenten aus der Summe der Toleranzen der einzelnen Komponenten. Je nach Anwendungsfall unterscheidet sich allerdings die Berechnung der Gesamttoleranz. Im Bereich des Maschinenbaus werden dabei häufig die einzelnen Toleranzen direkt addiert. Damit ergibt sich die Gesamttoleranz zu

$$T_{ges} = T_1 + T_2 + T_3 \dots T_n, \quad (2.1)$$

mit T_{ges} : Gesamttoleranz,
 T_1, T_2, T_3, T_n : Einzelne Toleranzen
 n : Anzahl der zu berücksichtigenden Toleranzen.

Im Bereich des Bauingenieurwesens und Geodäsie hingegen werden die Toleranzen hingegen häufig quadratisch aufaddiert. Damit ergibt sich die Gesamt toleranz zu

$$T_{ges} = \sqrt{T_1^2 + T_2^2 + T_3^2 \dots T_n^2}, \quad (2.2)$$

Die quadratische Summe der Toleranzen entspricht dabei der Varianz-Kovarianzfortpflanzung (Steinle et al. 2018). Neben den klassischen Methoden der Qualitätsfortpflanzung besteht auch die Möglichkeit diese mittels neuronaler Netze durchzuführen (Laufer 2011).

2.1.2.3 Qualitätsbeurteilung

Die Qualitätsbeurteilung stellt neben dem Qualitätsmodell die zweite Säule des Qualitätssicherungskonzepts dar (vgl. Abbildung 2.1). Im Allgemeinen lässt sich die Qualitätsbeurteilung als den Vergleich des Ist-Zustandes mit den Anforderungen an Produkte oder Systeme beschreiben. Für diese Evaluierung stehen unterschiedliche Systeme zur Verfügung, wie es beispielsweise in Batini et al. (2009) am Beispiel der Datenqualität aufgezeigt wird. Bei dem in dieser Arbeit verwendeten Qualitätsmodells ist es dabei das Ziel, die zuvor definierten Parameter hinsichtlich der definierten Kriterien zu evaluieren. Diese Evaluierung findet dabei an Kontroll- und Entscheidungspunkten statt (Zhang et al. 2020). Bei einem Kontrollpunkt handelt es sich hierbei um einen Zeitpunkt im Prozess, an dem ein bestimmter Prozess oder ein Produkt mittels festgelegter Merkmale und messbarer Parameter bewertet werden kann. Bei einem Entscheidungspunkt hingegen handelt es sich um einen Zeitpunkt im Prozess, an dem Entscheidungen getroffen werden, die die Qualität des Endproduktes maßgeblich beeinflussen. An diesem kann nun die voraussichtliche Qualität des Endproduktes prädiziert und so die Wahl verschiedener Optionen für den weiteren Prozessablauf unterstützt werden.

2.1.3 Qualitätssicherung im Bauprozess

Wie bereits in Abschnitt 2.1 erwähnt, ist bei der Qualitätssicherung die Qualität verschiedener Disziplinen zu berücksichtigen. Da im Rahmen dieser Arbeit die technische Qualität betrachtet wird, werden im Folgenden auch nur die Möglichkeiten der technischen Aspekte von Bauprozessen näher betrachtet.

Die Qualitätskontrolle und Bauabnahme erfolgt in den meisten Fällen nach den anerkannten Regeln der Technik. Diese sind nach DIN EN 45020 (2007) definiert als „technische Festlegungen, die von einer Mehrheit repräsentativer Fachleute als Wiedergabe des Standes der Technik angesehen wird“. Weiter heißt es hier, dass ein normatives Dokument zum Zeitpunkt seines Ausdrucks als anerkannte Regel der Technik zu verstehen ist. Durch ihre öffentliche Zugänglichkeit können auch internationale, regionale, nationale oder auch Provinznormen anerkannte Regeln der Technik sein (DIN EN 45020 2007). Diese Qualitätssicherung gilt sowohl für die im Bau verwendeten Baustoffe wie auch für die Verarbeitung dieser. Die anerkannten Regeln der Technik lassen dabei allerdings keine Unterscheidung zwischen einem Mangel und einer annehmbaren Unregelmäßigkeit zu (Hankammer 2022). Dabei kann zwischen zwei unterschiedlichen Arten der Qualitätssicherung unterschieden werden: der optischen Überprüfung und der geometrischen Überprüfung. Die Überprüfung auf optische Mängel ist beispielsweise bei der Farbwahl von Fliesen entscheidend, damit sich am Ende ein einheitliches Bild ergibt. Ein wichtiger Punkt der Qualitätssicherung in Bauprozessen ist die geometrische Qualitätskontrolle (Schweitzer et al. 2012). Dazu gehören die Maße einzelner Bauteile, aber auch die Ebenheit von beispielsweise Böden. Im klassischen Fall, der Überprüfung der Maße eines Bauteils, können diese entweder als einfache Messungen mittels Bandmaß, oder bei höheren geforderten Genauigkeiten auch mittels Tachymeter, Laserscanner oder Lasertracker bestimmt werden. Aus Effizienzgründen kommen letztere dabei im Allgemeinen nicht direkt auf der Baustelle zum Einsatz, sondern werden bereits im Rahmen der Vorfertigung eingesetzt, um beispielsweise neue Fertigungsmethoden zu evaluieren. Hierbei wird immer die Abweichung der realen Maße von den Soll-Maßen betrachtet. Die Festlegung der Toleranzen wird dabei beispielsweise in der DIN 18202 (2019) für den Hochbau geregelt. Die Toleranzen sind dabei zunächst Qualitätsparameter, aber durch die Festlegung der konkret

einzuhaltenen Werte auch Qualitätskriterien. Die Anwendung der Toleranzen auf die Bauteilgeometrie ist dabei exemplarisch in Abbildung 2.2 dargestellt.

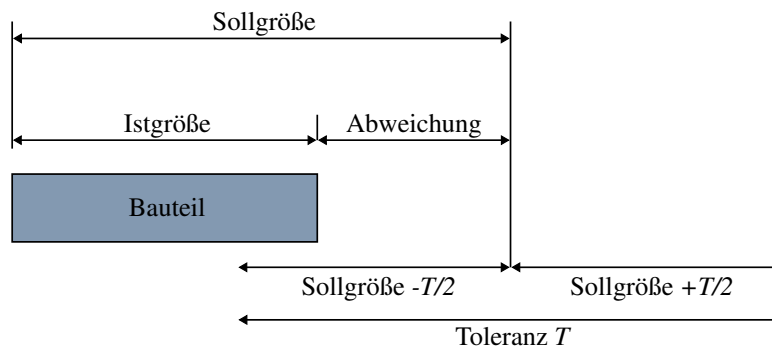


Abb. 2.2: Toleranzen in Bauprozessen (in Anlehnung an Schweitzer und Schwieger (2011)).

Dabei wird im Allgemein davon ausgegangen, dass die Sollgröße eines Bauteils bekannt ist. Die Istgröße des Bauteils mit der Abweichung addiert entspricht dann wieder der Sollgröße. Liegt die Istgröße nun innerhalb des Toleranzbereiches ist die Qualität des Bauteils genügend. Andernfalls sind die Anforderungen an das Bauteil nicht erfüllt. Die Toleranzbereiche sind dabei meist symmetrisch um die Sollgröße angeordnet. Allerdings ist dies nicht zwingend erforderlich. Die geometrische Betrachtung umfasst dabei neben den Bauteilmaßen auch Winkelabweichungen, beispielsweise die Abweichung von der Rechtwinkligkeit, oder auch die Ebenheit von Böden oder Wänden. Die vorliegenden Toleranzen sind dabei immer für den betrachteten Bauprozess zu definieren, beziehungsweise ergeben sie sich aus den finalen Anforderungen.

2.1.4 Software und Dokumente zur Qualitätssicherung im Bau

Da Bauprozesse in den letzten Jahren zunehmend komplexer geworden sind und die Zahl, der am Bauprozess Beteiligten immer weiter zunimmt, ist eine kontinuierliche Datenerhaltung während des Planungs- und Bauprozesses von großer Bedeutung, um einen reibungslosen Bauprozess zu gewährleisten. Diese Informationen über den aktuellen Bauzustand bieten die Möglichkeit der regelmäßigen Baufortschrittskontrolle und können so auch frühzeitig mögliche Konflikte detektieren (Borrmann et al. 2015), und zu einer Qualitätssteigerung führen. Dabei ist Bauwerksdatenmodellierung (BIM) ein häufig verbreiteter Standard in allen im Bau vertretenen Fachbereichen. Da die vorhandenen Daten allerdings nicht mit allen Softwareanwendungen kompatibel sind, ist eine Kompatibilität dadurch alleine noch nicht gewährleistet (Jiang et al. 2019). Das Ziel eines offenen Standards, welcher die Kompatibilität zwischen Softwarelösungen verschiedener Fachbereiche gewährleistet, wurde auch von der internationalen Organisation buildingSmart vorangetrieben (buildingSmart 2024). Diese definierte daraufhin das Austauschformat Industry Foundation Class (IFC), welches auch in der DIN EN ISO 16739 (2021) veröffentlicht wurde. Dabei ist auch der digitale Zwilling eines Gebäudes von enormem Interesse, da damit die Möglichkeiten der Entscheidungsfindung verbessert werden können (Tuhaise et al. 2023). Der digitale Zwilling kommt auch im Bereich der Geodäsie zum Einsatz, wenn es beispielsweise um das Bauwerksaufmaß, die Definition eines Koordinatensystems oder auch die Erstellung von komplexen 3D-Gebäudemodellen geht (Blankenbach 2017).

Um alle diese Daten problemlos austauschen zu können, bietet die Standardisierung in allen Lebenszyklusphasen eines Gebäudes erhebliche Vorteile. Allerdings limitiert sie auch die Möglichkeiten der Nutzung eines Datenformates, wenn nicht standardisierte Objekte verwendet werden (Leite et al. 2011). Eine Alternative stellt daher das Buildings and Habitats object Model (BHoM) dar. Dabei handelt es sich um ein gemeinschaftliches Entwicklungsprojekt für die Baubranche. Ziel dabei ist die Standardisierung von Daten, nicht aber die Standardisierung der Datenbank (BHoM 2024). Dies ermöglicht die Anwendung für innovative, stark interdisziplinär geprägte Planungs- und Fertigungsprozesse (Gil Pérez et al. 2022; Gil Pérez et al. 2023a). Die Daten werden

dabei in einem menschenlesbaren JSON Format abgespeichert und können mittels einer kostenfreien, Quellcode offenen Erweiterung in einer Vielzahl von Programmen wie Rhino, Excel oder Python direkt weiterverarbeitet werden.

2.2 Grundlagen der Faserverbundsystemen

Die Verwendung von Faserverbundsystemen hat eine lange Historie und wurde nicht erst durch ihren Einsatz in der Industrie zu einem hervorragenden Leichtbauprinzip. Dahinter verbirgt sich die Idee, das Fasern über eine deutlich höhere Steifigkeit und Festigkeit verfügen, als wenn Materialien in kompakter Form vorhanden sind (Schürmann 2007). Diese Eigenschaften haben sich damit auch in der Natur durchgesetzt. So sind die Stängel von Pflanzen aus einzelnen Fasern aufgebaut. Auch der zellartige Kern der menschlichen Knochen besteht aus Kollagenfasern, welche sich im Wachstum den Belastungen anpassen können. Neben den direkt in der Natur vorkommenden Fasern wird dieser Effekt auch in der Tierwelt, beispielsweise beim Nestbau eingesetzt, wenn die Wand des Nests mit Haaren oder Federn verstärkt wird (Schürmann 2007). Im Bereich der Baustoffe ist Holz als natürlicher Faserverbundwerkstoff lange Zeit einer der am meisten genutzten Werkstoffe um Häuser oder auch Schiffe zu bauen. Auch wurden bereits im alten Ägypten Lehmziegel mit Stroh oder Pflanzenfasern verstärkt, um so deren Festigkeit zu erhöhen.

Das Prinzip der Faserverbundsysteme besteht darin, die Eigenschaften verschiedener Werkstoffe zu kombinieren, um so die gewünschten Materialeigenschaften erreichen zu können. Dabei besteht der Verbundstoff zum einen aus den Verstärkungsfasern. Diese können beispielsweise Karbonfasern, Glasfasern oder auch natürliche Fasern, wie Hanffasern, sein. Den anderen Bestandteil bildet die Bettungsmasse, auch Matrix genannt. Bei dieser Matrix handelt es sich um verschieden Harze, die für die Fertigung in Frage kommen und die Fasern umschließen.

Mit Beginn des 20. Jahrhunderts erweiterte sich das Anwendungsfeld der faserverstärkten Kunststoffe immer mehr und sie ersetzen bereits zu Beginn des Jahrhunderts die bis dahin aus Holz gefertigten Bauteile im Flugzeugbau. In den folgenden Jahren wurde der Einsatzbereich der faserverstärkten Kunststoffe immer größer, sodass diese für Bauteile im Karosseriebau der Automobilindustrie, im Schiffbau oder auch in der Herstellung von Sportgeräten zum Einsatz kamen (Ehrenstein 2006). Im Folgenden werden nun die grundlegenden Eigenschaften der Faserverbundwerkstoffe dargelegt. Des Weiteren wird auf die Verwendung dieser im Bereich der Architektur eingegangen und die Besonderheit bezüglich der Datenstruktur und besondere Herausforderungen dargelegt. Dabei wird auch die Wahl der Materialien sowie des Fertigungsprozesses betrachtet.

2.2.1 Verwendung von Faserverbundsystemen in der Architektur

Die Möglichkeit der Leichtbauweise machten die Faserverbundsysteme auch für die Architektur interessant. Im Jahr 1957 wurde eines der ersten Gebäude mit einer Hülle aus Glasfaserverstärktem Kunststoff errichtet (vgl. Abbildung 2.3), mit dem Ziel diesen Werkstoff für das Bauen bekannter zu machen.



Abb. 2.3: Monsanto Haus der Zukunft. Eine Attraktion im Disneyland Kalifornien, die demonstrieren sollte, wie das Wohnen in der Zukunft aussehen könnte (Boschung 2022).

In den folgenden Jahren entstanden verschiedene weitere prototypische Gebäude oder Gebäudeteile, allerdings konnte sich die Bauart auch auf Grund von Zweifeln bezüglich der Stabilität nicht durchsetzen (Voigt 2007). Ein weiterer Aspekt, der die Anwendung in der Architektur zunächst nur langsam voranschreiten ließ, ist die Anzahl der vielen individuell benötigten Bauteile, die gefertigt werden müssen. Durch die Fertigung mittels teurer Schalungen oder Wickelkernen war die Anwendung in der Architektur somit aufwendig (Bakis et al. 2002). Die Fertigung mittels Kern oder Schalung, welche in anderen Disziplinen der Standard ist (Munro 1988), definiert somit auch die möglichen Formen eines Bauteils, da die Fasern in der Fertigung auf diesem Kern abgelegt werden. Dadurch ist entweder die Freiheit des Designs stark eingeschränkt, oder aber es entstehen durch die Verwendung komplexerer Kerne höhere Kosten (Früh und Knippers 2021).

In den letzten Jahren wurde die Entwicklung von Bauteilen und prototypischen Gebäuden am Institut für Computerbasiertes Entwerfen (ICD) sowie am Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen (ITKE) der Universität Stuttgart weiterentwickelt (vgl. Abbildung 2.4). Dabei entstanden verschiedenen Prototypen (Schlopschnat et al. 2023), wie beispielsweise der Faserpavillon für die Bundesgartenschau in Heilbronn 2019 (vgl. 2.4b) oder auch das Maison Fibre für die Architektur Biennale in Venedig 2021 (vgl. Abbildung 2.4c)



(a) ICD/ITKE Forschungspavillon 2012 ©ICD/ITKE Universität Stuttgart (2012).



(b) BUGA Faser Pavillon, Heilbronn 2019 ©ICD/ITKE Universität Stuttgart (2019).



(c) Maison Fibre, Venedig 2021 ©ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart (2021b).



(d) livMatS Pavilion, Botanischer Garten Freiburg 2021 ©ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart (2021a).

Abb. 2.4: Darstellung verschiedener Bauwerksdemonstratoren im Bereich des Bauens mit Faserverbundsystemen.

Im Laufe der Zeit wurde die Fertigung von einer Fertigung mit Schalung immer weiterentwickelt, und ist inzwischen zu einer kernlosen Wickelung geworden. Bei dieser ist nun keine Schalung mehr notwendig und es wird stattdessen ein Fertigungsrahmen verwendet der sich nach der Fertigung und Trocknung, vom Bauteil

entfernen lässt. Das im Rahmen dieser Arbeit verwendet Verfahren wird im folgenden Abschnitt genauer erläutert.

2.2.2 Fertigungsprozess von Bauteilen aus kernlosen Faserverbundsystemen

Für die Fabrikation der Bauteile aus kernlosen Faserverbundsystemen werden ein einzelner oder mehrere kollaborierende sechs-achsige Roboterarme verwendet. Diese sind mit einem speziellen Endeffektor ausgestattet, welcher für eine konstante Spannung auf die zu wickelnden Fasern sorgen soll. Je nach Imprägnierungsverfahren können die Fasern dabei vorab oder direkt im Endeffektor imprägniert werden (Bodea et al. 2021a). Neben dem Roboter ist der Fertigungsrahmen ein zentrales Element des Fertigungsprozesses. Dieser positioniert die Wickelstifte, auch Ankerpunkte genannt, und muss so gebaut sein, dass er den während der Fertigung zunehmenden Kräften, die auf ihn wirken, standhält (Dambrosio et al. 2019). Die Fertigung unterschiedlicher Bauteile mittels kernloser Faserverbundsysteme kann im Generellen durch den in Abbildung 2.5 dargestellten Fertigungsaufbau dargestellt werden. Je nach Bauteil variiert dabei die Form und Größe des Fertigungsrahmens. Um Material bei der Fertigung sparen zu können, wird der Rahmen dabei so konstruiert, dass dieser im Idealfall nach der Fertigung demontiert werden kann, um für weitere Bauteile verwendet werden zu können (Bodea et al. 2021b; Minsch et al. 2017; Woods et al. 2016). Damit können effizient und individuell auch größere Bauteile gefertigt werden (Zechmeister 2019).

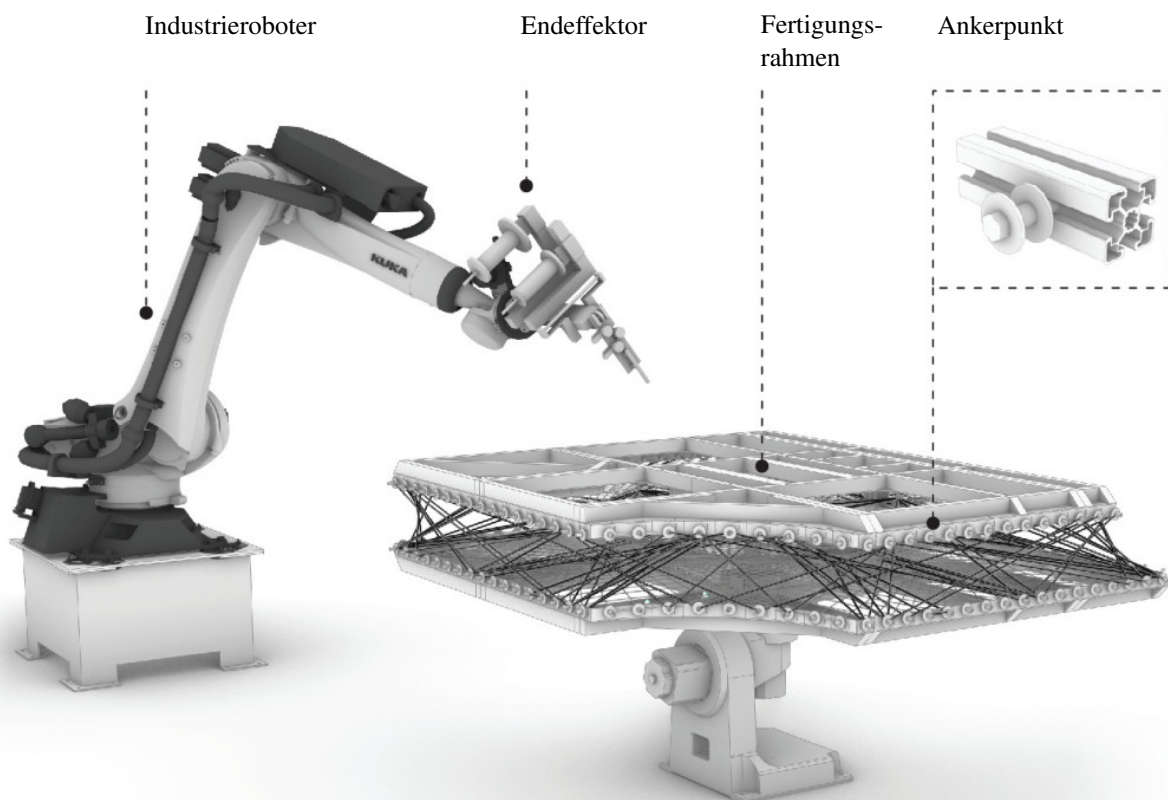


Abb. 2.5: Exemplarischer Fertigungsaufbau für die Fertigung von Bauteilen aus kernlosen Faserverbundsystemen (in Anlehnung an Zechmeister (2024)).

Das in Abbildung 2.5 dargestellte Fertigungsverfahren kann für unterschiedliche Fertigungen individuell angepasst werden. Beispiele hierfür sind die Montage des Wickelrahmens auf einem Dreh- oder Kipptisch oder auch

die Nutzung des Industrieroboters in Kombination mit einer Lineareinheit. Durch diese Erweiterung wird die Erreichbarkeit aller Ankerpunkte ermöglicht und somit können auch komplexere oder größere Bauteile gefertigt werden.

Die genauen Fertigungsverfahren unterscheiden sich dabei je nach Anwendungsbereich. Ein guter Überblick über die aktuellen Entwicklungen in den unterschiedlichen Fertigungsverfahren wird in Carosella et al. (2024) gegeben. Die unterschiedlichen Möglichkeiten können dabei miteinander kombiniert werden. Eine Darstellung der unterschiedlichen Möglichkeiten im Fertigungsprozess ist in Abbildung 2.6 dargestellt.

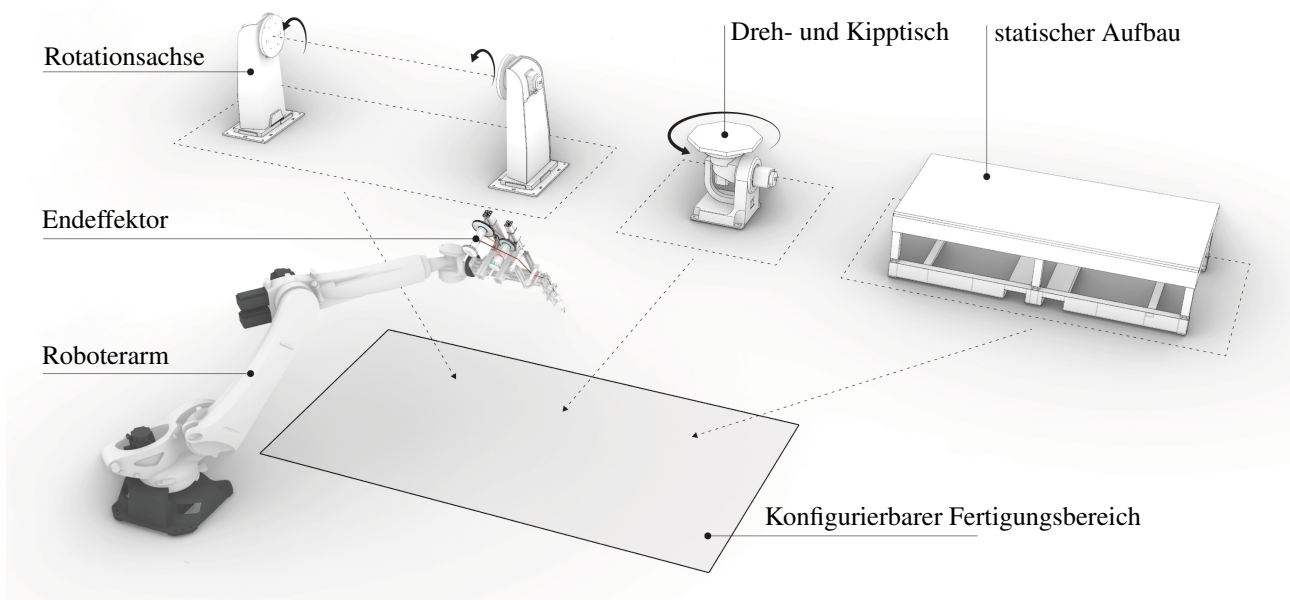


Abb. 2.6: Mögliche Variation der Fertigungsplattform (in Anlehnung an Gil Pérez et al. (2022)).

In Abbildung 2.7 ist ein beispielhafter Fertigungsaufbau für ein Bauteil des in Abbildung 2.4b dargestellten Pavillon der BUGA in Heilbronn dargestellt. Dabei zeigt sich, dass der Industrieroboter hier auf einer Lineareinheit montiert wurde, um die Erreichbarkeit des Bauteils zu gewährleisten. Die Rahmenkonstruktion, ist hier zusätzlich auf einer rotierenden Achse montiert, um alle Ankerpunkte im Fertigungsprozess erreichen zu können.

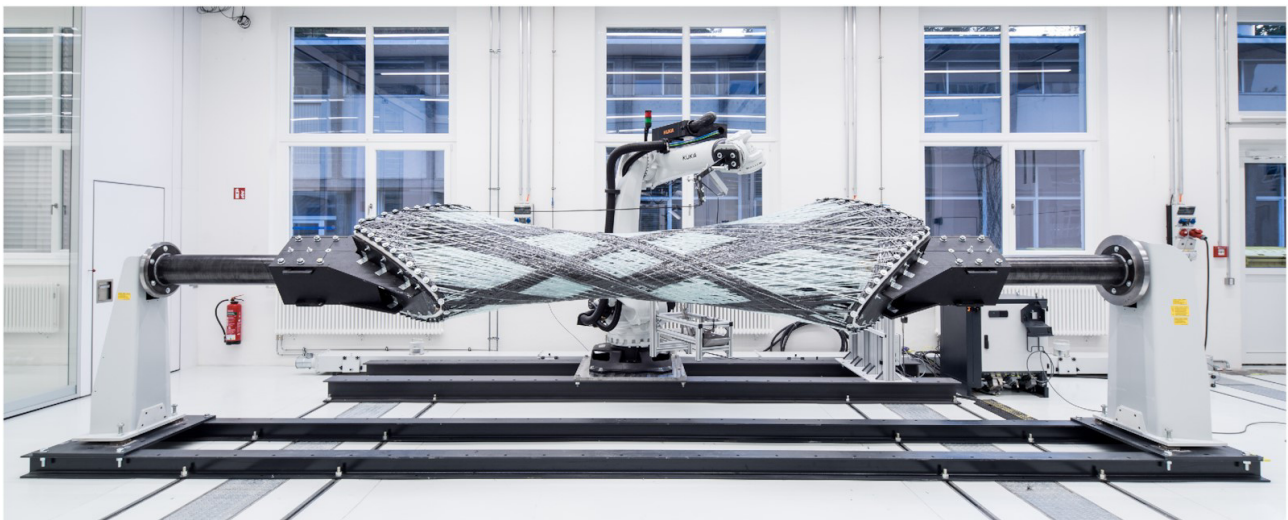


Abb. 2.7: Fabrikationssetup ©ICD/ITKE Universität Stuttgart (2019).

Eine besondere Herausforderung bei der Fertigung besteht dabei darin, dass die Fasern nicht auf einem Kern abgelegt werden und somit die Interaktion der freispannenden Fasern maßgeblich Einfluss auf die finale Geometrie nimmt. Die Bestimmung der Interaktion der Fasern, sowie die Prädiktion der Faserquerschnitte und der finalen Form der Bauteile ist dabei nicht trivial (Gil Pérez et al. 2022). Daher werden Methoden benötigt, um dieses Verhalten simulieren zu können (Knippers 2017). Da die Geometrie solcher Bauteile maßgeblich durch die systematische Abfolge der Platzierung einzelner Fasern erfolgt, ist die Kontrolle über die Geometrie der Fasern ein zentraler Punkt in der Simulation und Fertigung. Unterschiedliche Geometrien können nun durch die Wahl eines entsprechenden Rahmens, durch die Position und Orientierung der Ankerpunkte oder auch die Abfolge der Syntax generiert werden. Neben der reinen Abfolge der Faserelemente ist auch die Faser-Faser-Interaktion entscheidend für die strukturellen Eigenschaften des späteren Bauteils. Durch das Zusammenpressen einzelner Fasersegmente entsteht dabei eine Netzstruktur, die für die Kraftübertragung entscheidend ist (Prado et al. 2014). Diese Interaktion entsteht dabei beispielsweise durch eine unterschiedliche Höhe der Ankerpunkte. Die Simulation des Verhaltens der Fasern während des Fertigungsprozesses stellt dabei eine große Herausforderung dar, da die nicht ausgehärteten, imprägnierten Fasern sich durch jedes neu hinzukommende Fasersegment verformen und damit die endgültige Form des Bauteils beeinflussen (Waimer et al. 2013).

Die grundlegende Planung wird dabei durch die Fasersyntax dargestellt. Diese stellt die Topologie des Fasernetzes als eine Abfolge der verwendeten Ankerpunkte dar (Zechmeister et al. 2023). Eine detailliertere Darstellung der Geometrie der Objekte wird dann durch die Pfadplanung erhalten. Bei dieser wird der Tool Center Point (TCP) des Wickelroboters sowie dessen Orientierung betrachtet. Bei dieser Repräsentation werden somit die Ankerpunkte bereits im Modell berücksichtigt, allerdings werden die einzelnen Faserbündel noch immer als Linie behandelt. Eine weitere mögliche Darstellung der Geometrie in der Planungsphase stellt die Prozesssimulation dar (Hügler et al. 2022). Bei dieser Simulation werden nun auch die Faserquerschnitte berücksichtigt und es besteht somit auch die Möglichkeit die Querschnitte der Faserbündel zu evaluieren.

Durch die unterschiedlichen Detaillierungsgrade der Planungsdaten unterscheiden sich auch die vorhandenen Planungsdaten, die für eine Qualitätssicherung herangezogen werden können. Je nach Detaillierungsgrad ist somit kein direkter Vergleich der Geometrie möglich, wie in Abschnitt 2.1.3 dargestellt. Dies bedeutet, dass nicht die wahre Geometrie und Form der Bauteile zu vergleichen ist, sondern vielmehr eine Darstellung der Abweichungen an charakteristischen Punkten notwendig ist. Die charakteristischen Punkte sind hierbei die Schnittpunkte der einzelnen Fasersegmente, da deren Position ausschlaggebend für die Kraftübertragung und somit auch für die Statik des Bauteils ist.

3 Grundlagen

Die Erfassung der Geometrie von Objekten im Raum und die anschließenden Identifikation von charakteristischen Merkmalen stellt die zentrale Aufgabe bei der Evaluierung der geometrischen Qualität dar. In diesem Kapitel werden daher zunächst die messtechnischen Grundlagen dargelegt, die für das Verständnis der 3D-Erfassung von Objekten notwendig sind. Anschließend werden die algorithmischen und mathematischen Verfahren näher betrachtet, welche für die Auswertung der Daten benötigt werden.

3.1 Messtechnische Grundlagen

Um die geometrische Qualität eines Bauelements oder Gebäudes beurteilen zu können, ist die Erfassung der Geometrie des Ist-Zustands von großer Bedeutung. Im Bau sind dabei die Festlegung der Grundstücksgrenzen, der Eckpunkte des Fundaments, oder auch die Erfassung des gesamten Objektes von Interesse. Je nach Objekt und gewünschtem Detaillierungsgrad können hierbei punktweise oder flächenhafte Verfahren zur Vermessung eingesetzt werden (Schwarz 2017). Punkt-basierte Verfahren, wie beispielsweise Tachymetermessungen oder GNSS-Messungen, können hierbei bei einfachen, geradlinigen Objekten eingesetzt werden, wenn Kantenpunkte detektiert werden sollen und damit die Form des Objektes rekonstruiert werden kann. Für die Erfassung eines komplexen architektonischen Objektes, wie beispielsweise Kuppeln oder Freiformflächen, bietet sich hingegen eine flächenhafte Erfassung der Geometrie an, um einen Abgleich mit den Planungsdaten durchführen zu können. Das verwendete Messverfahren zur Kontrolle der Geometrie richtet sich daher immer nach den gewünschten Anforderungen. Da im Rahmen dieser Arbeit vor allem komplexe geometrische Objekte betrachtet werden, werden im Folgenden nur die flächenhaften Verfahren näher betrachtet.

Die Erstellung einer digitalen Repräsentation, auch digitaler Zwilling genannt, gewinnt im Bau immer mehr an Bedeutung und kommt unter anderem in der Denkmalpflege, bei Stadtmessungsämtern oder auch in der Bauwirtschaft zum Einsatz. Dieser Repräsentation zugrunde liegen in den meisten Fällen 3D-Punktwolken, welche mittels verschiedener Verfahren generiert wurden (Tang et al. 2010; Wang und Kim 2019; Lu und Lee 2017).

Die häufigsten eingesetzten Methoden zur flächenhaften Erfassung basieren auf 3D-Punktwolken, die mittels Laserscanning oder Photogrammetrie erfasst werden können (Gojcic 2021). Ziel beider Verfahren ist es dabei, zunächst eine 3D-Punktwolke des gewünschten Objektes zu erzeugen, welche dann für die weitere Evaluierung zur Verfügung steht. Die dabei generierten Punktwolken unterscheiden sich dabei in den aufgenommenen Informationen. Dazu gehören zum einen die geometrischen Informationen, wie die Koordinaten, die Punktverteilung oder auch die Auflösung. Zum anderen können die radiometrischen Informationen betrachtet werden, wie die Intensitäten oder Reflektanzen, oder auch die Verfügbarkeit von Farbinformationen. Für beide Arten der Information ist zudem der Aufnahmestandpunkt entscheidend. Dabei kann zwischen einer Luftaufnahme (z.B. Airborne Laser Scanning (ALS) oder Bildflüge), der statischen terrestrischen Aufnahme (z.B. Terrestrial Laser Scanning (TLS)) oder auch der kinematischen Aufnahme (z.B. Mobile Laser Scanning (MLS)) unterschieden werden (Yang 2023). Im Folgenden werden die unterschiedlichen Verfahren zur Erfassung und Vorverarbeitung einer 3D-Punktwolke betrachtet.

3.1.1 Flächenhafte 3D-Erfassung mittels photogrammetrischer Systeme

Im Falle der photogrammetrischen Verfahren besteht die Datenaufnahme aus der Bildaufnahme. Die photogrammetrischen Systeme lassen sich dabei nach unterschiedlichen Charakteristika klassifizieren. Dazu gehören beispielsweise der Aufnahmeort und die Entfernung zum Messobjekt, die Anzahl der auszuwertenden

Bilder, die Aufnahme und Auswertemethode, oder auch die Anwendungsgebiete (Luhmann 2023). Im Folgenden wird nur die für diese Arbeit relevante Nahbereichsphotogrammetrie näher betrachtet.

Unter der Nahbereichsphotogrammetrie versteht man Aufnahmeentfernung von unter 300 m. Das prinzipielle Vorgehen der Photogrammetrie lässt sich durch das mathematische Modell der Zentralperspektive beschreiben. Dabei wird für jeden Objektpunkt p ein Strahl festgelegt, welcher durch das Projektionszentrum O' , sowie den Bildpunkt p' definiert wird. Ist zudem die innere Orientierung der Kamera sowie die äußere Orientierung bekannt, so können die 3D-Koordinaten des Objektpunktes p bestimmt werden. In Abbildung 3.1 ist dies beispielhaft für den Spezialfall dargestellt, dass die Bildebene parallel zur Objektebene verläuft.

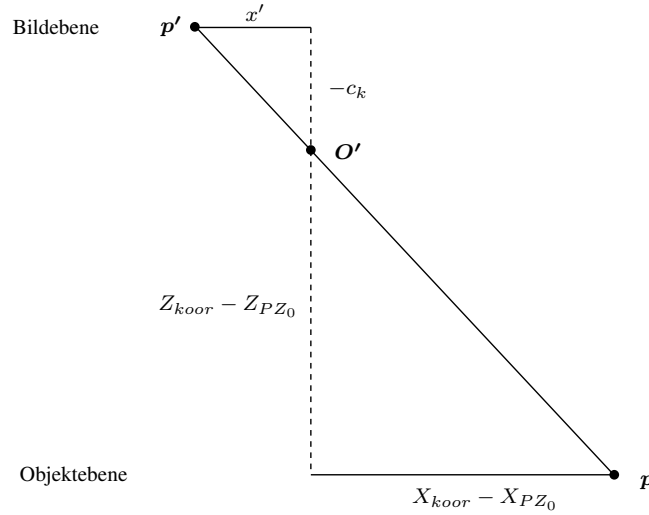


Abb. 3.1: Zusammenhang zwischen Bildpunkt und Objektpunkt im vereinfachten Fall, dass die Bildebene parallel zur Objektebene verläuft (in Anlehnung an Luhmann (2023)).

Zu den Parametern der inneren Orientierung gehören dabei die Kamerakonstante c_k , sowie die Koordinaten des Bildhauptpunktes x_p, y_p . Die innere Orientierung der Kamera lässt sich dabei mittels Kamerakalibrierung bestimmen (Luhmann 2023). Die Parameter der äußeren Orientierung beschreiben nun die Lage und Orientierung der Kamera im Raum und können daher durch die Lage des Projektionszentrums

$$\mathbf{X}_{PZ_0} = \begin{bmatrix} X_{PZ_0} \\ Y_{PZ_0} \\ Z_{PZ_0} \end{bmatrix}, \quad (3.1)$$

sowie die Drehwinkel $\alpha_{rot}, \beta_{rot}, \gamma_{rot}$ beschrieben werden. Dabei beschreibt α_{rot} die Rotation um die x -Achse, β_{rot} die Rotation um die y -Achse und γ_{rot} die Rotation um die z -Achse. Damit kann dann eine allgemeine Rotationsmatrix $\mathbf{R}$ aufgestellt werden. Diese ergibt sich durch

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_1(\alpha_{rot}) \cdot \mathbf{R}_2(\beta_{rot}) \cdot \mathbf{R}_3(\gamma_{rot}) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}. \quad (3.2)$$

Sind die Parameter der inneren und äußeren Orientierung bekannt, so ergibt sich der Zusammenhang der Bild- und Objektkoordinate durch die Kollinearitätsgleichungen. Diese sind gegeben durch

$$\begin{aligned} x'_i + v_{x_i} &= x'_0 - c_k \frac{r_{11}(X_{koor} - X_{PZ_0}) + r_{21}(Y_{koor} - Y_{PZ_0}) + r_{31}(Z_{koor} - Z_{PZ_0})}{r_{13}(X_{koor} - X_{PZ_0}) + r_{23}(Y_{koor} - Y_{PZ_0}) + r_{33}(Z_{koor} - Z_{PZ_0})}, \\ y'_i + v_{y_i} &= y'_0 - c_k \frac{r_{12}(X_{koor} - X_{PZ_0}) + r_{22}(Y_{koor} - Y_{PZ_0}) + r_{32}(Z_{koor} - Z_{PZ_0})}{r_{13}(X_{koor} - X_{PZ_0}) + r_{23}(Y_{koor} - Y_{PZ_0}) + r_{33}(Z_{koor} - Z_{PZ_0})}. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Diese Gleichungen können nun als Beobachtungsgleichungen für die weitere, überbestimmte, Ausgleichung verwendet werden und finden in der Photogrammetrie beispielsweise Anwendung bei der Bestimmung des räumlichen Rückwärtschnitts oder des räumlichen Vorwärtsschnitts.

Im Folgenden werden nun zwei photogrammetrische Messsysteme genauer vorgestellt. Bei diesen handelt es sich zum einen um Structure from Motion und zum anderen um die industriellen Messsysteme mittels Streifenlichtprojektion.

3.1.1.1 Structure from Motion

Eine photogrammetrische Lösung zur 3D-Objekterfassung stellt das Verfahren Structure from Motion dar. Die grundlegende Idee hinter diesem Verfahren ist es, aus mehreren 2D-Bildern eine 3D-Repräsentation zu erstellen (Westoby et al. 2012; Ullman 1979). Dazu wird das gewünschte Objekt zunächst systematisch fotografiert. Dabei ist neben scharfen Bildern auch eine Überlappung zwischen den einzelnen Bildern notwendig. Anschließend können in allen Bildern charakteristische Punkte detektiert und zugeordnet werden. Dies geschieht beispielsweise mittels des Speeded Up Robust Features (SURF) Algorithmus. Mittels einer anschließenden Bündelblockausgleichung werden dann sowohl die äußere Orientierung der Kamera als auch die 3D-Objektkoordinaten bestimmt (Zisserman und Hartley 2003).

Dieses Verfahren wird vor allem für die Dokumentation von historischen Gebäuden oder auch archäologischen Ausgrabungsstätten verwendet, da das Aufnahmeverfahren kostengünstig, je nach Wahl der Kamera, umsetzbar ist. Mit einer entsprechenden Rechenleistung können zudem auch große Objekte erfasst werden. Wichtig ist allerdings, dass das zu erfassende Objekt über eine ausreichende Oberflächenstruktur verfügt, um eine Punktzuordnung durchführen zu können. Die erreichbare Auflösung ist dabei immer von der Wahl der Kamera sowie der Entfernung zum Objekt abhängig. Mit den in der Ingenieurphotogrammetrie oder auch in der Architektur angewendeten Systemen lassen sich somit Objekte mit einer Größe bis hin zu mehreren hundert Metern mit einer Genauigkeit von etwa einem Millimeter erfassen (Luhmann 2023). Dabei ist allerdings zu beachten, dass je nach Objektgröße und Form eine entsprechende Anzahl an Bildern notwendig ist. Eine vollständige Erfassung des gewünschten Objektes kann daher auch nur realisiert werden, wenn eine entsprechende Aufnahme des Objektes vorgenommen werden kann. Liegen viele hoch aufgelöste Bilder vor, so kann die Rechenzeit, die vor allem die Merkmalsextraktion betrifft, mehrere Stunden bis Tage dauern (Luhmann 2023). Im Anschluss an die Merkmalsextraktion werden die Bilder dann in einer Bündelblockausgleichung orientiert. Da aus den Bildern allein zunächst keine Bestimmung des Maßstabes möglich ist, werden hier zusätzliche Datumpunkte verwendet. Ein Nachteil dieses Verfahrens besteht dabei darin, dass durch die Merkmalsextraktion auf Basis der aufgenommenen Bilder Effekte, die durch Beleuchtung entstehen, einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die finale Punktwolke haben. Durch Probleme in der Ausleuchtung, oder auch durch Schatten, kann es daher zu fehlerhaften Punktzuordnungen kommen.

3.1.1.2 Streifenprojektionssystem

Bei Streifenprojektionssystemen handelt es sich um ein Messsystem, welches aus einem Projektor, sowie einer oder mehrerer Kameras besteht. Mittels Kalibrierung werden nun vorab die Orientierungen der Kameras und des Projektors bestimmt (Rocchini et al. 2001). Der Projektor projiziert anschließend ein Streifenmuster auf das zu messende Objekt. Dieses Muster kann dann von den verwendeten Kameras erfasst werden. Das Messvolumen ist dabei von der Wahl der Objektive abhängig und liegt zwischen $0,5 \text{ mm}^3$ und 4 m^3 . Das maximale Messvolumen wird dabei zusätzlich durch die Rechenleistung des Messrechners begrenzt, da große Objekte zu einer hohen Anzahl an Messpunkten und damit einer großen Datenmenge führen. Die erreichbaren Genauigkeiten sind dabei von der Größe des Messvolumens abhängig. Für kleine Objekte können Genauigkeiten von bis zu $0,3 \text{ mm}$ erreicht werden.

Streifenlichtprojektionssysteme lassen sich vielseitig einsetzen und sind vor allem im Bereich der industriellen Vermessung ein wichtiger Bestandteil für den Soll-Ist-Vergleich von Produkten (Luhmann 2023). Ein Vorteil

dieser Systeme besteht dabei darin, dass das System auch direkt in die Fertigung integriert werden kann und, beispielsweise mittels Montage auf einem Industrieroboter, eine automatisierte Qualitätssicherung durchgeführt werden kann.

Für die Funktionsweise der Streifenlichtprojektionssysteme ist die Projektion des Streifenmusters, sowie die anschließende Detektion dieses Musters von zentraler Bedeutung. Durch die Verzerrung des Musters kann anschließend die Geometrie des Messobjektes bestimmt werden (Bell et al. 2000). Da für eine vollständige Erfassung eines Objektes mehrere Aufnahmen notwendig sind, können hier auch zusätzliche Marker zur Verknüpfung der einzelnen Messungen angebracht werden. Da es sich bei diesem System um ein optisches System handelt, ist es wichtig, dass in der Messumgebung keine störenden Lichteinfälle vorhanden sind, die zu einem verfälschten Muster führen könnten. Des Weiteren ist die Oberfläche des Messobjektes zu beachten. Um das Streifenmuster für die Kamera möglichst gut sichtbar zu machen, werden daher häufig mattierende Scanningsprays verwendet (Yang et al. 2019). Diese werden auf die zu messenden Objekte gesprüht und verschwinden je nach Art des verwendeten Sprays innerhalb von einigen Stunden bis zu einem Tag (AESUB 2023).

3.1.2 Flächenhafte 3D-Erfassung mittels Laserscanner

Bei den terrestrischen Laserscannern handelt es sich um aktive optische Multisensorsysteme für die schnelle, geometrische Erfassung von 3D-Objekten (Gordon et al. 2003). Das zu Grunde liegende Messprinzip ist, wie auch beim Tachymeter, ein polares Messsystem, welches auf der Messung zweier Raumwinkel und einer zugehörigen Distanzmessung beruht. Die gemessenen Raumwinkel, sowie die Schrägstrecke sind in Abbildung 3.2 dargestellt. Zusätzlich wird bei den meisten Scannern noch eine radiometrische Information, die Intensität gespeichert (Vosselman und Maas 2010). Daneben verfügen viele Scanner heutzutage über eingebaute Kamerasysteme, sodass eine zusätzlich RGB-Information gespeichert werden kann, was eine Kolorierung der Punktwolke ermöglicht.

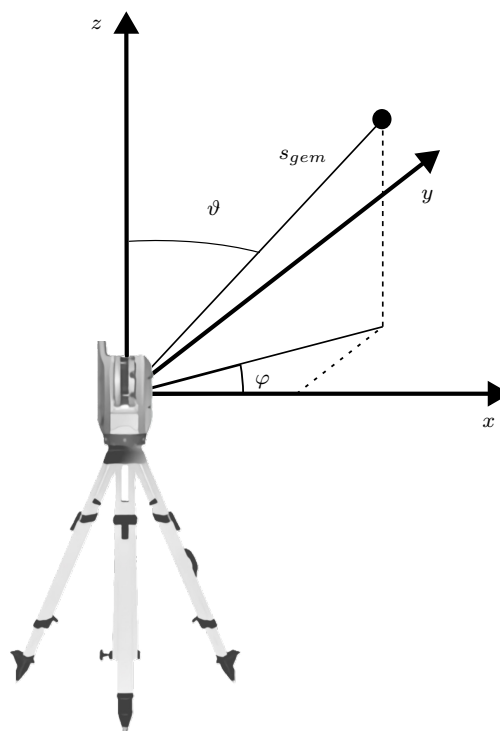


Abb. 3.2: Messgrößen beim terrestrischen Laserscanner.

Aus den gemessenen Winkeln und Strecken ergeben sich dann die kartesischen Koordinaten im Scannerkoordinatensystem durch

$$\begin{aligned}x &= s_{gem} \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \varphi, \\y &= s_{gem} \cdot \sin \vartheta \cdot \sin \varphi, \\z &= s_{gem} \cdot \cos \vartheta,\end{aligned}\tag{3.4}$$

mit x, y, z : Punktkoordinaten,
 s_{gem} : Distanzmessung,
 ϑ : Vertikalwinkel,
 φ : Horizontalwinkel.

3.1.2.1 Winkelmessung

Die Winkelmessung eines terrestrischen Laserscanners besteht aus der Zuordnung der Laserstrahlrichtung zu einer bestimmten Rotationsstellung im Bezug auf seine Steh- und Kippachse und ist damit identisch mit der Winkelmessung bei Tachymetern oder Theodoliten. Eine detaillierte Beschreibung dieses Winkelabgriffs findet sich beispielsweise in Deumlich und Staiger (2002). Im Gegensatz zu den Tachymetern und Theodoliten kommen bei der Winkelmessung für Laserscanner allerdings neben der Anforderung an die Winkelauflösung auch noch die Anforderungen an die zeitliche Auflösung hinzu (Kuhlmann und Holst 2017). Da die Anzahl der gemessenen Punkte mit bis zu 1 Million Punkte pro Sekunde die Möglichkeiten eines direkten Winkelabgriffs übersteigt, wird der Winkelabgriff mittels einer zeitlichen Interpolation realisiert. Dieses Verfahren wird auch als dynamische Richtungsmessung bezeichnet (Schlemmer 1996). Wird nun von einer konstanten Winkelgeschwindigkeit ω und der gemessenen Zeit T_ω ausgegangen, ergibt sich der zugehörige Winkel durch

$$\varphi = \omega \cdot T_\omega.\tag{3.5}$$

Für die Umsetzung bei terrestrischen Laserscannern wird dabei nur ca. 1% der Winkel physikalisch abgegriffen. Die restlichen Werte werden dann interpoliert. Damit ist die Winkelgenauigkeit von der Genauigkeit des zeitlichen Abgriffs und damit von der Rotationskonstanz des Geräts abhängig (Kuhlmann und Holst 2017).

3.1.2.2 Distanzmessung

Bei der Distanzmessung von terrestrischen Laserscannern handelt es sich um eine reflektorlose elektrooptische Distanzmessung. Hierfür haben sich, wie auch bei den Tachymetern, zwei Verfahren für die Distanzmessung durchgesetzt. Hierbei handelt es sich um das Phasenvergleichsverfahren und das Impulslaufzeitverfahren. Durch steigende Anforderungen kommt es in neueren Geräten auch immer mehr zu Mischverfahren beider Verfahren (Kuhlmann und Holst 2017). Da diese in dieser Arbeit nicht zur Anwendung kommen, werden sie im Folgenden nicht näher betrachtet. Die folgenden Abschnitte behandeln daher die beiden klassischen Verfahren der Distanzmessung.

Phasenvergleichsverfahren: Für die Bestimmung der Strecken mittels des Phasenvergleichsverfahrens wird der Trägerwelle ein harmonisches Signal λ_M aufmoduliert. Die Wellenlänge ist dabei eine Funktion in Abhängigkeit von der Frequenz und der Lichtgeschwindigkeit im Medium. Die doppelte Strecke ergibt sich dann aus der Anzahl N der vollständigen Schwingungen sowie dem Wellenreststück $\Delta\lambda_M$ (Kahmen 1993; Deumlich und Staiger 2002; Kuhlmann und Holst 2017). Die gemessene Strecke ergibt sich damit durch

$$s_{gem} = \frac{1}{2} (N \cdot \lambda_M + \Delta\lambda_M),\tag{3.6}$$

mit N : Anzahl der vollständigen Schwingungen,
 λ_M : Trägerwellenlänge,
 $\Delta\lambda_M$: Wellenreststück.

Das Wellenreststück stellt dabei die Messgröße dar, da aus diesem entsprechend die Phasenverschiebung abgeleitet werden kann. Zusätzlich muss die Anzahl der vollständigen Schwingungen bestimmt werden. Hierfür werden die Messungen mit unterschiedlichen Frequenzen durchgeführt. Die Messgenauigkeit des Phasenvergleichsverfahrens ist dabei im Allgemeinen höher als beim Impulslaufzeitverfahren. Durch die auftretenden Mehrdeutigkeiten ist das Verfahren allerdings auf eine Reichweite von einigen hundert Metern begrenzt. Dieses Verfahren wird beispielsweise bei den Scannern Zoller+Fröhlich Imager 5016, Surphaser 400, Faro Focus S oder auch dem Trimble X12 eingesetzt (Kerekes 2023).

Impulslaufzeitverfahren: Beim Impulslaufzeitverfahren wird ein Lichtimpuls von der Laserdiode (dem Sender) erzeugt. Dieser Lichtimpuls wird dann, wenn er auf ein Objekt trifft, reflektiert und der Eingang des reflektierten Signals am Empfänger detektiert. Dabei wird die benötigte Zeit des Signals vom Sender zum Empfänger gemessen (Kahmen 1993; Deumlich und Staiger 2002; Kuhlmann und Holst 2017). Durch diesen Vergleich ergibt sich die gemessene Strecke damit durch

$$s_{gem} = \frac{1}{2} \cdot T_s \cdot c, \quad (3.7)$$

mit T_s : Zeitmessung,
 c : Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts im Medium mit $c = \frac{c_0}{n_{med}}$ mit $c_0 = 299792,458$ m/s und n_{med} dem Brechungsindex des Mediums.

Auch bei dieser Art der Streckenmessung muss somit die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Laserstrahl im aktuellen Medium betrachtet werden. Dieses Verfahren wird vor allem bei Laserscannern mit einer größeren Reichweite eingesetzt. Einige beispielhafte Geräte für die Verwendung dieses Verfahrens sind Riegl VZ600i, Riegl VZ2000, Trimble X7, Leica RTC360 oder auch der Leica P40 (Kerekes 2023).

Vergleich der Verfahren der Distanzmessung: Durch die beiden unterschiedlichen Messprinzipien ergeben sich auch unterschiedliche Vor- und Nachteile. Im Allgemeinen weisen Geräte, die das Impulslaufzeitverfahren zur Distanzmessung verwenden, eine größere Reichweite auf. Allerdings wird diese Methode häufig als weniger genau und zeitintensiver betrachtet. Auch die Größe der Laserspots ist bei diesem Verfahren im Vergleich zum Phasenvergleichsverfahren häufig größer. Ein weiterer Unterschied ist die Möglichkeit der Mehrpunktdetektion. So ist es mit Laserscannern, die das Impulslaufzeitverfahren zur Distanzmessung verwenden, je nach Gerät und verfügbarer Software möglich, mehrere Messpunkte im Strahlengang zu erhalten. Bei Laserscannern, die das Phasenvergleichsverfahren zur Distanzmessung nutzen, ist dies hingegen nicht möglich (Schäfer 2017).

3.1.2.3 Geometrische Kenngrößen und radiometrische Informationen

Bei der Messung mittels TLS sind verschiedene geometrische Kenngrößen von Bedeutung. Dazu gehören zunächst die Auflösung, die häufig auch als Scandichte bezeichnet wird. Diese gibt den Abstand zwischen zwei gemessenen Punkten an. Je nach Laserscanner kann dies durch Festlegung eines selbst gewählten Winkels zwischen den einzelnen Messpunkten (RIEGL Laser Measurement Systems GmbH 2022) oder auch aus einer Liste voreingestellter Scan-Modi ausgewählt werden (Trimble Inc. 2020; Leica Geosystems AG 2012). Dabei gilt im Allgemeinen, je höher die Auflösung, desto länger die Messzeit. Die Auflösung wird dabei meist als Punktabstand in einer gewissen Entfernung (z.B. 10 m) oder als Winkelauflösung angegeben. In Tabelle 3.1 sind die beispielhaften Auflösungsbereiche unterschiedlicher Laserscanner dargestellt.

Um die für die durchgeführten Messungen ideale Auflösung festlegen zu können, ist zudem der Durchmesser des Laserspots, die Spotgröße, von Bedeutung. Mit zunehmender Entfernung des Messobjektes vom Gerät vergrößert sich diese. Bei den gemessene Strecken des Laserscanner handelt es sich dabei nicht um eine punktweise Messung, sondern die Strecke über den gesamten Laserspot betrachtet wird (Chaudhry et al. 2019; Lichti et al. 2005). Um die Auflösung bestimmen zu können, also beispielsweise die Frage wie groß ein Riss innerhalb einer Struktur sein muss, damit er detektiert werden kann, müssen daher auch die überlappenden Laserspots zu betrachtet werden. Da in dieser Arbeit allerdings die Erfassung der äußeren Geometrie der Strukturen und nicht die Erfassung spezifischer Merkmale innerhalb der Struktur im Fokus steht, wird dies an dieser Stelle nicht weiter betrachtet. Eine genauere Betrachtung findet sich in Schmitz et al. (2020).

Tab. 3.1: Niedrigste und höchste Auflösung verschiedener Laserscanner (RIEGL Laser Measurement Systems GmbH 2022; Leica Geosystems AG 2012; FARO Europe GmbH 2021; Leica Geosystems AG 2020; Trimble Inc. 2020).

Laserscanner	niedrigste Auflösung	höchste Auflösung
Leica P40	0,2885°	0,0046°
Riegl VZ2000	Vz 1,1500°	Vz 0,0015°
	Hz 0,6200°	Hz 0,0024°
Leica HDS7000	0,2882°	0,0034°
Faro Fokus S	0,2813°	0,0086°
Trimble X7	0,0630°	0,0229°

Die Größe und Form des Laserspots ist dabei abhängig von der Entfernung des Messgerätes zum Messobjekt, da die Spotgröße mit steigender Entfernung zunimmt (vgl. Abbildung 3.4), und dem Auftreffwinkel des Laserstrahls am Objekt (vgl. Abbildung 3.3). Die Form des Spots wird vom Auftreffwinkel des Messstrahls auf des Objekt beeinflusst. Trifft der Messstrahl rechtwinklig auf das Objekt, so ergibt sich ein kreisförmiger Laserspot. Je mehr der Auftreffwinkel davon abweicht, desto elliptischer wird der resultierende Laserspot am Messobjekt (vgl. Abbildung 3.3) (Schäfer 2017).

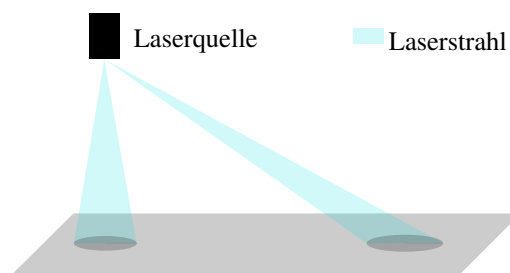


Abb. 3.3: Form des Laserspots bei unterschiedlichen Auftreffwinkeln. Der linke Laserstrahl zeigt dabei das Verhalten bei einem rechtwinkligen Auftreffwinkel, während der rechte Laserstrahl einen Auftreffwinkel von 45° zeigt.

Der Durchmesser der Laserspots ist dabei, wie bereits erwähnt, distanzabhängig (Vosselman und Maas 2010). Im Allgemeinen ist davon auszugehen, dass die Spotgröße bei Laserscannern, die das Impulslaufzeitverfahren zur Streckenmessung nutzen und für eine große Reichweite ausgelegt sind, bereits bei einer kurzen Distanz größer ist. Entscheidend hierfür ist zum einen die Stahldivergenz, diese gibt den Öffnungswinkel des Laserstrahls an. Zusätzlich ist der Durchmesser des Laserstrahl beim Austritt des Gerätes zu beachten. Eine Übersicht verschiedener Laserscanner und ihrer Spotgrößen in Abhängigkeit der Distanz ist in Tabelle 3.2 dargestellt.

Tab. 3.2: Spotgrößen und Strahldivergenz verschiedener Laserscanner mit dem Impulslaufzeitverfahren und dem Phasenvergleichsverfahren zur Streckenmessung aus den Herstellerangaben (Leica Geosystems AG 2020; RIEGL Laser Measurement Systems GmbH 2022; Leica Geosystems AG 2012; FARO Europe GmbH 2021).

Laserscanner	Strahldivergenz	Durchmesser Austritt	Spotgröße in 30 m	Messprinzip
Leica P40	0,23 mrad	3,50 mm	10,40 mm	Impulslaufzeitverfahren (Mischverfahren)
Riegl VZ2000	0,30 mrad	18,00 mm	27,00 mm	Impulslaufzeitverfahren
Leica HDS7000	0,30 mrad	3,50 mm	12,50 mm	Phasenvergleichsverfahren
Faro Fokus S	0,30 mrad	2,12 mm	11,12 mm	Phasenvergleichsverfahren

Betrachtet man nun die Auflösung zusammen mit der erwarteten Spotgröße, so ergeben sich daraus die in Abbildung 3.4 dargestellten Muster. In Abbildung 3.4a zeigt sich, dass mit einer größeren Auflösung sich nur ein Messpunkt auf dem zu messenden Objekt befindet. Die Zentren der Messpunkte sind dabei durch die schwarzen Linien von der Laserquelle zum Messobjekt dargestellt. Zusätzlich ist der Laserstrahl (in hellblau) dargestellt. Dabei sieht man, wie der Durchmesser des Laserstrahls mit zunehmender Entfernung von seiner Quelle zunimmt. Bei der hier gewählten Auflösung ist zudem sichtbar, dass alle drei Laserstrahlen vollständig auf dem Vorder- oder Hintergrund des Objektes liegen. Wird nun das Verhalten bei einer zweiten Auflösung, dargestellt in Abbildung 3.4b, betrachtet, so zeigt sich, dass die Zentren der Messstrahlen hier deutlich enger beieinander liegen. Dies führt auch dazu, dass sich die zugehörigen Laserstrahlen überlagern. Betrachtet man nun den Durchmesser der Laserstrahlen am Messobjekte, so zeigt sich, dass obwohl das Zentrum des Messstrahls für die beiden äußeren Messungen auf den Hintergrund trifft, der Laserstrahl am Objekt geteilt wird und ein Teil des Laserstrahls auf den Vordergrund, und ein Teil auf den Hintergrund trifft. Dieser Effekt tritt dabei vor allem im Bereich von Kanten oder bei sehr dünnen Objekten, wie sie in dieser Arbeit verwendet werden, auf. Aus diesem Grund ist die Betrachtung des Umgangs mit unvollständigen Laserspots von enormer Bedeutung und wird im Folgenden näher betrachtet.

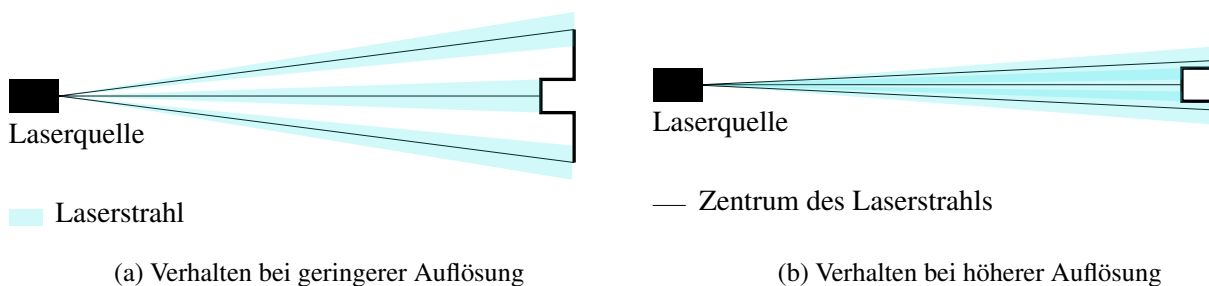
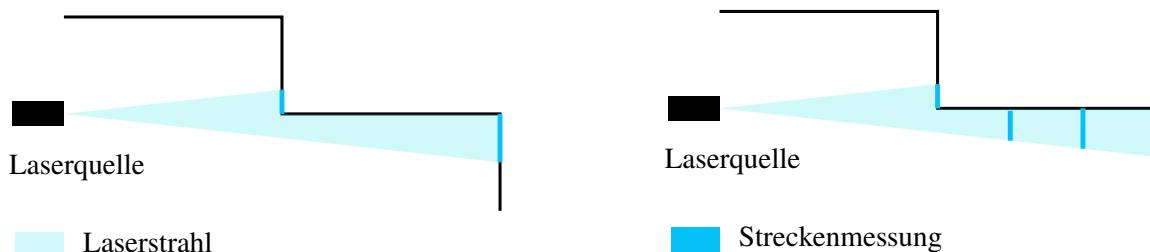


Abb. 3.4: Darstellung des Verhaltens dreier Messstrahlen bei unterschiedlichen Auflösungen beim Auftreffen auf eine Kante.

Zusätzlich zu den Koordinaten eines gemessenen Punktes liefern die meisten Laserscanner auch einen Intensitätswert. Dieser gibt Auskunft über die Intensität des reflektierten Laserpulses. Diese Intensität ist abhängig vom jeweiligen Material, dem Einfallswinkel und je nach Laserscanner auch von der Entfernung zum Objekt (Wujanz et al. 2017). Die gemessenen Intensitäten stellen somit einen Mittelwert über den gesamten Laserspot dar, und nicht den Wert des direkt dargestellten Messpunktes (Chaudhry 2021). Durch die bereits diskutierte Form und Größe der einzelnen Laserspots kommt es vor allem bei kleinen Objekten oder auch in Kantenbereichen dazu, dass ein Spot nur in Teilen auf dem gewünschten Objekt liegt. Der Umgang der Laserscanner mit diesen unvollständigen Laserspots ist dabei vor allem vom Verfahren der Distanzmessung

abhängig (Schmitz et al. 2021). Bei Laserscannern mit dem Impulsvergleichsverfahren zur Distanzmessung ist die Unterscheidung zwischen dem ersten und dem letzten Puls entscheidend. Die Methode des ersten Pulses wird vor allem bei terrestrischen Laserscannern verwendet, da das Objekt, auf das der Laserspot zuerst trifft, in der Regel das gewünschte Objekt ist. Der letzte Puls ist beim Laserscanning aus der Luft gebräuchlicher, wenn der Boden gescannt werden soll und Pulse von z.B. Bäumen nicht berücksichtigt werden sollen (Matikainen et al. 2009). Dieses Verhalten ist auch in Abbildung 3.5a dargestellt. Der Laserstrahl (hellblau) trifft auf die Kante des Objekts, ein Teil des Laserspots wird nun von der vorderen und ein Teil von der hinteren Oberfläche reflektiert. Daraus ergeben sich zwei mögliche Streckenmessungen. Für die Entscheidung welche Streckenmessung nun verwendet wird, ist ein geräteinterner Grenzwert entscheidend. Für den ersten Puls muss die Intensität diesen Grenzwert überschreiten, damit er als Messpunkt verwendet wird (in Abbildung 3.5a entspricht dies der kürzeren Streckenmessung). Bei den meisten Laserscannern ist dieser Grenzwert jedoch nicht bekannt. Wird der Intensitätswert nicht überschritten, wird der nächste Puls betrachtet. Sollte dieser den entsprechenden Grenzwert überschreiten (vgl. Abbildung 3.5a, längere Streckenmessung), wird diese Distanzmessung verwendet. Einige Scanner können zusätzlich zum ersten und letzten Impuls auch alle Impulse liefern, die einen definierten Grenzwert überschreiten, so dass einer Winkelmessung mehrere Distanzmessungen zugeordnet werden können. Dies ist zum Beispiel beim Riegl VZ2000 möglich (Riegl Laser Measurement Systems GmbH 2015).

Im Vergleich dazu führt das Phasenvergleichsverfahren im Randbereich zu Mischreflexionen. Dadurch werden gemittelte Abstandsmessungen durchgeführt und Messpunkte können nicht nur auf dem Vorder- oder Hintergrund, sondern auch im Bereich dazwischen lokalisiert werden. Dies ist in Abbildung 3.5b dargestellt. Der Laserstrahl (hellblau) wird hier durch den Rand geteilt, wobei die unterschiedlichen Streckenmessungen den resultierenden Messpunkten zugeordnet werden können. Die Messpunkte befinden sich entweder auf dem Objekt oder auf dem Hintergrund, was durch die kürzeste und längste Streckenmessung dargestellt wird, oder sie befinden sich aufgrund von Mischreflexionen (Streckenmessungen dazwischen) zwischen dem Objekt und dem Hintergrund. Dieser Effekt wird gewöhnlich als Mixed-Pixel-Effekt bezeichnet (Chaudhry et al. 2021).



(a) Darstellung der möglichen Streckenmessungen beim Impulsvergleichsverfahren (b) Darstellung der möglichen Streckenmessungen beim Phasenvergleichsverfahren

Abb. 3.5: Vergleich des Verhaltens beim Umgang mit unvollständigen Laserspots bei Laserscannern mit dem Impulsvergleichsverfahren und dem Phasenvergleichsverfahren.

Neben den geometrischen Informationen werden zusätzlich auch radiometrische Informationen erfasst. Dazu gehören die Intensitäten oder auch die Reflektanz, sowie eventuelle RGB-Informationen. Wie bereits im vorherigen Abschnitt erwähnt, ist die Intensität ein wichtiger Faktor für die Streckenmessung. Allerdings können mittels der radiometrischen Informationen auch weitere Rückschlüsse über das Messobjekt geschlossen werden. Dabei ist zu unterscheiden, ob ein Scanner einen Wert für die Reflektanz oder die Intensität liefert. Während es sich bei der Reflektanz um eine physikalische Größe handelt, die den prozentualen Anteil zwischen ausgestrahlter und empfangener Leistung angibt, handelt es sich bei den Intensitäten um bereits prozessierte Werte. Diese Intensitätswerte liegen dabei im Bereich zwischen null und eins. Bei diesen Werten ist dabei in den wenigsten Fällen bekannt, welche Vorverarbeitungsschritte, wie beispielsweise eine distanzabhängige Korrektur, bereits geräteintern durchgeführt wurde. Auch sind die Umgebungsbedingungen hier entscheidend, da oftmals die

stärkste Reflektion den Wert eins und die schwächste den Wert null annimmt. Somit kann ein Messobjekt in der gleichen Messkonfiguration bei unterschiedlichen Umgebungen unterschiedliche Intensitäten aufweisen. Aus diesem Grund können die Intensitäten hier in erster Linie zur Visualisierung verwendet werden.

Sind zusätzlich eine oder mehrere Kameras in den Laserscanner integriert, so ergibt sich die zusätzliche Möglichkeit, eine kolorierte Punktwolke zu generieren. Bei vielen Herstellern lassen sich dabei Einstellungen bezüglich der gewünschten Bildqualität sowie der Umgebungssituation vornehmen, um ein zufriedenstellendes Ergebnis zu erhalten. Die kolorierten Punktwolken dienen dabei zum einen der Visualisierung der Messdaten und können zum anderen auch für eine später Segmentierung verwendet werden (Kuhlmann und Holst 2017).

3.1.2.4 Unsicherheiten und Fehlerquellen

Neben der Betrachtung der Messprinzipien ist auch die Betrachtung der zu erwartenden Messunsicherheiten von Bedeutung. Im Allgemeinen lässt sich die Genauigkeit der Messungen in drei grundlegende Kategorien einteilen. Dazu gehören die instrumentenspezifischen Fehler, der Einfluss der Umgebung und Atmosphäre und der Einfluss des zu messenden Objekts selbst (Kerekes 2023). Des Weiteren gilt es auch den Einfluss der Scaengeometrie zu beachten.

Instrumentenspezifische Fehler: Zu den instrumentenspezifischen Fehlern gehören dabei die Messgenauigkeiten der Messelemente, also der Winkel- (horizontal und vertikal) und Distanzmessung. Angaben für diese finden sich bei den meisten Herstellern im Datenblatt. Weitere instrumentenspezifische Fehler entstehen durch Abweichungen in der Fertigung des Gerätes. Dazu gehören beispielsweise der Zielachs- und Kippachsfehler. Diese Abweichungen sind dabei mit denen eines Tachymeters vergleichbar. Zusätzlich lassen sich noch weitere Laserscanner spezifische Abweichungen, wie beispielsweise ein Offset des Spiegels, feststellen. Eine detaillierte Darstellung von 18 solcher Abweichungen findet sich in Muralikrishnan et al. (2015). Um diese Abweichungen aus der Fertigung korrigieren zu können und den Angaben im Datenblatt zu entsprechen, werden die meisten Instrumente einer werksseitigen Kalibrierung unterzogen.

Da die Kalibrierparameter sich allerdings im zeitlichen Verlauf ändern können (Lichti 2007) ist eine Überprüfung dieser notwendig. Eine Alternative zur Werkskalibrierung stellt dabei die regelmäßige softwareseitig integrierte Selbstkalibrierung der Geräte, wie beispielsweise beim Trimble X7 (Vogel et al. 2020), dar. Eine weitere Möglichkeit bietet die Selbstkalibrierung durch den Anwender mit einem vordefinierten Messaufbau, um die Kalibrierung nach der Messung anzubringen (Medić et al. 2017).

Atmosphärische Fehler: Zu den Einflüssen der Atmosphäre gehören beispielsweise die Temperatur, der Luftdruck oder auch die Luftfeuchte. Diese Einflüsse sind vor allem bei der Messung langer Distanzen, Distanzen über 200 m, von Bedeutung (Rüeger 1996). Da in dieser Arbeit zum einen recht kurze Strecken (unter 10 m) und zum anderen in Innenräumen gemessen wird, werden die atmosphärischen Einflüsse an dieser Stelle nicht weiter behandelt.

Fehler durch das Messobjekt: Die dritte Gruppe der Unsicherheiten entstehen nun durch das Messobjekt selbst. Dazu gehören zum einen die Geometrie des Objektes und die aus der Messkonfiguration entstehenden Auftreffwinkel des Laserstrahls am Objekt und zum anderen die Oberflächenbeschaffenheit des Messobjektes. Wie bereits in Abschnitt 3.1.2.3 erwähnt, nimmt die Form des Laserspots in Abhängigkeit vom Auftreffwinkel eine eher runde oder eher elliptische Form an. Hier gilt es nun, die bereits angesprochenen Effekte durch unvollständige Laserspots zu berücksichtigen.

Weitere Effekte, welche durch das Messobjekt selbst hervorgerufen werden, lassen sich auf die Oberflächenbeschaffenheit des Objektes zurückführen. Dabei sind sowohl die Struktur der Oberfläche (rau, glatt), als auch die optischen Eigenschaften (Farbe, matt, glänzend) zu beachten. Je nach Oberflächenstruktur, Material und Farbe wird der Laserstrahl dabei unterschiedlich reflektiert. Im einfachsten Fall unterscheidet man dabei drei

Fälle, die spiegelnde Reflexion, die diffuse Reflexion sowie die diffuse Reflexion mit Spiegelung (Jutzi et al. 2017). Unterschiedliche Materialien können dabei auch einen Einfluss auf die Distanzmessung haben (Linzer und Neuner 2022). Dies zeigt sich auch daran, dass die Genauigkeit der Distanzmessung nach Wujanz et al. (2017) von den gemessenen Intensitäten abhängt.

Um Messungen von stark glänzenden oder auch transparenten Oberflächen durchführen zu können, stehen unterschiedliche Scanningsprays zur Verfügung, die eine transparente oder auch weiße, mattierende Schicht auf der Oberfläche bilden. Diese haben dabei eine Schichtdicke von etwa 8-15 μm und somit im Vergleich zu den erreichbaren Messgenauigkeiten des Laserscanners keinen Einfluss auf das Ergebnis der Distanzmessung. Je nach Art des Scanningsprays zeigt diese Schicht eine zeitlich begrenzte Auswirkung (AESUB 2023).

3.1.2.5 Punktwolkenvorverarbeitung

Um die Punktwolken für eine spätere Qualitätssicherung verwenden zu können, ist nach der eigentlichen Messung noch eine Vorverarbeitung notwendig. Dabei sind vor allem die Schritte der Filterung und Registrierung relevant. Diese werden nun im folgenden Abschnitt kurz betrachtet.

Da bei der Messung mittels Laserscannern häufig mehrere Einzelscans aufgenommen werden, um eine vollständige Abdeckung des gewünschten Objektes zu realisieren, ist die Registrierung dieser Einzelscans notwendig, damit alle Messdaten anschließend in einem einheitlichen Koordinatensystem vorliegen. Sollen die Scans zusätzlich mittels vordefinierter Punkte in ein übergeordnetes Koordinatensystem transformiert werden, spricht man auch von einer Georeferenzierung. Mathematisch wird in beiden Fällen eine 3D-Helmerttransformation, wie in Abschnitt 3.2.1 dargestellt, durchgeführt. Bei der Referenzierung wird allerdings kein Maßstab geschätzt, während dieser bei der Georeferenzierung benötigt wird. Die Bestimmung der Transformationsparameter kann dabei zielzeichenbasiert, softwarebasiert oder auch hardwarebasiert erfolgen.

Ein klassischer Ansatz dabei ist die zielzeichenbasierte Registrierung. Hierfür werden Zieltafeln in der Scanumgebung angebracht, die später in mehreren Scans sichtbar sind. Diese können dann später in den Einzelscans detektiert werden und die entsprechenden Transformationsparameter bestimmt werden. Sind die Koordinaten der Zielzeichen zudem im übergeordneten System bekannt, ist auch eine Georeferenzierung der Punktwolke möglich (Kuhlmann und Holst 2017).

Neben der Registrierung ist die Filterung der Daten notwendig, um Ausreißer aus der Messung entfernen zu können. Dabei lassen sich unterschiedliche Filtermethoden auf die Punktwolken anwenden. Eine Übersicht über unterschiedliche Ansätze der Filterung findet sich beispielsweise in Han et al. (2017). Bei der Filterung ist zu beachten, dass die Filterung im Idealfall für jeden Laserscannerstandpunkt separat erfolgen sollte, um so Effekte, die durch eine entsprechenden Scankonfiguration entstehen, ebenfalls eliminieren zu können.

Ein weiterer Schritt der Punktwolkenvorverarbeitung, der im Rahmen dieser Arbeit benötigt wird, ist eine Vorsegmentierung des Messobjektes. Die Segmentierung kann dabei händisch oder bei referenzierten Daten mit einer zuvor definierten Bounding Box erfolgen. Allerdings ist auch in diesem Fall eine manuelle Überprüfung zu empfehlen, um etwaige Störobjekte, wie beispielsweise ein Roboterarm während der Fertigung, zusätzlich entfernen zu können.

3.2 Mathematische Grundlagen und Ausgleichungsrechnung

Durch die enormen Datenmengen, die mittels terrestrischer Laserscanner erzeugt werden, werden Methoden benötigt, um diese weiter verarbeiten zu können. Dabei sind die Methoden der Schätzverfahren, Ausgleichungsrechnung und Fehlerlehre, sowie grundlegende Konzepte der räumlichen Geometrie ein zentraler Bestandteil. In den folgenden Abschnitten werden diese daher näher betrachtet.

3.2.1 Koordinatentransformation

Für die Überführung verschiedener Mess- und Planungsdaten in ein gemeinsames Koordinatensystem sind Koordinatentransformationen von großer Bedeutung. Je nach Eigenschaften des Ausgangs- und des Zielkoordinatensystems werden hierfür unterschiedliche Transformationen benötigt. Dabei ist neben der Dimension (2-dimensional (2D) oder 3-dimensional (3D)) auch die Orthogonalität und Skalierung der Achsen entscheidend. Im Folgenden wird nun der Fall zweier 3D kartesischer Koordinatensysteme betrachtet. In diesem Fall kommt die räumliche Ähnlichkeitstransformation, auch 3D-Helmerttransformation, zur Anwendung. Bei dieser handelt es sich um eine formtreue Transformation, welche eine Orthogonalität der Achsen beider Systeme voraussetzt. Zusätzlich wird eine gleiche Skalierung aller Achsen innerhalb eines Systems vorausgesetzt.

Diese Transformationsparameter beschreiben im räumlichen Fall die drei Translationen t_x, t_y und t_z , die die Verschiebung des Ursprungs darstellen. Außerdem werden die drei Rotationswinkel $\alpha_{rot}, \beta_{rot}$ und γ_{rot} benötigt. Diese beschreiben die Rotation der Koordinatenachsen vom Ausgangskordinatensystem ins Zielkoordinatensystem (Eichhorn et al. 2013; Kahmen 1993). Mit diesen ergibt sich die Transformation durch

$$\begin{pmatrix} X_Z \\ Y_Z \\ Z_Z \end{pmatrix} = m \cdot \mathbf{R} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix}, \quad (3.8)$$

mit X_Z, Y_Z, Z_Z : Punktkoordinaten im Zielsystem
 X, Y, Z : Punktkoordinaten im Ausgangssystem
 m : Maßstabsfaktor
 $\mathbf{R}$: Rotationsmatrix.

Die Rotationsmatrix setzt sich dabei aus den Rotationen um die einzelnen Achsen zusammen und ergibt sich durch

$$\mathbf{R}(\alpha_{rot}, \beta_{rot}, \gamma_{rot}) = \mathbf{R}_1(\alpha_{rot}) \cdot \mathbf{R}_2(\beta_{rot}) \cdot \mathbf{R}_3(\gamma_{rot}). \quad (3.9)$$

Dabei sind die Rotationsmatrizen gegeben mit

$$\mathbf{R}_1(\alpha_{rot}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_{rot} & \sin \alpha_{rot} \\ 0 & -\sin \alpha_{rot} & \cos \alpha_{rot} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{R}_2(\beta_{rot}) = \begin{pmatrix} \cos \beta_{rot} & 0 & -\sin \beta_{rot} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta_{rot} & 0 & \cos \beta_{rot} \end{pmatrix}, \quad (3.10)$$

$$\mathbf{R}_3(\gamma_{rot}) = \begin{pmatrix} \cos \gamma_{rot} & \sin \gamma_{rot} & 0 \\ -\sin \gamma_{rot} & \cos \gamma_{rot} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Da die Matrizenmultiplikation nicht kommutativ ist, muss hierbei auf die Reihenfolge der Rotationen geachtet werden. Bei den Rotationsmatrizen handelt es sich außerdem um orthonormale Matrizen. Dies bedeutet, dass die Inverse der Matrix der Transponierten der Matrix entspricht. Aus diesem Grund kann für die Umkehrtransformation die transponierte $\mathbf{R}'$ anstelle der Inversen $\mathbf{R}^{-1}$ verwendet werden (Kahmen 1993).

Um die Transformationsparameter bestimmen zu können, werden identische Punkte herangezogen. Um somit alle sieben Transformationsparameter bestimmen zu können werden mindestens sieben Koordinatenpaare benötigt. Da jeder identische Punkt drei Koordinatenpaare aufweist, werden somit mindestens drei identische Punkte benötigt. Da in diesem Fall bereits eine Überbestimmung vorliegt, können die Transformationsparameter mittels Ausgleichung (vgl. 3.2.3.1) bestimmt werden. Wird kein Maßstab für die Transformation benötigt, wie beispielsweise bei der Registrierung von Einzelscans, verringert sich die Anzahl der Transformationsparameter auf sechs.

3.2.2 Varianz-Kovarianzfortpflanzungsgesetz

Da Messungen in der Realität nie fehlerfrei vorliegen, aufgrund von Instrumentenfehlern oder Umgebungsbedingungen, ist eine qualitative Beurteilung der Ergebnisse mittels statistischer Methoden möglich. Um

Unsicherheiten und Fehler, die bei Messungen entstehen, im Prozess der Auswertung betrachten zu können, kommt häufig das Varianz-Kovarianzfortpflanzungsgesetz zur Anwendung. Mit diesem können bei bekanntem mathematischen Modell die Varianzen der Zielgrößen in Abhängigkeit der Ausgangsgrößen bestimmt werden. Dies wird häufig benötigt, da nicht die direkt gemessenen Größen, sondern die daraus abgeleiteten Größen von Interesse sind (Niemeier 2008). Hierfür wird streng genommen ein linearer Zusammenhang zwischen den Eingangs- und Ausgangsgrößen vorausgesetzt. Liegt dieser nicht vor, ist eine Linearisierung notwendig. Allgemein gilt hierbei der Zusammenhang

$$\Sigma_{XX} = F \cdot \Sigma_{LL} \cdot F', \quad (3.11)$$

mit Σ_{XX} : Kovarianzmatrix der Zielgrößen
 Σ_{LL} : Kovarianzmatrix der Eingangsgrößen
 F : Jacobi-Matrix des funktionalen Modells.

Die F -Matrix beinhaltet hierbei die partiellen Ableitungen oder auch die Differenzenquotienten der Eingangsgrößen nach den Ausgangsgrößen. Die partiellen Ableitungen werden hierbei benötigt, da der funktionale Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen in der Praxis meist nicht linear ist. Daher ist eine Linearisierung notwendig. Eine Herleitung des Varianz-Kovarianzgesetzes sowie der notwendigen Linearisierung findet sich beispielsweise in (Niemeier 2008). Für ein funktionales Modell $f(X)$ ergibt sich die Jacobi-Matrix entsprechend durch

$$F = \begin{bmatrix} \frac{\partial f(X_1)}{\partial L_1} & \frac{\partial f(X_1)}{\partial L_2} & \cdots & \frac{\partial f(X_1)}{\partial L_n} \\ \frac{\partial f(X_2)}{\partial L_1} & \frac{\partial f(X_2)}{\partial L_2} & \cdots & \frac{\partial f(X_2)}{\partial L_n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\partial f(X_m)}{\partial L_1} & \frac{\partial f(X_m)}{\partial L_2} & \cdots & \frac{\partial f(X_m)}{\partial L_n} \end{bmatrix}. \quad (3.12)$$

An dieser Stelle muss zudem darauf hingewiesen werden, dass dieser Zusammenhang streng nur für normalverteilte Zufallsgrößen gilt und somit alle Eingangsgrößen einer Normalverteilung folgen müssen. Ist diese Voraussetzung nicht erfüllt, oder es liegt kein expliziter funktionaler Zusammenhang vor, so kann alternativ die Monte-Carlo Simulation angewandt werden. Da diese in dieser Arbeit allerdings nicht verwendet wird, da die hier normalverteilte Größen mit bekanntem funktionalen Zusammenhang betrachtet werden, wird dies an dieser Stelle nicht weiter betrachtet. Weiterführende Erklärungen hierzu finden sich beispielsweise in Thomopoulos (2013).

