

Technische Universität München
TUM School of Engineering and Design

Ein Beitrag zur Verbesserung von roboterbasierten optischen Messsystemen durch eine neuartige Verkettung von Punktwolken

Philipp Alexander Friedrich Bauer

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr. rer. nat. Tim C. Lüth

Prüfer*innen der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Prof. Dr.-Ing. Christoph Holst

Die Dissertation wurde am 26.01.2023 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die TUM School of Engineering and Design am 26.06.2023 angenommen.

Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes und damit die Sicherheit der Arbeitsplätze hängen entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des iwv ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen sowie von Nachhaltigkeitsaspekten entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in alle Planungs- und Entwicklungsprozesse spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des iwv. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Die Steuerung und der Betrieb von Produktionssystemen, die Qualitätssicherung, die Verfügbarkeit und die Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den Forschungsberichten des iwv werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des Institutes veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und den Anwendenden zu verbessern.

Gunther Reinhart

Michael Zäh

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München (TUM).

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart für das Vertrauen und die Unterstützung während meiner Zeit am *iwb* sowie für die wohlwollende Betreuung meiner Dissertation. Ebenso möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. rer. nat. Tim C. Lüth für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission bedanken. Prof. Dr.-Ing. Christoph Holst danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Des Weiteren danke ich allen Kolleginnen und Kollegen am *iwb*, die dazu beigetragen haben, dass diese Zeit zu einem unvergesslichen Lebensabschnitt wurde. Insbesondere die angenehme Arbeitsatmosphäre, die angeregten Diskussionen und die ein oder andere Nachtschicht werden mir dabei in guter Erinnerung bleiben. Mein spezieller Dank gilt dabei Alejandro Magaña, Lisa Heuß, Max Busch, Clemens Gonnermann, Fabian Konwitschny und Daniel Gebauer.

Darüber hinaus danke ich auch allen Studentinnen und Studenten, die mich im Laufe meines Dissertationsvorhabens mit viel Eifer und Engagement unterstützt haben. Insbesondere möchte ich an dieser Stelle Fridolin Fink, Mario Worack, Lars Heckler und Stefan Schmitt hervorheben.

Meiner gesamten Familie möchte ich für den Rückhalt und die immerwährende Unterstützung danken. Insbesondere meinen Eltern, Renate und Friedrich Bauer, gilt mein ganz besonderer Dank; sie haben mir den Wert und die Bedeutung von Bildung vermittelt und mein Vorhaben stets bedingungslos gefördert.

Zuletzt danke ich Dir, liebe Madeleine, von ganzem Herzen! Vor allem deine aufmunternden Worte, dein Optimismus und dein Verständnis für die vielen Arbeitsstunden an zahlreichen Wochenenden haben mir durch diese intensive Zeit geholfen. Ich freue mich auf die gemeinsame Zukunft, auf unsere Ziele und auf – hoffentlich deutlich mehr – zukünftige Urlaube!

München, im August 2023

Philipp Bauer

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	ix
Verzeichnis der Formelzeichen	xi
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation, Motivation und Zielsetzung der Dissertation	1
1.2 Wissenschaftstheoretische Einordnung und Forschungsmethodik	3
1.3 Aufbau der Arbeit	5
2 Grundlagen	7
2.1 Optische Koordinatenmesstechnik für roboterbasierte Systeme .	7
2.1.1 Industrieroboter, 3D-Sensoren und Projektionssysteme .	7
2.1.2 Digitalisierung von Prüfobjekten	13
2.2 Punktwolkenverarbeitung	14
2.2.1 Transformation von Punktwolken	14
2.2.2 Iterative-Closest-Point-Algorithmus	15
2.2.3 Globale Registrierung und Fehlerfortpflanzung	17
2.3 Bildverarbeitung	18
2.3.1 Detektionsverfahren nach der Viola-Jones-Methode . . .	19
2.3.2 Lokalisation von Kanten	20
2.3.3 Subpixelgenaue Referenzpunkte	22
3 Stand des Wissens	25
3.1 Überblick	25
3.2 Roboterbasierte optische Messsysteme in der Qualitätsprüfung .	26
3.2.1 Allgemeines	26
3.2.2 Etablierte Verfahren zur Ausrichtung von Teilansichten .	27
3.3 Registrierung von Punktwolken	32
3.3.1 Allgemeines	32
3.3.2 Verfahren zur Grobausrichtung	33
3.3.3 Ansätze zur Feinregistrierung	36
3.4 Detektion von Zielmarken	41
3.4.1 Allgemeines	41
3.4.2 Detektions- und Identifikationsmethoden	43
3.4.3 Detektion von projizierten Zielmarken	47
3.5 Bereitstellung von Projektionen	49

3.5.1	Allgemeines	49
3.5.2	Ansätze zur Adaption von Projektionen	50
3.6	Fazit und Ableitung des Handlungsbedarfs	52
4	Herausforderungen, Lösungskonzept und Vorgehensweise	55
4.1	Herausforderungen beim Einsatz von Projektionen	55
4.2	Lösungskonzept basierend auf bereichsspezifischen Projektionen und virtuellen Strukturen	57
4.3	Vorgehensweise und Arbeitsziele	60
5	Technische Umsetzung	63
5.1	Versuchsumgebung und Demonstrator	63
5.2	Softwaretechnische Realisierung	65
6	Kumulative Darstellung der eingebundenen Publikationen	69
6.1	Übersicht	69
6.2	Publikation 1 – Beschreibung des Lösungskonzepts	71
6.3	Publikation 2 – Studie zur Grobausrichtung von Punktwolken . .	73
6.4	Publikation 3 – Bereitstellung bereichsspezifischer Projektionen .	74
6.5	Publikation 4 – Intelligente Vordetektion von Projektionsprimitiven	76
6.6	Publikation 5 – Feinregistrierung von Punktwolken	77
6.7	Publikation 6 – Potenzialanalyse des Lösungskonzepts hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit	79
7	Themenübergreifende Diskussion der Ergebnisse	81
7.1	Kritische Reflexion	81
7.2	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	89
8	Schlussbetrachtung	93
8.1	Zusammenfassung	93
8.2	Ausblick	95
	Literaturverzeichnis	97
	Abbildungsverzeichnis	113
	Tabellenverzeichnis	115
	Begriffserklärung	117
A	Anhang	119
A.1	Betreute Studienarbeiten	119
A.2	Veröffentlichungen des Autors	121

Abkürzungsverzeichnis

API	Application Programming Interface
AR	Augmented Reality
CAD	Computer Aided Design
CLI	Command Line Interface
COM	Component Object Model
DLP	Digital Light Processing
DMD	Digital Micromirror Device
DRM	Design Research Methodology
GUI	Graphical User Interface
HDMI	High Definition Multimedia Interface
ICP	Iterative Closest Point
<i>iwb</i>	Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften
KMG	Koordinatenmessgerät
KOS	Koordinatensystem
LCD	Liquid Crystal Display
ML	Maschinelles Lernen
OpenCV	Open Computer Vision
PCL	Point Cloud Library
SVD	Singular Value Decomposition
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
TUM	Technische Universität München
XML	Extensible Markup Language

Verzeichnis der Formelzeichen

Symbol	Einheit	Beschreibung
A	—	Homogene Transformationsmatrix (4x4)
A_0	—	Initialisierte Transformationsmatrix (4x4) zur Translation \mathbf{t} und Rotation \mathbf{R}
A_{cal}	—	Durch Fehlerminimierung berechnete Transformationsmatrix (4x4)
$C()$	—	Operator für die Korrespondenzsuche
d	mm	Länge eines Prüfmerkmals
$d()$	—	Abstandsmetrik für die Korrespondenzsuche
$e_{A,d}$	mm	Gesamtmeßfehler einer Verkettung
$e_{A,i}$	mm	Ausrichtungsfehler einer Registrierung
\mathbf{e}_i	—	Fehler zwischen Korrespondenzen
e_{MSE}	—	Mittlerer quadratischer Fehlerabstand
i	—	Laufindex
$I_{B_{m,n}}$	—	Binärbild
I_P	—	Pixelintensität
$I_{\sigma_{m,n}}$	—	Geglättetes Bild mittels Gauß-Filter
I_1, I_2	—	Intensitätswerte einer Schwellwertoperation
\mathcal{K}_{In}	$\frac{\text{€}}{h}$	Installations- und Inbetriebnahmekosten pro Stunde
\mathcal{K}_M	$\frac{\text{€}}{h}$	Maschinenstundensatz
\mathcal{K}_P	$\frac{\text{€}}{h}$	Personalkosten pro Stunde
$\mathcal{K}_{\text{Prüfauftrag}}$	€	Kosten pro Prüfauftrag
m	—	Index zur Kennzeichnung einer Bildzeile

n	–	Index zur Kennzeichnung einer Bildspalte
n_c	–	Anzahl an korrespondierenden Punkten
P_{X_1}, P_{X_2}	–	Punkte der Punktwolken X_1, X_2
$\mathcal{Q}()$	–	Operator zur Transformationsberechnung durch Fehlerminimierung
R	–	Rotationsmatrix in $\mathbb{R}^{3 \times 3}$
R_{ij}	–	Einträge der Rotationsmatrix R in i-ter Zeile und j-ter Spalte
\mathbb{R}	–	Reelle Zahlen
S_x, S_y	–	Sobel-Operator in x- und y-Richtung
t	–	Festgelegter Intensitätsschwellwert
t	–	Translationsvektor in \mathbb{R}^3
t_{Dauer}	h	Dauer pro Prüfauftrag
t_x, t_y, t_z	–	Komponenten des Translationsvektors t in x-, y- und z-Richtung
X_c	–	Menge an Korrespondenzen
X_1, X_2	–	Punktwolke
$\Theta_{m,n}$	–	Kantenrichtung
$\rho_{m,n}$	–	Gradientenstärke
τ	mm^2	Schwellwert als Abbruchkriterium des ICP-Algorithmus

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Ausgangssituation, Motivation und Zielsetzung der Dissertation

Vorherrschende Trends wie die Globalisierung oder die Ressourcenverknappung nehmen Einfluss auf die Produktion. Sie wirken sich auf die Herstellkosten, die Qualität, die Geschwindigkeit und die Wandelbarkeit aus. Diese Zielgrößen der Produktion sind somit sich verändernden Rahmenbedingungen ausgesetzt und diese beeinflussen die Gestaltung von Produktionssystemen. (ABELE und REINHART 2011, S. 10 ff., S. 34)

In Bezug auf die Qualität lässt sich eine gesteigerte Erwartungshaltung am Markt beobachten (IMKAMP et al. 2012; PFEIFER und SCHMITT 2010, S. 2 f.). In der Folge ergeben sich somit auch neue Anforderungen an die Fertigungsmesstechnik (PFEIFER und SCHMITT 2010, S. 2 f.), um die Produktqualität im Einklang mit den genannten Trends und deren Auswirkungen auf die Produktion zu erfassen. Daraus resultiert zudem die Forderung, schnellere, genauere, sicherere und flexiblere Messsysteme zu entwickeln (IMKAMP et al. 2012).

Die Automobilindustrie ist im Bereich der geometrischen Qualitätsprüfung von gefertigten Blechbauteilen besonders mit diesen Herausforderungen konfrontiert. Die Produktionsbedingungen der Automobilindustrie sind von zunehmend geringeren Fertigungstoleranzen (KIRACI et al. 2017), hohen Stückzahlen (KOUTECKÝ et al. 2016; LUDWIG 2010, S. 50) und einem ausgeprägten Kostenbewusstsein (KIRACI et al. 2017) geprägt. Aus diesem Grund ist es unerlässlich, zukunftsfähige Messsysteme zu entwickeln; sie sollen einen wichtigen Beitrag zu einer effektiven und ressourcenschonenden Qualitätsprüfung leisten.

Roboterbasierte optische Messsysteme haben sich in den letzten Jahren in diesem Bereich besonders etabliert. Dabei führt ein Industrieroboter einen optischen 3D-Sensor durch den Arbeitsraum. Dieses System vereint die positiven Eigenschaften eines Industrieroboters als verhältnismäßig kostengünstigen, flexiblen und automatisierbaren Manipulator (REINHART et al. 2018, S. 11 f.) mit den Fähigkeiten eines 3D-Sensors, der Oberflächen kontaktlos, schnell und flächenhaft erfassen kann. Sowohl Industrieroboter als auch optische Messsysteme in Verbindung mit einer industriellen Bildverarbeitung werden in verschiedenen Bereichen der

Produktion als Schlüsseltechnologien bezeichnet (PFEIFER und SCHMITT 2010, S. 16; REINHART et al. 2018, S. 11). Ihre Kombination birgt großes Potenzial für die Herausforderungen der Fertigungsmesstechnik.

Moderne 3D-Sensoren erfassen die Oberfläche von Prüfobjekten innerhalb eines spezifizierten Sichtbereichs. Nach einem Messvorgang steht eine 3D-Aufnahme in Form einer Punktwolke zur Verfügung. Aufgrund des limitierten Sichtbereichs sind in der Regel mehrere solcher Teilbereichsaufnahmen (nachfolgend kurz Teilansichten genannt) notwendig, um den Messbereich zu erweitern (WECKENMANN 2012, S. 229) bzw. größere Prüfmerkmale als Ganzes zu erfassen (ULRICH 2018, S. 9). Dies erfordert eine möglichst genaue Ausrichtung der 3D-Aufnahmen zueinander mit einer anschließenden Zusammenführung. Der Prozess des Ausrichtens von Punktwolken wird dabei auch als *Registrierung* bezeichnet (BENNAOUN und MAMIC 2002, S. 101 f.; ULRICH 2018, S. 9). Bei roboterbasierten Messsystemen muss diesbezüglich jedoch die Genauigkeit der Roboterkinematik konzeptionell berücksichtigt werden. Während Industrieroboter Genauigkeiten im Bereich von Millimetern erreichen (GERKE 2014, S. 156; LUDWIG 2010, S. 147; NUBIOLA und BONEV 2013; ULRICH et al. 2014), werden beispielsweise in der Automobilindustrie Toleranzen im Bereich von Zehntelmillimetern (ca. 0,1–0,2 mm) gefordert (LUX-GRUENBERG 2020, S. 2; ÜRÜN et al. 2017). In diesem Zusammenhang weisen KIRACI et al. (2017) und LUHMANN et al. (2019, S. 619) auf die unzureichende Roboter Genauigkeit für Messapplikationen hin. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, innovative Registrierungsverfahren für roboterbasierte optische Messsysteme zu erforschen.

Aufgrund der Messgenauigkeiten aktueller 3D-Sensoren im Submillimeterbereich erweisen sich Ansätze als besonders aussichtsreich, die eine präzise Ausrichtung von Teilansichten auf Basis der punktbasierten Oberflächenausschnitte ermöglichen. Sie sind in der Lage, initiale Ausrichtungsfehler zu kompensieren. Dabei hängt der Erfolg solcher algorithmischen, iterativen Methoden von der Oberflächenausprägung und somit von den vorhandenen Oberflächenmerkmalen der auszurichtenden Teilansichten ab (GODIN et al. 1994; LUHMANN 2010; LUHMANN et al. 2019, S. 622). Daher ist es erforderlich, dass auf Basis von den vorhandenen geometrischen Merkmalen einer Oberfläche eine Einschränkung aller Freiheitsgrade bei der Ausrichtung erfolgen kann (LUHMANN et al. 2019, S. 622). Dies ist nicht immer gegeben; zum Beispiel nicht an ebenen Oberflächen (LUHMANN et al. 2019, S. 622). Hier kann der Einsatz von zusätzlich eingebrachten Informationen oder Hilffsystemen zur Unterstützung des Ausrichtungsprozesses Abhilfe schaffen.

Als besonders vielversprechend zeigen sich projizierte Texturen, die durch Projektoren auf einer Bauteiloberfläche bereitgestellt werden. Diese zusätzlichen Informationen können kostengünstig, kontaktlos und flexibel eingebracht und anschließend zur Unterstützung der Registrierung herangezogen werden. Dies bietet Vorteile gegenüber etablierten Verfahren wie der Ausrichtung von Teilansichten mithilfe von teuren Lasertrackern oder dem aufwändigen Einmessen von aufgebrachten Zielmarken auf Basis photogrammetrischer Methoden (ULRICH 2018, S. 20 ff., S. 57 f.).

Insbesondere moderne Projektoren besitzen hierbei großes Potenzial. Sie weisen zum einen eine hohe technische Leistungsfähigkeit auf und erlauben zum anderen eine computergestützte Anbindung und Integration in die Umgebung von roboterbasierten optischen Messsystemen. Daraus ergeben sich neue Chancen, die bisher nicht genutzt wurden und die das Forschungsvorhaben dieser Arbeit motivieren. Insbesondere eröffnen sich Möglichkeiten, den Herausforderungen wie der Automatisierbarkeit, den komplexen Aufnahmebedingungen bei der Messdatenerfassung oder der Anwendbarkeit auf ein breites Bauteilspektrum in neuer Weise zu begegnen.

Es ist notwendig, zukunftsfähige Messsysteme zu entwickeln, die für eine geometrische Qualitätsprüfung in produzierenden Unternehmen eingesetzt werden können. Daraus leitet sich die Zielsetzung dieser Dissertation ab. Sie besteht in der Genauigkeitssteigerung bei der Verkettung von Punktwolken für roboterbasierte optische Messsysteme, wobei die Einsetzbarkeit von modernen Projektoren für eine präzise Ausrichtung von Teilansichten mittels iterativer Methoden erforscht werden soll. Es soll, aufbauend auf dem Stand des Wissens und nach wissenschaftlichen Gesichtspunkten, ein geeigneter Ansatz abgeleitet und evaluiert werden. Der Ansatz soll die hohen Ungenauigkeiten von initialen Ausrichtungsfehlern zuverlässig kompensieren. Diese stellen sich beispielsweise bei einer Registrierung auf Basis der Kinematik von Industrierobotern ein.

Ausgehend von der beschriebenen Zielsetzung lassen sich vier Forschungsfragen (FF) aufstellen:

1. Wie können moderne Projektoren eingesetzt werden, um zu einer präzisen Ausrichtung von Teilansichten für roboterbasierte optische Messsysteme beizutragen?
2. Wie können derartige Projektionssysteme modelliert und in Messsysteme integriert werden, um Projektionen in gewünschter Weise bereitzustellen?
3. Welche Methoden der digitalen Bildverarbeitung eignen sich für eine zuverlässige Detektion der projizierten Referenzelemente?
4. Welchen Beitrag leistet ein entsprechender Registrierungsansatz zur Steigerung der Genauigkeit gegenüber einer roboterassistierten Ausrichtung von Teilansichten?

1.2 Wissenschaftstheoretische Einordnung und Forschungsmethodik

Aus der formulierten Zielsetzung ergibt sich der inhärente Forschungscharakter dieser Arbeit. Da ein technisches System und Verfahren in einem anwendungsorientierten Kontext erforscht wird, ist das Forschungsvorhaben von konstruktiver

Natur. Nach ULRICH und HILL (1976, S. 305) lässt es sich den Realwissenschaften und dort den angewandten Wissenschaften zuordnen. Zur Beantwortung der ingenieurwissenschaftlichen Fragestellungen wird auf das Wissen und die Erkenntnisse der Formal- und Grundlagenwissenschaften zurückgegriffen, wie auf die Mathematik und die Naturwissenschaften.

Die in der Arbeit verwendete Forschungsmethodik lehnt sich an das Vorgehen nach BLESSING und CHAKRABARTI (2009) an, welches als *Design Research Methodology (DRM)* eingeführt wurde. Die grundlegenden Stufen der DRM sind im linken Teil von Abb. 1.1 aufgeführt und wurden im Zuge des Forschungsvorhabens dieser Dissertation durchlaufen.