3.2.3 Schätzverfahren

Da Messungen nie fehlerfrei vorliegen (vgl. Abschnitt 3.2.2), werden häufig mehr Messungen als mathematisch notwendig durchgeführt, um aus den Messgrößen die gewünschten Zielgrößen ableiten zu können. Dies führt zu einem überbestimmten Gleichungssystem, welches nicht eindeutig lösbar ist. In den Naturwissenschaften und der Technik wird dabei zumeist das Schätzverfahren der „Methode der kleinsten Quadrate“, auch als „Fehlerquadratmethode“ oder „Schätzung nach L2-Norm“ bekannt, angewendet (Niemeier 2008). Die Methode der kleinsten Quadrate wurde von Gauß (1809) veröffentlicht. Das Ziel dieses Ansatzes ist es, die Summe der Quadrate der Verbesserungen zu minimieren. Dabei gilt allgemein

$$\Omega = v^T \cdot P \cdot v \rightarrow \min, \quad (3.13)$$

mit Ω : Verbesserungsquadratsumme
 v : Vektor der Verbesserungen
 P : Gewichtsmatrix.

Für die Ausgleichung wird dann in den Allgemeinfall der Ausgleichung nach dem Gauß-Helmert-Modell, und in die Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen, dem Gauß-Markov-Modell, unterschieden. Der

Unterschied dabei ergibt sich durch das verwendete funktionale Modell (Niemeier 2008). Im Folgenden werden die beiden Verfahren sowie die Hauptkomponentenanalyse und ihre Anwendung näher betrachtet.

3.2.3.1 Gauß-Markov-Modell

Bei der Ausgleichung nach dem Gauß-Markov-Modell kann jede Beobachtung L_i als Funktion der Unbekannten $\mathbf{X}$ dargestellt werden

$$L_i = F_i(X_1, X_2, X_3, \dots, X_u) = F_i(\mathbf{X}). \quad (3.14)$$

Für den vollständigen Ansatz des Gauß-Markov-Modells wird neben einem funktionalen Modell auch ein stochastisches Modell der Eingangsgrößen benötigt. Für dieses gilt allgemein

$$\begin{aligned} \text{funktionales Modell: } \mathbf{L} + \mathbf{v} &= \mathbf{A} \cdot \mathbf{X}, \\ \text{stochastisches Modell: } \Sigma_{ll} &= \sigma_0^2 \cdot \mathbf{Q}_{ll}, \end{aligned} \quad (3.15)$$

mit $\mathbf{L}$: Vektor der Beobachtungen
 $\mathbf{v}$: Vektor der Verbesserungen
 $\mathbf{A}$: Koeffizientenmatrix der Ausgleichung, partielle Ableitungen nach den Unbekannten
 $\mathbf{X}$: Parametervektor
 Σ_{ll} : Kovarianzmatrix der Beobachtungen
 σ_0^2 : a-priori Varianzfaktor
 $\mathbf{Q}_{ll}$: Kofaktormatrix der Beobachtungen.

Die Gewichtsmatrix $\mathbf{P}$ ergibt sich nun als Inverse der Kofaktormatrix der Beobachtungen $\mathbf{Q}_{ll}$. Der Lösungsvektor der Unbekannten ergibt sich damit durch

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{l}. \quad (3.16)$$

Neben den ausgeglichenen Beobachtungen können nun auch die Verbesserungen sowie die Varianzen und Kovarianzen der geschätzten Beobachtungen bestimmt werden. Zusätzlich stehen verschiedene Proben zur Verfügung, um die Korrektheit der durchgeführten Ausgleichung zu überprüfen. Diese werden an dieser Stelle nicht weiter betrachtet, eine gute Übersicht findet sich aber beispielsweise in Koch (1980), Niemeier (2008) oder Jäger et al. (2016).

3.2.3.2 Gauß-Helmert-Modell

Das Gauß-Helmert-Modell wird dann angewendet, wenn eine Trennung zwischen Beobachtungen und Unbekannten nicht möglich ist, da in einem funktionalen Zusammenhang mehrere Beobachtungen und Unbekannte vorkommen. Damit gilt der allgemeine Ansatz

$$\mathbf{F}(\mathbf{L}, \mathbf{X}) = \mathbf{0}. \quad (3.17)$$

Zur Bestimmung der Unbekannten wird nun zunächst ein Widerspruchsvektor $\mathbf{w}$ benötigt. Dieser ergibt sich durch

$$\mathbf{w} = \mathbf{F}(\mathbf{L}, \mathbf{X}_0), \quad (3.18)$$

mit $\mathbf{L}$: Vektor der Beobachtungen
 $\mathbf{X}_0$: Vektor der Näherungswerte für die Unbekannten.

Zusätzlich wird auch hier wie bereits in Abschnitt 3.2.3.1 die $\mathbf{A}$ -Matrix mit den Ableitungen nach den Unbekannten benötigt. Zusätzlich wird die $\mathbf{B}$ -Matrix mit den Ableitungen nach den Beobachtungen benötigt. Damit lässt sich die Ausgleichung nach dem Gauß-Helmert-Modell kompakt schreiben als

$$\mathbf{B} \cdot \mathbf{v} + \mathbf{A} \cdot \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{w} = \mathbf{0}. \quad (3.19)$$

Die Schätzung der Unbekannten ergibt sich nun durch

$$\hat{\mathbf{x}} = - \left((\mathbf{B} \cdot \mathbf{Q}_u \cdot \mathbf{B}^T)^{-1} \cdot \mathbf{A} \cdot \left(\mathbf{A}^T \cdot (\mathbf{B} \cdot \mathbf{Q}_u \cdot \mathbf{B}^T)^{-1} \cdot \mathbf{A} \right)^{-1} \right)^T \cdot \mathbf{w}, \quad (3.20)$$

mit $\mathbf{Q}_u$: Kofaktormatrix der Beobachtungen.

Auch hier können nun wieder, zusätzlich zu den bestimmten Unbekannten, die Verbesserungen, Varianzen und Kovarianzen der Beobachtungen und Unbekannten bestimmt werden. Außerdem stehen auch hier verschiedene Proben zur Überprüfung der durchgeführten Ausgleichung zur Verfügung. Da diese allerdings nicht den zentralen Bestandteil dieser Arbeit darstellen, werden diese an dieser Stelle nicht weiter betrachtet. Für eine detaillierte Darstellung wird daher wieder auf Koch (1980), Niemeier (2008) und Jäger et al. (2016) verwiesen.

3.2.3.3 Hauptkomponentenanalyse

Bei der Hauptkomponentenanalyse oder auch häufig aus dem Englischen als Principal Component Analysis (PCA) bekannten Verfahren, handelt es sich um ein Verfahren, welches auch unter dem Begriff Hauptachsentransformation bekannt ist. Dieses wurde zunächst von Pearson (1901) entwickelt und später von Hotelling (1933) weiterentwickelt. Ziel dabei ist es eine Transformation der Hauptachsen durchzuführen, so dass die Richtung der Achse der maximalen Varianz die Hauptkomponente darstellt (Wickens 2014). Für die Bestimmung wird daher zunächst die Kovarianzmatrix der Punktwolke benötigt. Dafür werden zunächst die Residuen aller Punkte zum Mittelwert, dem Schwerpunkt der Punktwolke, berechnet. Der Schwerpunkt ergibt sich durch

$$\mathbf{a} = \frac{\sum_{i=1}^n \mathbf{X}_{koor}}{n}, \quad (3.21)$$

mit $\mathbf{X}_{koor}$: Punktkoordinaten
 n : Anzahl der Punkte.

Damit ergeben sich dann die Residuen durch,

$$\delta \mathbf{X}_{koor} = \mathbf{X}_{koor} - \mathbf{J} \cdot \mathbf{a}, \quad (3.22)$$

mit $\delta \mathbf{X}_{koor}$: Residuen der Punktwolke
 $\mathbf{X}_{koor}$: Punktkoordinaten der Punktwolke
 $\mathbf{J}$: Einsmatrix (Matrix mit 1 der Dimension) $n \times 3$.

Aus diesen Residuen kann nun die Varianz-Kovarianzmatrix der Punktwolke bestimmt werden. Für diese gilt

$$\Sigma_u = \frac{\delta \mathbf{X}_{koor}^T \cdot \delta \mathbf{X}_{koor}}{n - 1}, \quad (3.23)$$

mit Σ_u : Varianz-Kovarianzmatrix der Beobachtungen
 n : Anzahl der Punkte.

Für die Hauptachsentransformation werden nun die Eigenwerte der Kovarianzmatrix bestimmt. Dabei muss das folgende lineare Gleichungssystem gelöst werden

$$\mathbf{0} = (\Sigma_u - \lambda_{eig} \cdot \mathbf{I}), \quad (3.24)$$

mit λ_{eig} : Eigenwert
 $\mathbf{I}$: Einheitsmatrix.

Für jeden dieser Eigenwerte λ_{eig_i} kann nun noch der zugehörige Eigenvektor $\mathbf{v}_{\text{eig}_i}$ bestimmt werden. Dieser ergibt sich durch Lösung des Gleichungssystems

$$(\mathbf{A} - \lambda_{\text{eig}_i} \cdot \mathbf{I}) \cdot \mathbf{v}_{\text{eig}_i} = \mathbf{0}. \quad (3.25)$$

Der Eigenvektor zum größten Eigenwert gibt dann die Hauptrichtung der verwendeten Punktwolke an.

3.2.3.4 Linienschätzung im 3D-Raum

Um eine Gerade im Raum beschreiben zu können, muss sowohl die Lage als auch die Orientierung der Geraden bekannt sein. Dabei ist die Lage durch den Schwerpunkt des Datensatzes gegeben und ergibt sich nach Gleichung (3.21). Für die Berechnung der Richtung müssen nun zunächst die Residuen der Punktwolke zum Schwerpunkt der Punktwolke $\mathbf{a}$, dem Stützpunkt der Geraden, bestimmt werden. Damit kann anschließend die Kovarianzmatrix berechnet werden. Diese ergeben sich durch die Gleichungen (3.22) und (3.23). Anschließend können die Eigenwerte und Eigenvektoren der Matrix Σ_{ll} berechnet werden. Da es sich bei der Kovarianzmatrix um eine symmetrische positiv-definite Matrix handelt, gilt $\lambda_{\text{eig}_1}, \lambda_{\text{eig}_2}, \lambda_{\text{eig}_3} \in \mathbb{R}$ und $\lambda_{\text{eig}_1} \geq \lambda_{\text{eig}_2} \geq \lambda_{\text{eig}_3}$. Die Richtung der Geraden ergibt sich nun aus dem Eigenvektor zum größten Eigenwert, da dieser in die Richtung der größten Ausdehnung der Daten zeigt. Je stärker λ_{eig_1} dabei im Vergleich zu λ_{eig_2} und λ_{eig_3} ist, desto größer ist die Ausdehnung der Punktwolke in Richtung der Geraden. Eine alternative Möglichkeit zur Geradenschätzung bietet das in Abschnitt 3.2.3.2 vorgestellte Gauß-Helmert Modell. Mit diesem können zusätzlich die Genauigkeiten der geschätzten Parameter bestimmt werden.

3.2.4 Berechnung des nächsten Punktes von mehrerer windschiefen Geraden im Raum

Die Berechnung von Schnittpunkten zweier Geraden im Raum ist vor allem bei geschätzten Geraden aus Messungen durch die vorhandenen Unsicherheiten in Messung und Schätzung nicht möglich. Im 2D haben zwei Geraden immer entweder genau einen Schnittpunkt oder keinen Schnittpunkt, wenn die Geraden parallel zueinander sind. Geht man von der Ebene in den Raum über, so kommt die Option der windschiefen Geraden hinzu, die keinen gemeinsamen Schnittpunkt haben, aber auch nicht parallel zueinander verlaufen. Windschiefe Geraden entstehen häufig nach Geradenschätzungen. Um den Punkt zu bestimmen, dessen Summe der quadrierten Abstände zu allen betrachteten Geraden minimal ist, wird die Berechnung des Schnittpunktes ersetzt durch die Berechnung des Punktes $\mathbf{p}$, der zu den betrachteten Geraden einen minimalen Abstand aufweist (vgl. Abbildung 3.6). Soll nun dieser Punkt für eine beliebige Anzahl von Geraden im Raum bestimmt werden, so gilt es die Summe der quadrierten Abstände der einzelnen Geraden zum nächsten Punkt zu minimieren.

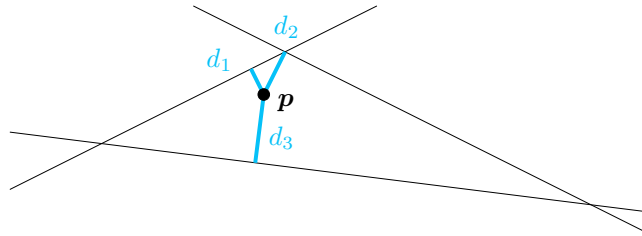


Abb. 3.6: Beispiel zur Bestimmung des Punktes mit dem minimalen Abstand dreier Geraden im Raum.

Das Verfahren zur Berechnung nach Traa (2013) wird im Folgenden vorgestellt. Für den quadrierten Abstand $d_{3D_i}^2$ einer Geraden g_i zum Schnittpunkt $\mathbf{p}$ gilt

$$d_{3D_i}^2 = \|\mathbf{p} - \mathbf{a}_i\|^2 - \left((\mathbf{p} - \mathbf{a}_i)^\top \mathbf{b}_i \right)^2 = (\mathbf{p} - \mathbf{a}_i)^\top (\mathbf{p} - \mathbf{a}_i) - \left((\mathbf{p} - \mathbf{a}_i)^\top \mathbf{b}_i \right)^2, \quad (3.26)$$

mit d_{3D_i} : Abstand der Gerade i zum berechneten Punkt
 $\mathbf{p}$: Punktkoordinaten
 $\mathbf{a}_i$: Stützpunkt der Gerade i
 $\mathbf{b}_i$: Richtungsvektor der Gerade i
 $\left((\mathbf{p} - \mathbf{a}_i)^\top \mathbf{b}_i\right)$: Projektion von $\mathbf{p} - \mathbf{a}_i$ auf die Gerade i .

Für die Summe der quadrierten Abstände aller Linien ergibt sich dementsprechend

$$\sum_i d_{3D_i}^2 = \sum_i \left((\mathbf{p} - \mathbf{a}_i)^\top (\mathbf{p} - \mathbf{a}_i) - \left((\mathbf{p} - \mathbf{a}_i)^\top \mathbf{b}_i \right)^2 \right). \quad (3.27)$$

Da eine Minimierung durchgeführt werden soll, ist die Zielfunktion nach den Koordinaten des Punktes $\mathbf{p}$ abzuleiten. Für die Bestimmung des minimalen Abstandes wird diese gleich null gesetzt. Damit ergibt sich

$$\sum_i \left(2(\mathbf{p} - \mathbf{a}_i) - 2 \left((\mathbf{p} - \mathbf{a}_i)^\top \mathbf{b}_i \right) \mathbf{b}_i \right) = \mathbf{0}, \quad (3.28)$$

durch Umformung ergibt sich

$$\sum_i (\mathbf{p} - \mathbf{a}_i) = \sum_i \left(\mathbf{b}_i \mathbf{b}_i^\top \right) (\mathbf{p} - \mathbf{a}_i). \quad (3.29)$$

Da die Koordinaten des Punktes $\mathbf{p}$ bestimmt werden sollen, kann die Gleichung nun nach $\mathbf{p}$ umgestellt werden

$$\left(\sum_i \left(\mathbf{I} - \mathbf{b}_i \mathbf{b}_i^\top \right) \right) \mathbf{p} = \sum_i \left(\mathbf{I} - \mathbf{b}_i \mathbf{b}_i^\top \right) \mathbf{a}_i. \quad (3.30)$$

Damit ergibt sich letztendlich für die Berechnung der Punktkoordinaten

$$\mathbf{p} = \left(\sum_i \mathbf{I} - \mathbf{b}_i \mathbf{b}_i^\top \right)^{-1} \left(\sum_i \left(\mathbf{I} - \mathbf{b}_i \mathbf{b}_i^\top \right) \mathbf{a}_i \right). \quad (3.31)$$

Zusätzlich kann nun bei der Berechnung des gemeinsamen Punktes auch eine Gewichtung der einzelnen Linien eingeführt werden. Hierbei handelt es sich um einen Konfidenzwert c_i für jede Linie. Damit ergibt sich die Ausgangsgleichung zu

$$\sum_i d_i^2 = \sum_i c_i \left((\mathbf{p} - \mathbf{a}_i)^\top (\mathbf{p} - \mathbf{a}_i) - \left((\mathbf{p} - \mathbf{a}_i)^\top \mathbf{b}_i \right)^2 \right). \quad (3.32)$$

Für die finale Berechnung des Punktes ergibt sich damit

$$\mathbf{p} = \left(\sum_i c_i \left(\mathbf{I} - \mathbf{b}_i \mathbf{b}_i^\top \right) \right)^{-1} \left(\sum_i c_i \left(\left(\mathbf{I} - \mathbf{b}_i \mathbf{b}_i^\top \right) \mathbf{a}_i \right) \right). \quad (3.33)$$

Bei dem hier verwendeten Konfidenzwert handelt es sich um den Kehrwert der Varianz einer einzelnen Geraden. Dies bedeutet, dass eine geringe Varianz einer Geraden zu einem hohen Konfidenzwert der Geraden führt und demnach auch zu einer hohen Gewichtung der Geraden bei der Punktberechnung.

3.3 Methoden der Segmentierung

Die Segmentierung von Punktwolken in einzelne Teilelemente ist ein wichtiger Bestandteil für die Betrachtung und Analyse von gemessenen Objekten. Im Folgenden werden daher die verschiedenen Möglichkeiten dargestellt

und erläutert.

Unter Segmentierung versteht man im Allgemeinen die Zerlegung einer Datenmenge oder Gruppe in einzelne Abschnitte oder auch Segmente. Das Vorgehen der Segmentierung findet heutzutage in vielen Fachbereichen wie beispielsweise der Biologie, Linguistik oder auch Ökonomie Anwendung um effizient Strukturen zu erkennen. Auch im Bereich der digitalen Bildverarbeitung ist die Segmentierung ein wichtiges Teilgebiet, welches einen zentralen Bestandteil bildet, um Prozesse automatisieren zu können. Dazu gehört neben der Qualitätssicherung auch die Steuerung von Robotern, oder Anwendungen im Bereich des autonomen Fahrens (Arezoumand et al. 2013; Dürr 2023; Lu et al. 2023). Die ersten Algorithmen zur Segmentierung entstanden in den 1960er Jahren, um in 2D Bildern Kanten zu erkennen (Szeliski 2011). In den folgenden Jahren war dann die Entwicklung immer effizienterer Segmentierungsalgorithmen ein zentraler Schwerpunkt der Forschung.

Die Segmentierung selbst lässt sich dabei in unterschiedliche Teilbereiche einteilen. Eine Möglichkeit der Einteilung besteht dabei in der Analyse der Information, welche einem bestimmten Pixel, in 2D, oder einem Punkt, in 3D, zugeordnet wird. Hierbei wird meist in drei Kategorien unterschieden (Mohan und Valada 2021):

- **Semantische Segmentierung:** Hierbei wird jedem Pixel oder Punkt eine Klasse zugeordnet. Wendet man dies beispielsweise auf die Punktwolke eines Gebäudes an, so kann eine Unterteilung in die Klassen Wand oder Decke erfolgen. Allerdings wird keine Unterteilung in einzelne Wände durchgeführt.
- **Instanz-Segmentierung:** Bei dieser Art der Segmentierung wird eine Segmentierung in unterschiedliche Instanzen durchgeführt. Auf das vorherige Beispiel angewandt, bedeutet dies eine Segmentierung der Punktwolke in die einzelnen Gebäudeelemente, die Flächen der Wände und Decken, nicht aber die Zuordnung des Ergebnisses einer Klasse. Es ist daher nicht bekannt, ob es sich bei der segmentierten Fläche um eine Wand oder eine Decke handelt.
- **Panoptische Segmentierung:** Bei dieser Segmentierung werden nun die beiden vorherigen Ansätze kombiniert und es kann jedem Datenpunkte somit sowohl eine Klasse als auch eine Instanz zugeordnet werden. Auf das vorherige Beispiel angewendet, bedeutet dies eine Segmentierung der Punktwolke in die einzelnen Wände oder Decken sowie eine Zuordnung, zu welcher dieser Klassen der segmentierte Ausschnitt gehört.

Eine weitere Möglichkeit der Kategorisierung stellt die Einteilung nach den verwendeten Verfahren dar. Diese wird beispielsweise in Lindner (2009) und Jähne (2012) verwendet. Hierbei erfolgt eine Unterscheidung in die folgenden Verfahren

- **Pixelorientierte Verfahren:** Bei diesem Verfahren wird zunächst für jedes Pixel oder jeden Datenpunkt entschieden, ob dieser zum Segment gehört oder nicht. Dabei kann zusätzlich die Umgebung mitberücksichtigt werden. Das Ergebnis stellt dabei zunächst kein zusammenhängendes Objekt dar. Dieses Verfahren kommt häufig zum Einsatz, um aus einem Grauwertbild ein Binärbild zu generieren. Eine detaillierte Erläuterung findet sich beispielsweise in Jähne (2012).
- **Kantenorientierte Verfahren:** Im Gegensatz zum vorherigen Verfahren, bei dem jeder Datenpunkt einem Segment zugeordnet wurde, werden hier die Grenzen zwischen unterschiedlichen Segmenten detektiert. Diese kann in Form einer Linie vorliegen, aber auch in Form eines beliebigen Polygons vorkommen. Weitergehende Erläuterungen hierzu finden sich unter anderem in Jähne (2012), Dolapsaki und Georgopoulos (2021) und Aggarwal et al. (2024).
- **Regionenorientierte Verfahren:** Ziel dieses Verfahren ist es zusammenhängende Objekte zu klassifizieren. Dabei wird der Farb- oder Intensitätswert eines jeden Datenpunktes betrachtet und mit einem oder mehreren Schwellenwerten verglichen. Aus diesem Grund ist das Verfahren häufig auch als Schwellenwertsegmentierung bekannt. Weiterführende Literatur hierzu findet sich in Kaganami und Beiji (2009), Jähne (2012) und Karthick et al. (2014).
- **Cluster-Verfahren:** Bei diesem Verfahren besteht das Ziel darin, die vorhandenen Daten in Cluster mit ähnlichen Eigenschaften zu unterteilen. Diese Ähnlichkeit kann dabei beispielsweise durch die räumliche Lage festgestellt werden (Forsyth 2012).

- **Modellbasierte Verfahren:** Diese Verfahren können dann angewendet werden, wenn die exakte Form eines Objektes im Bild oder Raum bekannt ist. Ist diese Form bekannt, so können damit auch lückenhaft dargestellte Objekte klassifiziert und segmentiert werden (Jähne 2012).
- **Texturorientierte Verfahren:** Ziel hierbei ist es durch eine Detektion der unterschiedlichen Texturen, welche in der Datenmenge vorkommen, eine Klassifizierung anhand dieser durchzuführen und den Wechsel als Objektgrenze zu verwenden. Dies ist beispielsweise möglich, wenn Objekte starke Rillen oder ähnliches aufweisen (Brock et al. 1996).

In dieser Arbeit ist vor allem die panoptische Segmentierung von Bedeutung und es werden regionenorientierte, clusterbasierte und modellbasierte Verfahren zur Segmentierung verwendet. Neben den verschiedenen Arten der Segmentierung ist auch die Evaluierung des Ergebnisses der Segmentierung ein zentraler Bestandteil (Wang et al. 2020). Diese verschiedenen Methoden der Evaluierung lassen sich dabei nach Zhang (1996) und Chen und Zhu (2019) in die subjektive und objektive Evaluierung unterteilen. Bei der subjektiven Evaluierung wird hierbei das Segmentierungsergebnis von einem Menschen beurteilt. Ein Nachteil dieses Ansatzes ist dabei, dass unterschiedliche Personen eine unterschiedliche Beurteilung des Ergebnisses vornehmen können und somit das Ergebnis beeinflussen. Bei der objektiven Evaluierung wird zunächst die Performance des Algorithmus für einen spezifischen Anwendungsfall betrachtet. Zusätzlich kann die Segmentierung mit einer bekannten Referenzsegmentierung, welche auch als „Ground Truth“ bezeichnet wird, verglichen werden. Da es sich auch bei diesen um händisch segmentierte Daten handeln kann, ist auch hier eine gewisse Subjektivität vorhanden. Da die Segmentierung in dieser Arbeit nur einen Zwischenschritt und nicht das finale Ergebnis darstellt, werden diese Evaluierungsmethoden an dieser Stelle nicht weiter behandelt. Tiefergehende Erklärungen hierzu finden sich beispielsweise in Zhang (1996), Chen und Zhu (2019) und Wang et al. (2020). Im Folgenden werden nun die in dieser Arbeit angewandten Segmentierungsalgorithmen näher betrachtet.

3.3.1 K-Means

Der K-Means-Algorithmus ist ein Verfahren, welches zur Clusteranalyse verwendet werden kann. Hierbei werden die Daten, ein n -dimensionaler Merkmalsvektor, die der Clusterung zu Grunde liegen, einer zuvor definierten Anzahl an Clustern zugeordnet. Das Verfahren wurde zunächst von Steinhaus (1956) veröffentlicht. Unter dem Namen K-Means wurde das Verfahren dann erstmals von MacQueen (1967) veröffentlicht. Das Ziel des Verfahrens ist es, die vorkommenden Objekte, oder auch Daten, so zu clustern, dass die Summe der quadrierten Abweichungen von den Clusterzentren minimal wird. Während es sich bei den ursprünglichen Implementierungen meist um Ein-Schritt-Verfahren handelte, wird das Verfahren heutzutage iterativ angewandt. Die Grundlage des Verfahrens ist die Clusterung durch Varianzminimierung (Ester und Sander 2000). Bei der Durchführung des Verfahrens werden zunächst k Clusterzentren definiert. Diese können zufällig gewählt werden oder zu Beginn des Algorithmus definiert werden. Anschließend wird der Abstand aller Datenpunkte zu den jeweiligen Zentren berechnet. Ein Punkt wird nun dem Cluster zugeordnet, dem er am nächsten liegt und damit den geringsten Beitrag zur Erhöhung der Gesamtvarianz liefert. Diese Gesamtvarianz Ω ergibt sich durch

$$\Omega = \sum_{i=1}^k \sum_{X_{koor_j} \in S_i} \|X_{koor_j} - j\|^2, \quad (3.34)$$

mit Ω : Residuenquadratsumme
 k : Anzahl der Clusterzentren
 j : Koordinaten des Clusterzentrums
 X_{koor_j} : Datenpunkt i
 S_i : Cluster.

Soll nun das Verfahren iterativ durchgeführt werden (Lloyd 1982), werden die Clusterzentren neu berechnet. Dafür wird der Schwerpunkt aller Punkte, die einem Cluster zugeordnet wurden, bestimmt und dieser als neues

Clusterzentrum verwendet (vgl. 3.7). Diese Schritte werden wiederholt, bis entweder eine maximale Anzahl an Iterationsschritten durchgeführt wurde, oder keine signifikante Veränderung der Koordinaten der Clusterzentren mehr vorliegt.

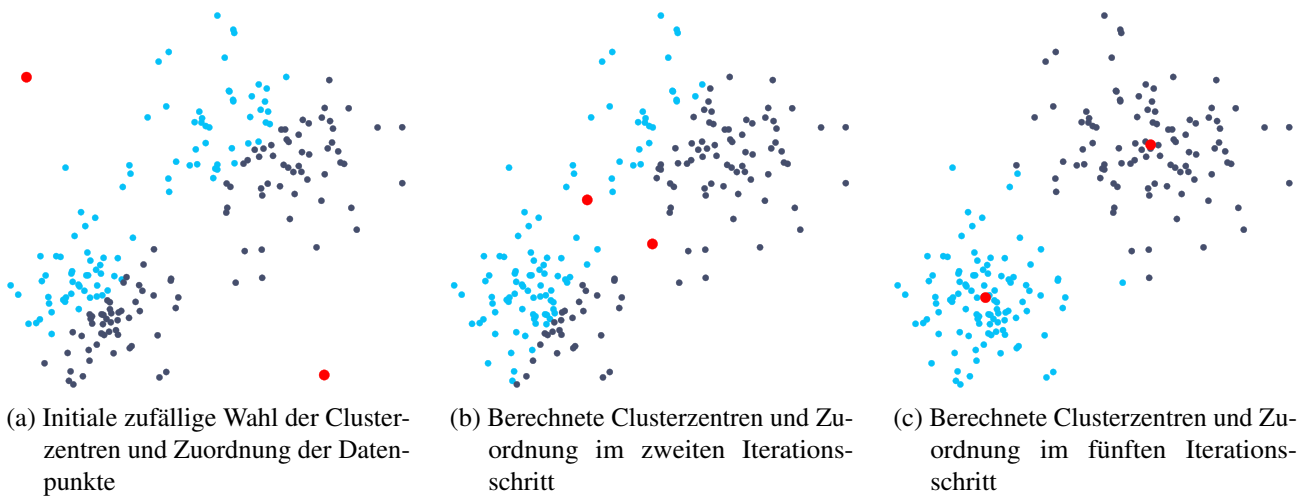


Abb. 3.7: Darstellung der Ergebnisse der K-Means Clusterung nach unterschiedlichen Iterationsschritten. Die Clusterzentren sind dabei in rot dargestellt, während die Datenpunkte in zwei unterschiedlichen Blautönen dargestellt sind.

Die für die Clusterung verwendeten Merkmale können dabei unterschiedlicher Art sein. Beispiele hierfür sind die Koordinaten eines Punktes oder auch die Intensitäten. Ein Nachteil des Verfahrens ist, dass durch die zufällige Wahl der Clusterzentren eine Wiederholbarkeit nicht gegeben ist. Mehrere Durchläufe des Algorithmus mit denselben Daten können damit zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Dies muss je nach Anwendung bei der Weiterverarbeitung der Segmentierungsergebnisse beachtet werden. Auch muss die Anzahl der Cluster bereits zu Beginn bekannt sein, weshalb eine gewisse Vorinformation über die Anzahl der vorkommenden Cluster vorhanden sein muss.

3.3.2 DBSCAN

Der Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise, dichtebasierte räumliche Clusteranalyse mit Rauschen (DBSCAN) Algorithmus ist ein Verfahren zur Clusteranalyse, welches dichtebasiert arbeitet und dabei Ausreißer, auch Rauschpunkte genannt, für die Clusterung vernachlässigen und diese separat zurückführen kann. Der Algorithmus wurde von Ester et al. (1996) entwickelt und gilt bis heute als einer der wichtigsten Algorithmen in der Clusteranalyse. Der Algorithmus unterscheidet die vorliegenden Datenpunkte dabei in drei Kategorien.

- **Kernobjekte:** Diese gelten selbst als dicht. Unter dicht versteht man dabei, wenn diese eine Mindestanzahl an Nachbarn innerhalb eines vordefinierten Abstandes besitzen (vgl. B in Abbildung 3.8).
- **Dichte-erreichbare Punkte:** Diese erfüllen selbst nicht die Eigenschaft eines dichten Punktes, liegen allerdings innerhalb des definierten Abstandes ϵ zu einem Kernobjekt. Durch diese Definition bilden diese Punkte den Rand eines Clusters (vgl. C in Abbildung 3.8).
- **Rauschen / Ausreißer :** Punkte, die keinem Cluster zugeordnet werden können und somit als Rauschen gelten. Dies ist der Fall, wenn die Punkte weder als dicht bezeichnet werden können noch in der Nähe eines Kernobjektes liegen (vgl. A in Abbildung 3.8).

Der Algorithmus ist dabei von zwei Eingangsgrößen abhängig. Diese sind zum einen die Anzahl der notwendigen Nachbarn, um einen Punkt als Kernobjekt zu definieren, und zum anderen der Abstand ϵ , der den zulässigen Abstand zu den Nachbarn angibt. Um die Clusterung der Datenpunkte durchzuführen, wird mit einem beliebigen Datenpunkt gestartet. Für diesen wird überprüft, ob sich im Abstand ϵ genügend weitere Datenpunkte befinden um ein Cluster zu bilden. Ist dies nicht der Fall, handelt es sich beim betrachteten Punkt zunächst um Rauschen. Im Laufe der weiteren Analyse kann der betrachtete Datenpunkt allerdings immer noch zu einem dichte-erreichbaren Punkt werden. Hat der Datenpunkt die erforderliche Anzahl an Nachbarn, werden alle zugehörigen Datenpunkte bestimmt und getestet, ob es sich bei diesen ebenfalls um ein Kernobjekt, oder um einen dichte-erreichbaren Punkt handelt. Handelt es sich um ein Kernobjekt, so werden wiederum die Datenpunkte innerhalb des Abstandes ϵ bestimmt und dem Cluster zugeordnete. Sind alle Punkte des Cluster betrachtet, so wird der nächste Datenpunkt, der bislang nicht berücksichtigt wurde, weiter betrachtet. Ein Vorteil dieses Algorithmus besteht darin, dass die Anzahl der Cluster nicht vorab bekannt sein muss. Zusätzlich liefert er im Bereich der Kernobjekte eine Wiederholbarkeit, auch wenn die Datenpunkte in unterschiedlicher Reihenfolge vorliegen. Im Bereich der dichte-erreichbaren Punkte ist dies allerdings nicht der Fall.

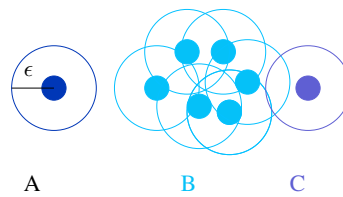


Abb. 3.8: Darstellung des Ergebnisses einer Clusterung nach dem DBSCAN Verfahren. Dabei werden die Ausreißer, auch als Rauschen bezeichnet, in A dargestellt. B bildet die Kernobjekte und C liefert den Bereich der dichte-erreichbaren Punkte.

3.3.3 Hough-Transformation

Bei der Hough-Transformation handelt es sich um ein modellbasiertes Verfahren, welches ursprünglich für die Detektion von parametrisierbaren geometrischen Figuren, wie beispielsweise Geraden und Kreisen in Gradientenbildern, entwickelt wurde. Dieses Verfahren wurde dann 1962 unter dem Namen „Method and Means for Recognizing Complex Patterns“ patentiert (Hough 1962). Zur Erkennung der geometrischen Figuren wird ein Dualraum, auch Parameterraum oder Hough-Raum, geschaffen, in dem die gesuchten Parameter der geometrischen Figuren detektiert werden sollen. Bei diesen Parametern handelt es sich im Fall einer Geraden um die Steigung, sowie den y -Achsenabschnitt. Ein Vorteil des Verfahren liegt vor allem darin, dass es sich um ein sehr robustes Verfahren zur Erkennung von geometrischen Figuren handelt. Dadurch kann eine Detektion auch dann durchgeführt werden, wenn Daten stark verrauscht sind, oder Teile der Objekte, auch aufgrund von Verdeckungen, nicht sichtbar sind (Nischwitz et al. 2020). Das grundlegende Vorgehen der Hough-Transformation wird nun zunächst am Beispiel der Geradenschätzung in 2D veranschaulicht. Wie bereits eingangs erwähnt, geht es bei der Hough-Transformation darum, die Parameter der geometrischen Figuren zu bestimmen, was im Fall der Geradenschätzung Steigung und y -Achsenabschnitt sind. Diese Repräsentation ist allerdings insofern kritisch, da Geraden, die parallel zur y -Achse verlaufen, eine unendliche Steigung aufweisen, welche im Endlichen nicht dargestellt werden kann. Für die Hough-Transformation bietet es sich daher an, hierbei auf die Darstellung der Geraden in der Hesseschen Normalform überzugehen. Damit ist eine Gerade gegeben durch

$$r = x \cos \theta + y \sin \theta, \quad (3.35)$$

mit r : Senkrechter Abstand der Geraden zum Ursprung
 θ : Winkel zwischen r und x -Achse, $\theta \in \mathbb{R}_0^+$.

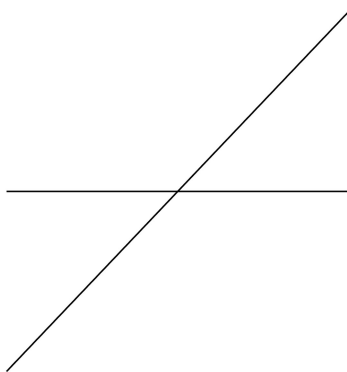


(a) Darstellung einer Geraden im kartesischen Koordinatensystem

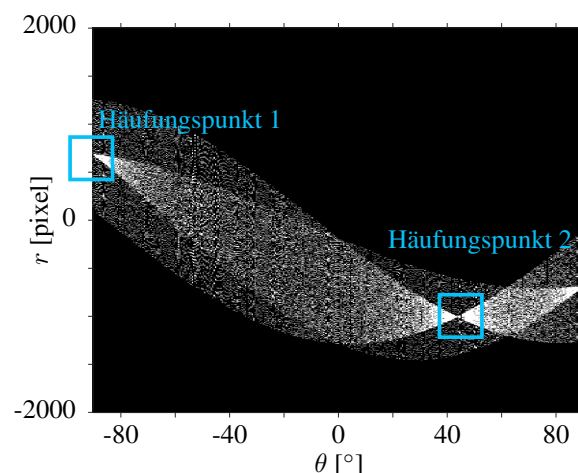
(b) Repräsentation der Geraden im Parameterraum

Abb. 3.9: Schematische Darstellung der grundlegenden Idee der Hough-Transformation. Darstellung einer Geraden im kartesischen Koordinatensystem (Abbildung 3.9a) und die dazugehörige Repräsentation im Parameterraum (Abbildung 3.9b) (in Anlehnung an Bäsmann und Besslich (1991)).

Für die nun durchgeführte Hough-Transformation werden nun die möglichen Richtungen diskretisiert. Es wird also eine endliche Anzahl an möglichen Richtungen der Geraden festgelegt. Der nun aufgespannte (r, θ) -Raum wird auch Akkumulator genannt. In diesem Akkumulator wird nun zu Beginn jede Zelle, also jedes Pixel der Abbildung im (r, θ) -Raum, mit dem Wert 0 belegt. Anschließend wird mit den vorliegenden Daten der Kantenpunkte x, y , und den diskretisierten Richtungen der Geraden θ der Abstand zum Ursprung r bestimmt. Die zugehörige Akkumulatorzelle wird dann um den Wert 1 erhöht. Wurde dies für alle Punkte der Datenmenge durchgeführt, erfolgt die Identifikation der Geraden im Parameterraum. Handelt es sich bei der Kombination von r, θ um die Geradenparameter einer Linie in den Eingangsdaten, so bildet sich eine Häufung der Punkte im Parameterraum (vgl. Abbildung 3.10).



(a) Darstellung eines Pixelbildes zweier Linien



(b) Darstellung der beiden Linien des Pixelbildes im Parameterraum nach der Durchführung der Hough-Transformation.

Abb. 3.10: Repräsentation zweier Geraden im Pixelbild und nach Durchführung der Hough-Transformation. 3.10a stellt die beiden Linien als Pixelbild dar. 3.10b stellt den Parameterraum des Bildes nach der Hough-Transformation dar. Die beiden hellen Häufungspunkte sind dabei die Geradenparameter der beiden Linien des Eingangsbildes.

Allgemein können so die benötigten Schritte für die Hough-Transformation und damit die Klassifikation verschiedener geometrischer Figuren in 2D in drei Schritte gegliedert werden (Nischwitz et al. 2020):

1. Parametrisierung der Referenzstruktur
2. Erstellung des Akkumulators und Berechnung der Werte der einzelnen Akkumulatorzellen
3. Auswertung des Akkumulators

Neben der Erweiterung der Methodik für weitere geometrische Figuren, ist auch eine Erweiterung in den 3D-Raum möglich. Die Anwendung der Hough-Transformation in 3D gewinnt an Bedeutung, da die Verfügbarkeit von 3D-Punktwolken zunimmt. So werden Punktwolken mittels verschiedener Verfahren schnell gewonnen und die robuste Klassifikation von Objekten wie beispielsweise Wänden, Decken oder auch Leitungen ist von großem Interesse. Daher wurden beispielsweise Möglichkeiten entwickelt, um mittels Hough-Transformation Ebenen (Borrmann et al. 2011), oder auch Stromleitungen (Shokri et al. 2021) zu erkennen. Eine Variante um eine 3D Hough-Transformation zur Erkennung von Linien in 3D durchzuführen, wurde von Dalitz et al. (2017) vorgestellt. Dabei handelt es sich um eine iterative Hough-Transformation, bei der die drei Schritte der ursprünglichen Hough-Transformation auf sieben Schritte erweitert werden. Im Folgenden wird die hierfür benötigte Vorgehensweise nun dargestellt.

Wie bereits erwähnt basiert dieses Verfahren auf sieben grundlegenden Schritten. Diese sind

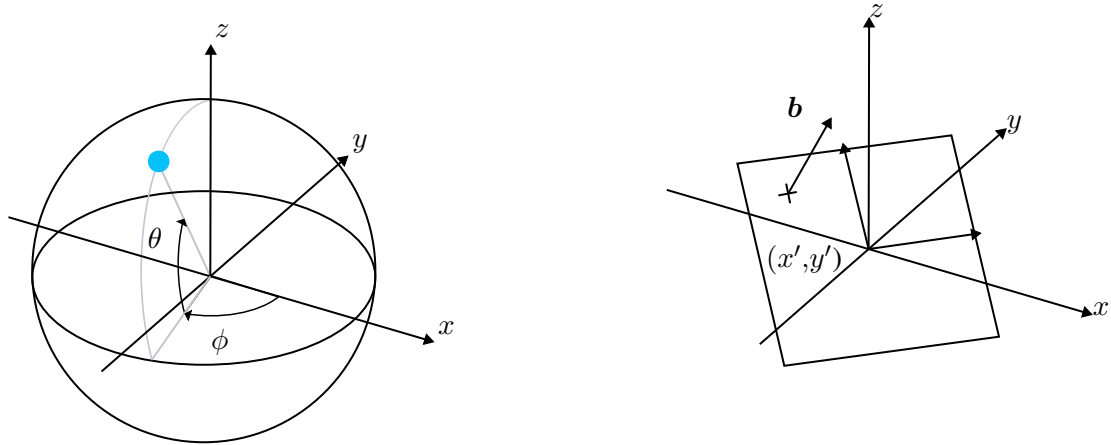
1. Diskretisierung des Parameterraums für alle Linien, die das Punktwolkenvolumen kreuzen,
2. Hough-Transformation der Punktwolke $\mathbf{X}$ basierend auf der Diskretisierung aus Schritt 1,
3. Bestimmung der Linienparameter auf Grundlage der meist bestimmten Akkumulatorzelle,
4. Bestimmung aller Punkte $\mathbf{Y} \subseteq \mathbf{X}$, die zu dieser Linie mit der höchsten Gewichtung gehören
5. Bestimmung der optimalen Linienparameter für alle zugehörigen Punkte $\mathbf{Y}$ mittels einer orthogonalen kleinsten-Quadrate Ausgleichung (vgl. 3.2.3.4)
6. Bestimmung aller Punkte der Punktwolke $\mathbf{X}$, deren Entfernung zur Linie unterhalb eines zuvor festgelegten Grenzwertes liegt und Entfernung dieser aus $\mathbf{X}$ und dem Akkumulator,
7. Wiederholung der Schritte 2-6, bis die gewünschte Anzahl an Linienparametern erreicht ist, oder die gefundene Gerade nicht die Mindestanzahl an Datenpunkten aufweist.

Im Folgenden werden nun die einzelnen Schritte genauer betrachtet. Bevor die genaue Betrachtung der Diskretisierung erfolgen kann, muss zunächst die Repräsentation der Linie in 3D definiert werden. Dabei ist die Linie definiert durch den Stützpunkt $\mathbf{a}$ und dem Richtungsvektor $\mathbf{b}$, wobei dieser eine Länge von 1 hat. Durch den zusätzlichen Parameter u , bei dem es sich um eine beliebige reelle Zahl handelt, kann die Länge des Richtungsvektors skaliert werden. Damit ergibt sich die Geradengleichung zu

$$\mathbf{g} = \mathbf{a} + u \cdot \mathbf{b}. \quad (3.36)$$

Die Richtung einer Linie wird dabei durch eine horizontale Richtung ϕ (Azimuth) und eine vertikale Richtung θ (Elevation) beschrieben (vgl. Abbildung 3.11). Die Richtung der Gerade kann damit in Abhängigkeit der beiden Winkel ausgedrückt werden als

$$\mathbf{b} = \begin{pmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi \cos \theta \\ \sin \phi \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix}. \quad (3.37)$$



(a) Linienrepräsentation durch Azimuth und Elevation

(b) Senkrechte Ebene zum Richtungsvektor der Geraden durch den Ursprung

Abb. 3.11: Darstellung der Linienrepräsentation nach Roberts (in Anlehnung in Dalitz et al. (2017)).

Um eine eindeutige Linienrepräsentation zu erhalten und die Linienrichtung vorzeichenunabhängig zu definieren, wird der Wertebereich der Winkel nun entsprechend eingeschränkt und es gilt $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$ und $-\pi < \theta \leq \pi$. Um eine vorzeichenunabhängige Darstellung auch dann zu gewährleisten, wenn die Linie in der (x, y) -Ebene liegt, gilt $b_y > 0$ für $b_z = 0$ und $b_x = 1$ für $b_y = b_z = 0$. Da eine Gerade im Raum durch den Schnittpunkt der Geraden zweier Ebenen repräsentiert werden kann, besitzt eine Gerade im Raum somit 4 Freiheitsgrade (zwei pro Schnittpunkt). Um nun die Redundanz des Stützpunktes der Geraden zu eliminieren, wird im Folgenden die Repräsentation einer Geraden nach Roberts (1988) verwendet. Dabei wird eine Ebene aufgespannt, deren Normalenvektor der Richtungsvektor der Ebene ist. Zusätzlich schneidet die Ebene den Ursprung des Koordinatensystems. Durch den Schnittpunkt des Richtungsvektors mit der so erzeugten Ebene im Koordinatensystem der Ebene, kann die Gerade im Raum eindeutig repräsentiert werden (vgl. Abbildung 3.11b). Für die Berechnung dieses Schnittpunktes gilt damit

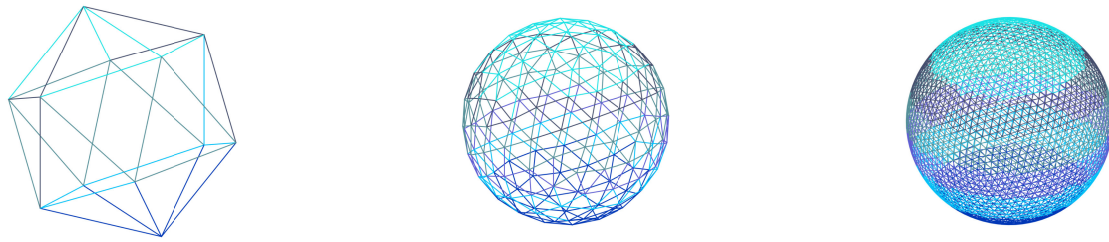
$$x' = \left(1 - \frac{b_x^2}{1 + b_z}\right) p_x - \left(\frac{b_x b_y}{1 + b_z}\right) p_y - b_x p_z, \quad y' = -\left(\frac{b_x b_y}{1 + b_z}\right) p_x + \left(1 - \frac{b_y^2}{1 + b_z}\right) p_y - b_y p_z. \quad (3.38)$$

Die Koordinaten eines Punktes ergeben sich dann durch

$$\mathbf{p} = x' \cdot \begin{pmatrix} 1 - (b_x^2)/(1 + b_z) \\ (-b_x b_y)/(1 + b_z) \\ -b_x \end{pmatrix} + y' \cdot \begin{pmatrix} (-b_x b_y)/(1 + b_z) \\ 1 - (b_y^2)/(1 + b_z) \\ -b_y \end{pmatrix}. \quad (3.39)$$

In einem nächsten Schritt kann nun die eigentliche Diskretisierung des Parameterraumes betrachtet werden. Das hierfür verwendete Verfahren basiert auf der Tessellierung (Zerteilung) platonischer Festkörper (Jeltsch et al. 2016). Diese platonischen Festkörper zeichnen sich dadurch aus, dass sie aus mehreren deckungsgleichen, ebenen, regelmäßigen Vielecken bestehen. Der Körper mit den meisten Knoten ist hierbei der Ikosaeder, dessen Oberfläche aus 12 Ecken, 20 Dreiecken und 30 Kanten besteht. Um nun mehr Richtungen erzeugen zu können, wird eine Tessellierung des Ikosaeders durchgeführt. Dabei wird in jedem Tessellationschritt ein neuer Knoten zwischen zwei bereits bestehende Knoten eingeführt (vgl. Abbildung 3.12). Damit entstehen aus einem bisherigen Dreieck vier neue Dreiecke. Hierbei muss allerdings beachtet werden, dass die Anzahl der platonischen Körper begrenzt ist und der Ikosaeder mit seinen 12 Knoten bereits der Körper mit den meisten Knoten ist. Nach der Tessellation handelt es sich daher nicht mehr um einen platonischen Körper, da es zu Abweichungen der Länge der einzelnen Kanten kommt (Jeltsch et al. 2016). In dieser Implementierung werden vier Tessellierungsschritte

durchgeführt. Damit besteht der neue Körper aus 2562 Knoten was in 1281 mögliche Richtungen der Geraden resultiert.



(a) Ikosaeder ohne Tesselierung

(b) Ikosaeder 2 Tesselierungsschritte

(c) Ikosaeder 4 Tesselierungsschritte

Abb. 3.12: Darstellung unterschiedlicher Tesselierungsschritte des Ikosaeder.

Bevor nun die Diskretisierung der (x', y') - Ebene durchgeführt werden kann, muss nun noch das Zentrum der Punktwolke so verschoben werden, dass das Zentrum der Bounding Box mit dem Ursprung übereinstimmt. Die Bounding Box ist dabei der kleinstmöglichen Quader, dessen Kanten parallel zu den Koordinatenachsen ausgerichtet sind, der alle Punkte der Punktwolke enthält. Dies verhindert, dass der Hough-Raum extrem groß wird und damit viele Zellen des Akkumulators Linien außerhalb der Punktwolke repräsentieren (Dalitz et al. 2017).

Nun kann die eigentliche Hough-Transformation durchgeführt und der Akkumulator berechnet werden. Um Probleme mit naheliegenden Linien zu vermeiden, wird im Folgenden immer nur die Linie mit dem höchsten Gewicht im Akkumulator betrachtet. Ist die Linie mit dem höchsten Gewicht bestimmt, werden alle Punkte bestimmt, deren Abstand zur Linie einen zuvor festgelegten Grenzwert unterschreitet. Diese Punkte werden dann aus der Punktwolke und dem Akkumulator entfernt. Da durch die Diskretisierung der möglichen Richtungen eine Einschränkung in den möglichen Richtungen besteht, werden nun die idealen Parameter der gefundenen Linie mittels einer orthogonalen kleinste-Quadrate Schätzung bestimmt (vgl. Kapitel 3.2.3.4). Diese Schritte entsprechen den Schritten 2-6 der zuvor dargestellten Schritte. Diese werden nun so lange wiederholt, bis die Punktwolke nicht mehr genügend Punkte für eine erneute Linienbestimmung beinhaltet, oder die zuvor definierte Anzahl gewünschter Linien erreicht ist.

Das Verfahren der Hough-Transformation ermöglicht somit eine effiziente und eindeutige Bestimmung von Geraden im Raum. Ein Vorteil des Verfahrens gegenüber anderen Verfahren wie beispielsweise random sample consensus (RANSAC) ist hier vor allem die Wiederholbarkeit der Berechnung und damit Reproduzierbarkeit von Ergebnissen bei mehrfacher Ausführung der Berechnung.

3.4 Methoden der Graphentheorie

Da die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Strukturen eine Netzstruktur aufweisen, werden im Folgenden die graphentheoretischen Grundlagen genauer betrachtet. Diese stellen dabei ein Teilgebiet der diskreten Mathematik dar. Die Graphen repräsentieren dabei die Struktur eines Netzes wie beispielsweise ein Straßennetz, ein Computernetz oder eine elektrische Schaltung (Tittmann 2019). All diese Netze bestehen aus zwei grundlegenden Objekten, den Knoten und den Kanten. Die Kanten verbinden dabei die Knoten miteinander und können gerichtet oder ungerichtet sein, je nachdem entsteht dann ein gerichteter oder ein ungerichteter Graph. Eine weitere Möglichkeit der Kategorisierung von Graphen besteht darin, diese in einen zusammenhängenden und einen nicht zusammenhängenden Graphen zu unterteilen. Dabei gilt die Voraussetzung, dass es für jedes

Knotenpaar einen Weg gibt, der die beiden miteinander verbindet. Es kann damit ausgehend von jedem Knoten, jeder andere Knoten erreicht werden (Nitzsche 2009).

- Zusammenhängender Graph: Kanten sind ungerichtet (vgl. Abbildung 3.13a),
- Stark zusammenhängend: Kanten sind gerichtet (vgl. Abbildung 3.13b),
- Schwach zusammenhängend: Netz aus gerichteten Kanten erfüllt nicht die Bedingung, dass von jedem Knoten jeder andere Knoten erreicht werden kann. Werden die Kanten allerdings ungerichtet betrachtet, so ist die Bedingung erfüllt (vgl. Abbildung 3.13c).

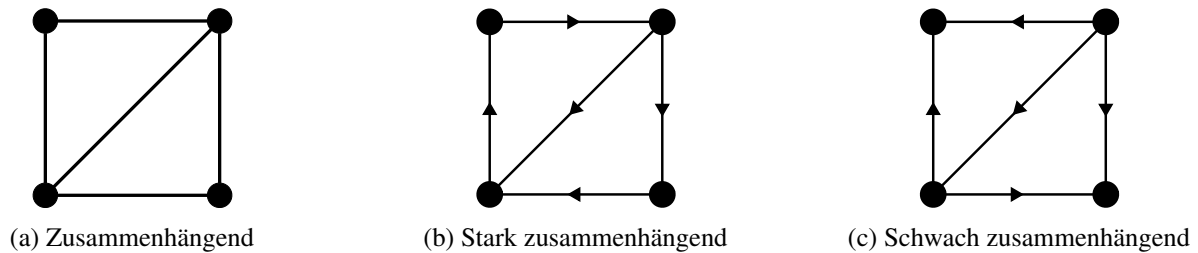


Abb. 3.13: Darstellung der unterschiedlichen Arten an Graphen.

Um nun ein vorliegendes Netzwerk analysieren zu können, kann zusätzlich der Grad eines Knotens betrachtet werden. Unter diesem versteht man dabei für einen ungerichteten Graphen die Anzahl der Kanten, die einem Knoten zugeordnet sind. Liegt ein gerichteter Graph vor, unterscheidet man zwischen dem Eingangsgrad und dem Ausgangsgrad eines Knotens. Die Betrachtung dieser Grade liefert dann Informationen hinsichtlich der möglichen Wege, auch Pfade genannt, die in diesem Graphen möglich sind. Unter diesen Wegen versteht man dabei die Abfolge einer Reihe von Knoten und Kanten in einer vorgegebenen Reihenfolge. Man unterscheidet dabei verschiedene Arten an Wegen:

- Einfacher Weg: Dieser Weg stellt eine Folge von Knoten dar, bei der jeder Knoten allerdings höchstens einmal durchlaufen werden darf,
- Kantenzug: Im Vergleich zum einfachen Weg können bei diesem sowohl Kanten als auch Knoten mehrfach vorkommen (Nitzsche 2009),
- Zyklus: Bei einem Zyklus handelt es sich um einen Weg, dessen Start und Endknoten identisch sind und dazwischen mindestens ein weiterer Knoten durchlaufen wird (Diestel 2000).

Bei der Betrachtung dieser unterschiedlichen Arten an Wegen muss allerdings beachtet werden, dass die Benennung der einzelnen Wege sich in der Literatur unterscheiden. Dies ist besonders bei der Definition des Kantenzuges zu beachten, der, in Teilen der Fachliteratur, auch wie ein einfacher Weg behandelt wird, und kein mehrfach Durchlaufen einzelner Kanten zulässt.

Einen Spezialfall nimmt dabei der Eulerweg ein. Bei diesem handelt es sich um einen Zyklus, bei dem alle Kanten des Graphen genau einmal durchlaufen werden. Die bekanntesten Beispiele dafür sind das *Haus vom Nikolaus* oder auch das *Königsberger Brückenproblem*. Ein Graph enthält hierbei genau dann einen Eulerweg, wenn es sich um einen ungerichteten, zusammenhängenden Graph handelt, bei dem zwei oder kein Knoten einen ungeraden Grad aufweisen und alle übrigen Knoten einen geraden Grad haben. Im Sonderfall, dass kein Knoten einen ungeraden Grad aufweist, spricht man dann von einem Eulerkreis, da Start- und Endpunkt des Weges identisch sind (Mönius et al. 2021). Um einen Eulerweg in einem vorliegenden Graphen zu bestimmen, kann dabei beispielsweise der Algorithmus nach Hierholzer und Wiener (1873) verwendet werden. Neben dem Eulerkreis, bei dem alle Kanten genau einmal durchlaufen werden, spielen die hamiltonischen Graphen, bei denen alle Knoten genau einmal durchlaufen werden, eine wichtige Rolle in der Graphentheorie. Da sie in dieser Arbeit nicht weiter verwendet werden, werden diese an dieser Stelle nicht weiter betrachtet. Weiterführende Erläuterungen hierzu finden sich beispielsweise in Nitzsche (2009).

Sind neben den Verbindungen der Graphen auch die geometrische Lage der Knoten und Kanten im Raum von Bedeutung, so spricht man von der topologischen Graphentheorie, die damit die Nahtstelle zwischen der Topologie und der Graphentheorie darstellt. Ein weiteres vergleichbares Teilgebiet bildet die geometrische Graphentheorie (Pach und Agarwal 1995; Felsner 2004).

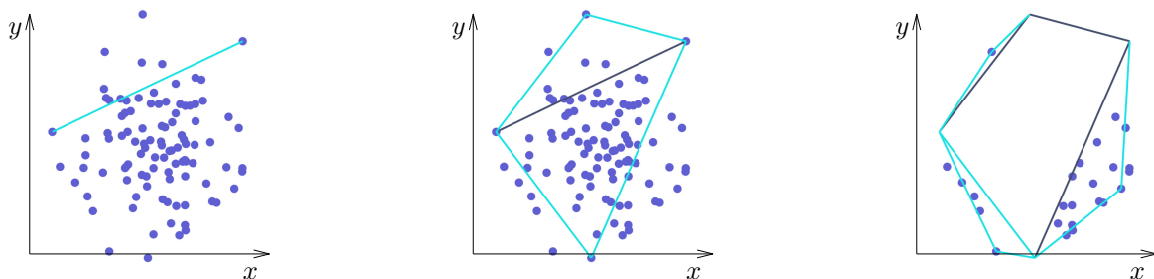
3.5 Bestimmung der Form und Fläche von Objekten im 2D-Raum

Liegt eine endliche Menge an Punkten im 2D-Raum vor, so stellt sich häufig die Frage, wie daraus eine geschlossene Kontur erstellt werden kann. Dies ist z.B. dann notwendig, wenn die Fläche eines Objektes bestimmt werden soll. Für die Beschreibung der äußeren Form eines Objektes stehen dabei unterschiedliche Verfahren zur Verfügung. Dazu gehören beispielsweise die Beschreibung mittels B-Spline-Kurven, der Schätzung von bekannten geometrischen Primitiven, wie Kreis oder Rechteck, oder auch die konvexe Hülle, sowie im Allgemeinfall dazu die Bestimmung mittels Alpha-Shapes.

Eine Schätzung mittels B-Splines wurden in Balangé et al. (2022a) untersucht, diese Methode wurde beispielsweise auch für die Schätzung der Fläche eines Blattes (Dupuis et al. 2016) angewendet. Bei der Schätzung mittels geometrischer Primitive können die notwendigen Parameter mittels unterschiedlicher Verfahren geschätzt werden. Ein Verfahren hierbei stellt auch hier die bereits in Abschnitt 3.3.3 dargestellte Hough-Transformation dar. Da in dieser Arbeit allerdings komplexere Formen untersucht werden, wird dies an dieser Stelle nicht weiter betrachtet. Die folgenden Abschnitte behandeln daher die in dieser Arbeit verwendete konvexe Hülle, sowie deren Verallgemeinerung, die Alpha-Shapes.

3.5.1 Konvexe Hülle

Die konvexe Hülle eines 2D-Datensatzes ist das konvexe Polygon mit minimaler Fläche, dass alle Datenpunkte enthält (vgl. Abbildung 3.17a). Für die Schätzung der Scheitelpunkte der konvexen Hülle gibt es mehrere Algorithmen (Graham 1972, Jarvis 1973). In dieser Untersuchung wurde der QuickHull-Algorithmus verwendet (Green und Silvermann, 1979). Dabei werden zunächst die beiden Punkte der Punktmenge mit den minimalen und maximalen x -Koordinaten bestimmt, da diese mit Sicherheit Teil der konvexen Hülle sind. Dann wird eine Linie durch beide Punkte gezogen und die Punktmenge durch diese Linie in zwei Hälften geteilt (vgl. Abbildung 3.14a). Nun werden in jeder Punktwolkenhälfte die Punkte mit dem maximalen Abstand zur Linie gesucht und damit ein Dreieck gebildet (vgl. Abbildung 3.14b). Alle Punkte innerhalb des Dreiecks sind keine Scheitelpunkte der konvexen Hülle. Dies wird mit den beiden neuen Dreiecksseiten wiederholt, bis alle Punkte entweder ein Scheitelpunkt der konvexen Hülle sind oder sich innerhalb der konvexen Hülle befinden (vgl. Abbildung 3.14c).



(a) Gerade durch die Punkte mit minimaler und maximaler x -Koordinate

(b) Bestimmung der Punkte mit dem größten Abstand zur ersten Gerade

(c) Entfernung aller innen liegenden Punkte und erneute Bestimmung der Punkte mit den größten Abständen zur jeweiligen Gerade

Abb. 3.14: Konstruktionsschritte für die Erstellung einer konvexen Hülle.

Wie gut die konvexe Hülle die vorliegende Form approximiert, ist dabei neben der Geometrie des Objektes auch von der Qualität der Messdaten abhängig. Einzelne Ausreißer sorgen dabei schnell dafür, dass die geschätzte Form deutlich zu groß wird. Dies zeigt sich auch anhand des in Abbildung 3.17a dargestellten Beispiels. Die Punktdichte nimmt hier an der Oberseite des Objektes stark ab, weshalb die dort auftretenden einzelnen Punkte daher auch Ausreißer sein können. Daher ist die Datenvorverarbeitung hier von großer Bedeutung.

3.5.2 Alpha-Shapes

Bei den sogenannten Alpha-Shapes handelt es sich um eine Verallgemeinerung der konvexen Hülle. Eine erste Definition der Alpha-Shapes findet sich in Edelsbrunner et al. (1983). Wie der Name bereits vermuten lässt, ist der α -Parameter bei der Berechnung von zentraler Bedeutung. Dieser gibt an, wie detailliert die bestimmte Form am Ende ist. Der α -Parameter nimmt dabei Werte zwischen 0 und $+\infty$ an, wobei ein Wert von $+\infty$ der Form einer konvexen Hülle entspricht (vgl. 3.5.1). Je niedriger der α -Parameter wird, desto detaillierter ist schlussendlich die bestimmte Form (Pateiro-López und Rodríguez-Casal 2010). Dies zeigt sich auch in Abbildung 3.17b. Die hier gefundene Form wurde mit einem α -Parameter von 0,54 bestimmt. Dabei zeigt sich, dass es zu einzelnen Spitzen in der Form kommt. Je nach Ursprungsform des Messobjektes ist es allerdings wahrscheinlich, dass solche Effekte nicht der Realität entsprechen und durch Ausreißer in den Messungen entstehen. Daher ist auch in diesem Fall die Datenvorverarbeitung von zentraler Bedeutung. Der α -Parameter gibt dabei den Radius eines Kreises an. Alle Kanten der Alpha-Shape müssen dabei eine Länge besitzen, die kleiner als der Durchmesser des Kreises ist (vgl. Abbildung 3.15).

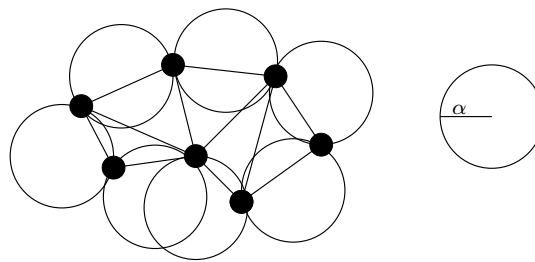
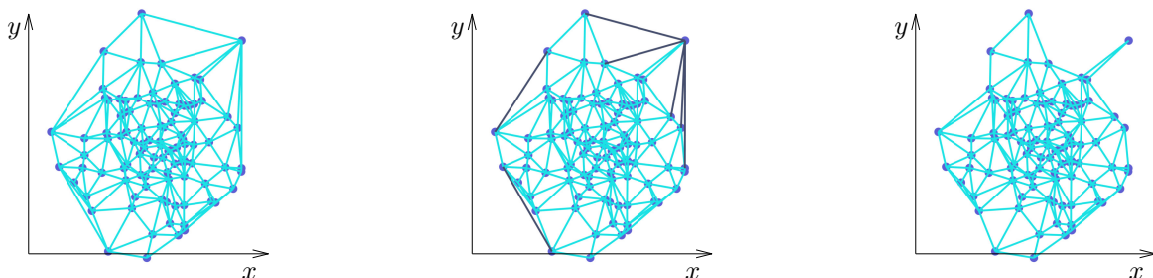


Abb. 3.15: Bedeutung des alpha-Parameters für die Konstruktion der Alpha-Shapes.

Zur Erstellung der Alpha-Shape wird zunächst eine Delaunay-Triangulation durchgeführt (Delaunay 1934) (vgl. Abbildung 3.16a). Anschließend werden die Kanten der Delaunay-Triangulation betrachtet. Dabei werden alle Kanten entfernt, deren Länge größer als der entsprechende 2α -Parameter ist (vgl. Abbildung 3.16b). Die verbleibenden Kanten bilden nun die Alpha-Shape (vgl. Abbildung 3.16c).



(a) Ergebnis der Delaunay Triangulation

(b) Bestimmung der Kanten der Delaunay Triangulation deren Länge größer als 2α ist

(c) Entfernung der zu langen Kanten

Abb. 3.16: Konstruktionsschritte für die Erstellung der Alpha-Shapes.

Eine Herausforderung dabei bildet die Wahl des α -Parameters. Dieser kann entweder selbst bestimmt werden, wenn ein optimaler Wert für die vorliegenden Strukturen bekannt ist, oder aus den vorliegenden Daten berechnet werden. Hierzu stehen in der Literatur unterschiedliche Ansätze zur Verfügung. Eine Möglichkeit dabei ist es den erwarteten Punktabstand als α -Parameter zu verwenden (Jochem et al. 2009). Eine weitere Möglichkeit ist auch die Verwendung eines lokalen α -Parameters, um einen unterschiedlichen Detaillierungsgrad innerhalb des Objektes zu realisieren (Santos et al. 2018). Des Weiteren stehen verschiedene Algorithmen zur Verfügung, die für eine beliebige Eingangsdatenmenge den optimalen α -Parameter ermitteln sollen. Vor allem ist dies bei großen Datensätzen sehr rechenintensiv. Bei diesen Implementierungen ist dabei zu beachten, dass hier häufig der Kehrwert des in der Literatur als Alpha-Shape definierten Wertes, dies entspricht der Krümmung, anstelle des Radius, verwendet wird. Die Berechnung erfolgt dabei beispielsweise mittels Intervallhalbierungsmethode und es werden so die möglichen α -Parameter getestet, bis eine Form gefunden wird, die keine Kanten im Inneren der generierten Form enthält (Bellock 2022).

Die durch die Alpha-Shapes entstehenden Formen können dabei von konkaver und konvexer Form sein. Ein weiterer Unterschied im Vergleich zur konvexen Hülle besteht zudem darin, dass es sich bei der erhaltenen Alpha-Shape nicht um eine zusammenhängende Form im Sinne der Topologie handeln muss. Damit bieten diese Vorteile, wenn beispielsweise hohle Strukturen betrachtet werden sollen.

Der Vergleich der konvexen Hülle mit einer Alpha-Shape ist in Abbildung 3.17 dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die Alpha-Shape eine detailliertere Beschreibung der Randgeometrie der Datenpunkte darstellt, allerdings einzelne Punkt (z.B. oben rechts) einen starken Einfluss auf die geschätzte Geometrie haben. Der Einfluss auf die Querschnittsfläche fällt allerdings geringer aus.

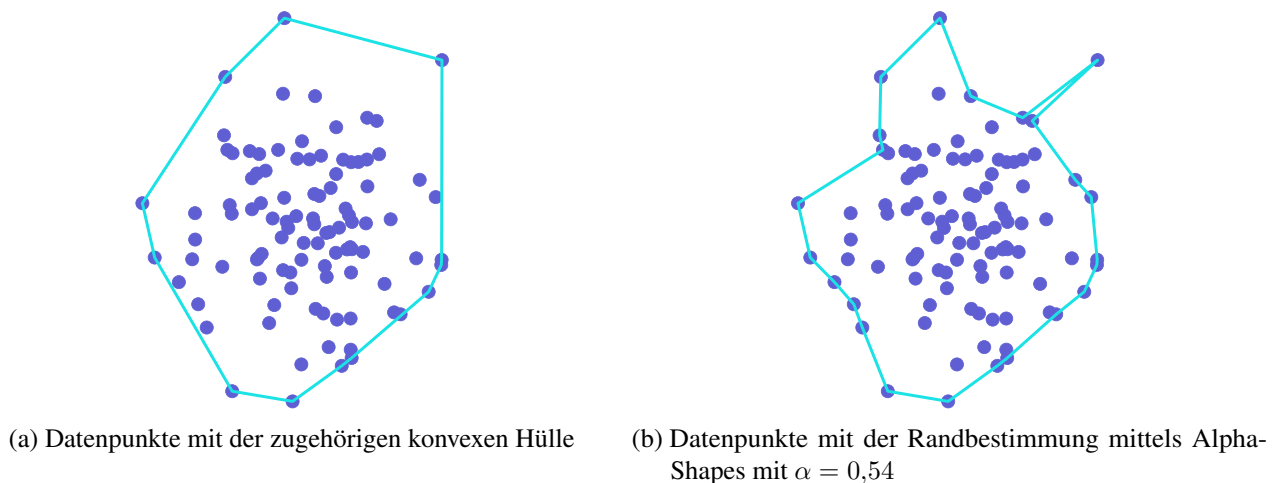


Abb. 3.17: Vergleich der Bestimmung der äußeren Geometrie durch eine konvexe Hülle oder Alpha-Shapes.

4 Aufbau eines Qualitätssicherungskonzeptes für Faserverbundsysteme

Im Rahmen dieser Arbeit soll ein Qualitätssicherungskonzept für die Fertigung von Faserverbundsystembauteilen erstellt werden. Dabei werden die verschiedenen Schritte von der Planung, Fertigung bis zur finalen geometrischen Qualitätskontrolle betrachtet, wobei der Fokus auf der geometrischen Qualitätssicherung liegt. Ziel des erstellten Qualitätssicherungskonzeptes ist es dabei, dieses in den Co-Design Prozess aus Planung und Fertigung zu integrieren.

In diesem Kapitel werden nun zunächst die Kontroll- und Entscheidungspunkte im Planungs- und Fertigungsprozess genauer betrachtet und die jeweiligen relevanten Punkte vorgestellt. Anschließend wird das entwickelte Qualitätssicherungskonzept für die geometrische Qualitätskontrolle betrachtet. Dabei wird sowohl das Messkonzept, sowie der Auswerteprozess vorgestellt. Die generelle Struktur des Aufbaues des Qualitätssicherungskonzeptes basiert dabei auf Zhang et al. (2020). Das damit erstellte Qualitätssicherungskonzept findet sich in Ausschnitten auch in Balangé et al. (2021), Balangé et al. (2022a), Balangé et al. (2022b), Gil Pérez et al. (2022), Balangé et al. (2023), Gil Pérez et al. (2023a), Kannenberg et al. (2024) und Balangé und Schwieger (2025).

4.1 Identifikation der technischen Qualitätsanforderungen und Definition der Kontroll- und Entscheidungspunkte

Bei der Fertigung von Faserverbundsystembauteilen sind die speziellen technischen Anforderungen stark von der späteren Verwendung des Bauteils abhängig. Allerdings können die Anforderungen allgemein kategorisiert werden in Anforderungen an das verwendete Material, an die Fabrikationsplattform, den Fabrikationsprozess sowie die Geometrie und die strukturellen Eigenschaften des Bauteils selbst. Aus diesen lassen sich damit drei Entscheidungspunkte und zwei Kontrollpunkte ableiten, die im Planungs- und Fertigungsprozess einmal oder mehrfach durchlaufen werden. Der zeitliche Ablauf der unterschiedlichen Kontrollpunkte (CP) und Entscheidungspunkte (DP) ist in Abbildung 4.1 dargestellt.

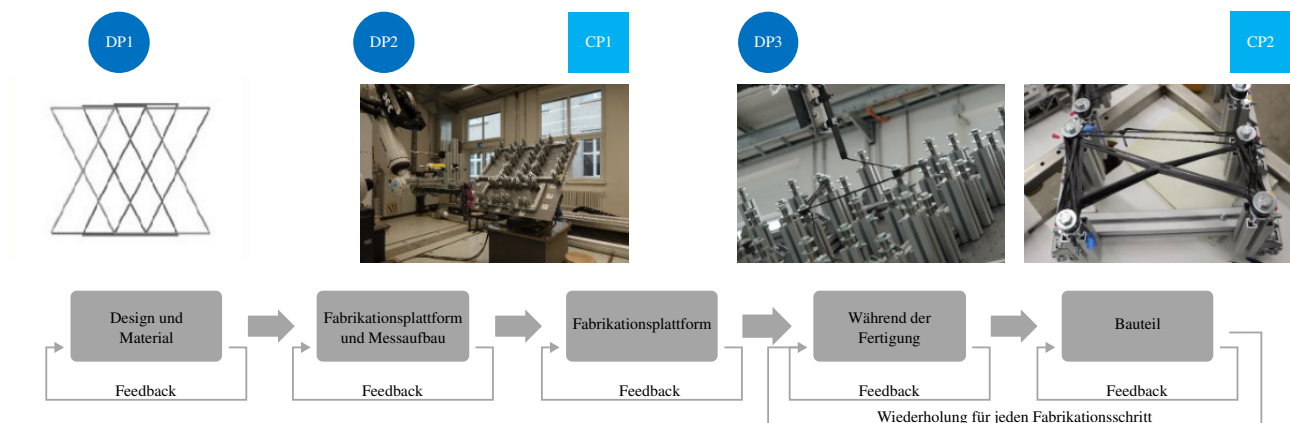


Abb. 4.1: Co-Design Mess- und Fertigungsprozess mit der Zuordnung der Kontroll- und Entscheidungspunkte.

Bei diesen relevanten Punkten im Planungs- und Fertigungsprozess handelt es sich im ersten Schritt um die Wahl der gewünschten Form, sowie die gewünschten Materialien. In einem nächsten Schritt wird dann die Fabrikationsplattform näher betrachtet und diese für die gewünschten Elemente angepasst. Dabei ist auch die Kontrolle des Fertigungsaufbaues entscheidend. Der nächste Schritt ist dann die Fertigung der Bauteile selbst.

Hier werden die während der Fertigung variablen Bedingungen betrachtet. In einem letzten Kontrollpunkt wird dann die finale Geometrie des Bauteils evaluiert. In Tabelle 4.1 sind die einzelnen Produkte und Prozesse, die an den unterschiedlichen Kontroll- und Entscheidungspunkten evaluiert werden, sowie die Qualitätsmerkmale, die an dieser Stelle relevant sind, dargestellt. Dabei ist anzumerken, dass die Tabelle im Hinblick auf die Fertigung exemplarische Teilprozesse betrachtet und keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt.

Tab. 4.1: Technische Qualitätsmerkmale im Planungs- und Fertigungsprozess.

		Verfügbarkeit	Prozesskorrektheit	Zeiteinhaltung	Tragfähigkeit	Vollständigkeit	Korrektheit	Genauigkeit
DP1	Material	x		x	x			
	Syntax		x		x			
DP2	Plattformdesign	x						
	Rahmendesign	x	x				x	
	Koordinatensysteme					x	x	
	Wahl des Messgeräts	x		x		x	x	x
	Wahl der Messkonfiguration					x	x	x
CP1	Fertigungsaufbau						x	
	Material	x						
DP3	Material			x				
	Fabrikationssystem						x	
CP2	Tragfähigkeit des Bauteils				x			
	Geometrie des Bauteils					x	x	
	Messung des Bauteils					x	x	
	Auswertung der Messung					x	x	

Die Evaluierung an diesen definierten Kontroll- und Entscheidungspunkten führt dann im Sinne des Co-Designs zur Möglichkeit des Feedbacks innerhalb der Produktionsschleife, um somit eine kontinuierliche Qualitätssicherung und -steigerung zu ermöglichen. Nach Kannenberg et al. (2024) lässt sich dieses Feedback in die drei Kategorien High-Level-Feedback, Mid-Level-Feedback und Low-Level-Feedback unterteilen. Hierbei wird unter einem High-Level-Feedback ein Feedback verstanden, welches bereits in einer frühen Planungsphase stattfindet. Es steht vor allem das Design des Bauteils, wie die Topologie, sowie der Fabrikationsplattform im Mittelpunkt. In dieser Arbeit entspricht dies den nachfolgend dargestellten Entscheidungspunkten 1 und 2. Das Mid-Level-Feedback ist im Gegensatz dazu nicht mehr direkt in den Designprozess integriert, sondern unterstützt bei der Wahl unterschiedlicher Designs hinsichtlich der Prozesskorrektheit der Fertigung oder der benötigten Materialmenge. Auch dieses Feedback lässt sich in den ersten beiden Entscheidungspunkten finden. Als letztes gilt es das Low-Level-Feedback zu berücksichtigen. Hierbei handelt es sich um ein Feedback, welches über einen längeren Zeitraum betrachtet werden muss und dabei als Feedback für zukünftige Fertigungen verwendet werden soll. Grund hierfür ist vor allem, dass die Qualitätssicherung hier anhand der bereits gefertigten Strukturen stattfindet und somit kein Eingriff in die aktuelle Produktion mehr möglich ist. Zu dieser Kategorie des Feedbacks gehört dabei zum einen die geometrische Qualitätssicherung des finalen Bauteils, zum anderen sind auch strukturelle Tests dieser Art des Feedbacks zuzuordnen. Damit kann der letzte Kontrollpunkt zusätzlich

auch als ein weiterer Entscheidungspunkt für zukünftige Fertigungen verstanden werden.

Im Folgenden werden nun die einzelnen Kontroll- und Entscheidungspunkte näher betrachtet und die an diesen relevanten Qualitätsparameter und Qualitätskriterien für die in Tabelle 4.1 vorgestellten Qualitätsmerkmale festgelegt. Für die Qualitätskriterien ist an dieser Stelle zu beachten, dass diese sich von Anwendung zu Anwendung unterscheiden, oder stellenweise die Zielgröße sich zum aktuellen Zeitpunkt nicht direkt benennen lässt. Aus diesem Grund sind diese im Folgenden nur exemplarisch dargestellt.

Entscheidungspunkt 1, Planung - Design und Material: Mit Beginn der Planung müssen zunächst die Entscheidungen bezüglich der Form der Struktur getroffen werden. Dabei müssen die spätere Verwendung und die dabei benötigten strukturellen Eigenschaften betrachtet werden. In diesem Schritt müssen zudem die Entscheidungen bezüglich des Materials getroffen werden. Dabei ist zum einen das Material der Faser, beispielsweise Kohlenstofffasern, Glasfasern oder Naturfasern, sowie die Stärke des Materials, also aus wie vielen Einzelfasern das verwendete Faserbündel besteht, entscheidend. Für die finale Geometrie ist zudem die Anzahl der Lagen von Bedeutung. Zum anderen muss die Entscheidung bezüglich der verwendeten Matrix (in diesem Fall welches Harz und welcher Härter verwendet werden sollen) getroffen werden, da damit die späteren Bauteileigenschaften signifikant beeinflusst werden. Dabei ist auch die Verarbeitung des gewünschten Materials zu berücksichtigen, da sich unterschiedliche Systeme in ihrer Verarbeitungszeit stark unterscheiden können. Neben der Wahl des Materials selbst müssen hier auch die Entscheidungen bezüglich der Anzahl der Lagen der Fertigung, der gewünschten Fabrikationsreihenfolge, also die Frage, ob das Bauteil von innen nach außen oder von außen nach innen gefertigt werden soll, entschieden werden. Damit zusammenhängend ergeben sich dann auch die Frage nach der benötigten Materialmenge. Für die benötigte Menge des verwendeten Harzes ist außerdem der Faser-Volumen-Gehalt von zentraler Bedeutung. Dieser gibt an, welche Menge an Harz im Verhältnis zur Faser selbst verwendet wird. Ist dieser zu niedrig, ist der Faden zu trocken, so dass keine Interaktion der Fasern an den Schnittpunkten passiert und damit die strukturellen Eigenschaften der Bauteile maßgeblich beeinträchtigt werden. Bei der Planung der Syntax ist auch darauf zu achten, ob es sich bei der Struktur um einen geschlossenen Pfad handelt, oder ob alternativ Hilfsanker eingeführt werden müssen, um eine durchgängige Syntax zu erhalten. Zudem sind die Höhenunterschiede der einzelnen Ankerpunkte zu berücksichtigen, da auch diese einen maßgeblichen Einfluss auf die Faser-Faser-Interaktion haben (vgl. Abschnitt 2.2.2). Im Sinne des Qualitätsmodells ergeben sich damit die in Tabelle 4.2 dargestellten Qualitätsparameter und -kriterien.

Tab. 4.2: Qualitätsmerkmale, -parameter und -kriterien am Entscheidungspunkt 1 (DP1).

Qualitätsmerkmal	Qualitätsparameter	Qualitätskriterium
Verfügbarkeit	$m_{\text{Mat}} = \frac{\text{Menge vorhandenes Material}}{\text{Menge benötigtes Material}} [\%]$	$m_{\text{Mat}} \geq 100\%$
Prozesskorrektheit	Anzahl Knoten mit ungeradem Grad G_{ung}	$G_{\text{ung}} = 0 \vee G_{\text{ung}} = 1$
	Höhenunterschied der Anker Δh_{Ank}	$\Delta h_{\text{Ank}} > \text{Grenzwert}$
Zeiteinhaltung	Verarbeitungszeit des Materials t_{Mat}	$t_{\text{Mat}} > \text{Prozessdauer}$
Tragfähigkeit	Grenzzustand der Tragfähigkeit [N]	Anforderungen eingehalten
	Faserstärke $\varnothing_F$ [mm]	$\varnothing_F > \text{Grenzwert}$

Entscheidungspunkt 2, Planung - Fabrikationsplattform und Messaufbau: Aus den Entscheidungen bezüglich des Materials und der gewünschten Syntax ergeben sich dann die Anforderungen an die Fabrikationsplattform. Dabei ist die Wahl der Fertigungsrahmen sowie deren Montage entscheidend. Auch die Lage und Ausrichtung der Ankerpunkte, die später die Grundlage für den Fertigungsprozess darstellen, ist dabei von Bedeutung. Neben der Geometrie des Aufbaus muss auch die Stabilität betrachtet werden, da der Faden

während des Fertigungsprozesses unter Spannung stehen muss und daher eine Verformung des Rahmens vermieden werden sollte. Zusätzlich ist die Position der Plattform relativ zum Roboter entscheidend, um so eine Pfadplanung zu ermöglichen, bei der der Austrittswinkel des Fadens einen gewissen Grenzwert nicht überschreitet, da es andernfalls durch die entstehende Reibung zu einer Faserschädigung kommen kann. Zusätzlich kann das Harz in diesem Fall auch wieder aus dem Faden gepresst werden. Um die idealen Positionen festlegen zu können, müssen zudem die einzelnen Koordinatensysteme, die im Folgenden verwendet werden, betrachtet werden. Dazu gehören zum einen das Koordinatensystem des Roboters, das Koordinatensystem der Fabrikationsplattform, ein Koordinatensystem der einzelnen Fertigungsrahmen und ein Koordinatensystem der einzelnen Bauteile. Die Koordinatensysteme des Fertigungsprozess sind beispielhaft in Abbildung 4.2 dargestellt. Auch das Koordinatensystem der späteren Messungen muss bereits an dieser Stelle bedacht werden, um alle benötigten Transformationsparameter bestimmen zu können und schlussendlich alle Daten in ein gemeinsames Koordinatensystem überführen zu können.

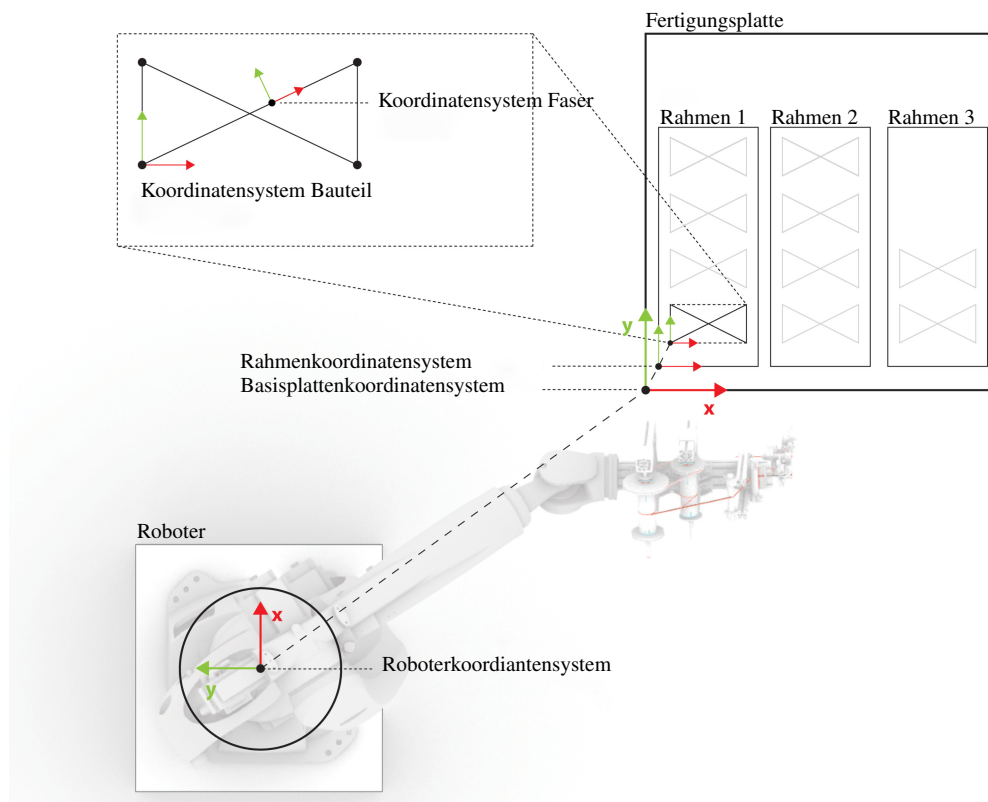


Abb. 4.2: Koordinatensysteme des Fertigungsprozess (in Anlehnung an Gil Pérez et al. (2022)).

An dieser Stelle müssen nun zusätzlich die für die Messung notwendigen Entscheidungen getroffen werden. Dazu gehört zum einen die Wahl des Messgeräts, in diesem Fall des Laserscanners. Dieses Messgerät muss dann hinsichtlich der Eignung für die durchzuführenden Messungen überprüft werden. Zusätzlich ist die Wahl des Messkonzepts, also die Anzahl der benötigten Standpunkte für eine vollständige Erfassung an dieser Stelle zu treffen. Auch muss hier die Entscheidung getroffen werden, ob Messungen nur für das finale Bauteil durchgeführt werden, oder ob verschiedene Messepochen in der Fertigung durchgeführt werden. Beispielsweise können Messungen nach jeder Faserverbindung zwischen zwei Ankerpunkten durchgeführt werden, um die Änderung der Fasergeometrie bestimmen zu können. Zusätzlich ist die Dauer der Messung zu beachten. Dies ist vor allem für die Messungen im Fertigungsprozess relevant, da nur eine begrenzte Zeit zur Verfügung steht, bevor das Material nicht mehr für die Fertigung geeignet ist. Im Sinne des Qualitätsmodells ergeben sich damit die in Tabelle 4.3 dargestellten Qualitätsparameter und -kriterien.

Tab. 4.3: Qualitätsmerkmale, -parameter und -kriterien am Entscheidungspunkt 2 (DP2).

Qualitätsmerkmal	Qualitätsparameter	Qualitätskriterium
Verfügbarkeit	$Anz_{Geräte} = \frac{\text{Anzahl vorhandener Geräte}}{\text{Anzahl benötigter Geräte}} [\%]$	$Anz_{Geräte} \geq 100\%$
Prozesskorrektheit	$Anz_{Anker} = \frac{\text{Anzahl erreichbarer Anker}}{\text{Anzahl Anker}} [\%]$	$Anz_{Anker} \geq 100\%$
Zeiteinhaltung	Dauer der Messung t_{Mess}	$t_{Mat} > t_{Mess} + \text{Prozessdauer}$
Vollständigkeit	$Anz_{Koor} = \frac{\text{Anzahl realisierter Koordiantensysteme}}{\text{Anzahl notwendiger Koordiantensysteme}}$	$Anz_{Koor} \geq 100\%$
	$Anz_{Trafo} = \frac{\text{Anzahl realisierter Transformationen}}{\text{Anzahl notwendiger Transformationen}}$	$Anz_{Trafo} \geq 100\%$
	gleichmäßige Punktverteilung der Punktwolke	keine visuell feststellbaren Datenlücken
Korrektheit	Abweichung zur Referenzmessung Δ_{ref}	Minimierung Δ_{ref}
	Korrekte Realisierung der Koordinatensysteme	erfüllt
Genauigkeit	Standardabweichung (RMS)	innerhalb des Konfidenzbereichs
	Wiederholstandardabweichung	innerhalb der Gerätespezifikationen

Kontrollpunkt 1, Umsetzung - Fabrikationsplattform: An diesem Kontrollpunkt geht es darum, ob der Aufbau der Fertigungsplattform mit der Planung übereinstimmt und somit ein reibungsloser Fertigungsablauf ermöglicht werden kann. Des Weiteren ist auch die Rahmengeometrie zu überprüfen und ein Testlauf der geplanten Roboterpfade notwendig, um zu bestätigen, dass es bei der Fertigung zu keiner Kollision des Roboters kommt und alle Ankerpunkte gut erreicht werden. Im Sinne des Qualitätsmodells ergeben sich damit die in Tabelle 4.4 dargestellten Qualitätsparameter und -kriterien.

Tab. 4.4: Qualitätsmerkmale, -parameter und -kriterien am Kontrollpunkt 1 (CP1).

Qualitätsmerkmal	Qualitätsparameter	Qualitätskriterium
Verfügbarkeit	$m_{Mat} = \frac{\text{Menge vorhandenes Material}}{\text{Menge benötigtes Material}} [\%]$	$m_{Mat} \geq 100\%$
Korrektheit	Korrekte Funktionsweise des Systems $Korr_{sys}$	$Korr_{sys} = 1$ (erfüllt) $Korr_{sys} = 0$ (nicht erfüllt)
	Abweichung Rahmensollgeometrie Δ_{rahmen}	Minimierung

Entscheidungspunkt 3, Im Fertigungsprozess: Während der Fertigung ist eine dauerhafte Überwachung des verwendeten Materials notwendig, um zum einen zu überprüfen, ob noch ausreichend Material vorhanden ist und zum anderen, ob der Materialzustand noch geeignet für die Fertigung ist. Je nach Fertigungsart, mit oder ohne vorimprägnierten Fasern, muss dabei entweder nur der Zustand des Fadens oder auch der Zustand von Faser und Matrix separat betrachtet werden. Dabei ist vor allem die Trocknungszeit zu beachten, um sicherzustellen, dass der Faden im Wickelprozess ausreichend feucht ist, damit die einzelnen Lagen aneinander haften. Auch muss der reale Faser-Volumengehalt sowie die Faservorspannung gemessen und mit den gewünschten Werten verglichen werden. Im Sinne des Qualitätsmodells ergeben sich damit die in Tabelle 4.5 dargestellten Qualitätsparameter und -kriterien.

Tab. 4.5: Qualitätsmerkmale, -parameter und -kriterien am Entscheidungspunkt 3 (DP3).

Qualitätsmerkmal	Qualitätsparameter	Qualitätskriterium
Zeiteinhaltung	Verarbeitungszeit des Materials t_{Mat}	$t_{\text{Mat}} > \text{Prozessdauer}$
Korrektheit	Korrekte Funktionsweise des Systems Korr_{sys}	$\text{Korr}_{\text{sys}} = 1$ (erfüllt) $\text{Korr}_{\text{sys}} = 0$ (nicht erfüllt)

Kontrollpunkt 2, Bauteil: Der letzte Kontrollpunkt bezieht sich auf die Qualitätsüberprüfung des finalen Bauteils oder im Fall der Qualitätssicherung im Fertigungsprozess auf die betrachtete Messepoche. Dabei sind die optischen, geometrischen und strukturellen Eigenschaften von zentraler Bedeutung. Durch die optische Überprüfung lässt sich so bereits feststellen, ob es während der Fertigung zu einer Faserschädigung gekommen ist oder ob die Faserbündel eine kompakte Struktur bilden. Auch lässt sich hier bereits sehr gut feststellen, ob die einzelnen Schichten miteinander verbunden sind oder ob es zu Lücken zwischen den einzelnen Lagen kommt, was dann wiederum einen Einfluss auf die strukturellen Eigenschaften hat. Neben der Optik gibt auch das Gewicht einen Hinweis über das spätere strukturelle Verhalten. Durch die Bestimmung der Masse der Bauteile kann der finale Faservolumengehalt bestimmt werden. Weitere Hinweise bezüglich des strukturellen Verhaltens können mittels Belastungstest gewonnen werden, allerdings handelt es sich dabei nicht um eine zerstörungsfreie Prüfung und es müssen zusätzliche Elemente für den Test gefertigt werden. Werden die Bauteile nun einem Belastungstest unterzogen, kann an dieser Stelle auch das Verhalten der realen Bauteile mit dem berechneten Verhalten überprüft werden und sowohl die Maximallast als auch die Bruchstellen verglichen werden. Zuletzt ist an dieser Stelle die Geometrie der Bauteile zu beachten. Diese liefert Aufschluss darüber, ob die Annahmen, welche für die vorab durchgeführten Berechnungen getroffen wurden, treffend waren oder ob eventuelle Anpassungen diesbezüglich notwendig sind. Ein besonderes Augenmerk bei der Betrachtung der Geometrie liegt dabei auf der Lage der Schnittpunkte der einzelnen Faserbündel sowie der Querschnitte und deren Orientierung im Faserbündel. Auch der Zusammenhalt der einzelnen Lagen der Fertigung wird an dieser Stelle überprüft. Neben der Überprüfung des Bauteils ist an dieser Stelle auch die Evaluierung der Messung und Auswertung von Bedeutung, um die Ergebnisse entsprechend einordnen zu können. Werden zusätzlich einzelnen Fertigungsschritte der Produktion betrachtet, ist zusätzlich die Veränderung zur Vorepoche zu beachten. Dabei ist vor allem die Veränderung der Lage und Orientierung der einzelnen Segmente, sowie auch der Schnittpunkte von Interesse. Im Sinne des Qualitätsmodells ergeben sich damit die in Tabelle 4.6 dargestellten Qualitätsparameter und -kriterien.

Tab. 4.6: Qualitätsmerkmale, -parameter und -kriterien am Kontrollpunkt 2 (CP2).

Qualitätsmerkmal	Qualitätsparameter	Qualitätskriterium
Tragfähigkeit	Grenzzustand der Tragfähigkeit [N]	Anforderungen eingehalten
Vollständigkeit	gleichmäßige Punktverteilung der Punktwolke	keine visuell feststellbaren Datenlücken
	$\Delta_{\text{Linie}} = \text{Soll-Linienanzahl} - \text{Ist-Linienanzahl}$	$\Delta_{\text{Linie}} = 0$
	$\Delta_{\text{SP}} = \text{Soll-Schnittpunkanzahl} - \text{Ist-Schnittpunkanzahl}$	$\Delta_{\text{SP}} = 0$
	$\Delta_{\text{A}} = \text{Soll-Querschnittsflächenanzahl} - \text{Ist-Querschnittsflächenanzahl}$	$\Delta_{\text{A}} = 0$
Korrektheit	Abweichung der Schnittpunkte vom Soll dx, dy, dz, d_{3D}	Minimierung
	Abweichung der Querschnittsflächen d_A	Minimierung

4.2 Geometrische Qualitätssicherung

Die geometrische Qualitätssicherung wird im Folgenden am Entscheidungspunkt 2 für die Wahl des Messsystems und des Messaufbaus im Hinblick auf die Vollständigkeit, Korrektheit und Genauigkeit der Messung (vgl. Tabelle 4.3), sowie am Kontrollpunkt 2 für die finale Bauteilgeometrie hinsichtlich der Vollständigkeit, Korrektheit und Genauigkeit (vgl. Tabelle 4.6), durchgeführt. Die Geometrie des finalen Bauteils ist für die Evaluierung der unterschiedlichen Simulations- und Planungsschritte des Gesamtprozesses von großer Bedeutung. Dazu gehören der Vergleich mit der Simulation, der Syntaxplanung und auch der Vergleich mit den charakteristischen Punkten, den Schnittpunkten des Objektes, die in die strukturellen Berechnungen eingehen. All diese Berechnungen arbeiten allerdings mit einer Geometrie in einem unterschiedlichen Detaillierungsgrad. Um eine geometrische Qualitätssicherung durchführen zu können, ist die Bestimmung der geometrischen Kenngrößen in einem vergleichbaren Abstraktionslevel ein zentraler Bestandteil. Zudem können mit den Informationen bezüglich der realen Geometrie strukturelle Berechnungen durchgeführt werden und damit Belastungstests ersetzt. Damit kann sowohl Material als auch Zeit eingespart werden, welches sonst für die zusätzlich benötigten Komponenten benötigt worden wäre.

Bei der Bestimmung der geometrischen Kenngrößen der Bauteile sind vor allem die Lage der einzelnen Faserstränge, die Schnittpunkte der Faserstränge, sowie die Faserquerschnittsfläche und Orientierung dieser Flächen entscheidend. Bei den im Prozess vorkommenden Detaillierungsgraden bildet die Fasersyntax das abstrakteste Level. Bei diesem wird das Objekt durch Geraden dargestellt, deren Ende an einem Anker mittels eines Punktes approximiert wird. Die Pfadplanung hingegen stellt die reale Robotertrajektorie dar und enthält somit auch Informationen bezüglich der Ankerpunkte. Die gemessene Geometrie stellt nun eine Punktwolkenrepräsentation des realen Objektes dar. In Abbildung 4.3 sind die unterschiedlichen Detaillierungsgrade der Prozesse schematisch dargestellt. Ziel der Auswertung ist es nun aus dieser realen 3D-Repräsentation wieder ein abstrahiertes Linienmodell zu generieren und zusätzlich die Querschnittsflächen zu berechnen. Dafür sind die folgenden Auswerteschritte notwendig:

- Segmentierung der Punktwolke in einzelne Liniensegmente des Objekts,
- Geradenschätzung für die einzelnen Segmente,
- Verbinden der geschätzten Liniensegmente,
- Sortierung der Liniensegmente
- Berechnung der Querschnittsflächen.

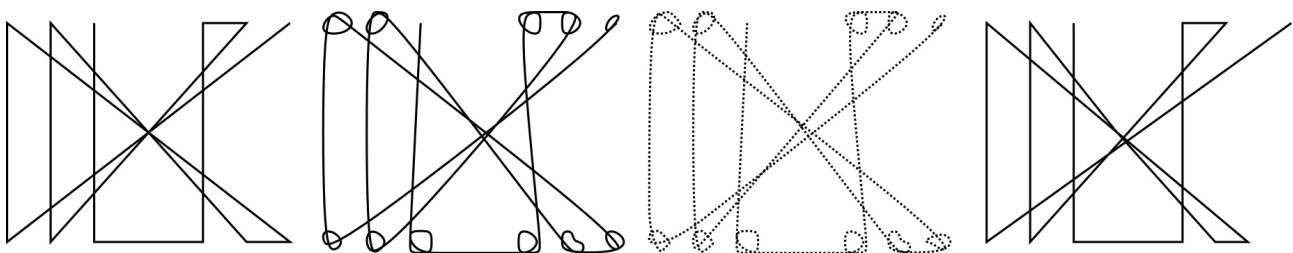


Abb. 4.3: Vergleich der unterschiedlichen Detaillierungsgrade im Planungs- und Fertigungsprozess. Von links nach rechts ist dabei die Syntax aus der Planung, die Pfadplanung, die gemessene Punktwolke sowie die rückgeführte Geometrie dargestellt.

Im Rahmen dieser Arbeit werden dabei vor allem die Linien, die Liniensegmente sowie die Schnittpunkte betrachtet. Ein Linie beschreibt dabei, entgegen der mathematischen Definition, die Verbindung zweier Ankerpunkte (Befestigungspunkte an der Rahmenkonstruktion). Ein Liniensegment dagegen beschreibt den Abschnitt einer Linie zwischen zwei Schnittpunkten beziehungsweise zwischen einem Schnittpunkt und einem Ankerpunkt und entspricht damit näherungsweise, abhängig von der Spannung des Fadens,

dem mathematischen Verständnis einer Strecke. Die Schnittpunkte stellen dabei die Berührungspunkte der einzelnen Liniensegmenten dar. Diese Begriffsdefinition ist auch in Abbildung 4.4 zur Verdeutlichung dargestellt.

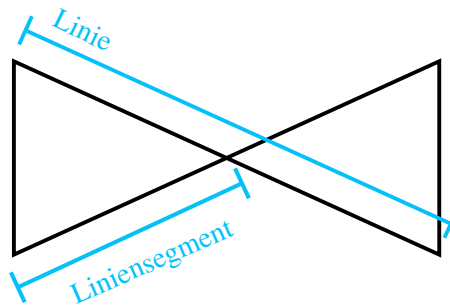


Abb. 4.4: Begriffsdefinition für die Unterteilung der einzelnen Abschnitte der Fasergeometrie.

Im Folgenden wird nun das erstellte Mess- und Auswerteverfahren genauer erläutert. Dabei wird zunächst die Datenaufnahme und die Erstellung eines Messkonzeptes betrachtet. Anschließend wird der entwickelte Auswertalgorithmus dargestellt.

4.2.1 Datenaufnahme

4.2.1.1 Wahl des Messverfahrens

Der erste Schritt um eine geometrische Qualitätssicherung durchführen zu können, ist die Erfassung der Geometrie des Bauteils und damit die Erstellung einer digitalen Repräsentation des Bauteils. Zunächst werden hier die Voruntersuchungen für die Wahl des Laserscanners betrachtet um anschließend das finale Messkonzept erstellen zu können. Die Anforderungen an das Messsystem waren dabei, dass es sich zum einen um ein mobiles System handeln sollte, da die Fertigung und somit auch die Messung in unterschiedlichen räumlichen Umgebungen stattfinden soll. Eine weitere Anforderung war die Messdauer. Da neben einer Messung des fertigen Bauteils auch Messungen im Fertigungsprozess durchgeführt werden sollten, musste ein Kompromiss zwischen Messdauer und erreichbarer Genauigkeit gewählt werden. Eine besondere Herausforderung an die Messung stellte die Struktur der zu messenden Objekte dar, da diese teils relativ feine Strukturen (im Extremfall eine minimale Breite von etwa 5 mm) aufweist. Zusätzlich handelt es bei den hier untersuchten Probekörpern um Strukturen, welche aus Kohlenstofffasern gefertigt wurden und damit eine schwarze, durch das Harz zusätzlich glänzende, Oberfläche aufweisen.

Zu Beginn wurden daher Versuche mittels TLS sowie der photogrammetrischen Aufnahme und Auswertung, wie in Abschnitt 3.1.1.1 dargestellt, durchgeführt. Dabei zeigte sich bei der photogrammetrischen Erfassung, dass die unterschiedlichen Beleuchtungssituationen, sowie die in der nahen Umgebung vorkommenden Objekte im Fabrikationssetup zu Problemen führten. Zu diesen Objekten gehörten dabei beispielsweise Kabel, die sich im Bild schlecht von den zu beobachtenden Objekten unterscheiden lassen. Damit fiel die Entscheidung, für die nachfolgenden Messungen ein TLS-System zu verwenden.

4.2.1.2 Voruntersuchungen für die Auswahl des TLS, Einfluss der Messkonfiguration und des Material auf Vollständigkeit, Korrektheit und Genauigkeit

Da unterschiedliche Laserscanner unterschiedliche Charakteristika aufweisen, wurden Testmessungen mit drei Geräten durchgeführt. Bei diesen handelte es sich um den Leica HDS7000, als Laserscanner, der das Phasenvergleichsverfahren zur Streckenmessung verwendet, sowie die beiden Laserscanner basierend auf

dem Impulslaufzeitverfahren: der Trimble X7, ausgelegt für kürzere Entfernungen, und der Riegl VZ2000, ausgelegt für größere Distanzen. Im Versuchsaufbau wurde nun ein Testobjekt in etwa 3 m Entfernung vom Laserscannerstandpunkt auf einem Drehtisch montiert. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 4.5 dargestellt. Messungen wurden dann jeweils mit allen drei Geräten durchgeführt. Da ein Objekt in der Realität selten nur aus einer frontalen Sicht gemessen wird, wird zusätzlich der Einfluss des Einfallswinkels auf die Qualität der Messung betrachtet. Um diesen zu untersuchen, wurde das Objekt auf dem Drehtisch in 10° Schritten bis zu einer Verdrehung von 90° gedreht und die Messungen entsprechend mit allen Geräten wiederholt. Um zusätzlich die Wiederholstandardabweichung der Messung zu betrachten, wurde die Nullposition (keine Verdrehung) mit allen Geräten fünfmal gemessen.

Da es sich bei den zu messenden Objekten um Objekte mit einer glänzenden schwarzen Oberfläche handelt, die im Allgemeinen nicht ideal für Laserscannermessungen sind, wurden zusätzliche Untersuchungen bezüglich des Einflusses der Oberflächeneigenschaften durchgeführt. Dazu wurden die Messungen im selben Messaufbau unter der Verwendung des AESUB Scanningsprays durchgeführt (vgl. Abschnitt 3.1.2.4). Dieses wird auf die zu messenden Oberflächen gesprüht und bildet eine mattweiße Schicht auf der Oberfläche des Objekts. Die Schichtdicke wird vom Hersteller mit 8-15 μm angegeben, was im Vergleich zur erwarteten Messgenauigkeit an dieser Stelle als vernachlässigbar angesehen werden kann (AESUB 2023). Das in dieser Arbeit verwendete Scanningspray sublimiert je nach Umgebungsbedingungen nach etwa 4 Stunden.



Abb. 4.5: Testsetup für den Vergleich der unterschiedlichen Laserscanner.

Für die durchgeführten Messungen wurden, um ein vergleichbares Ergebnis zu erhalten, vergleichbare Geräteeinstellungen für alle Scanner vorgenommen. Die daraus resultierenden Laserscannerspezifikationen sind den Datenblätter der Hersteller (Leica Geosystems AG 2012; Trimble Inc. 2020; RIEGL Laser Measurement Systems GmbH 2022) entnommen und in Tabelle 4.7 dargestellt.

Tab. 4.7: Relevante Laserscannerspezifikationen aus den Datenblättern der Hersteller, sowie aus persönlicher Kommunikation (Leica Geosystems AG 2012; Trimble Inc. 2020; RIEGL Laser Measurement Systems GmbH 2022).

Scanner	Auflösung	Punktabstand in 3 m Entfernung	Durchmesser des Laserspots in 3 m Entfernung	Scandauer
Leica HDS7000	0,036°	1,8 mm	4,4 mm	6 : 44 min
Trimble X7	0,028°	1,5 mm	4,4 mm	3 : 43 min
RieglVZ 2000	0,040°	2,1 mm	19,8 mm	9 : 38 min

In Abbildung 4.7 sind nun in der jeweiligen Ausgangstellung die Punktwolken aller drei Laserscanner mit und ohne Verwendung eines Scanningsprays dargestellt. Neben der reinen Geometrie sind hier zusätzlich die Intensitäten dargestellt. Für den Riegl VZ2000 stehen an dieser Stelle zusätzlich die Reflektanzen zur Verfügung, allerdings werden, zur besseren Vergleichbarkeit, für alle Laserscanner die Intensitäten betrachtet.

Vergleich der Messungen der Nullepoche (keine Verdrehung) hinsichtlich Genauigkeit und Korrektheit:

Die ersten Untersuchungen wurden hinsichtlich der Wiederholstandardabweichung durchgeführt und damit die Genauigkeit der Messung betrachtet. Ziel dabei war es zu untersuchen, ob Unterschiede in der erfassten Punktwolke bei mehrmaligen Messungen festgestellt werden können. Dabei konnten für alle drei Laserscanner keine sichtbaren Unterschiede zwischen den Einzelscans festgestellt werden. In einem nächsten Schritt wurden dann die Randbereiche des gemessenen Objektes genauer betrachtet. Dabei zeigte sich, dass durch die geringe Objektbreite nur wenige Laserspots vollständig auf dem Objekt liegen.

Der Umgang der Laserscanner mit diesen unvollständigen Laserspots ist daher für die weitere Betrachtung entscheidend. Für die Messungen mit dem Leica HDS7000 zeigt sich, dass durch diese unvollständigen Laserspots der Mixed-Pixel-Effekt auftritt (vgl. Abschnitt 3.1.2.3). Dabei zeigt sich, dass das Objekt in einem regelmäßigen Abstand von 80 cm noch vier weitere Male zu beobachten ist (vgl. Abbildung 4.6). Auffällig ist, dass dieser Effekt nur bei den Messungen des Leica HDS7000, einem Scanner, der auf dem Phasenvergleichsverfahren basiert, deutlich zu beobachten ist und damit die Korrektheit der Messung im Vergleich zu den anderen Laserscannern niedriger ist. Dieser Effekt ist bei den auf dem Impulslaufzeitverfahren basierenden Laserscannern nicht zu beobachten.

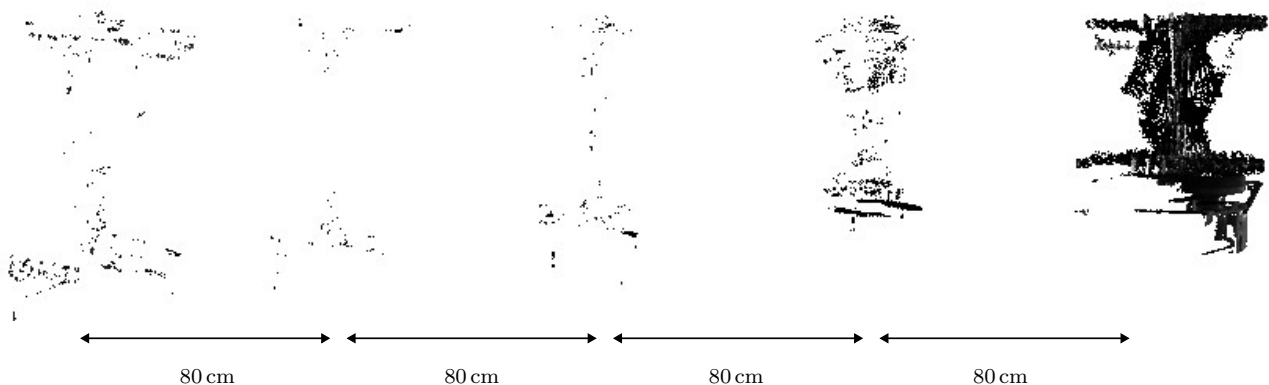


Abb. 4.6: Punktwolke des Testobjektes aus Messungen des Leica HDS7000 und die zusätzlichen sichtbaren Punktwolken, die durch den Mixed-Pixel-Effekt erzeugt werden.

Vergleich der Messungen mit und ohne Scanningspray hinsichtlich Vollständigkeit: Beim Vergleich der durchgeführten Messungen ohne Spray mit den Messungen unter Verwendung des Scanningsprays zeigt sich, dass durch die Verwendung des Sprays die Oberfläche vollständiger erfasst werden kann. Außerdem zeigt sich, dass die vollständige Erfassung des Objektes ohne Verwendung eines Scanningsprays nur mit dem Trimble X7 möglich war. Des Weiteren fällt auf, dass die Lücken bei den Messungen mit dem Leica HDS 7000 und dem Riegl VZ2000 (vgl. Abbildung 4.7a und 4.7e) an den gleichen Stellen des Objektes auftreten. Da der Messaufbau für alle Laserscanner identisch war, deutet dies darauf hin, dass der Auftreffwinkel am Objekt an dieser Stelle bei beiden Geräten zu einer unvollständigen Punktwolke führt. Zusätzlich zeigt sich an diesen Stellen auch für die Messungen mit dem Trimble X7 ohne die Verwendung des Scanningsprays, dass die Intensitäten in diesen Bereichen eher geringer sind. Dies deutet auf wenige bis keine vollständigen Laserspots in diesen Bereichen hin. Dies ist ebenfalls ein Anzeichen für einen Einfallswinkel, der vom Idealfall des rechtwinkligen Auftreffens des Laserstrahl am Objekt abweicht.

Vor allem bei den Messungen mit dem Riegl VZ2000 zeigt sich dabei, dass die Intensitäten zum Rand hin

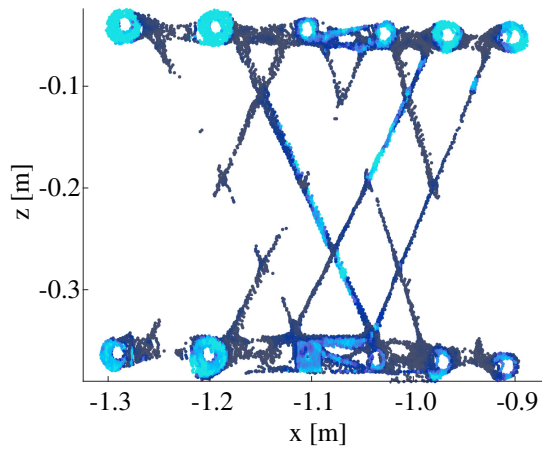
stark abnehmen, was darauf hindeutet, dass der Laserspot sich an diesen Stellen nicht mehr vollständig auf dem Objekt befindet. Zusätzlich wird nun die Anzahl der gemessenen Objektpunkte mit und ohne Verwendung des Scanningsprays verglichen. Dabei wird davon ausgegangen, dass mit Verwendung des Scanningsprays eine Vollständigkeit von 100% erreicht wird. Diese sind in Tabelle 4.8 dargestellt. Da unter Verwendung des Scanningsprays auch Punkte auf dem Objekt detektiert werden, deren Zentrum nicht auf dem Objekt liegt ist auch bei Prozentzahlen von unter 100% von einer vollständigen Erfassung auszugehen. Dabei zeigt sich, dass die Änderung der Punktzahl bei den Trimble X7 Messungen mit 77% der Punkte bei der Messung ohne Spray am geringsten ist. Die größte Abweichung zeigt sich hier bei den Messungen des Riegl VZ2000 mit 62%. Dies lässt sich vor allem durch die Spotgröße erklären (vgl. Tabelle 4.7). Prinzipiell zeigt sich auch, dass die Intensitäten bei der Verwendung des Sprays deutlich stärker sind als ohne dessen Verwendung.

Tab. 4.8: Punktzahl am Objekt.

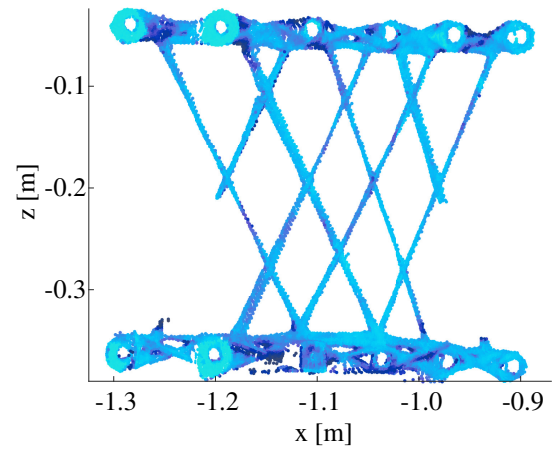
Scanner	0° ohne Spray	0° mit Spray	50° ohne Spray	50° mit Spray
Leica HDS7000	9031	12148	7757	11272
Trimble X7	23994	31077	17908	25328
Riegl VZ2000	10304	16709	3445	12246

Einfluss des Einfallswinkels auf die Vollständigkeit der Messung: In einem nächsten Schritt wird betrachtet, wie sich die Anzahl der Messpunkte mit Veränderung des Einfallswinkels verändert. Im Folgenden wird dabei nun eine Drehtischposition von 50° betrachtet. Zusätzlich finden sich die Darstellungen der Punktwolken für die Messungen mit Drehtischpositionen von 10° – 40° in den Abbildungen A.1-A.4. Die Ergebnisse hierzu sind in Abbildung 4.8 dargestellt. Die Einfallswinkel die bei einer Drehtischposition von 50° auftreten, entsprechen dabei Winkeln, die in der realen Anwendung häufig zum Einsatz kommen und somit genauer betrachtet werden. Dabei zeigt sich, dass der Trimble X7 und der Leica HDS7000 auch bei schlechteren Einfallswinkeln noch ausreichend Messpunkte auf dem gewünschten Messobjekt zurückgeben. Bei den Messungen mit dem Riegl VZ2000 zeigt sich dabei allerdings, dass die Erfassung ohne Scanningspray hier nur noch sehr lückenhaft möglich ist. Betrachtet man auch hier wieder die Punktzahl auf dem Objekt mit und ohne Spray, so zeigt sich, dass der Trimble X7 mit 71% immer noch prozentual die meisten Punkte auf dem Objekt detektiert. Der Leica HDS7000 folgt mit 69% allerdings nur knapp dahinter. Hier zeigt sich, dass im Vergleich zur 0°-Position nur eine prozentuale Veränderung von 5 – 6% festzustellen ist. Ein größerer Unterschied zeigt sich bei der Betrachtung der Riegl VZ2000 Daten. Dabei zeigt sich, dass ohne die Verwendung des Scanningsprays nur etwa ein Viertel der Messpunkte auf dem Objekt liegt. Auch hier sind die deutlich größeren Spotgrößen wieder entscheidend für die schlechtere Erfassung.

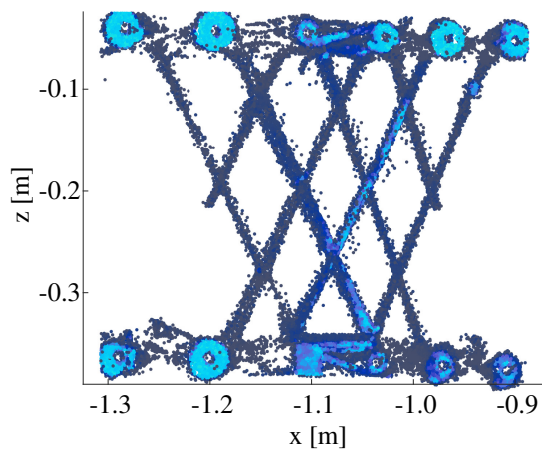
Neben den Änderungen der Punktzahl am Objekt, unter Verwendung des Sprays, kann nun auch die Änderung der Punktzahl im verdrehten Zustand betrachtet werden. Hierfür wird die Punktzahl ohne Verdrehung als 100% angenommen. Dabei fällt auf, dass sich die Punktzahl beim Leica HDS7000 am wenigsten ändert und bei einer Verdrehung von 50° mit Spray 93% der Ursprungspunktzahl erreicht wird und ohne 85%. Der Trimble X7 bewegt sich auch hier in einer Größenordnung von 75% mit Spray und 71% ohne die Verwendung des Scanningsprays. Der Riegl VZ2000 weist auch hier die größten Unterschiede auf mit 33% mit Spray und 28% ohne Spray. Hier bestätigt sich der optische Eindruck direkt, dass die Erfassung mit dem Riegl VZ2000 in beiden Szenarien bei steigendem Einfallswinkel nicht mehr vollständig erfolgt. Dabei zeigt sich, dass hier bereits bei einer Drehtischposition von 20° nur noch eine stark lückenhafte Erfassung (vgl. Abbildung A.2) möglich ist. Abschließend zeigt sich hier, dass eine vollständige Erfassung unter Verwendung des Scanningsprays für alle betrachteten Einfallswinkel mit allen Laserscanner möglich ist, der Leica HDS7000 hierbei allerdings die wenigsten Rauschpunkte aufweist. Die visuelle Analyse unterschiedlicher Einfallswinkel zeigt allerdings, dass ohne die Verwendung des Scanningsprays eine vollständige Erfassung nur mit dem Trimble X7 möglich ist. Auch hier zeigen sich aber bei steigendem Einfallswinkel immer mehr Lücken in der Punktwolke.



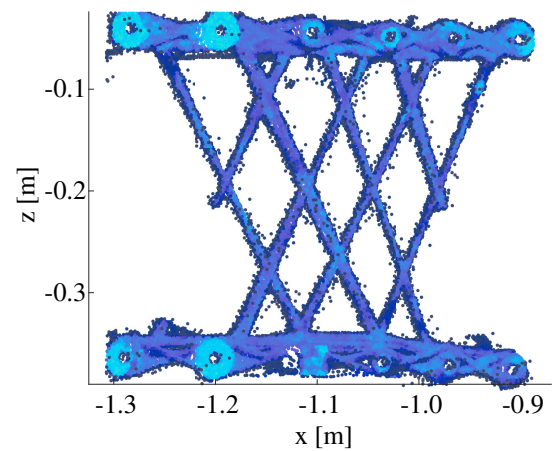
(a) Leica HDS7000 Scan ohne Spray 0°-Position



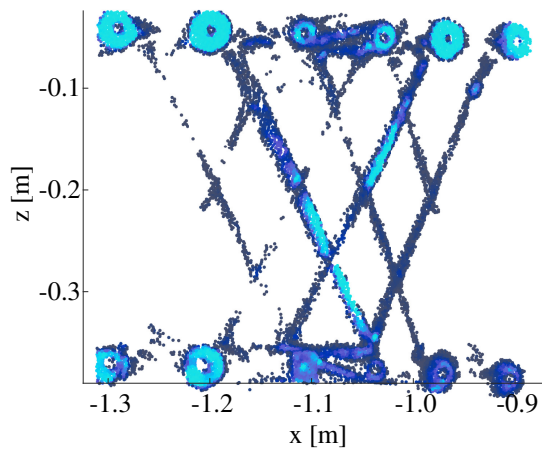
(b) Leica HDS7000 Scan mit Spray 0°-Position



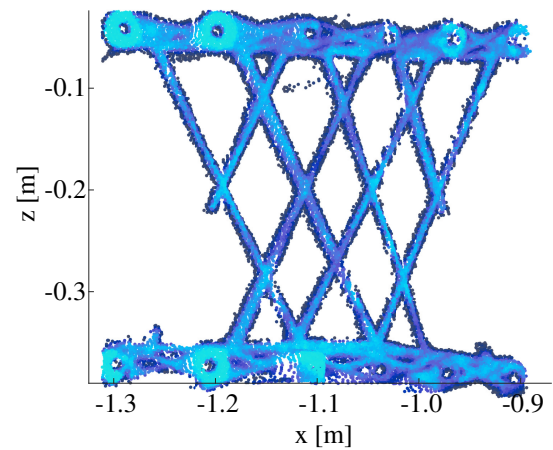
(c) Trimble X7 Scan ohne Spray 0°-Position



(d) Trimble X7 Scan mit Spray 0°-Position



(e) Riegl VZ2000 Scan ohne Spray 0°-Position



(f) Riegl VZ2000 Scan mit Spray 0°-Position

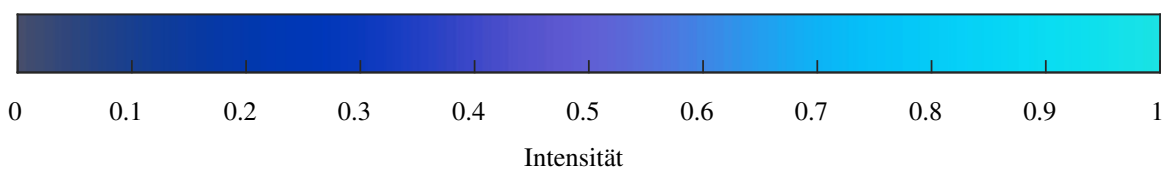
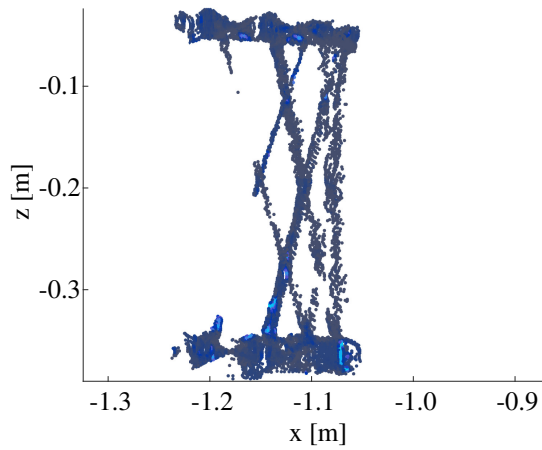
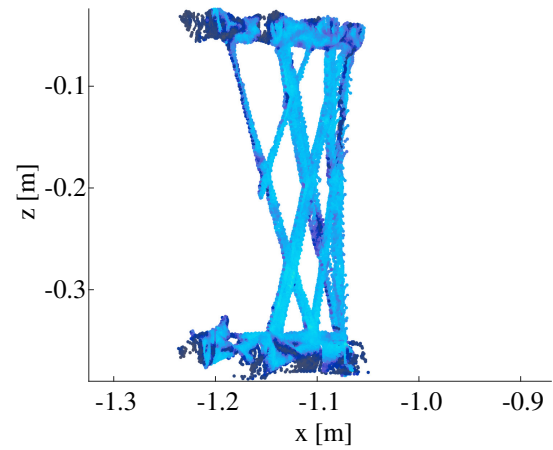


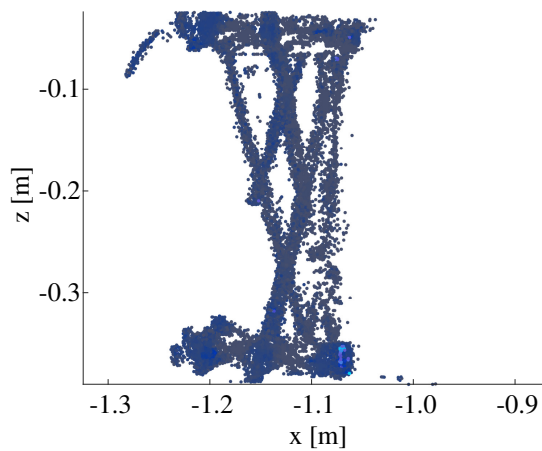
Abb. 4.7: Scans eines Standpunktes des Testobjektes aus den Messungen der Laserscanner Leica HDS7000, Trimble X7 und Riegl VZ2000 mit und ohne Verwendung eines Scanningsprays in der 0°-Position.



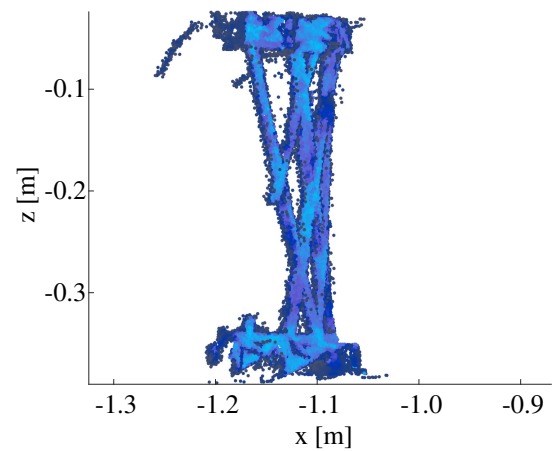
(a) Leica HDS7000 Scan ohne Spray 50°-Position



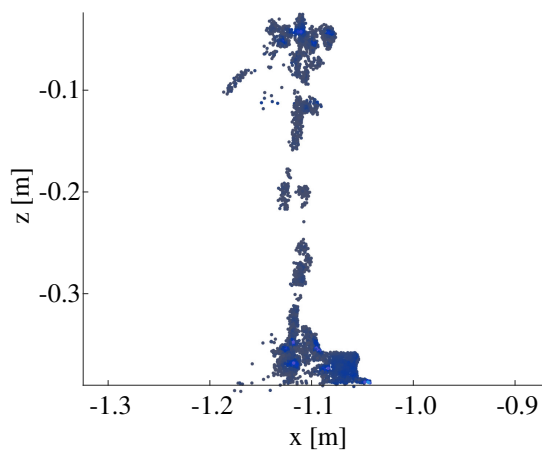
(b) Leica HDS7000 Scan mit Spray 50°-Position



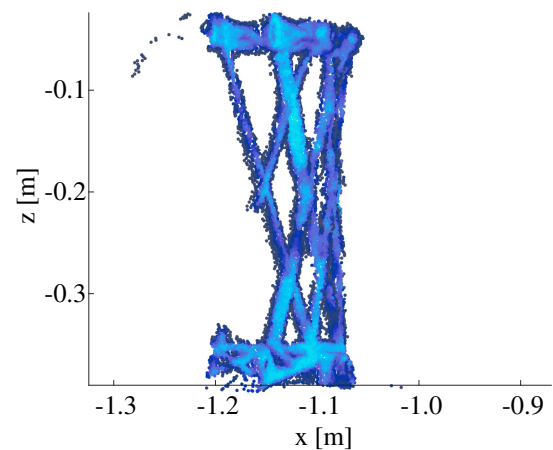
(c) Trimble X7 Scan ohne Spray 50°-Position



(d) Trimble X7 Scan mit Spray 50°-Position



(e) Riegl VZ2000 Scan ohne Spray 50°-Position



(f) Riegl VZ2000 Scan mit Spray 50°-Position

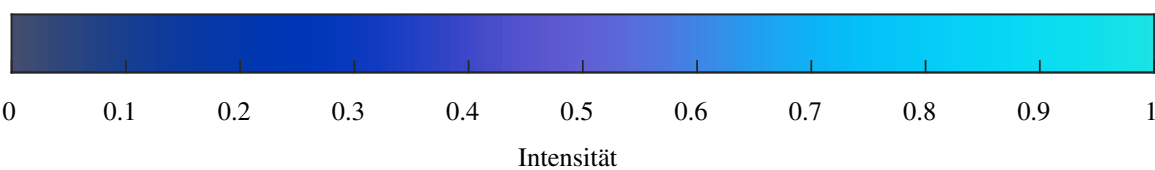


Abb. 4.8: Scans eines Standpunktes des Testobjektes aus den Messungen der Laserscanner Leica HDS7000, Trimble X7 und Riegl VZ2000 mit und ohne Verwendung eines Scanningsprays in der 50°-Position.

Untersuchung der Intensitäten sowie der Randbereiche des Messobjektes hinsichtlich der Korrektheit der Punktwolke: Neben der Vollständigkeit der Erfassung werden nun auch die Intensitäten genauer betrachtet. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Intensitäten zum Rand des Objekts hin abnehmen sollten, da an dieser Stelle nur unvollständige Laserspots auftreten. Zu diesem Zweck werden nun zwei kleinere Ausschnitte (A1 und A2) der Punktwolke genauer betrachtet. Diese befinden sich räumlich auf etwa gleicher Höhe und sind an der Achse durch die Objektmitte gespiegelt. Die ausgewählten Bereiche sind in Abbildung 4.9 und die Punktzahl der einzelnen Ausschnitte in Tabelle 4.9 dargestellt. Aufgrund der Krümmung des Objekts sind durch die beiden Ausschnitte unterschiedliche Einfallswinkel zu beobachten, die einen Einfluss auf die Intensitäten haben können. Der Einfallswinkel für den Ausschnitt A1 beträgt dabei ca. 65° und der Einfallswinkel für den Ausschnitt A2 ca. 90° , der Laserstrahl trifft also nahezu rechtwinklig auf das Testobjekt. Da sich die Erfassung mit dem Leica HDS7000 in beiden Szenarien (mit und ohne Scanningspray) als schwierig erwies, werden im Folgenden nur der Trimble X7 und der Riegl VZ2000 weiter betrachtet.

Tab. 4.9: Punktzahl am Objekt für die Ausschnitte A1 und A2.

Scanner	A1 ohne Spray	A1 mit Spray	A2 ohne Spray	A2 mit Spray
Trimble X7	93	79	100	94
Riegl VZ2000	39	55	56	44

Auffällig ist hierbei zunächst die absolute Punktzahl in den einzelnen Ausschnitten. Für die meisten Fälle ist diese bei den Messungen ohne Spray höher als im Vergleich zu den Messungen mit Spray. Dieser Effekt tritt auf, da die Ausschnitte an Stellen gewählt wurden, an denen die Punktwolken beider Laserscanner das Testobjekt vollständig erfasst haben.

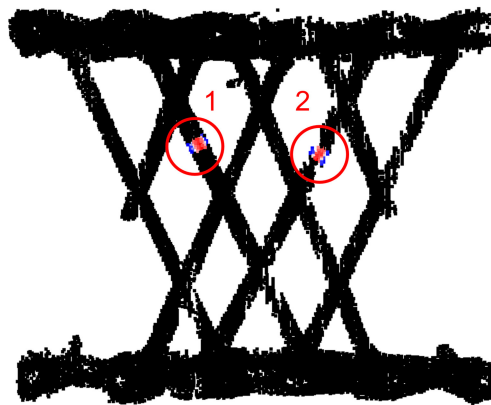


Abb. 4.9: Punktwolke des Testobjekts mit den beiden ausgewählten Ausschnitten 1 und 2.

Die Betrachtung der Punktwolkenschnitte für den Ausschnitt 1 zeigt, dass vor allem bei den Messungen des Riegl VZ2000 mit Scanningspray ein ansteigender und abfallender Intensitätsgradient im Verlauf des Faserquerschnitts zu erkennen ist (vgl. Abbildung 4.10d). Ohne den Einsatz des Sprays ist immer noch ein Unterschied in den Intensitätswerten zwischen den Randpunkten und den Punkten in der Mitte des Faserbündels sichtbar (vgl. Abbildung 4.10c). Dieser Unterschied zeigt sich auch beim Trimble X7 mit Scanningspray. Auffällig ist, dass es keinen fließenden Übergang zwischen den Intensitätswerten gibt, sondern vielmehr eine plötzliche Veränderung (vgl. Abbildung 4.10b). Ohne den Einsatz des Sprays ist kein Unterschied in den Intensitäten zu erkennen (vgl. Abbildung 4.10a).

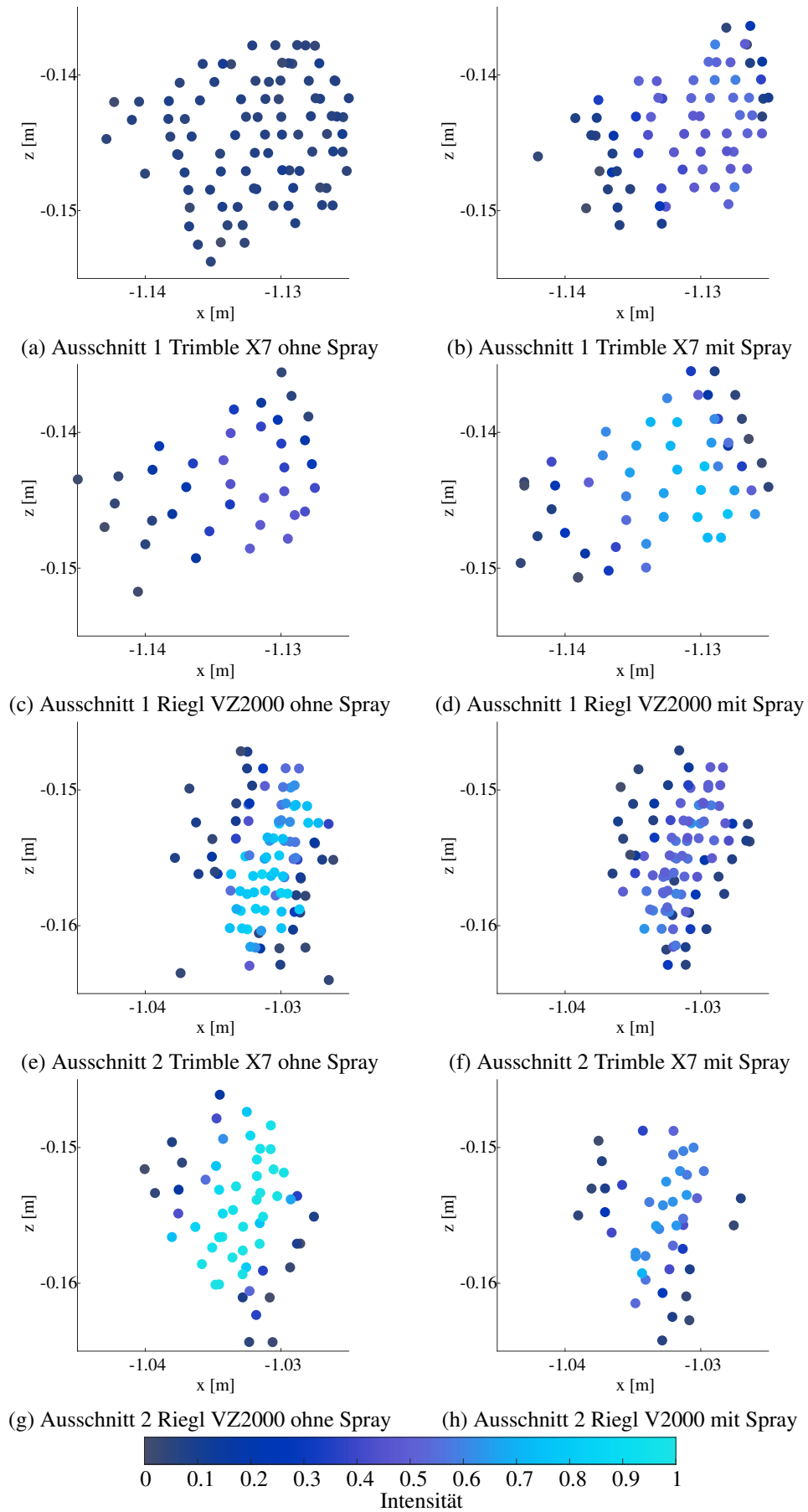


Abb. 4.10: Punktwolkenausschnitte des Testobjektes zum Vergleich der Intensitäten aus den Messungen des Trimble X7 und Riegl VZ2000 mit und ohne Scanningspray.

Der zweite Bereich zeigt in allen Scans die stärkste Intensität, da der Messstrahl fast senkrecht auf das Objekt trifft. Für alle vier betrachteten Messszenarien ist hier ein Gradient der Intensitäten zu beobachten (vgl. Abbildungen 4.10e - 4.10h). Dabei ist besonders auffällig, dass die Intensitäten ohne Scanningspray stärker erscheinen als mit Scanningspray. Dieser Effekt ist bei beiden Laserscannern zu beobachten. Bei der Betrachtung der Intensitäten muss allerdings beachtet werden, dass diese nur einen relativen Wert angeben und es sich nicht um eine physikalische Größe handelt. Aus diesem Grund sind gleiche Intensitäten unterschiedlicher Laserscanner nicht mit einem gleich starken Signal gleichzusetzen und dienen hier vor allem der Visualisierung. Auch ist zu beachten, dass die Intensitäten geräteintern bereits prozessiert sind und dabei auch von der Messumgebung beeinflusst werden können. Eine weitere Beobachtung in diesem Ausschnitt ist, dass die Ränder des Faserbündels ohne Verwendung des Scanningsprays deutlicher definiert sind, der Rand der Faser in der Punktwolke also klarer erkennbar ist. Dies ist besonders beim Riegl VZ2000 sichtbar. Die jeweilige Ausdehnung der Punktwolke kann nun für beide Ausschnitte betrachtet werden. Dabei zeigt sich, dass es einen Unterschied in der Ausdehnung zwischen den Szenarien mit und ohne Scanningspray gibt. Dies wird vor allem im Ausschnitt 1 sichtbar. Die größere Ausdehnung zeigt sich dabei auch wie bereits eingangs erwähnt in der höheren Punktzahl in den einzelnen Ausschnitten für die Messungen ohne die Verwendung des Scanningsprays.

Da die Spotgröße im Vergleich zur Objektgröße recht groß ist, liegen nur wenige Punkte vollständig auf dem Objekt. Die meisten Messungen sind daher Mischreflexionen. Dies ist auch der Grund, weshalb die Intensitäten zum Rand hin abnehmen. Dabei zeigt sich auch, dass die Punktwolken aus den Messungen mit dem Trimble X7 in allen Fällen deutlich mehr Punkte aufweisen als die Punktwolken aus den Riegl VZ2000 Messungen. Auch dies ist auf die deutlich größere Spotgröße des Riegl VZ2000 zurückzuführen, da so der Anteil des Laserspots, der das Objekt trifft, deutlich geringer ist, im Vergleich zu den Laserspots des Trimble X7.

Um die festgestellten Unterschiede in der Ausdehnung der einzelnen Ausschnitt genauer betrachten zu können, und damit den Einfluss des Scanningsprays auf die Korrektheit der gemessenen Ränder der Faserbündel zu untersuchen, werden nun die Schatten der Punktwolken, also die Punktwolke des Hintergrunds des Objektes, genauer betrachtet. Da der Trimble X7 in den bisherigen Analysen die vielversprechendsten Ergebnisse für diese Anwendung lieferte, werden an dieser Stelle nur die Messungen des Trimble X7 mit und ohne Scanningspray betrachtet.

Um den Einfluss des Scanningsprays untersuchen zu können, werden die Differenzen aus den Abbildungen beider Hintergründe gebildet. Damit ergeben sich die Bereiche des Hintergrunds, in denen nur eine der beiden Varianten eine Messung liefert. In Abbildung 4.11 ist der Differenzschatten der beiden Punktwolke mit und ohne Scanningspray dargestellt. Bereiche, in denen sich das Messergebnis nicht unterscheidet, sind dabei in weiß dargestellt. Bei den blauen Punkten handelt es sich um die Bereiche, in denen nur die Punkte ohne die Verwendung des Scanningsprays vorhanden sind, während es sich bei den roten Bereichen um jene handelt, in denen nur die Punkte mit Verwendung des Scanningsprays vorhanden sind. Von besonderem Interesse sind hier die Randbereiche, da sich hieraus ableiten lässt, wie viele zusätzliche Punkte mit dem Spray erfasst werden und damit auch die Größenordnung der Veränderung der erfassten Geometrie. Eine genauere Betrachtung des Schattens zeigt, dass der Schatten bei Verwendung des Sprays generell größer ist, was anhand der hohen Anzahl zusätzlicher blauer Punkte sichtbar ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich in diesem Fall mehr Punkte auf dem Objekt befinden, was auch die Beobachtungen aus Tabelle 4.8 bestätigen. Es zeigt aber auch, dass diese Effekte nicht gleichmäßig über das gesamte Objekt verteilt auftreten. Es ist auch zu erkennen, dass die geringsten Unterschiede im Bereich von Ausschnitt 1 und 2 auftreten. Für Ausschnitt 2, an dem der Messstrahl fast senkrecht auf das Objekt trifft, zeigt sich, dass hier eine der wenigen Stellen auftritt, an denen es mehr Punkte für die Messungen mit Scanningspray auf dem Hintergrund liegen im Vergleich zu den Messungen ohne Scanningspray. Dies zeigt, dass der Einfallswinkel auf das Messobjekt den Einfluss des Grenzwertes für die Intensitäten erhöht und somit zu größeren Unterschieden zwischen den Messungen mit und ohne Scanningspray führt.

Neben dem Auftreten der Unterschiede ist auch die Größe der Unterschiede von Bedeutung. So lassen sich auch die Unterschiede in der erfassten Geometrie des Objekts genauer untersuchen. Wie bereits erwähnt, ist die Abweichung nicht in allen Bereichen des Objekts gleich groß. In den meisten Regionen lassen sich jedoch am Rand des Objekts Unterschiede in der Größenordnung von zwei Messpunkten feststellen. Bei einem

Punktabstand von 1,5 mm im Abstand des Objekts (vgl. Tabelle 4.7) bedeutet dies eine Differenz von 3 mm an jedem Objektrand. Da dieser Effekt nun für die Gesamtgeometrie doppelt berücksichtigt werden muss, da der Effekt auf beiden Seiten des Faserbündels auftritt und sich somit auf 6 mm summieren kann, hat dies bei einer Objektgröße von 5 mm bis 20 mm einen enormen Einfluss.

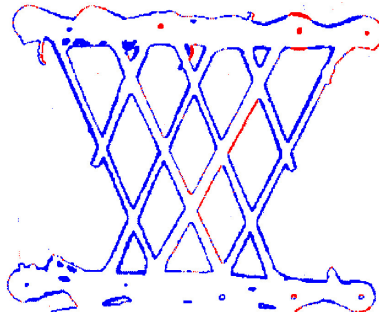


Abb. 4.11: Vergleich der Messungen des Hintergrundes des Objektes für den Trimble X7 mit und ohne Scanningspray. Blau sind dabei Bereiche, in denen mehr Messpunkte ohne die Verwendung des Scanningsprays im Hintergrund befinden, während in rot die Bereiche dargestellt werden, in denen sich mehr Punkte mit Verwendung des Scanningsprays im Hintergrund befinden.

Da sich daraus allerdings noch kein Rückschlüsse über die Korrektheit der erfassten Geometrie und damit keine Entscheidung hinsichtlich der Verwendung des Scanningsprays getroffen werden kann, wird die in Abschnitt 4.2.1.5 weiter betrachtet.

4.2.1.3 Wahl des Laserscanners

Für die Wahl des Laserscanners, werden die in Tabelle 4.3 Qualitätsparameter für die Auswahl des Messgerätes betrachtet. Für die Anforderungen an den Laserscanner ist hierbei die Vollständigkeit der Messung, es sollen keine visuellen Lücken in der Punktwolke auftreten, die Korrektheit der Messung, die Messungen sollen der realen Fasergeometrie entsprechen und die Genauigkeit der Messung, im Sinne der Wiederholstandardabweichung entscheidend. Zusätzlich ist die Messzeit zu beachten, da auch Messungen im Fertigungsprozess durchgeführt werden sollen. In Tabelle 4.10 sind die Qualitätsmerkmale, sowie die Erfüllung dieser dargestellt. Für die Beurteilung der Vollständigkeit wurde hier die Vollständigkeit der Punktwolken unter den verschiedenen betrachteten Einfallswinkeln gemeinsam betrachtet. Die Korrektheit betrachtet hier den Bereich der realen Fasergeometrie, dies ist für die Laserscanner Trimble X7 und Riegl VZ2000 nicht beurteilbar, während durch den festgestellten Mixed-Pixel-Effekt für die Messungen mit dem Leica HDS7000 die Korrektheit als nicht erfüllt betrachtet werden kann. Die Genauigkeit betrachtet an dieser Stelle nur die Wiederholgenauigkeit der Messung, die für alle Laserscanner im Vergleich erfüllt wird.

Tab. 4.10: Beurteilung der Qualitätsmerkmale für die Wahl des Laserscanners.

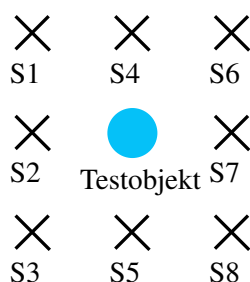
Qualitätsmerkmal	Leica HDS7000		Trimble X7		Riegl VZ2000	
	ohne Spray	mit Spray	ohne Spray	mit Spray	ohne Spray	mit Spray
Zeiteinhaltung	nicht erfüllt	nicht erfüllt	erfüllt	erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
Vollständigkeit	nicht erfüllt	erfüllt	erfüllt	erfüllt	nicht erfüllt	erfüllt
Korrektheit	nicht erfüllt	nicht erfüllt	<i>nicht beurteilbar</i>	<i>nicht beurteilbar</i>	<i>nicht beurteilbar</i>	<i>nicht beurteilbar</i>
Genauigkeit	erfüllt	erfüllt	erfüllt	erfüllt	erfüllt	erfüllt

Letztendlich fiel die Entscheidung für die weiteren Messungen auf den Trimble X7. Da mit diesem eine vollständige Erfassung möglich ist und diese auch unter größeren Einfallswinkeln noch Ergebnisse mit vergleichsweise geringen Lücken liefert. Dies ist vor allem relevant, wenn die zu messenden Strukturen größer oder auch komplexer sind, da in diesen Fällen nicht für jeden Abschnitt des Bauteils eine ideale Aufnahmegeometrie gewährleistet werden kann. Ein weiteres Argument war hierbei, dass eine vollständige Erfassung auch ohne Spray möglich ist. Dies ist vor allem dann relevant, wenn Messungen in der Fertigung durchgeführt werden sollen und die Oberfläche dabei nicht beeinträchtigt werden darf, da direkt nach der Messung die Fertigung fortgesetzt werden soll. Ein weiterer Faktor, der diese Entscheidung stützt, ist die Messzeit. Diese ist mit dem Trimble X7 am geringsten, was den Gesamtmessaufwand damit minimiert und damit das effizienteste Messsystem darstellt. Nachdem die Wahl auf den Trimble X7 als Messinstrument fiel, wurden in den weiteren Untersuchungen unterschiedliche Messkonfigurationen analysiert um die zu messenden Objekte mit so vielen Standpunkten wie nötig aber auch so wenigen wie möglich zu erfassen. Diese Untersuchungen werden im folgenden Abschnitt dargestellt.

4.2.1.4 Messkonzept

Mit der Entscheidung für den Trimble X7 Laserscanner wurde in einem nächsten Schritt nun das Messkonzept für die Datenaufnahme sowohl für das finale Bauteil als auch für die Messungen im Fertigungsprozess genauer betrachtet. Dabei zeigte sich recht schnell, dass eine Messkonfiguration mit möglichst gleichen Sichten auf alle Bereiche des Objektes durch die räumlichen Randbedingungen der Produktion nicht immer gewährleistet werden kann, weshalb die Anforderungen an das Messkonzept erhöht sind. Ziel ist es daher, ein Messkonzept zu entwickeln, welches auch unter nicht idealen Bedingungen noch zufriedenstellende Messergebnisse liefern kann. Durch die teils stark individuellen Geometrien der Bauteile ist zusätzlich die Verdeckung durch das Objekt selbst zu berücksichtigen. Neben der möglichst optimalen Messgeometrie ist aber auch die praktikable Umsetzung und damit die benötigte Zeit für die Vermessung zu berücksichtigen. Dies ist vor allem bei Messungen im Produktionsprozess von großer Bedeutung, da die Messzeit die zur Verfügung stehende Fertigungszeit, in der das Material sich verarbeiten lässt, weiter reduziert.

Um eine ideale Messkonfiguration zu finden, wurden zunächst Scans von acht Standpunkten durchgeführt. Diese waren dabei in einem regelmäßigen Raster mit dem Objekt im Zentrum angeordnet (vgl. Abbildung 4.12). Der Abstand der Standpunkte zum Objekt betrug dabei circa 2 m. Diese Scans wurden dann in verschiedenen Kombinationen mittels gleichmäßig verteilter Black-White-Zielzeichen registriert und die registrierten Punktwolken im Hinblick auf die Vollständigkeit der Erfassung betrachtet. Für die Messungen war das Testobjekt dabei mit der Vorderseite in Richtung Standpunkt 2 und mit der Rückseite in Richtung Standpunkt 7 ausgerichtet. Die Scanpositionen 4 und 5 waren demnach seitlich am Objekt. Die Positionen 1, 3, 6 und 8 hatten damit einen Winkel von etwa 45° zur Vorder- bzw. Rückseite des Objektes. Für die Auswertung wurde nun die Kombination aller Scans mit 4 weiteren Kombinationen verglichen. Die verwendeten Kombination sind in Tabelle 4.11 dargestellt. Um zusätzlich den Einfluss des Scanningsprays weiter zu betrachten, wurden von allen Standpunkten die Scans mit und ohne Spray für ein Objekt durchgeführt.



Tab. 4.11: Verwendete Standpunktkonfigurationen.

Konfiguration	Verwendete Standpunkte
Konfiguration 1	1,2,3,4,5,6,7,8
Konfiguration 2	1,3,6,8
Konfiguration 3	2,4,5,7
Konfiguration 4	2,7
Konfiguration 5	1,2,3,6,7,8

Abb. 4.12: Messaufbau zur Bestimmung einer idealen Messkonfiguration.

Um die unterschiedlichen Messkonfigurationen beurteilen zu können, wurden Testmessungen für zwei verschiedene Objekte durchgeführt. Bei diesen handelt es sich um ein Objekt in Form einer 8, welches mit nur zwei Hülsen auf gleicher Höhe gefertigt wurde (vgl. Abbildung 4.13a) und um ein X-förmiges Objekt, welches einen Höhenunterschied in der z -Achse aufweist (vgl. Abbildung 4.13b). Da es sich bei den Objekten um relativ kleine Objekte handelte, wurde hier darauf verzichtet, Messungen in unterschiedlichen Höhen durchzuführen.



(a) Probekörper 1: 8-Element



(b) Probekörper 2: X-Element

Abb. 4.13: Die für die Evaluierung des Messkonzeptes verwendeten Probekörper in den jeweiligen Messhaltungen montiert.

Diese beiden Testobjekte wurden dann von allen acht Standpunkten aufgenommen und nach den in Abbildung 4.12 und Tabelle 4.11 dargestellten Konfigurationen ausgewertet. Die Abbildungen 4.14 und 4.15 zeigen die Punktwolken nach der Registrierung der einzelnen Standpunkte.



(a) Konfiguration 1



(b) Konfiguration 2



(c) Konfiguration 3



(d) Konfiguration 4



(e) Konfiguration 5

Abb. 4.14: Darstellung der Punktwolke des 8-Elements nach der Registrierung der unterschiedlichen Messkonfigurationen.



(a) Konfiguration 1



(b) Konfiguration 2



(c) Konfiguration 3



(d) Konfiguration 4



(e) Konfiguration 5

Abb. 4.15: Darstellung der Punktwolke des X-Elements nach der Registrierung der unterschiedlichen Messkonfigurationen.

Beim Vergleich der Konfigurationen zeigt sich, dass die Konfiguration 2 die mit Abstand schlechtesten Ergebnisse liefert. Dies bestätigt somit auch die Ergebnisse aus der Untersuchung der verschiedenen Laserscanner, dass der Einfallswinkel auf das Objekt von großer Bedeutung für die Qualität der Ergebnisse ist. Betrachtet man nur die Frontalansicht, so lassen sich zwischen Konfiguration 3 und 4 keine großen Unterschiede feststellen. Diese zeigen sich erst bei der Betrachtung der seitlichen Ansicht. Für das X-Element kann damit die Qualität der Punktwolke verbessert werden, da die Seitenkanten ebenfalls erfasst werden können. Für das 8-Element lässt sich allerdings keine Verbesserung feststellen, da die Seite den breitesten Abschnitt des Bauteils darstellt und somit nur der Anker erfasst werden kann. Die Konfiguration 5 erzielt nun ein vergleichbares Ergebnis wie auch Konfiguration 3 und 4 allerdings mit mehr Scans, die in diesem Fall aber keine zusätzlichen Informationen liefern können. Für die in dieser Arbeit dargestellten Ergebnisse wurde sich daher für die Messkonfiguration 3, für das X-Element und für die Messkonfiguration 4 für das 8-Element entschieden.

Die gewählte Messkonfiguration muss allerdings, wie bereits Eingangs erläutert, im realen Mess- und Fertigungsumfeld auch an die Gegebenheiten vor Ort angepasst werden. Bei weiteren Messungen, welche unter realen Produktionsbedingungen durchgeführt wurden, zeigte sich dabei, dass ein schlechterer Standpunkt im Zweifel durch einen zusätzlichen Standpunkt ausgeglichen werden kann. Auch die Form der Struktur ist von Bedeutung. Für gekrümmte Strukturen ist dann die Konfiguration 5 zu empfehlen, um möglichst viel Fläche mit einem optimalen Auftreffwinkel erfassen zu können.

Neben der Lage der Standpunkte ist auch die Höhe der Standpunkte entscheidend. Da theoretisch die gesamte Hülle erfasst werden soll, wäre im Idealfall eine würfelförmige Anordnung zu empfehlen. Da dies allerdings nicht praktikabel ist, wurden je nach Objekt die Scans der oben dargestellten Konfigurationen in unterschiedlichen Höhen wiederholt. Dies erwies sich vor allem dann als sinnvoll, wenn die Elemente noch im Fertigungsrahmen vermessen wurden und somit mehrere Elemente gleichzeitig gemessen werden sollten.

Mit der hier festgelegten Messkonfiguration können damit die Messungen für ein Bauteil in etwa 20 Minuten durchgeführt werden. Da 360°-Scans durchgeführt werden, um eine zuverlässige Registrierung zu gewährleisten, ist es auch möglich durch einen geschickten Aufbau mehrere Objekte gleichzeitig zu vermessen und somit die benötigte Gesamtzeit reduzieren zu können.

In den bisherigen Untersuchungen der unterschiedlichen Messsysteme und Messkonfigurationen lag der Fokus immer auf der vollständigen Erfassung der Objekte. Im Folgenden soll nun die Korrektheit der erfassten Geometrie beurteilt werden. Da an dieser Stelle kein 3D-Modell aus der Planung herangezogen werden kann, wurden entsprechende Referenzmessungen mit einem industriellen Messsystem durchgeführt. Diese sind im folgenden Abschnitt dargestellt.

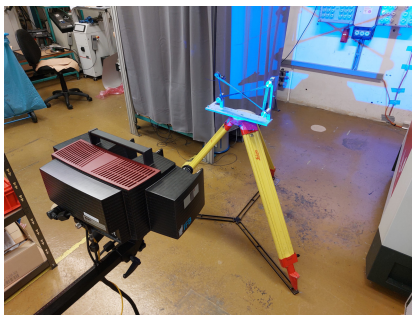
4.2.1.5 Referenzmessungen mittels Streifenprojektionssystem zur Analyse hinsichtlich der Vollständigkeit, Korrektheit und Genauigkeit der Punktwolke

Um die TLS-Ergebnisse zu validieren, wurden zusätzlich Messungen mit dem ATOS Triple Scan System durchgeführt. Bei diesem handelt es sich um ein Streifenprojektionssystem, welches aus zwei Kameras und einem Projektor besteht. Die relevanten Systemeigenschaften sind in Tabelle 4.12 dargestellt.

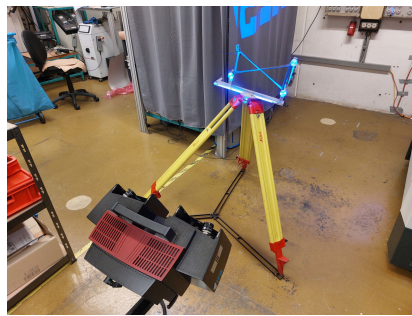
Tab. 4.12: Systemeigenschaften des ATOS Triple Scansystems (GOM - Optical Measuring Techniques 2010).

ATOS III Triple Scan	
Pixelanzahl der Kameras	2 mal 8000000
Messbereich	30 mm ² bis 2000 mm ²
Punktabstand	0,1 mm bis 0,61 mm
Messpunkte pro Scan	5000000
Genauigkeit	0,01 mm bis 0,03 mm (1 : 15000 – 25000 des Messvolumens)

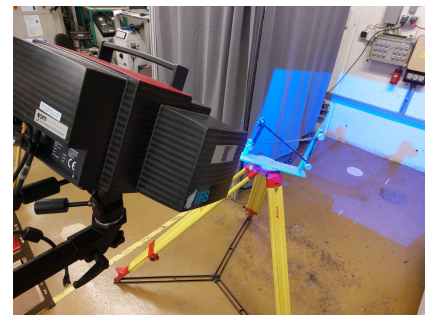
Die mit diesem System erreichbaren Genauigkeiten sind dabei um etwa einen Faktor 100 besser als die 3D-Punktgenauigkeit des Trimble X7. Aus diesem Grund eignen sich diese Messungen als Referenzmessungen. Mit diesem System wurden Messungen für 24 Probekörper durchgeführt. Für die Messungen wurden die Prototypen dabei auf einer speziell für diese Anwendung gefertigten Halterung angebracht und diese auf einem Stativ montiert. Die Datenaufnahme sowie eine anschließende Prozessierung der Daten erfolgt dabei mittels der Software Zeiss GOM INSPECT (*ZEISS Quality Suite* 2025). In sieben unterschiedlichen Ausrichtungen wurde das Objekt anschließend auf dem Stativ rotiert und dabei ca. 14 Bilder pro Umdrehung aufgenommen. Um eine möglichst vollständige Erfassung des Objektes zu ermöglichen, wurden zunächst Frontalaufnahmen durchgeführt (vgl. Abbildung 4.16a). Dafür waren Sensor und Objekt auf derselben Höhe und beide horizontal ausgerichtet. Für die verbleibenden sechs Messpositionen wurde der Sensor einmal tief aufgebaut mit Blickrichtung nach oben, um die Unterseite des Objektes erfassen zu können (vgl. Abbildung 4.16b). Um zusätzlich möglichst verschiedenen Blickwinkel zu realisieren, wurde bei jeder Aufnahme position je eines der drei Stativbeine, auf denen das zu messende Objekt montiert war, um etwa 15 cm ausgefahren. Für die letzten drei Aufnahmestandpunkte wurde der Sensor nun oberhalb des Objektes positioniert und der Blickwinkel nach unten ausgerichtet (vgl. Abbildung 4.16c). Ziel dabei war es nun die Oberseite des Objektes erfassen zu können. Auch hier wurde wieder, um möglichst viele Aufnahmewinkel zu generieren, die Länge der Stativbeine in den drei Aufnahmedurchläufen variiert. Für jedes Objekt wurde so eine Bildreihe von etwa 100 Bildern aufgenommen.



(a) Horizontale Bildaufnahme



(b) Bildaufnahme von unten mit gekipptem Stativ



(c) Bildaufnahme von oben mit gekipptem Stativ

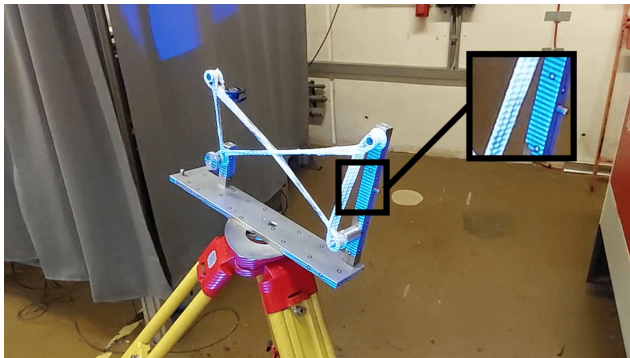
Abb. 4.16: Aufnahmekonfiguration für die Messungen mit dem ATOS Triple Scansystem.

Für die Aufnahmen wurde, wie bereits zuvor bei den TLS Testmessungen, ein Scanningspray verwendet, um bessere Aufnahmen zu ermöglichen. Durch die verwendete Blaulicht Technologie des Systems können hiermit Messungen unabhängig vom Umgebungslicht durchgeführt werden und diese somit gut für einen Vergleich mit den TLS-Messungen verwendet werden. Für die Messung selbst wird mittels des integrierten Projektors ein Streifenmuster auf das Objekt projiziert und dieses dann, in mehreren Schritten, leicht verändert. Dies ist beispielhaft in Abbildung 4.17 dargestellt.

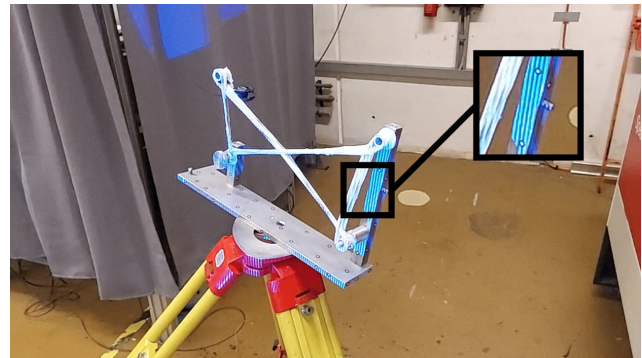
Um eine Registrierung zwischen den einzelnen Bildern zu ermöglichen, wurden auf der Halterung der Messobjekte Passpunkte angebracht. Diese konnten später auch für die Registrierung der einzelnen Elemente zueinander verwendet werden. Für die Prozessierung der Ergebnisse wird zunächst für jede der verwendeten Halterungen die gewünschte Ausrichtung des Objektes bestimmt. Hierfür wurden in den jeweiligen gewünschten Ebenen entsprechend Punkte gewählt, die das Koordinatensystem definieren. Anschließend konnten die Passpunkte exportiert werden und diese für die Registrierung der weiteren Objekte verwendet werden. Zusätzlich wurde ein Mesh der aufgenommenen Daten erzeugt. Anschließend wurden Mesh und Punktwolke für die weiteren Vergleiche exportiert. Diese können für die weiteren Vergleiche mit den TLS-Punktwolken herangezogen werden.

Betrachtet man die exportierten Messergebnisse, zeigt sich, dass die Punktzahl der ATOS-Messungen deutlich höher ist, als bei einer vergleichbaren Aufnahme mittels TLS. Die Punktzahl für das hier dargestellte Objekt beträgt dabei fast 800 000 Messpunkte, was in einer deutlich höheren Punktdichte resultiert, wodurch feinere Strukturen detektiert werden können. Eine vergleichbare TLS Punktwolke des Objektes enthält hier nur zwischen 15 000 und 25 000 Punkten. Trotz der hohen Punktzahl der ATOS-Messungen gilt es allerdings zu beachten,

dass auch hier die Sichtbarkeit eine Voraussetzung für die Messung ist. Dadurch kommt es auch bei diesem Datensatz zu Lücken insbesondere an den Innenseiten des Bauteils. Dies muss bei der weiteren Analyse und dem Vergleich mit den TLS-Messungen berücksichtigt werden.



(a) Horizontal projiziertes Streifenmuster

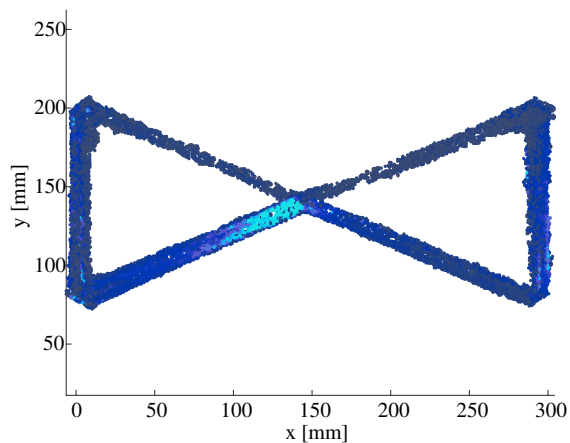


(b) Vertikal projiziertes Streifenmuster

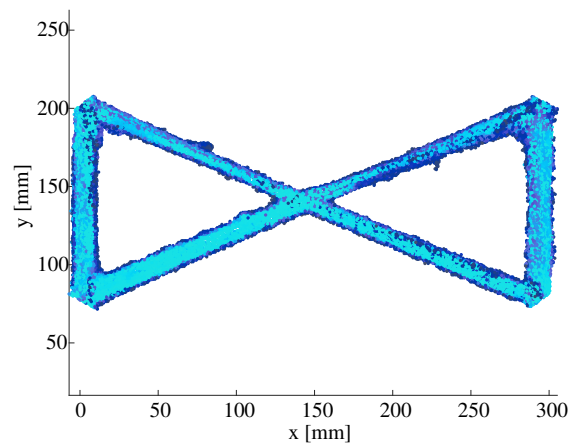
Abb. 4.17: Projiziertes Streifenmuster des ATOS Triple Scansystems auf das Messobjekt.

4.2.1.6 Vergleich der Messergebnisse aus TLS und Streifenlichtprojektionssystem:

Um nun die Eignung der TLS Punktwolken als Messsystem für die Vermessung der in dieser Arbeit betrachteten Bauteile zu überprüfen, werden die gemessenen Punktwolken, mit denen der Referenzmessungen verglichen. Der Fokus liegt dabei auf der Betrachtung des X-Elements sowie dem Einfluss des Scanningsprays. In Abbildung 4.18 ist die Frontalansicht der nun näher betrachteten Punktwolken dargestellt.



(a) TLS Punktwolke ohne Spray



(b) TLS Punktwolke mit Spray

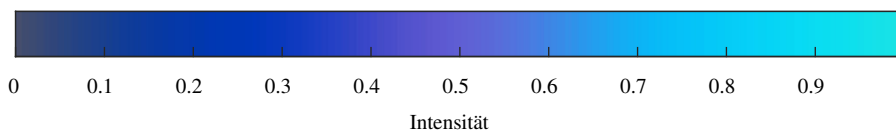


Abb. 4.18: Frontalansicht der betrachteten TLS Punktwolken mit und ohne Scanningspray.