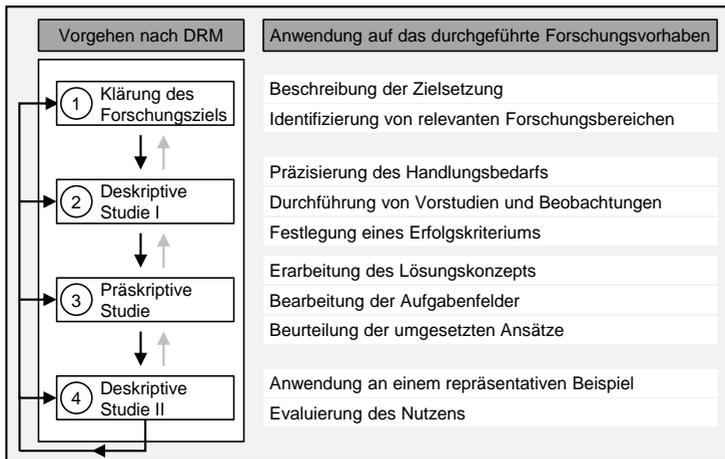


Abbildung 1.1: Angewendete Forschungsmethodik entsprechend dem DRM-Framework nach BLESSING und CHAKRABARTI (2009, S. 15)

Das Vorgehen nach der DRM sieht vier sequenzielle Stufen vor, die es bei der Umsetzung eines Forschungsvorhabens zu adressieren gilt. BLESSING und CHAKRABARTI (2009, S. 17) weisen daraufhin, dass dieses Vorgehen nicht als ein linearer und starrer Weg zu interpretieren ist. Vielmehr sind Iterationen zwischen den einzelnen Stufen möglich und sinnvoll sowie eine parallele Bearbeitung, um die Effizienz des Forschungsprozesses zu erhöhen. Darüber hinaus werden sieben mögliche Forschungstypen aufgezeigt, die sich hinsichtlich der Bearbeitungsweise in den einzelnen Stufen unterscheiden. Die vorliegende Arbeit lässt sich diesbezüglich als Typ 5 in das DRM-Framework einordnen. Dieser Forschungstyp sieht zur Bearbeitung von Stufe 1 ein literaturbasiertes Vorgehen vor, während die Stufen 2 und 3 zusätzlich zur Literatur auch empirische Studien beinhalten. Stufe 4 umfasst abschließend eine initiale Evaluation der realisierten Lösung. Nachfolgend wird die Anwendung der Forschungsmethodik anhand der durchlaufenen Abschnitte erläutert. (BLESSING und CHAKRABARTI 2009, S. 14–19)

In *Klärung des Forschungsziels* (Stufe 1) erfolgt ausgehend von der Problemstellung einer unzureichenden Genauigkeit von Industrierobotern für die geometrische Qualitätsprüfung zunächst die Beschreibung der Zielsetzung des Forschungsvorhabens. Dies geschieht auf Basis von vorhandener Literatur, ergänzt durch Expertengespräche, und dem damit verbundenen Aufbau von Wissen. Dabei gilt es im Weiteren, die relevanten Forschungsbereiche im erweiterten Kontext von roboterbasierten optischen Messsystemen und bestehenden Möglichkeiten zur Registrierung von Punktwolken zu identifizieren. Diese Bereiche umfassen insbesondere die Messtechnik, die Optik, die Robotik sowie die Computer Vision. Sie bilden den heuristischen Bezugsrahmen dieser Arbeit und sind im Hinblick auf das Forschungsziel zu durchdringen. Anschließend steht das Schaffen von Verständnis für die zugrunde liegende Situation im Vordergrund. Dafür werden in der *deskriptiven Studie I* (Stufe 2) einerseits Erkenntnisse aus der systematischen Literaturrecherche zu einem Handlungsbedarf konkretisiert. Andererseits werden erste experimentelle Vorstudien und Beobachtungen durchgeführt, um Herausforderungen bei dem praktischen Einsatz von Projektionen zu identifizieren. Empirische Daten tragen dabei zu einem besseren Systemverständnis von auftretenden Einflussfaktoren bei. Die Definition eines Erfolgskriteriums erlaubt zudem die Festlegung eines geeigneten Maßstabs, der zu einer abschließenden Bewertung des umgesetzten Forschungsvorhabens herangezogen wird. In der *präskriptiven Studie* (Stufe 3) findet die Erarbeitung der Lösung statt. Sie umfasst die Erarbeitung eines entsprechenden Lösungskonzepts zum geeigneten Einsatz von Projektoren für die Registrierung von Punktwolken. Das Lösungskonzept wird basierend auf Erkenntnissen aus den durchgeführten Studien und Beobachtungen durch logische Schlussfolgerung abgeleitet. Die *präskriptive Studie* sieht darüber hinaus die Bearbeitung der resultierenden Aufgabenfelder sowie die Beurteilung der einzelnen Ansätze vor. Der letzte Abschnitt *deskriptive Studie II* (Stufe 4) zielt auf eine initiale Evaluation des realisierten Lösungskonzepts ab. Hierbei soll die Anwendbarkeit anhand eines Beispielbauteils aus der Automobilindustrie untersucht werden. Außerdem wird der Nutzen in Relation zu dem festgelegten Erfolgskriterium bewertet.

1.3 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der vorliegenden Arbeit folgt im Wesentlichen dem in Abschnitt 1.2 vorgestellten Ablauf der verwendeten Forschungsmethodik. Darüber hinaus erfolgte die schriftliche Ausarbeitung der Arbeit in Form einer publikationsbasierten Dissertation. Abb. 1.2 zeigt die Struktur der Arbeit anhand der Zuordnung der einzelnen Kapitel zu den Resultaten jeder Stufe des DRM-Frameworks nach BLESSING und CHAKRABARTI (2009, S. 15). Zudem sind thematische Überschneidungen zwischen den Kapiteln und den eingebundenen Publikationen gekennzeichnet. Eine erweiterte Übersicht über die Veröffentlichungen und deren Zusammenhänge ist Kapitel 6 zu entnehmen.

Resultate der Stufen 1–4 nach DRM	Aufbau der Arbeit	Thematische Zuordnung					
		P1	P2	P3	P4	P5	P6
① Forschungsziel	Kapitel 1 – Einleitung	x					
	Kapitel 2 – Grundlagen						
	Kapitel 3 – Stand des Wissens (3.1–3.5)	x		x	x	x	
② Verständnis	Kapitel 3 – Fazit und Ableitung des Handlungsbedarfs (3.6)	x					
	Kapitel 4 – Herausforderungen (4.1)	x			x	x	
③ Realisierung	Kapitel 4 – Lösungskonzept, Vorgehensweise (4.2, 4.3)	x					
	Kapitel 5 – Technische Umsetzung						
	Kapitel 6 – Ergebnisse (Eingebundene Publikationen)	x	x	x	x	x	x
④ Evaluation	Kapitel 7 – Themenübergreifende Diskussion			x	x	x	x
	Kapitel 8 – Schlussbetrachtung						

P: Publikation

Abbildung 1.2: Aufbau der vorliegenden Arbeit mit Zuordnung der Kapitel zu den Resultaten des DRM-Frameworks nach BLESSING und CHAKRABARTI (2009, S. 15)

Die vorliegende Arbeit umfasst acht Kapitel. Zunächst wird in Kapitel 1 die Ausgangssituation, der Anwendungsrahmen und die Zielsetzung des Forschungsvorhabens dargelegt. Nachfolgend wird auf die verwendete Forschungsmethodik eingegangen und der Aufbau der Arbeit beschrieben. Wesentliche Grundlagen werden in Kapitel 2 erläutert, um das notwendige Verständnis für die zugrunde liegenden Thematiken herzustellen. Der Stand des Wissens (Kapitel 3) führt den relevanten Stand der Forschung und der Technik zu den einzelnen Themenbereichen auf. Insbesondere umfasst dies roboterbasierte optische Messsysteme, Methoden zum Registrieren von Punktwolken, Detektionsmethoden für Zielmarken und Ansätze zur Bereitstellung von Projektionen. Die jeweiligen Gebiete werden stellenweise durch die korrespondierenden Abschnitte der eingebundenen Publikationen weiterführend behandelt, weswegen diese als ergänzende Elemente zu dem präsentierten Stand des Wissens zu betrachten sind. Kapitel 3 schließt mit einem Fazit und der Ableitung des Handlungsbedarfs. Einleitend zu Kapitel 4 werden Herausforderungen beim Einsatz von Projektionen aufgezeigt. Im Anschluss wird das Lösungskonzept der Arbeit vorgestellt und die Vorgehensweise zur Realisierung des Konzepts skizziert. Die Beschreibung der technischen Umsetzung und Implementierung am Demonstrator erfolgt in Kapitel 5. Im Zuge der Ausarbeitung der vorliegenden Arbeit als kumulative Dissertation wurden detaillierte Zusammenfassungen aller eingebundenen Publikationen erstellt. Diese sind in Kapitel 6 in sachlogischer Reihenfolge aufgeführt. Die erarbeiteten Ergebnisse werden daraufhin in Kapitel 7 themenübergreifend diskutiert und kritisch reflektiert. Abschließend findet eine Schlussbetrachtung statt (Kapitel 8). Diese beinhaltet einerseits eine Zusammenfassung der vorliegenden Arbeit. Andererseits werden mögliche Anknüpfungspunkte für zukünftige Forschungstätigkeiten aufgezeigt.

Kapitel 2

Grundlagen

Das vorliegende Kapitel führt in die thematischen Grundlagen dieser Dissertation ein. Dazu werden technische Komponenten erläutert, relevante Begriffe eingeführt und verwendete Methoden beschrieben. Dies zielt einerseits auf ein verbessertes Verständnis der behandelten Themen ab. Andererseits soll auch die Nachvollziehbarkeit der erarbeiteten Ergebnisse der eingebundenen Publikationen in Kapitel 6 erleichtert werden. Zur Veranschaulichung wird stellenweise der Bezug zum Anwendungsrahmen der vorliegenden Arbeit hergestellt.

2.1 Optische Koordinatenmesstechnik für roboterbasierte Systeme

2.1.1 Industrieroboter, 3D-Sensoren und Projektionssysteme

Im Rahmen dieser Arbeit wird die optische Koordinatenmesstechnik für roboterbasierte Systeme im Kontext der geometrischen Qualitätsprüfung betrachtet. Ein solches System umfasst einen Industrieroboter sowie einen optischen 3D-Sensor und wird daher in der vorliegenden Arbeit auch als *roboterbasiertes optisches Messsystem* bezeichnet. In Abb. 2.1 sind diese Systemkomponenten sowie ein Projektionssystem dargestellt, auf die im Folgenden eingegangen wird.

Industrieroboter

Als Industrieroboter wird nach *DIN EN ISO 10218-1* (2012, S. 7) ein „[a]utomatisch gesteuerter, frei programmierbarer Mehrzweck-Manipulator, der in drei oder mehr Achsen programmierbar ist und zur Verwendung in der Automatisierungstechnik entweder an einem festen Ort oder beweglich angeordnet sein kann“ verstanden. Dieser Beschreibung lassen sich Sechs-Achs-Vertikal-Knickarmroboter zuordnen (vgl. Abb. 2.1), die sich in zahlreichen Anwendungen etabliert haben (REINHART et al. 2018, S. 35). Im Weiteren wird stets auf derartige Industrieroboter Bezug

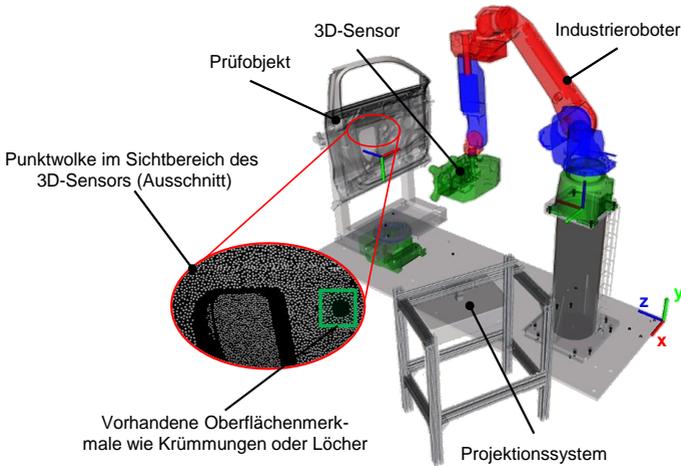


Abbildung 2.1: Roboterbasiertes optisches Messsystem (aus BAUER, FINK et al. 2020 in adaptierter Form)

genommen, weswegen auf eine genaue Spezifikation an den entsprechenden Stellen verzichtet wird.

Beim anforderungsgerechten Einsatz von Industrierobotern sind neben Belastungsgrößen, geometrischen und kinematischen Kenngrößen auch deren Genauigkeit für die jeweiligen Anwendungen zu berücksichtigen (REINHART et al. 2018, S. 20 f.). Für Letzteres gilt es dabei, eine Unterscheidung hinsichtlich der Posegenauigkeit und der Posewiederholgenauigkeit zu treffen (GERKE 2014, S. 154).

Die Posegenauigkeit beschreibt die Abweichung einer vorgegebenen Position und Orientierung (Soll-Pose) von dem tatsächlich erreichten Zustand (Ist-Pose). Die Ist-Pose entspricht dabei dem Mittelwert, der sich bei mehrmaligem Anfahren der Soll-Pose aus derselben Richtung ergibt. Die Posewiederholgenauigkeit spiegelt indes die Streuung mehrerer Ist-Posen für eine Soll-Pose wider, die sich bei einem mehrmaligen Anfahren aus derselben Richtung einstellt. (DIN EN ISO 9283 1998, S. 11, S. 14)

Während Industrieroboter in der Regel Posegenauigkeiten im Millimeterbereich erreichen (GERKE 2014, S. 156; LUDWIG 2010, S. 147; NUBIOLA und BONEV 2013; ULRICH et al. 2014), liegt die Posewiederholgenauigkeit im Submillimeterbereich (Zehntel bis Hundertstel eines Millimeters). Beispielsweise erreicht ein FANUC m-20iA eine Posewiederholgenauigkeit von 0,03 mm (FANUC CORPORATION 2019). Zur Veranschaulichung dieses Zusammenhangs sind in Abb. 2.2 die beiden Genauigkeiten für Industrieroboter qualitativ gegenübergestellt. Für Industrieroboter ist dabei die Posegenauigkeit im Vergleich zur Posewiederholgenauigkeit deutlich geringer einzustufen.

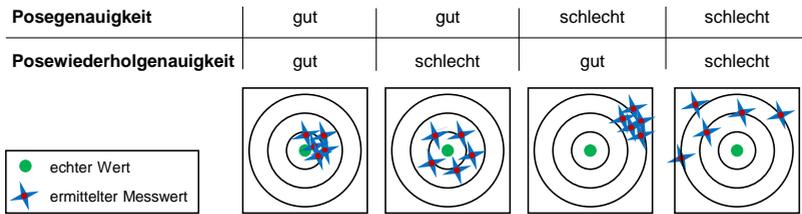


Abbildung 2.2: Kenngrößen in Bezug auf die Genauigkeit von Industrierobotern (nach REINHART et al. 2018, S. 22)

Die genannten Genauigkeitsgrößen sind stets für den einzelnen Industrieroboter sowie den jeweiligen Anwendungsfall zu prüfen. Im Hinblick auf Messapplikationen müssen diese konzeptionell berücksichtigt werden. Auf entsprechende Ansätze wird in Kapitel 3 eingegangen.

3D-Sensoren

Optische 3D-Messmittel erlauben eine kontaktlose messtechnische Erfassung von Prüfobjekten. Dabei existiert eine Vielzahl an verschiedenen Messmethoden, um die Koordinaten von Oberflächenpunkten im dreidimensionalen Raum zu bestimmen. Abb. 2.3 zeigt diesbezüglich eine Klassifizierung zur Einteilung von 3D-Messmitteln nach LUHMANN et al. (2019, S. 6).

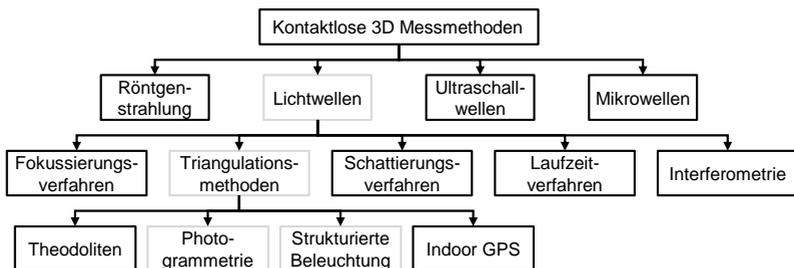


Abbildung 2.3: Übersicht über verschiedene Messverfahren von kontaktlosen 3D-Messmitteln (nach LUHMANN et al. 2019, S. 6)

Für den betrachteten Anwendungsrahmen dieser Arbeit sind 3D-Sensoren von Bedeutung, die eine schnelle, flächenhafte optische Antastung zur geometrischen Beschreibung von Bauteiloberflächen ermöglichen. Im industriellen Umfeld werden diesbezüglich überwiegend Sensoren eingesetzt, die nach dem Triangulationsprinzip arbeiten und dabei auf Photogrammetrie oder strukturierte Beleuchtung zurückgreifen (siehe graue Umrandung in Abb. 2.3).

Etablierte 3D-Sensoren arbeiten dabei beispielsweise nach dem Prinzip der Stereophotogrammetrie oder der Streifenprojektion (WECKENMANN 2012, S. 217).

Je nachdem, ob ein Projektionssystem bei der Triangulation beteiligt ist, wird häufig auch von aktiver oder passiver Triangulation gesprochen (WECKENMANN 2012, S. 216 f.). Zum konkreten Aufbau und den Funktionsweisen der verschiedenen Sensortypen wird auf die Grundlagenliteratur zur Koordinatenmesstechnik mithilfe optischer Messsysteme verwiesen (KEFERSTEIN et al. 2018; LUHMANN et al. 2019; WECKENMANN 2012). Für das Streifenprojektionsverfahren nennen KEFERSTEIN et al. (2018, S. 256) erreichbare Messunsicherheiten von bis zu 0,01 mm.

Der Messbereich von 3D-Sensoren korreliert dabei linear mit der Messunsicherheit (KEFERSTEIN et al. 2018, S. 256). Diese Eigenschaft führt zu einer Einschränkung des effektiven Messbereichs von 3D-Sensoren, da definierte Genauigkeiten nur in einem begrenzten Erfassungsbereich sichergestellt werden können. Zudem wirken bei optischen Messsystemen Umwelteinflüsse ein, wie Störlicht oder das optische Verhalten der zu erfassenden Oberflächen (WECKENMANN 2012, S. 218). Diese Einflüsse gehen am Ende in die Messunsicherheiten mit ein und führen bei realen Messungen zu imperfekten 3D-Aufnahmen.

Als Resultat des Messvorgangs eines flächenhaft antastenden optischen 3D-Sensors entsteht eine digitale punktbasierte Repräsentation der betrachteten Oberfläche, die sogenannte *Punktwolke* (siehe Abb. 2.1). Sie kann bis zu Millionen von Antastpunkten enthalten. Neben der Prüfung von einfachen Geometrielementen wird auch die Inspektion von Freiformflächen möglich (KEFERSTEIN et al. 2018, S. 213). Eine 3D-Aufnahme beschränkt sich dabei auf den spezifizierten Sichtbereich des 3D-Sensors, der häufig auch als *Messvolumen* bezeichnet wird.

Im Rahmen dieser Arbeit wird stets von einer organisierten Punktwolke ausgegangen; die gemessenen Punkte liegen in einer matrixartigen Anordnung vor. Zusätzlich wird hier auch die Fähigkeit vieler 3D-Sensoren vorausgesetzt, ein entsprechendes Farb- oder Intensitätsbild einer aufzunehmenden Szene mit zu erfassen. Die erfassten Farb- oder Intensitätsinformationen werden nachfolgend auch als *2D-Messdaten* oder *Bilddaten* bezeichnet. Somit liegt für jeden Punkt neben den x -, y - und z -Koordinaten auch ein entsprechender Farb- oder Intensitätswert I vor (4D-Informationen pro Punkt: x, y, z, I). Die matrixartige Anordnung der Daten erleichtert die Anwendung von Methoden der klassischen digitalen Bildverarbeitung. Dies erlaubt beispielsweise das Identifizieren von charakteristischen Bildpunkten, nachfolgend auch *Referenzpunkte* genannt, innerhalb des Sichtbereichs des 3D-Sensors. Nachdem zu jedem Referenzpunkt auch Punktkoordinaten zur Verfügung stehen, kann dieses Vorgehen für eine anschließende Punktwolkenverarbeitung genutzt werden.