Diese ergibt sich aus den referenzierten Einzelmessungen aus der Messkonfiguration 3 aus Tabelle 4.11. Dabei werden nun die Scans ohne die Verwendung des Scanningsprays (vgl. Abbildung 4.18a) und die Scans unter Verwendung des Scanningsprays betrachtet (vgl. Abbildung 4.18b). Da die Bereiche der Ösen um die

Ankerpunkte der Fertigung im Allgemeinen die höchsten Abweichungen aufweisen, wurden diese für diesen Vergleich manuell segmentiert und die Punktwolken ohne Ankerpunkte betrachtet.

Vergleich der TLS-Punktwolke mit dem aus ATOS-Messungen generierten Mesh mit und ohne Scanningspray: Der Vergleich der beiden Punktwolken zeigt dabei direkt Unterschiede in den gemessenen Intensitäten. Diese sind, wie aus den Voruntersuchungen zu erwarten war, deutlich größer unter Verwendung des Scanningsprays. Ein weiterer Effekt, welcher bei genauerer Betrachtung der Punktwolke unter Verwendung des Scanningsprays auffällt (vgl. Abbildung 4.18b), ist der dunklere Rand, der für eine geringere Intensität spricht, der sich an den Rändern des ganzen Objektes zeigt. Dies zeigt deutlich, dass an diesen Stellen unvollständige Laserspots gemessen wurden und das Zentrum dieser sich somit nicht unbedingt auf dem Objekt befinden muss. Die Betrachtung der Punktwolke ohne Spray (vgl. Abbildung 4.18a) zeigt dabei ein gleichmäßigeres Muster der Intensitäten und weist nur am linken unteren Liniensegment eine deutlich stärker Intensität auf, was auf den Einfallswinkel der Messung zurückzuführen ist. Des Weiteren fällt bei dieser Punktwolke auf, dass vor allem die beiden oberen Liniensegmente deutlich dünner erscheinen, was auf eine geringere Punktdichte aufgrund eines größeren Einfallswinkels zurückzuführen ist. Um nun neben den optischen Eindrücken der Messung auch einen numerischen Vergleich durchführen zu können, wird nun ein Cloud to Mesh (C2M)-Vergleich der TLS Punktwolken und dem aus ATOS-Messungen generierten Mesh durchgeführt. Die Ergebnisse dieses Vergleiches sind in Abbildung 4.19 dargestellt.

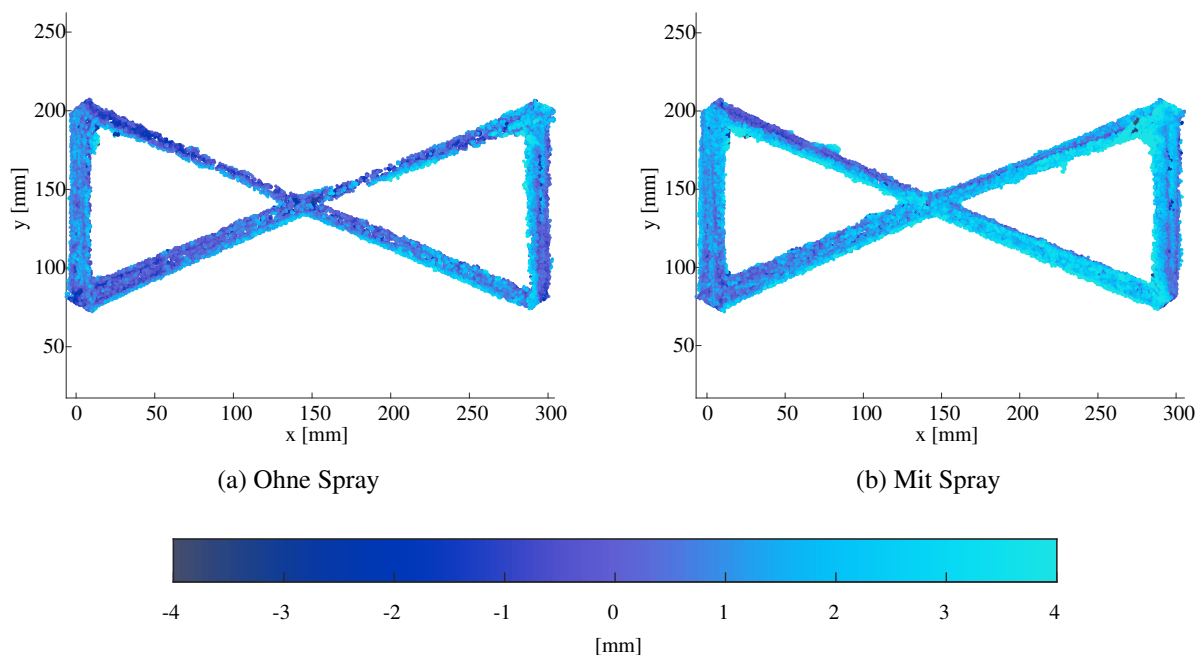


Abb. 4.19: Frontalansicht des C2M-Vergleichs der TLS Punktwolken mit dem aus ATOS-Messungen generierten Mesh mit und ohne Scanningspray.

Die Analyse der C2M-Ergebnisse ergibt hierbei, dass die Abweichungen zum Mesh unter Verwendung des Scanningsprays größer sind als ohne dessen Verwendung. Bei dieser Darstellung zeigt sich dabei eine positive Abweichung in der Größenordnung von bis zu 3 mm, was einer zu groß gemessenen Oberfläche entspricht. Im Vergleich dazu bewegen sich die Abweichungen bei den Messung ohne Scanningspray optisch um 0 mm. Dies lässt sich dadurch erklären, dass unter Verwendung des Scanningsprays die Intensitäten höher sind und dadurch auch nur Teile des Laserspots auf dem Objekt ausreichen, damit der Punkt dem Objekt zugeordnet wird. Um diese Abweichungen nicht nur optisch, sondern auch numerisch betrachten zu können, wurde eine Schätzung der zugehörigen Parameter der Normalverteilung für die berechneten Abweichungen durchgeführt. Um zusätzlich

den Einfluss der einzelnen Standpunkte zu untersuchen, wurde dies für alle vier Einzelstandpunkte, sowie für die registrierte Gesamtpunktwolke durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Tabelle 4.13 für die Messungen ohne Spray und in Tabelle 4.14 für die Messungen mit Spray dargestellt. Betrachtet man hier nun zunächst die Mittelwerte der Abweichungen für die Messungen ohne Spray, so zeigt sich, dass diese im Mittel über alle Scans eine Abweichung von 0,017 mm im Vergleich zu den ATOS-Messungen aufweisen. Da die Koordinatenachse des Objektes durch die Mitte des Objektes verläuft, ist hier vor allem sichtbar, dass die auftretenden Effekte gespiegelt und somit auf beiden Seiten mit unterschiedlichen Vorzeichen und somit mit der gleichen Auswirkung auf die Bestimmung der Geometrie des Objektes vorkommen. Dies bedeutet, dass entweder auf beiden Seiten zu groß oder zu klein gemessen wird. Betrachtet man nun die einzelnen Scans, so zeigt sich, dass die Abweichungen beim Vergleich der Messungen von vorne und hinten betragsmäßig vergleichbar sind, und sich nur im Vorzeichen unterscheiden. Diese liegen im Mittel betragsmäßig bei etwa 0,3 mm. Der Vergleich der Seitenansichten weist hierbei größere Unterschiede auf. Vor allem zeigt sich hierbei, dass keine Symmetrie der Abweichungen festzustellen ist. Dabei muss allerdings auch beachtet werden, dass zum einen die absoluten Punktzahlen hier deutlich geringer sind, wodurch sich einzelnen Abweichungen stärker auswirken. Zum anderen kommt hinzu, dass das Bauteil an einer Seite an der Halterung befestigt ist, wodurch es zu zusätzlichen Abschattungen kommen kann, was dann das Gesamtbild der Abweichungen verzerrt. Betrachtet man die berechneten Standardabweichungen, so zeigt sich, dass diese sich für alle fünf Szenarien in einem Bereich von 1,127 mm bis 1,326 mm bewegen. Unter Berücksichtigung der aus dem Datenblatt entnommenen 3D-Punktgenauigkeit von 2,1 mm (Trimble Inc. 2020) liegen diese damit im Bereich der erwartbaren Abweichungen.

Da die Vermutung nahe liegt, dass die berechneten Abweichungen vom Mesh im Zusammenhang mit den gemessenen Intensitäten stehen, werden im Folgenden der Korrelationskoeffizient, sowie der Rangkorrelationskoeffizient aus der C2M-Abweichung und den Intensitäten berechnet. Dies sind für die Betrachtung ohne Spray ebenfalls in Tabelle 4.13 dargestellt. Die Betrachtung der Korrelation zeigt dabei, dass diese sich nahe 0 mit negativem Vorzeichen bewegen. Dabei lassen sich allerdings zwei Ausnahmen feststellen. Wie bereits bei der Analyse der Abweichungen fallen auch hier wieder die seitlichen Scans auf. Dabei ist besonders hervorzuheben, dass die Korrelation bei den Scans von der linken Seite als einzige ein positives Vorzeichen aufweist. Beim Scan von rechts hingegen fällt vor allem die Größenordnung der Korrelation auf, die hier fast um den Faktor 10 höher ist. Vergleicht man diese berechneten Korrelationen nun mit denen des Rangkorrelationskoeffizienten, so fällt auf, dass hier alle berechneten Korrelationen ein negatives Vorzeichen aufweisen. Diese negative Korrelation entspricht dabei auch den Erwartungen, dass die Abweichungen zum Mesh somit mit einer geringeren Intensität zunehmen. Für die zweite Auffälligkeit zeigt sich hingegen keine Änderung unter der Verwendung des Rangkorrelationskoeffizienten. Die berechneten Korrelationen werden nun hinsichtlich ihrer Signifikanz gegen Null (bei einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 95%) getestet. Dabei zeigt sich, dass der Korrelationskoeffizient nur für den direkten Scan von vorne nicht signifikant ist. Betrachtet man allerdings den Rangkorrelationskoeffizienten so handelt es sich bei allen Korrelationen um signifikante Korrelationen.

Tab. 4.13: Mittelwert, Standardabweichung des Mittelwerts, Korrelation und Rank-Korrelation für die Einzelscans sowie die registrierte Punktwolke und deren Signifikanz für die Messungen ohne Spray.

	Vorne	Hinten	Links	Rechts	Registriert
Mittelwert $\bar{l}$ [mm]	0,280	-0,350	0,497	-0,046	0,017
Standardabweichung s [mm]	1,127	1,278	1,010	1,326	1,206
Korrelationskoeffizient r	-0,008	-0,076	0,055	-0,368	-0,041
Signifikant	nein	ja	ja	ja	ja
Rangkorrelationskoeffizient r_R	-0,080	-0,060	-0,055	-0,365	-0,069
signifikant	ja	ja	ja	ja	ja

Betrachtet man nun im Vergleich dazu die berechneten Werte unter Verwendung des Scanningsprays (vgl. Tabelle 4.14), so ergibt sich für fast alle Konfigurationen eine deutliche Verschiebung des Mittelwerts.

Tab. 4.14: Mittelwert, Standardabweichung des Mittelwerts, Korrelation und Rank-Korrelation für die Einzelscans sowie die registrierte Punktwolke und deren Signifikanz für die Messungen mit Spray.

	Vorne	Hinten	Links	Rechts	Registriert
Mittelwert $\bar{l}$ [mm]	1,262	−0,277	0,707	0,572	0,562
Standardabweichung s [mm]	1,265	1,406	1,055	1,417	1,486
Korrelationskoeffizient r	−0,353	−0,659	−0,250	−0,379	−0,301
Signifikant	ja	ja	ja	ja	ja
Rangkorrelationskoeffizient r_R	−0,222	−0,597	−0,207	−0,320	−0,212
signifikant	ja	ja	ja	ja	ja

Lag dieser ohne Spray noch nahe 0 mm, so ist er unter Verwendung des Scanningsprays mit 0,562 mm durchaus zu beachten. Auffällig bei der Betrachtung der mittleren Abweichung ist dabei, dass sich der Mittelwert des Frontalscans um einen Millimeter verschoben hat, während der Mittelwert für den Scan der Rückseite annähernd gleichbleibend ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass hier neben der Oberfläche des Objektes vor allem der Auftreffwinkel einen entscheidenden Einfluss aufweist. Auch zeigt sich bei diesen Messungen, dass für die Abweichungen der linken und rechten Seite, wie bereits bei den Messungen ohne Spray, keine Symmetrie festzustellen ist. Der Vergleich der Standardabweichungen ergibt, dass diese hier im Mittel um etwa 0,2 mm größer sind, im Vergleich zu den vorher betrachteten. Betrachtet man nun die berechneten Korrelationskoeffizienten und Rangkorrelationskoeffizienten, so zeigt sich, dass in allen Fällen eine signifikante, negative Korrelation aus C2M-Abweichung und Intensitäten festgestellt werden kann. Diese Korrelationen sind hier auch in der Größenordnung um etwa den Faktor 10 größer als ohne die Verwendung des Sprays. Auffällig ist hier zudem, dass für den seitlichen Scan von rechts fast keine Änderung der Korrelation festgestellt werden kann.

Alles in allem zeigt sich damit, dass die Abweichungen der TLS-Punktwolke zur Referenzmessung ohne die Verwendung des Scanningsprays deutlich geringer sind. Dies bestätigt auch den optischen Vergleich zu Beginn, bei dem auffiel, dass die größten Abweichungen an Stellen niedriger Intensität auftreten. Es ist daher davon auszugehen, dass der Grenzwert der Intensität des Trimble X7 automatisch so eingestellt wird, dass er in diesem Anwendungsfall sehr gute Ergebnisse für die Messungen ohne Spray bietet.

Die Messungen mit dem ATOS-System bieten zwar ebenfalls eine sehr gute 3D-Repräsentation des Objektes, allerdings ist die Messung hierfür aufwendiger und kann weniger flexibel in der Fertigung eingesetzt werden und entspricht damit nicht den Anforderungen an das in dieser Arbeit entwickelte Messkonzept. Damit können nun die restlichen Qualitätsmerkmale des Entscheidungspunkt 2 für das Messkonzept evaluiert werden. Die Ergebnisse hierfür sind in Tabelle 4.15 dargestellt. Damit kann nun auch die Korrektheit der Messungen, also die Abweichungen zur Referenz beurteilt werden. Die Anforderung an das Messsystem ist dabei, dass die Abweichung zur Referenz 0 mm betragen soll. Im Hinblick auf diese Anforderung zeigt sich, dass die Messungen ohne die Verwendung des Scanningsprays mit 0,017 mm eine geringere Abweichung zur Referenz aufweisen als die Messungen mit Scanningspray. Somit kann die Korrektheit für die Messungen ohne Spray als erfüllt betrachtet werden, während die Messungen mit Scanningspray eine größere Abweichung aufweisen und die Korrektheit somit als nicht erfüllt betrachtet werden kann.

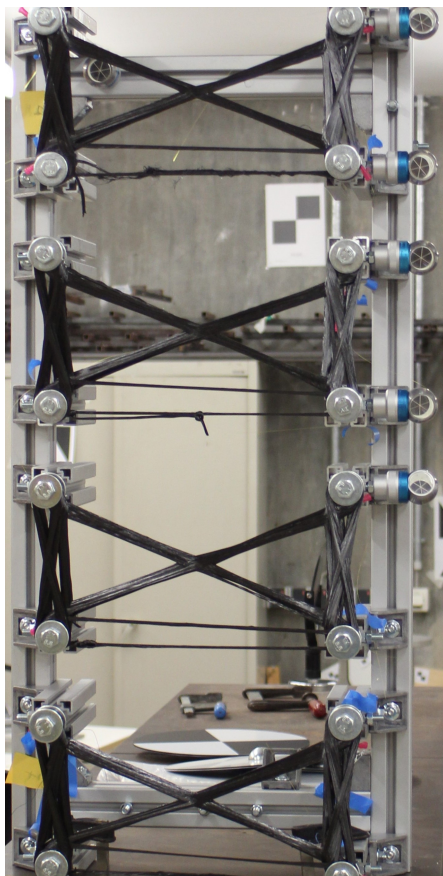
Diese Analyse unterstützt auch die Wahl in Abschnitt 4.2.1.3 und zeigt auch hier das Potential für die TLS-Messungen. Das Messkonzept ergibt sich somit zu TLS-Messungen mit dem Trimble X7 Laserscanner ohne die Verwendung eines Scanningsprays. Wichtig ist hierbei allerdings eine entsprechende Vorverarbeitung der Messdaten. Somit wird im Folgenden die Vorverarbeitung der Messungen mit dem Trimble X7 ohne die Verwendung eines Scanningsprays näher betrachtet.

Tab. 4.15: Beurteilung der Qualitätsmerkmale für die Wahl des Messkonzepts.

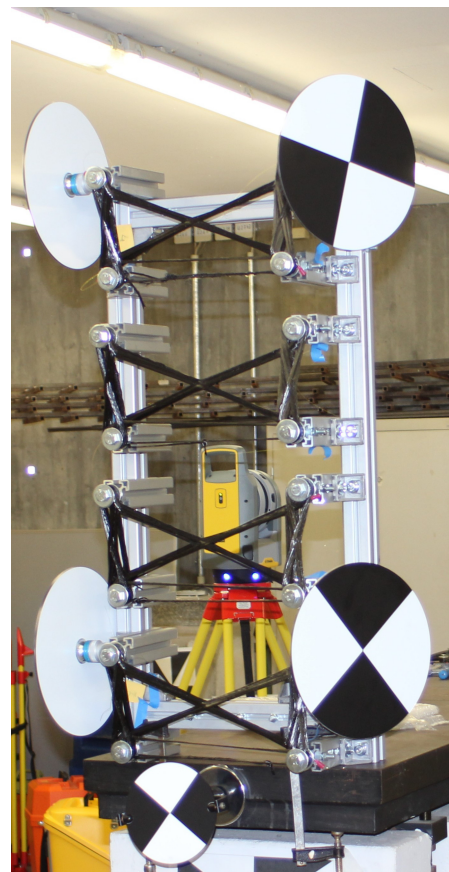
Qualitätsmerkmal	Trimble X7	
	ohne Spray	mit Spray
Zeiteinhaltung	erfüllt	erfüllt
Vollständigkeit	erfüllt	erfüllt
Korrektheit	erfüllt	nicht erfüllt
Genauigkeit	erfüllt	erfüllt

4.2.2 Datenvorverarbeitung

Nach den Messungen müssen die Daten für die weitere Auswertung vorverarbeitet werden. Dazu gehören je nach Testszenario die Filterung, Registrierung und Georeferenzierung, sowie die Grobsegmentierung. Zunächst werden alle Scans einer Epoche mittels Zielzeichen, wie in Abschnitt 3.1.2.5 dargestellt registriert (vgl. Abbildung 4.20).



(a) Montierte Elemente im Fertigungsrahmen mit Kugelreflektoren für die tachymetrischen Messungen zur Festlegung des Koordinatensystems



(b) Montierte Elemente im Fertigungsrahmen mit Black-White Zielzeichen für die Referenzierung der TLS-Messungen

Abb. 4.20: Georeferenzierung der Testobjekte im Fertigungsrahmen für tachymetrische Messungen 4.20a und TLS-Messungen 4.20b.

Dafür wird die Trimble eigenen Software Trimble RealWorks verwendet (*Trimble RealWorks* 2024). Je nach Anforderung an die spätere Auswertung wird nun auch das Koordinatensystem festgelegt. Ist ein lokales System ausreichend, so kann das Koordinatensystem des ersten Scannerstandpunktes, in welchem die Ergebnisse der Registrierung direkt dargestellt werden, direkt für die weitere Auswertung verwendet werden. Ist ein spezielles Koordinatensystem gewünscht, häufig werden hierbei die Achsen durch die Ankerpunkte der Rahmenkonstruktion definiert, werden zusätzlich Zielzeichen am Rahmen angebracht (vgl. Abbildung 4.20). Mittels magnetischer Nester können an diesen dann sowohl die Laserscanner Zielzeichen für eine Registrierung, als auch Kugelsphären für eine tachymetrische Messung angebracht werden und somit neben der Registrierung auch eine Georeferenzierung der Punktwolke im Bauteilkoordinatensystem realisiert werden (vgl. Abbildung 4.2).

Eine beispielhafte Darstellung für die tachymetrischen Messungen, sowie die Laserscannermessungen im Fertigungsrahmen findet sich in Abbildung 4.20. Der Vorteil der zusätzlichen tachymetrischen Messungen besteht hierbei darin, dass mehr identische Punkte für die Bestimmung der Transformation gemessen werden können, ohne dass durch die Anbringung weitere TLS Zielzeichen zu einer Verdeckung des Testobjektes durch die Zielzeichen kommt.

Neben der Georeferenzierung und Registrierung wird an dieser Stelle auch eine Filterung der Punktwolke durchgeführt. Da die Objekte sehr klein sein können, wird die Filterung an dieser Stelle auf eine Detektion und Eliminierung der groben Ausreißer beschränkt, um keine Datenlücken zu generieren. Da die Streckenmessung im Vergleich zur Winkelmessung ungenauer ist, treten hierbei häufig Effekte in Messrichtung auf. Um diese detektieren und filtern zu können, wird die Filterung hierbei standpunktweise durchgeführt und erst in einem letzten Schritt alle registrierten Punktwolken zu einer gemeinsamen Punktwolke kombiniert. Für die Filterung werden dabei die Standardfilteroptionen *Rausch-Filter* und *SOR-Filter* in CloudCompare verwendet (*CloudCompare* 2022).

Da für die Datenaufnahme 360°-Grad Scans verwendet werden, um eine zuverlässige Registrierung zu gewährleisten, müssen für die weitere Datenverarbeitung zusätzlich die einzelnen Objekte segmentiert werden. Dies ist vor allem entscheidend, wenn mehrere Objekte gleichzeitig gemessen wurden, da die weitere Auswertung objektweise stattfindet. Im Zuge einer Grobsegmentierung wird das Objekt daher aus der Gesamtpunktwolke ausgeschnitten. Dies geschieht entweder manuell, vor allem dann, wenn ein nicht näher definiertes Koordinatensystem verwendet wird, oder automatisiert, indem eine Bounding Box um das Objekt gelegt wird und damit die relevanten Punkte der Punktwolke bestimmt werden können.

Auch wenn eine Grobsegmentierung automatisiert durchgeführt werden kann, ist die manuelle Überprüfung an dieser Stelle von großer Bedeutung, um Störobjekte im Scan vor der eigentlichen Auswertung zu detektieren und entsprechend auszuschneiden um einen weiteren Einfluss auf die Auswertung der Geometrie ausschließen zu können. Solche Störobjekte können beispielsweise Teile des Roboterarms der Fertigung sein, wenn Messungen direkt im Fertigungsprozess durchgeführt werden.

Eine sorgfältige Vorverarbeitung der Daten ist dabei im Folgenden entscheidend für die Qualität der Ergebnisse des Auswertalgorithmus, da dieser durch Störobjekte in den Punktwolke stark beeinträchtigt wird und damit zu einem unzureichenden Segmentierungsergebnis führt.

4.2.3 Zusammenfassung der benötigten Schritte für die Messung und Datenvorverarbeitung

Nachdem alle benötigten Schritte für die Messung und Auswertung festgelegt sind, werden diese nun noch einmal zusammenfassend in Abbildung 4.21 dargestellt. Dabei zeigt sich, dass prinzipiell zwei Varianten der Messung betrachtet werden. Der Unterschied dabei besteht darin, ob die Messungen, und die spätere Auswertung in einem lokalen Koordinatensystem durchgeführt werden sollen, oder ob eine Georeferenzierung in ein übergeordnetes Koordinatensystem erfolgen soll.

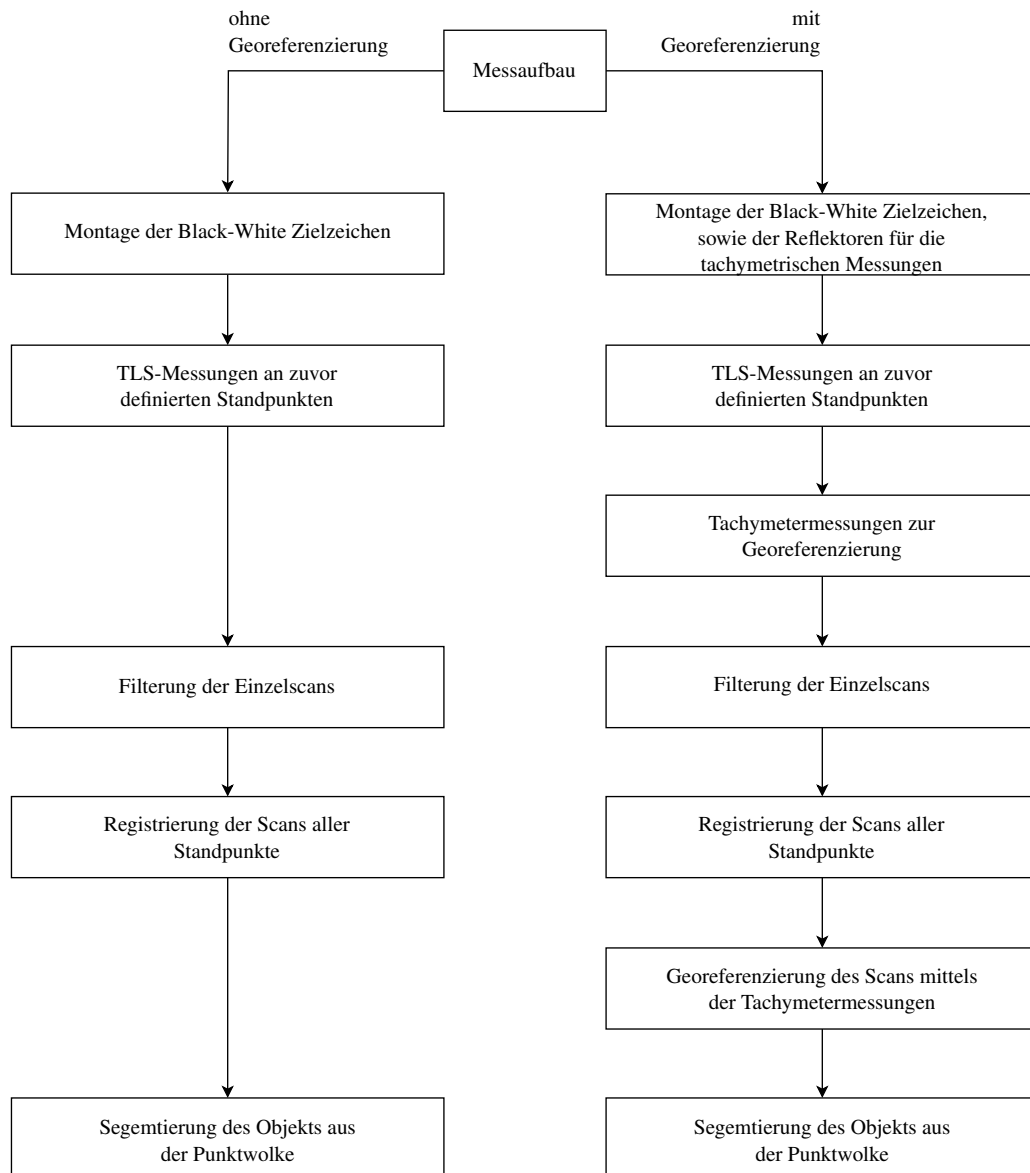


Abb. 4.21: Ablaufdiagramm der benötigten Schritte für die Messung und Datenvorverarbeitung.

4.2.4 Auswertalgorithmus

Um eine geometrische Qualitätssicherung durchführen zu können, müssen die gemessenen und vorverarbeiteten Punktwolken nun weiter prozessiert werden, um die charakteristische Geometrie bestimmen zu können. Im Folgenden wird der hierfür entwickelte Auswertalgorithmus genauer betrachtet. Ziel dieses Algorithmus ist es die geometrischen Kenngrößen im Abstraktionslevel der Syntax-Ebene aus der gemessenen Punktwolke zu extrahieren und damit Informationen bezüglich der charakteristischen Objektparameter zu erhalten und eine Qualitätsbeurteilung hinsichtlich der in Tabelle 4.6 dargestellten Qualitätsparameter durchzuführen. Die Qualitätsbeurteilung findet dabei für die Liniensegmente, den Schnittpunkten der einzelnen Liniensegmente, sowie für die Querschnittsflächen des Faserstrangs im Verlauf der Liniensegmente statt.

Der grundlegende Aufbau des Algorithmus lässt sich dabei in 5 Schritte unterteilen. Zu diesen gehören

- Segmentierung,
- Linienschätzung,

- Netzwerkgenerierung 1: Verbindung der geschätzten Liniensegmente
- Netzgenerierung 2: Sortierung der Liniensegmente
- die Querschnittsflächenberechnung.

Eine schematische Darstellung der benötigten Schritte des Auswertalgorithmus findet sich in Abbildung 4.22. Zusätzlich zu diesen Auswerteschritten ist noch eine Qualitätsbeurteilung der einzelnen Auswerteschritte notwendig, um schlussendlich nicht nur eine Aussage hinsichtlich der Qualität der Fertigung, sondern auch der Qualität der Messung und Auswertung treffen zu können.

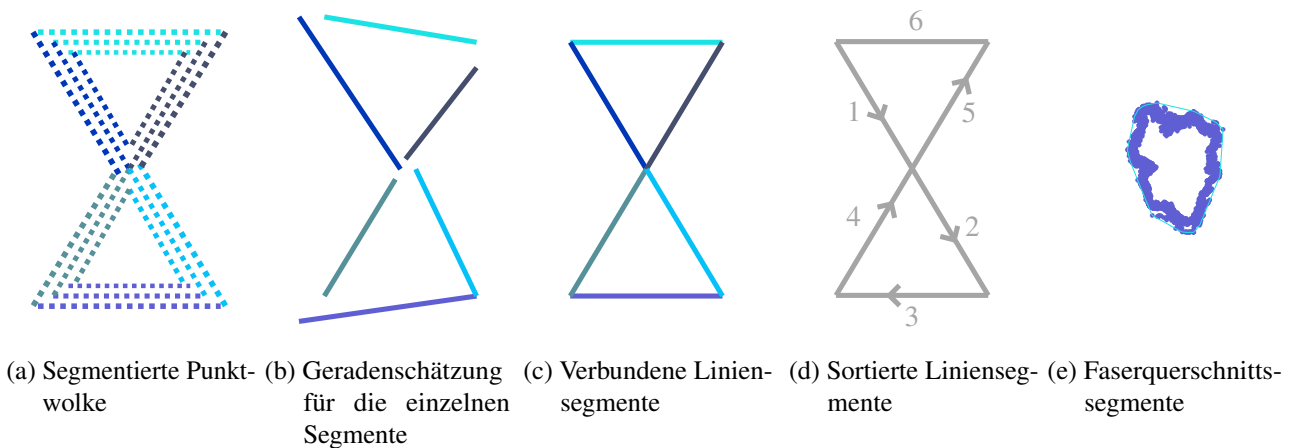


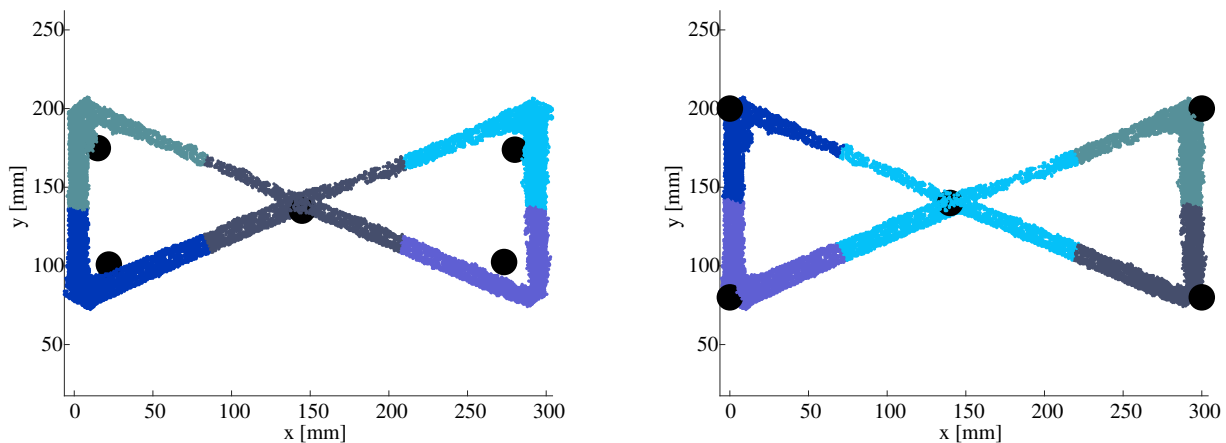
Abb. 4.22: Schritte des Auswertalgorithmus für die Extraktion der geometrischen Kenngrößen.

Um diese Auswertung hinsichtlich der Qualitätssicherung durchführen zu können, wird die vorprozessierte Punktwolke des Objektes benötigt. Bei dieser kann es sich dabei um eine beliebige Punktwolke des Objektes handeln, der Algorithmus kann also nicht nur für TLS-Punktwolken angewendet werden, sondern kann auch direkt für die ATOS-Messungen verwendet werden. Werden zudem Punktwolken aus den Ergebnissen einer Prozesssimulation (vgl. Abschnitt 2.2.2) erzeugt, kann der Algorithmus auch bereits in der Planungsphase eingesetzt werden, um den Produktionsprozess betreffende Entscheidungen zu unterstützen. Sind zusätzliche Soll-Informationen über das Bauteil vorhanden, wie beispielsweise die Anzahl der zu erwartenden Liniensegmente oder Schnittpunkte, sowie deren erwartete Position oder auch die Stärke des Faserstrangs, so können diese Informationen für die Bestimmung der Einstellgrößen des Algorithmus verwendet werden. Liegen für das entsprechende Bauteil diese Informationen nicht vor, so können Standardwerte oder auch selbst gewählte Parameter hierfür verwendet werden. Im Folgenden werden nun die einzelnen Abschnitte des Auswerteprozesses näher betrachtet. Dabei werden auch die Parameter, die aus Vorinformationen verwendet werden können und deren Einfluss, näher betrachtet.

4.2.4.1 Segmentierung

Um die geometrischen Kenngrößen extrahieren zu können, ist zunächst eine Segmentierung der Punktwolke notwendig. Ziel dabei ist es, die einzelnen Linien und Liniensegmente der Punktwolke zu detektieren. Die Segmentierung der einzelnen Liniensegmente erfolgt dabei mittels einer iterativen Hough-Transformation (vgl. Abschnitt 3.3.3). Da je nach Objekt die Anzahl der Liniensegmente hoch sein kann, bei großen Objekten handelt es sich hierbei schnell um mehrere tausend Liniensegmente, wird zuvor eine K-Means-Clustering der Punktwolke durchgeführt (vgl. Abschnitt 3.3.1). Diese Clustering ermöglicht es später die Hough-Transformation für jedes dieser Punktkluster unabhängig voneinander durchführen zu können.

K-Means Clustering: Um die Clusterung der Punktwolke mittels K-Means durchführen zu können, muss zunächst die Anzahl der Cluster festgelegt werden. Im Allgemeinen zeigt sich hier, dass sich als Anzahl für die Wahl der Cluster die Anzahl der zu erwartenden Schnittpunkte anbietet. Da an den Schnittpunkten erwartungsgemäß mehr Punkte vorhanden sind, bilden sich damit die Cluster, durch die Verschiebung der Clusterzentren, in den meisten Fällen um die Schnittpunkte. Eine weitere Möglichkeit der Verwendung von Vorinformationen besteht hierbei darin, die zu erwartenden Schnittpunktkoordinaten direkt als Clusterzentren zu verwenden. In diesem Fall werden dann alle Messpunkte dem nächstgelegenen Schnittpunkt zugeordnet. Der Vergleich zwischen den Ergebnissen des K-Means Algorithmus mit unterschiedlichen Vorinformationen ist nun in Abbildung 4.23 dargestellt. Die Farbgebung der einzelnen Cluster ist dabei ohne Bedeutung. Der Vergleich der beiden Abbildungen zeigt dabei, dass die Cluster sich in beiden Fällen um die realen Schnittpunkte bilden, unabhängig davon, ob nur die Anzahl der Cluster (vgl. Abbildung 4.23a) oder auch die Clusterzentren (vgl. Abbildung 4.23b) vorgegeben werden. Wichtig ist hierbei, die Anzahl der benötigten Iterationen um dieses Ergebnis zu erreichen. Während bei Vorgabe der Clusterzentren die Zuordnung direkt im ersten Berechnungsschritt erfolgt, sind mehrere Iterationsschritte notwendig, wenn nur die Anzahl der Cluster vorhanden ist. An dieser Stelle muss zusätzlich erwähnt werden, dass die Clusterbildung direkt um die Schnittpunkte im Falle komplexerer Bauteile nur unter Vorgabe der Anzahl der Schnittpunkte nicht immer funktioniert. Dabei ist vor allem die Verteilung der Schnittpunkte und damit die Punkthäufungen über das Objekt von Bedeutung.



(a) K-Means mit Anzahl der Schnittpunkte als Clusteranzahl (b) Direkte Verwendung der Schnittpunktkoordinaten als Clusterzentren

Abb. 4.23: Vergleich der Ergebnisse des K-Means Algorithmus bei der Verwendung unterschiedlicher Vorinformation. Die jeweiligen Clusterzentren sind dabei durch einen schwarzen Punkt gekennzeichnet.

Qualitätsbeurteilung der Vorsegmentierung hinsichtlich der Genauigkeit und Vollständigkeit: Da das Ergebnis der K-Means Clustering stark von der Wahl der initialen Clusterzentren abhängig ist, handelt es sich bei diesem Algorithmus um einen nicht deterministischen Algorithmus. Da dieser den einzigen nicht deterministischen Anteil des Auswertalgorithmus darstellt, wird nun der Einfluss der K-Means Clustering auf die abgeleiteten geometrischen Kenngrößen untersucht. Hierfür wird ein Testobjekt mit einer etwas höheren Komplexität und damit einer höheren Anzahl an Schnittpunkten verwendet. Die Struktur des Objektes ist dabei identisch mit dem in Abschnitt 4.2.1 verwendeten Testkörper. Allerdings handelt es sich bei der hier verwendeten Punktwolke um Messungen von vier Standpunkten, die gemeinsam registriert wurden und somit sind alle Seiten des Testobjektes erfasst. Da einige Schnittpunkte des Testobjektes sich nahe der Ankerpunkte befinden und diese erfahrungsgemäß daher schlechter geschätzt werden können, werden im Folgenden 11 Cluster für die Schätzung verwendet. Um nun den Einfluss der initial gewählten Cluster bestimmen zu können, werden 1000 Durchläufe mit denselben Stellgrößen für die Schnittpunktberechnung durchgeführt (vgl. Abschnitt 4.2.4.2). Die berechneten Schnittpunktkoordinaten aller Durchläufe werden nun mittels DBSCAN (vgl. Abschnitt 3.3.2)

gruppiert und so die zusammengehörigen Schnittpunkte der unterschiedlichen Durchläufe identifiziert. An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass die berechneten Schnittpunkte nicht nur von der K-Means Clustering abhängig sind. Allerdings sind alle weiteren Auswerteschritte deterministisch, ein mehrmaliges Ausführen ändert daher nicht das Ergebnis unter Verwendung derselben Stellgrößen. Die optische Analyse zeigt dabei, dass vor allem an den Schnittpunkten P10 und P13 eine sichtbare Streuung der bestimmten Schnittpunkte stattfindet. Eine weitere Auffälligkeit zeigt sich bei Schnittpunkt P8, bei dem es sich um keinen wirklichen Schnittpunkt handelt. An dieser Stelle ist an das Testobjekte eine Label zur Kennzeichnung der Objekte angebracht, welches hier fehlerhaft als Schnittpunkt identifiziert wurde. Um neben den optischen auch eine numerische Bestimmung der Unsicherheiten durchführen zu können, wurden die mittleren Schnittpunktkoordinaten sowie die empirischen Standardabweichungen berechnet. Diese werden dabei sowohl getrennt in die drei Koordinatenachsen wie auch gesamt betrachtet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.16 dargestellt.

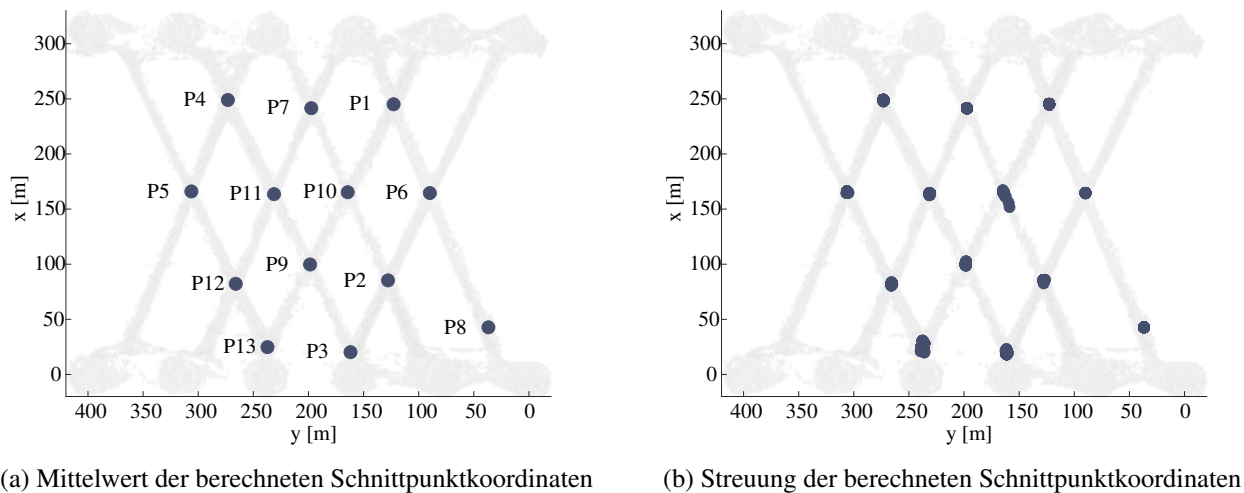


Abb. 4.24: Mittelwert und Streuung der berechneten Schnittpunktkoordinaten aus 1000 Durchläufen.

Der numerische Vergleich zeigt, dass die Standardabweichung der bestimmten 3D-Koordinaten der Schnittpunkte mit Ausnahme von vier Fällen unter einem halben Millimeter liegt. Die vier Punkte für die dies nicht gilt, sind zum einen die bereits in der Darstellung auffälligen Punkte P10 und P13. Zusätzlich fallen hier die Punkte P3 und P9 auf. Bei den Punkten P3 und P13 handelt es sich dabei um Schnittpunkte, die nahe eines Ankerpunktes liegen. Aus diesem Grund ist hier davon auszugehen, dass es durch die Verdeckung der Hüllen zu einer geringeren Punktdichte am realen Schnittpunkt kommen kann und dadurch die Schätzung stärker von der Wahl der Cluster abhängt. Dabei ist besonders Punkt P13 mit einer Standardabweichung in x -Richtung von 3,088 mm auffällig. Der Punkt P10, der die optisch größte Streuung aufweist zeigt auch hier im Vergleich eine erhöhte Abweichung. Auch hier zeigen sich die höchsten Abweichungen in x -Richtung. Diese sind allerdings mit 0,697 mm dennoch deutlich kleiner als im Fall des Punktes P13. Für den Punkt P9 zeigen sich vergleichbare Abweichungen, wie für P3. Auffällig ist hier, dass der Punkt P9 eine direkte Verbindung zu allen anderen auffälligen Punkten aufweist. Durch die Netzgenerierung können sich so auch fehlerhafte Schätzungen fortpflanzen. Der optisch auffällige Punkt P8 hingegen weist in der numerischen Auswertung die geringsten Abweichungen auf und ist mit einer Standardabweichung im μm -Bereich auch unterhalb der zu erwartenden Genauigkeit des Mess- und Auswertealgorithmus. Auch zeigt sich, dass es sich bei diesem Punkt um den einzigen Schnittpunkt handelt, der nicht in jeder Iteration gefunden werden kann. Betrachtet man allerdings dessen Lage, so zeigt sich, dass es sich bei diesem Schnittpunkt um keinen realen Schnittpunkt handelt. Damit wird die Vollständigkeit der Segmentierung nicht beeinträchtigt. Allerdings kommt es zu einer Übererfüllung der Anzahl der Schnittpunkte, so dass auch dies an dieser Stelle als eine Minderung der Korrektheit der Schnittpunktberechnung betrachtet werden muss. Da die Schnittpunkte allerdings noch nicht das finale Segmentierungsergebnis darstellen, wird der Umgang mit der Überbestimmung in den folgenden Abschnitten weiter betrachtet.

Tab. 4.16: Mittelwert und Standardabweichung der berechneten Schnittpunktkoordinaten mit vorheriger K-Means Clusterung aus 1000 Durchläufen. Die hervorgehobenen Werte sind dabei im Folgenden genauer erläutert.

	$\bar{X}$ [mm]	$\bar{Y}$ [mm]	$\bar{Z}$ [mm]	σ_x [mm]	σ_y [mm]	σ_z [mm]	σ_{3D} [mm]
P1	245,073	122,766	59,297	0,187	0,037	0,078	0,206
P2	85,333	127,817	56,121	0,290	0,093	0,157	0,343
P3	20,211	161,844	67,336	0,874	0,170	0,578	1,061
P4	248,965	273,088	58,472	0,400	0,144	0,051	0,428
P5	166,014	306,184	43,684	0,114	0,093	0,049	0,155
P6	164,582	89,860	44,514	0,048	0,027	0,028	0,062
P7	241,514	197,400	70,133	0,051	0,033	0,026	0,066
P8	42,729	36,741	23,332	0,001	0,001	0,003	0,004
P9	99,753	198,512	62,573	0,483	0,062	0,648	0,810
P10	165,296	164,377	62,076	0,697	0,347	0,288	0,830
P11	163,543	231,205	60,834	0,250	0,135	0,301	0,414
P12	82,245	265,967	55,644	0,315	0,178	0,107	0,378
P13	24,812	237,168	66,189	3,088	1,243	0,578	3,378

Im Allgemeinen zeigt die Analyse der Schnittpunktkoordinaten, dass es zu einer Variation dieser im Bereich von einigen Zehntelmillimetern durch die K-Means Clusterung kommen kann. Auffällig ist außerdem, dass die größten Standardabweichungen in x -Richtung und die geringsten in z -Richtung auftreten. Allerdings sind diese Abweichungen gering und unterhalb der zu erwartenden Genauigkeit des Mess- und Auswertesystems. Somit bietet die K-Means Clusterung trotz ihres nicht deterministischen Verhaltens eine gute Möglichkeit die Punktwolke vor der eigentlichen Geradenschätzung zu clustern. Dies ist vor allem bei großen Objekten und damit verbunden großen Punktwolken relevant um die Rechenzeit des Auswertalgorithmus mittels Parallelisierung minimieren zu können.

Iterative Hough-Transformation und deren Qualitätsbeurteilung hinsichtlich der Vollständigkeit und Korrektheit: Um nun auch die einzelnen Liniensegmente zu erhalten, wird nach der Clusterung eine iterative Hough-Transformation auf die einzelnen Punktwolkencluster angewandt (vgl. Abschnitt 3.3.3). Um möglichst viele Linien direkt bestimmen zu können und somit eine etwaige Nachbearbeitung zu minimieren, kann die in dieser Arbeit verwendete Hough-Transformation mittels verschiedener Stellgrößen an das auszuwertende Objekt angepasst werden. Im Folgenden werden die benötigten Einstellgrößen der Hough-Transformation genauer betrachtet. Die Wahl dieser Parameter kann dabei aus vorhanden Vorinformationen aus der Planung abgeleitet werden.

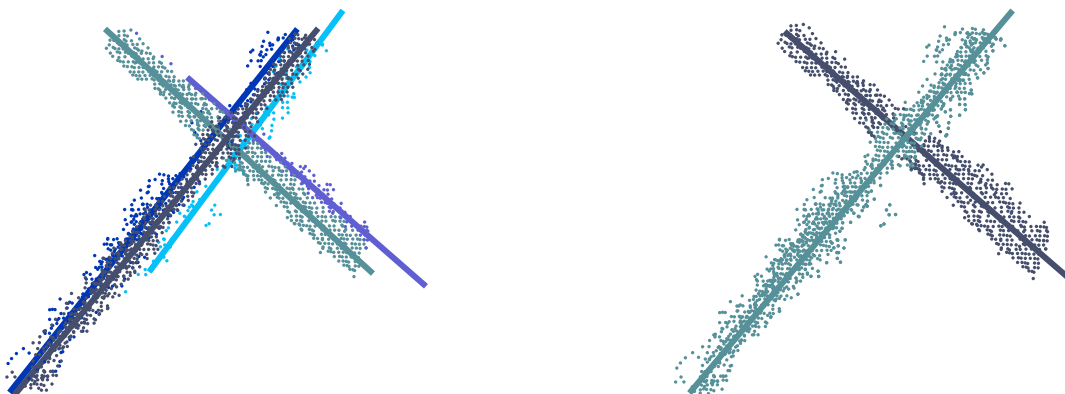
- **Schrittweite der Hough-Transformation:** Durch die Schrittweite der Hough-Transformation wird die Größe der Akkumulatorzellen bestimmt und somit der Bereich, in dem nach möglichen Linien gesucht wird.
- **Maximale Linienanzahl:** Da es sich bei der durchgeführten Hough-Transformation um eine iterative Hough-Transformation handelt, können pro Cluster mehrere Linien zurückgegeben werden. Aus diesem Grund kann eine Festlegung der maximalen Linienanzahl sinnvoll sein, um zu viele Linien zu vermeiden. In durchgeführten Test zeigt sich hierbei allerdings, dass für einfache Bauteile der Standardwert 0, der alle gefundenen Linien zurückgibt, ausreichend ist. Bei komplexeren Bauteilen hingegen kann es sinnvoll sein, hier einen Grenzwert zu setzen, da sonst sehr viele, nicht korrekte Linien gefunden werden.

- **Minimaler Wert der Akkumulatorzelle:** Ein weiterer Parameter, der benötigt wird, ist der minimale Wert, der in der Akkumulatorzelle vorliegen muss, damit diese auch als Linie gewertet wird. Bei der Wahl dieses Wertes ist die Größe des Objektes, sowie die gewählte Messeinstellung entscheidend, da diese die Anzahl der vorhandenen Punkte stark beeinflussen. In der Praxis hat sich hierbei ein Wert von 20 Punkten als sinnvoll erwiesen, wobei die meisten der gefundenen Linien in den vorliegenden Datensätzen eher in der Größenordnung von hundert oder tausend Punkten liegen.
- **Linienabstand:** Der Linienabstand gibt an, wie weit ein Punkt von der Linie entfernt liegen darf, um noch dieser zugeordnet zu werden. Liegen Informationen bezüglich des zu erwartenden Radius der Faserbündel vor, so bietet es sich an, diesen Wert hierfür zu verwenden. Wird der Abstand zu klein gewählt, oder ist nicht an allen Stellen homogen, kann es dazu führen, dass Linien doppelt gefunden werden und die Ergebnisse noch weiter überarbeitet werden müssen.

Die ersten drei Parameter sind dabei auch in der allgemeine Implementierung der Hough-Transformation für die Detektion von Geraden in 3D berücksichtigt (vgl. Abschnitt 3.3.3). Der Unterschied in dieser Arbeit besteht nun darin, dass die benötigten Stellgrößen direkt aus verfügbaren Planungsdaten abgeleitet werden können. Der Stellparameter des Linienabstandes wurde neu in die Implementierung eingeführt, da im Rahmen dieser Arbeit davon auszugehen ist, dass alle Fasersegmente einen vergleichbaren Durchmesser aufweisen und somit dies als zusätzliches Kriterium für die Segmentierung verwendet werden kann.

Wendet man die Hough-Transformation nun auf die einzelnen Cluster an, so zeigt sich, dass eine vollständige Segmentierung der Liniensegmente möglich ist. Im Hinblick auf die Korrektheit der Segmentierung zeigt sich allerdings, dass einzelne Faserbündel noch durch mehrere Geraden repräsentiert werden (vgl. Abbildung 4.25a). Daher wird im Anschluss an die Segmentierung nun eine Überprüfung der gefundenen Linien durchgeführt. Je nach Wahl der Faserstärke oder auch der Homogenität der Faserstärke innerhalb eines Bauteils, kann es sein, dass ein Faserbündel als zwei separate Linien segmentiert wird. Um dies zu verhindern, wird in der Nachbearbeitung ein Differenzkriterium eingeführt.

- **Differenzkriterium:** Bei diesem wird an n gleichmäßig verteilten Stellen entlang der Geraden der euklidische Abstand zu allen anderen Geraden des Clusters berechnet. Anschließend wird die Differenz zwischen dem minimalen und dem maximalen Abstand zu jeder Geraden bestimmt. Ist diese Differenz kleiner als ein zuvor definierter Grenzwert, so werden die Linien als identisch betrachtet und es wird eine neue Gerade mittels der Punkte beider Geraden geschätzt (vgl. Abbildung 4.25b).



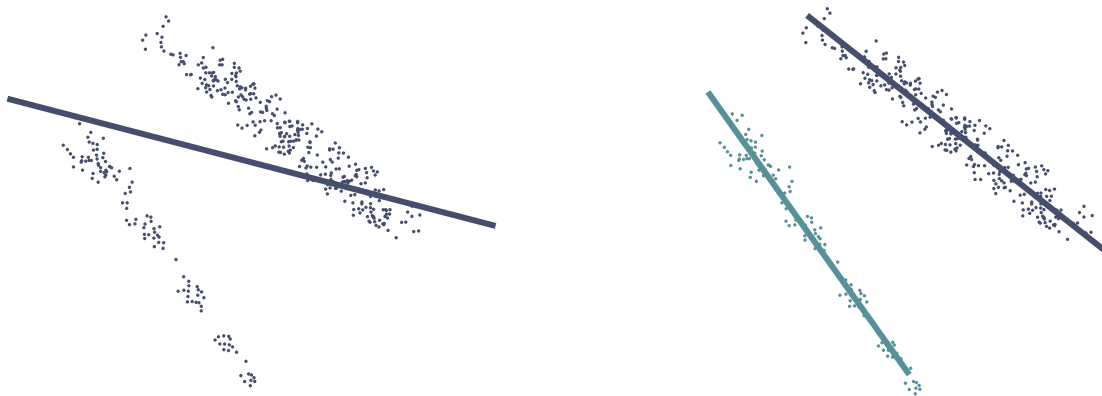
(a) Detektierte Linien eines Clusters nach der Hough-Transformation (b) Detektierte Linien mit anschließender Filterung nach parallelen Linien

Abb. 4.25: Einfluss der Filterung nach parallelen Linien auf das Segmentierungsergebnis.

Da in den betrachteten Strukturen häufig auch parallele Faserstränge auftreten, würde das Differenzkriterium ohne Zusatzbedingung auch diese zusammenfassen (vgl. Abbildung 4.26a). Um dies zu verhindern, wird eine zusätzliche Bedingung, das Distanzkriterium, eingeführt.

- Distanzkriterium: Hierbei wird zusätzlich der mittlere Abstand der beiden Geraden betrachtet. Das Differenzkriterium kommt nur zur Anwendung, wenn dieser mittlere Abstand einen vorgegebenen Grenzwert unterschreitet (vgl. Abbildung 4.26b).

Die Wahl dieser beiden Parameter ist hierbei objektabhängig. Im Allgemeinen hat sich allerdings gezeigt, dass der zu erwartende Faserradius sich gut als Grenzwert für das Differenzkriterium eignet. Als Grenzwert für den minimalen Abstand zweier Geraden bietet es sich an, den doppelten erwarteten Radius zu verwenden. Dabei gilt auch hier, je mehr Informationen bereits über das Objekt bekannt sind, desto besser können die Grenzwerte gewählt werden und somit das Segmentierungsergebnis verbessert werden.



(a) Segmentierungsergebnis nach der Filterung nach parallelen Linien ohne Distanzkriterium (b) Segmentierungsergebnis nach der Filterung nach parallelen Linien mit Distanzkriterium

Abb. 4.26: Einfluss des Distanzkriteriums auf das Segmentierungsergebnis.

Durch die Anwendung dieser beiden Zusatzkriterien kann die Korrektheit der Segmentierung verbessert werden.

Geradenschätzung für die einzelnen Punktwolkencluster und Analyse hinsichtlich deren Genauigkeit:

Nach der Segmentierung müssen die zugehörigen Geradenparameter der einzelnen Punktwolkencluster bestimmt werden. Dabei ist zu unterscheiden, ob Genauigkeitsinformationen für die Punktwolke vorliegen. Ist dies nicht der Fall, erfolgt die Schätzung wie in Abschnitt 3.2.3.4 dargestellt. Liegen Genauigkeiten vor, können die Geradenparameter sowie deren Genauigkeiten mittels einer Ausgleichung nach Gauß-Helmert (vgl. Abschnitt 3.2.3.2) bestimmt werden.

Um die Schätzung der Geradenparameter mittels der Ausgleichung nach Gauß-Helmert durchzuführen, muss das funktionale Modell der Ausgleichung zunächst bestimmt werden. Dieser Art der Schätzung wird auch in Neitzel (2010) und Snow und Schaffrin (2016) durchgeführt. Da die Wahl der Geradenparameter im Allgemeinen nicht eindeutig definiert ist, wird im Folgenden die Linienrepräsentation nach Roberts, wie bereits für die Hough-Transformation (vgl. Abschnitt 3.3.3) verwendet. Dabei wird eine Gerade im Raum durch vier Parameter eindeutig repräsentiert. Die Beobachtungen sind in dieser Ausgleichung die Punkte der Punktwolke. Damit ergibt sich der Beobachtungsvektor zu

$$\mathbf{L} = [x_1 \quad y_1 \quad z_1 \dots x_i \quad y_i \quad z_i] \quad (4.1)$$

mit x_i, y_i, z_i : Koordinaten des Eingangspunktes i mit $i = 1$ bis Anzahl der Punkte.

Die Unbekannten ergeben sich dann als die benötigten Parameter der Geraden nach der Linienrepräsentation nach Roberts. Der Unbekanntenvektor ergibt sich damit zu

$$\mathbf{X} = [b_x \quad b_y \quad x' \quad y'] \quad (4.2)$$

mit b_x, b_y : x - und y -Komponente des Richtungsvektors der Geraden

x', y' : Koordinaten des Schnittpunktes der Ebene durch den Ursprung mit dem Richtungsvektor der Geraden als Normalenvektor.

Für das funktionale Modell ergeben sich in dieser Repräsentation die folgenden beiden Gleichungen für den Punkt i

$$F_{1,i}(\mathbf{L}, \mathbf{X}) = \sqrt{1 - b_x^2 - b_y^2} \cdot \left(x_i - x' \left(1 - \frac{b_x^2}{1 + \sqrt{1 - b_x^2 - b_y^2}} \right) - y' \cdot \left(\frac{b_x \cdot b_y}{1 + \sqrt{1 - b_x^2 - b_y^2}} \right) \right) - b_x \cdot (z_i + x' \cdot b_x + y' \cdot b_y) = 0, \quad (4.3)$$

$$F_{2,i}(\mathbf{L}, \mathbf{X}) = \sqrt{1 - b_x^2 - b_y^2} \cdot \left(y_i - x' \left(\frac{-b_x \cdot b_y}{1 + \sqrt{1 - b_x^2 - b_y^2}} \right) - y' \cdot 1 - \left(\frac{b_y^2}{1 + \sqrt{1 - b_x^2 - b_y^2}} \right) \right) - b_y \cdot (z_i + x' \cdot b_x + y' \cdot b_y) = 0. \quad (4.4)$$

Zusammengefügt ergibt sich damit das vollständige funktionale Modell zu

$$\mathbf{F}_i(\mathbf{L}, \mathbf{X}) = \begin{bmatrix} F_{1,i} \\ F_{2,i} \end{bmatrix}. \quad (4.5)$$

Um nun die Ausgleichung nach Gauß-Helmert durchführen zu können, werden im nächsten Schritt die $\mathbf{A}$ -Matrix, mit den Ableitungen nach den Unbekannten, sowie die $\mathbf{B}$ -Matrix, mit den Ableitungen nach den Beobachtungen, benötigt. Dies ergeben sich zu

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_{1,i}}{\partial b_x} & \frac{\partial F_{1,i}}{\partial b_y} & \frac{\partial F_{1,i}}{\partial x'} & \frac{\partial F_{1,i}}{\partial y'} \\ \frac{\partial F_{2,i}}{\partial b_x} & \frac{\partial F_{2,i}}{\partial b_y} & \frac{\partial F_{2,i}}{\partial x'} & \frac{\partial F_{2,i}}{\partial y'} \end{bmatrix}, \quad (4.6)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_{1,i}}{\partial x_i} & \frac{\partial F_{1,i}}{\partial y_i} & \frac{\partial F_{1,i}}{\partial z_i} \\ \frac{\partial F_{2,i}}{\partial x_i} & \frac{\partial F_{2,i}}{\partial y_i} & \frac{\partial F_{2,i}}{\partial z_i} \end{bmatrix}. \quad (4.7)$$

Für die Ausgleichung wird nun noch eine Näherungslösung für die Unbekannten benötigt. Für diese kann das in Abschnitt 3.2.3.4 dargestellte Verfahren verwendet werden. Für die Ausgleichung wird nun noch die Varianz-Kovarianzmatrix der Beobachtungen benötigt. Hier kann, je nach Verfügbarkeit, entweder eine Einheitsmatrix, in diesem Fall werden alle Punktkoordinaten gleich gewichtet, oder eine Matrix mit den nach Abschnitt 3.2.2 fortgepflanzten Varianzen der einzelnen Punktkoordinaten, sowie den Korrelationen zwischen den einzelnen Punktkoordinaten verwendet werden.

Damit sind alle benötigten Matrizen vorhanden und es kann die Ausgleichung des Gauß-Helmert-Modells

wie in Abschnitt 3.2.3.2 beschrieben durchgeführt werden. Zu beachten ist dabei, dass die Anzahl der Beobachtungen durch die Punktwolken sehr schnell, sehr groß werden kann. Dies führt ebenfalls zu großen Varianz-Kovarianzmatrizen, was dann in der Folge zu Problemen bei der Invertierung der Matrizen führen kann. Die Auswertung der Ergebnisse zeigt hier, dass bei der Ausgleichung, in allen in dieser Arbeit durchgeführten Anwendungsfällen, nach dem ersten Iterationsschritt Zuschläge in der Größenordnung von 10^{-12} mm auftreten. In Anbetracht der zu erwartenden Genauigkeiten kann somit keine Verbesserung der Schätzung erzielt werden. Die Anwendung dieses aufwendigeren Verfahrens lohnt sich daher nur, wenn die einzelnen Messpunkte sich in ihren Genauigkeiten stark unterscheiden. Durch die in dieser Arbeit gewählte Messkonfiguration können die Punkte aber gleich genau angenommen werden, weshalb dieser Ansatz in dieser Arbeit nicht näher betrachtet wird.

Um auch eine Information über die Genauigkeit der Schätzung im Falle der Verwendung des Verfahrens nach Abschnitt 3.2.3.4 zu erhalten, können hier die berechneten Eigenwerte der Varianz-Kovarianzmatrix der Punktwolke für eine Gewichtung der geschätzten Geraden in den weiteren Auswerteschritten verwendet werden.

4.2.4.2 Bestimmung der Schnittpunkte und Netzgenerierung, sowie die Analyse hinsichtlich der Korrektheit und Vollständigkeit

Sind alle Linien pro Cluster geschätzt, wird anschließend die Berechnung der Schnittpunkte innerhalb eines Clusters durchgeführt. In einem ersten Schritt wird dabei die Anzahl der identifizierten Linien überprüft. Ist diese größer eins, werden diese nun auf das Vorhandensein von Schnittpunkten überprüft. Da es sich bei den gefundenen Geraden um Schätzungen handelt, ist eine direkte Berechnung des Schnittpunktes nicht möglich, da die Geraden im Normalfall windschief zueinander sind. Um die potentiellen Schnittpunkte zu identifizieren, werden daher die Abstände der Geraden zueinander betrachtet. Hierfür wird zunächst paarweise der minimale Abstand der geschätzten Geraden pro Cluster berechnet. Anschließend wird überprüft, ob der Punkt, der zu beiden Geraden den kürzesten Abstand aufweist, ein potentieller Schnittpunkt sein könnte. Um nun daraus die relevanten Schnittpunkte zu extrahieren, werden verschiedene Randbedingungen eingeführt. Diese werden im Folgenden genauer erläutert.

- **Schnittpunkt innerhalb der Bounding Box der Punktwolke:** Eine Voraussetzung dafür, dass es sich um einen Schnittpunkt handelt, ist, dass dieser innerhalb der Bounding Box, also innerhalb des minimal umschließenden Quaders, der Punktwolke des Clusters liegen soll. Durch diese Bedingung können potentielle Schnittpunkte eliminiert werden, die außerhalb der betrachteten Punktwolke, und damit auch außerhalb des Objektes liegen und somit keinen realen Schnittpunkt repräsentieren.
- **Abstand der Geraden:** Zusätzlich ist der Abstand der Geraden zum potentiellen Schnittpunkt zu betrachten. Für diesen Abstand muss vorab ein Grenzwert festgelegt werden, ab wann von einem Schnittpunkt gesprochen wird.

Da die vorherigen Untersuchungen der Geraden immer paarweise durchgeführt werden, ist nun zunächst noch zu überprüfen, ob mehrere der gefundenen Schnittpunkte identisch sind. Um dies zu überprüfen, wird der Abstand zwischen den Schnittpunkten bestimmt. Ist dieser geringer als ein zuvor festgelegter Grenzwert, so werden die Schnittpunkte als identisch angenommen. Anschließend wird aus allen Geraden, die zu einem gemeinsamen Schnittpunkt gehören, erneut der Punkt mit dem geringsten Abstand zu allen Linien geschätzt und dieser als Schnittpunkt verwendet. An dieser Stelle wird zusätzlich eine Gewichtung der Geraden nach Formel (3.33) eingeführt. Diese ist dabei von den verfügbaren Informationen der geschätzten Geraden abhängig. Liegen Standardabweichungen für die Geraden vor, so können diese für die Gewichtsmatrix verwendet werden. Ist dies nicht der Fall, werden die Eigenwerte der zugehörigen Geraden aus der Hauptachsentransformation verwendet (vgl. Abschnitt 3.2.3.4). Dies führt dazu, dass längere Liniensegmente ein höheres Gewicht bei der Schnittpunktberechnung erhalten. Dies ist sinnvoll, da in diesen Fällen von einer besseren Geradenschätzung ausgegangen werden kann.

Durch diese Schätzungen erhält man nun eine Liste an Schnittpunkten und Geraden. Die geschätzten Liniensegmente, ein Teilstück der Geraden, beginnen oder enden allerdings noch nicht immer an den Schnittpunkten. Für eine vollständige Topologie ist dies allerdings Voraussetzung. Aus diesem Grund werden die geschätzten Geraden an die Schnittpunkte angepasst. Dabei lassen sich allgemein zwei Fälle unterscheiden:

1. Der Schnittpunkt liegt nahe einem aktuellen Start- oder Endpunkt einer Geraden: In diesem Fall wird der entsprechenden Start- oder Endpunkt der Geraden durch die Koordinaten des Schnittpunktes ersetzt.
2. Der Schnittpunkt liegt nicht nahe einem aktuellen Start- oder Endpunkt einer Linie: In diesem Fall wird die Linie am Schnittpunkt in zwei Liniensegmente geteilt (vgl. Abbildung 4.27a). Dabei besteht eine Linie nun aus dem ursprünglichen Anfangspunkt der Linie, sowie dem Schnittpunkt als Endpunkt und die zweite Linie aus dem Schnittpunkt als Anfangspunkt und dem ursprünglichen Ende (vgl. Abbildung 4.27b).

Die abgeänderten Linien werden anschließend mit dem Index der Ursprungslinie gespeichert. Dieses Verfahren wird nun für alle Schnittpunkte eines Cluster wiederholt. Da eine Linie zu mehreren Schnittpunkten gehören kann, wird zusätzlich überprüft, ob die Linie bereits zuvor betrachtet wurde. Dieser Fall ist in Abbildung 4.27 dargestellt. Die hellblau hervorgehobene Linie ist hier den beiden Schnittpunkten P1 und P2 zugeordnet und muss daher in drei Liniensegmente unterteilt werden. Im ersten Schritt wird das oben dargestellte Verfahren für die hellblaue Linie und den Schnittpunkt P1 angewendet (vgl. Abbildung 4.27a). Da die hellblaue Linie allerdings ebenfalls dem Schnittpunkt P2 zugeordnet ist, muss diese nun weiter betrachtet werden. Dafür muss zunächst festgestellt werden, zu welchem Liniensegment der Schnittpunkt gehört. Um dies zu bestimmen, wird zunächst der Abstand von Start- und Endpunkt aller Liniensegmente zum Schnittpunkt berechnet.

$$\begin{aligned} d_{P,Start_i} &= |\mathbf{P} - \mathbf{Start}_i| \\ d_{P,Ende_i} &= |\mathbf{P} - \mathbf{Ende}_i| \end{aligned} \quad (4.8)$$

mit $\mathbf{P}$: betrachteter Schnittpunkte,
 $\mathbf{Start}_i$: Startpunkte im Punktcluster,
 $\mathbf{Ende}_i$: Endpunkte im Punktcluster,
 $d_{P,Start_i}$: Abstand des Schnittpunktes zum Startpunkt des Liniensegments i ,
 $d_{P,Ende_i}$: Abstand des Schnittpunktes zum Endpunkt des Liniensegments i ,
 i : 1 bis Anzahl der Liniensegmente.

Anschließend wird die Länge des Liniensegments mit der Länge der Summe beider Liniensegmente von Start- und Endpunkt zum Schnittpunkt verglichen und dazu die Differenz d_U beider berechnet.

$$d_U = |\mathbf{Ende}_i - \mathbf{Start}_i| - (d_{P,Start_i} + d_{P,Ende_i}) \quad (4.9)$$

Gehört der Schnittpunkt zum betrachteten Liniensegment, so sollte die betrachtete Differenz im Vergleich am geringsten sein. Im in Abbildung 4.27 dargestellten Beispiel bedeutet diese, dass zunächst die Abstände vom Startpunkt und Schnittpunkt P1 zum Schnittpunkt P2 berechnet werden. Die Summe dieser wird dann mit dem direkten Abstand vom Startpunkt zu P1 verglichen. Das Gleiche wird dann mit dem zweiten Liniensegment durchgeführt. Es werden also die Abstände von P1 zu P2 und vom Endpunkt zu P2 berechnet und mit dem direkten Abstand von P1 zum Endpunkt verglichen. Dabei zeigt sich, dass der Schnittpunkt zum Liniensegment von P1 zum Endpunkt gehört (vgl. Abbildung 4.27b). Damit kann mit dieser nun das bereits eingangs durchgeführte Verfahren wiederholt werden, so dass am Ende drei Liniensegmente vorhanden sind (vgl. Abbildung 4.27c). Der gesamte Ablauf wird so lange durchgeführt, bis alle Schnittpunkte des Clusters betrachtet wurden.

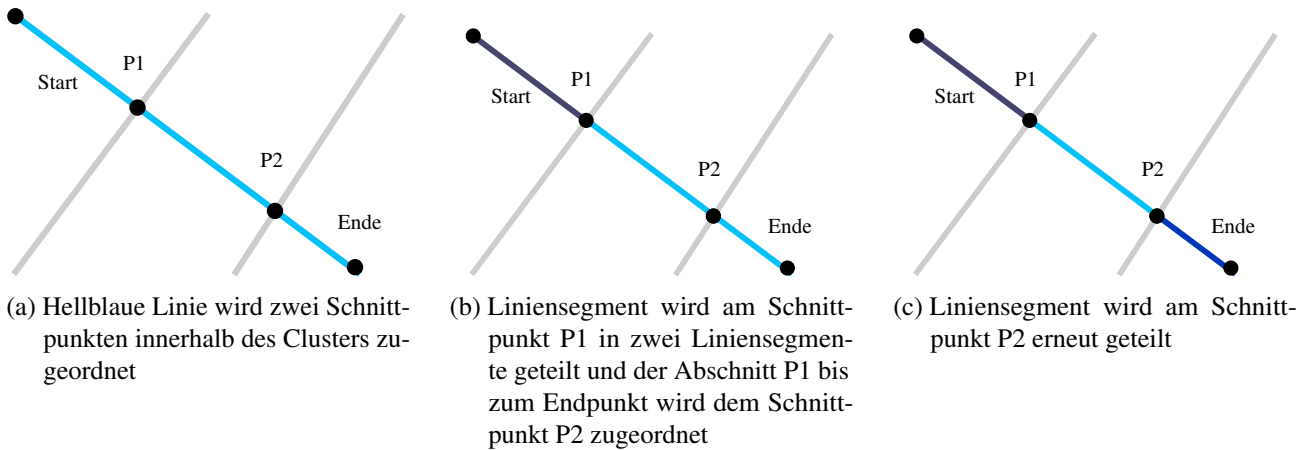


Abb. 4.27: Aufteilung der Liniensegmente an den Schnittpunkten bei mehreren Schnittpunkten für eine Linie.

Nun sind alle Linien innerhalb eines Clusters an den Schnittpunkten miteinander verbunden. Je nach Wahl der einzelnen Cluster kann es dazu kommen, dass auch Schnittpunkte zwischen verschiedenen Clustern entstehen. Diese werden im Folgenden bestimmt. Dabei werden zunächst alle geschätzten Liniensegmente dahingehend überprüft, ob weitere bislang nicht detektierte Schnittpunkte vorliegen. Hierfür werden die Liniensegmente dahingehend untersucht, ob es zwei oder mehrere Liniensegmente gibt, deren minimaler Abstand unterhalb des Grenzwertes, für die Betrachtung des Punktes als Schnittpunkt, liegt. Ein solcher Fall ist in Abbildung 4.28 dargestellt. Zwischen den beiden dargestellten Clustern (farblich markiert) befinden sich zwei weitere potenzielle Schnittpunkte (Kreis in der Abbildung) die bestimmt werden müssen. Dazu wird dasselbe Verfahren wie auch bei der clusterweisen Analyse durchgeführt. Wenn notwendig erfolgt im Anschluss ebenfalls die Aufspaltung der Linien an den Schnittpunkten in die einzelnen Liniensegmente. Somit sind nun alle Schnittpunkte des Objektes, sowie die zugehörigen Liniensegmente bestimmt.

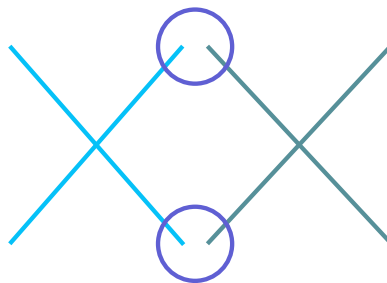


Abb. 4.28: Bestimmung der Schnittpunkte zwischen zwei Clustern.

Neben zusätzlichen Schnittpunkten zwischen Clustern, werden im Folgenden die offenen Enden der Liniensegmente betrachtet. Dies ist der Fall, wenn sich die Cluster um Schnittpunkte bilden. Dadurch sind Liniensegmente in zwei Clustern als ein Teil des Liniensegmentes segmentiert worden und müssen jetzt verbunden werden. Hierzu wird zunächst für jedes Liniensegment überprüft, ob die Start- und Endpunktkoordinaten bereits mit einem Schnittpunkt übereinstimmen. Ist dies der Fall wird der entsprechende Schnittpunktindex gespeichert. Anschließend werden alle Linien diesbezüglich untersucht. Dabei wird zwischen vier Fällen unterschieden:

1. Start- und Endpunkt sind einem Schnittpunkt zugeordnet:
In diesem Fall ist keine weitere Aktion für das Liniensegment notwendig. Auch muss das Liniensegment für die Verknüpfung mit weiteren Liniensegmenten nicht weiter betrachtet werden.
2. Nur der Startpunkt ist einem Schnittpunkt zugeordnet:
Dieser Fall ist zur besseren Verdeutlichung in Abbildung 4.29 dargestellt. Das betrachtete Liniensegment

ist dabei in dunkelblau dargestellt, der Endpunkt, der keinem Schnittpunkt zugeordnet ist, in rot. Für diese Linien wird nun zunächst der Abstand zu allen Schnittpunkten, im Beispiel die Schnittpunkte P1-P4, sowie die zugehörigen Lotfußpunkte zur Geraden für das jeweilige Liniensegment berechnet. Anschließend wird die Lage des Fußpunktes betrachtet. Dabei werden zwei Fälle unterschieden. Eine Möglichkeit ist, dass der Fußpunkt zwischen Start- und Endpunkt (P3) oder in der Verlängerung über den Endpunkt hinaus (P4) liegt. In diesem Fall ist der betrachtete Schnittpunkt kein Kandidat für einen möglichen neuen Endpunkt. Die zweite Möglichkeit ist, dass der Fußpunkt auf der anderen Seite der Geraden liegt, also in der Verlängerung der Geraden vom Startpunkt zum Endpunkt (P1 und P2). In diesem Fall handelt es sich um einen möglichen Schnittpunkt, welcher weiter betrachtet wird. Für alle nun noch in Frage kommenden Schnittpunkte werden nun die Abstände zwischen Schnittpunkt und Fußpunkt berechnet. Als neuer Startpunkt wird der Schnittpunkt gewählt, der den geringsten Abstand von Schnittpunkt und Fußpunkt aufweist. In diesem Beispiel entspricht dies Punkt P1. Somit wird der Endpunkt des Liniensegments (roter Punkt) durch den Schnittpunkt P1 ersetzt. Der bisherige Endpunkt des ursprünglichen Liniensegments von P1, der grüne Punkt, wird dann entsprechend durch den Startpunkt ersetzt.

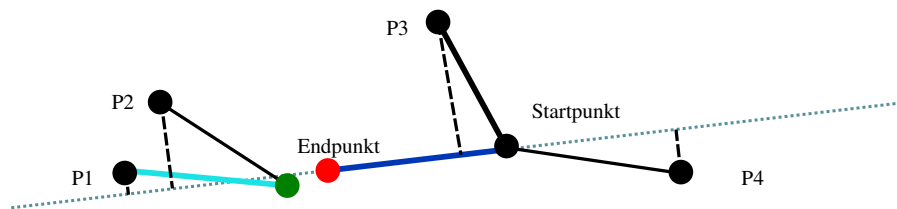


Abb. 4.29: Verbindung der geschätzten Liniensegmente zwischen zwei Clustern.

3. Nur der Endpunkt ist einem Schnittpunkt zugeordnet:

In diesem Fall wird das gleiche Verfahren wie im vorherigen Fall durchgeführt, mit dem Unterschied, dass an Stelle des Startpunktes der Endpunkt betrachtet wird.

4. Start- und Endpunkt sind keinem Schnittpunkt zugeordnet:

In diesem Fall wird das zuvor vorgestellte Verfahren für beide Enden des Liniensegments durchgeführt.

Da bei dieser Untersuchung alle Linien betrachtet werden, sind am Ende Doppelungen in der Liste der gefundenen Linien vorhanden, da eine Linie aus beiden Richtungen heraus entstehen kann. Im oben betrachteten Beispiel entspricht diese der zusätzlichen Verbindung der Linien unter Betrachtung des grünen Punktes. Aus diesem Grund werden nun alle doppelten Linien entfernt. Je nach Struktur können auch nach dieser Analyse noch offene Enden vorkommen. Dies ist davon abhängig, ob es sich bei der zu untersuchenden Struktur um eine offene oder geschlossenen Struktur handelt.

4.2.4.3 Netzgenerierung und Analyse hinsichtlich der Vollständigkeit und Korrektheit der Liniensegmentierung

Nachdem alle Liniensegmente bestimmt wurden und diese mit den Schnittpunkten verbunden sind, kann nun die Topologie der Struktur betrachtet werden. Durch den Fertigungsprozess des Wickelns und des damit vorhanden durchgängigen Fadens ist die Struktur im Allgemeinen geschlossen. Durch die zusätzliche Verwendung von Hilfsbrücken, die eine einfachere Fertigung ermöglichen, ist es allerdings auch möglich, dass Teile der Struktur der Fertigung anschließend entfernt werden und somit eine stellenweise offene Struktur vorliegt. Dies ist auch zu beachten, wenn Messungen während der Fertigung oder bei der Fertigung mit mehreren Robotern durchgeführt werden. Mit der Bestimmung der Topologie wird nun auch gleichzeitig eine Qualitätskontrolle der bisherigen Linienschätzung und Netzgenerierung durchgeführt und dabei die Vollständigkeit der Liniensegmente betrachtet. Ziel dieses Arbeitsschrittes ist es, die geschätzten Liniensegmente in einer vordefinierten Reihenfolge, meist

entspricht dies der Reihenfolge aus der Fertigung, zu sortieren, um später auch den Vergleich unterschiedlicher Datenquellen und eine einheitliche Weiterverarbeitung zu ermöglichen. Um zunächst grundlegende Informationen über das vorliegende Netz zu erhalten, wird zunächst die Anzahl der Liniensegmente pro Schnittpunkt betrachtet. Handelt es sich bei der Struktur um eine geschlossenen Struktur, so sind bei einer vollständigen Schätzung jedem Schnittpunkt eine gerade Anzahl an Liniensegmenten zugeordnet (vgl. Abschnitt 3.4). Andernfalls fehlen noch Liniensegmente oder es wurden fehlerhafte zusätzliche Liniensegmente segmentiert. Die fehlenden Liniensegmente werden in diesem Schritt auf Grundlage der vorliegenden Liniensegmente konstruiert um ein vollständiges Netz zu erhalten. Ein Grund für das Fehlen einzelner Liniensegmente kann dabei beispielsweise eine Verdeckung während der Messung sein. Dies passiert häufig auch dann, wenn ein Faden parallel und dicht am Fertigungsrahmen geführt wird und damit für den Laserscanner nicht sichtbar ist. Zusätzliche Liniensegmente entstehen, wenn die Korrektheit der Liniensegmente nicht für alle Liniensegmente erfüllt wird. In diesem Fall bleiben die nicht korrekten Liniensegmente nach der Netzgenerierung übrig.

Für die Sortierung der Liniensegmente ist nun entscheidend, welche Vorinformationen für die weitere Verarbeitung vorhanden sind. Dabei können drei grundlegende Fälle unterschieden werden. Diese sind:

1. Die Syntax der Struktur ist vorhanden und die Anzahl der erwarteten Schnittpunkte und Liniensegmente entspricht der Anzahl der aus der Auswertung bestimmten.
2. Die Syntax ist vorhanden, aber die Anzahl der Liniensegmente und Schnittpunkte unterscheidet sich.
3. Es ist keine Syntax vorhanden.

Dabei entspricht der erste Fall dem einfachsten Fall. In diesem können die geschätzten Schnittpunkte den Schnittpunkten der Syntax direkt zugeordnet werden und dadurch direkt die Reihenfolge der Liniensegmente bestimmt werden. Hierbei ist allerdings zu beachten, wie gut die reale Geometrie zur Syntax passt. Vor allem bei komplexen Objekten mit vielen Schnittpunkten, die dicht beieinander liegen, ist hier darauf zu achten, dass der nächste Schnittpunkt nicht zwingend der geometrisch richtige sein muss. In diesem Fall ist es sinnvoll die Ansätze für die anderen beiden Szenarien mit zu berücksichtigen.

Liegt keine Syntax vor, oder die Anzahl der bestimmten Schnittpunkte stimmt nicht mit denen aus der Syntax überein, so muss zunächst der Startpunkt manuell gewählt werden. Dieser kann, wenn vorhanden, aus der Planung übernommen werden, oder muss aktiv vorgegeben werden. Der gewählte Startpunkt und der zugehörigen Endpunkt sind dann das erste Liniensegment. Für das nächste Liniensegment werden nun drei Fälle unterschieden

- Zunächst wird geprüft, ob der Schnittpunkt weiteren Liniensegmenten zugeordnet ist. Ist dies der Fall, ist eines dieser Liniensegmente das Folgende. Gibt es mehrere potenzielle Kandidaten, muss unterschieden werden, welches Liniensegment das Richtige ist. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 4.30 dargestellt. Dazu wird der Winkel zwischen den normierten Richtungsvektoren des letzten Liniensegmentes und den möglichen Folgesegmenten (L1, L2 und L3 in Abbildung 4.30) berechnet. Anschließend wird das Liniensegment ausgewählt, dessen Winkel zum vorherigen Segment die kleinste Differenz zu 180° aufweist. In Abbildung 4.30 entspricht dies dem Liniensegment L2.

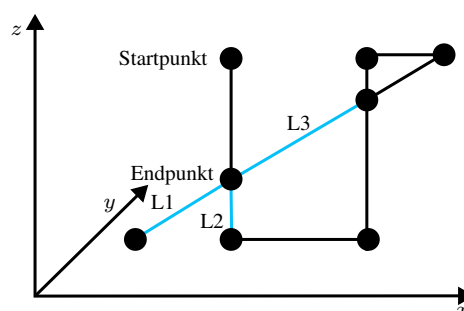


Abb. 4.30: Wahl des nachfolgenden Liniensegments bei mehreren potentiellen Kandidaten.