Projektionssysteme

Projektionssysteme zur Darstellung großformatiger Bilder sind in vielfältigen Bauweisen vorhanden. Dabei wurden traditionelle, filmbasierte Systeme, wie Dia- oder Overhead-Projektoren, weitestgehend von elektronischen Projektionsystemen abgelöst (BRENNESHOLTZ und STUPP 2008, S. 7; VANDENBERGHE 2016).

Letztere werden zur klaren Abgrenzung in dieser Arbeit als *Digital-Projektoren* bezeichnet. Sie ermöglichen eine computergestützte Anbindung und sind Gegenstand der nachfolgenden Betrachtungen.

Gewisse Digital-Projektoren werden entsprechend ihrer technischen Leistungsfähigkeit häufig auch als „Daten-Projektoren“ oder „Business-Projektoren“ bezeichnet. VANDENBERGHE (2016) zählt für diese unter Bezugnahme auf BRENNESHOLTZ und STUPP (2008) unter anderem technische Spezifikationen wie eine Lichtleistung von 1000–5000 lm, Auflösungen im Bereich von 1024 x 768 Pixel und höher oder eine Bildweite von 2–5 m auf (VANDENBERGHE 2016). Diese werden dabei typischerweise in Form einer Frontalprojektion genutzt (VANDENBERGHE 2016).

Zur Bildgenerierung in den Mikrodisplays haben sich diesbezüglich zwei Technologien durchgesetzt: LCD (engl.: *Liquid Crystal Display (LCD)*) und DMD (engl.: *Digital Micromirror Device (DMD)*). Die 3-LCD-Technologie nutzt zur roten, grünen und blauen Farbgebung polarisiertes Licht in Verbindung mit entsprechenden lichtdurchlässigen Flüssigkristallen. Ein Mikrodisplay-Element basierend auf DMD reflektiert einfallendes Licht und erlaubt so eine schnelle Modulation der drei Farbkanäle. Letzteres wird häufig auch als DLP (engl.: *Digital Light Processing (DLP)*) bezeichnet, das als Markenname von der Firma Texas Instruments eingeführt wurde. (VANDENBERGHE 2016)

Darüber hinaus kommen weitere optische Bauelemente, wie dichroitische Filter, Prismen oder Projektionslinsen, und verschiedene Lichtquellen zum Einsatz. Für eine detaillierte Beschreibung der verschiedenen Projektionstechnologien, Bauweisen und Komponenten wird auf weiterführende Literatur wie (CHEN et al. 2016) verwiesen.

Aufgrund räumlicher Gegebenheiten kann die Aufstellung eines Projektors notwendig werden, bei der die Projektionsachse nicht mehr mit der Bildmitte übereinstimmt (Schrägprojektion). Dadurch erscheint der Wiedergabebereich bzw. der dargestellte Inhalt verzerrt. Bei ebenen Oberflächen äußert sich dies in einer Trapezverzerrung (engl.: *keystone distortion*) (siehe Abb. 2.4). (VANDENBERGHE 2016)

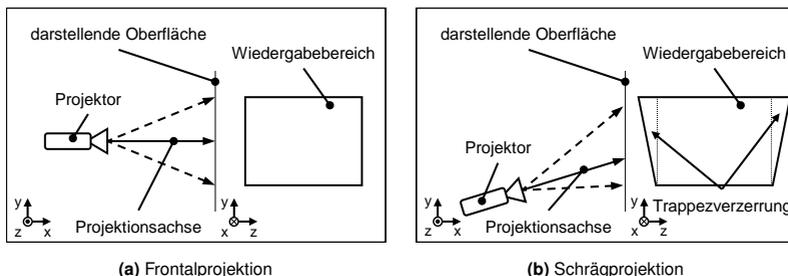


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung einer frontalen Projektion sowie einer Schrägprojektion mit dem auftretenden Effekt der Trapezverzerrung (nach VANDENBERGHE 2016)

Die beschriebene Trapezverzerrung kann mit einer elektronischen Perspektivkorrektur (engl.: *keystone correction*) kompensiert werden, indem gewisse Bildbereiche nicht mehr zur Darstellung genutzt werden (SUKTHANKAR et al. 2001; VANDENBERGHE 2016). Infolgedessen entsteht eine ungleiche Auflösungsverteilung (VANDENBERGHE 2016). Kommerzielle Digital-Projektoren bieten dazu häufig integrierte Funktionen an, sodass die nutzende Person manuell und interaktiv den Wiedergabebereich entzerren kann (siehe beispielsweise die verwendete Systemtechnik in Abschnitt 5.1). Interne Bildverarbeitungsroutinen passen anschließend wiederzugebende Bilder entsprechend dieser Einstellungen an.

Darüber hinaus existieren kamerabasierte Ansätze. SUKTHANKAR et al. (2001) und SUKTHANKAR et al. (2000) stellen eine automatische Perspektivkorrektur für Projektionssysteme zu Präsentationszwecken vor. Mithilfe der zusätzlichen Sensorik wird die Verzerrung des dargestellten Bereichs erfasst und in einen mathematischen Zusammenhang mit dem Wiedergabebild gebracht. Durch eine Korrektur-Transformation, beispielsweise auf Basis von Homographie-Matrizen (engl.: *homography matrices*), können so die wiederzugebenden Bilder vorverzerrt werden (BIMBER 2007, S. 13; PARK und PARK 2010; SUKTHANKAR et al. 2001). Trotz Schrägprojektion lassen sich so Inhalte verzerrungsfrei darstellen.

Die Modellierung von Projektionssystemen erfolgt in der Regel analog zu optischen Sensoren. Durch die Betrachtung eines Projektors als inverse Kamera kann die mathematische Beschreibung mithilfe des Lochkameramodells erfolgen (KOBLE et al. 2010; PARK und PARK 2010). Das Modell einer Lochkamera ist in Abb. 2.5 dargestellt.

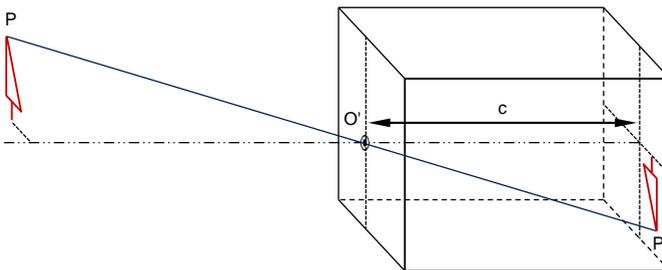


Abbildung 2.5: Lochkameramodell (nach LUHMANN et al. 2019, S. 8)

Abb. 2.5 zeigt für eine Kamera, wie ein Lichtstrahl ausgehend von dem Objektpunkt P durch das Projektionszentrum O' auf die Bildebene in P' trifft. Die genaue Position des Bildpunktes P' hängt dabei von den *intrinsischen* und *extrinsischen* Parametern ab. Die intrinsischen Parameter, beispielsweise der Abstand c vom Projektionszentrum zur Bildebene (Bildweite, engl.: *principal distance*), beschreiben dabei die Abbildungseigenschaften der Kamera. Die extrinsischen Parameter legen hingegen die äußere Position und Orientierung der Kamera in einem globalen Koordinatensystem (KOS) fest. Das Bestimmen der intrinsischen Parameter wird auch als *Kalibrierung* bezeichnet. (LUHMANN et al. 2019, S. 7 ff.)

Übertragen auf ein Projektionssystem entspricht ein Bildpunkt nun einem Projektor-Pixel, der elektronisch angesteuert wird. Die modulierte Intensität wird anschließend entsprechend der zentralperspektivischen Abbildung (Zentralprojektion) durch das Projektionszentrum auf die darstellende Oberfläche bzw. das Objekt übertragen. Sind die intrinsischen und extrinsischen Parameter eines Digital-Projektors bekannt, können die Strahlen mithilfe der Kollinearitätsgleichungen modelliert werden, um den mathematischen Zusammenhang eines Raumpunktes zur Bildebene bzw. zu einem Projektor-Pixel herzustellen (LUHMANN et al. 2019, S. 614). Die Herleitung der Kollinearitätsgleichungen im dreidimensionalen Raum ist beispielsweise (LUHMANN et al. 2019, S. 280 ff.) zu entnehmen.

2.1.2 Digitalisierung von Prüfobjekten

PFEIFER und SCHMITT (2010, S. 15) bezeichnen die Prüfdatenerfassung als „zentrale Aufgabe der Fertigungsmesstechnik“. Die weitreichenden Möglichkeiten und Vorteile der digitalen geometrischen Qualitätsprüfung erfordern zunächst ein digitales Abbild des realen Bauteils, wofür entsprechende Messtechnik notwendig ist. Aus diesem Zusammenhang resultiert die erhöhte Bedeutung von optischen Messsystemen in Verbindung mit einer computergestützten industriellen Bildverarbeitung (PFEIFER und SCHMITT 2010, S. 15 f.).

Zur Prüfung von komplexen, großflächigen Bauteilen sind aufgrund des begrenzten Messvolumens (vgl. Abschnitt 2.1.1) häufig mehrere Teilansichten erforderlich (WECKENMANN 2012, S. 229). Der Ablauf zur Digitalisierung und Auswertung eines Prüfobjekts ist in Abb. 2.6 zusammengefasst dargestellt.



Abbildung 2.6: Ablauf der Digitalisierung eines Prüfobjekts (in Anlehnung an BENNAMOUN und MAMIC 2002, S. 103)

Nach der *Datenerfassung* durch einen 3D-Sensor werden die 3D-Aufnahmen so präzise wie möglich zueinander ausgerichtet (*Registrierung*) und in einem gemeinsamen KOS zusammengeführt. Letzteres wird auch als *Integration* bezeichnet, wobei in der Regel noch weiterführende Methoden zur Oberflächenrekonstruktion angewendet werden. Liegt die Ist-Geometrie aller Teilansichten in einem Gesamtverbund vor, wird zur geometrischen *Evaluierung* von Prüfmerkmalen eine Soll-Referenz herangezogen, z. B. ein CAD-Modell (engl.: *Computer Aided Design (CAD)*) oder eine hochgenaue Referenzmessung mittels Koordinatenmessgerät (KMG).

Um die exakten Positionen einzelner Merkmale zu bestimmen, sind zudem häufig numerische Nachbearbeitungsprozesse der Punktwolke, wie das Erzeugen von Ausgleichsflächen, notwendig. Dies geht auf die diskrete Gestalt von Punktwolken

zurück, sodass in der Regel nur die Nachbarschaft eines Merkmals in Form gemessener Punkte vorliegt. (KEFERSTEIN et al. 2018, S. 257)

Unter *Digitalisierung* wird im Weiteren das Erfassen von notwendigen Teilansichten mittels 3D-Sensor sowie das Registrieren und Zusammenführen von Punktwolken zur Evaluierung einzelner geometrischer Merkmale verstanden. Eine vollständige digitale Objektrekonstruktion wird dabei nicht verfolgt.

In der Fertigungsmesstechnik wird dem Schritt der Registrierung eine erhöhte Bedeutung zugeschrieben, da sich Ausrichtungsfehler von Teilansichten unmittelbar auf die Messgenauigkeit auswirken (WECKENMANN 2012, S. 230). Insbesondere für roboterbasierte optische Messsysteme stellt dies eine zentrale Herausforderung dar (vgl. Abschnitt 1.1).

2.2 Punktwolkenverarbeitung

Der nachfolgende Abschnitt präsentiert die mathematischen Grundlagen zur Registrierung von Punktwolken. Zu Beginn wird hierfür auf die allgemeine Transformation von Punktwolken eingegangen (Abschnitt 2.2.1). Im Anschluss erfolgt die Einführung des etablierten ICP-Algorithmus nach BESL und MCKAY (1992) (engl.: *Iterative Closest Point (ICP) algorithm*) zur paarweisen Registrierung von Punktwolken auf Basis eines gemeinsamen Überlagerungsbereichs (Abschnitt 2.2.2). In Abschnitt 2.2.3 wird abschließend auf die Erweiterung einer paarweisen Registrierung zu einer sequenziellen Verkettung eingegangen.

2.2.1 Transformation von Punktwolken

Die Registrierung einer 3D-Aufnahme relativ zu einer anderen lässt sich mathematisch durch eine Transformation beschreiben, die durch eine Translation $\mathbf{t} \in \mathbb{R}^3$ (Verschiebung) und eine Rotation $\mathbf{R} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ (Drehung) der Punktwolke im euklidischen Raum \mathbb{R}^3 gekennzeichnet ist. Diesbezüglich wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgehend von einer starren Transformation ausgegangen, sodass die euklidischen Abstände zwischen den Punkten einer Punktwolke unverändert bleiben. (BENAMOUN und MAMIC 2002, S. 102)

Der Translationsvektor \mathbf{t} und die Rotationsmatrix \mathbf{R} sind dabei gegeben durch

$$\mathbf{t} = \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix} \text{ und } \mathbf{R} = \begin{pmatrix} R_{00} & R_{01} & R_{02} \\ R_{10} & R_{11} & R_{12} \\ R_{20} & R_{21} & R_{22} \end{pmatrix}. \quad (2.1)$$

Eine Punktwolke X entspricht dabei einer Anzahl an Punkten p des dreidimensionalen Raums \mathbb{R}^3 , welche in einem lokalen Koordinatensystem vorliegen.

Mithilfe von homogenen Koordinaten kann eine Transformation $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ für eine Punktwolke $X_1 = \{p_{X_1} \mid p \in \mathbb{R}^3\}$ mit $p_{X_1} = (x, y, z, 1)^T$ nach $X_2 = \{p_{X_2} \mid p \in \mathbb{R}^3\}$

mit $p_{X_2} = (x, y, z, 1)^T$ anhand Gleichung 2.2 beschrieben werden (JÄHNE 2005, S. 224).

$$X_2 = \mathbf{A} \cdot X_1, \quad \mathbf{A} = \begin{pmatrix} R_{00} & R_{01} & R_{02} & t_x \\ R_{10} & R_{11} & R_{12} & t_y \\ R_{20} & R_{21} & R_{22} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

Zur Darstellungsweise von Vektoren und Matrizen auf Basis homogener Koordinaten sei beispielsweise auf (JÄHNE 2005, S. 224 f.; SZELISKI 2011, S. 36) verwiesen. Ist die Transformationsmatrix \mathbf{A} bekannt, kann jeder Punkt p_{X_1} nach X_2 transformiert werden. So können zwei Teilansichten eines Objekts in einem gemeinsamen Koordinatensystem dargestellt werden.

Das Ziel des Registrierungsprozesses besteht somit darin, eine Transformation \mathbf{A} zwischen beiden Teilansichten zu bestimmen. Im Hinblick auf roboterbasierte optische Messsysteme haben sich dazu in der industriellen Praxis unterschiedliche Verfahren etabliert. Auf die Verfahren wird in Kapitel 3 eingegangen.

2.2.2 Iterative-Closest-Point-Algorithmus

In diesem Abschnitt wird das algorithmische Ermitteln einer Transformation für zwei sich überlagernde Punktwolken beschrieben. Dafür wird zunächst die Transformationsberechnung vorgestellt, für den Fall dass korrespondierende Punkte aus beiden Teilansichten vorliegen. Anschließend wird der iterative Algorithmus nach BESL und MCKAY (1992) eingeführt, der eine Methode für den Fall unbekannter Korrespondenzen darstellt.

Korrespondenzen stellen Punkte-Paare dar. Ein Punkte-Paar besteht aus denjenigen zwei Punkten der beiden Punktwolken, die sich einander eindeutig zuordnen lassen. Für einen Bereich, der aus zwei Blickrichtungen betrachtet wird, soll gelten, dass für jeden Punkt $p_{X_1,i}$ der Punktwolke X_1 ein korrespondierender Punkt $p_{X_2,i}$ in Punktwolke X_2 zu finden ist, deren räumliche Beziehung über die Transformationsmatrix \mathbf{A} zwischen den beiden Blickrichtungen festgelegt ist. Erfolgt die Annahme, dass alle Korrespondenzen n_c bekannt sind, lässt sich dieser Zusammenhang nach Gleichung 2.3 formulieren (BENNAMOUN und MAMIC 2002, S. 108):

$$p_{X_2,i} = \mathbf{A} \cdot p_{X_1,i}, \quad i \in \{1, 2, \dots, n_c\}. \quad (2.3)$$

Da bei realen Messungen keine perfekten Punktwolken entstehen, beispielsweise bedingt durch Messrauschen (KLASING et al. 2009) oder die Diskretisierung kontinuierlicher Oberflächen (SEGAL et al. 2009), bleiben für eine ermittelte Transformationsmatrix \mathbf{A}_{cal} Fehlerabstände \mathbf{e}_i , sogenannte Residuen, zwischen den korrespondierenden Punkten bestehen (HORN 1987) (siehe Gleichung 2.4).

$$\mathbf{e}_i = p_{X_2,i} - \mathbf{A}_{cal} \cdot p_{X_1,i} \quad (2.4)$$

Zur Betrachtung aller Restfehleranteile bzw. der Ausrichtungsqualität von Punktwolken wird entsprechend Gleichung 2.5 der mittlere quadratische Abstand e_{MSE} herangezogen:

$$e_{MSE} = \frac{1}{n_c} \sum_{i=1}^{n_c} \|p_{X_2,i} - \mathbf{A}_{cal} \cdot p_{X_1,i}\|^2. \quad (2.5)$$

Infolgedessen wird die Ermittlung der Transformation \mathbf{A}_{cal} zu einem Minimierungsproblem der Residuen. In der Literatur bestehen diesbezüglich verschiedene Lösungsverfahren, um diesen Fehler in geschlossener Form zu minimieren, beispielsweise mithilfe von Quaternionen (HORN 1987) oder Singulärwertzerlegung (ARUN et al. 1987). (BENNAMOUN und MAMIC 2002, S. 108–110)

Bei der Transformationsberechnung mit bekannten Korrespondenzen ist festzuhalten, dass dazu mindestens drei nicht-kollineare Punkte-Paare notwendig sind (HORN 1987). Im Hinblick auf die praktische Anwendung bedeutet dies, dass in dem gemeinsamen Sichtbereich mindestens drei Korrespondenzen zu finden sein müssen, beispielsweise manuell durch den Anwendenden oder anhand von eindeutig identifizierbaren geometrischen Merkmalen.

Das bisher beschriebene Vorgehen setzt zur Berechnung einer Transformation die Kenntnis über korrespondierende Punkte voraus. In den meisten Fällen sind diese jedoch unbekannt. Um dennoch eine präzise Ausrichtung von punktbasierten Oberflächen zu erreichen, hat sich die Methode nach BESL und MCKAY (1992) etabliert (WECKENMANN 2012, S. 232), welche als Iterative-Closest-Point-(ICP)-Algorithmus eingeführt wurde. Dabei werden die Korrespondenzen iterativ neu ermittelt.

Entsprechend der formalen Beschreibung nach BESL und MCKAY (1992) und den Ausführungen von BENNAMOUN und MAMIC (2002, S. 113 ff.) ergibt sich die Funktionsweise des ICP für Punktwolken wie folgt: Eine Punktwolke X_1 mit den Punkten $p_{X_1} \in X_1$ soll bestmöglich an die Punktwolke X_2 mit den Punkten $p_{X_2} \in X_2$ angenähert werden. Dazu wird der minimale Abstand zwischen einem Punkt p_{X_1} und einem Punkt p_{X_2} als Korrespondenzkriterium eingeführt mit

$$d(p_{X_1}, X_2) = \min_{p_{X_2} \in X_2} \|p_{X_2} - p_{X_1}\|. \quad (2.6)$$

Um einen korrespondierenden Punkt $p_{X_c} \in X_2$ zu einem Punkt p_{X_1} zu finden, wird somit die Bedingung $d(p_{X_1}, p_{X_c}) = d(p_{X_1}, X_2)$ festgelegt, wodurch Korrespondenzen stets einen minimalen euklidischen Abstand aufweisen, sprich dem nächsten Punkt (engl.: *closest point*) der anderen Punktwolke zugeordnet sind (BENNAMOUN und MAMIC 2002, S. 113). Entspricht X_c der Menge aller korrespondierenden Punkte, kann ein entsprechender Operator \mathcal{C} zur Korrespondenzsuche definiert werden:

$$X_c = \mathcal{C}(X_1, X_2). \quad (2.7)$$

Anschließend liegen die Korrespondenzen vor, sodass nun eines der genannten Vorgehen zur Bestimmung der Transformationsmatrix \mathbf{A}_{cal} mit Minimierung

der Residuen entsprechend Gleichung 2.5 angewendet werden kann. Dies wird mit dem Operator \mathcal{Q} ausgedrückt, der zum einen die Transformationsmatrixberechnung durchführt und zum anderen den verbleibende Fehler e_{MSE} ermittelt:

$$(\mathbf{A}_{cal}, e_{MSE}) = \mathcal{Q}(X_c, X_1). \quad (2.8)$$

Der beschriebene Ablauf wird ausgehend von einer gegebenen Initialtransformation (Grobaustrichtung) durchlaufen und iterativ mit jeweils neu berechneten Korrespondenzen und Transformationen wiederholt. Der Abbruch der Methode erfolgt bei der Unterschreitung eines festgelegten Schwellwertes $\tau > 0$, der die Veränderung von e_{MSE} zur vorangegangenen Iteration beschreibt (BESL und MCKAY 1992).