- Da es möglich ist, dass aufgrund von Verdeckungen (z.B. direkt am Rahmen) nicht alle Liniensegmente gemessen werden können, wird nun der Fall betrachtet, dass es im Knoten des aktuellen Endpunktes keine weiteren Segmente gibt (vgl. Abbildung 4.31b). Ist die gemessene Epoche nicht die erste Messepoche, kann die vorherige Epoche herangezogen werden, und es kann geprüft werden, ob hier ein passendes Liniensegment vorhanden ist (vgl. Abbildung 4.31a). Ist dies der Fall, kann eine neue Linie vom aktuellen Endpunkt des Netzes bis zum Endpunkt der Linie aus der vorherigen Epoche erzeugt werden, und die Netzgenerierung von dort aus fortgesetzt werden. Alternativ zur vorherigen Messepoche kann hier auch auf die Syntax zurückgegriffen werden.

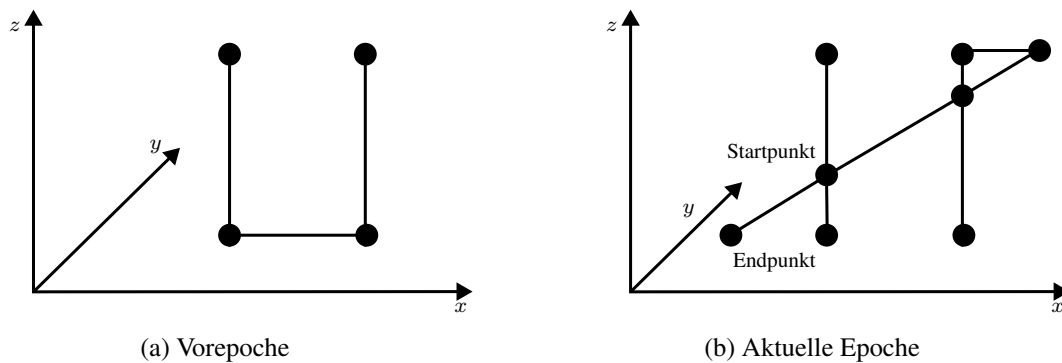


Abb. 4.31: Konstruktion mittels Informationen aus Vorepochen.

- Im dritten Fall, wenn es auch in der vorherigen Epoche keine passende Linie gibt, und keine Syntax vorhanden ist, wird das Objekt so ausgerichtet, dass der Rahmen entlang der z -Achse ausgerichtet ist. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 4.32 dargestellt. In diesem wird der Fall betrachtet, dass nur zwei Liniensegmente segmentiert wurden. Der Startpunkt ist dabei bereits definiert worden. Nun wird ein Anfangs- oder Endpunkt einer Linie mit einer ähnlichen z -Koordinate gesucht. Mögliche Start- oder Endpunkte sind dabei die Punkte P1 und P2. Wenn ein Punkt gefunden wird, im Beispiel ist dies P2, wird ein neues Liniensegment zwischen dem letzten Endpunkt des Netzes und dem neu gefundenen Punkt erzeugt. Dieses neu erzeugte Liniensegment ist in der Abbildung in hellblau dargestellt.

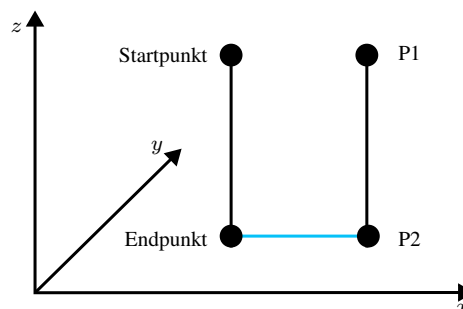


Abb. 4.32: Konstruktion fehlender Liniensegmente ohne Vorinformation.

Diese Schritte werden nun so lange durchgeführt, bis alle segmentierten Linien im Netz enthalten sind. Einen Sonderfall in der Auswertung stellen auch hier die Elemente dar, die mit zwei Robotern hergestellt wurden, da hier zwei Netze generiert werden müssen. Die Herausforderung hierbei ist, dass aus der gemessenen Punktwolke nicht ermittelt werden kann, welche geschätzten Linien zu welchem Roboter gehören und diese Information daher nur über die Topologie des Netzes gewonnen werden kann. Daher muss die Netzgenerierung hier in jeder Messepoche zweimal durchgeführt werden. Sobald alle Linien verwendet wurden, ist die Netzgenerierung abgeschlossen und die Daten können für eine spätere Analyse gespeichert werden.

Damit kann eine abschließende Qualitätsbetrachtung des Segmentierungsergebnisses durchgeführt werden. Dabei ist vor allem die Vollständigkeit und Korrektheit der segmentierten Liniensegmente zu beachten. An dieser Stelle zeigt sich, dass nicht an allen Stellen des Auswertalgorithmus die Vollständigkeit und Korrektheit immer erfüllt sein muss, um am Ende der Auswertung ein vollständiges und korrektes Ergebnis zu erhalten. Durch die unterschiedlichen Filterungen des Segmentierungsergebnisses, die Kombination einzelner Ergebnisse und durch die Netzgenerierung zum Abschluss kann auch bei einem unvollständigen oder stellenweise nicht korrekten Segmentierungsergebnis, ein vollständiges und korrektes Fasernetz erstellt werden.

4.2.4.4 Bestimmung der Form und Fläche der Faserquerschnitte und Analyse hinsichtlich der Vollständigkeit und Korrektheit

Ein weiteres charakteristisches Merkmal der Bauteile stellen die Querschnittsflächen, sowie die Form der Querschnitte dar. Zur Bestimmung dieser Flächen und Formen werden dazu die zuvor segmentierten Liniensegmente in kleinere Abschnitte unterteilt. Die Abschnittsgröße kann dabei frei gewählt werden. In den meisten Fällen hat sich hierbei eine Abschnittsgröße von 10 mm als sinnvoll erwiesen, da diese Abschnittsgröße auch häufig für die strukturellen Berechnungen verwendet wird. Um die Berechnung durchführen zu können, müssen zunächst die zugehörigen Punktwolken eines jeden Abschnitts, auch Untersegment genannt, bestimmt werden. Die Punktwolke muss daher entlang des Liniensegments in, beispielhaft, 10 mm große, Untersegmente unterteilt werden. Dazu wird zunächst der Anfangs- und Endpunkt des Untersegmentes bestimmt. Bei der Wahl dieser kann im einfachsten Fall direkt mit der Startkoordinate der betrachteten Linie begonnen werden. Die weiteren Punkte ergeben sich dann durch die definierte Abstandsgröße. Anschließend müssen die zugehörigen Punkte der Punktwolke des Untersegments bestimmt werden. Dafür wird ein Zylinder um das Liniensegment mit dem Start- und Endpunkt des Untersegments als Zentrum der Oberseite und Unterseite des Zylinders als Begrenzung erstellt. Der Radius des Zylinders sollte dabei groß genug gewählt werden, so dass der Faserstrang vollständig im Zylinder liegt. In der Praxis zeigte sich hierbei, dass der Radius besser zu groß als zu klein gewählt werden sollte, da sich in der betrachteten Punktwolke nur die Punkte des jeweiligen Liniensegmentes befinden. Ein zu klein gewählter Radius kann allerdings dazu führen, dass die Kontur des Querschnitts durchschnitten wird, der Zylinder befindet sich also im Faserbündel, und so entstehen fehlerhafte Querschnitte. Man erhält dabei eine unterteilte Punktwolke für das gesamte Liniensegment wie in Abbildung 4.33a dargestellt. Dieses Beispiel zeigt das bereits in Abschnitt 4.2.1.4 betrachtete Bauteil. Sind alle Punkte für den jeweiligen Abschnitt bestimmt, werden diese nun auf eine Ebene projiziert. Die dafür verwendete Ebene besteht aus dem Richtungsvektor des Liniensegmentes als Normalenvektor und dem Mittelpunkt des Untersegments, also dem Mittelpunkt aus Start- und Endpunkt des Untersegments für die Lage der Ebene. Nach der Projektion befinden sich die alle Punkte des Segments nun in einer Ebene im 3D-Raum wie in Abbildung 4.33b dargestellt.

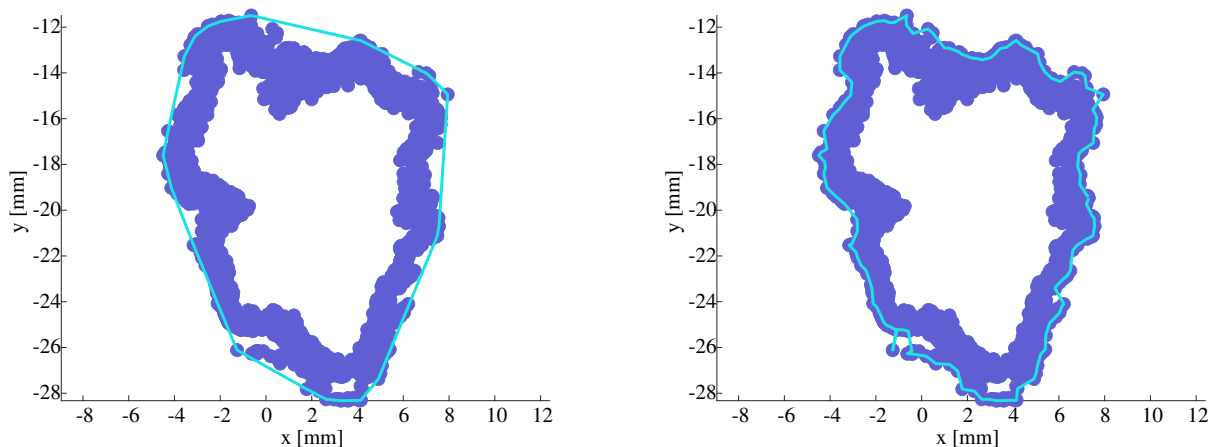


- (a) Einteilung der Punkte eines Liniensegmentes in die einzelnen Untersegmente (b) Projektion der Punkte je Untersegment auf eine Ebene rechtwinklig zum Richtungsvektor des Liniensegmentes

Abb. 4.33: Darstellung der Einteilung der Punktwolke eines Liniensegmentes in Untersegmente sowie die Projektion auf die zugehörigen Ebenen für das 8-Element mit einem geschätzten Liniensegment, dass die Verbindung zwischen den Ankerpunkten darstellt.

Um nun die Querschnittsflächen zu berechnen, erfolgt zunächst für jede Fläche die Transformation in ein lokales 2D-Koordinatensystem. Die x - und y -Achse liegen dabei in der zuvor definierten Ebene und der Schnittpunkt des Liniensegments mit der Ebene definiert den Ursprung. Die Wahl der Orientierung der Achsen hat auf die Bestimmung der Form und Fläche zunächst keinen Einfluss. Diese wird dann relevant, wenn zusätzlich Flächenträgheitsmomente berechnet werden sollen. In diesem Fall ist es ratsam sich an der Definition aus den strukturellen Berechnungen zu orientieren, um einen späteren Vergleich der Ergebnisse zu ermöglichen oder Simulationen mit realen Daten zu stützen.

Aus diesen 2D-Repräsentationen gilt es nun die Fläche zu bestimmen. Dazu werden zunächst die Randpunkte des Polygons, das die Form beschreibt, bestimmt. Dazu wird zum einen eine konvexe Hülle (vgl. Abbildung 4.34a) um die Punktwolke nach Abschnitt 3.5.1 berechnet. Diese Form der Berechnung bietet sich vor allem dann an, wenn in den vorliegenden Daten mit Lücken zu rechnen ist und diese damit überbrückt werden können. Alternativ kann auch eine Alpha-Shape, wie in Abschnitt 3.5.2 dargestellt, als Umriss bestimmt werden (vgl. Abbildung 4.34b). Die Wahl der jeweiligen Methodik ist dabei stark von der Vollständigkeit der Randstruktur des Querschnitts abhängig.



(a) Bestimmtes Flächenpolygon unter Verwendung des Ansatzes der konvexen Hülle (b) Bestimmtes Flächenpolygon unter Verwendung des Ansatzes der Alpha-Shape mit $\alpha = 0,71$

Abb. 4.34: Vergleich der Ergebnisse der Erstellung der Flächenpolygone mittels konvexer Hülle und Alpha-Shape.

Ist die Randstruktur bestimmt, so kann aus diesen nun die Fläche mittels der Gauß'schen Flächenformel bestimmt werden. Für die Qualitätsbetrachtung ist hier die Vollständigkeit der Querschnittsflächenberechnung zu betrachten. Dabei ist zum einen relevant, ob für jedes Untersegment eine Querschnittsfläche berechnet werden konnte. Zum anderen ist hier die Vollständigkeit der Punktwolke zu beachten, da diese, gerade bei der Berechnung mittels konvexer Hülle, direkt die Korrektheit der berechneten Fläche beeinflusst.

4.2.4.5 Varianz-Kovarianzfortpflanzung

Um eine Beurteilung der Qualität der Fertigung treffen zu können, werden zusätzlich auch die Merkmale und Parameter im vorgestellten Mess- und Auswerteprozess näher betrachtet. Für die Messungen selbst können dabei die Genauigkeiten der Strecken- und Winkelmessung verwendet werden. Weitere Einflüsse wurden an dieser Stelle nicht weiter behandelt, eine ausführliche Diskussion dieser findet sich beispielsweise in Kerekes (2023). Weitere Laserscannerspezifische Kalibrierparameter für die Gerätefehler werden an dieser Stelle nicht berücksichtigt, da die Messungen mit dem Trimble X7 durchgeführt wurde, der vor jeder Messung eine interne Selbstkalibrierung durchführt, weshalb das Anbringen von externen Parametern nicht sinnvoll ist.

Da die gemessenen Punktwolke nicht die gemessenen Polarelemente, sondern direkt die kartesischen Koordinaten angibt, ist eine Rückrechnung in die Polarelemente zunächst notwendig, um die Genauigkeit eines einzelnen Messpunktes bestimmen zu können. Anschließend können aus den Polarelementen, sowie den Angaben über die Strecken- und Winkelmessgenauigkeit aus dem Datenblatt des Laserscanners, die Standardabweichungen der kartesischen Koordinaten eines einzelnen Messpunktes bestimmt werden.

Da die Standardabweichungen allerdings pro Standpunkt berechnet sind, müssen diese in einem nächsten Schritt für die benötigten Transformationen zur Registrierung fortgepflanzt werden. Dabei können neben den Genauigkeiten der Punktkoordinaten auch die Genauigkeiten der Transformationsparameter bestimmt werden. Die Genauigkeiten der Transformationsparameter ergeben sich dabei durch die überbestimmte Schätzung dieser. Danach ist für die gesamte Punktwolke eine blockweise besetzte Varianz-Kovarianzmatrix vorhanden, die für die weitere Auswertung verwendet werden kann.

An dieser Stelle muss allerdings erwähnt werden, dass die Berechnung und Verwendung der vollbesetzten Varianz-Kovarianzmatrizen bei großen Objekten nicht mehr ohne Probleme möglich ist, da es im Verlauf der weiteren Auswertung zu Problemen hinsichtlich der Speichergröße der Matrix und der Möglichkeit der Invertierung kommt, da der Arbeitsspeicher des verwendeten Rechners nicht mehr ausreichend war (128 GB RAM).

Für die im Anschluss durchgeführte Hough-Transformation wird zunächst darauf verzichtet, die Varianzen und Kovarianzen für die Segmentierung zu verwenden, da es sich hierbei um eine Grobsegmentierung handelt und die abschließende Schätzung der Geradenparameter mittels einer kleinsten Quadrate Ausgleichung erfolgt. Wichtig ist an dieser Stelle nur, für die segmentierte Punktwolke für jedes Punktcluster eine eigenen Varianz-Kovarianzmatrix aus der Ursprungsmatrix zu erstellen, da diese für die weitere Berechnung benötigt wird. Anschließend erfolgt nun die finale Geradenschätzung. Hierfür stehen zwei verschiedenen Ansätze, je nach Datenverfügbarkeit, zur Verfügung. Im ersten Fall, wenn eine Varianz-Kovarianzmatrix der Punktwolke vorhanden ist, kann eine Ausgleichung nach dem Gauß-Helmert Modell (vgl. Abschnitt 3.2.3.2) erfolgen. Das Ergebnis der Ausgleichung stellt dabei die geschätzten Geradenparameter, sowie die Genauigkeiten dieser dar. Liegen alternativ keine Genauigkeiten der einzelnen Punkte vor, so wird eine Geradenschätzung wie in Abschnitt 3.2.3.4 dargestellt durchgeführt. Da bei diesem Verfahren keine direkten Genauigkeiten für die geschätzten Geradenparameter berechnet werden, wird an dieser Stelle der Eigenwert der geschätzten Gerade für die weitere Gewichtung verwendet. Dabei ist der zugehörige Eigenwert bei längeren Liniensegmenten größer, da hier die Hauptrichtung der Punktwolke sich stärker von den Quersausdehnung der Punktwolke unterscheiden. Durch die daraus resultierenden größeren Unterschiede in den berechneten Eigenwerten kann in diesen Fällen auch von einer zuverlässigeren Schätzung der Geradenparameter ausgegangen werden und die entsprechenden Liniensegmente daher mit den Eigenwerten für die weitere Berechnung gewichtet werden.

Die Genauigkeiten der Geradenschätzung oder alternativ die Eigenwerte der geschätzten Geraden gehen anschließend als Gewichtungsfaktor in die Schnittpunktberechnung ein. Ziel hierbei ist es, Geraden mit höherer Genauigkeit oder alternativ längere Geraden in der Berechnung stärker zu gewichten.

4.2.4.6 Zusammenfassende Darstellung der Schritte des Auswertalgorithmus

Abschließend wird noch einmal der Ablauf des vollständigen Auswertalgorithmus betrachtet. Dieser ist in Abbildung 4.35 dargestellt. Ein Vorteil des hier dargestellten Auswertungsablauf besteht dabei darin, dass eine unvollständige, oder inkorrekte Segmentierung in beispielsweise in der Hough-Transformation, oder auch eine ungünstige Clusterung für die K-Means Clusterung zu Beginn nicht dazu führen muss, dass das Gesamtergebnis der Auswertung nicht zufriedenstellend ist.

Durch die einzelnen durchgeführten Aspekte des entwickelten Auswertalgorithmus besteht daher im Laufe der Auswertung immer wieder die Möglichkeit, das bisherige Ergebnis kontinuierlich zu verbessern und somit eine möglichst gute Repräsentation der Liniensegmente, Schnittpunkte und Querschnittsflächen aus der Punktwolke zu erhalten.

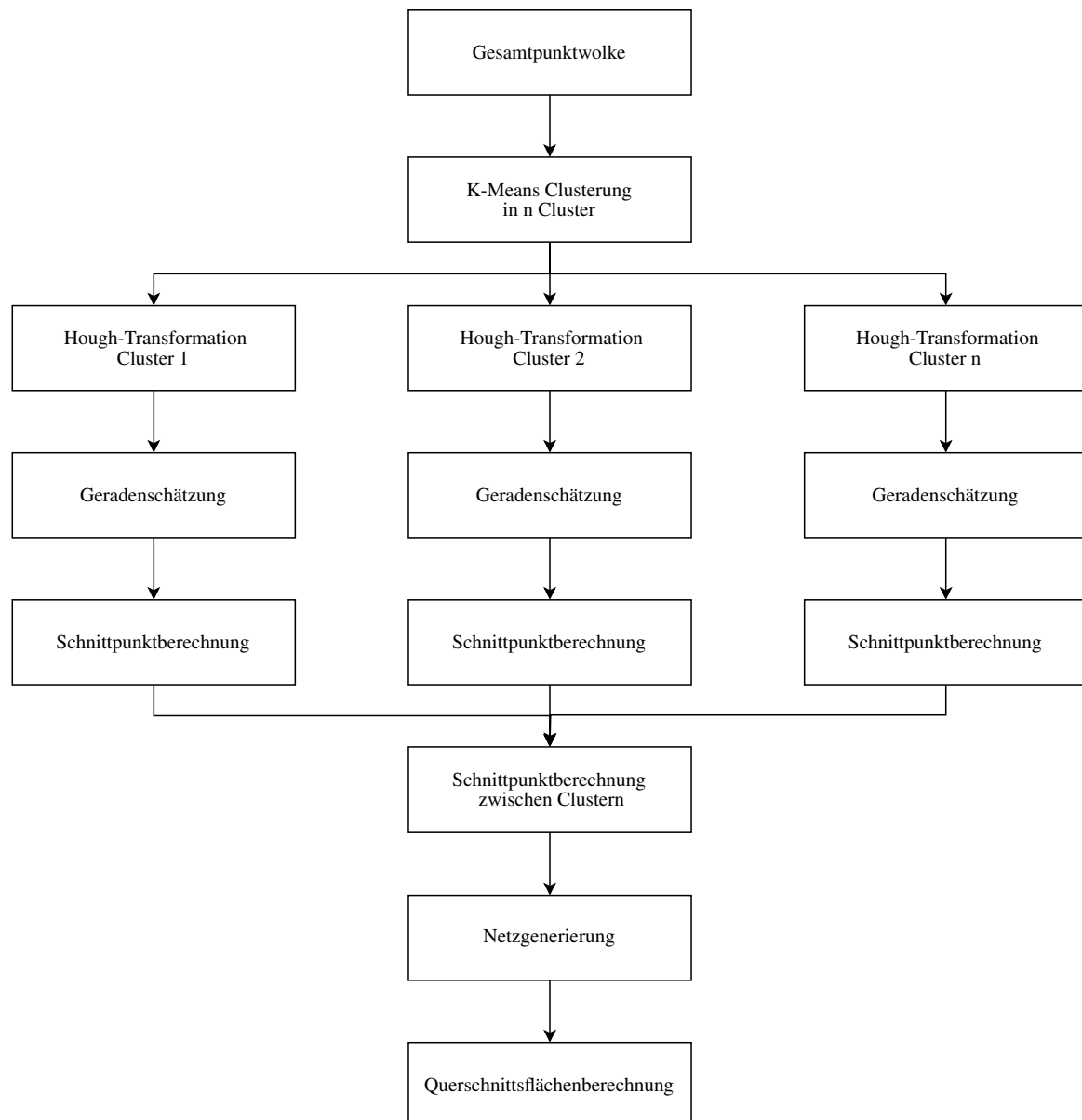


Abb. 4.35: Ablaufdiagramm der einzelnen Schritte des Auswertalgorithmus.

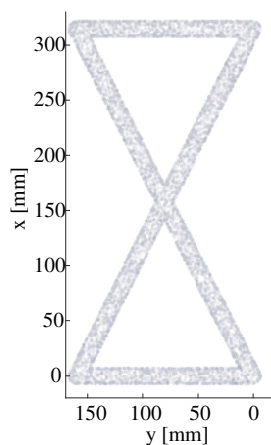
5 Testobjekte und Demonstratoren

Um das in dieser Arbeit entwickelte Qualitätssicherungskonzept evaluieren zu können, stehen verschiedenen Testobjekte und Datensätze zur Verfügung. Diese variieren dabei von Simulationen, über kleine prototypische Testkörper mit geringer Komplexität, bis hin zu realen Bauteilen. Die unterschiedlichen Datensätze ermöglichen dabei die Evaluierung unterschiedlicher Teilaspekte der Messung und Auswertung. Im Folgenden werden die einzelnen Datensätze, sowie die Analyseziele dieser, im Rahmen dieser Arbeit, dargestellt.

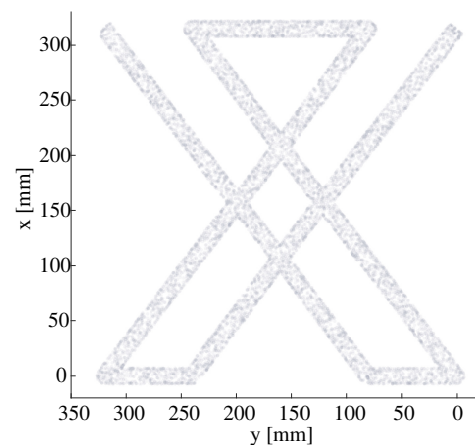
5.1 Simulation

5.1.1 Datensätze

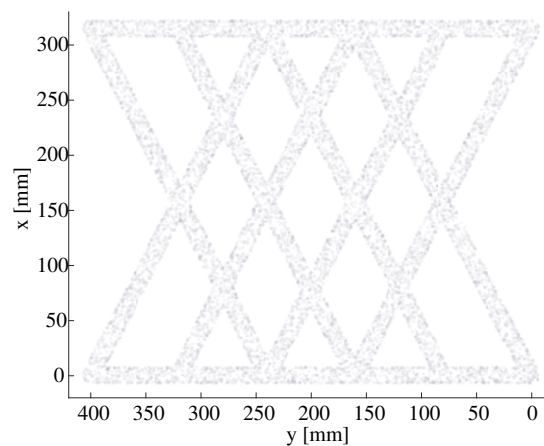
In einem ersten Schritt werden simulierte Datensätze mit unterschiedlichem Komplexitätslevel verwendet. Das Ziel dabei ist es, die Unsicherheiten der Messung von denen der Fertigung trennen zu können. Aus diesem Grund wurden aus der Syntax einer realen Fertigung 3D-Modelle erstellt. Die simulierten Punktwolken sind dabei in Abbildung 5.1 dargestellt.



(a) Testobjekt S1 Simulation



(b) Testobjekt S2 Simulation



(c) Testobjekt S3 Simulation

Abb. 5.1: Darstellung der drei simulierten Testobjekte.

Zur Generierung dieser Datensätze wurden um die einzelnen Fasersegmente Zylinder mit einem Durchmesser von 15 mm konstruiert. In den Überschneidungsbereichen wurden dann die Bereiche entfernt, die im Inneren eines weiteren Zylinders lagen. Abschließend wurde aus den erzeugten 3D-Modellen mittels eines regelmäßigen Gitters eine Punktwolke erzeugt, die für die weitere Verarbeitung verwendet wurde. Die Abtastung der Objekte erfolgte dabei mit jeweils 10 000 Punkten. Dies führt ebenfalls dazu, dass die Punktdichte in den einzelnen Objekten variiert und das Objekt S1, das kleinste, die höchste Punktdichte aufweist, während das Objekt S3, das Größte, die geringste Punktdichte aufweist. Dieser Unterschied in der Punktdichte ist auch in Abbildung 5.1 sichtbar. Innerhalb einer Punktwolke sind die Punktabstände allerdings identisch.

5.1.2 Analyseziel

Mit diesen drei Strukturen können nun unterschiedliche Realisierungen eines Fasernetzes betrachtet werden. Während es sich bei S1 um einen geschlossenen Pfad handelt, ist S2 ein Objekt mit offenem Anfang und Ende. Objekt S3 hingegen stellt in der dargestellten Form keinen Weg dar und kann nur mittels Hilfsbrücken gefertigt werden. Dadurch kann anhand dieser Strukturen die Funktionalität des entwickelten Auswertalgorithmus in allen drei Szenarien untersucht werden. Die Messabweichungen spielen an dieser Stelle keine Rolle.

Eine weitere Möglichkeit bei simulierten Daten stellt die Möglichkeit der Variation der Punktdichte dar. Dadurch kann der Einfluss dieser auf die Ergebnisse betrachtet werden und Aufschluss über eine mögliche Verbesserung des Messaufbaus liefern. Ein weiterer Vorteil dieses Datensatzes stellt die vorhandene Soll-Geometrie dar. Da die Punktwolke aus der Syntax generiert wurde, sind die realen Schnittpunktkoordinaten fehlerfrei bekannt. Im Zuge der Evaluierung kann die Vollständigkeit, Korrektheit und Genauigkeit an Kontrollpunkt 2 evaluiert werden (vgl. Tabelle 4.6). Diese Möglichkeit der Evaluierung besteht zudem für die Querschnittsflächen. Da der Radius der Zylinder bekannt ist, ist auch die Form und Fläche der Soll-Querschnitte bekannt. Somit können die simulierten Daten sehr gut für die Evaluierung des entwickelten Algorithmus verwendet werden.

5.2 Einfache Strukturen mit Referenzmessungen

5.2.1 Datensätze

Um in einem nächsten Schritt die Erfahrungen aus der Simulation auf die Realität übertragen zu können, werden nun zwei Datensätze von geringer Komplexität betrachtet. Diese sind in Abbildung 5.2 dargestellt.

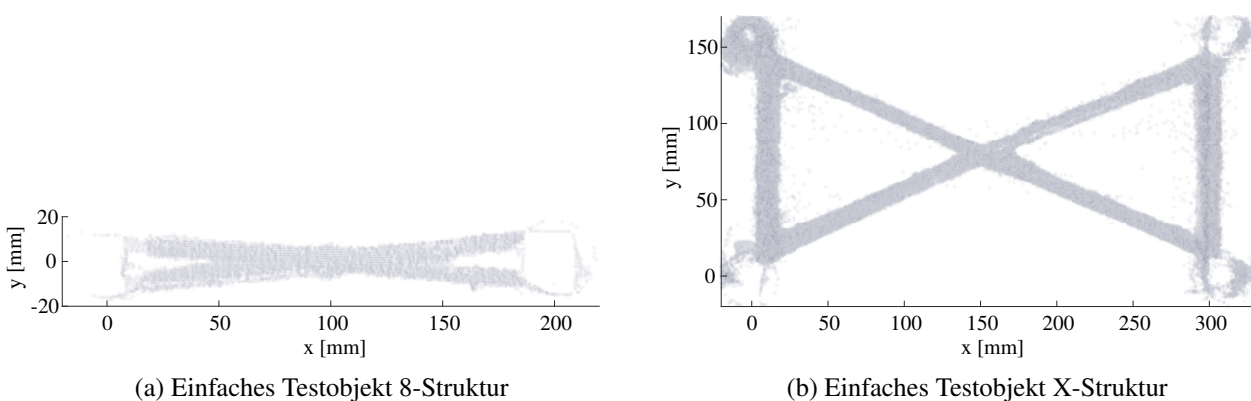
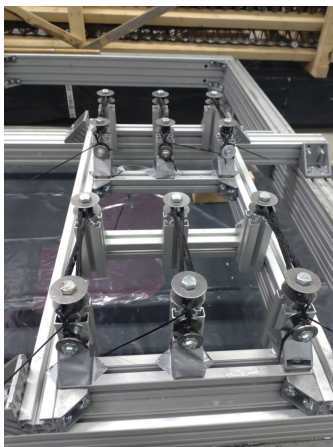


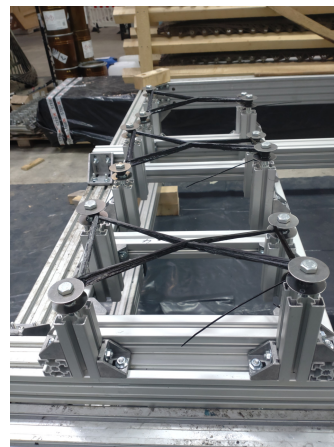
Abb. 5.2: Darstellung der einfachen Testobjekte

Für die hier vorliegenden Strukturen sind dabei neben den TLS Messungen auch zusätzliche Referenzmessungen mit einem industriellen Messsystem, dem ATOS Triple Scansystem, durchgeführt worden. Diese Datensätze wurden außerdem bereits für die Evaluierung der Messungen in Abschnitt 4.2.1.5 verwendet. Bei den hier betrachteten Strukturen handelt es sich zum einen um eine Struktur in Form einer Acht, sowie um eine X-Struktur (vgl. Abbildung 5.2). Die Fertigung erfolgte dabei in zwei Chargen mit je sechs Elementen pro Typ. Es stehen somit insgesamt je 12 Objekte zur Verfügung. Die X-Struktur entspricht dabei geometrisch, dem simulierten Datensatz S1.

Für die Fertigung der Testobjekte wurde eine 48k Kohlenstofffaser mit einem Zwei- bzw. Dreikomponentenharz mit einer Tropfzeit von etwa zwei Stunden, je nach Umgebungsbedingung, verwendet. Die Imprägnierung der Kohlenstofffasern erfolgte dabei direkt in der Fertigung. Die gefertigten Elemente im Fertigungsumfeld sind in Abbildung 5.3 dargestellt. Für die Fertigung selbst waren die Fertigungsrahmen fest montiert und zuvor durch den Roboter eingemessen und positioniert. Der Fertigungsroboter hatte für die Fertigung selbst sechs Freiheitsgrade und war zusätzlich auf einer Lineareinheit montiert, die parallel zu den Fertigungsrahmen verläuft und somit die Erreichbarkeit der Rahmen gewährleistet. Die Fertigung erfolgt dabei in Kooperation mit dem Institut für Flugzeugbau (IFB) der Universität Stuttgart.



(a) Fertigung des 8-Elements



(b) Fertigung des X-Elements

Abb. 5.3: Fertigungsrahmen der Testobjekte im Fertigungsumfeld.

Die Testobjekte wurden im Anschluss mindestens 24 bis 48 Stunden luftgetrocknet, bevor die Vermessung durchgeführt wurde. Die Messungen wurden in speziell für diese Strukturen gefertigten Messhalterungen durchgeführt. Die Messhalterungen wurden dabei in der institutseigenen Präzisionswerkstatt gefertigt und ermöglichen eine Zwei- bzw. Dreipunktaufhängung der Testkörper. Diese Methode der Befestigung bietet hier den Vorteil etwaige Abweichung der Geometrie ausgleichen zu können, aber trotzdem noch eine Vergleichbarkeit der einzelnen Testkörper zu ermöglichen. Die Messrahmen können zudem zur Registrierung der einzelnen Objekte zueinander, sowie der Referenzmessungen verwendet werden. Die Messungen wurden hierbei nach dem in Abschnitt 4.2.1.4 dargestellten Ablauf durchgeführt.

5.2.2 Analyseziel

Das Analyseziel dieser Datensätze ist es den Einfluss der Messgenauigkeit auf die Qualität der geschätzten Geometrie untersuchen zu können. Beide Testobjekte stellen dabei einfache geometrische Strukturen dar, die dadurch sehr gut geeignet sind, um sowohl die Qualität der Messung als auch die Qualität des Algorithmus zu überprüfen und hinsichtlich der in den Tabellen 4.3 und 4.6 dargestellten Qualitätsparametern auszuwerten. Das 8-Element ist hierbei besonders für die Betrachtung der Querschnitte geeignet, da es durch die einfache Struktur nicht zu Verdeckungen durch das Testobjekt selbst kommt und somit eine vollständige Erfassung gewährleistet.

werden kann. Zusätzlich ist dieses Testobjekt sehr gut dazu geeignet, die Trennbarkeit der einzelnen Faserstränge zu untersuchen. Dafür eignet sich die Kreuzung, die hier durch die zwei Faserstränge an zwei Ankern entsteht, sehr gut.

Neben den Möglichkeiten durch die Struktur selbst, bieten die vorhandenen Referenzmessungen die Möglichkeit die vorhandenen Ergebnisse beider gemessenen Datensätze zu vergleichen, und somit Rückschlüsse über die Genauigkeit und Korrektheit der Messergebnisse treffen zu können. Da zusätzlich einzelnen Komponenten für die TLS-Messungen mit und ohne Scanningspray gemessen wurden, ergibt sich auch hier die Möglichkeit des Vergleichs hinsichtlich der Vollständigkeit, Korrektheit und Genauigkeit der Ergebnisse.

5.3 Strukturen unterschiedlicher Komplexität mit Messungen im Fertigungsrahmen

5.3.1 Datensätze

Um unterschiedliche Grade an Komplexität der Testelemente betrachten zu können, werden die drei Testobjekte, deren Geometrien bereits für den simulierten Datensatz verwendet wurden, mit realen Daten untersucht. Die Geometrie der Testobjekte entspricht daher der Geometrie der Datensätze aus 5.1. Die Fertigung der Testkörper erfolgte dabei im Rahmen von Gil Pérez et al. (2022). Eine Veröffentlichung der verfügbaren Fertigungsdaten findet sich in Gil Pérez et al. (2023b). Für jede der unterschiedlichen Strukturen standen dabei 10 Testkörper zu Verfügung, die für die Auswertung betrachtet werden können.

Für die Fertigung dieser Testobjekte wurden ebenfalls 48k Kohlenstofffasern verwendet. Im Unterschied zur vorherigen Fertigung wurden allerdings vorimprägnierte Fasern verwendet. Die Fertigung erfolgte auch hier mittels eines sechs-achsigen Industrieroboters. Die Fertigungsrahmen waren nun allerdings auf einem zweiachsigen Drehtisch montiert. Durch dessen Kippung war es möglich, je 10 Testobjekte der unterschiedlichen Geometrien in einer Kipptischstellung produzieren zu können. Die Testobjekte wurden anschließend über Nacht im Ofen getrocknet. In Abbildung 5.4 ist der Fertigungsaufbau für die betrachteten Testkörper dargestellt.



Abb. 5.4: Fertigungssetup der Testdatensätze unterschiedlicher Komplexität. Dabei sind die montierten Fertigungsrahmen auf dem Kipptisch, sowie die Ausrichtung des Roboters zum Kipptisch dargestellt (Gil Pérez et al. 2022).

Die Messungen wurden anschließend im Fertigungsrahmen durchgeführt. Die Rahmen wurden dazu mit ihren Seitenkanten auf einem stabilen Untergrund fixiert. Dadurch war eine Messung der Vorder- und Rückseite der Testobjekte möglich. Zusätzlich zu den TLS-Messungen wurden auch tachymetrische Messungen durchgeführt, um die gemessenen Punktwolken, sowie die Fertigungsdaten in ein gemeinsames Koordinatensystem überführen

zu können. In jedem Fertigungsrahmen waren dabei zwei (S2 und S3) oder vier (S1) Testobjekte montiert (vgl. Abbildung 5.5). Dadurch wurden auch die Messungen für mehrere Testobjekte parallel durchgeführt. Um trotzdem eine vollständige Erfassung der Bauteile gewährleisten zu können, wurden um das Testobjekt verteilt vier Standpunkte mit je zwei unterschiedlichen Instrumentenhöhen gemessen. Dadurch konnte eine vollständige Erfassung der Testobjekte realisiert werden.



Abb. 5.5: Messaufbau für die Testdatensätze unterschiedlicher Komplexität für die TLS-Messungen, sowie die tachymetrischen Messungen. Die Abbildung zeigt dabei den Aufbau für das Testobjekt S1.

5.3.2 Analyseziel

Ziel dieses Datensatzes ist es unterschiedliche Komplexitäten verschiedener Strukturen zu untersuchen und dabei auch die realen Fertigungsbedingungen zu berücksichtigen. Mit einer steigenden Komplexität kommt es bei der Messung der Testobjekte immer häufiger auch dazu, dass Teile des Testobjektes durch das Testobjekt selbst verdeckt werden. Dieser Einfluss soll hier mit berücksichtigt werden. Des Weiteren bietet die Messung im Fertigungsrahmen die Möglichkeit mehrere Testobjekte gleichzeitig scannen zu können und somit mehrere Testobjekte in kürzerer Zeit aufnehmen zu können. Dies ist vor allem dann relevant, wenn viele Prototypen in einer kurzen Zeitspanne beurteilt werden sollen. Da für diese Datensätze keine geometrische Referenz zur Verfügung steht, kann ein Vergleich der Ergebnisse nur zwischen den einzelnen Testobjekten erfolgen. Dabei muss allerdings die Trennung zwischen Abweichungen aus der Fertigung, also einer Variation der realen Geometrie der Testobjekte, und Abweichungen aus der Messung und Auswertung, einer Abweichung der Geometrie durch, beispielsweise eine unvollständige Messung, berücksichtigt werden. Die Analyse findet auch hier an Kontrollpunkt 2, anhand der in Tabelle 4.6 vorgestellten Qualitätsparameter für die Messung und Auswertung statt.

5.4 Messungen im Fertigungsprozess

5.4.1 Datensätze

Um neben einer abschließenden Qualitätssicherung auch die Geometrie der Bauteile im Fertigungsprozess betrachten zu können, werden Messungen während der Fertigung durchgeführt. Dabei werden Strukturen unterschiedlicher Komplexität betrachtet, mit einem besonderen Augenmerk auf der Trennung von Schnittpunkten, sowie der Detektion von wahren Schnittpunkten, Schnittpunkten, an denen eine Faser-Faser Interaktion stattfindet. Die betrachteten Strukturen weisen dabei eine Höhe von 40 cm bis zu 1 m auf. Die Fertigung wurde mit einem

oder zwei Robotern durchgeführt. Insgesamt wurden von dieser Art 32 Testobjekte in insgesamt 121 Epochen gemessen. Unter einer Epoche werden dabei die einzelnen Messzeitpunkte während der Fertigung verstanden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde immer dann eine Messung durchgeführt, nachdem durch die Verbindung zweier Ankerpunkte ein oder mehrere neue Schnittpunkte entstanden sind. Für diese Arbeit werden dabei drei unterschiedliche Testobjekte ausgewählt (vgl. Abbildung 5.7 - 5.9). Bei diesen handelt es sich zum einen um zwei aufrechte Strukturen in fünf Epochen. Der Unterschied zwischen den beiden ergibt sich dabei in der verwendeten Syntax für die Fertigung, da das Testobjekt einmal von außen nach innen (neu hinzukommende Ankerpunkte liegen näher am Zentrum des Objektes, das Objekt wird von außen nach innen aufgebaut) und einmal von innen nach außen (neu hinzukommende Ankerpunkte liegen weiter vom Zentrum des Objektes entfernt, das Objekt wird von innen nach außen aufgebaut) gefertigt wurden. Zum anderen wird ein Testobjekt gewählt, das mit zwei Robotern gefertigt wurde, um zusätzlich die Herausforderung bei der Netzwerkgenerierung hinsichtlich der Korrektheit und Vollständigkeit an Kontrollpunkt 2 aufzeigen zu können.

Wie in den vorherigen Abschnitten erfolgt die Fertigung auch hier unter der Verwendung einer 48k Kohlenstofffaser, sowie eines Epoxidharz mit einem Faser-Volumen-Gehalt von 50:50. Wie auch bei der Fertigung in Abschnitt 5.3 wurden vorimprägnierte Fasern für die Fertigung verwendet. Eine besondere Herausforderung bei der Fertigung war hierbei, dass die Pfadplanung auch die für die Vermessung notwendigen Zielzeichen berücksichtigen musste, um Kollisionen zu vermeiden. Zusätzlich wurde die Fertigungszeit durch die epochenweisen Messungen verlängert, wodurch die Fasern während des gesamten Fertigungsprozesses hinsichtlich ihrer Feuchtigkeit beobachtet werden mussten. Der Mess- und Fertigungsaufbau ist in Abbildung 5.6 dargestellt. Der Fertigungsrahmen war dabei auf einem horizontal ausgerichteten Dreh- und Kipptisch montiert. Dieser Fertigungstisch wurde während der Fertigung rotiert, um die Erreichbarkeit aller Ankerpunkte zu gewährleisten.

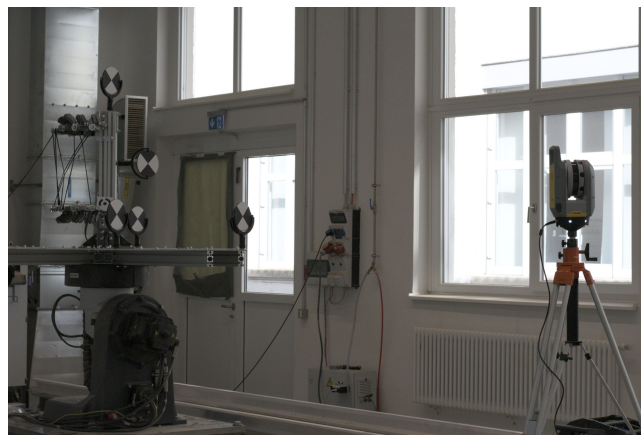
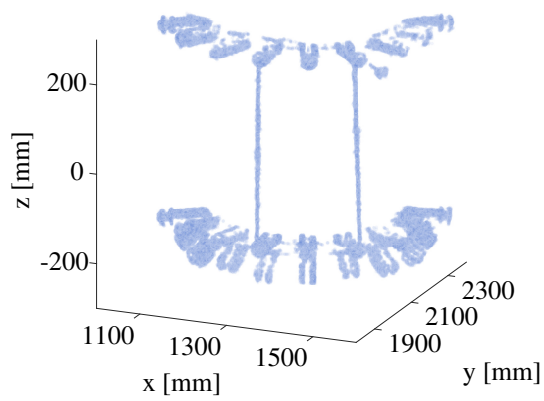
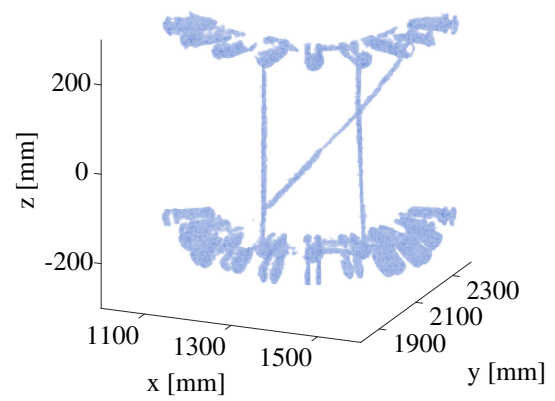


Abb. 5.6: Mess- und Fertigungsaufbau für die Testdatensätze mit Messungen in der Fertigung.

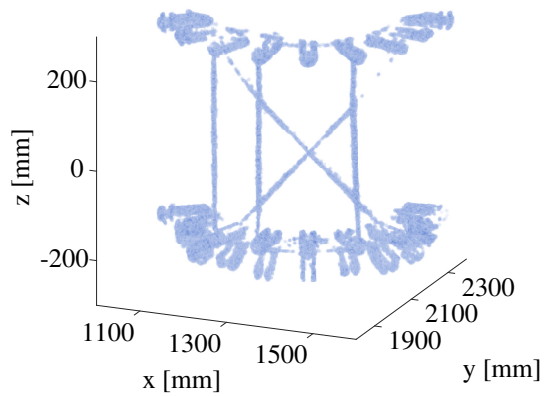
Wie bereits erwähnt, wurden die Messungen hier epochenweise in der Fertigung durchgeführt. Dabei wurden in jeder Epoche drei bis vier Standpunkte gemessen. Da die Objekte auf einem Drehtisch montiert waren, war es nur auf diesem möglich, die Zielzeichen zu montieren. Dadurch war die Verteilung dieser nicht ideal. Trotzdem konnten mittlere Abweichungen bei der Registrierung im Bereich von unter 0,5 mm erreicht werden. Da die Position des Drehtisches in jeder Messepoche unterschiedlich war, änderten sich auch die für die Messung verwendeten Standpunkte, da diese an die äußeren Gegebenheiten angepasst werden mussten und nicht immer die ideale Konfiguration möglich war. Eine besondere Herausforderung waren dabei die Messungen mit zwei Robotern, da in diesem Fall die Wahl der möglichen Standpunkten noch stärker eingegrenzt wurde. In den Abbildungen 5.7 - 5.9 sind nun die Scans der in dieser Arbeit verwendeten Messepochen dargestellt. Die Fertigung wurde dabei immer nach der Entstehung neuer Schnittpunkte bis zum nächsten Ankerpunkt fortgesetzt und anschließend für die Durchführung der Messungen pausiert. Bei der Betrachtung der Punktwolken zeigt sich auch, dass die entstehenden Schnittpunkte zum einen deutlich dichter beieinander liegen und zum anderen die Anzahl und Lage der Schnittpunkte auch optisch nicht mehr eindeutig bestimmbar sind. Auch wird offensichtlich, dass vor allem in den späteren Epochen eine vollständige Erfassung aller Segmente nicht immer möglich ist.



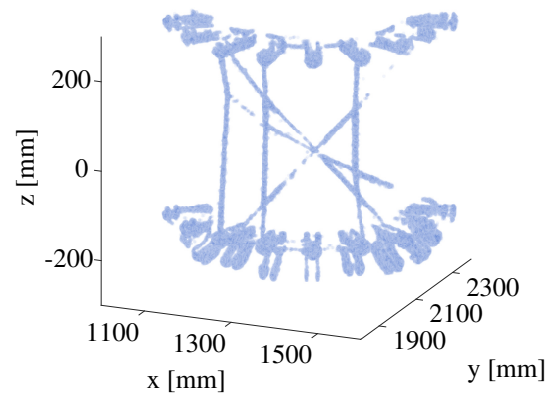
(a) Epoche 1



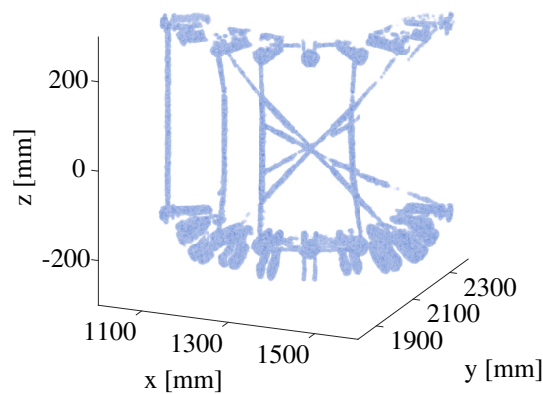
(b) Epoche 2



(c) Epoche 3



(d) Epoche 4



(e) Epoche 5

Abb. 5.7: Darstellung der Punktwolken für das Testobjekt 1 in der Fertigung. Dieses Objekt wurde von innen nach außen mit einem Roboter gefertigt. Dies bedeutet, dass neu hinzukommende Ankerpunkte weiter vom Zentrum des Objektes entfernt liegen.

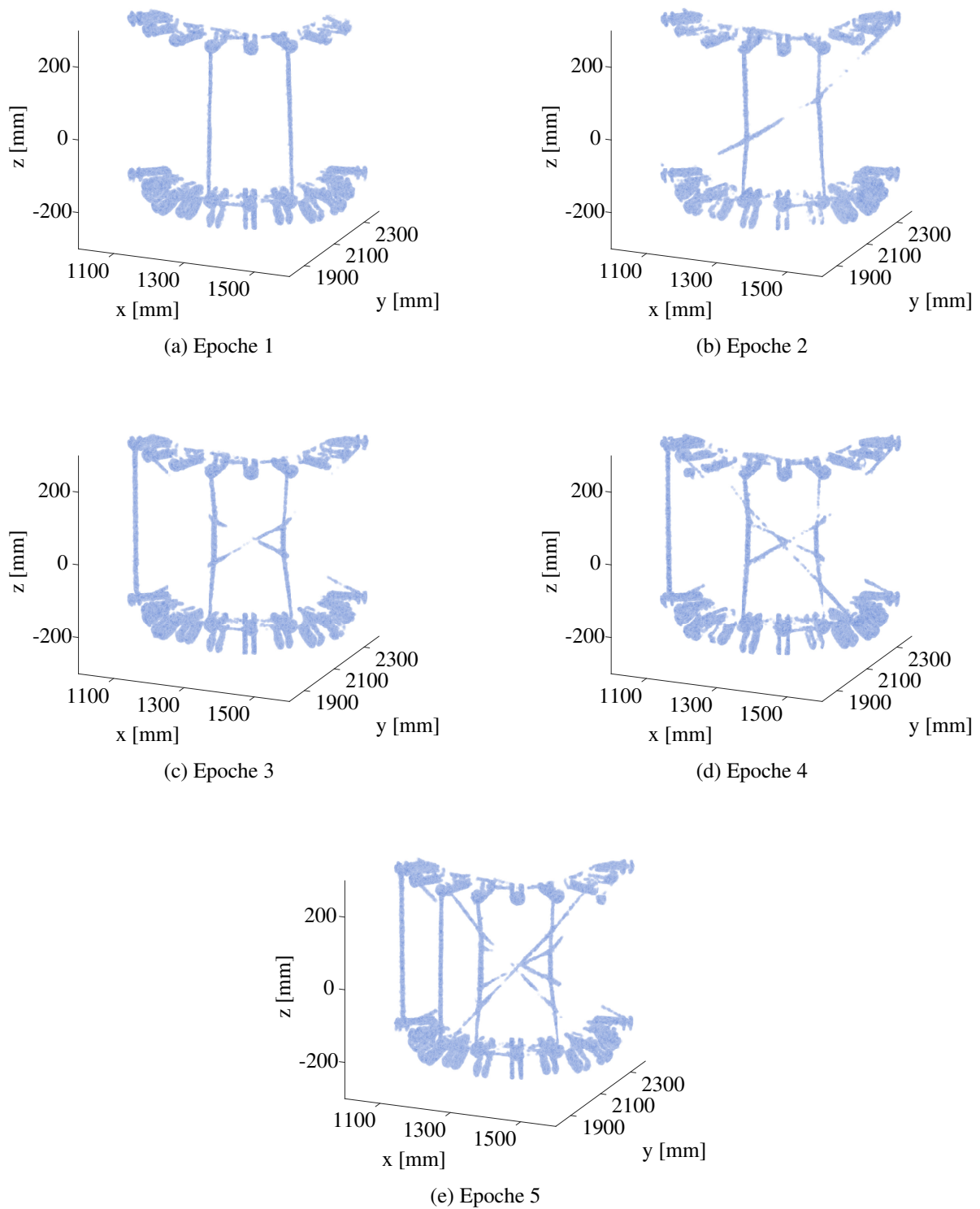


Abb. 5.8: Darstellung der Punktwolken für das Testobjekt 2 in der Fertigung. Dieses Objekt wurde von außen nach innen mit einem Roboter gefertigt. Dies bedeutet, dass neu hinzukommende Ankerpunkte näher am Zentrum des Objektes entfernt liegen.

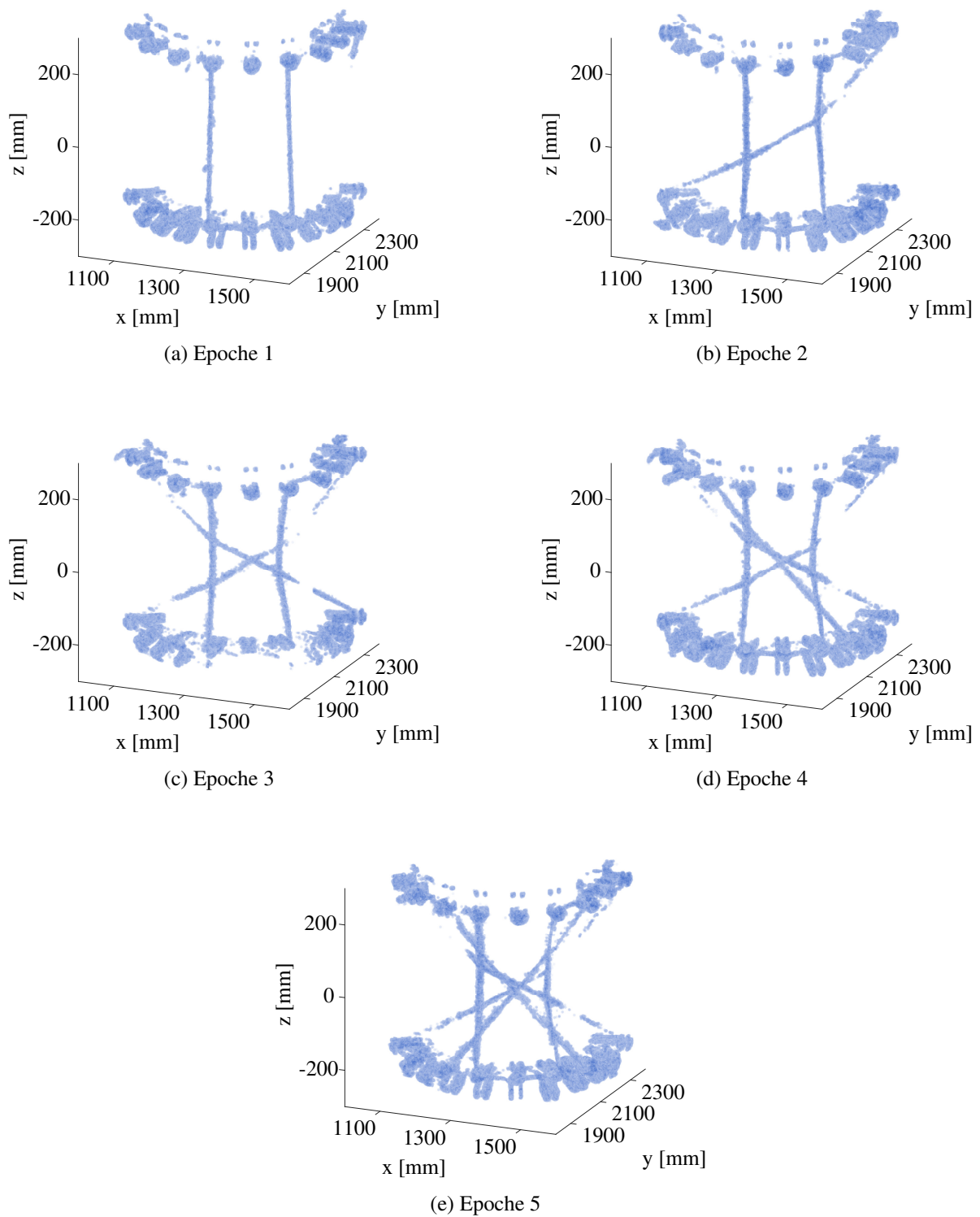


Abb. 5.9: Darstellung der Punktwolken für das Testobjekt 3 in der Fertigung. Dieses Objekt wurde von außen nach innen mit zwei Robotern gefertigt. Dies bedeutet, dass neu hinzukommende Ankerpunkte näher am Zentrum des Objektes entfernt liegen.

5.4.2 Analyseziel

Das Ziel dieser Strukturen ist es, den Mess- und Auswertalgorithmus im Fertigungsprozess zu evaluieren. Die größte Herausforderung dabei ist es, dass die Faserstärke im Vergleich zu den bisher betrachteten Datensätzen, noch einmal deutlich geringer ist. Zusätzlich kommen dazu die bereits erläuterten Probleme für die Messkonfiguration durch die Integration in den Fertigungsprozess. Damit dienen diese Strukturen auch der Untersuchung, inwiefern eine nicht optimale Messkonfiguration einen Einfluss auf die Qualität der Messung hat. Wie bereits im vorherigen Abschnitt diskutiert, zeigen die Punktwolken auch einige lückenhafte Abschnitte. Aus diesem Grund eignen sich die Strukturen sehr gut dafür, den Umgang des Algorithmus mit fehlenden Liniensegmenten bei der Netzgenerierung zu betrachten. Ein weiterer wichtiger Punkt für die Untersuchung dieses Datensatzes ist die Auswertung der Schnittpunkte. War die Anzahl dieser bei den vorherigen Testobjekten immer klar und auch aus der Planung bekannt, ist dies nun nicht mehr zwingend der Fall. Durch auftretende Deformationen in der Fertigung kommt es dazu, dass sich nicht mehr alle Liniensegmente im Zentrum des Testobjektes schneiden und damit weitere Schnittpunkte in geringem Abstand zu diesen entstehen. Aus diesem Grund ist hier auch die Trennbarkeit der einzelnen Schnittpunkte von großem Interesse. Der letzte Punkt, der anhand dieser Datensätze betrachtet wird, ist die Feststellung, ob es sich bei einem Schnittpunkt, um einen realen Schnittpunkt im Sinne der Faser-Faser Interaktion handelt, und dieser Schnittpunkt somit zur Tragfähigkeit der Struktur beiträgt, oder ob zwei Faserstränge stattdessen lose übereinander liegen. Die Qualitätsbeurteilung findet auch hier am Kontrollpunkt 2 statt. Da die Messung allerdings in der Fertigung stattfindet, wird dieser insgesamt fünfmal betrachtet. Die Evaluierung erfolgt auch hier hinsichtlich der Vollständigkeit und Korrektheit anhand der in Tabelle 4.6 dargestellten Qualitätsparameter.

5.5 Demonstrator - Hybrid Flax Pavillion

5.5.1 Datensatz

Als letzter Datensatz wird eine Bauteilkomponente des Hybrid-Flax Pavillon, der für die Landesgartenschau 2024 in Wangen im Allgäu gefertigt wurde, verwendet (Zechmeister et al. 2025). Im Unterschied zu den bisherigen Testobjekten handelt es sich also um ein Bauteil, dass für eine weitere Konstruktion verwendet wurde. In Abbildung 5.10 ist eine Innenansicht des final gefertigten Pavillons dargestellt. Als Testobjekt in dieser Arbeit dient dabei eines der hier dargestellten Faserbauteile.

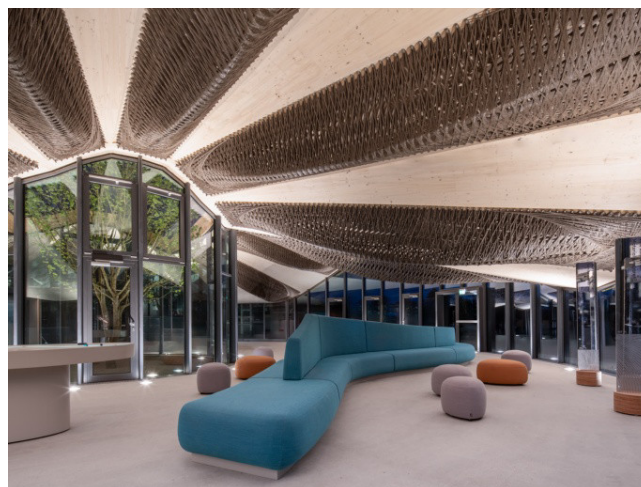


Abb. 5.10: Innenansicht des Hybrid Flax Pavillon mit Sicht auf die Naturfaserkomponenten ©ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart (2024).

Die einzelnen Faserbauteile haben dabei eine Länge von 8,6 m, wodurch sich das Testobjekt in der Größe deutlich von den bisherigen Testobjekten unterscheidet. Die Besonderheit der hier betrachteten Struktur liegt in der gemeinsamen Verwendung der beiden Materialien Naturfasern und Holz. Durch die hybride Struktur ist die Rahmenstruktur auf der zur Komponente gehörenden Holzplatte angebracht. Daher gilt es zu beachten, dass nicht alle Teile des Objektes im Sichtfeld des Laserscanners lagen.

Wie bereits eingangs erwähnt, handelt es sich bei der hier betrachteten Struktur um eine hybride Struktur mit einer Kombination aus Naturfasern und Holz. Bei der Durchführung der Messungen war das Objekt, in einem Prüfstand für einen Belastungstest, in einer Höhe von etwa 4 m montiert. Dabei zeigte die Faserseite des Bauteils nach unten. Dadurch war es möglich, die Faserkomponente vollständig mittels TLS zu erfassen.



Abb. 5.11: Punktwolke des Testobjektes des Hybrid Flax Pavillon.

Durch die gestiegen Objektgröße waren bei der Messung im Vergleich zu den kleineren Testobjekten auch mehr Standpunkte notwendig. Die Messanordnung ist in Abbildung 5.12 dargestellt. Es wurden zwölf Standpunkte gemessen, um das Objekt vollständig zu erfassen. An dieser Stelle muss allerdings erwähnt werden, dass sich vollständig dabei auf die äußeren Seiten des Bauteils bezieht. Da die Struktur eine geschlossenen Form aufweist, ist die Sicht im Inneren eher schlecht und nur unter größeren Einfallswinkeln möglich. Durch die dadurch entstehende Punktverteilung für die einzelnen Fasersegmente, ist davon auszugehen, dass es bei der Querschnittsflächenberechnung zu Problemen kommen kann. Auch bei der Schätzung der Geraden ist eine Verschiebung der geschätzten Faserachse zur realen Faserachse zu erwarten.

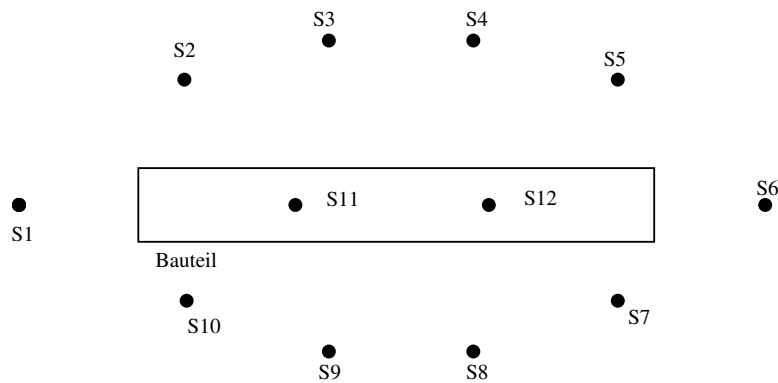


Abb. 5.12: Standpunkte für die Messungen des Demonstratorbauteils

5.5.2 Analyseziel

Das Analyseziel dieser Struktur ist es, das entwickelte Mess- und Auswertekonzept auch auf größere, reale, Bauteile zu übertragen. Da sich außerdem für diesen Testkörper das Material, von dem der verwendeten Testkörpern unterscheidet, kann die Anwendung für ein abweichendes Material untersucht werden. Interessant ist bei der Betrachtung vor allem, wie sich der Algorithmus bei der Verwendung von deutlich größeren Punktwolken verhält und ob die Qualität der Ergebnisse durch die Größe des Bauteils beeinflusst wird. Damit stellt dieses Testobjekt die Möglichkeit eines finalen Praxistests des entwickelten Mess- und Auswerteprozess dar. Die Qualitätsbetrachtung wird für dieses Bauteil hinsichtlich der Vollständigkeit und Korrektheit der segmentierten Liniensegmente und Schnittpunkte durchgeführt.

6 Analyse der Ergebnisse

Im Folgenden wird nun das in Kapitel 4 dargestellte Qualitätssicherungskonzept auf die in Kapitel 5 vorgestellten Datensätze angewandt. Bei der Evaluierung der Ergebnisse liegt der Fokus dabei auf der Vollständigkeit der erfassten Geometrie, sowie der daraus bestimmten geometrischen Elemente, wie Schnittpunkten und Liniensegmenten, sowie auf deren Korrektheit. Außerdem ist auch die Wiederholbarkeit und die Genauigkeit der bestimmten geometrischen Elemente von zentraler Bedeutung. Zusätzlich werden, soweit vorhanden, die Ergebnisse, mit denen der Referenzdatensätze verglichen. Die für die Auswertungen verwendeten Stellgrößen des Algorithmus sind in Tabelle 6.1 dargestellt.

Tab. 6.1: Gewählte Werte der Stellgrößen für die durchgeführten Auswertungen.

	Abschnitt 6.1			Abschnitt 6.2			Abschnitt 6.3			Abschnitt 6.4	Abschnitt 6.5
	S1 SIM	S2 SIM	S3 SIM	8-Element eine Linie	8-Element zwei Linien	X-Element	S1	S2	S3	Fertigung	Demonstrator
Anzahl K-Means Cluster	5	5	12	1	1	5	5	5	11	10	500
Schrittweite Hough-Transformation	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Minimaler Wert der Akkumulatorzelle	50	50	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Maximale Linienanzahl	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Linienstärke [mm]	15	15	15	25	10	20	20	20	10	20	
Differenzkriterium [mm]	35	35	35	15	10	35	35	35	35	10	35
Distanzkriterium [mm]	15	15	15	10	10	15	15	15	15	10	15
Abstand zum Schnittpunkt [mm]	20	20	10	10	15	20	20	20	20	10	20

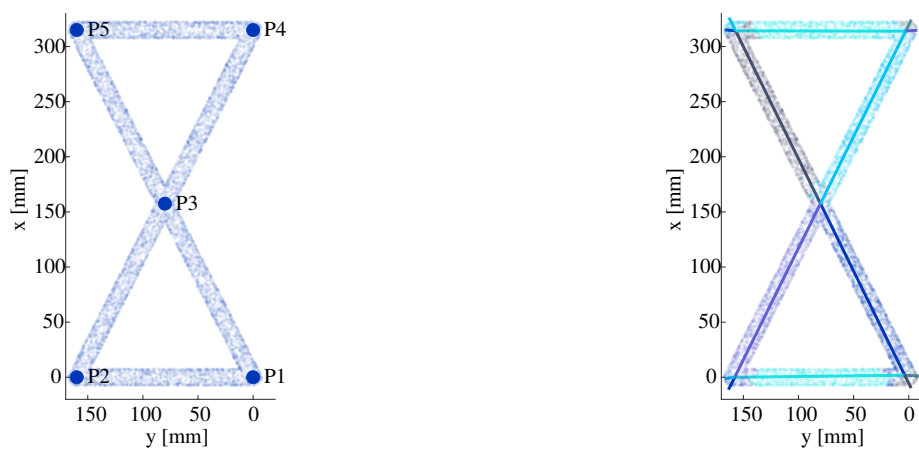
6.1 Simulierte Datensätze

Bei den simulierten Datensätzen können zunächst die bestimmten Schnittpunktkoordinaten des Auswertalgorithmus mit den fehlerfreien Soll-Koordinaten verglichen werden. Dabei wird sowohl die Abweichung entlang der einzelnen Koordinatenachsen, sowie die 3D-Abweichung der Schnittpunktkoordinaten betrachtet. Die Abweichungen für die drei simulierten Datensätze sind in den Tabellen 6.2 - 6.4 dargestellt. Um zusätzlich die Abweichungen räumlich am Objekt einzuordnen sind die Objekte mit nummerierten Schnittpunkten sowie die geschätzten Liniensegmente und die zugeordneten Punkte der Punktwolke in Abbildung 6.1 - 6.3 dargestellt. Da zum aktuellen Zeitpunkt keine Grenzwerte für die Bestimmung der Schnittpunktkoordinaten vorhanden sind, ist eine abschließende Qualitätsbeurteilung dieser nicht möglich und es kann nur das Ziel der Minimierung betrachtet werden.

6.1.1 Simuliertes Testobjekt S1

Betrachten man das Bauteil S1, so zeigt sich, dass hinsichtlich der Vollständigkeit der Segmentierung, alle Liniensegmente und Schnittpunkte detektiert werden konnten. Allerdings zeigt sich auch, dass an den äußeren

Schnittpunkten des Objektes zusätzliche, falsche Linien segmentiert wurden. Betrachtet man nun zusätzlich die Lage der geschätzten Schnittpunkte (vgl. Tabelle 6.2), so zeigt sich, dass hierbei die Schätzung des Punktes P3 mit einer Abweichung von 0,147 mm das mit Abstand besten Ergebnis aufweist. Dies lässt sich damit erklären, dass die Lage der Schnittpunkte im Objekt, die für die Auswertung relevanten sind, Verbindungen zu mehreren anderen Schnittpunkten haben und somit besser in das Netz integriert sind. Die Schnittpunkte an den Ankerpunkten hingegen lassen sich aus realen Messdaten nur schwer extrahieren, weshalb der Algorithmus an diesen Stellen Schwierigkeiten hat, was sich auch in den Abweichungen der Schnittpunktkoordinaten der Punkte P1, P2, P4 und P5 widerspiegelt. Diesen Schnittpunkten ist dabei auch immer eine nicht korrekte Linie zugeordnet (vgl. Abbildung 6.1b). Die Analyse der Abweichungen an den einzelnen Schnittpunkten zeigt dabei, dass vor allem die z -Koordinate hier die mit Abstand größten Abweichungen aufweist. Betrachtet man zusätzlich zu den Abweichungen der berechneten Schnittpunktkoordinaten auch die Zuordnung der Punkte der Punktwolke zu den segmentierten Liniensegmenten (vgl. Abbildung 6.1) so zeigt sich, dass diese an den Ecken des Objektes ein eigenes Punkcluster bilden, wodurch die Schätzung der zusätzlichen Linien entsteht.



(a) Soll-Koordinaten der Schnittpunkte für die simulierte Punktwolke des Testobjektes S1 (b) Geschätzte Linien und zugeordnete Punktcluster für die simulierte Punktwolke des Testobjektes S1

Abb. 6.1: Ergebnisse des Auswertalgorithmus für die simulierte Punktwolke des Testobjektes S1.

Tab. 6.2: Abweichung der geschätzten Schnittpunktkoordinaten von den Soll-Koordinaten der Schnittpunkte für das Testobjekt S1.

	dx [mm]	dy [mm]	dz [mm]	d_{3D} [mm]
P1	1,842	3,628	7,213	8,282
P2	0,014	-2,149	-7,201	7,515
P3	0,025	0,066	-0,129	0,147
P4	-1,083	2,838	-7,369	7,970
P5	-0,785	-2,999	7,050	7,701

Dieser Effekt ist dabei auf die Erstellungsmethode des simulierten Datensatzes zurückzuführen. Wie in Abschnitt 5.1 dargestellt sind die Punktwolken durch die Verschmelzung einzelner konstruierter Zylinder entstanden. Dadurch kommt es zu stark ausgeprägten Ecken des Objektes. Diese Spitzen werden nun jeweils als einzelnes Punkcluster betrachtet. Da es sich bei diesen segmentierten Punkclustern um sehr kleine Cluster handelt, ist an diesen Stellen auch die Linienschätzung ungenauer, da die Hauptrichtung des Clusters entweder nur sehr

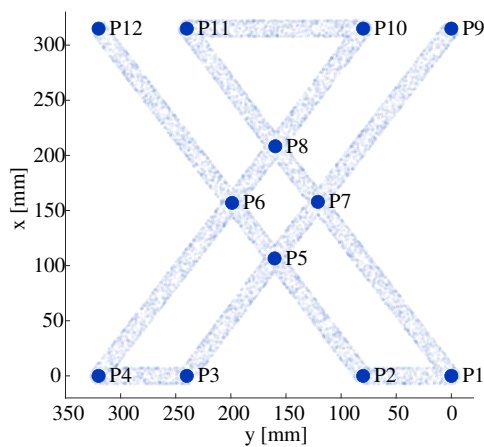
unsicher bestimmt werden kann oder unter Umständen die Hauptrichtung auch nicht mehr mit der eigentlichen Soll-Richtung des Liniensegments übereinstimmt. Dies führt zu den beobachteten Abweichungen der Schnittpunktkoordinaten und erklärt auch die stärkeren Abweichungen in z -Richtung. Sind die Punktkluster entsprechend klein, ergibt sich die Hauptrichtung der Punktwolke und damit die Richtung der geschätzten Geraden in Richtung der z -Achse. Für die Schnittpunktberechnung bedeutet dies, dass die Punkte an die Außenkante des Objektes verschoben werden, was die Abweichung in der z -Koordinate erklärt. Auffällig ist dabei, dass die Abweichung in z -Richtung für die Punkte P1 und P5, sowie P2 und P4 vergleichbar sind. Auch zeigt sich, dass die Abweichungen für alle vier Punkte betragsmäßig vergleichbar sind. Bei der Betrachtung der Soll-Koordinaten, zeigt sich, dass die Punkte P1 und P5 eine z -Koordinaten besitzen, die niedriger ist als die des Punktes P3. Die z -Koordinaten der Punkte P2 und P4 sind höher als die des Punktes P3. Die z -Koordinaten aller vier Punkte werden daher in Richtung der z -Koordinate des Punktes P3 verschoben.

Neben der Geraden- und Schnittpunktschätzung kann nun auch die Topologie der Struktur betrachtet werden. Hierbei zeigt sich, dass der Algorithmus ohne Probleme die richtige Reihenfolge der einzelnen Liniensegmente bestimmen kann, wenn der Anfangspunkt, sowie die Anfangsrichtung vorgegeben wird. Die Bestimmung der Topologie hat hier zusätzlich den Vorteil, dass damit die fehlerhaften Liniensegmente automatisch eliminiert werden, da diese nicht Teil des bestimmten Netzes sind.

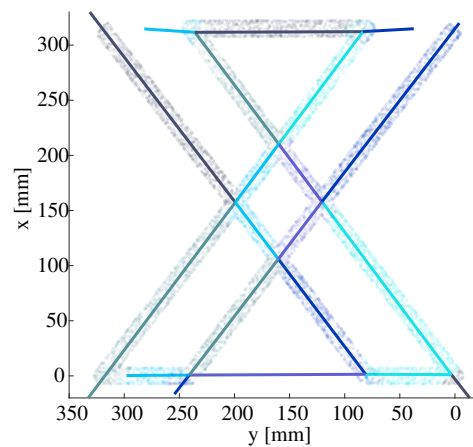
Damit ist die Vollständigkeit für die Schätzung der Liniensegmente mit $\Delta_{\text{Linie}} = 0$ und für die Schätzung der Schnittpunkte mit $\Delta_{\text{SP}} = 0$ erfüllt. Für die Korrektheit der Schnittpunkte dx, dy, dz, d_{3D} ergeben sich die in Tabelle 6.2 dargestellten Abweichungen. Diese liegen damit alle innerhalb des Radius der simulierten Punktwolke. Eine weitere Beurteilung ist aufgrund des fehlenden Grenzwertes an dieser Stelle nicht möglich.

6.1.2 Simuliertes Testobjekt S2

Als nächstes werden die Ergebnisse des Testobjektes S2 aus der simulierten Punktwolke betrachtet. Hierbei fällt zunächst auf, dass die Anzahl der segmentierten Schnittpunkte nicht mit der Anzahl der Soll-Schnittpunkte übereinstimmt und drei Schnittpunkte weniger erkannt wurden. Dafür wurden drei zusätzliche Liniensegmente segmentiert. Werden nun die fehlenden Schnittpunkte genauer betrachtet, so zeigt sich, dass es sich bei den beiden fehlenden Schnittpunkten, um die Punkte P4, P9 und P12 handelt. P4 ist dabei ein Punkt in der Ecke des Objektes. Die Betrachtung der segmentierten Liniensegmente in diesem Bereich zeigt, dass die Verbindungslinie zwischen P3 und P4 zu kurz geschätzt wurde und damit kein Schnittpunkt berechnet werden konnte (vgl. Abbildung 6.2b), da in den segmentierten Daten nur ein Liniensegment im Punkt P4 vorhanden ist.



(a) Soll-Koordinaten der Schnittpunkte für die simulierte Punktwolke des Testobjektes S2



(b) Geschätzte Linien und zugeordnete Punktcluster für die simulierte Punktwolke des Testobjektes S2

Abb. 6.2: Ergebnisse des Auswertalgorithmus für die simulierte Punktwolke des Testobjektes S2.

Schaut man sich neben den geschätzten Liniensegmenten hier auch die zugeordneten Punktwolken an, so zeigt sich, dass an dieser Stelle die Punkte im fehlenden Verbindungsstück, dem zweiten Liniensegment, das dem Punkt P4 zugeordnet werden sollte, zugeordnet wurden. Hier tritt, wie bereits beim vorherigen Datensatz, das Problem in den Überlappungsbereichen der sich schneidenden Zylinder auf, wodurch eine falsche Punktzuordnung durchgeführt wird. Die weiteren Punkte, die nicht detektiert werden konnten, sind die Punkte P9 und P12. Bei diesen handelt es sich allerdings um keinen realen Schnittpunkt, sondern um den Endpunkt des Objektes. Aus diesem Grund ist es hier korrekt, dass der Algorithmus keinen Schnittpunkt detektieren konnte. Auch die zusätzlichen Liniensegmente treten wieder an den bereits bei Testobjekt S1 beobachteten Stellen auf, da hier zusätzliche Punktcluster in den Ecken des Objektes segmentiert werden. Durch die Symmetrie des Objektes führt dies dazu, dass die Punktcluster an P2 und P3 zu einem zusammengeführt werden und dadurch das Liniensegment zwischen diesen Punkten entsteht.

Tab. 6.3: Abweichung der geschätzten Schnittpunktkoordinaten von den Soll-Koordinaten der Schnittpunkte für das Testobjekt S2.

	dx [mm]	dy [mm]	dz [mm]	d_{3D} [mm]
P1	1,134	3,231	2,938	4,512
P2	1,432	0,986	12,482	12,603
P3	0,724	0,975	-9,025	9,106
P4	-	-	-	-
P5	-0,546	-0,115	1,409	1,516
P6	0,407	0,352	0,639	0,835
P7	0,141	-0,416	0,391	0,588
P8	2,049	0,132	0,532	2,121
P9	-	-	-	-
P10	-2,744	3,411	-12,388	13,138
P11	-3,366	-4,118	14,718	15,649
P12	-	-	-	-

Die Analyse der Abweichungen zu den Soll-Schnittpunkten zeigt (vgl. Tabelle 6.3), dass auch hier der Effekt auftritt, dass die Schnittpunkte im Inneren des Testobjektes, P5-P8, deutlich genauer mit Abweichungen von 0,588 mm- 2,121 mm bestimmt werden können. Die Abweichungen der äußeren Schnittpunkte sind dabei mit Werten von teilweise über 10 mm auch noch einmal größer, im Vergleich zu den Abweichungen bei Testobjekt S1. Die Analyse dieser Punkte zeigt dabei auch wieder die bereits diskutierten Probleme in den Ecken des Objektes und den daraus resultierenden falschen Punktzuordnung oder der Schätzung zusätzlicher Liniensegmente wie sie beispielsweise an den Punkten P10 und P11 zu beobachten sind. Über alle Schnittpunkte verteilt, fällt zusätzlich auf, dass die ausschlaggebende Abweichung immer entlang einer Koordinatenachse auftritt. Dieser Effekt ist mit Ausnahme der Punkte P6 und P7 für alle Schnittpunkte zu beobachten. Auffällig ist dabei auch, dass es sich bei den Punkten P6 und P7 um gespiegelte Punkte des symmetrischen Objektes handelt, die sich im Zentrum des Objektes befinden. Dies bestätigt die Vermutung, dass die Geometrie des Testobjektes im Inneren deutlich besser bestimmt werden kann als in den Randbereichen. Der Effekt der vergleichbaren Abweichungen bei gespiegelten Punkten zeigt sich zudem bei den Punktpaaren P5 und P6 sowie P10 und P11.

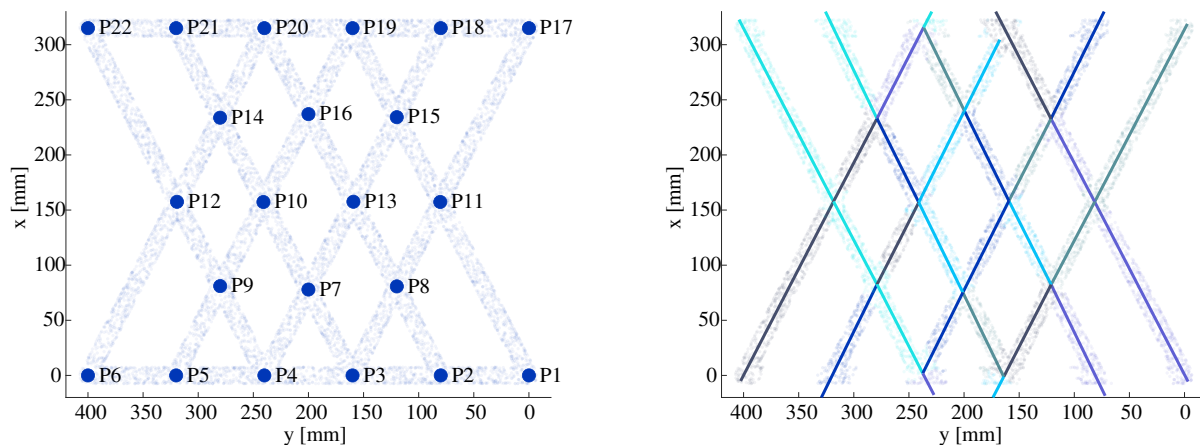
Durch die Bestimmung der Topologie innerhalb des Netzes ist es allerdings auch hier möglich, zum einen die fehlenden Schnittpunkte zu konstruieren, und zum anderen die zusätzlichen Liniensegmente zu eliminieren, wodurch die Vollständigkeit der Segmentierung erreicht werden kann.

Damit ist die Vollständigkeit für die Schätzung der Liniensegmente mit $\Delta_{\text{Linie}} = 0$ und für die Schätzung der

Schnittpunkte mit $\Delta_{SP} = 0$ erfüllt. Für die Korrektheit der Schnittpunkte dx, dy, dz, d_{3D} ergeben sich die in Tabelle 6.3 dargestellten Abweichungen. Auffällig dabei ist, dass die Abweichungen der Punkte P2, P3, P10 und P11 größer als der Radius der simulierten Punktwolke sind und somit als nicht korrekt betrachtet werden können. Eine weitere Beurteilung ist aufgrund des fehlenden Grenzwertes an dieser Stelle nicht möglich.

6.1.3 Simuliertes Testobjekt S3

Der letzte simulierte Datensatz stellt nun mit dem Testobjekt S3 das komplexeste Objekt in dieser Kategorie dar. Auch hier wird zunächst wieder die Vollständigkeit der Segmentierung betrachtet. Dabei zeigt sich, dass hier 9 von 22 Schnittpunkten nicht segmentiert werden können. Betrachtet man erneut die Lage der nicht detektierten Schnittpunkte, so zeigt sich, dass alle in den Außenreihen des Testobjektes liegen und mit Ausnahme von P19 sich in all diesen Schnittpunkten zwei Liniensegmente schneiden sollen. Da eines davon allerdings jeweils das Segment zwischen zwei Außenpunkten ist und diese nicht detektiert werden konnten, ist auch eine Detektion der Schnittpunkte nicht möglich. Dass diese Liniensegmente nicht detektiert werden konnten, lässt sich dadurch erklären, dass es sich hier um sehr kleine Segmente handelt, die zudem wieder an den Ecken des Objektes auftreten. Hier zeigt sich, dass diese Schnittpunkte dann detektiert werden können, wenn mehrere Liniensegmente aus dem Inneren des Objektes zu diesem Schnittpunkt führen. Dies zeigt sich beispielsweise an den Schnittpunkten P3, P4 und P20.



(a) Soll-Koordinaten der Schnittpunkte für die simulierte Punktwolke des Testobjektes S3 (b) Geschätzte Linien und zugeordnete Punktcluster für die simulierte Punktwolke des Testobjektes S3

Abb. 6.3: Ergebnisse des Auswertalgorithmus für die simulierte Punktwolke des Testobjektes S3.

Einzig an Punkt P19 führt dies nicht zum Erfolg. Betrachtet man hier zusätzlich die segmentierten Linien, so zeigt sich, dass das zugehörige Liniensegment aufgrund einer ungünstigen Punktzuordnung für die Liniensegmentierung zu kurz geschätzt wurde (vgl. Abbildung 6.3b). Würde man die Linie entsprechend verlängern, so könnte der Schnittpunkt detektiert werden.

Werden nun wieder die Abweichungen der Schnittpunktkoordinaten zum Soll betrachtet (vgl. Tabelle 6.4), so zeigt sich, dass die Abweichungen für alle Schnittpunkte in einem Bereich von 0,873 mm – 4,195 mm liegen. Hier zeigt sich auch wieder der Effekt, dass die Abweichungen abnehmen, je weiter im Inneren des Objektes sich ein Schnittpunkt befindet. Auch lässt sich hier wieder das symmetrische Verhalten in den Abweichungen, wie bereits beim vorherigen Testobjekt diskutiert, feststellen. So sind beispielsweise die Abweichungen für die Punkte P7 und P19 mit 2,923 mm und 3,121 mm in einer vergleichbaren Größenordnung. Auch haben beide Punkte ihre größte Abweichung in x -Richtung, allerdings mit unterschiedlichen Vorzeichen, dies bestätigt die bisherigen Beobachtungen, dass die Abweichungen im Bauteil symmetrisch auftreten. Hinsichtlich der

Vollständigkeit der Liniensegmente lässt sich bei diesem Datensatz beobachten, dass die kurzen Segmente entlang der y -Achse an den Rändern des Testobjektes nicht detektiert werden können. Außerdem zeigt sich, dass auch hier an den äußeren Rändern des Testobjektes kleine zusätzliche Liniensegmente entstehen, da sich auch hier zusätzliche Punktkluster bilden.

Im Unterschied zu den vorherigen Testobjekten können nun die fehlenden Schnittpunkte und überschüssigen Liniensegmente nicht mittels der Topologie des Netzes direkt konstruiert bzw. eliminiert werden. Der Grund hierfür ist, dass es sich bei der vorliegenden Struktur um eine Struktur handelt, deren Fertigung, und damit der kontinuierliche Faserpfad, nur mittels Hilfsbrücken in der Fertigung realisierbar ist und somit kein Eulerweg für das vorliegende simulierte Testobjekt existiert. Alternativ können die Liniensegmente nur unter Nutzung der Informationen aus dem Soll sortiert werden und dadurch überschüssige Liniensegmente eliminiert werden.

Tab. 6.4: Abweichung der geschätzten Schnittpunktkoordinaten von den Soll-Koordinaten der Schnittpunkte für das Testobjekt S3.

	dx [mm]	dy [mm]	dz [mm]	d_{3D} [mm]
P1	-	-	-	-
P2	-	-	-	-
P3	-1,226	3,987	-0,448	4,195
P4	1,915	-2,545	-1,361	3,464
P5	-	-	-	-
P6	-	-	-	-
P7	-2,698	1,031	0,453	2,923
P8	1,550	1,178	0,395	1,987
P9	1,503	-1,116	0,451	1,926
P10	-0,352	0,224	-0,767	0,873
P11	0,102	1,065	0,988	1,457
P12	0,258	-0,852	1,063	1,387
P13	0,769	0,099	-0,889	1,180
P14	-0,729	-1,144	0,247	1,379
P15	-1,415	1,219	0,427	1,916
P16	3,034	-0,283	0,676	3,121
P17	-	-	-	-
P18	-	-	-	-
P19	-	-	-	-
P20	0,689	-3,308	-0,814	3,476
P21	-	-	-	-
P22	-	-	-	-

Damit ist die Vollständigkeit für die Schätzung der Liniensegmente mit $\Delta_{\text{Linie}} = 10$ und für die Schätzung der Schnittpunkte mit $\Delta_{\text{SP}} = 9$ nicht erfüllt. Für die Korrektheit der Schnittpunkte dx, dy, dz, d_{3D} ergeben sich die in Tabelle 6.2 dargestellten Abweichungen. Diese liegen damit alle innerhalb des Radius der simulierten Punktwolke. Eine weitere Beurteilung ist aufgrund des fehlenden Grenzwertes an dieser Stelle nicht möglich. Es zeigt sich, dass hier der Vorteil der abschließenden Netzgenerierung fehlt, um eine vollständige Segmentierung zu erhalten.

6.1.4 Vergleich der berechneten Querschnittsflächen für simulierte Testdatensätze

Neben der Segmentierung werden nun auch die berechneten Querschnittsflächen für die simulierten Testdatensätze betrachtet. Da die Zylinder mit einem Durchmesser von 15 mm konstruiert wurden liegt die Soll Querschnittsfläche bei $176,714 \text{ mm}^2$. Für den Vergleich der Flächen werden nun beide implementierten Berechnungsvarianten, die konvexe Hülle und die Alpha-Shapes, betrachtet. Als Testobjekt für die Analyse wird hier das simulierte Testobjekt S1 gewählt, da die Anzahl der berechneten Querschnitte hier am geringsten ist und somit eine übersichtlichere Darstellung möglich ist. Die hier beobachteten Effekte lassen sich aber auch bei den anderen simulierten Datensätzen feststellen. In Abbildung B.1 im Anhang sind die berechneten Querschnitte für diese dargestellt.

In Abbildung 6.4 sind die berechneten Querschnittsflächen nun mittels einer Farbcodierung dargestellt. Hierbei zeigt sich visuell, dass sich vor allem an den Anfangs- und Endpunkten der Liniensegmente Abweichungen in den berechneten Querschnittsflächen feststellen lassen, während die Flächen im Verlauf des Liniensegmentes konstant erscheinen und es nur bei der Berechnung mittels Alpha-Shapes einige wenige Ausreißer gibt. Um die Schnittpunkte, dies entspricht den Anfangs- und Endpunkten der Liniensegmente, hingegen lassen sich auch hier durchaus größere Abweichungen in den berechneten Flächen darstellen. Dies liegt daran, dass die Definition der Fläche in diesen Bereichen nicht eindeutig ist, da der Querschnitt hier nicht klar definiert werden kann.

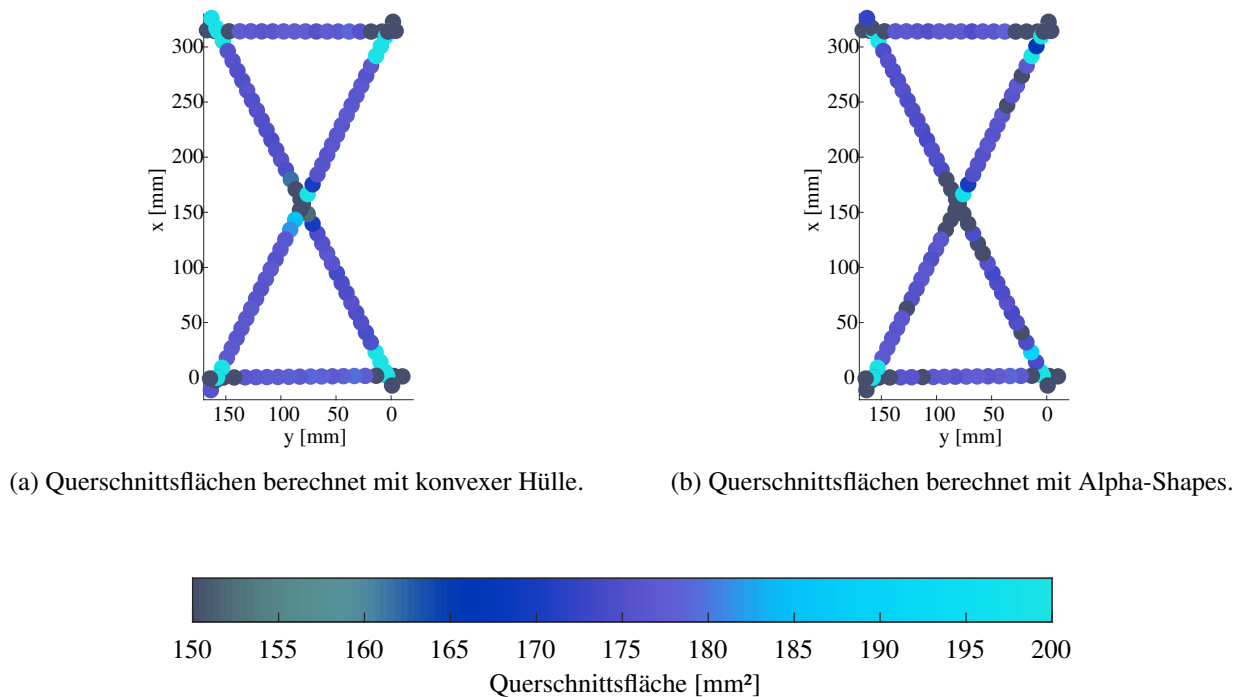


Abb. 6.4: Farblich codierte berechnete Querschnittsflächen für das simulierte Testobjekt S1.

Um die Querschnittsflächen zusätzlich noch im Detail numerisch betrachten zu können, ist in Abbildung 6.5 der Verlauf der Querschnittsflächen über die Liniensegmente dargestellt. Dabei zeigt sich, dass für alle Segmente jeweils die ersten und letzten beiden Werte von den Soll-Flächen abweichen. Diese werden dabei entweder mit dem doppelten Flächeninhalt oder einem Flächeninhalt nahe null geschätzt. Beispiel für dies fehlerhaften Querschnitte finden sich in Abbildung 6.6. In Abbildung 6.6a und 6.6b ist dabei der Fall dargestellt, dass die Flächen zu klein geschätzt werden, während die Abbildungen 6.6c und 6.6d den Fall der zu groß geschätzten Flächen zeigen.

Die Probleme der Querschnittsflächenberechnung in der Nähe der Schnittpunkte sind durch die unklare Zuordnung der Punkte zu den Liniensegmenten begründet. Gerade im Bereich von Schnittpunkte ist die

Zuordnung dabei nicht eindeutig und ein Punkt könnte mehreren Liniensegmenten zugeordnet werden. Es zeigt sich dabei auch, dass am Schnittpunkt P3, der den Schnittpunkt aus vier Liniensegmenten darstellt, die Flächen immer zu klein geschätzt wird. Dies hängt ebenfalls damit zusammen, dass die Punkte hier vier Liniensegmenten zugeordnet werden müssen. Abgesehen von den Schnittpunktbereichen lassen sich Abweichungen von der Soll-Fläche im Bereich von etwa 2 mm^2 feststellen.

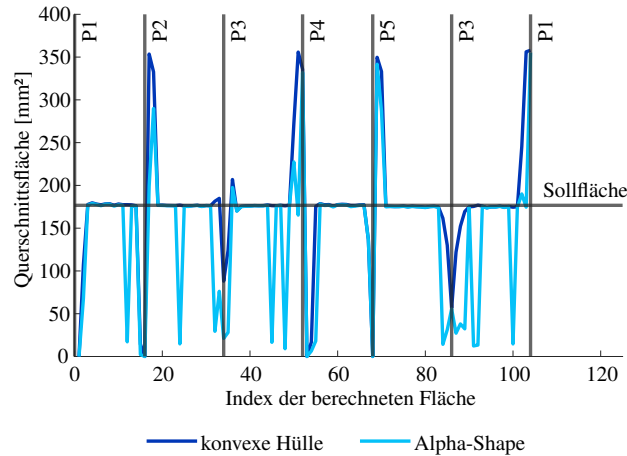
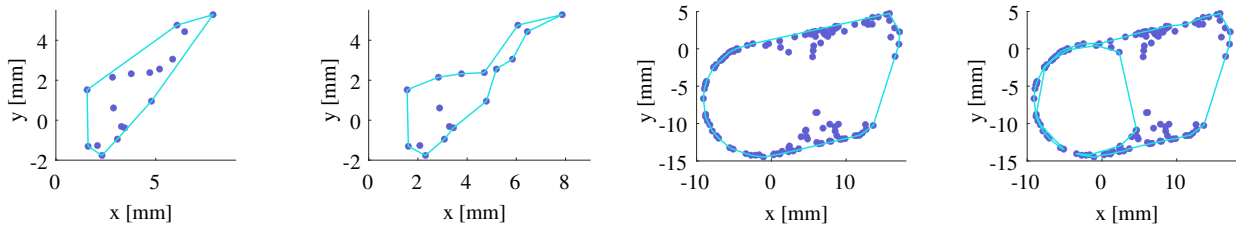


Abb. 6.5: Berechnete Querschnittsflächen mittels konvexer Hülle und Alpha-Shapes, sowie die Sollfläche für das simulierte Testobjekt S1.



(a) Fläche zu klein konvexe Hülle (b) Fläche zu klein Alpha-Shape (c) Fläche zu groß konvexe Hülle (d) Fläche zu groß Alpha-Shape

Abb. 6.6: Beispiel für fehlerhafte Querschnittsflächen in den Bereichen der Schnittpunkte.

Da die Abweichungen in der Querschnittsflächenberechnung immer im Bereich der Schnittpunkte auftreten, wurden die Ausreißer der Querschnittsflächenberechnung detektiert und eliminiert. In Abbildung 6.7 ist der Verlauf der Querschnittsflächen nach der Filterung dargestellt.

Aus diesen gefilterten Querschnittsflächen kann die mittlere Abweichung bestimmt werden. Die mittlere Abweichung zur Soll-Fläche beträgt dabei $d_{A_{\text{konvexe Hülle}}} = 0,372 \text{ mm}^2$ mit einer Standardabweichung von $1,191 \text{ mm}^2$ für die Berechnung mittels konvexer Hülle, und $d_{A_{\text{Alpha-Shape}}} = 0,784 \text{ mm}^2$ mit einer Standardabweichung von $1,323 \text{ mm}^2$ für die Berechnung mittels Alpha-Shapes. Damit zeigt sich, dass die Abweichung bei beiden Verfahren unter 1 mm^2 liegt, die Abweichungen bei der Berechnung mittels konvexer Hülle allerdings geringer sind. Die höhere Abweichung bei der Berechnung der Querschnittsfläche unter Verwendung der Alpha-Shapes lässt sich dadurch erklären, dass eine geringe Anzahl an Punktfehlzuordnungen hier bereits einen größeren Einfluss auf die berechnete Fläche hat. Ein solcher Fall ist in Abbildung 6.8 dargestellt. Hier zeigt sich, dass nur wenige fehlende Punkte zu einer größeren Abweichung bei der berechneten Fläche mittels Alpha-Shapes führen. Durch diesen Effekt entstehen die größeren Abweichungen bei der Berechnung mittels Alpha-Shapes und das

Verfahren der konvexen Hülle kann als das stabilere Verfahren betrachtet werden.

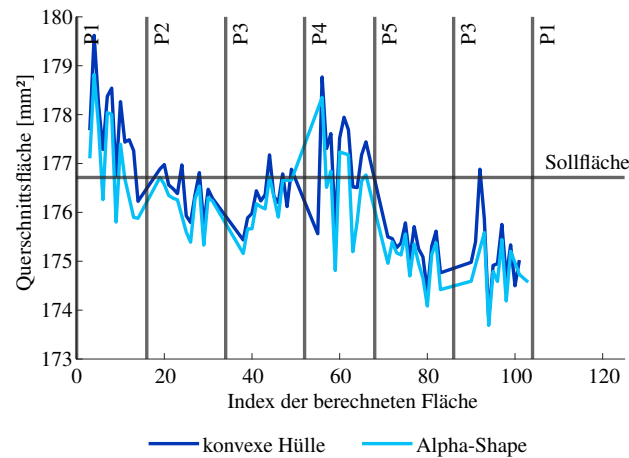


Abb. 6.7: Berechnete Querschnittsflächen mittels konvexer Hülle und Alpha-Shapes, sowie die Sollfläche für das simulierte Testobjekt S1.

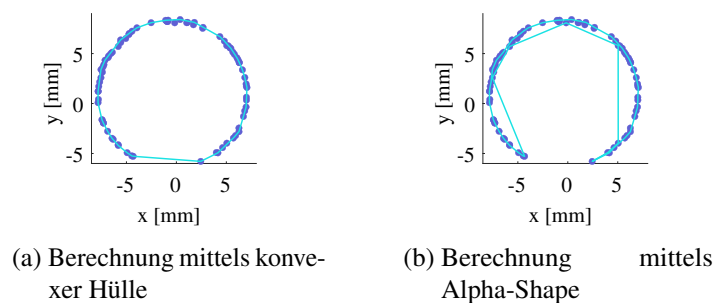


Abb. 6.8: Vergleich des Verhalten der Querschnittsflächenberechnungen bei lückenhaften Segmentierungen.

Für die Vollständigkeit der Querschnittsflächenberechnung zeigt sich, dass mit beiden Verfahren in allen Fällen ein Querschnitt bestimmt werden kann, und es ergibt sich $\Delta_A = 0$. Da allerdings nicht alle Querschnittsflächen ein plausibles Ergebnis liefern, wurde eine Filterung durchgeführt. Hierfür wurde der Konfidenzbereich der Querschnittsflächen mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 95% bestimmt. Für die weitere Betrachtung wurden dann nur die Querschnittsflächen verwendet, die innerhalb des Konfidenzbereichs liegen. Damit ergibt sich für die konvexe Hülle $\Delta_A = 30$ und für die Alpha-Shapes $\Delta_A = 37$. Somit ist die Vollständigkeit hier, vor allem im Bereich der Schnittpunkte nicht gewährleistet.

6.1.5 Zusammenfassung der Ergebnisse der simulierten Testdatensätze

Durch die Anwendung des entwickelten Auswertalgorithmus auf die simulierten Datensätze zeigt sich, dass die vollständige Bestimmung der Liniensegmente und Schnittpunkte größtenteils möglich ist. Schwierigkeiten bestehen im Bereich der Hüllen in denen sich die simulierten Datensätze von realen Datensätzen unterscheiden. Prinzipiell ist es möglich den Algorithmus hinsichtlich der simulierten Daten anzupassen, damit diese Fälle auch abgefangen werden können und eine vollständige und korrekte Segmentierung direkt erreicht werden kann. Allerdings zeigt sich, dass in der Netzgenerierung fehlende oder fehlerhafte Liniensegmente gut konstruiert bzw.

eliminiert werden konnten, und somit die Vollständigkeit für alle Liniensegmente erreicht wurde.

Hinsichtlich der berechneten Querschnittsflächen zeigt sich, dass diese über das gesamte Segment verteilt, sehr gut bestimmt werden können. Allerdings zeigt sich hier auch, dass es bei der Berechnung der Fläche mittels Alpha-Shapes immer wieder zu einzelnen fehlerhaften Flächenberechnungen in der Mitte des Segmentes kommt. Diese entstehen, wenn durch die Projektion der Punkte der Punktwolke einzelne Punkte von der Kreisform abweichen. Dieser Effekt tritt auf, wenn das geschätzte Liniensegment nicht durch das Zentrum der Flächen verläuft. Während bei der konvexen Hülle diese Punkt im inneren vernachlässigt werden, kann es bei den Alpha-Shapes zu Abweichungen in der berechneten Querschnittsfläche führen. Damit kann die Ermittlung der Querschnittsfläche über die konvexe Hülle als das robustere Verfahren angenommen werden. Bei beiden Verfahren zeigen sich jedoch Probleme bei der Flächenberechnung im Bereich der Schnittpunkte. Allerdings muss hierbei auch beachtet werden, dass ein Faserquerschnitt in den Schnittpunktbereichen auch weniger Aussagekraft besitzt, da hier die einzelnen Faserbündel nicht unbedingt trennbar sind, beziehungsweise in der Folge die Querschnitte größer sind.

Ein weiterer Punkt, der bei der Beurteilung der Ergebnisse der simulierten Datensätze betrachtet werden muss, ist, dass die hier verwendeten Punktwolken einen idealen Fall mit gleichen Punktabständen über das gesamte Objekt darstellen. Dadurch sind auch keine Lücken im Datensatz vorhanden und alle Messpunkte können als fehlerfrei angenommen werden.

6.2 Einfache Strukturen mit Referenzmessungen

Nachdem der Algorithmus auf die simulierten Testobjekte angewendet wurde, erfolgt der Übergang zu den realen Messungen. Um weiterhin eine Möglichkeit der Validierung der Ergebnisse zu erhalten, werden nun Testobjekte verwendet, für die zusätzliche Referenzmessungen zur Verfügung stehen (vgl. Abschnitt 5.2).

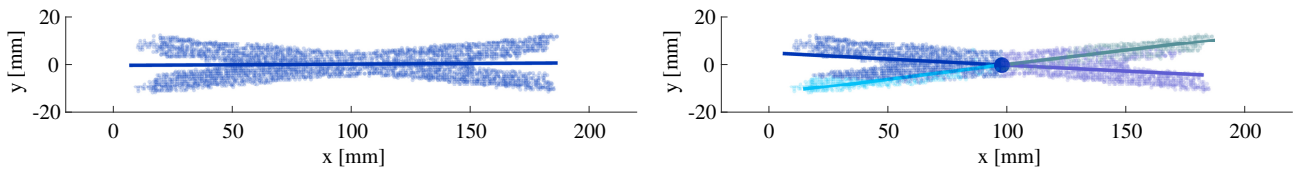
In den folgenden Abschnitten werden dabei exemplarische Probekörper betrachtet. Bei diesen Testobjekten kann die Vollständigkeit der Punktwolke als erfüllt betrachtet werden.

6.2.1 Vergleich der Ergebnisse des 8-Element mit und ohne Scanningsspray

Für die Analyse der Ergebnisse der einfacheren Strukturen wird zunächst das 8-Element betrachtet. Dieses Element ist dabei besonders für die Analyse der Querschnittsflächen geeignet, da keine Verdeckungen durch das Objekt selbst auftreten. Zusätzlich kann hier sehr gut die Trennbarkeit einzelner Liniensegmente in Abhängigkeit von der Wahl des Faserdurchmessers untersucht werden.

6.2.1.1 Einfluss der Wahl des Parameters des Liniendurchmessers auf die Schätzung

Wie bereits in Abschnitt 4.2.4 erläutert, verfügt der entwickelte Auswertalgorithmus über unterschiedliche Stellparameter, womit die Auswertung an den jeweiligen Datensatz angepasst werden kann. Anhand des hier betrachteten Testobjektes wird dies sehr deutlich sichtbar. Je nach Wahl der Anzahl der Linien, sowie des zu erwartenden Faserquerschnittes wird für diesen Datensatz eine Linie ohne Schnittpunkt (vgl. Abbildung 6.9a) oder auch vier Liniensegmente und ein Schnittpunkt segmentiert (vgl. Abbildung 6.9b). Für die Wahl der Parameter wurde dabei zum einen die maximale Linienanzahl angepasst. Zum anderen wurde der Liniendurchmesser angepasst. Da die Linien sehr dicht beieinander verlaufen, muss zusätzlich der Parameter zum Filtern paralleler Linien angepasst werden.



(a) Wahl eines größeren Faserdurchmesser (25 mm) mit einer resultierenden segmentierten Linie
 (b) Wahl eines kleineren Faserdurchmesser (10 mm) mit zwei resultierenden segmentierten Linien

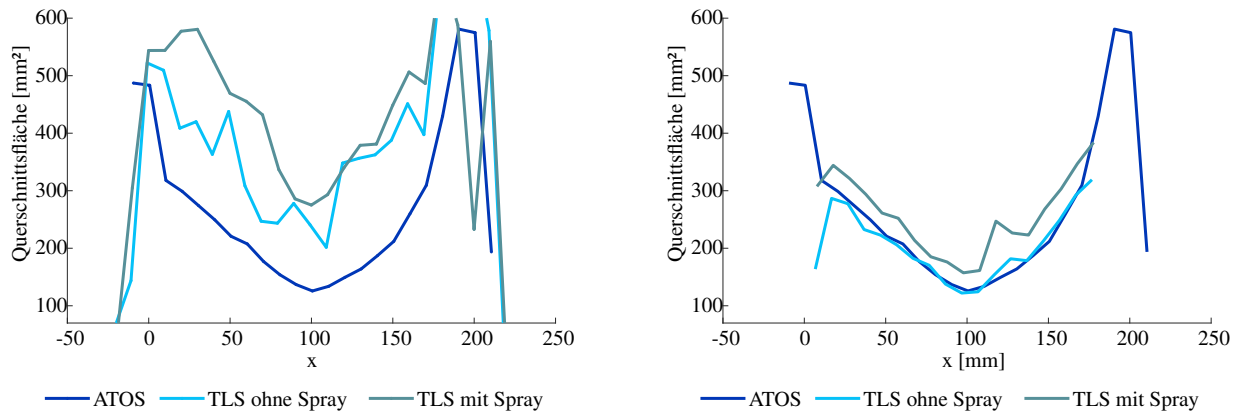
Abb. 6.9: Einfluss der Stellparameter des Algorithmus auf das Segmentierungsergebnis.

Anhand dieses Beispiels zeigt sich, dass die durchgeführte Segmentierung im Allgemeinen sehr variabel ist. Um die Qualität des Ergebnisses beurteilen zu können, ist es daher wichtig die Anforderungen klar zu definieren. In diesem Fall stellen beide Varianten eine vollständige und korrekte Segmentierung dar, allerdings mit unterschiedlichen Zielsetzungen. Während in Abbildung 6.9a die Segmentierung der Verbindung zwischen den Ankerpunkten darstellt und damit einen Vergleich zur Syntax ermöglicht, stellt 6.9b den abstrahierten realen Faserverlauf dar. In beiden Fällen gilt allerdings, durch die jeweiligen Anforderung, $\Delta_{\text{Linie}} = 0$ und $\Delta_{\text{SP}} = 0$, womit die Vollständigkeit erfüllt ist. Für die nachfolgenden Untersuchungen wird die Variante mit einem Liniensegment weiter verwendet.

6.2.1.2 Vergleich der berechneten Querschnittsflächen aus unterschiedlichen Messdaten

Um einen Vergleich der TLS-Messungen, sowie der ATOS-Messungen durchführen zu können, werden die berechneten Faserquerschnitte beider Verfahren miteinander verglichen. Zusätzlich werden auch die Ergebnisse aus der Flächenberechnung mittels der konvexen Hülle, sowie den Alpha-Shapes betrachtet. Für eine erste Untersuchung wird ein Testobjekt betrachtet, für das zusätzlich TLS-Messungen unter Verwendung des Scanningsprays vorliegen. Für alle Varianten zeigt sich dabei, dass sich die berechneten Querschnittsflächen vor allem in den Randbereichen stark unterscheiden können. Dies ist darauf zurückzuführen, dass es im Bereich der Ankerpunkte zu größeren Messabweichungen kommt. Diese entstehen dadurch, dass die beiden Messsysteme unterschiedlich mit überschüssigem Material, in diesem Fall dem überschüssigen Harz aus der Fertigung, umgehen. Während diese in der TLS-Punktvolke nicht erfasst werden, sind sie Teil der mittels ATOS gemessenen Punktvolke. Dadurch entstehen in diesen Bereichen deutlich zu große Querschnittsflächen. Dies ist auch in den Abbildungen 6.10 und 6.11 in den Randbereichen im Bereich der x -Positionen 0 mm und 200 mm sichtbar. Für die nachfolgenden Betrachtungen werden daher die Randbereiche nicht weiter betrachtet.

In Abbildung 6.10a sind nun die berechneten Querschnittsflächen auf Basis der konvexen Hülle für die ATOS Referenzmessungen, sowie für die ungefilterten TLS-Messungen, um den Einfluss der Filterung auf die berechneten Flächen zu untersuchen, mit und ohne die Verwendung des Scanningsprays dargestellt. Allgemein zeigt sich bei den berechneten Flächen direkt, dass die Variante mit einem geschätzten Liniensegment für die Analyse gewählt wurde. Dies ist dadurch sichtbar, dass die berechneten Flächen am Rand des Objektes mehr als doppelt so groß sind. Bei einer detaillierteren Betrachtung zeigt sich, dass die ungefilterten TLS-Daten, wie zu erwarten, zu einer größeren berechneten Querschnittsfläche führen. Hierbei wird auch sichtbar, dass das Rauschen der Punktvolke dazu führt, dass deutliche Sprünge zwischen den berechneten Flächen zu erkennen sind. Diese Sprünge und die deutlich zu groß geschätzten Flächen sind bei der Betrachtung der gefilterten Daten (vgl. Abbildung 6.10b) nun minimiert oder nicht mehr vorhanden. Vergleicht man nun zusätzlich die TLS-Daten mit und ohne die Verwendung des Scanningsprays, so ergibt sich, dass die Messungen ohne Spray sehr gut zu den ATOS-Referenzmessungen passen und sich eine mittlere Abweichung von $0,12 \text{ mm}^2$ für das betrachtete Bauteil ergibt.

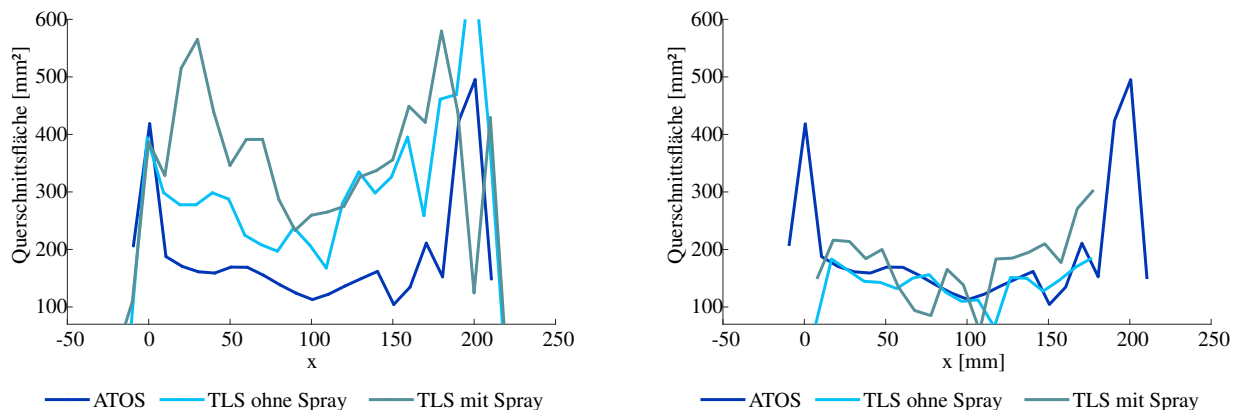


(a) Vergleich der berechneten Querschnittsflächen aus ATOS mit ungefilterten TLS-Daten

(b) Vergleich der berechneten Querschnittsflächen aus ATOS mit gefilterten TLS-Daten

Abb. 6.10: Vergleich der berechneten Querschnittsflächen aus ATOS- und TLS-Messungen mittels konvexer Hülle.

Die gleiche Analyse der Daten wird nun für die Flächenberechnung mittels Alpha-Shapes durchgeführt. Die Ergebnisse hierzu sind in Abbildung 6.11 dargestellt. Auch hier zeigt sich, dass die TLS-Messdaten ohne Filterung deutlich zu große Querschnittsflächen im Vergleich zu den ATOS-Messungen aufweisen (vgl. Abbildung 6.11a). Bei den gefilterten Daten zeigt sich, dass diese von der Größenordnungen, wie auch schon bei den Berechnungen mittels konvexer Hülle, deutlich besser zusammen passen. Dabei ist auffällig, dass die TLS-Messdaten mit Scanningspray ein größeres Schwanken in den Ergebnissen aufweisen. Insgesamt zeigen sich allerdings auch zwischen den ATOS-Messungen und den TLS-Messungen ohne Scanningspray größere Abweichungen im Vergleich zu den Berechnungen unter Verwendung der konvexen Hülle.



(a) Vergleich der berechneten Querschnittsflächen aus ATOS mit ungefilterten TLS-Daten.

(b) Vergleich der berechneten Querschnittsflächen aus ATOS mit gefilterten TLS-Daten

Abb. 6.11: Vergleich der berechneten Querschnittsflächen aus ATOS und TLS-Daten mittels Alpha-Shapes.

Beim Vergleich der beiden Methoden zeigt sich, dass die berechneten Flächen, bei Verwendung der Alpha-Shapes, über die gesamte Bauteillänge einen relativ konstanten Wert aufweisen, während die berechneten Querschnittsflächen unter Verwendung der konvexen Hülle zur Mitte hin deutlich abnehmen. Zur besseren

Verdeutlichung ist in Abbildung 6.12 der Verlauf der Querschnittsflächen für die gefilterten TLS-Daten für die Berechnung mittels konvexer Hülle und Alpha-Shape noch einmal im direkten Vergleich dargestellt. Das zu beobachtende Verhalten ist durch die Art der Berechnung der beiden Methoden zu erklären. Während die Berechnung der Alpha-Shapes die reinen Faserstränge betrachtet und daher im Bereich zwischen Anker und Schnittpunkt zwei einzelnen Flächen berechnet, werden diese bei der Berechnung mittels konvexer Hülle als eine Fläche berechnet. Die Wahl der Berechnungsmethode ist daher abhängig vom gewünschten Ziel der Berechnung. Für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Datensätze bieten die berechneten Flächen mittels konvexer Hüllen allerdings eine genauere Schätzung.

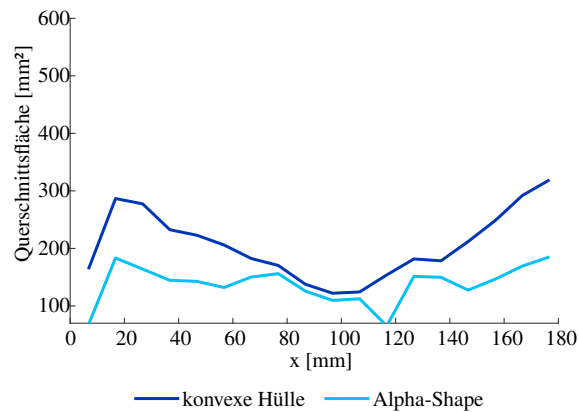


Abb. 6.12: Vergleich der berechneten Querschnittsflächen für gefilterte TLS-Daten bei der Berechnung mittels konvexer Hülle und Alpha-Shape.

Der numerische Vergleich der berechneten Querschnittsflächen für alle zwölf verfügbaren Elemente zeigt dabei ebenfalls den Effekt, dass die Abweichung im Bereich der Randbereiche deutlich größer sind, als zur Mitte des Objektes. Über alle betrachteten Flächen zeigt sich dabei eine Abweichung von $34,31 \text{ mm}^2$ für die konvexen Hüllen aus ATOS-Messungen und TLS-Daten. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die Abweichungen vor allem in den Bereichen auftreten, in denen die beiden Faserstränge getrennt voneinander verlaufen. Im Bereich der Schnittpunkte reduziert sich die mittlere Abweichung daher auf $10,03 \text{ mm}^2$. Ein weiterer Grund für die auftretenden Abweichungen ist die Position, an der die Schnittpunkte bestimmt wurden. Da diese in 10 mm Abschnitten entlang der geschätzten Geraden bestimmt wurden, ist die Position der Schnittpunkte nicht identisch. Durch die Variation des Faserquerschnitts im Verlauf der Liniensegmente, kann es zu Abweichungen kommen, da nicht die exakten Position, sondern die nächstgelegenen Abschnitte miteinander verglichen werden. Es zeigt sich somit, dass die Vollständigkeit der Querschnittsflächen mit $\Delta_A = 0$ erfüllt ist. Für die Korrektheit der Querschnittsflächen ergibt sich eine mittlere Abweichung von $d_A = 10,03 \text{ mm}^2$ für alle zwölf betrachteten Bauteile. Da zum aktuellen Zeitpunkt kein Grenzwert für die Abweichung der berechneten Querschnittsflächen bekannt ist, kann keine finale Aussage im Hinblick auf die Korrektheit getroffen werden. Aus diesem Grund werden in Abschnitt 6.3.4 die berechneten Querschnittsflächen mit alternativen Messmethoden verglichen.

6.2.2 Vergleich des X-Element mit und ohne Scanningspray

Die Erkenntnisse aus den bisherigen Untersuchungen werden nun auf ein komplexeres reales Testobjekt übertragen. Da auch für diesen Datensatz Referenzmessungen zur Verfügung stehen, werden hier zum einen die Abweichungen der berechneten Schnittpunktkoordinaten betrachtet, zum anderen wird eine Analyse der Vollständigkeit der Erfassung der Testobjekte durchgeführt. Die Vollständigkeit wird dabei vor und nach der

Durchführung der Netzgenerierung betrachtet. Dabei werden auch Vergleiche hinsichtlich der Verwendung des Scanningsprays für die geschätzten Schnittpunktkoordinaten sowie die erreichte Vollständigkeit durchgeführt.

6.2.2.1 Betrachtung der Vollständigkeit der Erfassung und Auswertung für ATOS- und TLS-Messungen

In einem ersten Schritt werden alle verfügbaren Datensätze hinsichtlich der erreichten Vollständigkeit evaluiert. Die Soll-Anzahl der segmentierten Schnittpunkte für dieses Objekt beträgt 5, die Anzahl für die Liniensegment 6. Die Ergebnisse der Segmentierung sind in Tabelle 6.5 dargestellt. Dabei wird unterschieden, zwischen der segmentierten Linienzahl und Schnittpunktzahl vor der und nach der Netzgenerierung.

Tab. 6.5: Anzahl der segmentierten Schnittpunkte und Liniensegmente für die 12 Testobjekte vor und nach der Netzgenerierung.

	vor der Netzgenerierung		nach der Netzgenerierung	
	Schnittpunkte	Liniensegmente	Schnittpunkte	Liniensegmente
Element 1 - ATOS	5	12	5	6
Element 1 - TLS	5	14	5	6
Element 2 - ATOS	5	13	5	6
Element 2 - TLS	5	13	5	6
Element 3 - ATOS	4	12	5	6
Element 3 - TLS	4	9	5	6
Element 4 - ATOS	5	13	5	6
Element 4 - TLS	5	13	5	6
Element 4 - TLS mit Spray	5	10	5	6
Element 5 - ATOS	5	11	5	6
Element 5 - TLS	4	11	5	6
Element 6 - ATOS	5	13	5	6
Element 6 - TLS	5	14	5	6
Element 7 - ATOS	5	14	5	6
Element 7 - TLS	5	14	5	6
Element 8 - ATOS	5	14	5	6
Element 9 - ATOS	5	13	5	6
Element 9 - TLS	5	14	5	6
Element 10 - ATOS	5	13	5	6
Element 10 - TLS	5	14	5	6
Element 11 - ATOS	4	11	5	6
Element 11 - TLS	5	13	5	6
Element 12 - ATOS	5	11	5	6
Element 12 - TLS	5	13	5	6

Betrachtet man das Ergebnis der reinen Segmentierung, so zeigt sich, dass für je zwei Testobjekte aus den ATOS- und TLS-Messungen je ein Schnittpunkt nicht segmentiert werden konnte. Auffällig ist dabei, dass dieser Effekt für beide Messverfahren bei Element 3 auftritt. Allerdings lassen sich visuell keine Unterschiede

zwischen diesem Testobjekt und den anderen feststellen. Des Weiteren zeigt sich, dass die nicht segmentierten Schnittpunkte in allen Fällen eine Ecke des Objektes repräsentieren. Da für die Segmentierung die Ankerpunkte aus der Punktwolke entfernt wurden, liegt an diesen Stellen eine geringere Punktdichte vor, wodurch das Segmentierungsergebnis beeinflusst wird. Betrachten man zusätzlich die segmentierten Liniensegmente, so zeigt sich, dass für alle Testobjekte zu viele Liniensegmente gefunden wurden. Hier wird auch wieder der bereits bei den simulierten Datensätzen festgestellte Effekt sichtbar, dass sich um die äußeren Schnittpunkte kurze Liniensegmente bilden (vgl. Abschnitt 6.1.1). Die Anzahl der segmentierten Liniensegmente variiert dabei zwischen 9 und 14. Dabei lässt sich keine Unterscheidung zwischen den ATOS- und TLS-Messdaten feststellen. Auch lässt sich keine nennenswerte Abweichung bei der Anzahl der segmentierten Schnittpunkte und Liniensegmente unter Verwendung des Scanningsprays feststellen.

Vergleicht man die Ergebnisse direkt nach der Segmentierung mit denen, nachdem eine Netzgenerierung für das Testobjekt durchgeführt wurde, so zeigt sich, dass für alle Testobjekte mit allen Messverfahren die korrekte Anzahl an Schnittpunkten und Liniensegmenten vorliegt. Damit gilt für alle Testobjekte mit allen Messverfahren $\Delta_{\text{Linie}} = 0$, $\Delta_{\text{SP}} = 0$ und damit die Vollständigkeit als erfüllt.

6.2.2.2 Vergleich der berechneten Schnittpunktkoordinaten aus ATOS- und TLS-Messungen

Nachdem im vorherigen Abschnitt die Vollständigkeit der Segmentierung überprüft wurde, werden nun die Abweichungen der geschätzten Schnittpunktkoordinaten aus ATOS- und TLS-Messungen genauer betrachtet. Dafür werden die absoluten Abweichungen für alle drei Koordinaten für alle Testobjekte berechnet. Zusätzlich wird die daraus resultierende 3D-Abweichung berechnet. Dabei zeigt sich, dass die maximale Abweichung hier im Bereich von 9,98 mm liegt, während eine mittlere Abweichung von 5,55 mm festzustellen ist. Die Abweichungen der TLS-Messungen mit Scanningspray liefern dabei vergleichbare Ergebnisse hinsichtlich der Genauigkeit. Da es sich bei den hier verwendeten Testobjekten um Objekte mit mehreren Faserlagen handelt, führt dies auch dazu, dass der Schnittpunkt nicht direkt einen Punkt darstellt, sondern der mittlere Schnittpunkt aus allen sechs Lagen geschätzt wird. Durch die Interaktion der Fasern in der Fertigung kommt es dabei zu Abweichungen der Geometrie, wodurch die Schnittpunkte hier eher elliptische Schnittregionen darstellen. Eine solche Schnittregion ist in Abbildung 6.13 dargestellt. Der reale Schnittpunkt liegt dabei innerhalb des roten Bereiches. Die hier festgestellten Abweichungen, d_{3D} , liegen dabei alle innerhalb des realen Volumens, in dem sich der wirkliche Schnittpunkt befindet, wodurch die Korrektheit als erfüllt betrachtet werden kann. Dadurch zeigt sich, dass die TLS-Messungen für diese Anwendung ebenso wie die ATOS-Messungen geeignet sind.

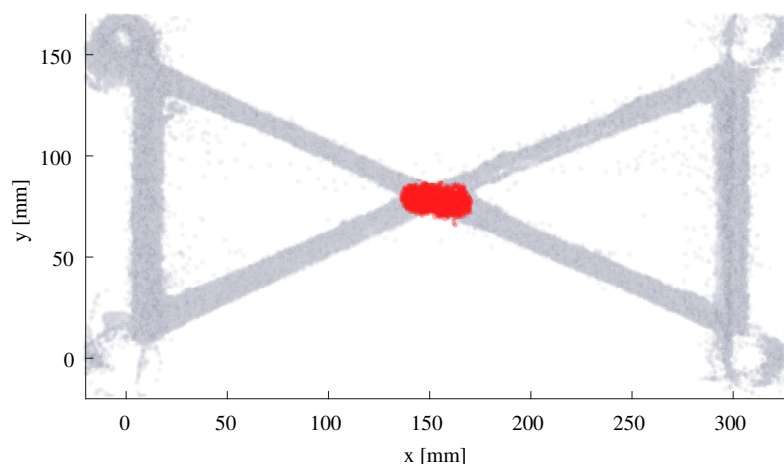


Abb. 6.13: Darstellung des Bereichs der Schnittpunktregion für das X-Element.

6.2.3 Zusammenfassung der Ergebnisse für die einfachen Strukturen mit Referenzmessungen

Anhand dieses Datensatzes lässt sich der Einfluss der Stellparameter für den Algorithmus aufzeigen. Damit zeigt sich, dass die Wahl dieser dabei immer abhängig vom gewünschten Ziel der Auswertung ist und diese somit ebenfalls aus den Anforderungen an die Qualitätssicherung abgeleitet werden müssen. Des Weiteren zeigt der Vergleich der berechneten Querschnittsflächen, dass die gefilterten TLS-Messdaten mit der Methode der konvexen Hülle vergleichbare Ergebnisse liefern, wie die berechneten Querschnittsflächen mit der Methode der konvexen Hülle aus den ATOS-Messungen. Dabei zeigte sich auch, dass die geschätzten Querschnittsflächen aus TLS-Messungen ohne Scanningspray besser zu den Referenzquerschnitten passen. Auch zeigt sich, dass die Schätzung mittels konvexer Hülle hier genauere Ergebnisse liefert im Vergleich zur Berechnung mittels Alpha-Shapes.

Des Weiteren zeigt sich, dass eine vollständige Erfassung und Segmentierung der Schnittpunktkoordinaten, sowie der Liniensegmente mit beiden Messverfahren möglich ist. Auch wird deutlich, dass die Randbereiche, genauer die Ankerpunkten, Probleme bei der eigentlichen Segmentierung aufweisen, die allerdings durch die anschließend durchgeführte Netzgenerierung behoben werden können. Auch zeigt sich, dass die Abweichung zwischen den ATOS- und TLS-Messungen im Bereich der berechneten Abweichungen für die simulierten Datensätze liegen.

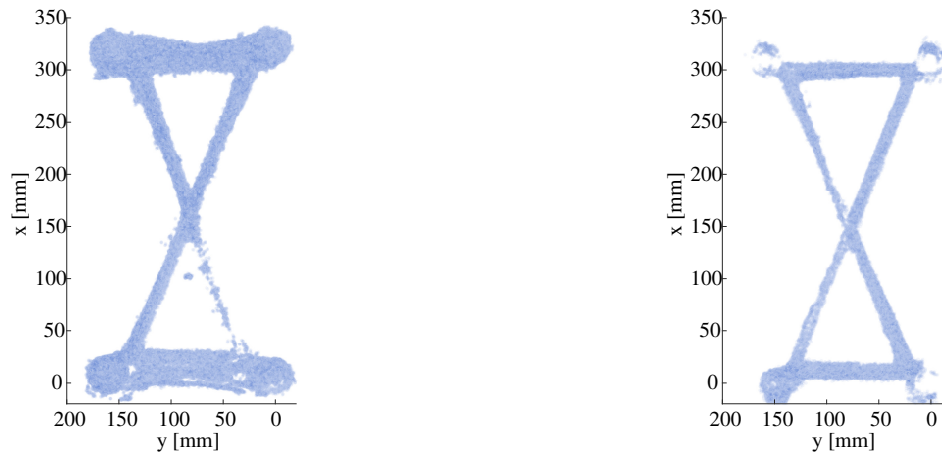
6.3 Strukturen unterschiedlicher Komplexität mit Messungen im Fertigungsrahmen

Nachdem nun einfache Strukturen unter möglichst idealen Messbedingungen untersucht wurden, werden in diesem Abschnitt komplexere Bauteile, sowie Messungen im Fertigungsrahmen genauer betrachtet. Dafür stehen Strukturen in der Art der simulierten Datensätze zu Verfügung. Dabei wird im Folgenden der Einfluss der Qualität der Messung und des Messaufbaus näher untersucht. Zusätzlich werden Bauteile unterschiedlicher Komplexität betrachtet. Da sich bei den bisherigen Untersuchungen an den Ankerpunkten immer wieder Probleme bei der Schätzung zeigten, wird deren Einfluss auf die Schätzung der Geometrie ebenfalls näher betrachtet. Zuletzt werden die berechneten Querschnittsflächen mit vorhandenen Referenzquerschnitten aus mechanischen Messungen verglichen.

6.3.1 Untersuchung des Einflusses des Fertigungsrahmens auf die Qualität der Messung

Um den Einfluss der Messung im Fertigungsrahmen auf die geschätzte Geometrie untersuchen zu können, werden im Folgenden die Testobjekte der Art S1 aus den Messungen im Fertigungsrahmen betrachtet. Die Ergebnisse der Auswertung werden dann mit den Messungen aus Abschnitt 6.2 verglichen.

Zunächst wird hierbei die Vollständigkeit der Punktwolke betrachtet. Dabei zeigt sich, dass diese in den einzelnen Liniensegmente deutlich variiert und somit ein deutlicher Qualitätsunterschied in der Erfassung im Vergleich zur Messung in der speziellen Messhalterung festzustellen ist. Dieser Unterschied ist in Abbildung 6.14 dargestellt. Dabei ist deutlich sichtbar, dass die Punktdichte für die Messungen im Fertigungsrahmen stärker schwankt und einzelne Bereiche auch nur sehr grob erfasst wurden. Damit ist die Vollständigkeit der Messung nicht mehr in allen Bereichen der Testobjekte erfüllt. Dies zeigt sich besonders bei der Betrachtung des Liniensegmentes auf der rechten unteren Seite des Testobjektes für die Messungen im Fertigungsrahmen vom Zentrum des Objektes zum Ankerpunkt (vgl. Abbildung 6.14a). Die Punktwolke ist an dieser Stelle sehr dünn, so dass zwar die Lage des Liniensegment weiterhin sichtbar ist, eine vollständige Erfassung allerdings nicht mehr gewährleistet werden konnte. Im Vergleich dazu zeigt sich, dass bei der Erfassung in der Messhalterung zwar auch Schwankungen in der Punktdichte vorliegen, allerdings konnten hier alle Liniensegmente vollständig erfasst werden.



(a) Punktwolke eines Testobjektes S1 bei Messungen im Fertigungsrahmen (b) Punktwolke eines Testobjektes S1 bei Messungen in einer speziellen Messhalterung

Abb. 6.14: Vergleich der Vollständigkeit der Punktwolke für die Messungen im Fertigungsrahmen und der Messhalterung.

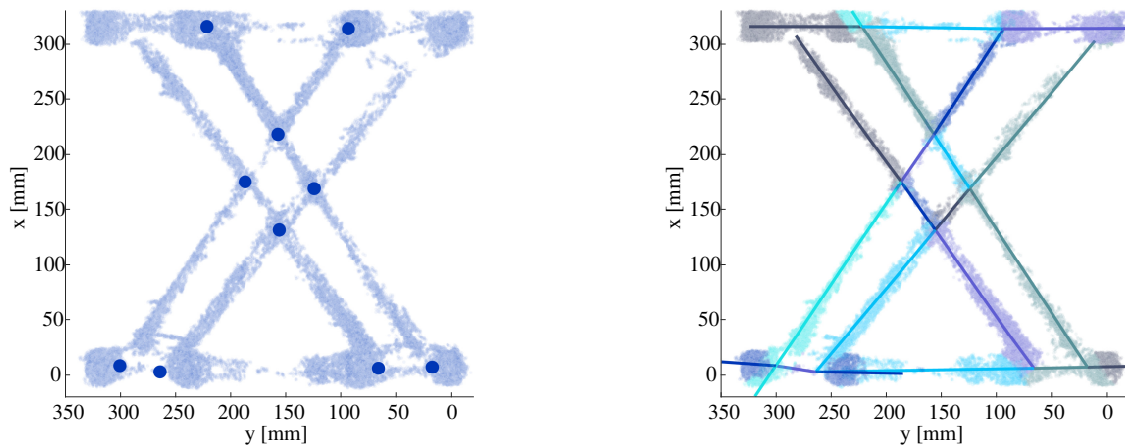
Neben der Betrachtung der Vollständigkeit der Punktwolke ist ebenso der Umgang des Auswertalgorithmus mit diesen Variationen in der Punktdichte von großer Bedeutung. Die Analyse der Ergebnisse zeigt dabei, dass auch hier ein vergleichbares Muster bei der Vollständigkeit der Segmentierung auftritt. Der zentrale Schnittpunkt konnte dabei in allen Datensätzen segmentiert werden. Für die Schnittpunkte am Rand des Objektes konnten ebenfalls bei zwei Testobjekten ein einzelner Schnittpunkt nicht detektiert werden, die allerdings durch die anschließende Netzgenerierung bestimmt werden konnten. Damit zeigt sich, dass die lückenhaften Scans in diesem Ausmaß für die Bestimmung der Liniensegmente und des Netzes kein Problem darstellen und die Vollständigkeit mit $\Delta_{\text{Linie}} = 0$ und $\Delta_{\text{SP}} = 0$ für alle Testobjekte erfüllt ist. Anders sieht es bei der Berechnung der Querschnittsflächen aus. Da in diesen Abschnitten nur wenige Punkte vorhanden sind, ist eine vollständige Repräsentation des Faserbündels nicht mehr gewährleistet, wodurch auch die Querschnittsflächenberechnung keine brauchbaren Ergebnisse mehr liefert. Damit gilt $\Delta_A \geq 0$. Um einen spezifischeren Wert für die Abweichungen der Anzahl der Querschnittsflächen bestimmen zu können, wird ein Grenzwert der minimalen Querschnittsfläche benötigt, der an dieser Stelle allerdings nicht bekannt ist.

6.3.2 Untersuchung der Anwendung des Algorithmus auf komplexere Testobjekte

Da die vollständige Erfassung der Geometrie der Testobjekte mit zunehmender Komplexität durch die entstehenden Verdeckungen durch das Testobjekt selbst zu einer immer größerer Herausforderung wird, werden im Folgenden zwei komplexere Bauteile betrachtet. Diese entsprechen dabei in Form und Größe den simulierten Datensätzen S2 und S3. In Abbildung 6.15 und 6.16 sind die geschätzten Schnittpunktkoordinaten, sowie die geschätzten Liniensegmente für je ein Testobjekt exemplarisch dargestellt.

Für das Testobjekt S2 zeigt sich dabei, dass die Schnittpunkte im Zentrum des Objektes vollständig segmentiert wurden. Für die Schnittpunkte an den Ankerpunkten wurden sechs aus acht Schnittpunkten segmentiert, wobei die Lage dieser, dabei nicht das Zentrum des Ankerpunktes, sondern den realen Schnittpunkt der Fasersegmente darstellt (vgl. Abbildung 6.15a). Betrachten man zusätzlich die segmentierten Liniensegmente, sowie die geschätzten Geraden, so zeigt sich, dass im Bereich der Ankerpunkte zumeist eine Gerade durch die zwei Ankerpunkte geschätzt wurde. Dies wird deutlich, wenn man die Zuordnung der Punkte der Punktwolke zu den Liniensegmenten betrachtet. Besonders die Bereiche unten links und oben rechts in Abbildung 6.15b zeigen dabei, durch die beiden runden Objekte, die jeweils dem gleichen Liniensegment zugeordnet wurden, dass die Ankerpunkte hier maßgeblich für die geschätzten Geraden mit verwendet werden. Da diese sich allerdings in

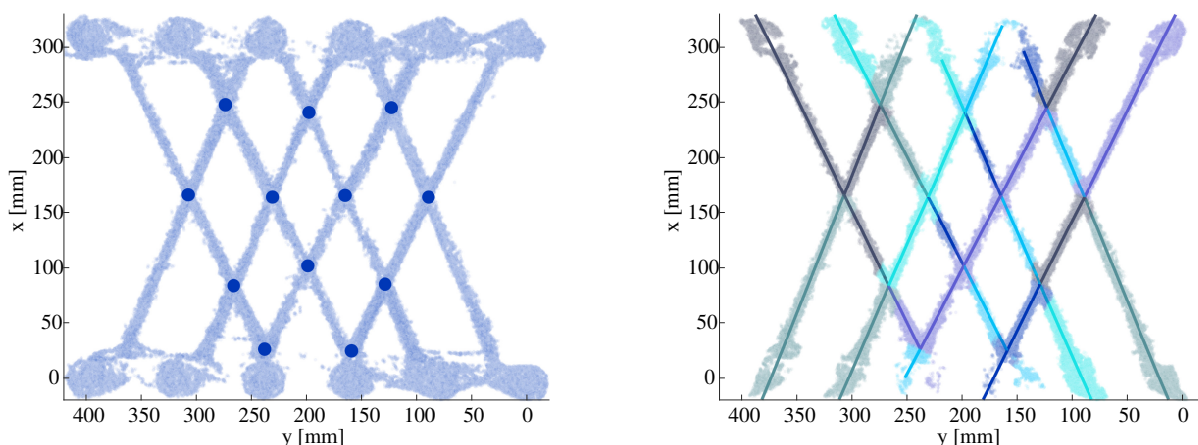
ihrer Höhe von der reinen Fasergeometrie unterschieden, müssen diese Schnittpunktkoordinaten mit Vorsicht betrachtet werden.



(a) Geschätzte Schnittpunktkoordinaten für die gemessene Punktwolke des Testobjektes S2 (b) Geschätzte Linien und zugeordnete Punktcluster für die simulierte Punktwolke des Testobjektes S2

Abb. 6.15: Ergebnisse des Auswertalgorithmus für die gemessene Punktwolke des Testobjektes S2.

Das Testobjekt S3 weist ein vergleichbares Verhalten, wie das zuvor betrachtete Testobjekt S2, auf. Auch hier zeigt sich, dass alle Schnittpunkte im Inneren des Testobjektes segmentiert werden konnten, während an den Ankerpunkten nur zwei Schnittpunkte segmentiert werden konnten. Dabei ist auffällig, dass es sich bei beiden segmentierten Schnittpunkten an den Ankerpunkten um Schnittpunkte handelt, die sich vom Ankerpunkt aus betrachtet im Inneren des Testobjektes befinden (vgl. Abbildung 6.16a). Dieser Effekt lässt sich dadurch erklären, dass die Enden der Liniensegmente für einen Schnittpunkt außerhalb des Objektes zu weit voneinander entfernt sind und dadurch kein gemeinsamer Schnittpunkt festgestellt werden kann. Dieser Abstand zeigt sich auch bei Betrachtung der Liniensegmente (vgl. Abbildung 6.16b). Um diese Schnittpunkte nun zusätzlich bestimmen zu können, werden die Liniensegmente an ihren Enden entsprechend verlängert, damit der Schnittpunkt noch innerhalb des definierten Grenzbereiches liegt. Dies führt allerdings an anderen Stelle dazu, dass fehlerhafte Schnittpunkte entstehen. Aus diesem Grund wurde an dieser Stelle darauf verzichtet.



(a) Geschätzte Schnittpunktkoordinaten für die gemessene Punktwolke des Testobjektes S3 (b) Geschätzte Linien und zugeordnete Punktcluster für die gemessene Punktwolke des Testobjektes S3

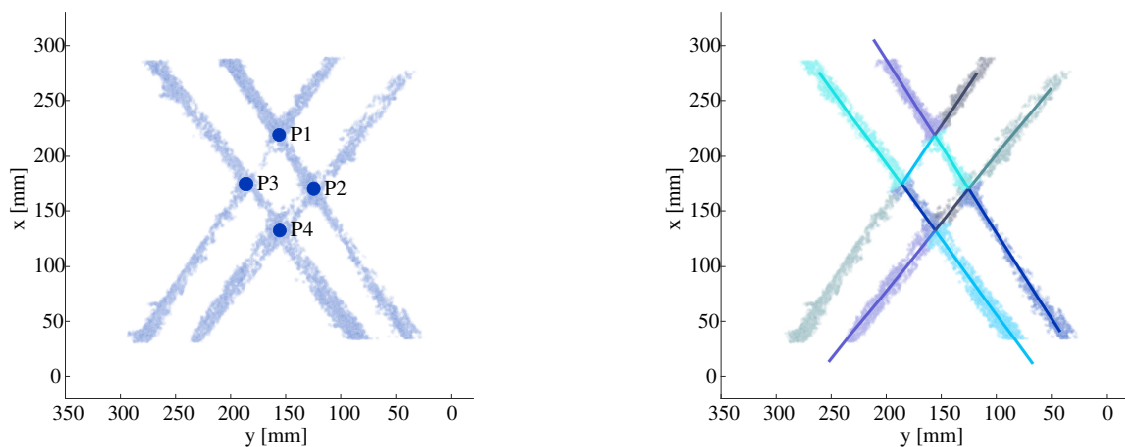
Abb. 6.16: Ergebnisse des Auswertalgorithmus für die gemessene Punktwolke des Testobjektes S3.

Vergleicht man die Ergebnisse beider Testobjekte mit den Ergebnissen des simulierten Datensatzes, so zeigt sich, dass für das Testobjekt S2 dieselbe Anzahl an Schnittpunkten segmentiert werden konnte, im Vergleich zum simulierten Datensatz. In beiden Fällen handelt es sich bei den nicht detektierten Schnittpunkten um Schnittpunkte bei den Ankerpunkten. Dasselbe Verhalten zeigt sich auch für das Testobjekt S3. Auch hier können für beide Datensätze alle Schnittpunkte im Inneren des Objektes geschätzt werden, wohingegen die Schnittpunkte an den Ankern zu Problemen führen. Auch zeigt sich, dass es sich bei den beiden segmentierten Schnittpunkten im realen Messdatensatz um zwei der drei segmentierten Schnittpunkten an den Ankerpunkten im simulierten Datensatz handelt.

Im Sinne der Vollständigkeit der Ergebnisse des Auswertalgorithmus zeigt sich daher, dass auch bei größeren und komplexeren Datensätzen und daraus resultierenden Verdeckungen durch das Objekt selbst eine vollständige Segmentierung der charakteristischen Objekte der Testobjekte möglich ist. Einzig im Bereich der Ankerpunkte zeigen sich dabei Probleme bei der Repräsentation der geschätzten Geometrie. Dies führt für die Vollständigkeit der Linienschätzung zu $\Delta_{\text{Linie}} = 0$ für das Testobjekt S2 und $\Delta_{\text{Linie}} = 10$ für das Testobjekt S3. Für die Vollständigkeit der Schnittpunkte ergibt sich $\Delta_{\text{SP}} = 2$ für das Testobjekt S2 und $\Delta_{\text{SP}} = 10$ für das Testobjekt S3.

6.3.3 Einfluss der Ankerpunkte auf die Schätzung

Wie bereits in Abschnitt 6.3.2 angedeutet, zeigt sich, dass die Auswertung im Bereich der Ankerpunkte in vielen Fällen zu Problemen führt. Um nun den Einfluss der Ankerpunkte, und einer dort eventuell fehlerhaften Schätzung der Liniensegmente, auf die geschätzte Geometrie des restlichen Testobjektes untersuchen zu können, werden im Folgenden die Ankerpunkte aus der Punktwolke entfernt und nur das Innere der Testobjekte für die Segmentierung verwendet. Die Ergebnisse für beide Testobjekte sind in den Abbildungen 6.17 und 6.18 dargestellt. Dabei zeigt sich, dass für beide Testobjekte alle Schnittpunkte und Liniensegmente vollständig segmentiert werden konnten ($\Delta_{\text{Linie}} = 0$ und $\Delta_{\text{SP}} = 0$).

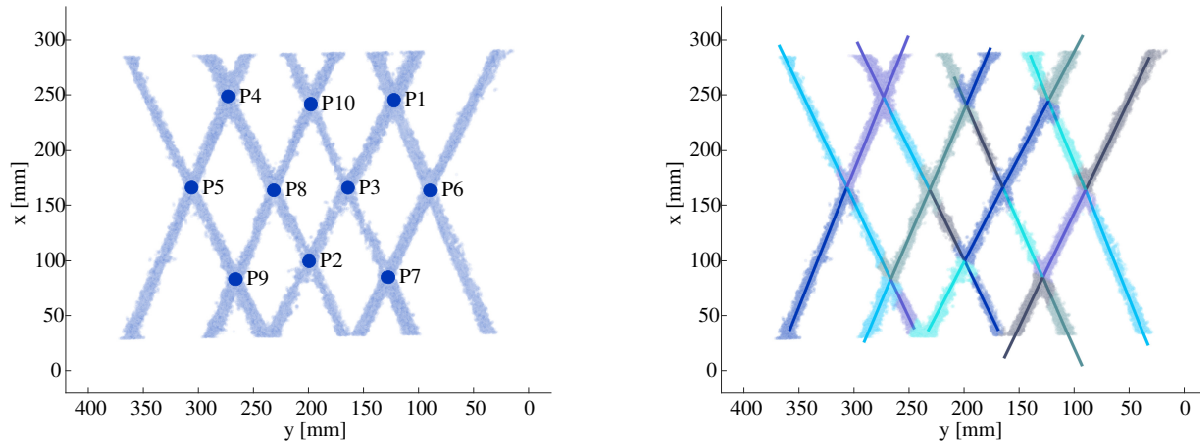


(a) Geschätzte Schnittpunktkoordinaten für die gemessene Punktwolke des Testobjektes S2

(b) Geschätzte Linien und zugeordnete Punktcluster für die gemessene Punktwolke des Testobjektes S2

Abb. 6.17: Ergebnisse des Auswertalgorithmus für die gemessene Punktwolke ohne den Bereich der Ankerpunkte des Testobjektes S2.

Um auch den Einfluss der Ankerpunkte auf die Schätzung der Schnittpunkte betrachten zu können, werden im Folgenden die Abweichungen der geschätzten Schnittpunktkoordinaten im Zentrum des Objektes für beide Szenarien miteinander verglichen. Die Abweichungen der Koordinaten sind dabei in Tabelle 6.6 für das Testobjekt S2 und in Tabelle 6.7 für das Testobjekt S3 dargestellt.



(a) Geschätzte Schnittpunktkoordinaten für die gemessene Punktwolke des Testobjektes S3

(b) Geschätzte Linien und zugeordnete Punktcluster für die gemessene Punktwolke des Testobjektes S3

Abb. 6.18: Ergebnisse des Auswertalgorithmus für die gemessene Punktwolke ohne den Bereich der Ankerpunkte des Testobjektes S3.

Tab. 6.6: Abweichung der geschätzten Schnittpunktkoordinaten für das Testobjekt S2 aus der Schätzung einer Punktwolke mit und ohne den Bereich der Ankerpunkt.

	dx [mm]	dy [mm]	dz [mm]	d_{3D} [mm]
P1	-0,382	0,704	-3,101	3,203
P2	-1,635	-1,113	-2,110	2,892
P3	0,312	0,561	0,072	0,646
P4	-1,408	0,037	0,290	1,438
Mittlere Abweichung	-0,778	0,0474	-1,212	2,044

Tab. 6.7: Abweichung der geschätzten Schnittpunktkoordinaten für das Testobjekt S3 aus der Schätzung einer Punktwolke mit und ohne den Bereich der Ankerpunkt.

	dx [mm]	dy [mm]	dz [mm]	d_{3D} [mm]
P1	0,006	-0,302	0,715	0,776
P2	1,908	-1,073	0,327	2,214
P3	-0,443	-0,123	1,602	1,667
P4	-0,413	1,163	0,297	1,269
P5	-0,074	0,631	0,449	0,778
P6	0,414	-0,730	0,768	1,138
P7	0,150	0,559	1,190	1,323
P8	0,350	-0,363	0,625	0,803
P9	0,611	-0,024	0,767	0,981
P10	-0,614	-0,560	1,504	1,718
Mittlere Abweichung	0,190	-0,0821	0,824	1,267

Die Analyse der Abweichungen zeigt dabei, dass die höchsten Abweichungen in der z -Koordinate des Schnittpunktes entstehen. Dies ist dadurch zu erklären, dass die Lage der Ankerpunkte zu den Liniensegmenten passt, während die Höhe durch die zusätzlichen Unterlegscheiben und Schrauben von der Höhe des Fasernetzes abweicht. Sind Teile der Halterung Teil der Punktwolke, führt dies zu einer fehlerhaften Schätzung der z -Koordinate. Durch die anschließende Netzgenerierung verteilt sich der Fehler in der Höhe auf die umliegenden Schnittpunkte. Eine weitere Auffälligkeit ist, dass die Abweichungen für das Testobjekt S3 im Vergleich zum Testobjekt S2 kleiner sind. Die Abweichungen betragen dabei im Maximum $-3,101$ mm für das Testobjekt S2 und $1,602$ mm für das Testobjekt S3. Diese Beobachtung zeigt sich auch bei der Betrachtung der mittleren Abweichung für beide Objekte. Während für das Objekt S3 sowohl die Abweichung in x - als auch in y -Richtung mit unter $0,2$ mm vernachlässigt werden kann, ist für das Testobjekt S2 nur die mittlere Abweichung in y -Richtung unterhalb dieses Wertes.

Auch in der Betrachtung der mittleren 3D-Abweichung zeigt sich, dass die mittlere Abweichung für das Testobjekt S2 mit $2,044$ mm im Vergleich zur mittleren Abweichung für das Testobjekt S2 mit $1,267$ mm fast doppelt so groß ist. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass je größer eine Struktur, desto weniger Einfluss haben eventuelle Fehlschätzungen in den Randbereichen auf die Gesamtgeometrie, da insgesamt mehr Beobachtungen zur Verfügung stehen und somit eine besserer Schätzung durchgeführt werden kann.

Betrachtet man abschließend die Lage der Schnittpunkte, an denen die größten Abweichungen auftreten, so zeigt sich, dass für das Objekt S3, die beiden Punkte P2 und P10 die höchsten Abweichungen aufweisen. Betrachtet man nun deren Lage im Objekt, so zeigt sich, dass diese beiden Punkte sich symmetrisch im Objekt befinden. Vor allem bei P2 fällt dabei auf, dass dieser Punkt eine Verbindung mit den beiden Schnittpunkten an den Ankerpunkten aufweist, die in der Schätzung unter Verwendung der gesamten Punktwolke segmentiert wurden. Damit zeigt sich, dass die Ankerpunkte in der Punktwolke je nach Lage der Schnittpunkte einen mehr oder weniger großen Effekt auf die Korrektheit der Schätzung haben. Da die Schnittpunkte an den Ankerpunkten allerdings allgemein eher schlecht segmentiert werden können, bietet es sich an, diese aus der Punktwolke zu entfernen um eventuelle Abweichungen (dx, dy, dz, d_{3D}) vermeiden zu können.

6.3.4 Vergleich der Querschnittsflächen mit alternativen Messmethoden

Für das Testobjekt S2 stehen nun zusätzlich weitere unterschiedliche Mess- und Rechenverfahren für die Bestimmung des Faserquerschnitts zur Verfügung (Gil Pérez et al. 2023a). Dabei sind sowohl Verfahren, die eine zerstörungsfreie Prüfung, wie auch eine nicht zerstörungsfreie Prüfung beinhalten, berücksichtigt.

Für das untersuchte Element wurde daher ein Liniensegment ausgewählt, dass dann aus dem Testobjekt entfernt wurde, womit die Bestimmung des Querschnittes erfolgen konnte. Die dabei verwendeten Verfahren sind der ideale Faserquerschnitt auf Grundlage der verwendeten Materialien (bei einem Faser-Volumen Verhältnis von 40%), Messungen mittels Messschieber an einer Stelle des Liniensegmentes, sowie Mikroschliffbilder einzelner Segmente. Die Berechnung der Fläche mittels Mikroschliffbilder ist dabei die mit Abstand genaueste Methode, allerdings auch die Einzige, die sich nicht zerstörungsfrei durchführen lässt. Für diese werden einzelne Scheiben des Liniensegmentes ausgeschnitten und für die Schliffbildanalyse vorbereitet. diese werden anschließend mikroskopisch untersucht und liefern neben der äußeren Geometrie auch Informationen über den Materialzustand im Inneren des Faserbündels. Die damit bestimmten Querschnitte sind in Tabelle 6.8 dargestellt.

Tab. 6.8: Vergleich der bestimmten Faserquerschnitte aus unterschiedlichen Messverfahren.

	Querschnittsfläche in mm^2
Ideal (Faser-Volumen Verhältnis 40%)	55,42
Messschieber	78,64
Mikroschliffbild	58,05
TLS mit konvexer Hülle	57,34

Der Vergleich der Ergebnisse zeigt, dass die Querschnittsflächen aus TLS-Messungen nur um $d_A = 0,71 \text{ mm}^2$ von denen aus Mikroschliffbildern abweichen. Dabei muss allerdings beachtet werden, dass die Querschnitte für die TLS-Messungen hier über das gesamte Liniensegment gemittelt wurden, da der genaue Ort der anderen Messungen nicht eindeutig bestimmbar war. Auch die Abweichung zum idealen Soll-Wert liegt für die TLS-Messungen dabei bei unter 2 mm^2 . Die größten Abweichungen treten hier zu den Messungen des Messschiebers auf, die allerdings auch zu den anderen Verfahren eine deutliche Abweichung aufweisen. Damit zeigt sich, dass die Bestimmung der Querschnittsfläche mit dem hier entwickelten Algorithmus sehr gut möglich ist und die Korrektheit somit erfüllt ist.

6.3.5 Zusammenfassung der Ergebnisse für die Strukturen unterschiedlicher Komplexität mit Messungen im Fertigungsrahmen

Die Analyse dieser Datensätze zeigt, dass eine Erfassung der Testobjekte im Fertigungsrahmen möglich ist, allerdings dabei eventuelle Einschränkungen im Sinne der Vollständigkeit zu beachten sind. Der Vorteil dabei ist allerdings, dass bei dieser Methode je nach Testobjekt vier (S1) bzw. zwei (S2 und S3) Testobjekte gleichzeitig vermessen werden können. Im Sinne der Effizienz ist diese Methode daher bei einer großen Anzahl an Bauteilen zu bevorzugen.

Auch zeigt sich, dass die Extraktion der geometrischen Kenngrößen auch mit Lücken in den Datensätzen weiterhin möglich ist, nur die Berechnung der Querschnittsflächen an diesen Stelle nicht mehr zuverlässig funktioniert. Weiter zeigt sich vor allem anhand der Ergebnisse der Testobjekte S2 und S3, dass auch für komplexere Testobjekte wie, S2 und S3, eine zuverlässige Segmentierung der charakteristischen Geometrieelemente möglich ist. Des Weiteren zeigt sich, dass besonders für kleine Objekte der Einfluss der Ankerpunkte auf die Gesamtschätzung der Geometrie beachtet werden, muss. Im Hinblick auf die Querschnittsflächenberechnung stellt der Vergleich mit mechanischen Messmethoden eine Validierung der geschätzten Querschnittsflächen aus dem entwickelten Auswertealgorithmus dar.

6.4 Messungen im Fertigungsprozess

Im Folgenden werden die Ergebnisse für die Messungen im Fertigungsprozess betrachtet. Dabei besteht eine besondere Herausforderung an die Auswertung darin, dass es sich um deutlich dünnere Strukturen handelt, als in den bisher betrachteten Datensätzen. Eine weitere Schwierigkeit, die hier hinzu kommt, ist, dass die Messungen in der Fertigung durchgeführt wurden, wodurch die Fasern zusätzlich feucht sind, was die Qualität der Messung beeinflusst. Aus diesem Grund werden zunächst die Möglichkeiten und Grenzen der Segmentierung für die vorhandenen Datensätze exemplarisch dargestellt. Dabei wird auch der Umgang mit lückenhaften Daten näher betrachtet. Anschließend liegt der Fokus auf der Möglichkeit der Netzgenerierung unter Verwendung des Vorwissens aus vorherigen Epochen oder auch aus Planungsdaten, wie der Syntax des Testobjektes.

6.4.1 Ergebnisse der Liniensegmentierung und Schnittpunktberechnung

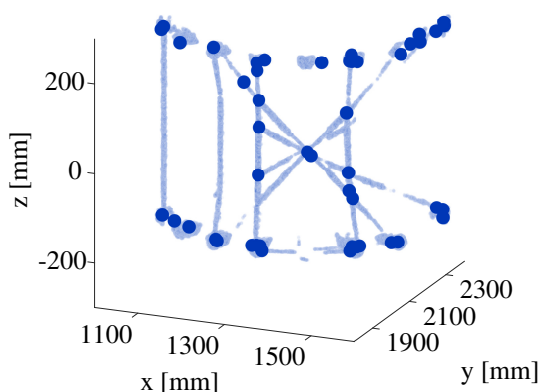
Die Liniensegmentierung und Schnittpunktberechnung zeigt, dass die Qualität der Ergebnisse zum einen sehr stark von der Qualität der Messungen, und hier vor allem der Vollständigkeit, und zum anderen von der Vorsegmentierung der Objekte abhängig ist. Eine zusätzliche Herausforderung ist der geringe Abstand zwischen den einzelnen Schnittpunkten. Da die Anzahl der Schnittpunkte mit steigender Anzahl der Epochen zunimmt, ist dieser Effekt vor allem in den späteren Epochen zu finden. Da die späteren Epochen die interessanteren Effekte aufweisen, wird die Schätzung für das Testobjekt 1 dieses Datensatzes in der fünften Epoche näher betrachtet. Eine vollständige Übersicht der Schätzungsergebnisse aller Epochen findet sich im Anhang in den Abbildungen

B.2-B.10.

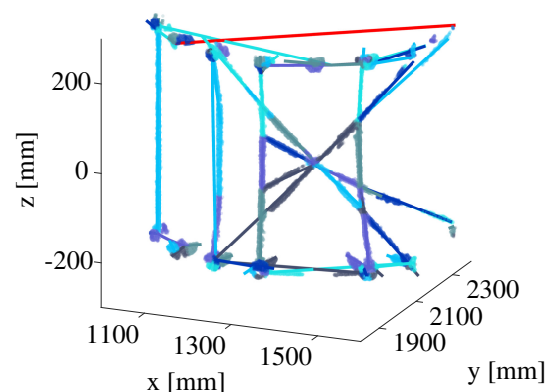
In Abbildung 6.19 sind die Ergebnisse der Liniensegmentierung und Schnittpunktberechnung des Datensatzes dargestellt. Dabei zeigt sich, dass bis auf zwei Schnittpunkte im Zentrum des Testobjektes alle Schnittpunkte segmentiert werden konnten. Allerdings zeigt sich auch, dass es im Bereich der Ankerpunkte zu vielen zusätzlichen Schnittpunkten kommt. Diese entstehen, da in diesen Bereichen eine starke Punkthäufung im Vergleich zu den Liniensegmenten selbst vorhanden ist. Durch die Einstellparameter des Auswertalgorithmus ist es nun prinzipiell möglich, diese vielen kleinen zusätzlichen Linien zu verhindern, indem beispielsweise die minimale Punktzahl für ein Liniensegment erhöht wird. Dies führt im Umkehrschluss allerdings auch dazu, dass einige Liniensegmente, die entweder in Realität nur sehr kurz sind, oder eventuell auch größere Datenlücken aufweisen, ebenfalls nicht mehr segmentiert werden können. Einen weiteren wichtigen Aspekt stellt an dieser Stelle die Trennbarkeit der einzelnen Schnittpunkte dar. Dabei zeigt sich, dass dies im Zentrum des Objektes gut funktioniert. Allerdings zeigt sich auch, dass im Kreuzungsbereich der diagonalen Faserstränge mit den vertikalen Fasersträngen Schnittpunkte teilweise nicht und teilweise auch mehrfach segmentiert werden.

Betrachtet man neben den geschätzten Schnittpunkten auch die geschätzten Geraden der einzelnen Liniensegmente, so zeigt sich, dass insgesamt in diesem Beispiel zu viele Liniensegmente segmentiert wurden. Dabei werden auch einzelnen Punktcluster mit großem Abstand einem Liniensegment zugeordnet, wodurch beispielsweise Liniensegmente quer durch den Fertigungsrahmen auftreten (vgl. Abbildung 6.19b rot markiertes Liniensegment). Auch für diese fehlerhaften Liniensegmente stehen mögliche Filterungen zur Verfügung. Allerdings führt dies dazu, dass damit auch reale Liniensegmente, deren Punktwolke eine Unterbrechung in der Vollständigkeit aufweist, gefiltert werden.

Daher zeigt sich anhand dieses Datensatzes sehr gut, dass die Wahl geeigneter Eingangsparameter für den Auswertalgorithmus entscheidend ist. Im Allgemeinen ist dabei die Schätzung zu vieler Liniensegmente und Schnittpunkte ($\Delta_{\text{Linie}} \leq 0, \Delta_{\text{SP}} \leq 0$) einer zu geringen Anzahl an Schnittpunkten und Liniensegmenten ($\Delta_{\text{Linie}} \geq 0, \Delta_{\text{SP}} \geq 0$) für die weitere Verarbeitung der Ergebnisse vorzuziehen, da in der weiteren Datenverarbeitung Liniensegmente einfacher gelöscht, als nachträglich konstruiert werden können. Es muss allerdings beachtet werden, dass gerade bei komplexen Testobjekten der Abstand einzelner Liniensegmente oftmals sehr gering ist, obwohl keine Interaktion dieser Faserbündel stattfindet. An diesen Stellen ist daher eine Trennung dieser relevant.



(a) Geschätzte Schnittpunktkoordinaten für die gemessene Punktwolke des Testobjektes 1, Epoche 5



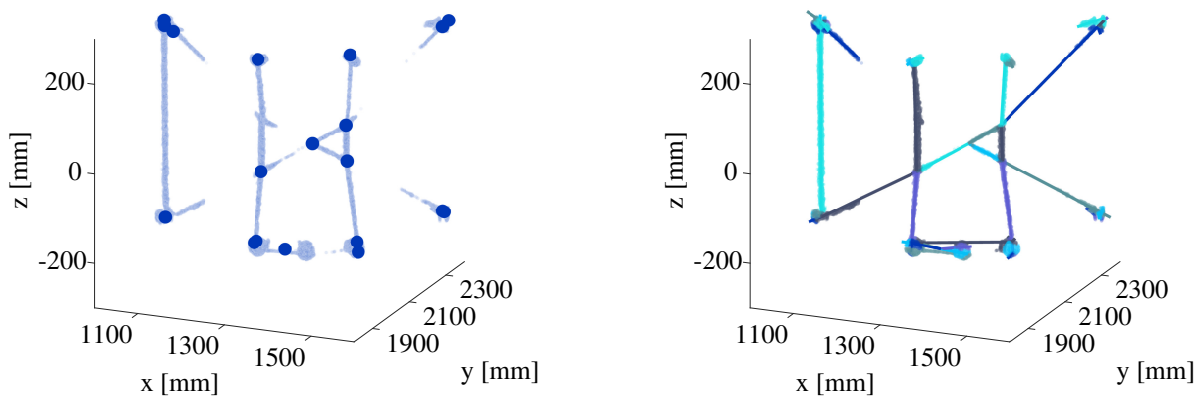
(b) Geschätzte Linien und zugeordnete Punktcluster für die gemessene Punktwolke des Testobjektes 1, Epoche 5

Abb. 6.19: Ergebnisse des Auswertalgorithmus für die gemessene Punktwolke des Testobjektes 1, Epoche 5.

Das erzielte Ergebnis ist dabei neben den Einstellparametern des Algorithmus maßgeblich von der Qualität, und dabei vor allem von der Vollständigkeit der Punktwolke abhängig. Im Folgenden werden daher die besonderen Herausforderungen an die Segmentierung genauer betrachtet.

6.4.1.1 Besondere Herausforderungen für die Segmentierung

Da es sich bei den durchgeführten Messungen um Messungen im Fertigungsprozess handelt, kommt es durch die örtlichen Gegebenheiten dazu, dass Messkonfigurationen nicht ideal gewählt werden können und dadurch eine vollständige Erfassung der Objekte nicht immer möglich ist. Diese unvollständige Erfassung stellt dabei eine Herausforderung für die Schätzung dar. Da die einzelnen Faserbündel im Allgemeinen für diesen Datensatz bereits sehr dünn sind, führen die zusätzlichen Lücken, wie sie beispielsweise in Abbildung 6.20a in den Verbindungen vom Zentrum des Testobjektes über die diagonalen Faserbündel zu den Ankerpunkten auftreten, zu Problemen bei der Schätzung der Schnittpunkte und Liniensegmente.



(a) Geschätzte Schnittpunktkoordinaten für die gemessene Punktwolke des Testobjektes 2, Epoche 3 (b) Geschätzte Linien und zugeordnete Punktcluster für die gemessene Punktwolke des Testobjektes 2, Epoche 3

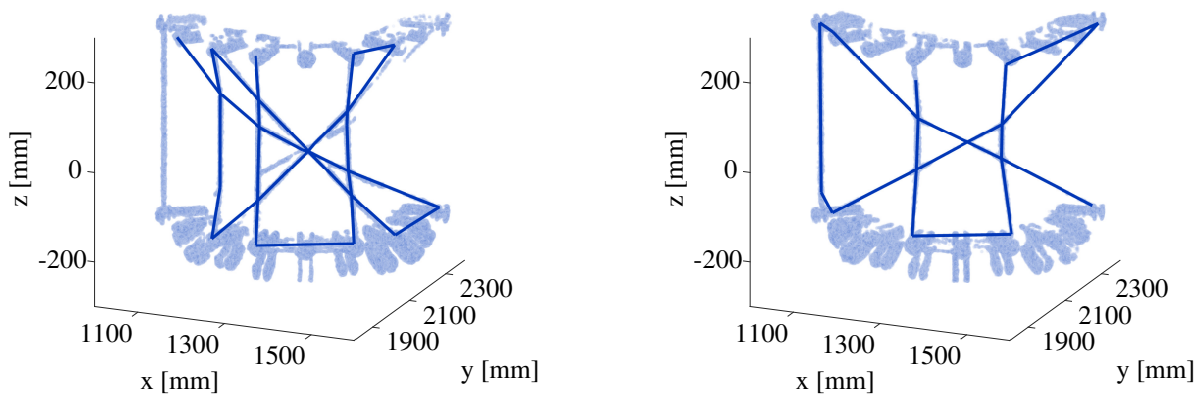
Abb. 6.20: Ergebnisse des Auswertalgorithmus für die gemessene Punktwolke des Testobjektes 2, Epoche 3.