Aktuelle Implementierungen des ICP sehen darüber hinaus noch häufig eine definiere, zulässige Suchdistanz für die Korrespondenzsuche \mathcal{C} vor und erlauben eine festgelegte Anzahl an zulässigen Iterationen.

2.2.3 Globale Registrierung und Fehlerfortpflanzung

Der in Abschnitt 2.2.2 beschriebene ICP-Algorithmus erzielt eine „optimale“ lokale Annäherung von zwei sich überlagernden Punktwolken. Wird die paarweise Registrierung für mehrere aneinandergereihte 3D-Aufnahmen durchgeführt, entsteht eine sequenzielle, paarweise Verkettung. Diese Art stellt eine Sonderform der globalen Registrierung dar (BENAMOUN und MAMIC 2002, S. 102). Sie erlaubt die Betrachtung von mehreren Einzelausrichtungen, ohne dabei Ausgleichsrechnungen vorsehen zu müssen. Dies wird beispielsweise bei einer gleichzeitigen Registrierung von drei oder mehr Punktwolken im Verbund oder aufgrund eines geschlossenen Kreises von Teilansichten notwendig.

Abb. 2.7 zeigt schematisch die sequenzielle Verkettung von Punktwolken zu einer Gesamtaufnahme für die Evaluation eines Längenprüfmerkmals d . Die paarweise Registrierung erfolgt dabei auf Basis der gemeinsamen Überlagerungsbereiche Φ_1, Φ_2, Φ_3 von jeweils benachbarten Punktwolken, beispielsweise mithilfe des ICP-Algorithmus (vgl. Abschnitt 2.2.2).

Aufgrund der Registrierung realer Punktwolken resultiert ein verbleibender Ausrichtungsfehler e_A nach jeder paarweisen Registrierung. Dieser setzt sich bei einer Verkettung sukzessive mit jeder weiteren Ausrichtung fort und akkumuliert sich (CHEN und MEDIONI 1991).

Nach ULRICH (2018, S. 77 f.) können die Restfehler einer paarweisen Ausrichtung $e_{A,i}$ als stochastische Messfehler betrachtet werden. Demnach kann für die Bestimmung des Gesamtmessfehlers $e_{A,d}$ (vgl. Abb. 2.7) das Gauß'sche Fehlerfortpflanzungsgesetz herangezogen werden (ULRICH 2018, S. 77 f.). Der resultierende Fehler ist somit abhängig von der Anzahl j an paarweisen Ausrichtungen und kann nach Gleichung 2.9 abgeschätzt werden (ULRICH 2018, S. 78):

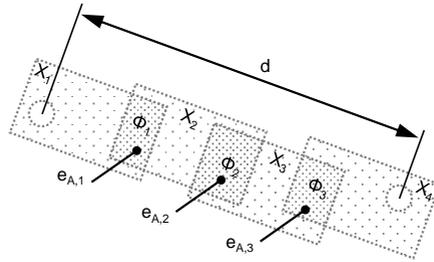


Abbildung 2.7: Verkettung von Punktwolken zur Erfassung eines geometrischen Prüfmerkmals (in Anlehnung an BAUER, MAGAÑA FLORES et al. 2019)

$$e_{A,d} \approx \sqrt{\sum_{i=1}^j e_{A,i}^2}. \quad (2.9)$$

Bedingt durch das Verkettungsprinzip und den ansteigenden Gesamtfehler ist die Anzahl an sequenziellen Ausrichtungen bei der Messung von Prüfmerkmalen nach Möglichkeit minimal zu halten. Durch Steigerung der paarweisen Registrierungsgenauigkeiten lässt sich der resultierende Fehler gemäß Gleichung 2.9 reduzieren, bzw. die maximal zulässige Anzahl an Teilansichten für eine Prüfaufgabe erhöhen. Daher kommt einem genaukeitorientierten Ausrichten von Punktwolken eine erhöhte Bedeutung zu. Die Eignung des Verkettungsprinzips im Kontext der geometrischen Qualitätsprüfung ist dabei anwendungsspezifisch für das jeweilige Prüfmerkmal zu evaluieren.

2.3 Bildverarbeitung

Der nachfolgende Abschnitt erläutert allgemeine Vorgehensweisen der digitalen Bildverarbeitung im Hinblick auf eine Detektion von *Zielmarken* (engl.: *targets, fiducials, markers*). Zielmarken stellen künstlich eingebrachte Referenzelemente auf einem Bauteil oder in einer Szene dar (siehe auch Abschnitt 3.4). Unter Detektieren wird hier das Finden dieser Elemente und das Bestimmen von entsprechenden Bildpunkten (Referenzpunkten) in pixelbasierten Bilddaten verstanden. Zunächst wird in Abschnitt 2.3.1 auf eine allgemeine Methode zur Objektdetektion, basierend auf Maschinellem Lernen (ML), eingegangen. Abschnitt 2.3.2 und Abschnitt 2.3.3 stellen Verfahren zur Lokalisation von charakteristischen Bildstrukturen vor.

2.3.1 Detektionsverfahren nach der Viola-Jones-Methode

Um Objekte unter komplexen Lichtbedingungen in Bildern zuverlässig zu detektieren, bieten sich ML-Methoden an (siehe Abschnitt 3.4). Dabei werden zunächst repräsentative Daten des zu detektierenden Objekts gesammelt, mit denen anschließend ein entsprechendes Modell trainiert wird. Steht ein neues Bild zur Verfügung, wird dieses dem trainierten Modell übergeben. Als Resultat werden die Position des gesuchten Objekts bzw. der gesuchten Objekte in Form von markierten Rahmen (engl.: *bounding boxes*) zurückgegeben. Somit ist die unmittelbare Region der gesuchten Objekte in Bildern bekannt.

Ein solches Verfahren beschreibt die Viola-Jones-Methode (VIOLA und JONES 2001). Auf Basis von positiven Trainingsdaten (einzelne Abbilder der gesuchten Objekte) und negativer Trainingsdaten (Abbilder von möglichen Hintergründen) wird ein sogenannter *Kaskaden-Klassifikator* trainiert. Das Training zielt auf die Minimierung des Klassifizierungsfehlers in Bezug auf gezeigte Trainingsdaten ab. Dabei erfolgt eine Variation und Auswahl von Merkmalen sowie die Ermittlung von geeigneten Schwellwerten.

In der Anwendung werden mithilfe eines „gleitenden Fensters“ (engl.: *sliding window*) aus einem neuen Eingangsbild zahlreiche Teilbilder erstellt, indem sich das Fenster zeilen- und spaltenweise über das Bild bewegt. Die Teilbilder werden anschließend dem Klassifikator übergeben (siehe Abb. 2.8).

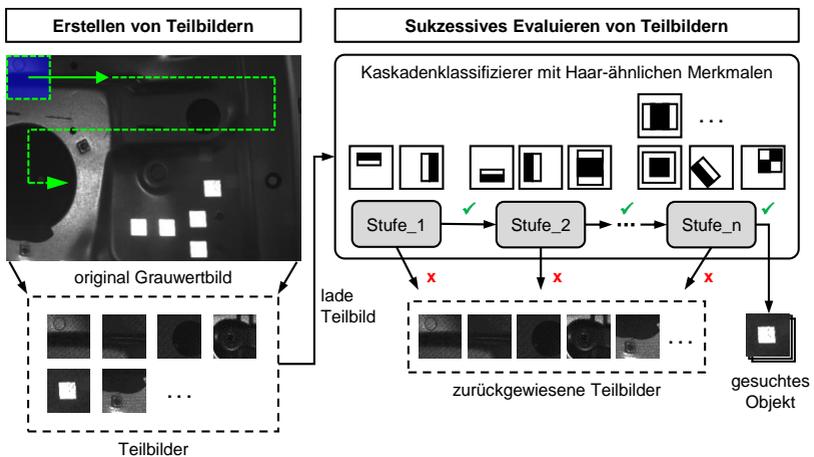


Abbildung 2.8: Veranschaulichung des Detektionsablaufs mithilfe eines Kaskaden-Klassifikators auf Basis von Haar-ähnlichen Merkmalen nach der Viola-Jones-Methode (VIOLA und JONES 2001, 2004) (in Anlehnung an RASTOGI 2020)

Der Klassifikator besteht in der Regel aus mehreren Stufen, wobei jede Stufe eine gewisse Auswahl an sogenannten *Haar-ähnlichen Merkmalen* (engl.: *Haar-like features*) beinhaltet (vgl. Abb. 2.8). Die Benennung der Merkmale geht auf die Ähnlichkeit des Aussehens zu einer Haar-Wavelet-Funktion (Kombination

von zwei Rechteck-Funktionen) zurück. Ein Merkmal besteht aus rechteckigen schwarzen und weißen Bereichen. Diese bilden Regionen, aus denen die Pixelinformationen eines zugrunde gelegten Teilbildes ausgelesen und aufsummiert werden. Der resultierende Wert aus einem Vergleich der Intensitätssummen aus den schwarzen und weißen Bereichen wird mit dem Schwellwert verglichen, der im Training für dieses Merkmal ermittelt wurde. Je nach Festlegung erfolgt beispielsweise bei Überschreitung des hinterlegten Schwellwerts die Annahme, dass ein gesuchtes Objekt in dem Teilbild zu erkennen ist und umgekehrt. Durchläuft ein Teilbild erfolgreich alle Stufen des Klassifikators wurde ein Objekt mit hoher Wahrscheinlichkeit gefunden. Nachdem die Position des entnommenen Teilbildes im Originalbild bekannt ist, kann dort das gesuchte Objekt markiert werden. (VIOLA und JONES 2001)

Die Anzahl an Stufen sowie die Anzahl und Auswahl der Haar-ähnlichen Merkmale wird mithilfe eines Lernalgorithmus, wie AdaBoost (FREUND und SCHAPIRE 1997), festgelegt. Dabei existieren auch unterschiedliche Sets an möglichen Merkmalen, beispielsweise nach VIOLA und JONES (2001) oder LIENHART und MAYDT (2002). Aufgrund der kaskadenartigen Anordnung kann eine überwiegende Anzahl an Teilbildern bereits in den ersten Stufen abgelehnt werden, wodurch sich Laufzeitvorteile ergeben (VIOLA und JONES 2001).

Auf den generellen Einsatz von Methoden des ML in der Fertigungsmesstechnik und im Hinblick auf die Detektion von Zielmarken wird ausführlicher in Kapitel 3 eingegangen.

2.3.2 Lokalisation von Kanten

Nach LUHMANN et al. (2019, S. 459) bilden Grauwertkanten die vorrangigen Strukturen in Bildern zur Erkennung von Objekten durch das menschliche Auge. Dabei setzen sich erkennbare Objekte durch eine charakteristische Veränderung vom Bildhintergrund ab, beispielsweise in Form einer Grauwertveränderung entlang der Kante des physischen Objekts (LUHMANN et al. 2019, S. 459).

Die Gestaltung und der Einsatz von stationären Zielmarken nutzt die sprunghafte Änderung im Intensitätsverlauf zur räumlichen Referenzierung. Dazu werden eingebrachte Hell-Dunkel-Übergänge (Kanten) einer Marke in Bildern aus zwei oder mehreren Perspektiven lokalisiert und anschließend für weitere Verarbeitungsprozesse herangezogen. Daher kommt der genauen Lokalisation von Kanten in der optischen Messtechnik eine erhöhte Bedeutung zu.

Nachfolgend werden zwei bekannte Methoden zur Bestimmung von Kanten vorgestellt: das Schwellwertverfahren sowie ein Verfahren basierend auf Intensitätsgradienten. Abb. 2.9 stellt beide Verfahren anhand einer exemplarischen quadratischen Zielmarke dar.

Das Schwellwertverfahren (engl.: *thresholding*) (siehe Abb. 2.9a) verwendet einen festgelegten Wert t zur Differenzierung, ob Intensitätswerte I_p bzw. Grauwerte der einzelnen Bildpixel einer bestimmten Objektklasse zuzuordnen sind

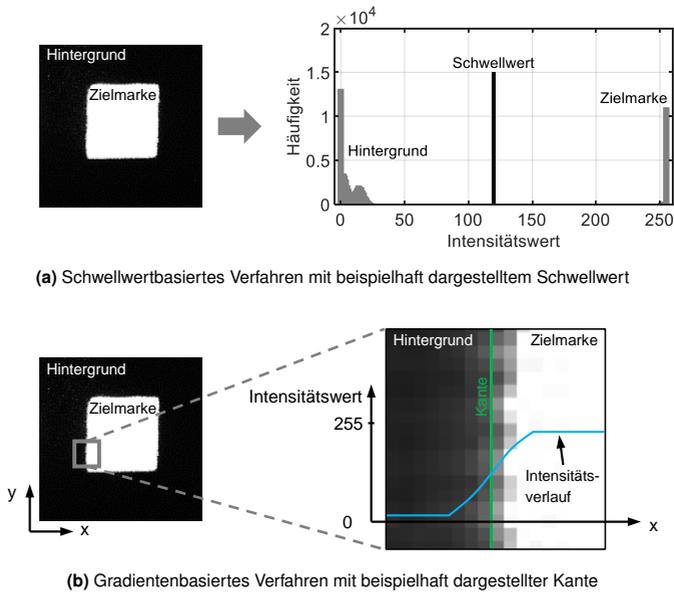


Abbildung 2.9: Verfahren zur Lokalisation von Kanten am Beispiel einer projizierten Zielmarke

(LUHMANN et al. 2019, S. 440), beispielsweise dem Bildhintergrund oder der Zielmarke. Für den bimodalen Fall lässt sich dies mathematisch als

$$I_{B_{m,n}}(I_p) = \begin{cases} I_1, & \text{für } I_p \leq t \\ I_2, & \text{für } I_p > t \end{cases} \quad (2.10)$$

beschreiben (LUHMANN et al. 2019, S. 440). Infolgedessen entsteht ein Binärbild $I_{B_{m,n}}$ mit den Werten I_1 und I_2 , wobei die Indices m und n die jeweilige Zeile bzw. Spalte eines Bildes kennzeichnen. Um aus zusammenhängenden Regionen entsprechende pixelgenaue Kanten zu ermitteln, werden anschließend Konturverfolgungsalgorithmen wie nach SUZUKI und ABE (1985) eingesetzt.

Ein weiteres Verfahren zur Bestimmung von Kanten basiert auf den Intensitätsgradienten von Pixeln (vgl. Abb. 2.9b). Dazu werden Kantenpixel anhand ihrer Intensitätsveränderung innerhalb einer festgelegten Nachbarschaft identifiziert. Diesbezüglich bezeichnet JÄHNE (2005, S. 366) den *Canny-Filter* (CANNY 1986) als optimal. Zur Minderung von Bildrauschen erfolgt zunächst eine Glättung mithilfe eines diskreten Gauß-Filters. Anschließend werden die Gradienten des geglätteten Bildes I_σ auf Basis der Ableitungen in horizontaler und vertikaler Richtung berechnet. Dafür werden die sogenannten Sobel-Operatoren eingesetzt (SONKA et al. 1993, S. 80 f.; SZELISKI 2011, S. 102) (vgl. Gleichung 2.11). Dies entspricht mathematisch einer diskreten Faltung und kann in Anlehnung an die formale Beschreibung nach ULRICH (2018, S. 71) mit Gleichung 2.12 ausgedrückt werden, wobei hier der diskrete Fall betrachtet wird.

$$S_x = \frac{1}{8} \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad S_y = \frac{1}{8} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

$$\rho_{m,n} = \sqrt{(I_\sigma * S_x)_{m,n}^2 + (I_\sigma * S_y)_{m,n}^2} \quad (2.12)$$

$$\Theta_{m,n} = \arctan \left(\frac{(I_\sigma * S_y)_{m,n}}{(I_\sigma * S_x)_{m,n}} \right) \quad (2.13)$$

ρ entspricht dabei der Gradientenstärke, wohingegen Θ die Richtung der Kante vorgibt (Gleichung 2.13). Ein Kantenpixel besitzt die Eigenschaft, dass für ρ ein lokales Maximum in Richtung des Vektors $(\sin(\Theta_{m,n}), \cos(\Theta_{m,n}))$ vorzuliegen hat (BREDIES und LORENZ 2011, S. 75). Anschließend erfolgt die Reduktion der Kantendicke auf ein Pixel. Durch die Festlegung von zwei Schwellwerten t_l und t_h mit einer Hysterese können anschließend ungültige Kantenelemente herausgefiltert werden, welche infolge von Rauschen auftreten (SONKA et al. 1993, S. 90 f.). (BREDIES und LORENZ 2011, S. 75; SONKA et al. 1993, S. 88 ff.; ULRICH 2018, S. 70 f.)

2.3.3 Subpixelgenaue Referenzpunkte

In modernen Bildverarbeitungssystemen mit optischen Sensoren wird die Genauigkeit einer Kantenlokalisierung auf Pixelebene häufig nicht mehr als ausreichend erachtet (FABIJAŃSKA 2012). Daher existieren Verfahren, die im Anschluss an eine pixelgenaue Lokalisation eine subpixelgenaue Bestimmung von Kanten und Konturen ermöglichen (FABIJAŃSKA 2012). Dadurch wird die Positionsgenauigkeit von extrahierten Referenzpunkten, wie der Mittelpunkt einer Ellipse oder die Eckpunkte eines Rechtecks, weiter gesteigert.

NAIMARK und FOXLIN (2002) weisen im Kontext der Detektion von runden Zielmarken darauf hin, dass ihr Schwerpunkt mit Subpixelgenauigkeit bestimmt werden kann. Dies ist vorteilhaft, da mit steigender Anzahl an Pixeln, die an der Berechnung beteiligt sind, der Einfluss von Bildrauschen durch Mittelungseffekte reduziert wird (NAIMARK und FOXLIN 2002). Daneben können solche Verfahren auch zur Identifikation von Zielmarken eingesetzt werden (siehe Abschnitt 3.4).

Abb. 2.10 zeigt exemplarisch die Ermittlung von subpixelgenauen Referenzpunkten basierend auf einem initialen, pixelgenauen Kantenbild. Die genaue Position von Kurven oder Linien kann dabei z. B. über Kantenmodelle in Verbindung mit Methoden der kleinsten Fehlerquadrate bestimmt werden (LUHMANN et al. 2019, S. 468 ff.).

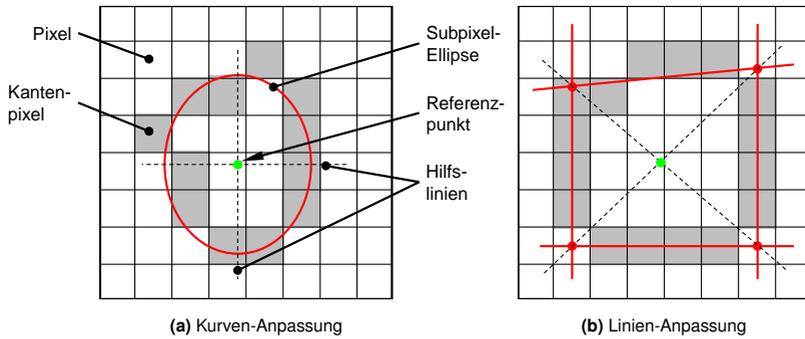


Abbildung 2.10: Exemplarische Darstellung einer subpixelgenauen Referenzpunktbestimmung mittels Kurven- oder Linien-Anpassung (engl.: *fitting*) (in Anlehnung an FABIJANŠKA 2012). Die Beschriftung aus 2.10a gilt analog für 2.10b.

Kapitel 3

Stand des Wissens

Ausgehend von der Zielsetzung (vgl. Abschnitt 1.1) dieser Arbeit werden in diesem Kapitel der Stand der Technik sowie relevante Forschungsarbeiten vorgestellt. Die übergeordneten Themenbereiche werden dazu in Abschnitt 3.1 kurz eingeführt und anschließend nacheinander behandelt. Abschließend wird in Abschnitt 3.6 ein Fazit zum Stand des Wissens gezogen und der Handlungsbedarf dieser Arbeit abgeleitet.

3.1 Überblick

Die vorliegende Dissertation behandelt verschiedene Themenbereiche und greift dabei auf deren Erkenntnisse aus dem Stand des Wissens zurück. Diese Bereiche umfassen neben den roboterbasierten optischen Messsystemen auch die Registrierung von Punktwolken, die Detektion von Zielmarken und das Bereitstellen von visuellen Informationen mithilfe von Digital-Projektoren. Die Gliederung dieses Kapitels folgt dieser Einteilung. Jeder Abschnitt stellt dabei den im Rahmen dieser Arbeit relevanten Stand des Wissens vor. Zur Veranschaulichung ist in Abb. 3.1 ein Überblick dargestellt. Die Vereinigung dieser vier Bereiche bildet den thematischen Rahmen dieser Arbeit.

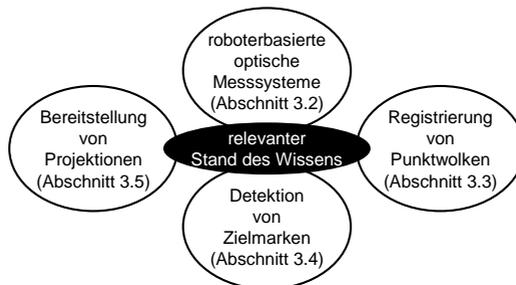


Abbildung 3.1: Überblick über die zugrunde liegenden Themenbereiche

3.2 Roboterbasierte optische Messsysteme in der Qualitätsprüfung

Nachfolgend findet eine Einführung in die geometrische Qualitätsprüfung von Bauteilen und in die Fertigungsmesstechnik mit Bezug zum Anwendungsrahmen dieser Arbeit statt (vgl. Abschnitt 3.2.1). Zudem werden in der Industrie etablierte Verfahren zum Ausrichten von Teilansichten vorgestellt (vgl. Abschnitt 3.2.2).

3.2.1 Allgemeines

Aufgrund der hohen Qualitätsanforderungen am Markt und sich verändernden Fertigungsbedingungen nimmt die Qualitätsprüfung eine zentrale Rolle ein (PFEIFER und SCHMITT 2010, S. 3) (vgl. auch Abschnitt 1.1). Die Fertigungsmesstechnik ist in alle Abschnitte des Produktentstehungsprozesses involviert und unterstützt diesen durch den Beitrag zu einer kontinuierlichen Verbesserung (KEFERSTEIN et al. 2018, S. 9 f.; PFEIFER und SCHMITT 2010, S. 4). Ziel ist dabei der Aufbau von Regelkreisen, um messtechnisch gewonnene Informationen an Produktionsverantwortliche zurückzuführen oder als Eingangsgröße für die Anlagensteuerung zu nutzen (KEFERSTEIN et al. 2018, S. 11; PFEIFER und SCHMITT 2010, S. 4).

Im Zuge dessen steht in der Fertigungsmesstechnik das messtechnische Aufnehmen von Merkmalen im Vordergrund. Deren Erfassung dient in der Regel zur Prüfung der Qualität, ob geforderte Produkteigenschaften von gefertigten Bauteilen in ausreichender Weise vorliegen. Nach PFEIFER und SCHMITT (2010, S. 1 f.) lassen sich Qualitätsmerkmale von Produkten hinsichtlich der Kategorien „Werkstoff“, „Funktion“ und „Geometrie“ einteilen. IMKAMP et al. (2012) ergänzen diese Einteilung um den Bereich „Elektrik“. Das Prüfen bei Werkstücken, welche mechanisch gefertigt wurden, konzentriert sich dabei mit ungefähr 90 % auf Längen und Längenverhältnisse und somit auf das Erfassen von geometrischen Merkmalen (DUTSCHKE 2002, S. 1). Diese umfassen Form, Maß, Lage und Rauheit. Aufgrund der Bedeutung der geometrischen Qualitätsprüfung für produzierende Unternehmen steht die Betrachtung solcher Prüfmerkmale im Rahmen dieser Arbeit im Vordergrund. (PFEIFER und SCHMITT 2010, S. 1–4)

Beim Einsatz von Messsystemen wird unterschieden, ob Daten *inline*, also in der Fertigungslinie und im Fertigungstakt, oder *offline*, abseits von der Fertigungslinie, erhoben werden. Zur Offline-Prüfung werden einzelne Bauteile stichprobenartig aus der Fertigung ausgegliedert. Nach messtechnischer Datenerfassung können diese dem Produktionsprozess wieder zugeführt werden. In Bezug auf die Automobilindustrie sind verstärkt Bestrebungen festzustellen, geometrische Qualitätsmerkmale automatisiert in der Fertigungslinie zu erfassen und zu prüfen (ALTINISIK und BOLOVA 2021; KIRACI et al. 2017). Aufgrund der geforderten Messgenauigkeiten, bestehenden Taktzeiten sowie der Forderung nach flexibel einsetzbaren und kostengünstigen Messsystemen ist dies noch mit hohen Herausforderungen für die Fertigungsmesstechnik verbunden.

In der geometrischen Offline-Prüfung sind KMGs bekannte Messsysteme (KIRACI et al. 2017; LUDWIG 2010, S. 37). Beispielsweise können derartige Systeme in Portalbauweise in einem Bereich von bis zu 3 m Messgenauigkeiten von ca. 0,001–0,04 mm erzielen (KEFERSTEIN et al. 2018, S. 69 ff.). KMGs ermöglichen somit Messungen mit geringen Messunsicherheiten (KEFERSTEIN et al. 2018, S. 70; LUDWIG 2010, S. 37), benötigen jedoch meist aufgrund der punktweisen Antastung viel Zeit (LUDWIG 2010, S. 39 ff.). Folglich ist die Inline-Fähigkeit von KMGs häufig nur bedingt gegeben (LUDWIG 2010, S. 41). Aus diesem Grund ist ein Trend in Richtung kontaktloses Messen mittels flächenhaft antastender optischer 3D-Sensoren zu beobachten (KEFERSTEIN et al. 2018, S. 215; ALTINISIK und BOLOVA 2021). In diesem Zusammenhang gilt es daher, optische Systeme in Richtung einer Inline-Prüfung zu entwickeln und zu befähigen (ALTINISIK und BOLOVA 2021; KIRACI et al. 2017). Insbesondere die Automobilindustrie versucht hier neue Wege zu finden (ALTINISIK und BOLOVA 2021; KIRACI et al. 2017; KOUTECKÝ et al. 2016). Infolgedessen gewinnen auch Robotersysteme an Bedeutung (KIRACI et al. 2017; LUDWIG 2010, S. 54), um optischen Messsystemen zu einer automatisierbaren und flexiblen Einsetzbarkeit in der Fertigungsmesstechnik zu verhelfen.

Der beschränkte Sichtbereich von 3D-Sensoren erfordert jedoch das Aufnehmen mehrerer Teilansichten (vgl. Abschnitt 2.1.1). Diese gilt es, möglichst genau zueinander auszurichten, um eine Gesamtaufnahme von Bauteilen zu erhalten und die Prüfung von geometrischen Merkmalen zu ermöglichen. Für roboterbasierte optische Messsysteme entsteht hierbei eine zentrale Problemstellung, da bei der Registrierung auf Basis der kinematischen Kette von Robotern große Ausrichtungsfehler entstehen (vgl. Abschnitt 2.1.1). Infolgedessen werden für Messapplikationen im industriellen Einsatz häufig alternative Verfahren zur Ausrichtung von Teilansichten herangezogen.

3.2.2 Etablierte Verfahren zur Ausrichtung von Teilansichten

Die fertigungsnahe geometrische Qualitätsprüfung zur flächenhaften Erfassung von Bauteilen findet zunehmend mithilfe von roboterbasierten optischen Messsystemen statt (vgl. Abschnitt 3.2.1). Damit die Vorteile von Industrierobotern nicht zu Lasten der Messgenauigkeit fallen, werden in der Regel zusätzlich Systeme und Verfahren eingesetzt, um die handhabende Kinematik entweder aus der Messkette zu entfernen oder diese zu kompensieren.

In industriellen Anwendungen werden verschiedene Verfahren eingesetzt, um die Transformation zwischen zwei Messposen eines 3D-Sensors zu ermitteln. LUHMANN (2010) nennt dazu vier Ansätze zur Ausrichtung von Punktwolken, wobei nachfolgend die Kinematik als Verfahren für Robotersysteme aufgrund der unzureichenden Genauigkeit nicht aufgeführt wird:

- externe optische Messsystemtechnik

- photogrammetrische Methoden mithilfe von Zielmarken (bzw. Kontrollpunkten)
- Ausrichten von Punktwolken auf Basis des ICP-Algorithmus sowie äquivalenten Methoden

In Ergänzung sei noch auf die Möglichkeit einer Kalibrierung der Roboterkinematik hingewiesen (siehe bspw. LUX-GRUENBERG (2020)). Eine Roboterkalibrierung zielt darauf ab, negative Einflüsse, wie Getriebeispiele oder Erwärmung (GERKE 2014, S. 157), zu kompensieren. Allerdings ist eine Beurteilung hinsichtlich der räumlichen und zeitlichen Gültigkeit häufig schwierig, wodurch mit einer erhöhten Wahrscheinlichkeit von Anwendungsfehlern zu rechnen ist (LUX-GRUENBERG 2020, S. 44). Daher wird dieser Ansatz nicht weiter betrachtet.

Die aufgelisteten Verfahren sind in Abb. 3.2 schematisch dargestellt. Dabei werden vor allem externe Messsystemtechnik und photogrammetrische Methoden im industriellen Anwendungsfeld eingesetzt, von denen etablierte Herangehensweisen im Weiteren kurz vorgestellt werden. Algorithmische, iterative Methoden zur Registrierung von Punktwolken werden separat in Abschnitt 3.3 tiefergehend beschrieben. Für weniger etablierte Systeme und Ansätze, z. B. Lasertracer, Indoor-GPS uvm., wird an dieser Stelle auf bekannte Sammelwerke verwiesen, wie (KEFERSTEIN et al. 2018; LUHMANN et al. 2019; WECKENMANN 2012).

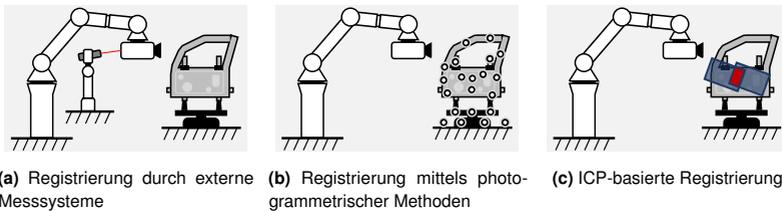


Abbildung 3.2: Verfahren zur Ausrichtung von Teilansichten für roboterbasierte optische Messsysteme

Externe Messsystemtechnik

Ein etabliertes System zum räumlichen Verfolgen von optischen Messsystemen stellen Lasertracer dar (siehe Abb. 3.2a). Die Position eines installierten Reflektors wird dabei kontinuierlich durch einen Laser im Arbeitsraum erfasst (KEFERSTEIN et al. 2018, S. 260 ff.). Diese wird auf Basis von Winkel- und Entfernungsmessungen ermittelt (KEFERSTEIN et al. 2018, S. 260; WECKENMANN 2012, S. 155). Zur Bestimmung der Orientierung wird ein zusätzliches Kamerasystem eingesetzt (KEFERSTEIN et al. 2018, S. 261 f.). Im Hinblick auf verschiedene Reflektorvarianten, unterschiedliche Bauarten und Funktionsweisen wird auf die Grundlagenliteratur verwiesen (KEFERSTEIN et al. 2018; WECKENMANN 2012).

Durch externe Messungen bestimmt ein Lasertracker somit die Relativbewegungen eines 3D-Sensors im Arbeitsraum, wodurch flächenhaft erfasste Teilansichten in ein globales KOS überführt werden können.

Grundsätzlich zeichnen sich solche externen Systeme durch eine hohe Mobilität und Flexibilität aus (WECKENMANN 2012, S. 166). Dabei können Messunsicherheiten von 0,05–0,1 mm in einem Bereich von bis zu 30 m realisiert werden (KEFERSTEIN et al. 2018, S. 262), wobei stets eine freie Sichtlinie zu den nachzuverfolgenden Reflektoren sicherzustellen ist (KEFERSTEIN et al. 2018, S. 260). Insbesondere für größere Bauteildimensionen (deutlich größer als 1 m) finden Lasertracker in der Fertigungsmesstechnik häufig Anwendung (WECKENMANN 2012, S. 156–166). Die Anschaffungskosten liegen hierbei in der Größenordnung von umgerechnet 94.156 € (100.000 \$) und mehr (NUBIOLA und BONEV 2013). Kommerziell erhältliche Lasertacker gibt es unter anderem von den Firmen Leica Geosystems AG, Faro Europe GmbH & Co. KG oder Automated Precision Inc. (LUHMANN 2010; WECKENMANN 2012, S. 156). ALTINISIK und BOLOVA (2021) und VINCZE et al. (1994) betrachten den Einsatz eines Lasertrackers für Robotersysteme.

Eine Alternative zu Lasertrackern stellen Tracking-Systeme auf Basis von mehreren Kameras dar, die stationär im Arbeitsraum positioniert und zueinander kalibriert werden (WECKENMANN 2012, S. 225). Die Messposen-Bestimmung eines 3D-Sensors erfolgt dann durch die Detektion von an den Sensor angebrachten Referenzelementen sowie deren Positionsberechnung im Raum durch Anwendung photogrammetrischer Methoden (WECKENMANN 2012, S. 224 f.) (siehe auch nachfolgenden Abschnitt). Zur Referenzierung werden nach WECKENMANN (2012, S. 224 f.) Kreismarken, Keramikkugeln oder Leuchtdioden eingesetzt. LUHMANN (2010) nennt beispielhaft ein Multi-Kamera-Tracking-System der Firma Steinbichler. WECKENMANN (2012, S. 225) stellt diesbezüglich eine inverse Variante (ProCam-System, Aicon 3D Systems GmbH) vor, bei der eine Kamera in der Antastvorrichtung integriert ist und der Arbeitsraum mit einer ausreichenden Anzahl an kalibrierten und codierten Zielmarken versehen ist. Im Bereich von roboterbasierten optischen Messsystemen ist exemplarisch das System *3D Arena* der Firma AICON 3D Systems GmbH zu nennen, welches mehrere Kameras an der Decke vorsieht, um den 3D-Sensor im Arbeitsraum zu verfolgen bzw. dessen sechs Freiheitsgrade zu bestimmen (LUHMANN et al. 2019, S. 620 f.). Für das System wird eine Messgenauigkeit von 0,1–0,3 mm angegeben (LUHMANN et al. 2019, S. 621). Ein ähnliches System ist das *ZEISS AiCell trace*, wobei dieses um zusätzliche Referenzelemente am Roboterarm erweitert ist (LUHMANN et al. 2019, S. 621). Aufgrund des Aufbaus von Kamera-Tracking-Systemen im Vergleich zu einem Lasertracker können diese einfacher umgesetzt werden, wodurch sich Kostenvorteile ergeben (WECKENMANN 2012, S. 225). Auch hier muss eine durchgehende Sichtbarkeit der Referenzelemente für die externe Messsystemtechnik während des gesamten Messvorgangs stets gewährleistet sein (LUHMANN et al. 2019, S. 618), was die Systemkomplexität erhöht bzw. die Flexibilität einschränkt.

Photogrammetrische Methoden mithilfe von Zielmarken

Mithilfe photogrammetrischer Methoden können Raumkoordinaten von einzelnen Punkten auf Basis von Bildern, die aus unterschiedlichen Perspektiven aufgenommen werden, ermittelt werden. Vereinfacht zusammengefasst geschieht dies in der Regel durch die Modellierung eines optischen Sensors als Lochkamera (mittels Zentralprojektion), dem Aufstellen von Kollinearitätsgleichungen und dem Einsatz von Optimierungsalgorithmen wie der Bündelausgleichung zur Bestimmung der jeweiligen Punkte (WECKENMANN 2012, S. 138 f.), siehe auch Grundlagen im Bereich der Nahbereichsphotogrammetrie (LUHMANN et al. 2019). Zur eindeutigen Signalisierung der zu bestimmenden Punkte werden dabei häufig physische, planare Zielmarken eingesetzt (vgl. Abschnitt 3.4). Diese werden auf dem Objekt, an Kulisselementen oder in der Umgebung angebracht (siehe Abb. 3.2b). Anschließend erfolgt die Datenerfassung und die Berechnung der entsprechenden Punktkoordinaten in einem globalen KOS.

Auf diese Weise wird in der Arbeit von LUHMANN (2010) eine Automobiltür vermessen, wobei eine erreichte relative Genauigkeit von ungefähr 0,025 mm für Punktkoordinaten genannt wird. Allgemein können photogrammetrische Systeme Genauigkeiten bei Längenmessungen von ungefähr 0,05 mm bei einem 2 m Prüfobjekt erreichen (LUHMANN 2010). Nach LUHMANN (2010) umfasst das Messen einzelner Objektpunkte in einer Offline-Anwendung den Standardanwendungsfall der Photogrammetrie. Dabei kommen in der Regel eine einzelne, hochauflösende Digitalkamera, Zielmarken und eine selbstkalibrierende Bündelausgleichung zum Einsatz. In diesem Zusammenhang bestehen auch Forschungsansätze, bei denen die Zielmarken projiziert werden. Im Rahmen der vorliegenden Dissertation ist dabei die Detektion der Zielmarken von vorrangigem Interesse, weswegen derartige Ansätze in Abschnitt 3.4 „Detektion von Zielmarken“ aufgegriffen werden.

Das beschriebene Vorgehen erlaubt eine äußerst genaue Bestimmung von einzelnen Punkten auf größeren Prüfobjekten. Sie ist allerdings im Kontext einer flächenhaften optischen Erfassung von Bauteiloberflächen (Millionen von Antastpunkten vgl. Abschnitt 2.1.1) häufig nicht zielführend. Jedoch eignet sich das Vorgehen, um einzelne Punkte in Form von Referenzpunkten in einem globalen KOS bereitzustellen. Anschließend kann die Ausrichtung von flächenhaft erfassten Teilansichten auf Basis dieser Referenzpunkte erfolgen (WECKENMANN 2012, S. 223). Der Ablauf ist schematisch in Abb. 3.3 dargestellt. Er umfasst in Schritt 1 und 2 das Anbringen von Zielmarken sowie die erforderlichen Schritte, um mithilfe photogrammetrischer Methoden globale Referenzpunkte zu bestimmen. In Schritt 3 erfolgt das Erfassen von flächenhaften Teilansichten sowie deren Ausrichtung in einem globalen KOS basierend auf den zuvor bestimmten Referenzpunkten. Abschließend sind die Zielmarken vom Prüfobjekt zu entfernen. Mit diesem Verfahren ist somit stets ein zweistufiger Aufnahmeprozess verbunden. Neben der zusätzlich erforderlichen Sensorik sind dabei auch die erheblichen zeitlichen und manuellen Aufwände bezüglich des Anbringens und Entfernens von Zielmarken auf einem Prüfobjekt zu beachten (PAPPA et al. 2003; ÜRÜN et al. 2017; WECKENMANN 2012, S. 232).