Dieses Verhalten zeigt sich auch bei der Betrachtung der segmentierten Liniensegmente. Dabei zeigt sich, dass für den Schnittpunkt links oben, der eigentlich fünf Schnittpunkte im Zentrum des Objektes, weder ein eingehendes noch ein ausgehendes Liniensegment für den diagonalen Abschnitt segmentiert werden konnte. Der Vergleich mit der Punktwolke zeigt hier, dass an dieser Stelle nur ein sehr kleiner Ausschnitt in der Punktwolke vorhanden war. Im Vergleich dazu zeigt der obere rechte Schnittpunkt, dass hier sowohl eine Segmentierung des Schnittpunktes gelang, sowie auch die zugehörigen Liniensegmente segmentiert werden konnten, obwohl auch hier die Punktwolke lückenhaft ist. Dieser Unterschied entsteht dadurch, dass kleine Liniensegmente vom Zentrum zu den eben betrachteten Schnittpunkten existieren. Während dieses für den Schnittpunkt oben rechts vorhanden ist und damit eine Segmentierung ermöglicht, fehlt dieses für den Schnittpunkt oben links. Dadurch wird die Datenlücke insgesamt zu groß und es kann keine vollständige Segmentierung durchgeführt werden. Somit zeigt sich, dass eine vollständige Segmentierung in diesen Fällen nicht immer erreicht werden kann ($\Delta_{SP} \geq 0$), wodurch eine weitere Prozessierung der Ergebnisse notwendig wird. Da die reine Segmentierung nicht das Endergebnis des Algorithmus darstellt, wird im Folgenden der Umgang mit diesen Ergebnissen in der weiteren Prozessierung betrachtet.

6.4.2 Ergebnisse der Netzgenerierung

Im Folgenden wird der Umgang des Auswertalgorithmus mit den teilweise unvollständigen Segmentierungsergebnissen hinsichtlich der Netzgenerierung betrachtet. In Abbildung 6.21a ist dabei die generierte Netzstruktur für die Messepoche 1 des Testobjektes dargestellt. Im Vergleich zu den segmentierten Schnittpunkten und Liniensegmenten zeigt sich dabei, dass die zusätzlichen Schnittpunkte hier eliminiert wurden. Für die generierte

Syntax zeigt sich, dass der Pfad bis auf die letzten beiden Anker-Verbindungen vollständig rekonstruiert werden konnte. Dabei ist besonders auffällig, dass die horizontalen unteren Verbindungen erzeugt wurden, die in der Punktwolke nicht sichtbar waren und daher auch nicht segmentiert werden konnten. Die fehlende Diagonale hingegen weist nicht genügend Punkte für eine Segmentierung auf. Da es sich dabei um die letzte Linie des Objektes handelt, wird auch die senkrechte Hilfslinie nicht weiter betrachtet, da kein weiterer Start- oder Endpunkt existiert, zu dem ein neues Liniensegment konstruiert werden könnte. Alternativ könnte an dieser Stelle ein Liniensegment zu den Schnittpunkten der Syntax konstruiert werden. Da die Schnittpunktkoordinaten aufgrund der unterschiedlichen Detaillierungsgraden der Daten (vgl. Abbildung 4.3) sich in ihrer realen Koordinate um bis zu 1 - 2 cm unterscheiden können, wurde an dieser Stelle die Entscheidung getroffen, ein unvollständiges Netz einem fehlerhaften Netz vorzuziehen.



(a) Ergebnisse der Netzgenerierung für die gemessene Punktwolke des Testobjektes 1, Epoche 5

(b) Ergebnisse der Netzgenerierung für die gemessene Punktwolke des Testobjektes 2, Epoche 3

Abb. 6.21: Beispielhafte Ergebnisse der Netzgenerierung.

In Abbildung 6.21b ist das Ergebnis der Netzgenerierung für die Messepoche mit lückenhaftem Ergebnis dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die Bestimmung des Netzes auch aus diesen lückenhaften Daten möglich war und somit eine vollständige Netzrepräsentation des Testobjektes in der dargestellten Messepoche möglich ist. Durch das erstellte Netz ist somit eine vollständige Bestimmung der Schnittpunkte und Liniensegmente in diesem Fall möglich und es ergibt sich $\Delta_{\text{Linie}} = 0$ und $\Delta_{\text{SP}} = 0$. Eine Ausnahme bildet hier die fünfte Epoche des Testobjektes 1. Da die Netzgenerierung an dieser Stelle nicht vollständig durchgeführt werden konnte, ergibt sich $\Delta_{\text{Linie}} = 6$ und $\Delta_{\text{SP}} = 3$.

Anhand der beiden Beispiele zeigt sich, dass einzelne fehlende Liniensegmente prinzipiell rekonstruiert werden können und somit eine vollständige Repräsentation der charakteristischen Geometrie des Objektes erstellt werden kann, auch wenn der gemessenen Datensatz Lücken aufweist. Allerdings ist dabei der Ort der auftretenden Lücke entscheidend, um eine Rekonstruktion zu ermöglichen.

6.4.2.1 Besonderheiten bei der Netzgenerierung mit zwei Robotern

Eine besondere Herausforderung bei der Netzgenerierung stellt nun die Fertigung mit zwei Robotern dar, da die segmentierten Liniensegmente der Punktwolke nicht direkt einem der beiden Roboter zugeordnet werden können. Es kann sich bei einem Liniensegment der Netzgenerierung zwar um ein korrektes Liniensegment für die gesamte Syntax des Testobjektes handeln, allerdings nicht um ein korrektes Liniensegment für den betrachteten Roboter. Zusätzlich muss folglich beachtet werden, mit welchem Roboter die jeweilige Epoche gefertigt wurde und welche vorherigen Epochen ebenfalls mit diesem gefertigt wurden. In Abbildung 6.22 ist

der Vergleich des Ergebnisses einer Netzgenerierung mit einem Roboter (vgl. Abbildung 6.22a) und mit zwei Robotern (vgl. Abbildung 6.22b) dargestellt. Dabei zeigt sich direkt, dass das Netz der dargestellten Epoche nur den Teil der Syntax darstellt, der zum in dieser Epoche fertigenden Roboter gehört. Dies zeigt sich daran, dass in diesem Fall die beiden senkrecht verlaufenden Liniensegmente nicht vorhanden sind, da sie mit dem anderen Fertigungsroboter gefertigt wurden. Im Gegensatz dazu zeigt die Fertigung mit einem Roboter die Syntax der gesamten Struktur.

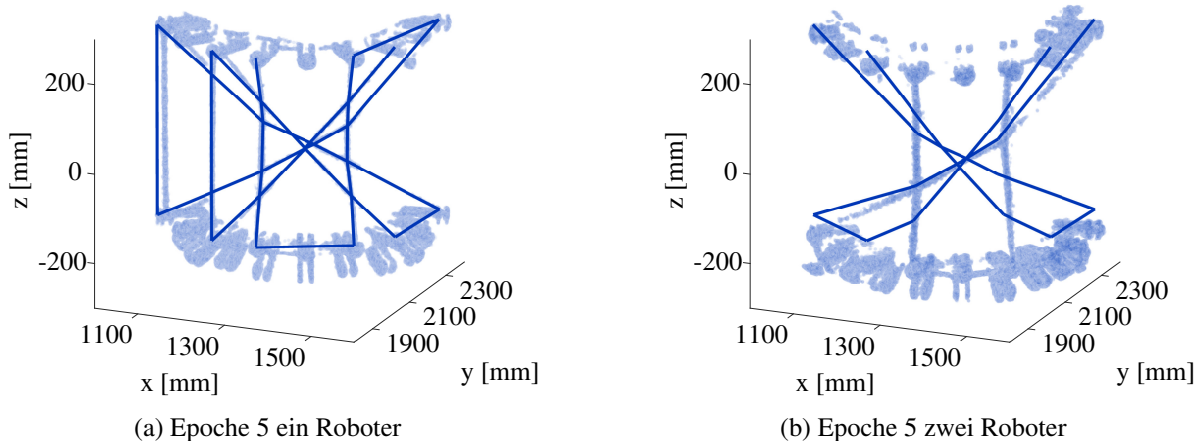


Abb. 6.22: Darstellung der Punktwolken für das Testobjekt 2 und 3 in der Fertigung mit generiertem Fasernetz.

Neben der Problematik der Zuordnung der einzelnen Liniensegmente zu einem Roboter ist zusätzlich der Punkt entscheidend, dass in diesen Fällen durch die Verwendung zweier Roboter auch zwei Roboter im Messaufbau berücksichtigt werden müssen. Dies schränkt die Wahl der möglichen Standpunkte für die Messung weiter ein, wodurch mit mehr Lücken in den Punktwolken zu rechnen ist.

6.4.3 Zusammenfassung der Ergebnisse für die Messungen im Fertigungsprozess

Zusammenfassend zeigt sich für die Anwendung des Qualitätssicherungskonzeptes auf die Messungen in der Fertigung, dass diese von den bisher betrachteten die größte Herausforderung, sowohl für die Messung als auch für die Auswertung der Messungen darstellt. Für die Messungen zeigte sich dabei, dass vor allem bei der Fertigung mit zwei Robotern die Anzahl der Standpunkte für die Messung eher erhöht werden sollte, sofern die örtlichen Gegebenheiten dies zulassen. Für die Auswertung der Messdaten zeigte sich, dass die Wahl der Algorithmusparameter entscheidend für das Segmentierungsergebnis ist. Dabei ist darauf zu achten, keine Überanpassung der Parameter auf eine spezifische Stelle des Testobjektes durchzuführen, da dies sonst an anderen Stellen zu einer unvollständigen Segmentierung führen kann. Auch zeigt sich, dass in diesem Fall die Schätzung von zu vielen Schnittpunkten und Liniensegmenten zu bevorzugen ist, da eine spätere Auswahl der korrekten Segmente einfacher ist als die Rekonstruktion fehlender Liniensegmente. Durch die einzelnen Schritte des Auswertalgorithmus können somit unterschiedliche Schwächen der einzelnen Schritte des Algorithmus, wie beispielsweise in der Segmentierung, durch die anschließenden Schritte korrigiert werden und somit trotz unvollständiger oder inkorrekt erster Schätzung eine vollständige und korrekte Netzgenerierung und damit auch die vollständigen Anzahl an Liniensegmenten und Schnittpunkten erreicht werden.

Im Vergleich mit den bisherigen Auswertungen zeigt sich vor allem, dass die dünnere Faserstärke hier ebenfalls die Grenzen des Messkonzeptes aufzeigt und eine weitere Verringerung dieser eine Messung stark erschweren oder unmöglich machen würde. Eine weitere Herausforderung dieses Datensatzes bestand in der Komplexität der einzelnen Strukturen. Obwohl die Objektgrößen hier vergleichbar oder auch kleiner sind als bei den bisherigen

Auswertungen, zeigt sich, dass vor allem die dicht beieinander liegenden Schnittpunkte eine Herausforderung darstellen. Allerdings war auch hier die Trennung der einzelnen Schnittpunkte erfolgreich.

6.5 Demonstrator - Hybrid Flax Pavillion

Für einen letzten Test des Auswertalgorithmus wird dieser auf einen Demonstrator angewendet. Die besondere Herausforderung besteht dabei in der Größe des Objektes. Dies führt zum einen zu einer deutlich größeren Punktzahl in der Punktwolke, was einen erheblichen Einfluss auf die Rechenzeit des Algorithmus hat. Zum anderen führt die Größe des Bauteils auch dazu, dass es zu mehr Verdeckungen in der Erfassung kommen kann und dadurch eine vollständige Erfassung des Bauteils schwieriger wird. Im Folgenden wird daher zunächst die Punktwolke hinsichtlich der erreichten Vollständigkeit betrachtet. Anschließend wird der Auswertalgorithmus zunächst auf ein Teilstück des Testobjektes angewendet, um den Algorithmus hinsichtlich der Möglichkeit der Segmentierung der Naturfasern zu betrachten. In einem letzten Schritt wird dann der Algorithmus auf das gesamte Bauteil angewendet.

6.5.1 Untersuchung der Vollständigkeit der erfassten Punktwolke

Im ersten Schritt der Analyse wird zunächst die Vollständigkeit der erfassten Punktwolke betrachtet. Die erfasste Punktwolke ist dabei in Abbildung 6.24 dargestellt. Die Analyse dieser zeigt, dass die äußere Geometrie des Bauteils trotz dessen Größe gut erfasst werden kann. Einzig in den Randbereichen zeigt sich eine deutlich geringere Punktdichte. Diese ergibt sich aus der Geometrie des Bauteils. Da sich die Faserbündel an diesen Stellen dichter an der Holzplatte befinden, ist eine Erfassung schwierig. Ein weiterer Unterschied in der Vollständigkeit der erfassten Punktwolke zeigt sich beim Schnitt durch die Punktwolke. Dabei zeigt sich, dass nur der äußere Rand der Form, nicht aber die Geometrie der Faserbündel im Inneren erfasst werden konnte. In Abbildung 6.23 ist ein Ausschnitt eines Schnittes durch das Objekt dargestellt. Der dargestellte Ausschnitt ist dabei entlang der Achsen des Koordinatensystems ausgerichtet, wobei die z -Achse die Stärke der Netzstruktur darstellt. Dabei zeigt sich, dass diese im Maximum bei etwa 40 mm liegt. Dies entspricht in etwa der Faserstärke an den Schnittpunkten. In den meisten Fällen liegt die Stärke allerdings eher im Bereich von wenigen Millimetern, was als Messrauschen betrachtet werden kann. Damit zeigt sich, dass eine vollständige Erfassung der innen liegenden Seiten der Faserstränge nicht möglich ist. Eine Schätzung der Querschnittsflächen für dieses Objekt ist daher auf diese Weise nicht möglich.

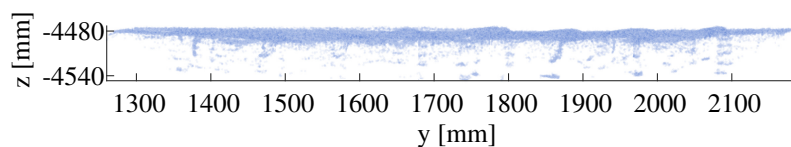


Abb. 6.23: Schnitt durch die Punktwolke des Testobjektes des Hybrid Flax Pavillion zur Untersuchung der erfassten 3D-Geometrie.

Damit zeigt sich, dass die äußere Hülle des Bauteils mit einer vergleichbaren Vollständigkeit als bei den kleineren Testobjekten erfasst werden kann. Allerdings ist eine vollständige 3D-Erfassung des Bauteils nicht möglich. Dies liegt zum einen an der geschlossenen Form des Bauteils, da dadurch Messungen aus zwei unterschiedlichen Richtungen nicht zu einer vollständigen Repräsentation führen. Zum anderen liegen die einzelnen Faserbündel des Bauteils so eng beieinander, dass auch eine Messung durch die Zwischenräume der Struktur nicht zu einer vollständigen Erfassung führt. Aus diesem Grund werden im Folgenden die Querschnitte der einzelnen Liniensegmente für diesen Datensatz nicht weiter betrachtet.

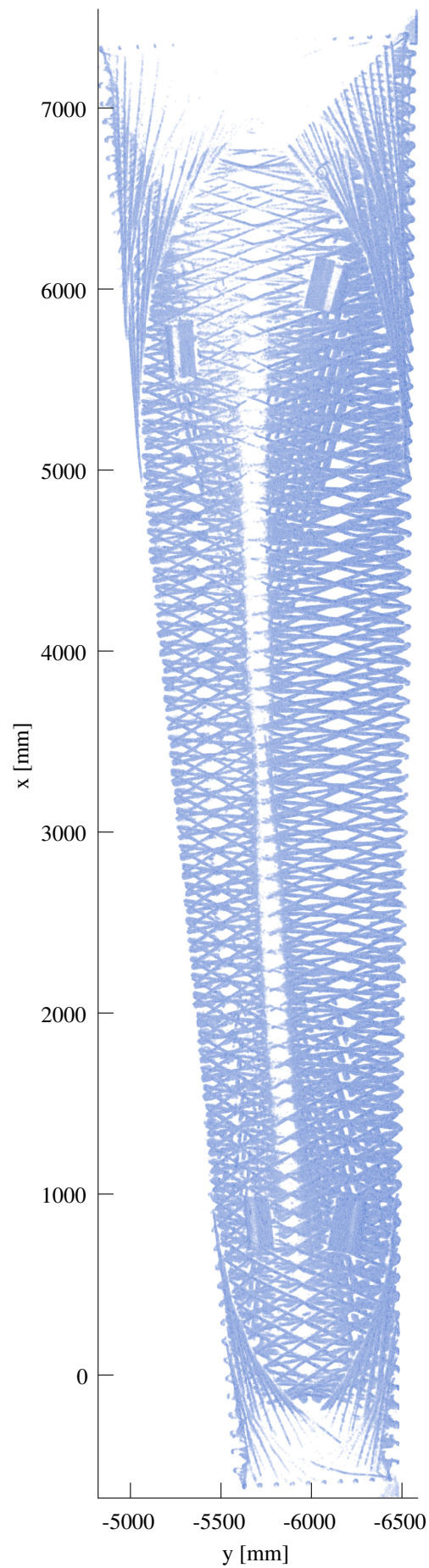


Abb. 6.24: Punktwolke des Testobjektes des Hybrid Flax Pavillon.

6.5.2 Untersuchung der Ergebnisse eines Ausschnitts des Bauteils

Im Folgenden wird zunächst ein Ausschnitt des Bauteils genauer betrachtet. Der gewählte Ausschnitt ist dabei in Abbildung 6.25 dargestellt. Anhand dieses Ausschnitts soll dabei zum einen die Auswertung im Hinblick auf die Komplexität der Struktur untersucht werden. Zum anderen soll der Einfluss des Material, in diesem Fall der Naturfasern, auf die Messung und Auswertung betrachtet werden.

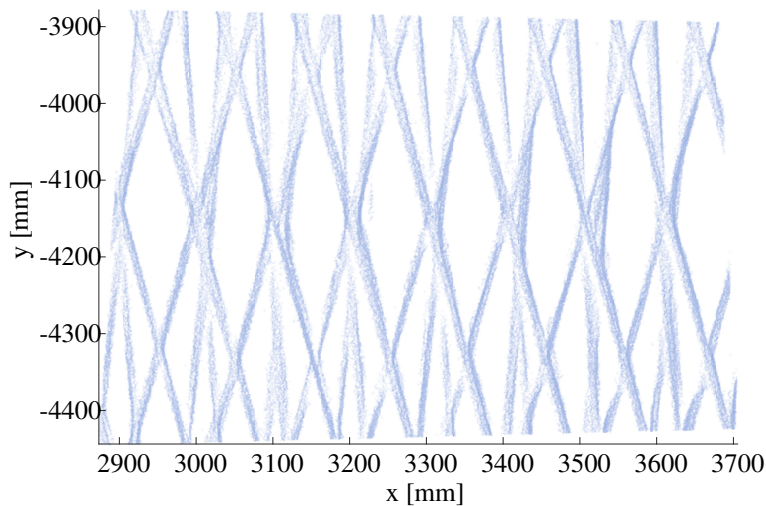


Abb. 6.25: Punktwolke des Testobjektes des Hybrid Flax Pavillon.

6.5.2.1 Analyse hinsichtlich der Komplexität

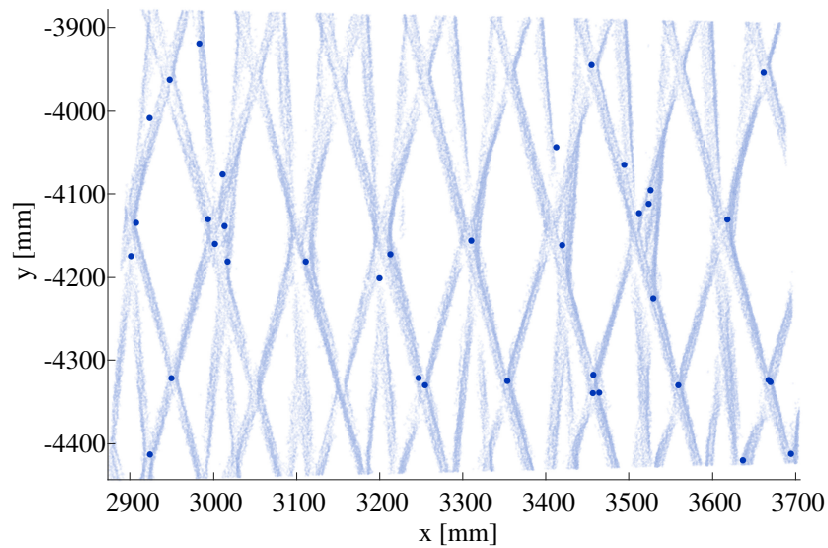
Zunächst wird nun der Einfluss der Komplexität der Fasersyntax auf das Ergebnis des Auswertealgorithmus betrachtet. Die Ergebnisse für den gewählten Ausschnitt sind dabei in Abbildung 6.26 dargestellt. Für die Segmentierung der Schnittpunkte (vgl. Abbildung 6.26a) zeigt sich dabei, dass die horizontal verteilten Schnittpunkte in der Mitte des Ausschnitts größtenteils segmentiert werden konnten. Die Schnittpunkte im unteren Drittel des Bauteils wurden hingegen nur im rechten Teil des Ausschnitts segmentiert. Dies deutet auf einen erhöhten Einfluss der Messanordnung, und damit der Punktdichte, auf das Ergebnis der Segmentierung hin. Betrachtet man hier die auftretenden Punktdichten, so zeigt sich, dass in diesem rechten Bereich, in dem die Schnittpunkte segmentiert werden konnten, die Punktwolke etwas dunkler wirkt, was auf eine höhere Punktdichte in diesem Bereich hindeutet.

Werden nun zusätzlich die segmentierten Linien betrachtet, zeigt sich, dass diese größtenteils segmentiert werden konnten. Probleme treten stellenweise in Bereichen der Schnittpunkte auf, da Liniensegmente über einen Schnittpunkt hinweg segmentiert werden. Dies spricht dafür, dass bei dem hier betrachteten Testobjekt die Richtungsänderung, der durch die Liniensegmente geschätzten Geraden, weniger stark ausfällt, im Vergleich zu den bisherigen betrachteten Bauteilen. Dies hat zur Folge, dass Liniensegmente häufig über einen Schnittpunkt hinweg segmentiert werden.

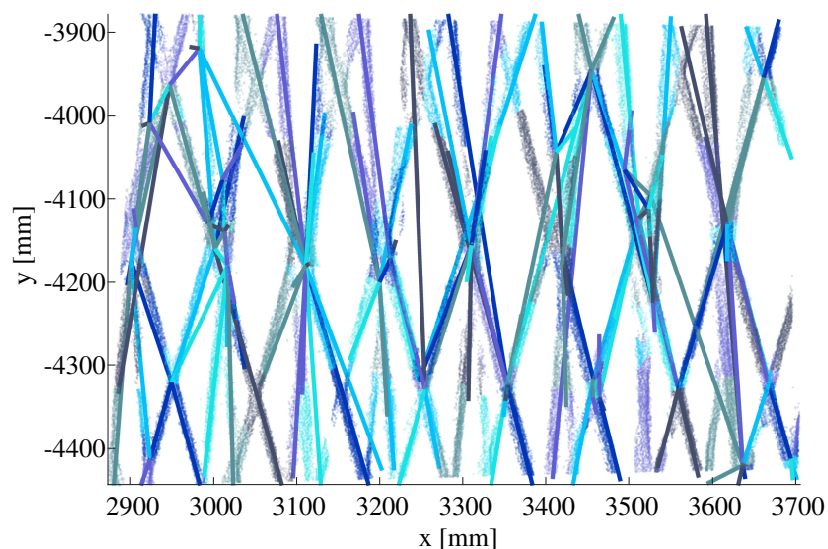
Auch zeigt sich, dass es gerade im Bereich der zentralen Schnittpunkte zu fehlerhaften Segmentierungen kommt, wodurch falsche Geradenparameter geschätzt werden. Alles in allem werden allerdings auch hier, wie bei den bisher betrachteten Testobjekten eher zu viele Liniensegmente geschätzt als zu wenige. Der Unterschied in der Qualität des Auswerteergebnisses besteht nun darin, dass für diese Struktur die Netzstruktur nicht bestimmt werden kann, da es sich nur um einen Ausschnitt handelt, der somit keine vollständige Pfadgenerierung zulässt. Die Verbindung der einzelnen Liniensegmente liefert hier nun nicht den Vorteil, der in den anderen Testobjekten durch die Netzgenerierung erreicht werden konnte. Damit ist eine Segmentierung aller Schnittpunkte hier nicht möglich und es ergibt sich $\Delta_{\text{Linie}} \geq 0$ und $\Delta_{\text{SP}} \geq 0$.

Eine weitere Auffälligkeit bei der Betrachtung der Liniensegmente ist, dass das Volumen, das ein Schnittpunkt

im Fasernetz einnimmt im Vergleich zu den bisherigen Testobjekten größer ist (vgl. Abbildung 6.13). Dadurch ist die Bestimmung des realen Schnittpunktes für diese Struktur komplexer im Vergleich zu den bisherigen.



(a) Geschätzte Schnittpunktkoordinaten für einen Ausschnitt der gemessenen Punktwolke des Bauteils



(b) Geschätzte Linien und zugeordnete Punktcluster für einen Ausschnitt der gemessenen Punktwolke des Bauteils

Abb. 6.26: Ergebnisse des Auswertalgorithmus für einen Ausschnitt der gemessenen Punktwolke des Bauteils.

6.5.2.2 Analyse hinsichtlich der Verwendung von Naturfasern

Da dieses Objekt das erste der betrachteten Testobjekte ist, das nicht aus Karbonfasern gefertigt wurde, wird der Einfluss der Naturfasern auf die Messung und Auswertung näher betrachtet. Für die Messung zeigt sich dabei, dass eine Erfassung der Objekte mit vergleichbarem Messaufbau als auch für die Elemente aus Karbonfasern möglich ist und sich durch einen visuellen Vergleich keine direkten Effekte in den gemessenen Daten feststellen lassen (vgl. Abbildung 6.24). Bei der Auswertung zeigt sich, dass die Bestimmung der Schnittpunkte im

Vergleich zu den Bauteilen aus Karbonfasern etwas schlechter funktioniert und diese somit unvollständiger segmentiert werden können. Dieser Effekt tritt allerdings weniger aufgrund des verwendeten Materials, sondern eher durch die Stärke der einzelnen Faserstränge, die bei den verwendeten Naturfasern höher ist, als bei den verwendeten Karbonfasern, auf. Nimmt die Materialstärke zu, so bilden sich an den Schnittpunkten größere ellipsenförmige Körper, deren Mittelpunkte als Schnittpunkte geschätzt werden müssen. Je höher die Faserstärke und je mehr Liniensegmente sich dann in einem Schnittpunkt treffen, desto mehr unterscheidet sich der reale Schnittpunkt von der mathematischen Definition eines Punktes, was die Schätzung erschwert.

Auch ist an dieser Stelle eine Trennbarkeit des Einflusses des Materials und der Größe des Demonstrator Bauteils nicht möglich.

Ein Einfluss, der an dieser Stelle nicht beachtet wird, ist der Einfluss des Materials auf die Distanzmessung des Laserscanner. Wie in Abschnitt 4.2.1 diskutiert, ist der Grenzwert der Intensitätswerte entscheidend für die Erfassung der Randbereiche des Objektes. Da sich die Naturfasern in dieser Hinsicht von den Karbonfasern unterscheiden, müsste an dieser Stelle das Verhalten der Messungen im Randbereich ebenfalls untersucht werden.

6.5.3 Betrachtung der Ergebnisse für das gesamte Bauteil

Zuletzt werden nun die Ergebnisse des Auswertalgorithmus für das gesamte Bauteil betrachtet. Dabei sind in Abbildung 6.27 die segmentierten Schnittpunkte und in Abbildung 6.28 die segmentierten Liniensegmente und Punktkluster dargestellt.

Bei der Betrachtung der segmentierten Schnittpunkte zeigt sich, dass über das gesamte Objekt hinweg Schnittpunkte segmentiert werden konnten, sich allerdings die Dichte der segmentierten Schnittpunkte stark unterscheidet. Auffallend ist dabei, dass sich dabei zwei Häufungszonen bilden. Diese liegen dabei zum einen in der Mitte des oberen Drittels des Bauteils, sowie im unteren Drittel des Bauteils (vgl. Abbildung 6.27). Die genauere Analyse zeigt, dass in diesen Bereichen eine dichtere Netzstruktur vorhanden ist, was damit auch zu mehr Schnittpunkten führt. Somit ist das auftretende Verhalten korrekt. Eine weitere Auffälligkeit ist, dass die segmentierten Schnittpunkte nahezu symmetrisch zu einer Achse parallel der x -Achse durch die Mitte des Objektes liegen. Da die Messungen in einem symmetrischen Aufbau um das Objekt durchgeführt wurden, zeigt sich hier, dass die Qualität der Punktwolke auf beiden Seiten identisch ist und auch die Effekte, die durch den Auswertalgorithmus auftreten auf beiden Seiten auftreten. Der mittlere Abschnitt des Bauteils (in x -Richtung) zeigt, dass die Schnittpunkte mit den größeren Abständen zueinander relativ zuverlässig segmentiert werden konnten. Dies zeigt, dass sich der Auswertalgorithmus prinzipiell auch auf größere Bauteile anwenden lässt, aber für eine vollständige Segmentierung über das gesamte Bauteil unterschiedliche Stellparameter des Algorithmus für unterschiedliche Bauteilabschnitte benötigt werden.

Die Analyse der segmentierten Liniensegmente in Abbildung 6.28 zeigt, dass die Richtungen der einzelnen Fasersegmente größtenteils korrekt segmentiert werden konnten, wobei auch einige Ausreißer auftreten, deren Schätzung weit entfernte Punktkluster verbindet und so die Generierung von geschätzten Geraden über große Abschnitte des Bauteils erzeugt. Besonders zeigt sich bei der Analyse, dass in den Randbereichen des Bauteils, in Abbildung 6.28 der obere und untere Teil, dass hier die einzelnen Liniensegmente sehr gut segmentiert werden konnten und somit die Struktur des Objektes klar sichtbar ist.

Wie auch bereits für den Ausschnitt des Bauteils ist auch an dieser Stelle sichtbar, dass im Allgemeinen über das ganze Bauteil eher zu viele Linien segmentiert werden. Allerdings lässt sich auch hier, trotz der Betrachtung der Gesamtstruktur, die Netzgenerierung nicht mehr zuverlässig durchführen, wodurch die entstehenden zusätzlichen Liniensegmente nur schwer aussortiert werden können. Die Alternative, die Sensitivität des Algorithmus zu verändern, um direkt die Anzahl der segmentierten Liniensegmente zu minimieren, hat sich hier ebenfalls als nicht zielführend erwiesen, da dies an anderer Stelle zu Schwierigkeiten in der Schätzung führt.

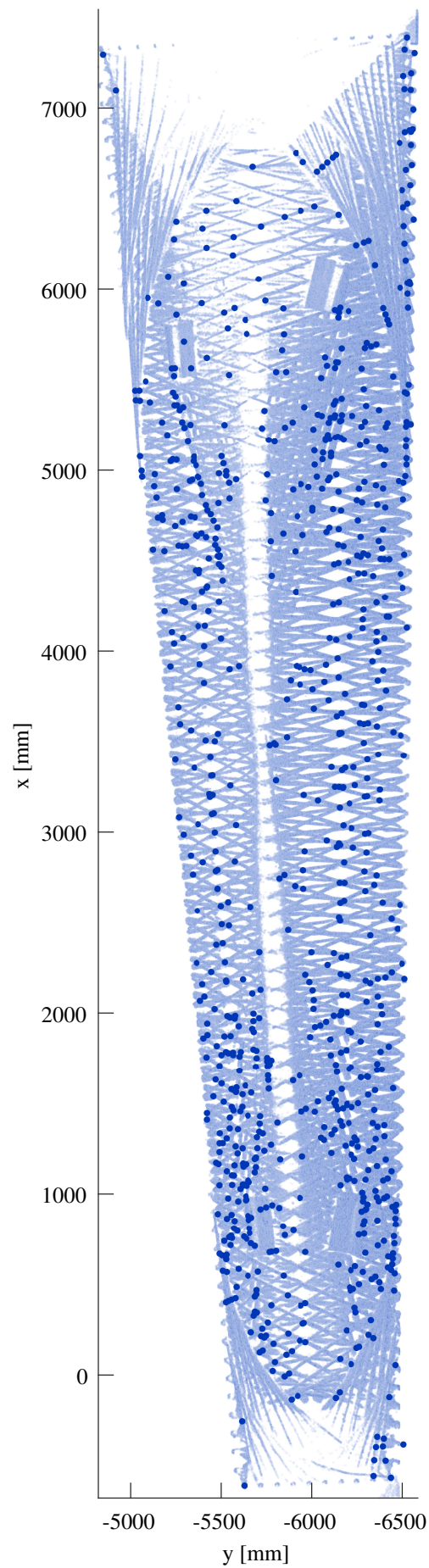


Abb. 6.27: Geschätzte Schnittpunktkoordinaten der gemessenen Punktwolke des Bauteils.

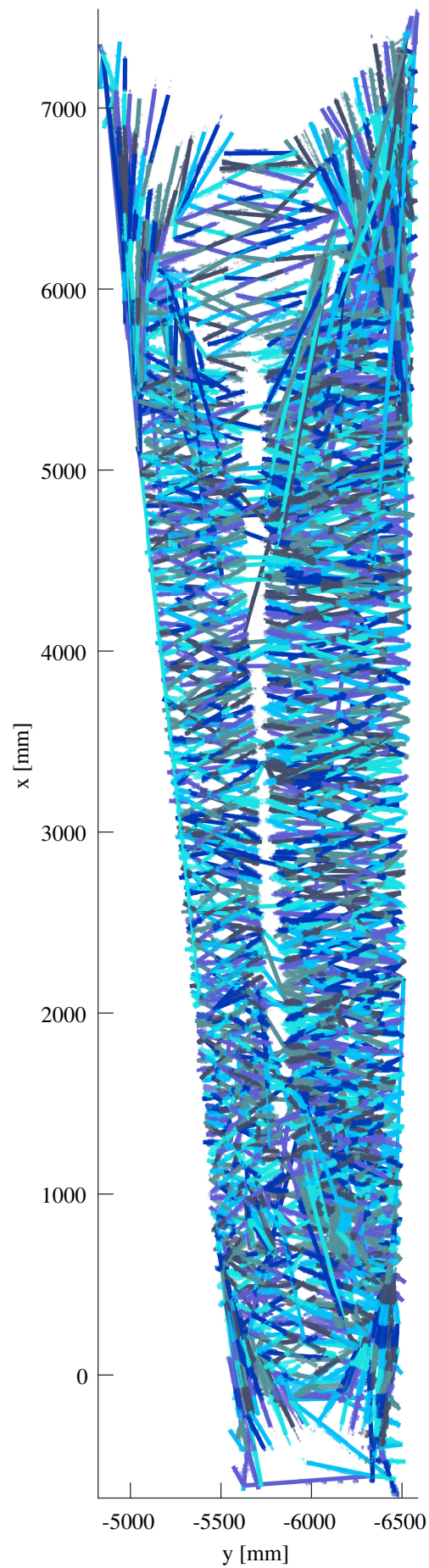


Abb. 6.28: Geschätzte Linien und zugeordnete Punktcluster der gemessenen Punktwolke des Bauteils.

An dieser Stelle ist die genaue Anzahl der Soll-Liniensegmente und Schnittpunkte nicht bekannt, so dass nur festgestellt werden kann, dass $\Delta_{SP} \geq 0$. Für die Liniensegmente kann keine Aussage getroffen werden, da die Korrektheit der einzelnen Liniensegmente nicht überprüft werden kann.

6.5.4 Zusammenfassung der Ergebnisse für das Reale Bauteil - Hybrid Flax Pavillion

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der in dieser Arbeit entwickelten Mess- und Auswerteprozess sich auch auf große Strukturen und damit reale Bauteile anwenden lässt. Die Unterschiede liegen dabei, im Bezug auf die Messung, vor allem in der Sichtbarkeit und damit der Möglichkeit alle Abschnitte des Bauteils vollständig erfassen zu können. Dies ist vor allem, bei Hohlstrukturen der Innenbereich des Bauteils, da hier keine oder eine nur stark eingeschränkte Sicht möglich ist. Dies führt dazu, dass die Bestimmung der Querschnittsflächen für diese Strukturen nicht möglich ist. Wird allerdings nur die Fläche des Objektes vergrößert und es handelt sich nicht um eine Objekt mit Hohlraum ist auch hier die Bestimmung der Querschnittsflächen möglich. Bei der Segmentierung der Liniensegmente und Schnittpunkte zeigt sich, dass diese im Allgemeinen zu vergleichbaren Ergebnissen, wie bei kleineren Testobjekten führt. Der Unterschied besteht hierbei vor allem darin, dass die Netzgenerierung für diese Objekte bislang nicht durchgeführt werden und somit eine Nachverarbeitung der segmentierten Liniensegmente nicht zuverlässig durchgeführt werden kann.

Im Hinblick auf die hier verwendeten Naturfasern zeigt sich, dass der Algorithmus auch für diese angewendet werden kann, die Stellgrößen des Algorithmus allerdings stark angepasst werden müssen. Hinsichtlich der Messung können auch diese mittels TLS durchgeführt werden, wobei die genaue Interaktion der Naturfasern und des Laserstrahls weiter betrachtet werden sollte.

6.6 Zusammenfassung der Qualitätsparameter

Die betrachteten Ergebnisse werden nun noch einmal zusammenfassend anhand der in Tabelle 4.6 dargestellten Qualitätsparameter betrachtet. Die Erfassung der Vollständigkeit der Punktwolke wird dabei an dieser Stelle nicht berücksichtigt, da sich diese nicht durch einen numerischen Wert direkt beschreiben lässt. Es werden daher die Qualitätsparameter der Liniensegmente, Schnittpunkte und Querschnittsflächen betrachtet. Zur besseren Übersicht werden in Tabelle 6.9 zunächst die Qualitätsparameter für die Liniensegmente und Schnittpunkte betrachtet.

Für diese zeigt sich, dass die Vollständigkeit der Schätzung der Liniensegmente und Schnittpunkte mit Ausnahme von drei Fällen für die Liniensegmente und vier Fällen für die Schnittpunkte erfüllt ist. Für die Testobjekte, in denen die Vollständigkeit nicht vollständig erfüllt werden kann, zeigt sich, dass es sich dabei immer um Objekte handelt, in denen keine Netzgenerierung durchgeführt werden kann. Für die Abweichung der Schnittpunktkoordinaten zeigt sich ebenfalls, wie bereits in den vorherigen Abschnitten diskutiert, dass die größten Abweichungen in der z -Koordinate an den Ankerpunkten auftreten.

Anschließend werden nun die Qualitätsparameter für die Querschnittsflächenberechnung betrachtet. Diese sind in Tabelle 6.10 dargestellt. Dabei zeigt sich zunächst, dass die Querschnittsflächen mit Ausnahme von einem Testobjekt vollständig erfasst werden konnten. Wird allerdings eine Filterung der berechneten Querschnitte hinsichtlich der Korrektheit durchgeführt, fällt auf, dass die Vollständigkeit an den Stellen der Datenlücke der Punktwolke nicht mehr erreicht wird. Auch zeigt sich, dass die Vollständigkeit bei der Berechnung mittels konvexer Hülle im Vergleich zu den Alpha-Shapes für TLS-Daten höher ist.

Tab. 6.9: Zusammenfassung der bestimmten Qualitätsparameter für die berechneten Liniensegmente und Schnittpunkte.

Abschnitt	Testobjekt	Δ_{Linie}	Δ_{SP}	dx [mm]		dy [mm]		dz [mm]		d_{3D} [mm]	
				$ dx_{\min} $	$ dx_{\max} $	$ dy_{\min} $	$ dy_{\max} $	$ dz_{\min} $	$ dz_{\max} $	$ d_{3D_{\min}} $	$ d_{3D_{\max}} $
6.1.1	S1 SIM	0	0	0,014	1,842	0,066	3,628	0,129	7,213	0,147	8,282
6.1.2	S2 SIM	0	0	0,407	3,366	0,132	4,118	0,391	14,718	0,588	15,649
6.1.3	S3 SIM	10	9	0,102	3,034	0,099	3,987	0,247	1,361	0,873	4,195
6.2.1.1	8-Element eine Linie	0	0	—	—	—	—	—	—	—	—
	8-Element zwei Linien	0	0	—	—	—	—	—	—	—	—
6.2.2	X-Element (ATOS/TLS)	0	0	—	—	—	—	—	—	—	—
6.3.1	S1	0	0	—	—	—	—	—	—	—	—
6.3.2	S2	0	2	—	—	—	—	—	—	—	—
	S3	10	10	—	—	—	—	—	—	—	—
6.3.3	S2 (Anker)	0	0	0,312	1,408	0,037	1,113	0,072	3,101	0,646	3,203
	S3 (Anker)	0	0	0,006	1,908	0,024	1,163	0,297	1,602	0,776	2,214
6.4	Testobjekt 1 Epoche 1-4	0	0	—	—	—	—	—	—	—	—
	Testobjekt 1 Epoche 5	6	3	—	—	—	—	—	—	—	—
	Testobjekt 2 Epoche 1-5	0	0	—	—	—	—	—	—	—	—
	Testobjekt 3 Epoche 1-5	0	0	—	—	—	—	—	—	—	—
	Demonstrator- bauteil	> 0	> 0	—	—	—	—	—	—	—	—

Tab. 6.10: Zusammenfassung der bestimmten Qualitätsparameter für die berechneten Querschnittsflächen.

Abschnitt	Testobjekt	Δ_A	d_A [mm ²]
6.1.1	S1 SIM alle Flächen	0	—
	S1 SIM 30 konvexe Hülle	0,372	konvexe Hülle
	Flächen gefiltert 37 Alpha-Shape	0,784	Alpha-Shape
6.2.1.2	8-Element TLS/ATOS	0	0,12
6.3.1	S1	> 0	—
6.3.4	S2 (Ausschnitt)	0	0,71
	Mikroschliffbild		

6.7 Laufzeitvergleich

Die in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse wurden auf einem System mit einem AMD Ryzen™ 9 7900 12-Kern-Prozessor und 128 GB RAM durchgeführt.

Die Rechenzeit lässt sich dabei unterteilen in die Segmentierung und Netzgenerierung, sowie die Querschnittsflächenberechnung. Die Laufzeit der Segmentierung und Netzgenerierung betrug dabei, in Abhängigkeit vom betrachteten Testobjekt zwischen 5 und 20 Minuten. Hierbei ist allerdings die Anzahl der K-Means Cluster

entscheidend, da die Hough-Transformation für die einzelnen Cluster parallel durchgeführt werden kann. Für die Laufzeit der Querschnittsflächenberechnung ist es entscheidend, ob die der α -Parameter der Alpha-Shapes vorgegeben wird oder bei der Berechnung für jede Fläche geschätzt werden muss. Da sich zeigt, dass eine individuelle Schätzung des α -Parameter notwendig ist. Es ergaben sich Laufzeiten von ca. 10 Sekunden bis zu 30 Minuten pro Querschnitt. Dabei ist die Anzahl der Punkte pro Querschnitt entscheiden, weshalb die Laufzeit für die ATOS-Messungen eher im Bereich 5-30 Minuten und für die TLS-Messungen eher im Bereich von 10 Sekunden bis 5 Minuten liegt. Bei Elementen mit ca. 120 Querschnitten ergaben sich damit im Mittel Laufzeiten von etwa 8 Stunden für die Auswertung der ATOS-Messungen und etwa einer Stunde für die TLS-Messungen. Eine Parallelisierung der Querschnittsflächenberechnung ist dabei aktuell nicht integriert.

7 Fazit und Ausblick

7.1 Erreichte Ziele des entwickelten Qualitätssicherungssystems

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Qualitätssicherungskonzept für die Planung und Fertigung von Bauteilen aus kernlosen Faserverbundsystemen entwickelt. Dafür wurden zunächst die entscheidenden Kontroll- und Entscheidungspunkte für die finale Qualität eines Bauteils herausgearbeitet und die relevanten Qualitätsmerkmale und -parameter definiert. Mit einem Schwerpunkt auf der geometrischen Qualität der Bauteile und damit verbunden der Extraktion der geometrischen Kenngrößen im Detaillierungsgrad der Planung stand die Vermessung mittels terrestrischer Laserscanner im Fokus der Untersuchung. Dabei zeigt sich, dass für die hier betrachtete Anwendung, mittels eines Laserscanners, der das Impulslaufzeitverfahren verwendet, bessere Ergebnisse erzielt werden können, als mittels Laserscannern, die das Phasenvergleichsverfahren zur Streckenmessung verwenden. Um zusätzlich den Einfluss des Materials auf die Qualität der Messung untersuchen zu können, wurden Messungen mit und ohne Verwendung eines Scanningsprays durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die gemessene Geometrie sich in den Randbereichen um etwa zwei bis drei Laserspots unterscheidet, was bei den verwendeten Punktabständen einem Unterschied in der Breite des Faserbündels von 6 mm entspricht. Um diesen Effekt genauer zu betrachten, wurden zusätzliche Referenzmessungen mit einem industriellen Messsystem durchgeführt. Der Vergleich der Punktwolken aus den Referenzmessungen, sowie den TLS-Messungen zeigte dabei, eine signifikante Korrelation zwischen den gemessenen Intensitätswerten, sowie den Abweichungen der TLS-Punktwolke von der Punktwolke der Referenzmessungen. Die Analyse der mittleren Abweichungen über die gesamte Punktwolke des Testobjektes zeigte dabei, dass diese für die Messungen ohne die Verwendung eines Scanningsprays mit 0,017 mm zu vernachlässigen sind. Im Vergleich dazu ergab sich für die Messungen unter Verwendung des Scanningsprays eine mittlere Abweichung von 0,562 mm. Damit zeigte sich, dass die Messungen ohne die Verwendung des Scanningsprays besser für den hier vorliegenden Anwendungsfall geeignet sind.

Eine weitere Einflussgröße, die die Messung selbst beeinflusst, ist die verwendete Messkonfiguration. Dabei wurden unterschiedliche Szenarien untersucht und ein Messkonzept ausgearbeitet, dass sich individuell auf unterschiedliche örtliche Gegebenheiten anpassen lässt und zudem sowohl Messungen in speziellen Halterungen, im Fertigungsrahmen, sowie in der Fertigung direkt zulässt. Damit zeigt sich, dass die Erfassung der Geometrie der unterschiedlichen Testobjekte mittels TLS sehr gut möglich ist und im Vergleich zu industriellen Messsystemen eine effiziente Lösung darstellt, um auch großflächige Objekte mit einem geringen Zeitaufwand messen zu können. Dieser geringere Zeitaufwand für die Messungen mittels TLS macht die Erfassung in der Fertigung möglich, da in diesen Fällen die Fertigung für die Messung unterbrochen werden muss, und somit die Messdauer minimal gehalten werden muss, um den Fertigungsprozess nicht zu beeinträchtigen. Hierbei ist auch von Vorteil, dass die Messungen ohne die Verwendung eines zusätzlichen Scanningsprays durchgeführt werden können, da diese Verwendung im Fertigungsprozess nicht möglich wäre, da das Scanningspray die Haftung der Fasern im weiteren Fertigungsprozess beeinflussen würde.

Neben der Entwicklung eines Messkonzeptes stellte die Erstellung eines Auswerteprozesses für die Extraktion der geometrischen Kenngrößen aus den Messungen im Detaillierungsgrad der Planung einen zentralen Aspekt dieser Arbeit dar. Um diesen automatisiert durchführen zu können, wurde ein fünfstufiger Algorithmus entwickelt. Zu Beginn wird dabei die Punktwolke in einzelne Liniensegmente segmentiert, dabei können sowohl Einstellungen bezüglich der minimalen Punktzahl als auch der Abstand der Messpunkte zu den Linien festgelegt werden. Um diese Segmentierung durchzuführen, wurde eine iterative Hough-Transformation implementiert. Optional kann der Segmentierung eine K-Means Clusterung vorangestellt werden. Ein Vorteil besteht darin, dass sich die Cluster dabei, wenn die Anzahl der Cluster, der Anzahl der Schnittpunkte entspricht, direkt um die Schnittpunkte bilden und somit die anschließende Segmentierung unterstützt werden kann. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Hough-Transformation, die dann für jedes Cluster separat durchgeführt wird, parallelisiert werden kann, was eine schnellere Prozessierung der Ergebnisse ermöglicht.

Besonders für komplexere Objekte zeigt sich dabei, dass die Anwendung der K-Means Clusterung vor der Hough-Transformation eine deutliche Verbesserung des Ergebnisses erzielt. Da die K-Means Clusterung den einzigen nicht deterministischen Anteil des Auswertalgorithmus darstellt, wurde hier auch der Einfluss variierender Ergebnisse auf die gesamte Schätzung untersucht. Dabei zeigte sich, dass die mittlere Abweichung über alle segmentierten Schnittpunkte dabei unter einem Millimeter liegt und somit der Einfluss auf die weitere Schätzung vernachlässigt werden kann.

Nach der Segmentierung erfolgt die Schätzung der Geradenparameter für die einzelnen Liniensegmente. Als weiteres Genauigkeitskriterium kann dann, je nach verwendeter Methode, entweder der Eigenwert der Hauptrichtung des für die Geradenschätzung verwendeten Punktklusters oder die geschätzten Genauigkeiten der Geradenparameter verwendet werden. Diese werden in einem nächsten Schritt für die Bestimmung der Schnittpunkte verwendet. Für die Schätzung der Schnittpunkte wurde der minimale Abstand der geschätzten Geraden betrachtet und so die Entscheidung getroffen, ob es sich bei diesen um einen realen Schnittpunkt handelt oder nicht. Die Wahl des hierfür verwendeten Grenzwertes muss dabei individuell auf das untersuchte Testobjekt angepasst werden. Alle so segmentierten Schnittpunkte werden dann zusammengefasst, um identische Schnittpunkte, in denen sich mehr als zwei Geraden schneiden, zu identifizieren. Aus allen zugeordneten Liniensegmenten, erfolgt dann eine gewichtete Schätzung des Schnittpunktes. Für die Schätzung der Liniensegmente und Schnittpunkte zeigte sich dabei, dass im Allgemeinen eine Schätzung von überschüssigen Schnittpunkten und Liniensegmenten zu bevorzugen ist, da dies in der Nachverarbeitung einfacher zu korrigieren ist, als eine Rekonstruktion fehlender Segmente und Schnittpunkte.

Nachdem die Liniensegmente und Schnittpunkte segmentiert wurden, erfolgt die Netzgenerierung und somit die Erstellung der Geometrie, die dem Detaillierungsgrad der Planung entspricht. Dabei zeigte sich, dass durch diese die überschüssigen Liniensegmente und Schnittpunkte eliminiert werden konnten und somit für die meisten Objekte eine vollständige Netzstruktur erstellt werden konnte. Voraussetzung dabei ist es, dass das vorliegende Testobjekt eine solche Struktur aufweist und nicht durch zusätzliche Hilfsbrücken gefertigt wurde, die zwischenzeitlich bereits vom Testobjekt entfernt wurden. Dabei zeigte sich, dass für alle Objekte, bei denen eine Netzgenerierung möglich war, schlussendlich eine vollständige Segmentierung der Liniensegmente und Schnittpunkte durchgeführt werden konnte.

In einem letzten Schritt der Auswertung wurden dann die Querschnittsflächen berechnet. Dabei wurden die einzelnen Liniensegmente in 10 mm große Abschnitte unterteilt und anschließend die Punkte auf eine Ebene mit dem Richtungsvektor der geschätzten Geraden als Normalenvektor der Ebene projiziert. Für diese Punkte wurde dann die Form der äußeren Hülle mittels konvexer Hülle und Alpha-Shapes bestimmt. Die Auswertung zeigt dabei, dass bei vollständigen Daten mit einer hohen Auflösung, wie beispielsweise bei den ATOS-Referenzmessungen, die Form des Querschnitts bei der Bestimmung mittels Alpha-Shape mehr Details aufweist und kleinere Änderungen in der Hülle detektiert werden können. Als Vorteil der konvexen Hülle zeigte sich dabei, dass diese auch bei lückenhaften Daten verlässliche Ergebnisse liefern kann. Auch im Vergleich zu den verfügbaren Soll-Daten liefert die konvexe Hülle eine bessere Übereinstimmung in den berechneten Querschnittsflächen. Die berechneten Querschnittsflächen zeigen dabei mit Abweichungen von $0,71 \text{ mm}^2$ zu den Referenzflächen aus Mikroschliffbildern sehr gute Ergebnisse.

Die für die Auswertung benötigten Stellparameter lassen sich dabei sowohl manuell festlegen, oder im Falle von vorhandenen Vorinformationen direkt aus den Planungsdaten ableiten. Dies bietet sich im Besonderen an für die Anzahl der K-Means Cluster, der minimale Abstand zweier Liniensegmente, oder auch der Abstand zweier Schnittpunkte. Damit kann eine einfache Anpassung an unterschiedliche Testobjekte erfolgen.

Das entwickelte Mess- und Auswertekonzept wurde dann anhand unterschiedlicher Testobjekte getestet. Dabei zeigte sich, dass das entwickelte Qualitätssicherungskonzept für Bauteile unterschiedlicher Größe und Komplexität anwendbar ist. Ebenfalls zeigte sich, dass die Größe des Testobjektes selbst einen geringen Einfluss auf die mögliche Schätzung der Geometrie hat, sondern vielmehr die Komplexität der einzelnen Bauteile und damit die Trennbarkeit zwischen einzelnen Liniensegmenten und Schnittpunkten entscheidend für die Qualität des Ergebnisses ist. Auffällig war hierbei auch, dass die Abweichungen zu bekannten Soll-Koordinaten der Schnittpunkte zum Zentrum eines Testobjektes deutlich abnahmen und damit die mittleren Abweichungen für größere Testobjekte geringer ausfielen. Auch zeigten die Auswertungen, dass die Vermessung mittels TLS

für alle Bauteile unterschiedlicher Größen ein geeignetes Messverfahren darstellt und gegenüber alternativen Methoden, wie beispielsweise industriellen oder photogrammetrischen Systemen, den Vorteil der Zeitersparnis, sowie der Unabhängigkeit von der Beleuchtungssituation bietet. Damit konnte ein flexibel einsetzbares Qualitätssicherungskonzept entwickelt werden, welches sich in einem breiten Spektrum einsetzen lässt. Ein Vorteil des entwickelten Auswertalgorithmus besteht des Weiteren darin, dass dieser sich prinzipiell auf alle Arten an Punktwolken anwenden lässt. Somit ergibt sich auch die Möglichkeit, aus 3D-Daten, wie beispielsweise einer Prozesssimulation, eine Punktwolke zu erzeugen und diese als Eingangsdaten für den Algorithmus zu verwenden. Wichtig ist dabei allerdings, dass die Punktwolken dabei nach Möglichkeit nur die Außenhülle des Objektes beschreiben sollten und nicht gefüllt sind. Andernfalls wird eine Geradenschätzung für kleine Liniensegmente schwierig. Abgesehen davon ist auch eine Kombination unterschiedlicher Datenquellen hierfür denkbar.

7.2 Grenzen des entwickelten Qualitätssicherungssystems

Die Analyse zeigte auch die Grenzen des entwickelten Systems auf. Hinsichtlich der Messung zeigt sich dabei, dass bei komplexeren Strukturen, oder insbesondere bei Strukturen, die einen Hohlraum beinhalten, eine vollständige Erfassung der gesamten Fasergeometrie nicht möglich war und dass die Innenseite der Objekte nicht erfasst werden konnte. Dieses Problem tritt allerdings auch bei den alternativ möglichen Messverfahren, wie beispielsweise der Photogrammetrie auf. Eine weitere Grenze des Auswertalgorithmus ist die Trennbarkeit einzelner Schnittpunkte, wenn deren Abstand zu gering ist. Werden die Stellparameter des Algorithmus so eingestellt, dass die einzelnen Schnittpunkte segmentiert werden können, so führt dies in anderen Bereichen der Schätzung zu Problemen.

Im Zusammenhang mit der Berechnung der Querschnittsflächen zeigte sich, dass diese vor allem in den Bereichen der Schnittpunkte zu fehlerhaften Schätzungen führt, da an diesen Stellen keine eindeutige Zuordnung der Messpunkte zu einem Segment getroffen werden konnte und es dadurch häufig zu zu großen oder zu kleinen Querschnittsflächen kommt. Allerdings muss an dieser Stelle auch beachtet werden, dass es sich in diesen Bereichen nicht mehr um einen klar definierten Querschnitt handelt. Dies gilt insbesondere dann, wenn ein Testobjekt aus mehreren Schichten gefertigt wurde und sich damit eine eher elliptische Form um den Schnittpunkt bildet.

Ein weiterer Punkt, an dem sich die Grenzen des entwickelten Konzeptes zeigen ist die Repräsentation der Ankerpunkte. An diesen Stellen ist eine Repräsentation der Fasergeometrie nicht ausreichend. Dies zeigte sich auch deutlich daran, dass Schnittpunkte, die vom Ankerpunkt betrachtet im Zentrum der Testobjekte lagen segmentiert werden konnten, während dies für Schnittpunkte zur Außenseite des Testobjektes hin nicht möglich war.

7.3 Ausblick hinsichtlich zukünftiger möglicher Erweiterungen

Aus den Grenzen des Qualitätssicherungskonzeptes ergeben sich damit auch einige mögliche Erweiterungen für zukünftige Entwicklungen. Um auch für komplexere Bauteile eine zuverlässige Segmentierung durchführen zu können, wäre es möglich das Bauteil in unterschiedliche Teilbereiche zu unterteilen. Diese Bereiche könnten dann mit unterschiedlichen Stellparametern des Auswertalgorithmus ausgewertet werden. Eine weitere Option wäre es, das gesamte Bauteil mit unterschiedlichen Stellparametern auszuwerten und eine finale Segmentierung aus allen Ergebnissen der unterschiedlichen Einstellungen zu berechnen. Ein solcher adaptiver Algorithmus könnte dabei mit vorgegebenen Eingangsparametern ausgeführt werden oder es könnten alternativ die Eingangsparametern des Algorithmus direkt aus den vorliegenden Punktwolken und Planungsdaten automatisch extrahiert werden. Ein wichtiger Aspekt ist auch die genauere Betrachtung der geschätzten Schnittpunkte, um zu identifizieren ob an diesen eine Interaktion der einzelnen Faserbündel stattfindet, oder ob diese nur lose

übereinander liegen. Dafür könnte entweder die Fläche des Schnittpunktes betrachtet werden, oder alternativ die Winkeländerung der zugehörigen Liniensegmente betrachtet werden.

Eine Möglichkeit um die Querschnittsflächenberechnung in den Bereichen der Schnittpunkte zu verbessern, wäre dabei eine Mehrfachzuordnung der Messpunkte zu ermöglichen. Damit könnten Messpunkte in den Regionen der Schnittpunkte mehreren Liniensegmenten zugeordnet werden, wodurch eine Verbesserung der Querschnitte erreicht werden kann.

Um neben den Liniensegmente auch eine korrekte Repräsentation der Ankerpunkte zu ermöglichen, wäre auch hier die Weiterentwicklung der geometrischen Repräsentation denkbar. Mögliche Ansätze wären eine B-Spline Darstellung oder eine Aufteilung in einzelne Kreissegmente, welche in die Liniensegmente übergehen.

Neben den Weiterentwicklungen im Bereich der Auswertung sind auch im Bereich der Messungen weitere Untersuchungen denkbar. Hierbei wäre die Untersuchungen der Interaktion des Laserstrahls mit weiteren Materialien, wie beispielsweise den Naturfasern, ein wichtiger Aspekt. Auch die allgemeine Betrachtung der Intensitätsgrenzwerte des TLS wäre hilfreich, um aus den vorliegenden Intensitätswerten im Zusammenhang mit der Spotgröße Rückschlüsse über den Anteil des Spots auf dem Messobjekt schließen zu können, und damit eine genauere Schätzung der äußeren Geometrie kleiner Strukturen ermöglichen zu können.

Literatur

- AESUB (2023): 3D Scanning sprays (Aerosol sprays). URL: <https://aesub.com/products/3d-scanning-spray-cans/>. Letzter Zugriff: 25.02.2025.
- Aggarwal, A., Stolkin, R., Marturi, N. (2024): Unsupervised learning-based approach for detecting 3D edges in depth maps. *Scientific reports*, Jahrgang 14, Heft 1, S. 1–16, DOI: 10.1038/s41598-023-50899-3.
- Arezoumand, R., Mashohor, S., Marhaban, M. H. (2013): Finding Objects with Segmentation Strategy based Multi Robot Exploration in Unknown Environment. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Jahrgang 97, S. 580–586, DOI: 10.1016/j.sbspro.2013.10.276.
- Bakis, C. E., Bank, L. C., Brown, V. L., Cosenza, E., Davalos, J. F., Lesko, J. J., Machida, A., Rizkalla, S. H., Triantafillou, T. C. (2002): Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction—State-of-the-Art Review. *Journal of Composites for Construction*, Jahrgang 6, Heft 2, S. 73–87, DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:2(73).
- Balangé, L., Harmening, C., Duque Estrada, R., Menges, A., Neuner, H., Schwieger, V. (2022a): Monitoring the production process of lightweight fibrous structures using terrestrial laser scanning. In: *Proceedings of the 5th Joint International Symposium on Deformation Monitoring - JISDM 2022*, 20.–22. Juni 2022, Valencia, Spanien, DOI: 10.4995/JISDM2022.2022.13830.
- Balangé, L., Schwieger, V. (2025): Possibilities and challenges of measuring small fibre composite system structures using terrestrial laser scanning. In: *Proceedings of the FIG Working Week 2025*, 6.–10. Apr. 2025, Brisbane, Australien.
- Balangé, L., Sprügel, N., Schwieger, V. (2023): Segmentierung und Modellierung von Fasern für die Qualitätssicherung von Faserverbundsystembauteilen mittels terrestrischem Laserscanning. In: Wieser, A. (Hrsg.): *Ingenieurvermessung 23. Beiträge zum 20. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Zürich*, 2023. Wichmann Verlag, Berlin, S. 117–129.
- Balangé, L., Zhang, L., Schwieger, V. (2021): First Step Towards the Technical Quality Concept for Integrative Computational Design and Construction. In: *Contributions to International Conferences on Engineering Surveying - 8th INGEO International Conference on Engineering Surveying and 4th SIG Symposium on Engineering Geodesy*, 22.–23. Okt. 2020, DOI: 10.1007/978-3-030-51953-7_10.
- Balangé, L., Zhang, L., Schwieger, V. (2022b): Qualitätssicherung im Rahmen des Exzellenzclusters Int-CDC. In: 208. DVW-Seminar: Qualitätssicherung geodätischer Mess- und Auswerteverfahren, 2.–3. Juni 2022, Berlin.
- Barbosa, F., Woetzel, J., Mischke, J. (2017): *Reinventing construction: A route of higher productivity*. McKinsey Global Institute, New York.
- Bässmann, H., Besslich, P. W. (1991): Hough-Transformation. In: Bässmann, H., Besslich, P. W. (Hrsg.): *Bildverarbeitung ad oculos*. Springer, Berlin und Heidelberg, S. 101–121.
- Batini, C., Cappiello, C., Francalanci, C., Maurino, A. (2009): Methodologies for data quality assessment and improvement. *ACM Computing Surveys*, Jahrgang 41, Heft 3, S. 1–52, DOI: 10.1145/1541880.1541883.
- Bell, T., Li, B., Zhang, S. (2000): Structured Light Techniques and Applications. In: Webster, J. G. (Hrsg.): *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*. Wiley, Hoboken, USA, S. 1–24.
- Bellok, K. E. (2022): Alpha Shape Toolbox Documentation. Release 1.3.1. URL: https://alphashape.readthedocs.io/_/downloads/en/latest/pdf/. Letzter Zugriff: 04.03.2025.
- BHoM (2024): The Buildings and Habitats object Model. URL: <https://bhom.xyz/>. Letzter Zugriff: 15.04.2024.
- Blankenbach, J. (2017): Bauaufnahme, Gebäudeerfassung und BIM. In: Schwarz, W. (Hrsg.): *Ingenieur-geodäsie*. Springer Reference Naturwissenschaften. Springer, Berlin und Heidelberg, S. 23–53.
- Bodea, S., Mindermann, P., Gresser, G. T., Menges, A. (2021a): Additive Manufacturing of Large Coreless Filament Wound Composite Elements for Building Construction. *3D Printing and Additive Ma-*

- nufacturing, Jahrgang 9, Heft 3, S. 144–159, DOI: 10.1089/3dp.2020.0346.
- Bodea, S., Zechmeister, C., Dambrosio, N., Dörstelmann, M., Menges, A. (2021b): Robotic coreless filament winding for hyperboloid tubular composite components in construction. *Automation in Construction*, Jahrgang 126, S. 1–20, DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103649.
- Borrmann, A., König, M., Koch, C., Beetz, J. (2015): *Building Information Modeling. Technologische Grundlagen und Industrielle Praxis*. 1. Aufl., Springer Fachmedien, Wiesbaden.
- Borrmann, D., Elseberg, J., Lingemann, K., Nüchter, A. (2011): The 3D Hough Transform for plane detection in point clouds: A review and a new accumulator design. *3D Research*, Jahrgang 2, Heft 2, S. 1–13, DOI: 10.1007/3DRes.02(2011)3.
- Boschung, P. (2022): Innovation um 1957: Ein Haus der Zukunft aus glasfaserverstärktem Kunststoff | Baublatt. URL: <https://www.baublatt.ch/bauspass/innovation-um-1957-ein-haus-der-zukunft-aus-glasfaserverstaerktem-kunststoff-33474>. Letzter Zugriff: 15.02.2024.
- Brock, C., Flach, B., Kask, E., Osterland, R. (1996): Objektsegmentierung durch Textur- und Randextraktion. In: Brauer, W., Jähne, B., Geißler, P., Haußecker, H., Hering, F. (Hrsg.): *Mustererkennung 1996*. 18. DAGM-Symposium Mustererkennung, Heidelberg, 11. - 13. September 1996. Informatik aktuell. Springer, Berlin, S. 55–62.
- Brüggemann, H., Bremer, P. (2020): *Grundlagen Qualitätsmanagement. Von den Werkzeugen über Methoden zum TQM*. 3. Aufl., Springer Fachmedien, Wiesbaden.
- Bruhn, M. (2019): *Qualitätsmanagement für Dienstleistungen. Handbuch für ein erfolgreiches Qualitätsmanagement : Grundlagen - Konzepte - Methoden*. 11. Aufl., Springer Gabler, Berlin und Heidelberg.
- buildingSmart (2024): BIM-KnowHow | BIM Methode. URL: <https://www.buildingsmart.de/bim-knowhow/bim-methode>. Letzter Zugriff: 15.04.2024.
- Carosella, S., Hügle, S., Helber, F., Middendorf, P. (2024): A short review on recent advances in automated fiber placement and filament winding technologies. *Composites Part B: Engineering*, Jahrgang 287, S. 1–10, DOI: 10.1016/j.compositesb.2024.111843.
- Chan, A. P. (1996): Quality Assurance in the Construction Industry. *Architectural Science Review*, Jahrgang 39, Heft 2, S. 107–112, DOI: 10.1080/00038628.1996.9697365.
- Chaudhry, S. (2021): *Surface related uncertainties of laser scanning: a simulation-based and experimental study*. Dissertation an der ETH Zurich. URL: 10.3929/ethz-b-000533401.
- Chaudhry, S., Salido-Monzú, D., Wieser, A. (2019): Simulation of 3D laser scanning with phase-based EDM for the prediction of systematic deviations. In: *Modeling Aspects in Optical Metrology VII*, 24.–27. Juni 2019, München, Deutschland, DOI: 10.1117/12.2526043.
- Chaudhry, S., Salido-Monzú, D., Wieser, A. (2021): A Modeling Approach for Predicting the Resolution Capability in Terrestrial Laser Scanning. *Remote Sensing*, Jahrgang 13, Heft 4, S. 1–23, DOI: 10.3390/rs13040615.
- Chen, Z., Zhu, H. (2019): Visual Quality Evaluation for Semantic Segmentation: Subjective Assessment Database and Objective Assessment Measure. *IEEE transactions on image processing*, Jahrgang 28, Heft 12, S. 5785–5796, DOI: 10.1109/TIP.2019.2922072.
- Chung, H. W. (1999): *Understanding Quality Assurance in Construction. A Practical Guide to ISO 9000 for Contractors*. 1. Aufl., Routledge, London.
- CloudCompare (2022). Version v2.12. URL: <https://cloudcompare-org.danielgm.net/>.
- Dalitz, C., Schramke, T., Jeltsch, M. (2017): Iterative Hough Transform for Line Detection in 3D Point Clouds. *Image Processing On Line*, Jahrgang 7, S. 184–196, DOI: 10.5201/ipol.2017.208.
- Dambrosio, N., Zechmeister, C., Bodea, S., Koslowski, V., Gil Pérez, M., Rongen, B., Knippers, J., Menges, A. (2019): Buga Fibre Pavilion. Towards an architectural application of novel fiber composite building systems. In: *Proceedings of the 39th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture*, 21.–26. Okt. 2019, Austin, USA, DOI: 10.52842/conf.acadia.2019.140.

- Delaunay, B. (1934): Sur la sphère vide. Bulletin de l'Académie des Sciences de l'URSS. Classe des sciences mathématiques et na, Jahrgang 1934, Heft 6, S. 793–800.
- Deumlich, F., Staiger, R. (2002): Instrumentenkunde der Vermessungstechnik. 9., völlig neu bearb. und erw. Aufl., Wichmann, Heidelberg.
- Deutsches Institut für Normung e.V. (2007): DIN EN 45020:2007-03, Normung und damit zusammenhängende Tätigkeiten - Allgemeine Begriffe. Beuth Verlag GmbH, Berlin. DOI: 10.31030/9832912.
- Deutsches Institut für Normung e.V. (2015): DIN EN ISO 9000:2015-11, Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe. Beuth Verlag GmbH, Berlin. DOI: 10.31030/2325650.
- Deutsches Institut für Normung e.V. (2015): DIN EN ISO 9001:2015-11, Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen. Beuth Verlag GmbH, Berlin. DOI: 10.31030/2325651.
- Deutsches Institut für Normung e.V. (2019): DIN 18202:2019-07, Toleranzen im Hochbau - Bauwerke. Beuth Verlag GmbH, Berlin. DOI: 10.31030/3061349.
- Deutsches Institut für Normung e.V. (2021): DIN EN ISO 16739-1:2021-11, Industry Foundation Classes_(IFC) für den Datenaustausch in der Bauwirtschaft und im Anlagenmanagement - Teil 1: Datenschema. Beuth Verlag GmbH, Berlin. DOI: 10.31030/3144077.
- Diestel, R. (2000): Graphentheorie. 2., neu bearb. und erw. Aufl. Springer-Lehrbuch. Springer, Berlin und Heidelberg.
- Dolapsaki, M. M., Georgopoulos, A. (2021): Edge Detection in 3D Point Clouds Using Digital Images. ISPRS International Journal of Geo-Information, Jahrgang 10, Heft 4, S. 1–18, DOI: 10.3390/ijgi10040229.
- Dupuis, J., Holst, C., Kuhlmann, H. (2016): Laser Scanning Based Growth Analysis of Plants as a New Challenge for Deformation Monitoring. Journal of Applied Geodesy, Jahrgang 10, Heft 1, S. 37–44, DOI: 10.1515/jag-2015-0028.
- Dürr, F. (2023): Multimodal Panoptic Segmentation of 3D Point Clouds. Dissertation am Karlsruher Institut für Technologie. Karlsruher Schriftenreihe zur Anthropomatik, Band 63, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe. URL: 10.5445/KSP/1000161158.
- Edelsbrunner, H., Kirkpatrick, D., Seidel, R. (1983): On the shape of a set of points in the plane. IEEE Transactions on Information Theory, Jahrgang 29, Heft 4, S. 551–559, DOI: 10.1109/TIT.1983.1056714.
- Ehrenstein, G. W. (2006): Faserverbund-Kunststoffe. Werkstoffe - Verarbeitung - Eigenschaften. 2. völlig überarbeitete Aufl., Hanser, München.
- Eichhorn, A., Heunecke, O., Kuhlmann, H., Neuner, H.-B., Welsch, W. (2013): Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen. 2., neu bearbeitete und erweiterte Aufl. Handbuch Ingenieurgeodäsie. Wichmann, Berlin und Offenbach am Main.
- Ester, M., Kriegel, H.-P., Sander, J., Xu, X. (1996): A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. In: Simoudis, E., Han, J., Fayyad, U. M. (Hrsg.): Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining. AAAI Press, Menlo Park, USA, S. 226–231.
- Ester, M., Sander, J. (2000): Knowledge Discovery in Databases. Techniken und Anwendungen. Springer, Berlin und Heidelberg.
- Eto, S., Masuda, H., Hiraoka, Y., Matsushita, M., Takahashi, M. (2020): Precise Calculation of Cross Sections and Volume for Tree Stem Using Point Clouds. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Jahrgang XLIII, S. 205–210, DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-205-2020.
- FARO Europe GmbH (2021): FARO Focus Laser Scanner. URL: https://media.faro.com/-/media/Project/FARO/FARO/FARO/Resources/2_TECH-SHEET / TechSheet _ Focus _ Laser _ Scanner / TechSheet_Focus_Laser_Scanner_DE.pdf?rev=f87143f7f76c4993a383309fed49e980. Letzter Zugriff: 20.06.2025.
- Felsner, S. (2004): Geometric graphs and arrangements. Some chapters from combinatorial geometry. 1. Aufl. Advanced lectures in mathematics. Vieweg, Wiesbaden.
- Forsyth, D. (2012): Computer vision. A modern approach. 2. Aufl., Pearson, Boston, USA.

- Frost, D., Gericke, O., Di Bari, R., Balangé, L., Zhang, L., Blagojevic, B., Nigl, D., Haag, P., Blandini, L., Jünger, H. C., Kropp, C., Leistner, P., Sawodny, O., Schwieger, V., Sobek, W. (2022): Holistic Quality Model and Assessment—Supporting Decision-Making towards Sustainable Construction Using the Design and Production of Graded Concrete Components as an Example. *Sustainability*, Jahrgang 14, Heft 18, S. 1–32, DOI: 10.3390/su141811269. PII: su141811269.
- Früh, N., Knippers, J. (2021): Multi-stage filament winding: Integrative design and fabrication method for fibre-reinforced composite components of complex geometries. *Composite Structures*, Jahrgang 268, S. 1–12, DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.113969. PII: S0263822321004293.
- Gauß, C. F. (1809): *Theoria motus corporum coelestium in sectionibus conicis solem ambientium*. 1. Aufl., F. Perthes und I. H. Besser, Hamburg.
- Gil Pérez, M., Zechmeister, C., Kannenberg, F., Mindermann, P., Balangé, L., Guo, Y., Hügler, S., Gienger, A., Forster, D., Bischoff, M., Tarín, C., Middendorf, P., Schwieger, V., Gresser, G. T., Menges, A., Knippers, J. (2022): Computational co-design framework for coreless wound fibre–polymer composite structures. *Journal of Computational Design and Engineering*, Jahrgang 9, Heft 2, S. 310–329, DOI: 10.1093/jcde/qwab081.
- Gil Pérez, M., Mindermann, P., Zechmeister, C., Forster, D., Guo, Y., Hügler, S., Kannenberg, F., Balangé, L., Schwieger, V., Middendorf, P., Bischoff, M., Menges, A., Gresser, G. T., Knippers, J. (2023a): Data processing, analysis, and evaluation methods for co-design of coreless filament-wound building systems. *Journal of Computational Design and Engineering*, Jahrgang 10, Heft 4, S. 1460–1478, DOI: 10.1093/jcde/qwad064.
- Gil Pérez, M., Mindermann, P., Zechmeister, C., Forster, D., Guo, Y., Hügler, S., Kannenberg, F., Balangé, L., Schwieger, V., Middendorf, P., Bischoff, M., Menges, A., Gresser, G. T., Knippers, J. (2023b): Post-processed and normalized data sets for the data processing, analysis, and evaluation methods for co-design of coreless filament-wound structures. *Daten-satz*. DOI: 10.18419/DARUS-3449.
- Gil Pérez, M., Rongen, B., Koslowski, V., Knippers, J. (2021): Structural design assisted by testing for modular coreless filament-wound composites: The BUGA Fibre Pavilion. *Construction and Building Materials*, Jahrgang 301, S. 1–15, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124303.
- Gojcic, Z. (2021): Benefiting from local rigidity in 3D point cloud processing. Dissertation an der ETH Zurich. URL: 10.3929/ethz-b-000523368.
- GOM - Optical Measuring Techniques (2010): GOM-ATOS III Triple Scan. URL: <https://dmand.sutd.edu.sg/wp-content/uploads/2016/02/GOM-ATOS-III-Triple-Scan.pdf>. Letzter Zugriff: 31.08.2024.
- Gordon, S., Lichti, D., Stewart, M., Franke, J. (2003): Structural deformation measurement using terrestrial laser scanners. In: *Proceedings of the 11th FIG Symposium on Deformation Measurements*, 25.–28. Mai 2003, Santorini, Griechenland. URL: http://www.fig.net/resources/proceedings/2003/santorini_comm6/d-instrumentation%20&%20new%20tech/d1.pdf.
- Gösseln, I. von (2017): Simulationsbasierte Effizienzoptimierung von Messprozessen am Beispiel der tachymetrischen Netzmessung. Dissertation an der Leibniz-Universität Hannover. DGK Reihe C, Heft 800, Verlag der Bayerische Akademie der Wissenschaften, München. URL: <https://publikationen.badw.de/en/044413067>.
- Haag, P., Balangé, L., Di Bari, R., Braun, K., Weißert, J., Zhang, L., Schwieger, V., Leistner, P., Kropp, C., Jünger, H. C. (2024): Development of the holistic quality model and assessment – Integrating the economic quality aspect and establishing an extended interrelation analysis. *Developments in the Built Environment*, Jahrgang 19, S. 1–12, DOI: 10.1016/j.dibe.2024.100511. PII: S2666165924001923.
- Han, X.-F., Jin, J. S., Wang, M.-J., Jiang, W., Gao, L., Xiao, L. (2017): A review of algorithms for filtering the 3D point cloud. *Signal Processing: Image Communication*, Jahrgang 57, S. 103–112, DOI: 10.1016/j.image.2017.05.009.
- Hankammer, G. (2022): *Abnahme von Bauleistungen Band 1. Rechtliche und technische Grundlagen & praktische Hinweise zur Abnahme von Rohbau, Dach und Fassade*. 6., aktualisierte und erweiterte Aufl., Rudolf Müller Medien, Köln.

- Helmus, M., Offergeld, B. (2012): Qualität des Bauens. Eine Studie über den Begriff und die Wahrnehmung von Bauqualität bei privaten und öffentlichen Bauherren und Bauunternehmen. Bd. 44. INQA-Bericht. INQA-Bauen, Wiesbaden.
- Hierholzer, C., Wiener, C. (1873): Ueber die Möglichkeit, einen Linienzug ohne Wiederholung und ohne Unterbrechung zu umfahren. *Mathematische Annalen*, Jahrgang 6, Heft 1, S. 30–32, DOI: 10.1007/BF01442866.
- Hotelling, H. (1933): Analysis of a complex of statistical variables into principal components. *Journal of Educational Psychology*, Jahrgang 24, Heft 6, S. 417–441, DOI: 10.1037/h0071325.
- Hough, P. V. C. (1962): Method and means for recognizing complex patterns, US3069654A.
- Hügler, S., Genc, E., Dittmann, J., Middendorf, P. (2022): Offline Robot-Path-Planning and Process Simulation for the Structural Analysis of Coreless Wound Fibre-Polymer Composite Structures. *Key Engineering Materials*, Jahrgang 926, S. 1445–1453, DOI: 10.4028/p-970esd.
- ICD/ITKE Universität Stuttgart (2012): ICD/ITKE Forschungspavillon 2012. URL: <https://www.icd.uni-stuttgart.de/de/projekte/icditke-research-pavilion-2012/>. Letzter Zugriff: 20. 06. 2025.
- ICD/ITKE Universität Stuttgart (2019): BUGA Faser Pavillon 2019. URL: <https://www.icd.uni-stuttgart.de/de/projekte/buga-fiber-pavilion/>. Letzter Zugriff: 20. 06. 2025.
- ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart (2021a): livMatS Pavillon. URL: <https://www.icd.uni-stuttgart.de/de/projekte/livMatS-Pavilion/>. Letzter Zugriff: 20. 06. 2025.
- ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart (2021b): Maison Fibre. URL: <https://www.icd.uni-stuttgart.de/de/projekte/maison-fibre/>. Letzter Zugriff: 20. 06. 2025.
- ICD/ITKE/IntCDC Universität Stuttgart (2024): Hybrid-Flachs Pavillon. URL: <https://www.icd.uni-stuttgart.de/de/projekte/hybrid-flachs-pavillon/>. Letzter Zugriff: 20. 06. 2025.
- Imai, M. (1998): Kaizen. Der Schlüssel zum Erfolg der Japaner im Wettbewerb. 8. Aufl., Ullstein, Berlin.
- Jäger, R., Müller, T., Saler, H. (2016): Klassische und robuste Ausgleichungsverfahren. Ein Leitfaden für Ausbildung und Praxis von Geodäten und Geoinformatikern. 2., neu bearbeitete und erweiterte Aufl., Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Jähne, B. (2012): Digitale Bildverarbeitung. Und Bildgewinnung. 7. Aufl., Springer, Berlin und Heidelberg.
- Jeltsch, M., Dalitz, C., Pohle-Fröhlich, R. (2016): Hough Parameter Space Regularisation for Line Detection in 3D. In: *Proceedings of the 11th Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications - VISIGRAPP 2016*, 27.–29. Feb. 2016, Rom, Italien, DOI: 10.5220/0005679003450352.
- Jiang, S., Jiang, L., Han, Y., Wu, Z., Wang, N. (2019): OpenBIM: An Enabling Solution for Information Interoperability. *Applied Sciences*, Jahrgang 9, Heft 24, S. 1–27, DOI: 10.3390/app9245358.
- Jochem, A., Höfle, B., Rutzinger, M., Pfeifer, N. (2009): Automatic roof plane detection and analysis in airborne lidar point clouds for solar potential assessment. *Sensors*, Jahrgang 9, Heft 7, S. 5241–5262, DOI: 10.3390/s90705241.
- Jutzi, B., Meyer, F. J., Hinz, S. (2017): Aktive Fernerkundungssensorik – Technologische Grundlagen und Abbildungsgeometrie. In: Heipke, C. (Hrsg.): *Photogrammetrie und Fernerkundung*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, S. 65–103.
- Kaganami, H. G., Beiji, Z. (2009): Region-Based Segmentation versus Edge Detection. In: *2009 Fifth International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing*, 12.–14. Sep. 2009, DOI: 10.1109/iih-msp.2009.13.
- Kahmen, H. (1993): *Vermessungskunde*. 18. Aufl. De Gruyter Lehrbuch. De Gruyter, Berlin und Boston.
- Kamiske, G. F., Hrsg. (2015): *Handbuch QM-Methoden. Die richtige Methode auswählen und erfolgreich umsetzen*. ger. 3., aktualisierte und erweiterte Aufl. Kamiske, Gerd F. (HerausgeberIn). München: Hanser. 963 S. ISBN: 9783446444416. URL: http://ebooks.ciando.com/book/index.cfm/bok_id/1994309.
- Kannenbergh, F., Zechmeister, C., Gil Pérez, M., Guo, Y., Yang, X., Forster, D., Hügler, S., Mindermann, P.,

- Abdelaal, M., Balangé, L., Schwieger, V., Weiskopf, D., Gresser, G. T., Middendorf, P., Bischoff, M., Knippers, J., Menges, A. (2024): Toward reciprocal feedback between computational design, engineering, and fabrication to co-design coreless filament-wound structures. *Journal of Computational Design and Engineering*, Jahrgang 11, Heft 3, S. 374–394, DOI: 10.1093/jcde/qwae048.
- Karthick, S., Sathiyasekar, D., Puraneeswari, A. (2014): A Survey Based on Region Based Segmentation. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, Jahrgang 7, Heft 3, S. 143–147, DOI: 10.14445/22315381/ijett-v7p262.
- Kerekes, G. (2023): An elementary error model for terrestrial laser scanning. Dissertation an der Universität Stuttgart. DGK Reihe C, Heft 900, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München. URL: 10.18419/OPUS-12955.
- Knippers, J. (2017): The Limits of Simulation: Towards a New Culture of Architectural Engineering. *Technology|Architecture + Design*, Jahrgang 1, Heft 2, S. 155–162, DOI: 10.1080/24751448.2017.1354610.
- Knippers, J., Kropp, C., Menges, A., Sawodny, O., Weiskopf, D. (2021): Integrative computational design and construction: Rethinking architecture digitally. *Civil Engineering Design*, Jahrgang 3, Heft 4, S. 123–135, DOI: 10.1002/cend.202100027.
- Koch, K.-R. (1980): Parameterschätzung und Hypothesentests in linearen Modellen. 1. Aufl., Dümmler, Bonn.
- Kokab, H. S., Urbanic, R. J. (2019): Extracting of Cross Section Profiles from Complex Point Cloud Data Sets. *IFAC*, Jahrgang 52, Heft 10, S. 346–351, DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.10.055.
- Kuhlmann, H., Holst, C. (2017): Flächenhafte Abtastung mit Laserscanning. In: Schwarz, W. (Hrsg.): *Ingenieurgeodäsie*. Springer Reference Naturwissenschaften. Springer, Berlin und Heidelberg, S. 167–212.
- Kuhlmann, H., Schwieger, V., Wieser, A., Niemeier, W. (2013): Ingenieurgeodäsie – Definition, Kernkompetenzen und Alleinstellungsmerkmale. *ZfV - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Jahrgang 138, Heft 6, S. 391–399. URL: <https://geodaesie.info/zfv/zfv-archiv/zfv-138-jahrgang/zfv-2013-6/ingenieurgeodaesie-definition-kernkompetenzen-und-alleinstellungsmerkmale>.
- Larssen, S., Helmis, C. (1998): Quality Assurance and Quality Control. In: Fenger, J., Hertel, O., Palmgren, F. (Hrsg.): *Urban Air Pollution - European Aspects. Environmental Pollution*. Springer, Dordrecht, S. 317–325.
- Laufer, R. (2011): Prozedurale Qualitätsmodellierung und -management für Daten : ingenieurgeodätische und verkehrstechnische Anwendungen. Dissertation an der Universität Stuttgart. DGK Reihe C, Heft 662, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München. URL: 10.18419/opus-3863.
- Leica Geosystems AG (2012): HDS7000. User Manual Version 1.1.
- Leica Geosystems AG (2020): Leica ScanStation P30/P40 Product Specifications. URL: <https://leica-geosystems.com/de/CH/products/laser-scanners/scanners/-/media/16CC39298D8340DA8C026236A56E3BA2.ashx>. Letzter Zugriff: 20.06.2025.
- Leite, F., Akcamete, A., Akinci, B., Atasoy, G., Kiziltas, S. (2011): Analysis of modeling effort and impact of different levels of detail in building information models. *Automation in Construction*, Jahrgang 20, Heft 5, S. 601–609, DOI: 10.1016/j.autcon.2010.11.027.
- Lichti, D. D. (2007): Error modelling, calibration and analysis of an AM–CW terrestrial laser scanner system. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Jahrgang 61, Heft 5, S. 307–324, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2006.10.004. PII: S0924271606001298.
- Lichti, D. D., Gordon, S. J., Tipdecho, T. (2005): Error Models and Propagation in Directly Georeferenced Terrestrial Laser Scanner Networks. *Journal of Surveying Engineering*, Jahrgang 131, Heft 4, S. 135–142, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9453(2005)131:4(135).
- Lindner, C. (2009): Segmentierung von Oberflächen mittels variabler Beleuchtung. Dissertation an der Technische Universität München. Berichte über Verteilte Messsysteme, Band 6, Shaker Verlag, Aachen.