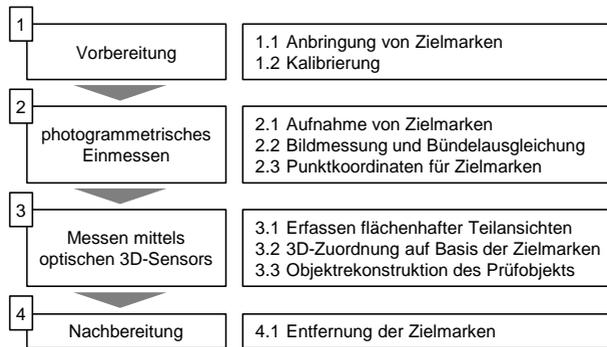


Abbildung 3.3: Verfahrensschritte zur Ausrichtung von Teilansichten auf Basis photogrammetrischer Methoden mit Zielmarken (in Anlehnung an ÜRÜN et al. 2017)

Ein solches Verfahren zur flächenhaften Erfassung von komplexen Objekten stellen REICH et al. (2000) vor. Die Autoren verwenden runde Zielmarken auf der Außenseite einer Automobiltür und erstellen mithilfe photogrammetrischer Methoden ein globales Referenzgerüst bestehend aus den aufgenommenen Markennittelpunkten. Anschließend erfasst ein Streifenlichtsensor Oberflächenbereiche des Objekts in Form von dichten Punktwolken. Mithilfe der zu den Marken gehörenden Punkte lassen sich die Teilansichten den zuvor berechneten Punkten des Referenzgerüsts zuordnen und hochgenau in das globale KOS überführen.

BERTAGNOLLI (2006) stellt in diesem Zusammenhang auch einen Ansatz zur automatisierten Messposenplanung in roboterbasierten optischen Messsystemen vor. Ziel dabei ist die vollständige Oberflächenrekonstruktion eines Messobjekts durch Teilansichten eines robotergeführten Streifenlichtensors. Auf Basis von CAD-Daten, Sensor-Spezifikationen, einer entwickelten Messstrategie sowie eines Optimierungsalgorithmus werden geeignete Messposen im Arbeitsraum automatisiert abgeleitet, wodurch sich insbesondere manuelle Tätigkeiten reduzieren und infolge Messzeiten einsparen lassen.

Es existieren auch kommerzielle Systeme, die als roboterbasierte optische Messsysteme für industrielle Messtechnikanwendungen angeboten werden, beispielsweise die *ZEISS AIBox* der Firma Carl Zeiss Optotechnik GmbH (vgl. Abschnitt 5.1), das Messsystem *ScanBox* der Firma GOM (LUHMANN et al. 2019, S. 620; ÜRÜN et al. 2017) oder das System *3D Arena* der Firma AICON 3D Systems GmbH (LUHMANN et al. 2019, S. 620 f.).

Darüber hinaus wurde konzeptionell die Überlegung zur Erweiterung solcher roboterbasierten optischen Messsysteme um Projektoren von ÜRÜN et al. (2017) angestellt. Dabei soll die manuelle Applikation von Zielmarken im Karosseriebau der Automobilindustrie durch entsprechende Projektionen ersetzt werden. Da dieser Ansatz eine Langzeitstabilität der beabsichtigten DLP-Projektoren während des Messvorgangs voraussetzt, werden in (ÜRÜN et al. 2017) zunächst Einflüsse wie Projektionsstabilität, Filterradfrequenz und freie Sichtlinie thematisiert.

Anschließend werden Voruntersuchungen hinsichtlich des zu verwendenden Farbkanales der hochauflösenden Digitalkamera vorgestellt. An einem prototypischen Testaufbau wird gezeigt, dass projizierte Zielmarken analog zu physischen Zielmarken detektiert und für photogrammetrische Methoden eingesetzt werden können, wobei eine Abnahme der inneren Genauigkeit nach der Bündelausgleichung zu beobachten war. ÜRÜN et al. (2017) weisen auch auf die Möglichkeit hin, verzerrt dargestellte kreisförmige Zielmarken auf Basis eines kalibrierten Digital-Projektors und CAD-Daten zu entzerren. Eine Umsetzung des vorgeschlagenen Konzepts zur Verwendung von projizierten Zielmarken in Verbindung mit photogrammetrischen Methoden in roboterbasierten optischen Messsystemen mit einer Evaluation im Hinblick auf die Realisierbarkeit, Robustheit oder Genauigkeit ist in der Arbeit von ÜRÜN et al. (2017) nicht beschrieben.

3.3 Registrierung von Punktwolken

Dieser Abschnitt behandelt insbesondere Ansätze zur paarweisen Ausrichtung von Punktwolken mithilfe von iterativen Methoden (vgl. Abb. 3.2c). Nach einer allgemeinen Einführung in Abschnitt 3.3.1 werden in Abschnitt 3.3.2 Möglichkeiten zur Grobausrichtung von Teilansichten thematisiert. Anschließend wird auf iterative Algorithmen eingegangen (siehe Abschnitt 3.3.3), die eine genaue Registrierung von Punktwolken erlauben. Derartige Forschungsansätze werden häufig im allgemeinen Kontext der Computer Vision entwickelt. Daher werden abschließend Anwendungsbeispiele mit Bezug zur Fertigungsmesstechnik vorgestellt.

3.3.1 Allgemeines

Der limitierte Sichtbereich optischer 3D-Sensoren erfordert die genaue Ausrichtung von mehreren Teilansichten zu einer Gesamtaufnahme bei der Digitalisierung von Bauteilen (vgl. Abschnitt 2.1). Aufgrund der hohen Messgenauigkeiten aktueller 3D-Sensoren ist es vorteilhaft, die erzeugten Messdaten für den Registrierungsprozess heranzuziehen. Die flächenhaft erfassten Punktwolken (vgl. Abschnitt 2.1.1) werden dabei mithilfe von algorithmischen, iterativen Methoden zueinander ausgerichtet, indem die Oberflächenausprägung eines gemeinsamen Überlappungsbereichs genutzt wird.

Im Folgenden werden daher insbesondere Registrierungsmethoden adressiert, die in Bezug zum algorithmischen Ausrichten von Punktwolken stehen und dabei auf vorhandene geometrische Oberflächenmerkmale zurückgreifen. Zusätzlich stellen optische 3D-Sensoren häufig auch Intensitätsinformationen in den Teilansichten bereit (siehe Abschnitt 2.1.1). Daher werden ebenfalls Ansätze betrachtet, die neben den 3D-Messdaten (x -, y - und z -Koordinaten von Punkten) auch zugehörige Intensitätswerte während der Registrierung berücksichtigen.

Die Intensitätsinformationen können dabei beispielsweise in Form von projizierten Texturen vorgegeben werden. Dies verspricht einen positiven Einfluss auf das Konvergenzverhalten etablierter Algorithmen.

Das Ziel bei der Registrierung von zwei Punktwolken besteht darin, eine möglichst präzise Transformation zu bestimmen (vgl. Abschnitt 2.2). Um diese auf Basis von vorhandenen Oberflächenmerkmalen zu ermitteln, wird in der Regel auf iterative Methoden, wie den bekannten ICP-Algorithmus von BESL und MCKAY (1992) bzw. dessen Varianten, zurückgegriffen (DÍEZ et al. 2015; HUANG et al. 2017; LI et al. 2018; WECKENMANN 2012, S. 232). Ausgehend von einer initialen Grobausrichtung der Punktwolken findet eine sukzessive Verfeinerung der Ausrichtung statt (BARONE et al. 2012; DÍEZ et al. 2015; HOLZ et al. 2015). Aufgrund dessen sowie in Anlehnung an den englischen Ausdruck *fine registration* (HUANG et al. 2017; SALVI et al. 2007) wird dieser Vorgang im Folgenden auch als „Feinregistrierung“ bezeichnet. Da die präzise Ausrichtung von Teilansichten für die geometrische Qualitätsprüfung von hoher Bedeutung ist (vgl. Abschnitt 2.1.2), wird das beschriebene Vorgehen – Grobausrichtung mit anschließender Feinregistrierung von Punktwolken – im Rahmen dieser Arbeit als zielführend erachtet.

Diese Unterscheidung wird zur Abgrenzung von verschiedenen Ansätzen aufgegriffen. In Abschnitt 3.3.2 werden Verfahren zur Grobausrichtung von Punktwolken aufgezeigt. Die Feinregistrierung mithilfe iterativer Ansätze sowie Anwendungsbeispiele für die Fertigungsmesstechnik werden in Abschnitt 3.3.3 betrachtet. Aufgrund der umfangreichen Literatur zu beiden Gebieten werden relevante Veröffentlichungen mit Bezug zur Zielsetzung dieser Arbeit vorgestellt. Dies adressiert insbesondere etablierte Ansätze zur sequenziellen, paarweisen Verkettung von Punktwolken für roboterbasierte Messsysteme. Alternative Registrierungsansätze wie Punktwolken-Verkettungen im Sinne eines geschlossenen Kreises oder gleichzeitige Ausrichtungen im Verbund von drei oder mehr Punktwolken werden dabei aus der Betrachtung ausgenommen.

3.3.2 Verfahren zur Grobausrichtung

Das Ziel der Grobausrichtung ist die Bestimmung einer Initialtransformation zwischen zwei Punktwolken. Dies stellt einen erforderlichen Schritt dar, damit anschließend sinnvolle Korrespondenzen während der iterativen Feinregistrierung gebildet werden können (siehe Abschnitt 2.2.2). Eine konkrete Spezifikation hinsichtlich der erforderlichen Güte einer solchen Registrierung existiert dabei nicht. Da die Grobausrichtung den Erfolg bzw. die Qualität der Feinregistrierung beeinflusst (BARONE et al. 2012; HOLZ et al. 2015; WECKENMANN 2012, S. 232 f.), sollte diese eine ausreichende Zuverlässigkeit bzw. Genauigkeit aufweisen (HOLZ et al. 2015). Zur Bestimmung einer Initialtransformation existieren für roboterbasierte Messsysteme verschiedene Verfahren, die sich vor allem hinsichtlich der Automatisierbarkeit sowie der erreichbaren Genauigkeit und Robustheit unterscheiden.

Eine manuelle Grobausrichtung von Punktwolken ist durch Interaktion mit der anwendenden Person möglich (BARONE et al. 2012; HOLZ et al. 2015; WECKENMANN 2012, S. 230; ZINSSER et al. 2003). Dieser wählt dabei eine ausreichende Anzahl an korrespondierenden Punkten aus, woraufhin eine Initialtransformation ermittelbar ist. Abgesehen von der Herausforderung, visuell geeignete Korrespondenzen zu identifizieren, impliziert dieses Vorgehen einen halb-automatisierbaren Ansatz (HOLZ et al. 2015; WECKENMANN 2012, S. 230).

Der manuellen Ausrichtung steht die Registrierung mithilfe von Odometriedaten gegenüber. Das handhabende System eines optischen 3D-Sensors verfügt über eine gesteuerte Kinematik, wodurch sich entsprechende Bewegungsdaten zur Bestimmung von Transformationen nutzen lassen (WECKENMANN 2012, S. 231). So greifen CALLIERI et al. (2004), SHI und XI (2008) und ULRICH (2018) auf die Achswinkelpositionen eines Industrieroboters zurück. Dieses Vorgehen eignet sich lediglich zur Grobausrichtung von Punktwolken, da die Posegenauigkeit von herkömmlichen Industrierobotern als unzureichend im industriellen Kontext der geometrischen Qualitätsprüfung anzusehen ist (vgl. Abschnitt 2.1). Jedoch erlaubt der Einsatz eines solchen kinematischen Handhabungssystems und dessen Odometriedaten eine automatisierte Registrierung (SHI und XI 2008; ULRICH 2018).

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, Punktwolken auf Basis charakteristischer Punkte zueinander auszurichten. Diese Punkte werden im Englischen häufig auch als *3D keypoints* bezeichnet (DÍEZ et al. 2015; HOLZ et al. 2015; TOMBARI et al. 2013). Dabei werden Punkte, die eindeutig identifizierbar sind, im Überlagerungsbereich beider Punktwolken mithilfe von algorithmischen Routinen gesucht. Das geschieht zumeist über sogenannte Merkmalsdeskriptoren, die einen Punkt basierend auf seiner Nachbarschaft beschreiben. Sobald mindestens drei korrespondierende Punkte-Paare ermittelt wurden (vgl. Abschnitt 2.2.2), können diese zur Transformationsberechnung herangezogen werden (DÍEZ et al. 2015). Beispiele für dieses Vorgehen stellen Ansätze mithilfe von *spin images* (JOHNSON und HEBERT 1999), *point feature histograms* (RUSU et al. 2008) sowie *fast point feature histograms* (RUSU et al. 2009) oder *signature of histograms of orientations* (SALTI et al. 2014) dar. Aufgrund der Vielzahl an Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet wird für einen umfassenden Überblick über merkmalsbasierte Verfahren an dieser Stelle auf weiterführende Literatur verwiesen (DÍEZ et al. 2015; HOLZ et al. 2015; TOMBARI et al. 2013).

Als große Herausforderung dieser Verfahren ist zum einen die Eindeutigkeit von derartigen charakteristischen Punkten zu nennen. Oberflächen ohne markante geometrische Merkmale weisen oft keine eindeutig identifizierbaren Punkte auf, wodurch merkmalsbasierte Verfahren vor allem für ebene und merkmalsarme Oberflächen ungeeignet sind (BARONE et al. 2012; VON ENZBERG et al. 2016). Zum anderen besitzen solche markanten geometrischen Merkmale häufig eine aufwendige Implementierung und greifen zum Teil auf komplexe Metriken zur Identifikation korrespondierender Punkte zurück. Infolgedessen beanspruchen entsprechende Routinen oft einen Großteil der Rechenzeit für Verarbeitungsprozesse, wie der Merkmalsextraktion und -zuordnung (BARONE et al. 2012).

Überdies müssen sie eine ausreichende Robustheit gegenüber Einflüssen wie Sensor-Rauschen, Punktdichteänderungen oder Stördaten aufweisen (HOLZ et al. 2015; TOMBARI et al. 2013). Aus den genannten Gründen ist eine genaue Ausrichtung mittels charakteristischer Punkte häufig nur bedingt erzielbar. DÍEZ et al. (2015) und HOLZ et al. (2015) führen merkmalsbasierte Verfahren vor allem als eine Möglichkeit zur Bestimmung der Initialtransformation von Punktwolken auf, wobei Abweichungen im Registrierungsergebnis in einem nachgelagerten Schritt durch iterative Methoden der Feinregistrierung kompensiert werden.

Für einige 3D-Sensoren besteht des Weiteren die Möglichkeit, neben der Punktwolke zusätzliche Intensitätsinformationen zu erfassen (siehe Abschnitt 2.1.1). Diese können ebenfalls für einen Registrierungsprozess genutzt werden. Dafür werden zunächst charakteristische Bildpunkte auf Basis der Intensitätswerte extrahiert. Durch die Zuordnung eines solchen Bildpunktes zu dem entsprechenden Punkt in der Punktwolke können auf diese Weise ebenfalls charakteristische Punkte im Sinne der vorherigen Absätze bestimmt und eine Transformation berechnet werden. BARONE et al. (2012) verwenden physische Zielmarken, die auf Objekten angebracht werden. Diese werden basierend auf den erfassten Intensitätsdaten detektiert und deren Mittelpunkte bestimmt. Die zugehörigen Punkte werden anschließend zu Dreiecken zusammengefasst. Über geometrische Ähnlichkeitsbeziehungen werden so gleiche Dreiecke in verschiedenen Ansichten identifiziert und korrespondierende Punkte zur Transformationsberechnung bestimmt. BARONE et al. (2012) demonstrieren auf diese Weise ein paarweises Ausrichten von Punktwolken zur Digitalisierung von Objekten. Auch VON ENZBERG et al. (2016) greifen auf die Intensitätsinformationen von Punktwolken zur Registrierung zurück. Dabei besteht das Ziel darin, die merkmalsarme Oberfläche auf der Außenseite einer Automobiltür durch mehrere Ansichten dreidimensional zu erfassen. Der Ansatz nutzt die vorhandene Oberflächentextur des Bauteils, extrahiert charakteristische Bildpunkte und verwendet zugehörige 3D-Punkte zur Transformationsberechnung zweier Punktwolken. VON ENZBERG et al. (2016) ordnen ihren Registrierungsansatz als Alternative zu einer Ausrichtung, zum Beispiel basierend auf externer Hardware oder odometrischen Daten eines Roboters, ein. Die zusätzliche Nutzung von Intensitätsinformationen verspricht Vorteile bei der Identifikation korrespondierender Punkte, insbesondere bei ebenen oder merkmalsarmen Oberflächenbereichen.

Im Hinblick auf die Sensitivität der Feinregistrierung gegenüber der initialen Transformation ist eine genaue Grobausrichtung anzustreben (MAISELI et al. 2017). Darüber hinaus ist für eine ressourcenschonende Qualitätsprüfung auch die Möglichkeit einer Automatisierbarkeit sinnvoll. Aufgrund der stets vorhandenen Odometriedaten erlauben roboterbasierte optische Messsysteme eine zuverlässige Ausrichtung von Punktwolken im Rahmen der inhärenten Posegenauigkeit von Industrierobotern (vgl. Abschnitt 2.1.1). Ferner bieten auch merkmalsbasierte Ansätze Möglichkeiten zur genauen Grobausrichtung, insbesondere wenn diese neben geometrischen Merkmalen der Punktwolke auch auf erfasste Intensitätsinformationen zurückgreifen können. Die dabei erzielbare Genauigkeit, Robustheit und Automatisierbarkeit sollte jedoch im Vorfeld

anwendungsspezifisch untersucht und im Hinblick auf die Einsetzbarkeit in roboterbasierten optischen Messsystemen evaluiert werden. Generell ist die Wahl des Vorgehens zur Grobausrichtung von Punktwolken in Abstimmung mit dem nachfolgenden Feinregistrierungsalgorithmus zu treffen.

3.3.3 Ansätze zur Feinregistrierung

Iterative Algorithmen

Die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Algorithmen zur Feinregistrierung vollziehen die Ausrichtung von Punktwolken durch ein iteratives Vorgehen. Dabei findet, ausgehend von einer Grobausrichtung, eine sukzessive Annäherung der punktbasierten Oberflächen des Überlagerungsbereichs statt. Bei jedem Durchgang werden für eine ausgewählte Punktmenge zunächst Korrespondenzen zwischen beiden Punktwolken hergestellt, damit eine Transformation berechnet werden kann. Sie wird anschließend auf eine der Punktwolken angewendet. Anhand einer Fehlermetrik wird darüber entschieden, ob eine Verbesserung der Ausrichtung vorliegt. Nach Erreichen von festgelegten Kriterien wird der Algorithmus beendet und die finale Transformation als mathematische Beschreibung der verfeinerten Ausrichtung zurückgegeben. (HOLZ et al. 2015)

Ein etablierter Ansatz zur Feinregistrierung stellt der bereits eingeführte ICP-Algorithmus von BESL und MCKAY (1992) dar. Die Korrespondenzen (Punkte-Paare zwischen beiden Punktwolken) werden über den minimalen euklidischen Abstand festgelegt. Dabei wird auf alle vorhandenen Punkte des Überlagerungsbereichs zurückgegriffen. Sind die Korrespondenzen ermittelt, erfolgt die Transformationsberechnung sowie deren Anwendung. Anschließend wird der verbleibende mittlere quadratische Abstand zwischen den Korrespondenzen bestimmt und mit der Abweichung der vorherigen Iteration verglichen. Eine neue Iteration beginnt, sofern ein festgelegter Grenzwert nicht erreicht wird. Eine nähere Ausführung des Ablaufs mit mathematischen Erläuterungen ist Abschnitt 2.2.2 zu entnehmen. Der Algorithmus konvergiert stets zu einem lokalen Minimum (BESL und MCKAY 1992). Das Erreichen des gewünschten globalen Minimums kann indes nicht garantiert werden (BESL und MCKAY 1992). Der Ansatz nach BESL und MCKAY (1992) zeichnet sich durch seine Einfachheit, Effektivität und Robustheit aus (BENAMOUN und MAMIC 2002, S. 113; DÍEZ et al. 2015; JOHNSON und BING KANG 1999; MAISELI et al. 2017; PITO 1997) und stellt einen der meist genutzten Algorithmen zum Registrieren von Punktwolken dar (DÍEZ et al. 2015; MAISELI et al. 2017). In diesem Zusammenhang wird der ICP-Algorithmus häufig auch als „Standard“ bezeichnet (DÍEZ et al. 2015; WECKENMANN 2012, S. 232) und ist daher üblicherweise in Open-Source-Bibliotheken zur Verarbeitung von Punktwolken vorhanden, beispielsweise in der Point Cloud Library (PCL) (HOLZ et al. 2015; RUSU und COUSINS 2011). Für ebene und merkmalsarme Oberflächen besteht allerdings die Herausforderung darin, eindeutige Korrespondenzen identifizieren zu können (HUANG et al. 2017).

Eine weitere iterative Methode wurde fast zeitgleich von CHEN und MEDIONI (1991) vorgestellt. Ausgehend von einer festgelegten Punktmenge wird zum Finden von korrespondierenden Punkten die Normalenrichtung und dessen Schnittpunkt herangezogen. Zur anschließenden Ermittlung der Transformation wird anstelle der Punkt-zu-Punkt-Fehlermetrik, wie in (BESL und MCKAY 1992), ein Vorgehen unter Einsatz von Tangentialebenen angewendet. Dabei wird die Summe der quadratischen Abstände zwischen den ausgewählten Punkten und den tangentialen Ebenen der jeweiligen Korrespondenzpunkte minimiert. Der Algorithmus gilt als konvergiert, wenn die Veränderung des Fehlers zur vorherigen Iteration einen definierten Schwellwert unterschreitet. Dieser Ansatz stellt ein nicht-lineares Minimierungsproblem dar (CHEN und MEDIONI 1991), deren Zielfunktion z. B. durch Einsatz eines nicht-linearen Algorithmus (FITZGIBBON 2003) oder durch Linearisierung (LOW 2004) gelöst werden kann. Die Methode zeigt ein schnelleres Konvergenzverhalten im Vergleich zu einer Punkt-zu-Punkt-Fehlermetrik (RUSINKIEWICZ und LEVOY 2001; SALVI et al. 2007). Das Vorgehen kann jedoch eine zeitintensive Berechnung von Oberflächennormalen erfordern, die unter Umständen eine unzureichende Genauigkeit aufweist (SALVI et al. 2007). ULRICH (2018, S. 74) weist darauf hin, dass der Einsatz dieser Methode für punktbasierte Oberflächen mit künstlich generierten geometrischen Strukturen nicht zielführend ist.

Darüber hinaus sind zahlreiche Varianten des ICP-Algorithmus und darauf aufbauende Erweiterungen entstanden. RUSINKIEWICZ und LEVOY (2001) ordnen iterative Methoden anhand der Umsetzung folgender Schritte ein: Punktauswahl im Überlagerungsbereich (1), Korrespondenz-Suche zwischen zwei Punktwolken (2), Korrespondenz-Gewichtung (3), Korrespondenz-Zurückweisung (4), Fehlermetrik und Ansatz zur Minimierung der Fehlermetrik (5). In Abb. 3.4 werden anhand dieser Einteilung ausgewählte Beispiele aufgeführt, um die Vielfalt an ICP-Varianten zu verdeutlichen.

Ferner existieren Erweiterungen des ICP wie der Generalized-ICP (SEGAL et al. 2009), der Ansätze von BESL und MCKAY (1992) und CHEN und MEDIONI (1991) kombiniert. Darüber hinaus besteht auch die Möglichkeit, Intensitäts- bzw. Farbinformationen in den ICP zu integrieren, z. B. für die Punktauswahl (DRUON et al. 2006), die Korrespondenz-Suche (GODIN et al. 1994; JOHNSON und BING KANG 1999; JOUNG et al. 2009) oder in der Zielfunktion (PARK et al. 2017). Zur direkten Verwendung von Intensitätsinformationen für iterative Methoden weisen DRUON et al. (2006) und GODIN et al. (1994) auf die Schwierigkeit hin, dass diese unter anderem in direkter Abhängigkeit zu den jeweiligen Aufnahmebedingungen, beispielsweise einer Messpose, stehen.

Die vorgestellte Auswahl zeigt einen Ausschnitt an verschiedenen Ansätzen zur Feinregistrierung. Sie wurden in Anlehnung an die Methode von BESL und MCKAY (1992) veröffentlicht. POMERLEAU et al. (2013) sprechen in diesem Zusammenhang von Hunderten von ICP-basierten Ansätzen. Für einen weiterführenden Überblick über ICP-basierte Ansätze kann daher auch auf die Arbeiten von MAISELI et al. (2017), POMERLEAU et al. (2013), RUSINKIEWICZ und LEVOY (2001) und SALVI et al. (2007) verwiesen werden.

Punktauswahl (1)	Korrespondenz-Suche (2)	Korrespondenz-Gewichtung (3)
<ul style="list-style-type: none"> • BESL und MCKAY (1992): alle Punkte • MASUDA ET AL. (1996): zufällige Auswahl einer Teilpunktmenge • RUSINKIEWICZ UND LEVOY (2001): Punktmengenauswahl auf Basis der Verteilung der Oberflächennormalen • TURK und LEVOY (1994): gleichmäßige Auswahl einer reduzierten Punktmenge 	<ul style="list-style-type: none"> • BESL und MCKAY (1992): geringster Punkt-zu-Punkt Abstand • CHEN und MEDIONI (1991): Schnittpunkt mit der Normalen • NEUGEBAUER (1997): Rückprojektion des Punktes 	<ul style="list-style-type: none"> • BESL und MCKAY (1992), CHEN und MEDIONI (1991): konstante Gewichtung • GODIN et al. (1994): Gewichtung mit zunehmendem Korrespondenz-Abstand
Korrespondenz-Zurückweisung (4)		Fehlermetrik und -minimierung (5)
<ul style="list-style-type: none"> • MASUDA et al. (1996): Zurückweisung auf Basis der Standardabweichung aller Korrespondenzabstände • RUSINKIEWICZ UND LEVOY (2001): maximal zulässige Entfernung • TURK und LEVOY (1994): Zurückweisung von Korrespondenzen aus Randbereichen • ZINSSER et al. (2003): Zurückweisung von Korrespondenz-Punkten bei Mehrfachzuordnungen auf Basis des Korrespondenz-Paares mit minimalem Abstand 		<ul style="list-style-type: none"> • BESL und MCKAY (1992): Summe quadratischer Abstände zwischen den korrespondierenden Punkten • CHEN und MEDIONI (1991): Summe quadratischer Abstände zwischen den ausgewählten Punkten und entsprechenden Tangentialebenen

Abbildung 3.4: Zusammenfassende Darstellung ausgewählter ICP-Varianten entsprechend der Einteilung von iterativen Algorithmen nach RUSINKIEWICZ und LEVOY (2001)

Die verschiedenen Algorithmen zielen darauf ab, je nach Anwendung unterschiedliche Randbedingungen und Anforderungen bei der Ausrichtung von Punktwolken einzubeziehen. Zu nennen sind Kriterien wie Rechenaufwand, Robustheit oder die Qualität von Messdaten. Da keiner der Registrierungsansätze pauschal für sämtliche Anwendungen in ausreichender Weise funktioniert (DÍEZ et al. 2015), besteht die Herausforderung vor allem in der richtigen Auswahl und Parametrierung eines Algorithmus (HOLZ et al. 2015).

Registrierungshilfen für den ICP-Algorithmus

Der Begriff „Registrierungshilfen“ ist an den englischen Ausdruck *registration aid* von PITO (1997) angelehnt. Der Gedanke dabei besteht darin, wie durch Vorüberlegungen und explizite Maßnahmen das Konvergenzverhalten des ICP-Algorithmus verbessert werden kann. Dies findet auf Basis der von BESL und MCKAY (1992) eingeführten Korrespondenz-Suche und Fehlermetrik statt.

In diesem Zusammenhang entwickelte PITO (1997) ein automatisiertes, optisches Messsystem zur dreidimensionalen Erfassung von Objekten. Das zu erfassende Objekt wird auf einer in die Szene eingebrachten Registrierungshilfe platziert. Dabei handelt es sich um einen physischen Gegenstand, dessen geometrische Formgestaltung anhand von theoretischen Vorüberlegungen zum Konvergenzverhalten des ICP-Algorithmus festgelegt wurde. Die einzelnen 3D-Aufnahmen umfassen somit neben dem eigentlichen Objekt stets auch Teile der gefertigten Registrierungshilfe. Die Registrierung findet dann auf Basis der erfassten Messdaten der Registrierungshilfe statt. PITO (1997) zeigt, dass auf diese Weise der Registrierungsprozess des ICP-Algorithmus zuverlässig unterstützt werden kann, unabhängig von der Oberflächenprägung des zu erfassenden Objekts. Ein Beweis, dass der ICP-Algorithmus für die gewählte 3D-Form stets zum gewünschten globalen Optimum konvergiert, wurde nicht erbracht. (PITO 1997)

Zur genauen Registrierung von Punktwolken verwenden HUANG et al. (2017) in die Szene eingebrachte, physische Referenzkugeln. Sie werden zur Ausrichtung von Punktwolken unterstützend herangezogen, indem diese zusätzlich zum Objekt durch einen 3D-Sensor aufgenommen werden. Für die partiell erfassten Kugeloberflächen werden zunächst vollständige, virtuelle Kugeln abgeleitet. Anschließend erfolgt die Registrierung unter Einbezug der virtuellen Daten und einem modifizierten ICP-Algorithmus. Die Autoren und Autorinnen zeigen, dass diese Vorgehensweise den Einfluss von Messrauschen reduzieren und zu einem verbesserten Konvergenzverhalten bei der Feinregistrierung beitragen kann. (HUANG et al. 2017)

Ein weiteres Verfahren zum genauen Ausrichten von Punktwolken im Kontext roboterbasierter Messsysteme beschreibt ULRICH (2018). Aufbauend auf der Arbeit von ULRICH et al. (2015) wird in ULRICH (2018) ein Feinregistrierungsansatz vorgestellt, der erfasste Punktwolken zunächst um zusätzliche, künstliche Punkte erweitert, indem einzelne Punkte an definierten Stellen hinzugefügt werden. Die so erweiterten Punktwolken werden anschließend mithilfe des ICP-Algorithmus ausgerichtet. ULRICH (2018) greift somit die Idee auf, dass eine Registrierungshilfe für den ICP auch virtuell erstellt werden kann. Dies bezieht sich auf diejenigen Punkte der auszurichtenden Punktwolken, die nicht unmittelbar auf die geometrische Oberflächenmessung eines physischen Objekts zurückgehen. Die künstliche Erweiterung einer Punktwolke um zusätzliche Punkte wird in der vorliegenden Dissertation auch als „Augmentierung“ bezeichnet. Nach ULRICH (2018) erfolgt dies anhand einer vollflächig projizierten Textur. Sie wird vom 3D-Sensor zusätzlich zur Objektoberfläche in Form von Intensitäten erfasst. Vorhandene Merkmale wie Hell-Dunkel-Übergänge (Kanten) markieren räumliche Positionen zum Hinzufügen künstlicher Punkte in Richtung der Oberflächennormalen. Die auf der Objektoberfläche dargestellte Textur zeigt ein repetitives Muster von hellen Vierecken. Zur Applikation werden selbst-konstruierte, kostengünstige Durchlichtprojektoren mit speziell angefertigten Folien eingesetzt (ULRICH 2018, S. 113). Der darstellende Bereich eines Projektors wird dazu manuell ausgerichtet. Anhand einer prototypischen Umsetzung im Labormaßstab wird gezeigt, dass diese Vorgehensweise höhere Genauigkeiten im Vergleich zu einer Ausrich-

tung auf Basis der Roboterkinematik ermöglicht (ULRICH 2018, S. 133). ULRICH (2018, S. 74) adressiert mit diesem Registrierungsansatz explizit Bauteile mit überwiegend homogenen Oberflächen, sprich merkmalsarme Punktwolken. Die Einteilung in homogen/merkmalsarm bzw. merkmalsreich ist dabei qualitativ-intuitiv vorzunehmen. Die Übertragbarkeit des Ansatzes auf Oberflächen mit geometrischen Merkmalen und deren Interaktion mit den projizierten Texturen, wie der resultierende Einfluss auf die Detektion oder das Registrierungsverhalten, wurde nicht betrachtet.

Anwendungen für die Fertigungsmesstechnik

Der Nutzen iterativer Algorithmen zur Feinregistrierung von Punktwolken ist vielfältig; neben Anwendungen wie in der Archäologie (STAVROULAKIS et al. 2018), der mobilen Robotik (KIM et al. 2019), dem Autonomen Fahren (MUTZ et al. 2016) oder zur Bewahrung von Kulturgütern (SONG et al. 2018) werden sie insbesondere auch in der Qualitätsprüfung eingesetzt. Im Bereich der geometrischen Qualitätsprüfung stellt der ICP-Algorithmus eine weit verbreitete Methode zum genauen Ausrichten von 3D-Aufnahmen dar (LI et al. 2018; SENIN et al. 2013; WECKENMANN 2012, S. 232). Auf diese Weise können Bauteiloberflächen präzise digitalisiert und zum Prüfen von Fertigungstoleranzen herangezogen werden.

Diesbezüglich wurden Systeme zum Erstellen digitalisierter Oberflächen von Prüfobjekten entwickelt, die ausschließlich auf Registrierungshilfen zurückgreifen. PITO (1997) stellt ein Messsystem vor, bei dem das zu erfassende Objekt auf einer gefertigten Registrierungshilfe positioniert wird. Beide Elemente befinden sich auf einem ansteuerbaren Rotationstisch. Indem zusätzlich zum Objekt auch stets Teile der Registrierungshilfe erfasst werden, kann eine robuste Feinregistrierung mittels ICP erfolgen. Darüber hinaus beschreibt ULRICH (2018) ein roboter-basiertes Messsystem zur geometrischen Qualitätsprüfung von Blechbauteilen. Unter Zuhilfenahme vollflächig projizierter Texturen und einer anschließenden Punktwolken-Augmentierung wird die Ausrichtung erfasster 3D-Aufnahmen auf Basis des ICP-Algorithmus durchgeführt. Dies wurde anhand eines Beispielbauteils aus der Automobilindustrie demonstriert. Eine weiterführende Erforschung des Ansatzes hinsichtlich der Übertragbarkeit auf industrielle Systemtechnik und entsprechende Prüfobjekte wird vom Autor als wichtig eingestuft und für zukünftige Forschungsarbeiten empfohlen (ULRICH 2018, S. 143).

Die vereinten Punktwolken bilden die digitale Repräsentation eines Bauteils und werden zur Evaluierung von Fertigungsabweichungen herangezogen. Dies wird anhand eines Abgleichs mit einer Referenz, z. B. einem CAD-Modell, ermittelt (vgl. Abschnitt 2.1.2). Für diesen Vorgang ist eine Überlagerung von digitalisierter Oberfläche und Referenzmodell erforderlich, der ebenfalls mithilfe von iterativen Algorithmen vollzogen werden kann. Einen solchen Vorgang zur Inspektion von Bauteiloberflächen betrachten beispielsweise SHI und XI (2008).

Für die Fertigungsmesstechnik steht die präzise messtechnische Prüfdatenerfassung an zentraler Stelle. Abgestimmte Vorgehensweisen bei der Datenerfassung,

-verarbeitung und der Feinregistrierung mithilfe iterativer Algorithmen erlauben eine genaue Digitalisierung von Bauteilen. Insbesondere in roboterbasierten Messsystemen birgt das große Potenziale, effektive und ressourcenschonende Alternativen zu etablierten Verfahren zu schaffen (vgl. Abschnitt 3.2.2). Dafür gilt es, aufbauend auf dem Stand des Wissens geeignete Konzepte abzuleiten und anhand industrieller Systemtechnik zu untersuchen.

3.4 Detektion von Zielmarken

Eingebrachte Referenzelemente auf Bauteiloberflächen, wie Zielmarken, müssen zur weiteren Verarbeitung in digitalen Bilddaten erkannt werden. In Abschnitt 3.4.1 wird zunächst allgemein auf das Detektieren von Zielmarken eingegangen. Abschnitt 3.4.2 stellt anschließend etablierte Detektions- und Identifikationsmethoden vor. Abschließend wird in Abschnitt 3.4.3 auf die Detektion von projizierten Zielmarken Bezug genommen.

3.4.1 Allgemeines

Digitale photogrammetrische (Offline-)Messsysteme wurden in den letzten Jahren und Jahrzehnten vielfältig eingesetzt. Sie zeichnen sich durch eine hohe Genauigkeit aus (LUHMANN 2010). Neben der Automobilindustrie sind Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt, der Produktion von Windenergiesystemen, dem Maschinenbau und dem Bauwesen zu finden (LUHMANN 2010). Dabei werden häufig Zielmarken eingesetzt, die künstlich signalisierte Punkte darstellen. Sie sind räumlich eindeutig mit hoher Genauigkeit bestimmbar (FRASER 1997; SHORTIS und SEAGER 2014). Daher eignen sie sich auch zur Registrierung von flächenhaft erfassten Punktwolken, beispielsweise in roboterbasierten optischen Messsystemen (siehe Abschnitt 3.2). Aufgrund der hohen Genauigkeitsanforderungen im industriellen Kontext (vgl. Kapitel 1) nimmt die Verwendung von Zielmarken für optische Messsysteme eine wichtige Rolle ein (SHORTIS und SEAGER 2014).

Eingebrachte Zielmarken ermöglichen ein kontrolliertes, räumliches Festlegen messbarer Objektpunkte (SHORTIS und SEAGER 2014). Sie werden dazu auf der Objektoberfläche, an Kulissenelementen oder in der Szene platziert. Durch optische Sensoren werden diese zunächst erfasst und anschließend mithilfe von Methoden der digitalen Bildverarbeitung detektiert. Ziel ist dabei die präzise Extraktion von einem oder mehreren charakteristischen Bildpunkten (Referenzpunkte), z. B. der Mittelpunkt einer kreisförmigen Zielmarke. Neben dem „Finden“ der Marken in Bildern (Zielmarkendetektion) ist in der Regel auch eine Zuordnung derselben Marken in mehreren Ansichten erforderlich. Aus diesem Grund ist das Design etablierter Zielmarken häufig um Codierungen ergänzt, um eine automatisierte Detektion sowie Korrespondenz-Suche zu ermöglichen (FRASER 1997; SHORTIS und SEAGER 2014). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit

ist jedoch das Vorgehen und die Methodik zur Markendetektion von vorrangiger Bedeutung, weswegen dieser Aspekt im Folgenden weiter ausgeführt wird.

Bei dem industriellen Einsatz von Zielmarken finden physische Zielmarken Anwendung (BURGESS et al. 2011; FRASER 1997; LUHMANN 2010). Diese besitzen häufig retro-reflektierende Oberflächenmaterialien (BURGESS et al. 2011; FRASER 1997; LUHMANN 2010; WIJENAYAKE et al. 2014) und ermöglichen so eine verbesserte Darstellung der Marken in den erfassten Bildern (BURGESS et al. 2011). Unter realen Aufnahmebedingungen sind dennoch Einflüsse wie Skalierungsunterschiede, Belichtungsschwankungen oder perspektivische Verzerrungen zu beobachten (CLAUS und FITZGIBBON 2004; SHORTIS und SEAGER 2014). Daher ist ein geeignetes algorithmisches Vorgehen zur Detektion stets notwendig. Die bestehende Literatur bezieht sich dabei überwiegend auf Ansätze zur Lokalisation von physischen Zielmarken. Eine Übertragbarkeit auf projizierte Zielmarken ist prinzipiell möglich, da sich solche Marken zunächst lediglich in der Art der Bereitstellung unterscheiden. Der Transfer vorgestellter Ansätze auf projizierte Zielmarken wird in Abschnitt 3.4.3 thematisiert.

In der Literatur sind bereits einige anwendungsspezifische Markersysteme vorgestellt worden. Im Augmented Reality (AR)-Bereich sind beispielsweise ARTag (FIALA 2005; FIALA 2010), ARToolKit (KATO und BILLINGHURST 1999) und AR-ToolKitPlus (WAGNER und SCHMALSTIEG 2007) bekannte Vertreter, während in der optischen Messtechnik Zielmarkensysteme z. B. von der Firma AICON (SCHNEIDER und SINNREICH 1993), Geodelta (VAN DEN HEUVEL et al. 1993) oder Photometrix (CRONK und FRASER 2006) zur Verfügung stehen (siehe Abb. 3.5). Für einen weiterführenden Überblick über entsprechende Zielmarkensysteme sei an dieser Stelle auf (GARRIDO-JURADO et al. 2014) bzw. (SHORTIS und SEAGER 2014) verwiesen. Darüber hinaus gibt es Markensysteme wie DataMatrix-Codes oder QR-Codes, deren Einsatzzweck primär auf die Bereitstellung von Informationen abzielt (FIALA 2005). Trotz der unterschiedlichen Einsatzzwecke bei den zuvor genannten Markensystemen finden sich im Hinblick auf die algorithmischen Detektionsprozeduren viele Ähnlichkeiten. Je nach Form, Anwendungsfall oder Einsatzbedingungen, wie verwendete Hardware oder Verarbeitungsgeschwindigkeit, gehen Zielmarkensysteme in der Regel mit eigens abgestimmten Detektionsalgorithmen einher, um diese zuverlässig in Bildern zu erkennen.