- Linzer, F., Neuner, H.-B. (2022): Transferability of an estimation procedure for distance deviations of terrestrial laser scanners from laboratory to on-site conditions. In: Proceedings of the 5th Joint International Symposium on Deformation Monitoring - JISDM 2022, 20.–22. Juni 2022, Valencia, Spanien, DOI: 10.4995/JISDM2022.2022.13853.
- Lloyd, S. (1982): Least squares quantization in PCM. IEEE Transactions on Information Theory, Jahrgang 28, Heft 2, S. 129–137, DOI: 10.1109/TIT.1982.1056489.
- Lu, Q., Lee, S. (2017): Image-Based Technologies for Constructing As-Is Building Information Models for Existing Buildings. Journal of Computing in Civil Engineering, Jahrgang 31, Heft 4, S. 1–14, DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000652.
- Lu, Y., Khargonkar, N., Xu, Z., Averill, C., Palanisamy, K., Hang, K., Guo, Y., Ruozzi, N., Xiang, Y. (2023): Self-Supervised Unseen Object Instance Segmentation via Long-Term Robot Interaction. In: Proceedings of the Robotics: Science and Systems 2023 - RSS 2023, 10.–14. Juni 2023, Daegu, Südkorea. URL: <https://roboticsproceedings.org/rss19/p017.pdf>.
- Luhmann, T. (2023): Nahbereichsphotogrammetrie. Grundlagen - Methoden - Beispiele. 5., neu bearbeitete Aufl., Wichmann, Berlin und Offenbach.
- MacQueen, J. (1967): Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In: Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, 27. Dez. 1965–7. Jan. 1966, Berkeley, USA.
- Matikainen, L., Hyypä, J., Kaartinen, H. (2009): Comparison Between First Pulse and Last Pulse Laser Scanner Data in the Automatic Detection of Buildings. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Jahrgang 75, Heft 2, S. 133–146, DOI: 10.14358/PERS.75.2.133.
- Medić, T., Holst, C., Kuhlmann, H. (2017): Towards System Calibration of Panoramic Laser Scanners from a Single Station. Sensors, Jahrgang 17, Heft 5, S. 1–25, DOI: 10.3390/s17051145.
- Minsch, N., Herrmann, F. H., Gereke, T., Nocke, A., Cherif, C. (2017): Analysis of Filament Winding Processes and Potential Equipment Technologies. Proceedings CIRP, Jahrgang 66, S. 125–130, DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.284. PII: S2212827117304729.
- Mohan, R., Valada, A. (2021): EfficientPS: Efficient Panoptic Segmentation. International Journal of Computer Vision, Jahrgang 129, Heft 5, S. 1551–1579. URL: <https://rdcu.be/erCCt>.
- Mönius, K., Steuding, J., Stumpf, P. (2021): Algorithmen in der Graphentheorie. Ein konstruktiver Weg in die Diskrete Mathematik. 1. Aufl. essentials. Springer Spektrum, Wiesbaden und Heidelberg.
- Munro, M. (1988): Review of manufacturing of fiber composite components by filament winding. Polymer Composites, Jahrgang 9, Heft 5, S. 352–359, DOI: 10.1002/pc.750090508.
- Muralikrishnan, B., Ferrucci, M., Sawyer, D., Gerner, G., Lee, V., Blackburn, C., Phillips, S., Petrov, P., Yakovlev, Y., Astrelin, A., Milligan, S., Palmtier, J. (2015): Volumetric performance evaluation of a laser scanner based on geometric error model. Precision Engineering, Jahrgang 40, S. 139–150, DOI: 10.1016/j.precisioneng.2014.11.002. PII: S0141635914002013.
- Neitzel, F. (2010): Ausgleichsrechnung – Modellbildung, Auswertung, Qualitätsbeurteilung. In: Beiträge zum 93. DVW-Seminar am 10. und 11. Juni 2010 in Hannover, 10.–11. Juni 2010, Hannover.
- Niemeier, W. (2008): Ausgleichsrechnung. Statistische Auswertemethoden. 2., überarb. und erw. Aufl. De Gruyter Lehrbuch. De Gruyter, Berlin.
- Nischwitz, A., Fischer, M., Haberäcker, P., Socher, G. (2020): Bildverarbeitung. Band II des Standardwerks Computergrafik und Bildverarbeitung. 4. Aufl., Springer Fachmedien, Wiesbaden und Heidelberg.
- Nitzsche, M. (2009): Graphen für Einsteiger. Rund um das Haus vom Nikolaus. 3., überarb. und erw. Aufl., Vieweg + Teubner, Wiesbaden.
- Ortega, M., Pérez, M., Rojas, T. (2003): Construction of a Systemic Quality Model for Evaluating a Software Product. Software Quality Journal, Jahrgang 11, Heft 3, S. 219–242, DOI: 10.1023/A:1025166710988. PII: 5141095.
- Pach, J., Agarwal, P. K. (1995): Combinatorial Geometry. 1. Aufl., John Wiley & Sons, INC, New York, USA.

- Pateiro-López, B., Rodríguez-Casal, A. (2010): Generalizing the Convex Hull of a Sample: The R Package *alphahull*. *Journal of Statistical Software*, Jahrgang 34, Heft 5, S. 1–28, DOI: 10.18637/jss.v034.i05.
- Pearson, K. (1901): LIII. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, Jahrgang 2, Heft 11, S. 559–572, DOI: 10.1080/14786440109462720.
- Pfeifer, T., Schmitt, R. (2021): *Masing Handbuch Qualitätsmanagement*. 7., überarbeitete Aufl., Hanser, München.
- Prado, M., Dörstelmann, M., Schwinn, T., Menges, A., Knippers, J. (2014): Core-Less Filament Winding. In: McGee, W., Ponce de León, M., Braumann, J., Bell Cokcan, S., Willette, A. (Hrsg.): *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2014*. Springer, Cham u. a., S. 275–289.
- RIEGL Laser Measurement Systems GmbH (2022): Datasheet RIEGL VZ-2000i. URL: http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegl/downloads/RIEGL_VZ-2000i_Datasheet_2022-09-27.pdf. Letzter Zugriff: 23. 05. 2024.
- Rinke, N., Gösseln, I. von, Kochkine, V., Schweitzer, J., Berkhahn, V., Berner, F., Kutterer, H., Neumann, I., Schwieger, V. (2017): Simulating quality assurance and efficiency analysis between construction management and engineering geodesy. *Automation in Construction*, Jahrgang 76, S. 24–35, DOI: 10.1016/j.autcon.2017.01.009. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580517300249>.
- Roberts, K. S. (1988): A new representation for a line. In: *Proceedings of the CVPR '88: The Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 5.–9. Juni 1988, Ann Arbor, USA, DOI: 10.1109/CVPR.1988.196303.
- Rocchini, C., Cignoni, P., Montani, C., Pingi, P., Scopigno, R. (2001): A low cost 3D scanner based on structured light. *Computer Graphics Forum*, Jahrgang 20, Heft 3, S. 299–308, DOI: 10.1111/1467-8659.00522.
- Röck, M., Saade, M. R. M., Balouktsi, M., Rasmussen, F. N., Birgisdottir, H., Frischknecht, R., Habert, G., Lützkendorf, T., Passer, A. (2020): Embodied GHG emissions of buildings – The hidden challenge for effective climate change mitigation. *Applied Energy*, Jahrgang 258, S. 1–12, DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.114107. PII: S0306261919317945.
- Rüeger, J. M. (1996): *Electronic Distance Measurement*. 4. Aufl., Springer Berlin Heidelberg, Berlin und Heidelberg.
- Santos, R. C. dos, Galo, M., Carrilho, A. C. (2018): Building Boundary Extraction from Lidar Data Using a Local Estimated Parameter for Alpha Shape Algorithm. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Jahrgang XLII, Heft 1, S. 127–132, DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-1-127-2018.
- Schäfer, T. (2017): *Berührungslose und flächenhafte Deformationsmessungen an Betonoberflächen unter besonderer Berücksichtigung der Interaktion zwischen Laserstrahl und Oberfläche*. Dissertation an der Technischen Universität München. DGK Reihe C, Heft 805, Verlag der Bayerische Akademie der Wissenschaften, München. URL: <https://publikationen.badw.de/de/044436953>.
- Schlemmer, H. (1996): *Grundlagen der Sensorik: Eine Instrumentenkunde für Vermessungsingenieure*. 1. Aufl., Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Schlopschnat, C., Gil Pérez, M., Zechmeister, C., Duque Estrada, R., Kannenberg, F., Rinderspacher, K., Knippers, J., Menges, A. (2023): Co-Design of Fibrous Walls for Multi-Story Buildings. In: Dörfler, K., Knippers, J., Menges, A., Parascho, S., Pottmann, H., Wortmann, T. (Hrsg.): *Advances in Architectural Geometry 2023*. De Gruyter, Berlin und Boston, S. 235–248.
- Schmitt, R., Dietrich, E., Hrsg. (2023): *Handbuch Messtechnik in der industriellen Produktion. Valide Messergebnisse planen, erhalten, auswerten und verteilen*. 1. Aufl. München: Hanser. 809 S. DOI: 10.3139/9783446466265.
- Schmitz, B., Kuhlmann, H., Holst, C. (2020): Investigating the resolution capability of terrestrial laser scanners and its impact on the effective number of measurements. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Jahrgang 159, S. 41–52, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.11.002. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271619302564>. PII: S0924271619302564.

- Schmitz, B., Coopmann, D., Kuhlmann, H., Holst, C. (2021): Using the Resolution Capability and the Effective Number of Measurements to Select the “Right” Terrestrial Laser Scanner. In: Contributions to International Conferences on Engineering Surveying - 8th INGENIO International Conference on Engineering Surveying and 4th SIG Symposium on Engineering Geodesy, 22.–23. Okt. 2020, DOI: 10.1007/978-3-030-51953-7_7.
- Schürmann, H. (2007): Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. 2., bearb. u. erw. Aufl., Springer, Berlin und Heidelberg.
- Schwarz, W., Hrsg. (2017): Ingenieurgeodäsie. Springer Reference Naturwissenschaften. Berlin und Heidelberg: Springer. ISBN: 9783662471876. DOI: 10.1007/978-3-662-47188-3.
- Schweitzer, J., Kochkine, V., Schwieger, V., Berner, F. (2012): Quality assurance in building construction, based on engineering geodesy processes. In: Proceedings of the FIG Working Week 2012, 4.–10. Mai 2012, Rom, Italien.
- Schweitzer, J., Schwieger, V. (2011): Modeling of quality for engineering geodesy processes in civil engineering. Journal of Applied Geodesy, Jahrgang 5, Heft 1, S. 13–22, DOI: 10.1515/jag.2011.002.
- Selbmann, H. K., Pietsch-Breitfeld, B. (1990): Hospital information systems and quality assurance. International Journal for Quality in Health Care, Jahrgang 2, Heft 3-4, S. 335–344, DOI: 10.1093/intqhc/2.3-4.335.
- Shokri, D., Rastiveis, H., Sarasua, W. A., Shams, A., Homayouni, S. (2021): A Robust and Efficient Method for Power Lines Extraction from Mobile LiDAR Point Clouds. PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science, Jahrgang 89, Heft 3, S. 209–232, DOI: 10.1007/s41064-021-00155-y.
- Sihn, W., Sunk, A., Nemeth, T., Kuhlang, P., Matyas, K. (2016): Produktion und Qualität. Organisation, Management, Prozesse. 1. Aufl., Hanser, München.
- Snow, K., Schaffrin, B. (2016): Line fitting in Euclidean 3D space. Studia Geophysica et Geodaetica, Jahrgang 60, Heft 2, S. 210–227, DOI: 10.1007/s11200-015-0246-x. PII: 246.
- Statistisches Bundesamt (2017): Produktivitätsindex für das verarbeitende Gewerbe. URL: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Konjunkturindikatoren/Produktion/kpi112.html#>. Letzter Zugriff: 05.05.2025.
- Steinhaus, H. (1956): Sur la division des corps matériels en parties. Bulletin de l’académie, Jahrgang 4, Heft 12, S. 801–804.
- Steinle, A., Bachmann, H., Tillmann, M. (2018): Bauen mit Betonfertigteilen im Hochbau. 3. Aufl., Ernst & Sohn, Berlin.
- Strauss, K. (2017): Made In Where? The Countries With The Best Reputations For Producing Quality. URL: <https://www.forbes.com/sites/karstenstrauss/2017/03/27/made-in-where-the-countries-with-the-best-reputation-for-producing-quality/>. Letzter Zugriff: 21.01.2025.
- Szeliski, R. (2011): Computer vision. Algorithms and applications. 1. Aufl., Springer, London.
- Tang, P., Huber, D., Akinci, B., Lipman, R., Lytle, A. (2010): Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques. Automation in Construction, Jahrgang 19, Heft 7, S. 829–843, DOI: 10.1016/j.autcon.2010.06.007.
- Thomopoulos, N. T. (2013): Essentials of Monte Carlo Simulation. Statistical Methods for Building Simulation Models. 1. Aufl., Springer, New York, USA.
- Tittmann, P. (2019): Graphentheorie. Eine anwendungsorientierte Einführung. 3., aktualisierte Aufl., Hanser, München.
- Traa, J. (2013): Least-squares Intersection of Lines. Wissenschaftliche Publikation an der University of Illinois at Chicago.
- Trimble Inc. (2020): Datasheet-Trimble X7 3D Laser Scanning Systeme. URL: https://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-923267/022516-364D_DEU_Trimble%20X7_DS_A4_1020_LRsec.pdf. Letzter Zugriff: 23.04.2024.
- Trimble RealWorks (2024). Version 2024.00. Trimble Inc.
- Tuhaise, V. V., Tah, J. H. M., Abanda, F. H. (2023): Technologies for digital twin applications in con-

- struction. *Automation in Construction*, Jahrgang 152, S. 1–19, DOI: 10.1016/j.autcon.2023.104931. PII: S0926580523001917.
- Ullman, S. (1979): The interpretation of structure from motion. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, Jahrgang 203, Heft 1153, S. 405–426, DOI: 10.1098/rspb.1979.0006.
- United Nations (2014): World urbanization prospects. The 2014 revision: Highlights, statistical papers. 1. Aufl. *Statistical Papers - United Nations (Ser. A), Population and Vital Statistics Report*. United Nations Publications, New York.
- United Nations (2015): Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. URL: <https://sdgs.un.org/2030agenda>. Letzter Zugriff: 05.05.2025.
- United Nations (2022): Global Status Report for Buildings and Construction. Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. URL: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/41133/Building_Construction_2022.pdf?sequence=3&isAllowed=y. Letzter Zugriff: 02.06.2025.
- United Nations (2025): World Population Prospects 2024. Summary of Results. URL: https://population.un.org/wpp/assets/Files/WPP2024_Summary-of-Results.pdf. Letzter Zugriff: 02.06.2025.
- Vogel, M., Day, R., Jackson, G., Lezennec, A., Lepe-re, G. (2020): White Paper: Inside the Trimble X7: Deep Dive into Trimble X7 Auto-Calibration. URL: <https://geospatial.trimble.com/en/resources/i/1468600-trimble-x7-auto-calibration-eliminates-the-guesswork/0?>. Letzter Zugriff: 20.06.2025.
- Voigt, P. (2007): Die Pionierphase des Bauens mit glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) 1942 bis 1980. Dissertation an der Bauhaus-Universität Weimar. URL: 10.25643/BAUHAUS-UNIVERSITAET.821.
- Vosselman, G., Maas, H.-G., Hrsg. (2010): Airborne and terrestrial laser scanning. eng. 1. Aufl. Dunbeath, Schottland: Whittles Publishing. 318 S. ISBN: 9781904445876.
- Waimer, F., La Magna, R., Reichert, S., Schwinn, T., Menges, A., Knippers, J. (2013): Integrated design methods for the simulation of fibre-based structures. In: *Rethinking Prototyping*, 28. Sep.–2. Okt. 2013, Berlin, DOI: 10.18419/opus-104.
- Wang, Q., Kim, M.-K. (2019): Applications of 3D point cloud data in the construction industry: A fifteen-year review from 2004 to 2018. *Advanced Engineering Informatics*, Jahrgang 39, S. 306–319, DOI: 10.1016/j.aei.2019.02.007. PII: S1474034618304683.
- Wang, Z., Wang, E., Zhu, Y. (2020): Image segmentation evaluation: a survey of methods. *Artificial Intelligence Review*, Jahrgang 53, Heft 8, S. 5637–5674, DOI: 10.1007/s10462-020-09830-9. PII: 9830.
- Wang, Z., Lan, Q., Wang, E. (2015): Automatically extracting contours of cross-sections from 3D point clouds of tunnel. In: *Proceedings of the International conference on advances in mechanical engineering and industrial informatics*, 11.–12. Apr. 2015, Zhengzhou, China, DOI: 10.2991/ameii-15.2015.2.
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., Reynolds, J. M. (2012): ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, Jahrgang 179, S. 300–314, DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.08.021.
- Wickens, T. D. (2014): The geometry of multivariate statistics. 1. Aufl., Psychology Press, New York, USA. URL: <https://www.taylorfrancis.com/books/9781315806334>.
- Wieser, A., Kuhlmann, H., Schwieger, V., Niemeier, W. (2016): Ingenieurgeodäsie – eine Einführung. In: Freeden, W., Rummel, R. (Hrsg.): *Handbuch der Geodäsie*. Springer Spektrum, Berlin und Heidelberg, S. 1–22.
- Wiltshko, T. (2004): Sichere Information durch infrastrukturgestützte Fahrerassistenzsysteme zur Steigerung der Verkehrssicherheit an Straßenknotenpunkten. Dissertation an der Universität Stuttgart. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12, Nr. 570, VDI Verlag, Düsseldorf. URL: 10.18419/opus-3684.
- Woods, B. K., Hill, I., Friswell, M. I. (2016): Ultra-efficient wound composite truss structures. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jahrgang 90, S. 111–124, DOI: 10.1016/j.compositesa.2016.06.022. PII: S1359835X16302111.
- Wujanz, D., Burger, M., Mettenleiter, M., Neitzel, F. (2017): An intensity-based stochastic model for ter-

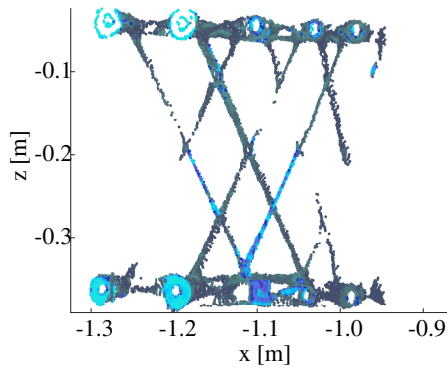
- restrial laser scanners. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Jahrgang 125, S. 146–155, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2016.12.006. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092427161630288x>. PII: S092427161630288X.
- Yang, Y. (2023): Towards improved targetless registration and deformation analysis of TLS point clouds using patch-based segmentation. Dissertation an der Universität Stuttgart. DGK Reihe C, Heft 929, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München. URL: 10.18419/OPUS-13796.
- Yang, Y., Chen, S., Wang, L., He, J., Wang, S.-M., Sun, L., Shao, C. (2019): Influence of Coating Spray on Surface Measurement Using 3D Optical Scanning Systems. In: Volume 1: Additive Manufacturing; Manufacturing Equipment and Systems; Bio and Sustainable Manufacturing, 10.–14. Juni 2019, Erie, USA, DOI: 10.1115/MSEC2019-2898.
- Zechmeister, C. (2019): Design for long-span core-less wound, structural composite building elements. In: *Impact: Design With All Senses*, 21.–25. Sep. 2019, Berlin.
- Zechmeister, C., Gil Pérez, M., Knippers, J., Menges, A. (2023): Concurrent, computational design and modelling of structural, coreless-wound building components. *Automation in Construction*, Jahrgang 151, S. 1–21, DOI: 10.1016/j.autcon.2023.104889. PII: S0926580523001498.
- Zechmeister, C., Hildebrandt, H., Duque Estrada, R., Chen, T.-Y., Gil Pérez, M., Kannenberg, F., Schlopschnat, C., Göbel, M., Knippers, J., Menges, A. (2025): Design and development of natural fiber-timber hybrid beam elements for sustainable construction. *Architectural Intelligence*, Jahrgang 4, Heft 1, S. 1–21, DOI: 10.1007/s44223-025-00083-6. PII: 83.
- Zechmeister, C. (2024): Computational fiber architecture. Co-design of large-scale, load-adapted fiber composite building components for robotic pre-fabrication. Dissertation an der Universität Stuttgart. Research Reports Institute for Computational Design and Construction, Nr. 16, Institute for Computational Design und Construction, Stuttgart. URL: 10.18419/opus-15439.
- ZEISS Quality Suite (2025). Version 6.0.2420.0.ad450c6. Carl Zeiss IQS Deutschland GmbH. URL: <https://www.zeiss.de/messtechnik/home.html>. Letzter Zugriff: 07.03.2025.
- Zhang, L., Balangé, L., Braun, K., Di Bari, R., Horn, R., Hos, D., Kropp, C., Leistner, P., Schwieger, V. (2020): Quality as Driver for Sustainable Construction—Holistic Quality Model and Assessment. *Sustainability*, Jahrgang 12, Heft 19, S. 1–23, DOI: 10.3390/su12197847.
- Zhang, L., Schwieger, V. (2011): Real Time Quality Assurance Indexes for Residential House Construction Processes. In: *Proceedings of the FIG Working Week 2011*, 18.–22. Mai 2011, Marrakesch, Marokko.
- Zhang, Y. J. (1996): A survey on evaluation methods for image segmentation. *Pattern Recognition*, Jahrgang 29, Heft 8, S. 1335–1346, DOI: 10.1016/0031-3203(95)00169-7.
- Zisserman, A., Hartley, R. (2003): *Multiple view geometry in computer vision*. 2. Aufl., Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Abkürzungsverzeichnis

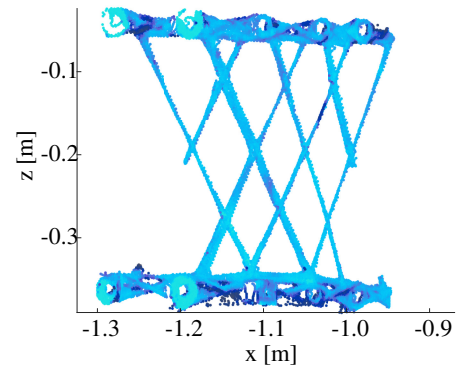
2D	2-dimensional
3D	3-dimensional
AEC	Architektur, Ingenieurwesen, Konstruktion Architecture, Engineering and Construction
ALS	Airborne Laser Scanning
BHoM	Buildings and Habitats object Model
BIM	Bauwerksdatenmodellierung Building Information Model
C2M	Cloud to Mesh
CFW	coreless filament winding
DBSCAN	Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise, dichte-basierte räumliche Clusteranalyse mit Rauschen
ICD	Institut für Computerbasiertes Entwerfen
IFB	Institut für Flugzeugbau
IFC	Industry Foundation Class
INAQ	Initiative Neue Qualität der Arbeit
IntCDC	Integrative Computational Design and Construction for Architecture
ITKE	Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen
MLS	Mobile Laser Scanning
PCA	Principal Component Analysis
QM	Qualitätsmodell
RANSAC	random sample consensus
SDGs	Sustainable Development Goals
SURF	Speeded Up Robust Features
TCP	Tool Center Point
TLS	Terrestrial Laser Scanning

A Anhang

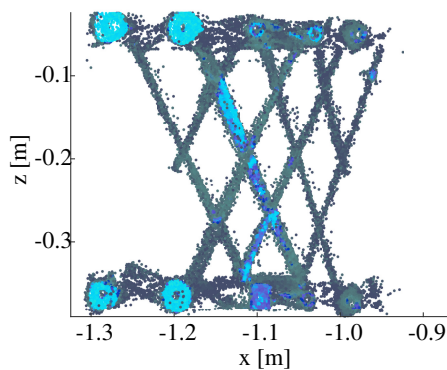
A.1 Testmessungen bei variierenden Einfallswinkeln und Laserscannern



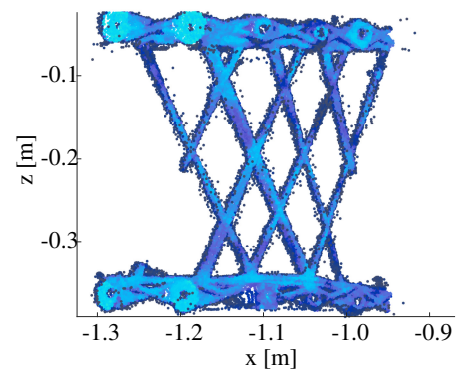
(a) Leica HDS7000 Scan ohne Spray 10°-Position



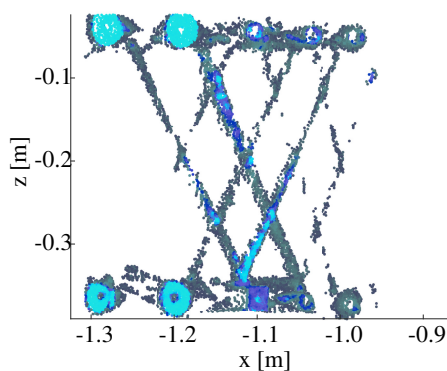
(b) Leica HDS7000 Scan mit Spray 10°-Position



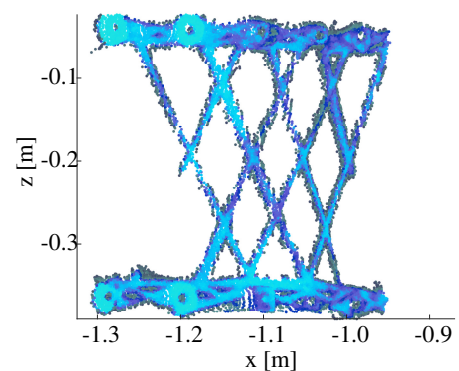
(c) Trimble X7 Scan ohne Spray 10°-Position



(d) Trimble X7 Scan mit Spray 10°-Position



(e) Riegl VZ2000 Scan ohne Spray 10°-Position



(f) Riegl VZ2000 Scan mit Spray 10°-Position

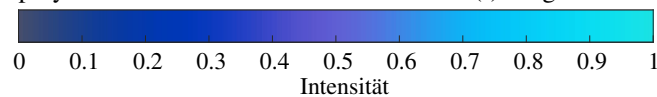
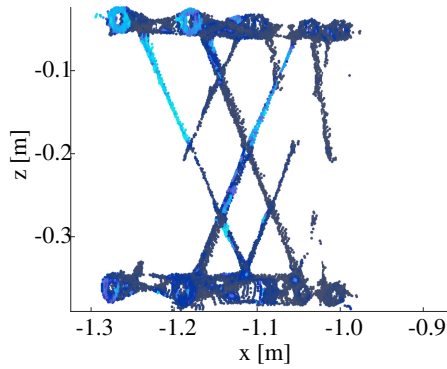
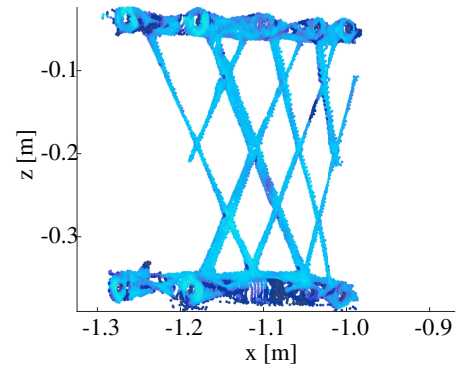


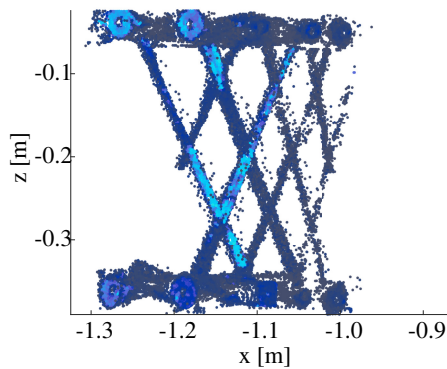
Abb. A.1: Scans eines Standpunktes des Testobjektes aus den Messungen der Laserscanner Leica HDS7000, Trimble X7 und Riegl VZ2000 mit und ohne Verwendung eines Scanningsprays in der 10°-Position.



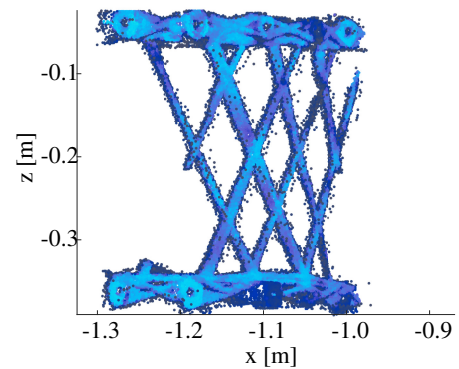
(a) Leica HDS7000 Scan ohne Spray 20°-Position



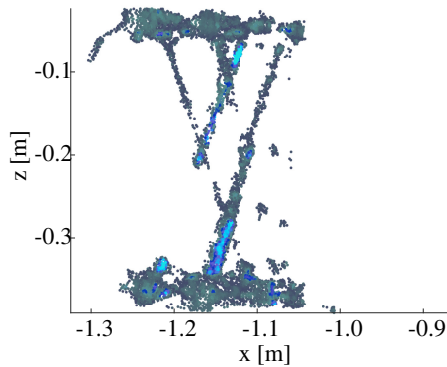
(b) Leica HDS7000 Scan mit Spray 20°-Position



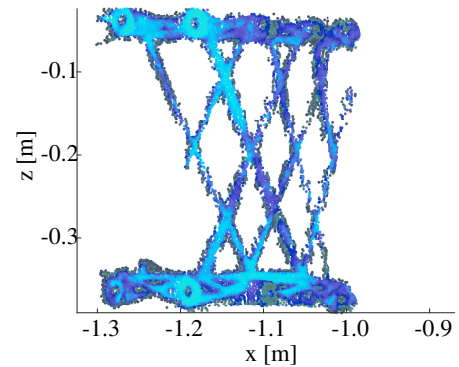
(c) Trimble X7 Scan ohne Spray 20°-Position



(d) Trimble X7 Scan mit Spray 20°-Position



(e) Riegl VZ2000 Scan ohne Spray 20°-Position



(f) Riegl VZ2000 Scan mit Spray 20°-Position

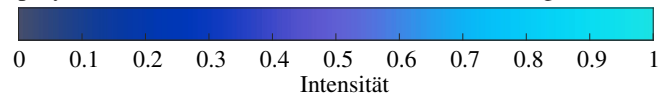
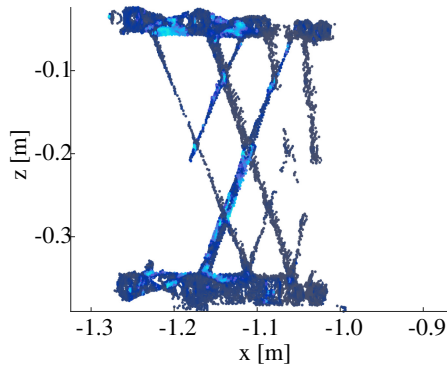
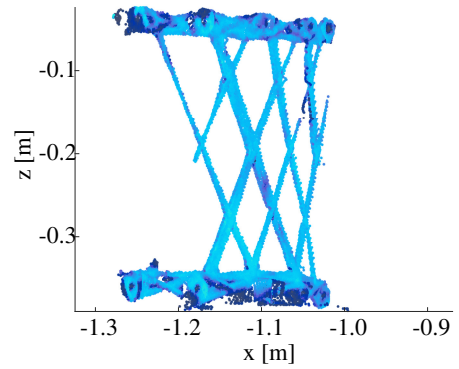


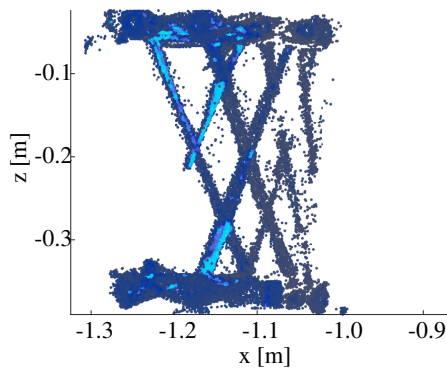
Abb. A.2: Scans eines Standpunktes des Testobjektes aus den Messungen der Laserscanner Leica HDS7000, Trimble X7 und Riegl VZ2000 mit und ohne Verwendung eines Scanningsprays in der 20°-Position.



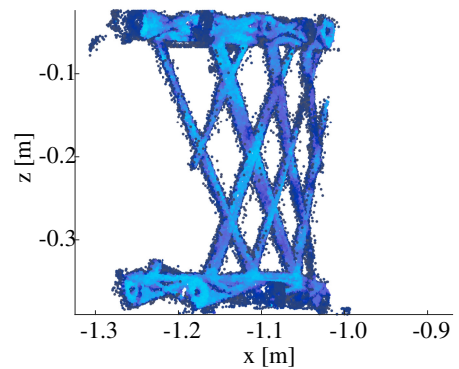
(a) Leica HDS7000 Scan ohne Spray 30°-Position



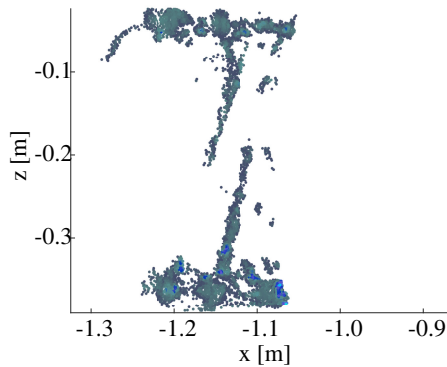
(b) Leica HDS7000 Scan mit Spray 30°-Position



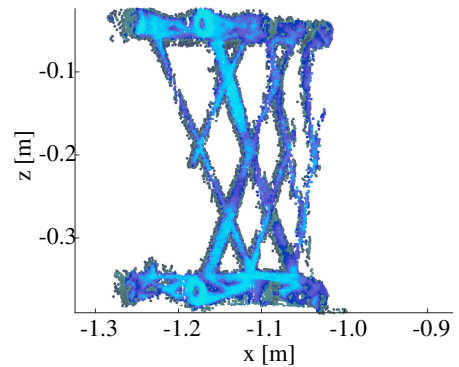
(c) Trimble X7 Scan ohne Spray 30°-Position



(d) Trimble X7 Scan mit Spray 30°-Position



(e) Riegl VZ2000 Scan ohne Spray 30°-Position



(f) Riegl VZ2000 Scan mit Spray 30°-Position

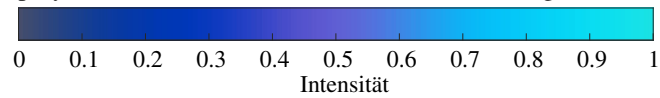
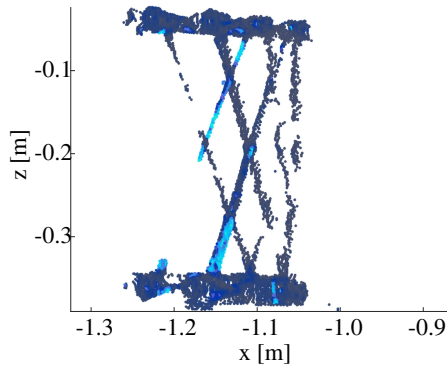
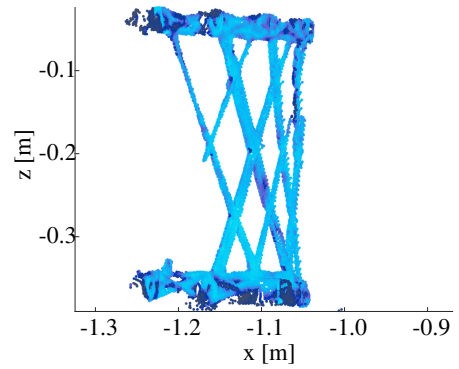


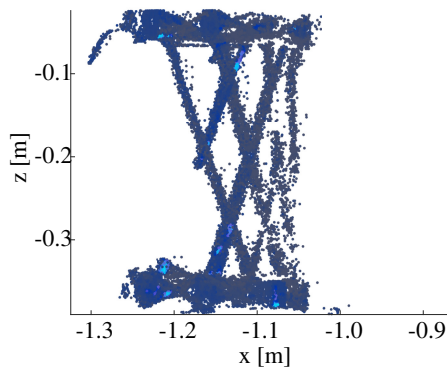
Abb. A.3: Scans eines Standpunktes des Testobjektes aus den Messungen der Laserscanner Leica HDS7000, Trimble X7 und Riegl VZ2000 mit und ohne Verwendung eines Scanningsprays in der 30°-Position.



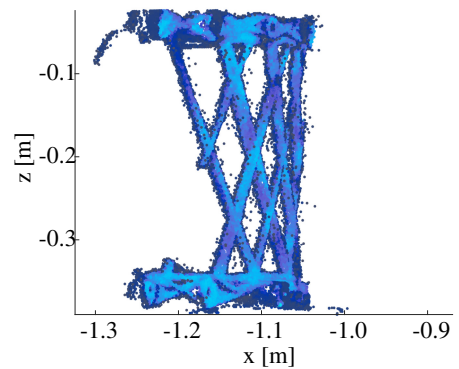
(a) Leica HDS7000 Scan ohne Spray 40°-Position



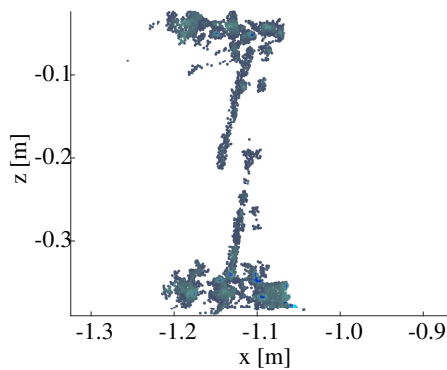
(b) Leica HDS7000 Scan mit Spray 40°-Position



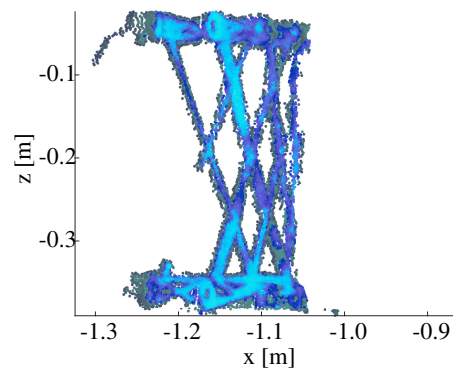
(c) Trimble X7 Scan ohne Spray 40°-Position



(d) Trimble X7 Scan mit Spray 40°-Position



(e) Riegl VZ2000 Scan ohne Spray 40°-Position



(f) Riegl VZ2000 Scan mit Spray 40°-Position

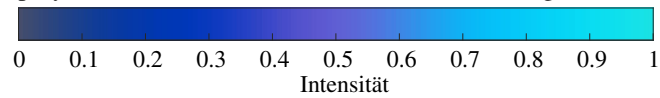
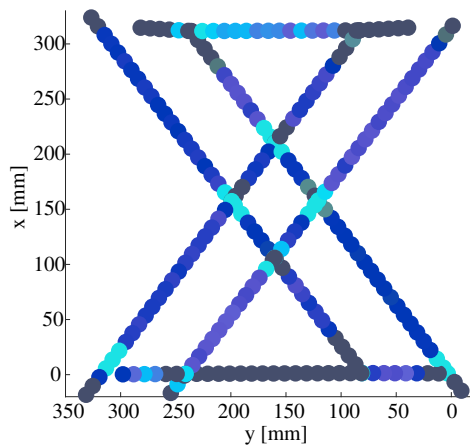


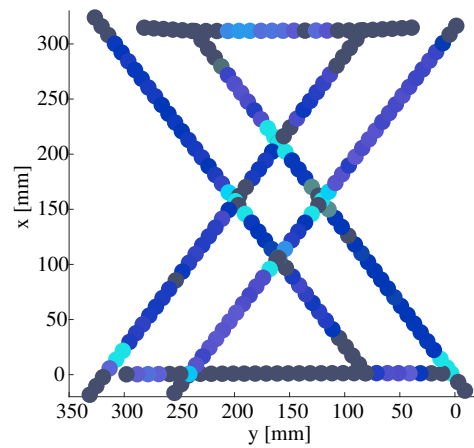
Abb. A.4: Scans eines Standpunktes des Testobjektes aus den Messungen der Laserscanner Leica HDS7000, Trimble X7 und Riegl VZ2000 mit und ohne Verwendung eines Scanningsprays in der 40°-Position.

B Anhang

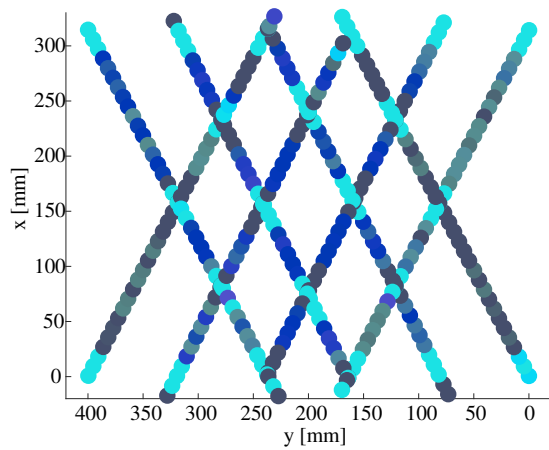
B.1 Darstellung der berechneten Querschnittsflächen für die simulierten Datensätze S2 und S3



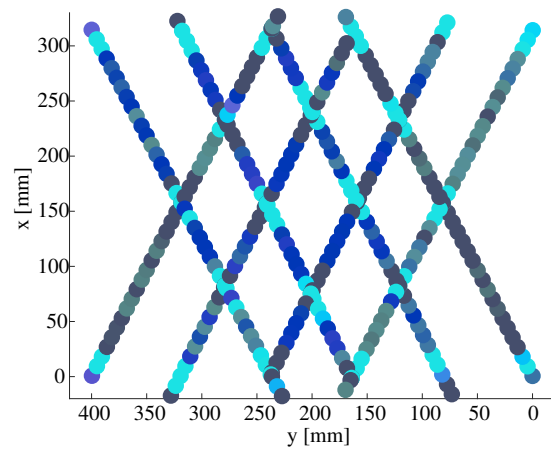
(a) Querschnittsflächen berechnet mit konvexer Hülle.



(b) Querschnittsflächen berechnet mit Alpha-Shapes.



(c) Querschnittsflächen berechnet mit konvexer Hülle.



(d) Querschnittsflächen berechnet mit Alpha-Shapes.

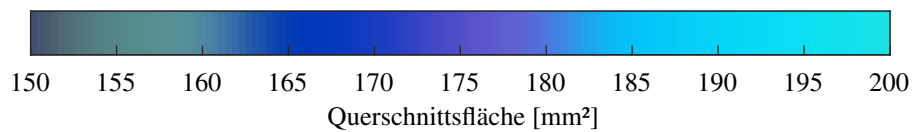


Abb. B.1: Farblich codierte berechnete Querschnittsflächen für die simulierten Testobjekte S2 und S3.

B.2 Ergebnisse der Auswertung für die Messungen in der Fertigung

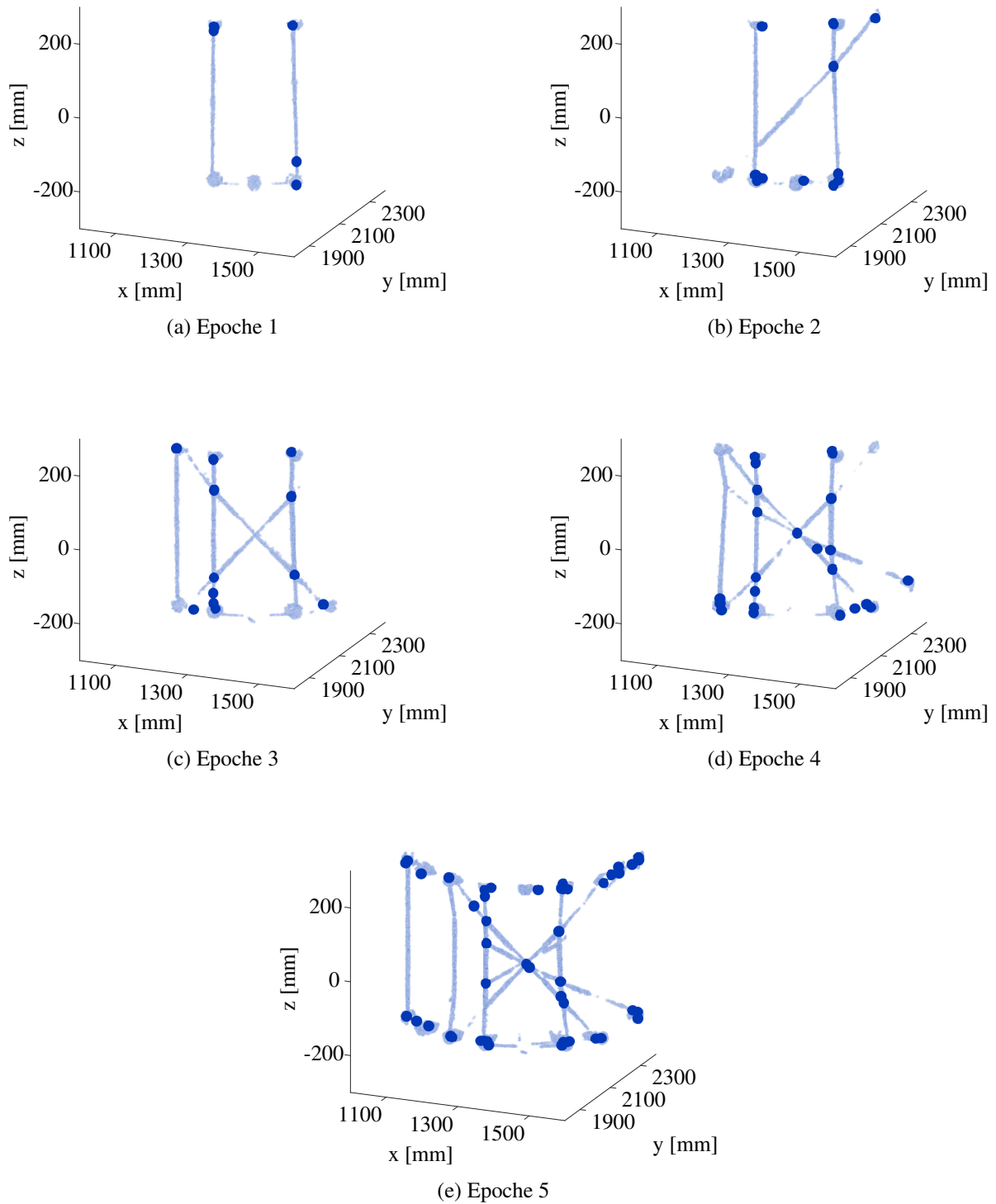
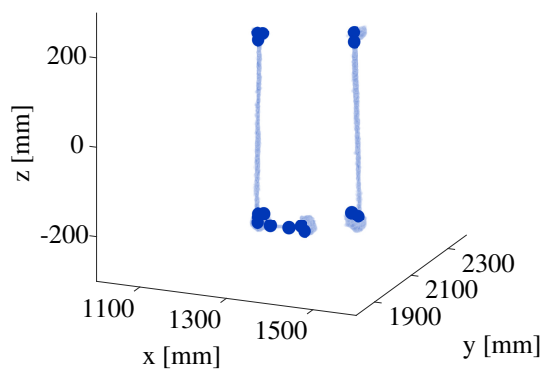
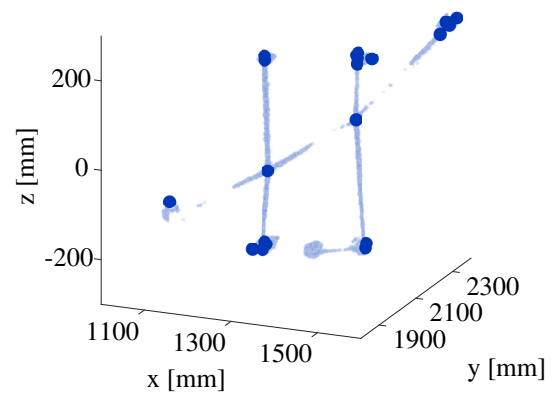


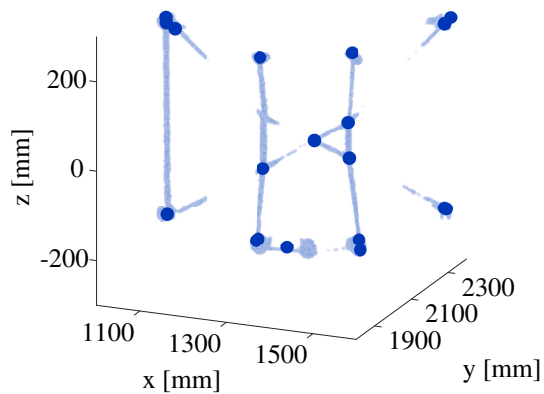
Abb. B.2: Geschätzte Schnittpunktkoordinaten für die gemessenen Punktwolke des Testobjekt 1 in der Fertigung. Dieses Objekt wurde von innen nach außen mit einem Roboter gefertigt.



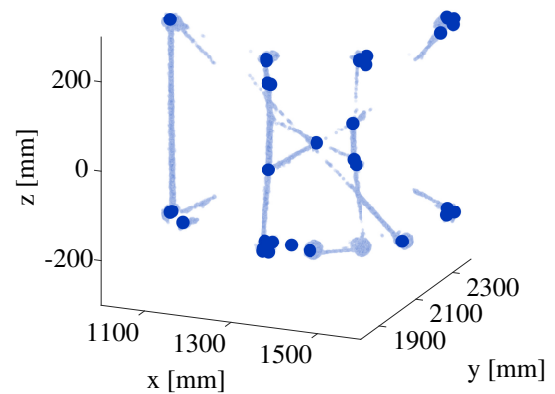
(a) Epoche 1



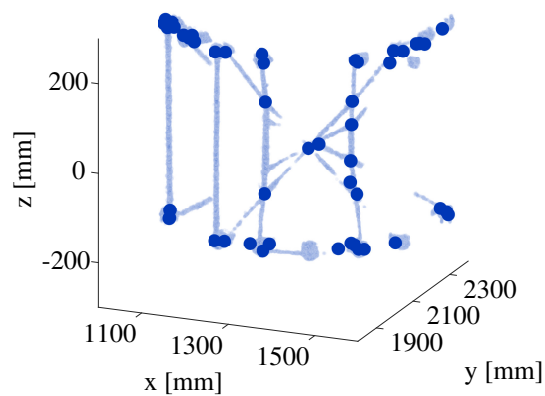
(b) Epoche 2



(c) Epoche 3



(d) Epoche 4



(e) Epoche 5

Abb. B.3: Geschätzte Schnittpunktkoordinaten für die gemessenen Punktwolke des Testobjekt 2 in der Fertigung. Dieses Objekt wurde von außen nach innen mit einem Roboter gefertigt.

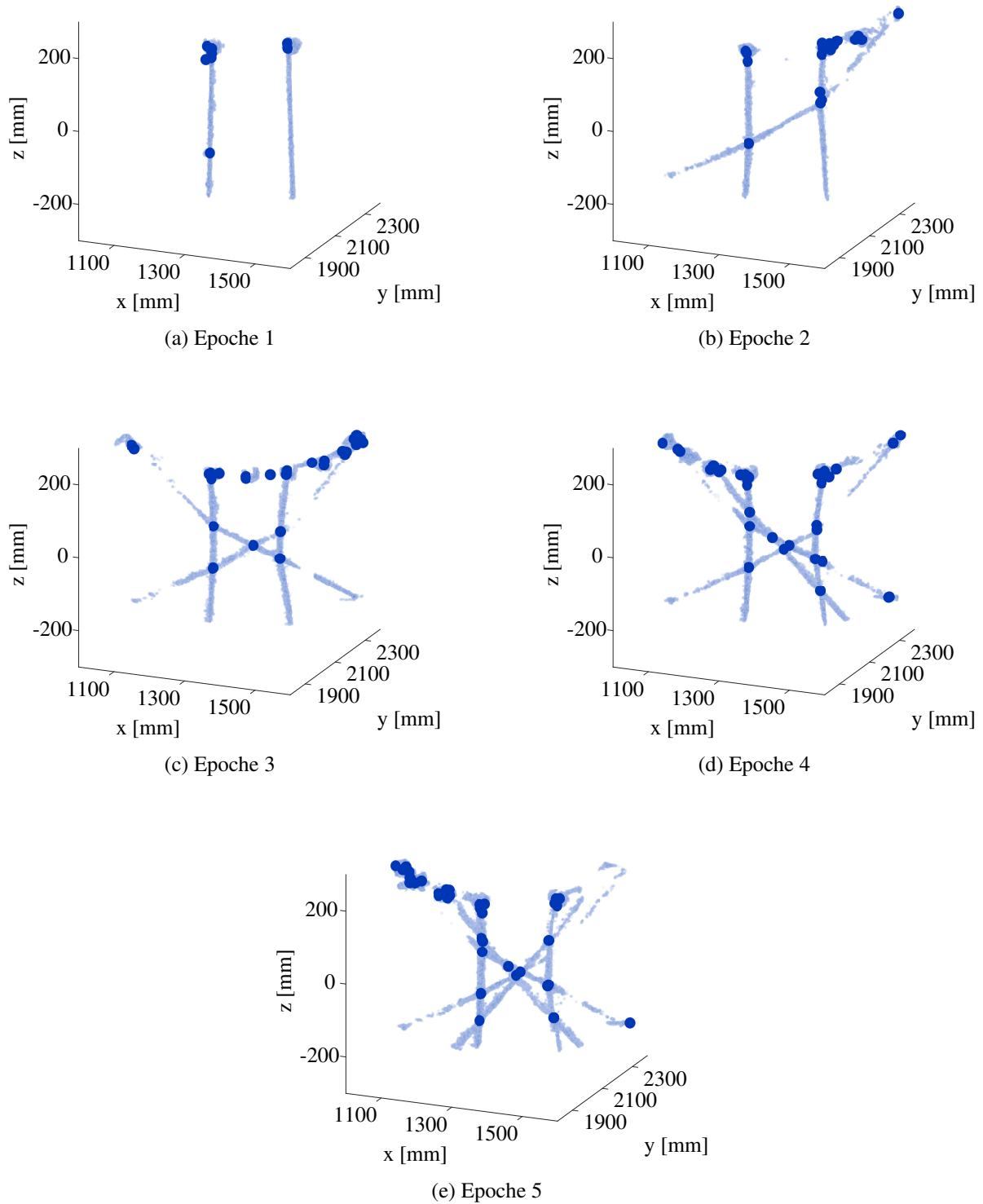
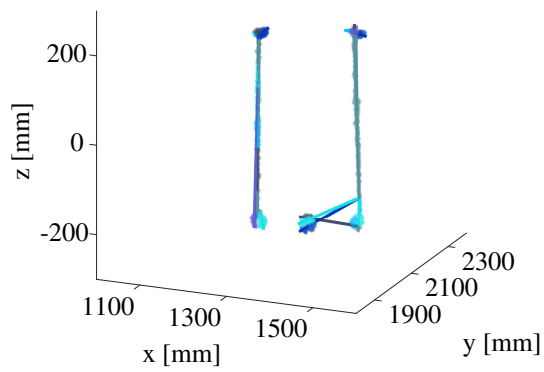
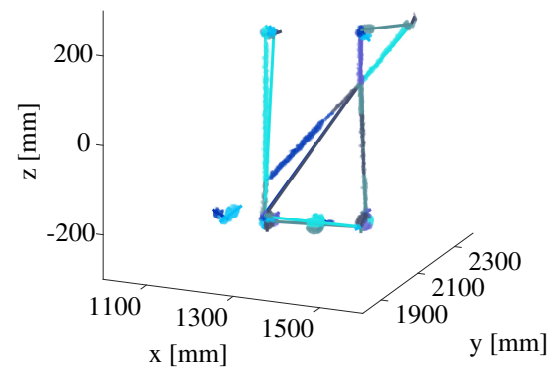


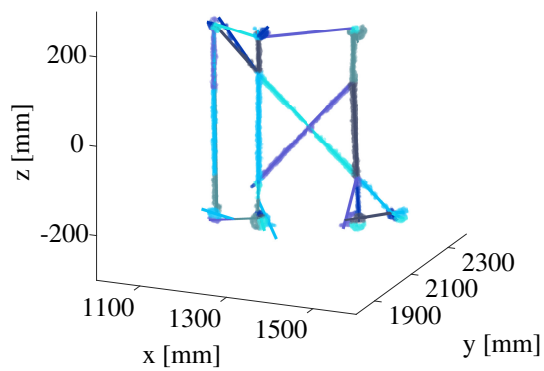
Abb. B.4: Geschätzte Schnittpunktkoordinaten für die gemessenen Punktwolke des Testobjekt 3 in der Fertigung. Dieses Objekt wurde von außen nach innen mit zwei Robotern gefertigt.



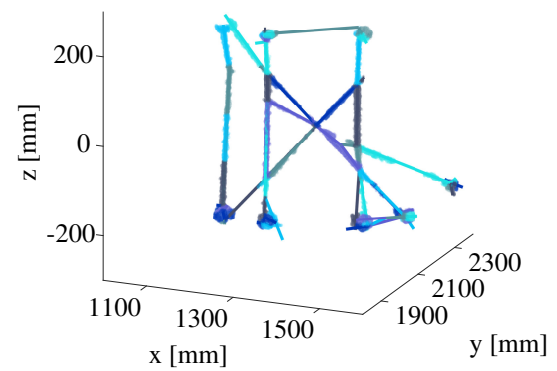
(a) Epoche 1



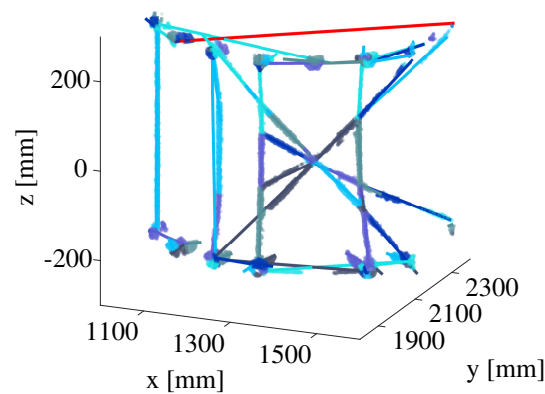
(b) Epoche 2



(c) Epoche 3



(d) Epoche 4



(e) Epoche 5

Abb. B.5: Geschätzte Linien und zugeordnete Punktcluster für die gemessenen Punktwolke des Testobjekt 1 in der Fertigung. Dieses Objekt wurde von innen nach außen mit einem Roboter gefertigt.

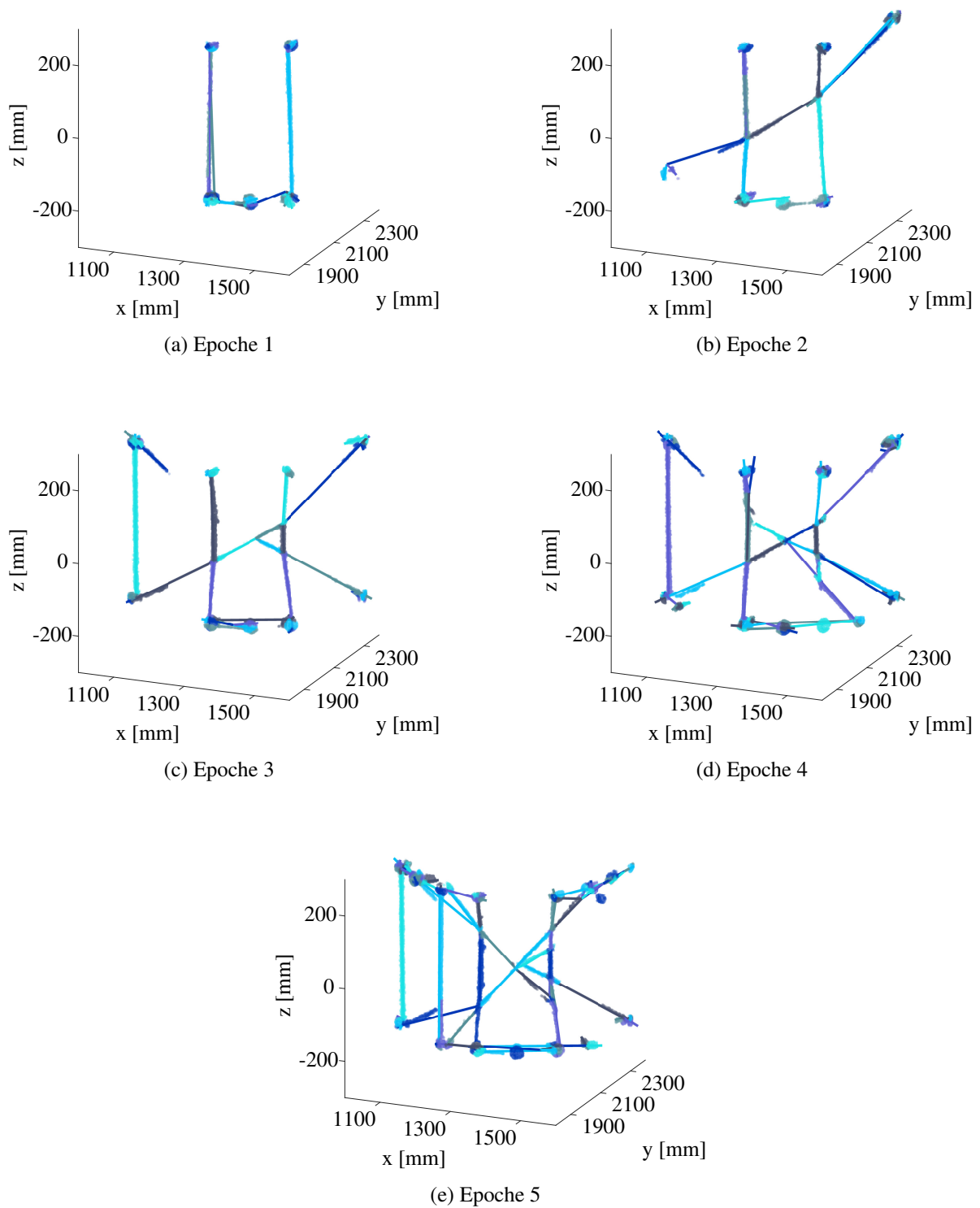


Abb. B.6: Geschätzte Linien und zugeordnete Punktcluster für die gemessenen Punktwolke des Testobjektes 2 in der Fertigung. Dieses Objekt wurde von außen nach innen mit einem Roboter gefertigt.

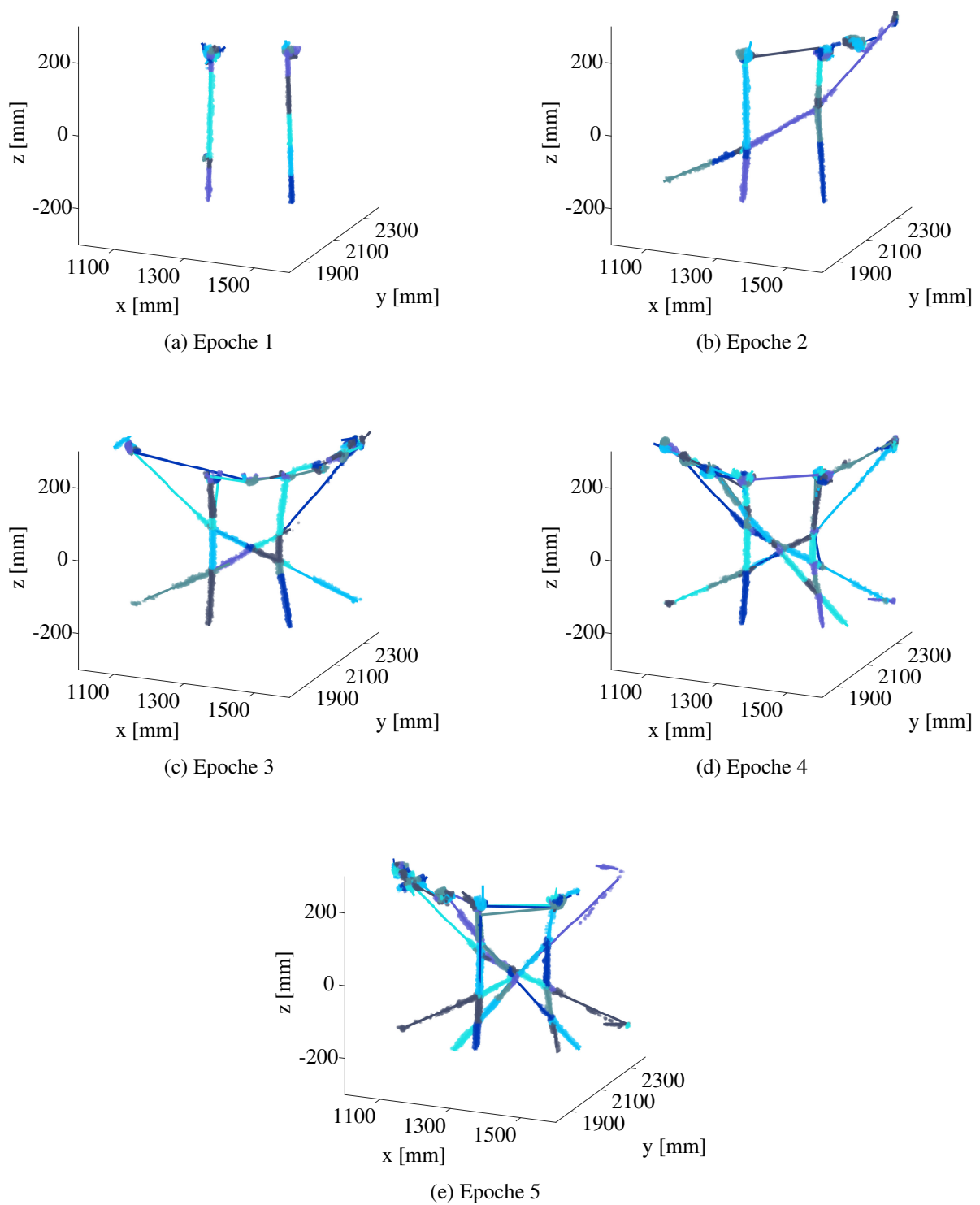
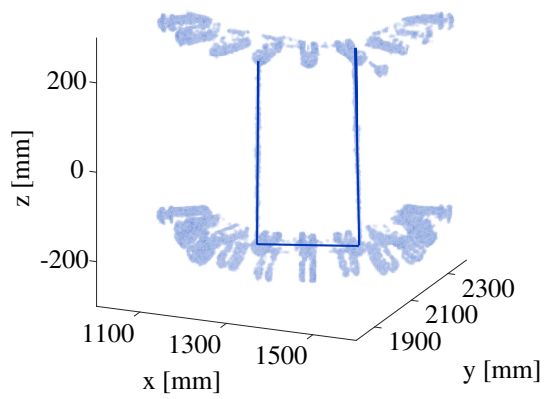
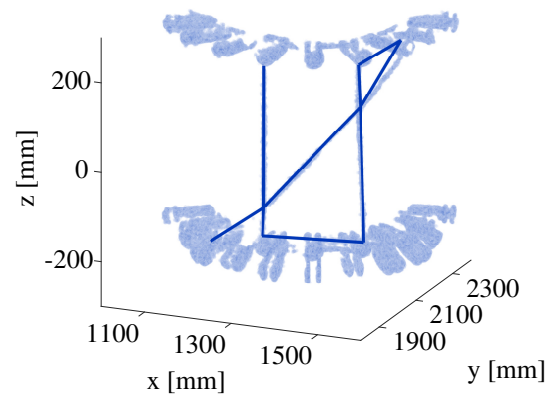


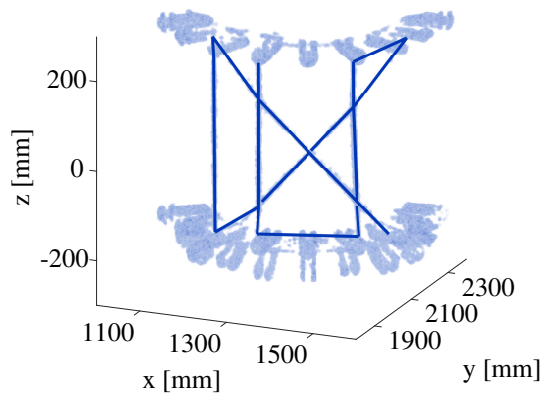
Abb. B.7: Geschätzte Linien und zugeordnete Punktcluster für die gemessenen Punktwolke des Testobjektes 3 in der Fertigung. Dieses Objekt wurde von außen nach innen mit zwei Robotern gefertigt.



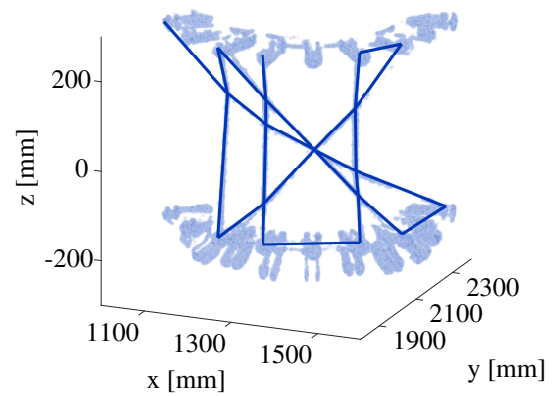
(a) Epoche 1



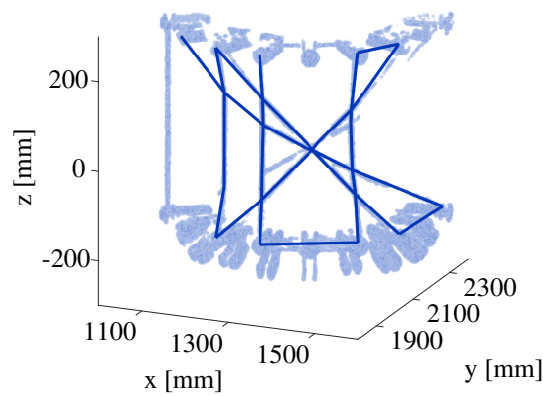
(b) Epoche 2



(c) Epoche 3



(d) Epoche 4



(e) Epoche 5

Abb. B.8: Ergebnisse der Netzgenerierung für die gemessenen Punktwolke des Testobjektes 1 in der Fertigung. Dieses Objekt wurde von innen nach außen mit einem Roboter gefertigt.

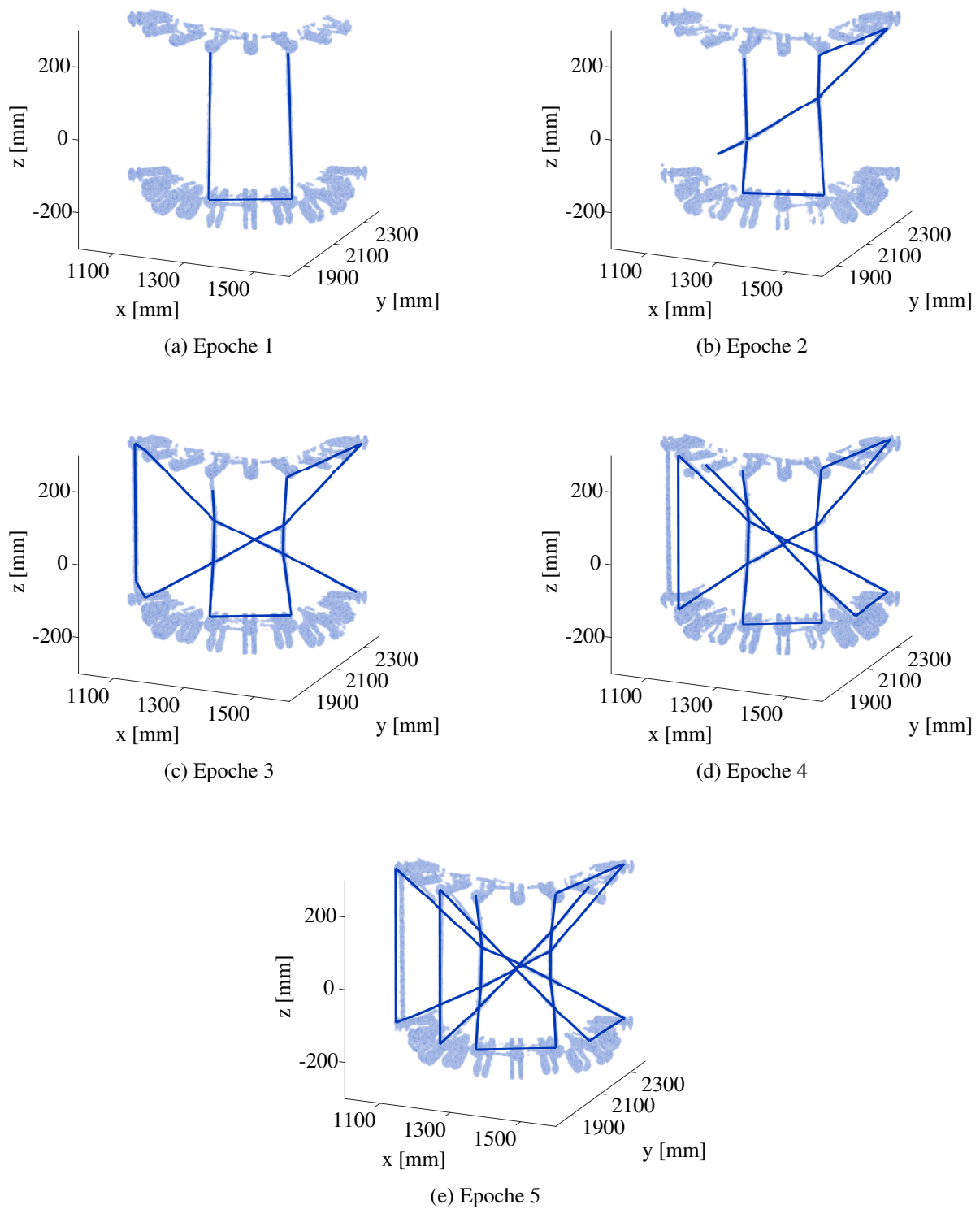
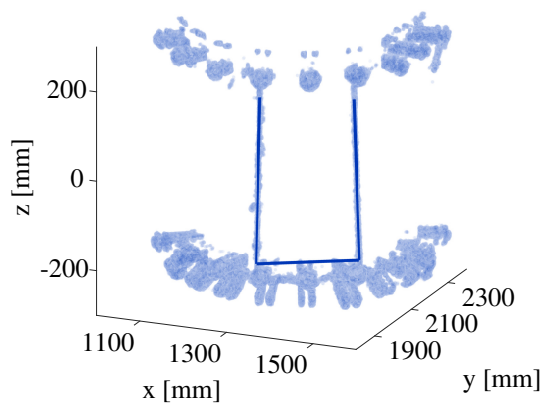
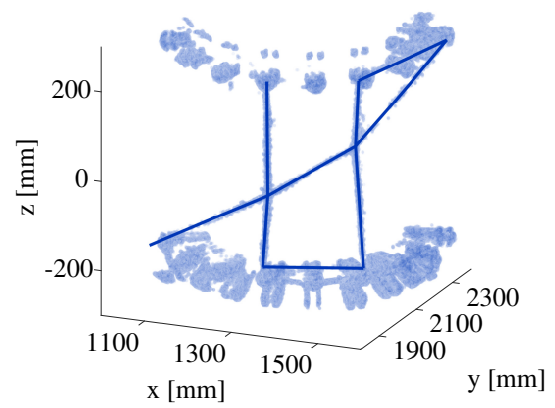


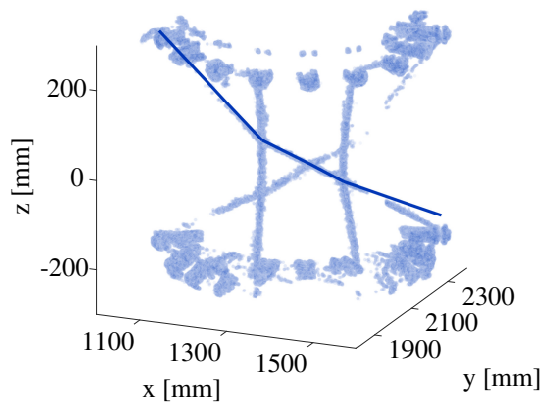
Abb. B.9: Ergebnisse der Netzgenerierung für die gemessenen Punktwolke des Testobjektes 2 in der Fertigung. Dieses Objekt wurde von außen nach innen mit einem Roboter gefertigt.



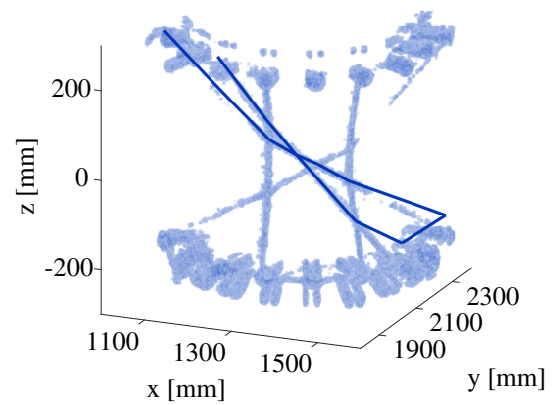
(a) Epoche 1



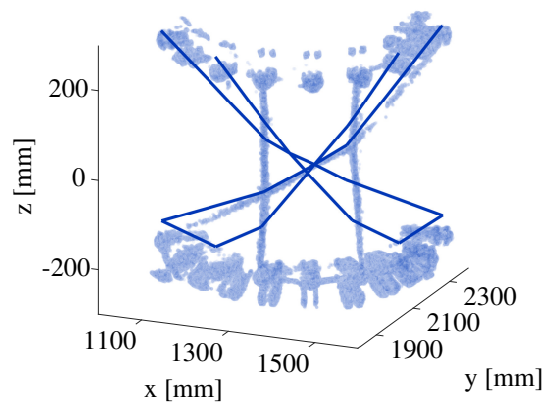
(b) Epoche 2



(c) Epoche 3



(d) Epoche 4



(e) Epoche 5

Abb. B.10: Ergebnisse der Netzgenerierung für die gemessenen Punktwolke des Testobjektes 3 in der Fertigung. Dieses Objekt wurde von außen nach innen mit zwei Robotern gefertigt.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die mich während der Entstehung dieser Dissertation begleitet und unterstützt haben. Mein besonderer Dank gilt hierbei meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Volker Schwieger, der mich bei der Erstellung dieser Arbeit stets unterstützt hat. Des Weiteren danke ich Prof. Dr. Corinna Harmening und Prof. Dr.-Ing. Peter Middendorf für die Übernahme des Koreferats.

Auch möchte ich mich bei der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) bedanken, die die Erstellung dieser Arbeit im Rahmen der Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder – EXC 2120/1 – 390831618 gefördert hat. Ich bedanke mich bei allen IntCDC Kolleginnen und Kollegen, die die Erstellung dieser Arbeit durch ihren interdisziplinären Input unterstützt haben und neue Ideen mit eingebracht sowie mir die Möglichkeit der Prototypen Messungen ermöglichte. Mein besonderer Dank gilt hierbei meinen RP18-Kollegen, sowie den Mitarbeitern des ICD und ITKE die mir einen Einblick in die vielen verschiedenen Demonstratoren ermöglichten. Zudem danke ich Sebastian Hügler vom IFB für seine Unterstützung bei der Fertigung der Probekörper und der Durchführung der Referenzmessungen. Auch danke ich Prof. Dr. Andreas Wieser, der im Rahmen seines Besuchs als Gastprofessor in IntCDC die Arbeit mit neuen Denkanstößen unterstützte.

Ich danke allen meinen aktuellen und ehemaligen Kolleginnen und Kollegen am IIGS für ihre Unterstützung. Mein besonderer Dank gilt Li Zhang, die die Arbeit im Projekt begleitet hat und an Martin Metzner, der immer für Fragen aller Art zur Verfügung stand. Auch danke ich Martin Knihs für die Fertigung der speziellen Messhalterungen, Urs Basalla, Andreas Kanzler und Yihui Yang für die Unterstützung bei der Durchführung von Messungen, sowie Ronja Miehl, Aiham Hassan und Gabriel Kerekes für den fachlichen Austausch. Mein Dank gilt des Weiteren Lyudmila Gorokhova und Philipp Luz, deren Unterstützung maßgeblich zum Abschluss dieser Arbeit beigetragen hat.

Zuletzt danke ich meinen Eltern, meinem Bruder, meinen Großeltern, und allen Freunden, die mich in den letzten Jahren bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben und dies alles erst möglich gemacht haben.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Laura Janina Balangé
Geburtsdatum: 09. September 1994
Geburtsort: Stuttgart Bad-Cannstatt
Staatsangehörigkeit: Deutsch

Ausbildung

09/2001 - 07/2005 Wolfgang-Zacher Grund- und Hauptschule, Waiblingen
09/2005 - 07/2013 Staufer-Gymnasium, Waiblingen
Abschluss: Abitur
10/2016 - 10/2016 Bachelorstudium der Geodäsie und Geoinformatik,
Universität Stuttgart,
Abschluss: B.Sc. Geodäsie und Geoinformation
10/2016 - 10/2018 Masterstudium der Geodäsie und Geoinformatik,
Universität Stuttgart,
Abschluss: M.Sc. Geodäsie und Geoinformation

Berufstätigkeit

seit 12/2018 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Ingenieurgeodäsie (IIGS),
Universität Stuttgart