Abbildung 3.5: Exemplarische Zielmarkensysteme aus dem Bereich der optischen Messtechnik (in Anlehnung an SHORTIS und SEAGER 2014)

Nachfolgend wird daher auf den Stand der Forschung und der Technik mit Bezug zur Detektion von Zielmarken eingegangen. Die Einteilung erfolgt dabei in Detektions- und Identifikationsmethoden. Diese Unterscheidung entspricht einem zweistufigen Vorgehen, um falsch detektierte Zielmarken in Bildern auszusortieren (FIALA 2010; KÖHLER et al. 2011; MONDÉJAR-GUERRA et al. 2018). Fehlerhafte Detektionen stellen beispielsweise nur teilweise erfasste Zielmarken oder andere markierte Objekte dar. KÖHLER et al. (2011) sprechen zunächst von der Detektion sogenannter „Kandidaten“ als mögliche Zielmarken (engl.: *candidate detection*), die im Anschluss einen Identifikationsprozess durchlaufen. Er stellt sicher, dass es sich bei den detektierten Kandidaten auch um tatsächliche Marken handelt. Der nachfolgende Überblick beschreibt etablierte Methoden und Ansätze im Bereich der Zielmarkendetektion.

3.4.2 Detektions- und Identifikationsmethoden

Detektieren von Marken

Zur Detektion von potenziellen Zielmarken (Kandidaten) in Bildern sind diese zunächst vom Bildhintergrund zu unterscheiden. Dabei wird bestimmt, welche Bildpixel den Marken bzw. dem Hintergrund zuzuordnen sind. Dieser Prozess wird üblicherweise als „Segmentierung“ bezeichnet (JÄHNE 2005, S. 471). In Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Bildinformationen existieren dabei unterschiedliche Ansätze, Zielmarken in Bildern zu segmentieren.

Planare Zielmarken besitzen in der Regel einen spezifischen Aufbau, der aus hellen und dunklen Bereichen besteht. Sie weisen zudem häufig retro-reflektierende Oberflächeneigenschaften auf (BURGESS et al. 2011). Infolgedessen werden hohe Kontraste erzielt, wodurch die hellen Bereiche in Bildern besser vom Hintergrund abgegrenzt werden. Eine einfache Herangehensweise, um diese zu segmentieren, stellt das Schwellwertverfahren dar. Dabei wird ein bestimmter Intensitätswert als Schwelle festgelegt. Alle Pixel mit einer Intensität über diesem Schwellwert werden als einer Marke zugehörig interpretiert. Die mathematischen Grundlagen dazu und die Darstellung eines beispielhaften Histogramms sind in Abschnitt 2.3.2 zu finden. Daraus lässt sich ein Binärbild ableiten, in dem Pixel potenzieller Marken den Wert „weiß“ (z. B. $I=255$) erhalten. Alle anderen Pixel werden dem Hintergrund zugeschrieben und sind somit „schwarz“ ($I=0$). Infolgedessen liegen die Zielmarken in Form von hellen Regionen vom Hintergrund getrennt vor. Durch weitere Bildverarbeitungsschritte können anschließend Kanten oder Referenzpunkte pixel- oder subpixelgenau extrahiert werden (vgl. Abschnitt 2.3.3). ANDZIULIS et al. (2015) beschreiben das schwellwertbasierte Vorgehen zur Detektion von schwarz-weißen Zielmarken und weisen dabei auf die Einfachheit und Effektivität dieser Methode hin.

Bei komplexeren Bildern besteht die Herausforderung im Festlegen eines geeigneten Schwellwertes (LUHMANN et al. 2019, S. 441). SHORTIS und SEAGER (2014) greifen zur Segmentierung von Marken-Kandidaten auf globale Schwellwerte zurück, die auf das gesamte Bild angewendet werden. Dabei wird auf Basis eines Hi-

stogramms ein entsprechender Schwellwert durch den Anwendenden bestimmt. Ein etabliertes Verfahren zur automatisierten Schwellwertermittlung stellt die Methode nach OTSU (1979) dar. Dazu wird ein Entscheidungswert basierend auf einer Histogramm-Analyse abgeleitet, indem eine maximale Differenzierung von zwei oder mehr Klassen in der Häufigkeitsverteilung vorgenommen wird. Beispiele einer Zielmarkendetektion basierend auf dem Schwellwertverfahren stellen Marken des ARToolKit dar (FIALA 2010; KATO und BILLINGHURST 1999). Als Schwierigkeit dieser Detektionsmethode ist das Bestimmen eines geeigneten Schwellwertes unter unkontrollierten Lichtbedingungen zu nennen (FIALA 2010). Auch CLAUS und FITZGIBBON (2004) verweisen auf die Herausforderung von Belichtungsänderungen unter realen Aufnahmebedingungen. Dadurch wird die Einsetzbarkeit global festgelegter Schwellwerte zur Segmentierung eingeschränkt.

Um komplexeren Belichtungssituationen bei der Zielmarkendetektion zu begegnen, werden auch lokale adaptive Schwellwertverfahren angewendet (ANDZIULIS et al. 2015; CLAUS und FITZGIBBON 2004). Dabei werden für definierte Regionen innerhalb eines Bildes individuelle Schwellwerte ermittelt. So verwenden beispielsweise WIJENAYAKE et al. (2014) eine adaptive Schwellwertbestimmung zur Zielmarkendetektion. Diese basiert auf einer gewichteten Summe der lokalen Intensitätswerte unter Verwendung eines Gauß-Kernels im Vergleich zu den Werten des Originalbildes. Hierbei wird für jeden Pixel innerhalb einer festgelegten Nachbarschaft eine entsprechende individuelle Schwellwertoperation durchgeführt. GARRIDO-JURADO et al. (2014) verwenden ebenfalls einen lokal adaptiven Ansatz zur Schwellwertbestimmung, da sich dieser durch ein robusteres Verhalten bei variierenden Lichtbedingungen auszeichnet (GARRIDO-JURADO et al. 2014).

Eine ebenfalls etablierte Methode zur Segmentierung von Zielmarken basiert auf den Intensitätsgradienten. Dabei geht es um das Erkennen von Kanten, die den Übergang von hellen zu dunklen Bereichen kennzeichnen. Ein verallgemeinertes Vorgehen zum Detektieren von Kanten in Bildern stellt CANNY (1986) vor. Dieses basiert im Gegensatz zu Schwellwertverfahren nicht direkt auf den absoluten Intensitätswerten eines Bildes sondern auf dessen Gradienten. Hierfür sind ebenfalls geeignete Gradientenschwellwerte vorab festzulegen. Die mathematischen Grundlagen dazu sowie eine beispielhafte Illustration sind in Abschnitt 2.3.2 zu finden. Im Bereich der Markendetektion verwenden NAIMARK und FOXLIN (2002) einen kantenbasierten Ansatz zur Extraktion von kreisförmigen, codierten Marken. FIALA (2005) und FIALA (2010) nutzen ebenfalls eine Kantendetektionsmethode zur Konturbestimmung von quadratischen, codierten Zielmarken. Bei komplexeren Lichtbedingungen können kantenbasierte Verfahren eine gute Alternative zu Schwellwertverfahren mit global ermitteltem Schwellwert darstellen (FIALA 2010; NAIMARK und FOXLIN 2002).

Um bei der Segmentierung von Zielmarken neben der Hell-Dunkel-Gestaltung zusätzliche Bildinformationen zu nutzen, können farbige Zielmarken eingesetzt werden. Dabei wird neben dem Kontrast auch die Farbinformation verwendet. So schlagen CRONK und FRASER (2006) und DEGOL et al. (2017) ein rotes bzw.

ein rot-grünes Zielmarkensystem vor. Sie wählen dabei ein schwellwertbasiertes Vorgehen, indem sie auf den entsprechenden Farbkanal wechseln. Als vorteilhaft sind geringere Falsch-Positiv-Raten während des Detektionsprozesses zu nennen, woraus eine Erhöhung der Detektionsgeschwindigkeit resultiert (DE-GOL et al. 2017). Jedoch erfordert dieses Vorgehen Sensoren mit verschiedenen Farbkanälen. Manche optische Systeme greifen gezielt auf Farbfilter (Bandpassfilter) zurück, um Störlicht aus gewissen Wellenlängenbereichen zu unterdrücken (LUHMANN et al. 2019, S. 234).

Da in realen Anwendungen in der Regel keine idealen Aufnahmebedingungen vorzufinden sind, werden für Zielmarkensysteme eigens abgestimmte Detektionsroutinen entwickelt und verwendet (MONDÉJAR-GUERRA et al. 2018). Diese greifen dabei meist auf Varianten und Modifikationen der oben vorgestellten Methoden und Ansätze zurück. Als Beispiel wird an dieser Stelle das Vorgehen zur Detektion des schwarz-weißen Markensystems von SHORTIS und SEAGER (2014) skizziert: Es werden basierend auf einem Bildhistogramm zunächst mehrere globale Schwellwerte festgelegt. Nacheinander werden diese auf ein Bild angewendet, um Kandidaten der Zielmarken zu detektieren. Durch vorab festgelegte Intervalle bezüglich der Anzahl an zusammenhängenden Pixeln erfolgt die Filterung von falsch detektierten Objekten, die dem Bildhintergrund zuzuordnen sind. Anschließend werden lokale Bildausschnitte der bestimmten Kandidaten gebildet. Es erfolgt eine erneute Durchführung einer Schwellwertoperation, wobei diesmal ein lokaler Schwellwert herangezogen wird. Im Anschluss finden zusätzliche Tests statt, die auf die Messung geometrischer Eigenschaften einer kreisförmigen Marke sowie deren Größe abzielen, um eine korrekte Detektion sicherzustellen (SHORTIS und SEAGER 2014).

Das beschriebene Vorgehen basiert auf vorhandenem Wissen über den vorliegenden Detektionsprozess und zeigt die konstruierte Komposition verschiedener Bildverarbeitungsroutinen. Die Herausforderung solcher Ansätze besteht dabei im Allgemeinen in der Formulierung von Entscheidungsregeln, die die zu detektierenden Zielmarken in Bildern ausreichend beschreiben (CHENG und HAN 2016). Die Entwicklung geeigneter Detektionsansätze ist somit zeitaufwendig und erfordert ein umfassendes Wissen über die angestrebte Anwendung sowie die vorherrschenden Bedingungen (CHOU et al. 2015; CLAUS und FITZGIBBON 2004). Daher ist es schwer, einen allgemeingültigen Ansatz zu realisieren, der stets eine zuverlässige Detektion aller Marken gewährleistet (CHOU et al. 2015; CLAUS und FITZGIBBON 2004).

Um den Herausforderungen wie komplexen Lichtbedingungen, Verzerrungen oder Reflexionen bei der Zielmarkendetektion zu begegnen, schlagen CLAUS und FITZGIBBON (2004) und CLAUS und FITZGIBBON (2005) den Einsatz von ML-Methoden vor. Dabei werden Bilddatensätze von aufgenommenen Zielmarken erstellt, um mit diesen mathematische Modelle zu trainieren. Auf Basis von erlernten Bildmerkmalen können anschließend Zielmarken in Bildern detektiert werden. Die Autoren zeigen die Machbarkeit einer intelligenten Detektion für schwarze kreisförmige Zielmarken in unterschiedlichen Innen- und Außen-Szenen und demonstrieren die erhöhte Zuverlässigkeit bei variierenden Licht-

einflüssen sowie verschiedenen Skalierungen gegenüber klassischen, manuell abgestimmten Routinen. Dabei kommt ein zweistufiger Klassifizierer zum Einsatz, der zum einen auf einer Entscheidungsregel und zum anderen auf einem Nächster-Nachbar-Verfahren basiert.

Auch im Bereich der Detektion von QR-Codes finden Methoden des ML Anwendung. Diesbezüglich stellen BELUSSI und HIRATA (2011) einen Ansatz vor, der das charakteristische Erkennungsmuster, das aus drei rechtwinklig angeordneten schwarzen Quadraten in den Ecken eines QR-Codes besteht, zuverlässig erkennt. Dafür wurde ein Detektionsverfahren nach der Methode von VIOLA und JONES (2001, 2004) verwendet (vgl. Abschnitt 2.3.1), welche Haar-ähnliche Merkmale mit einem Kaskaden-Klassifikator verwendet. Dieses Vorgehen wurde ursprünglich zur Gesichtsdetektion entwickelt und erlaubt die Integration von domänenspezifischem Wissen auf Basis der Gestalt der eingesetzten Merkmale (VIOLA und JONES 2001). Eine Übertragbarkeit der Viola-Jones-Methode auf die Detektion von Zielmarken für optische Messanwendungen wurde bisher nicht gezeigt. Darüber hinaus existieren weitere Ansätze zur QR-Code-Detektion wie beispielsweise angepasste CNNs (engl.: *convolutional neural network*) (CHOU et al. 2015) oder die Erkennung von BING-Merkmalen (engl.: *binarized normed gradients*) (YUAN et al. 2019).

NAIMARK und FOXLIN (2002) weisen auf die grundsätzlich großen Schwierigkeiten bei der Detektion von Zielmarken als Folge variabler Lichtbedingungen hin. Vorteile gegenüber klassischen Detektionsroutinen versprechen hierbei moderne Methoden aus dem Bereich des ML (CLAUS und FITZGIBBON 2004).

Identifizieren von detektierten Marken

Nach der Detektion stehen zahlreiche extrahierte Kandidaten als mögliche Zielmarken zur Verfügung. Der Identifikationsschritt soll anschließend sicherstellen, dass es sich bei den detektierten Elementen auch um tatsächliche Zielmarken handelt. Nach FIALA (2010) ist bei codierten Marken zusätzlich noch eine Unterscheidung in Verifikation und Identifikation vorzunehmen. Die Verifikation bezieht sich dabei auf die Entscheidung, ob das detektierte Objekt eine Zielmarke ist. Letzteres basiert dann auf der in der Kodierung hinterlegten Information.

Da im Rahmen dieser Arbeit die robuste Detektion von uncodierten Zielmarken im Vordergrund steht, werden im Folgenden Ansätze zur Identifikation vorgestellt, die eine entsprechende Selektion von falsch-positiven Kandidaten ermöglichen.

Die Identifikation findet in der Regel über Vorwissen statt. Fehlerhaft detektierte Kandidaten werden dabei durch Überprüfung bekannter geometrischer Eigenschaften der eingesetzten Zielmarken gefiltert. Dazu werden beispielsweise die Größe der Zielmarke, die Form oder die Rundheit verglichen (CRONK und FRASER 2006). Komplexere Ansätze wenden z. B. Kurven-Anpassung einer Ellipse (vgl. Abschnitt 2.3.3) mit anschließender Fehlerbetrachtung an (DOSIL et al. 2013), beinhalten eine algorithmische Polygon-Annäherung der Konturen

mit Prüfung der resultierenden Topologie (GARRIDO-JURADO et al. 2014) oder umfassen Formfaktoren mit zulässigen Intervallen (AHN 1997). In den Arbeiten von FIALA (2005) und FIALA (2010) wird für die Filterung falscher Kandidaten die Kenntnis über quadratische Zielmarken genutzt, sodass segmentierte Kantenpixel zu geraden Liniensegmenten zusammengefasst werden, die über vier Schnittpunkte ein Viereck bilden. Es können auch Strukturtests durchgeführt werden, wenn Zielmarken einen Aufbau mit charakteristischer Anordnung von Elementen aufweisen, wie beispielsweise im Falle von QR-Codes (BELUSSI und HIRATA 2011).

Zur korrekten Bestimmung von Referenzpunkten ist eine zuverlässige Detektion und Identifikation von Zielmarken erforderlich. Dabei sollen Zielmarken in Bildern robust gefunden werden. Gleichzeitig sollte eine möglichst geringe Anzahl an falsch-positiven Kandidaten bestehen. Daher sind stets auch geeignete Routinen zum Identifizieren notwendig und auf die verwendeten Zielmarken abzustimmen.

3.4.3 Detektion von projizierten Zielmarken

Aufgrund der erzielbaren Kontrasteigenschaften und den damit verbundenen Detektionsvorteilen finden sich zahlreiche physische (retro-reflektierende) Zielmarkensysteme in Anwendungen wie der optischen Messtechnik wieder (BURGESS et al. 2011). Der Einsatz hat jedoch auch Nachteile. Das Anbringen bzw. Entfernen solcher Marken ist zeitintensiv und erfordert manuelle Arbeitsschritte (GANCI und BROWN 2001; PAPPÀ et al. 2003; ÜRÜN et al. 2017; WECKENMANN 2012, S. 232) (vgl. auch Abschnitt 3.2.2). Damit geht ebenfalls ein erhöhter Änderungsaufwand bei nachträglichen Anpassungen wie beispielsweise der Markengröße oder -dichte einher (PAPPÀ et al. 2003). Des Weiteren besteht auch die Gefahr von Beschädigungen bei sensitiven Oberflächen (PAPPÀ et al. 2003).

Abhilfe schaffen hier projizierte Zielmarken. Ein Projektor stellt die entsprechenden Zielmarken auf der Oberfläche eines Objektes berührungslos dar. Analog zu den physischen Zielmarken werden die Marken anschließend mithilfe eines optischen Sensors aufgenommen und in den erfassten Bildern detektiert. Da auch die Erkennung von projizierten Marken zumeist auf Kontrastunterschieden in der entsprechenden Gestaltung basiert, sind die beschriebenen Methoden und Ansätze aus Abschnitt 3.4.2 zur Detektion und Identifikation übertragbar. Als Beispiel lässt sich das Zielmarkensystem von SHORTIS und SEAGER (2014) aufführen. Obwohl dieses überwiegend in Experimenten mit physischen Marken und in Kombination mit klassischen Detektions- und Identifikationsroutinen getestet wurde, zeigt eine Untersuchung dessen Anwendbarkeit auch auf Marken, die in projizierter Form bereitgestellt wurden.

Anwendungen von projizierten Zielmarken im Bereich der optischen Messtechnik umfassen dabei die räumliche Rekonstruktion von einzelnen Oberflächenpunkten. JONES und PAPPÀ (2002) und PAPPÀ et al. (2003) nutzen ein gleichmäßiges Punkte-Muster zur Oberflächenrekonstruktion von Bauteilen aus der Luft- und

Raumfahrtindustrie wie z. B. dünne Membranstrukturen für statische und dynamische Messanwendungen. Im Hinblick auf die Bereitstellung der projizierten Punkte-Muster weisen PAPPA et al. (2003) auf die Flexibilität von Digital-Projektoren gegenüber Dia-Projektoren hin. Die digitale Anbindung erlaube dabei eine computergestützte Anpassung des Punkte-Musters in der Zielmarkengröße, -dichte und Position. FENG et al. (2012) verwenden ebenfalls projizierte, uncodierte Punkte in repetitiver Anordnung, um die Oberfläche einer flexiblen Antenne zu rekonstruieren. ÜRÜN et al. (2017) thematisieren konzeptionell die Verwendung von Projektoren zur Karosserievermessung in der Automobilindustrie. Das beschriebene Konzept sieht dabei projizierte anstelle von angebrachten Zielmarken für die Erstellung von einzelnen globalen Referenzpunkten vor, die anschließend zur genauen Ausrichtung von flächenhaft erfassten Punktwolken herangezogen werden könnten (siehe auch Abschnitt 3.2.2). ULRICH (2018) nutzt vollflächig projizierte Texturen bestehend aus verzerrten Vierecken auf Bauteiloberflächen zur Feinregistrierung von Teilansichten für roboterbasierte optische Messsysteme (vgl. Abschnitt 3.3.3). Darüber hinaus werden projizierte Zielmarken auch zur Deformationsbestimmung von Kranträgern eingesetzt (CHEN et al. 2020). CHEN et al. (2020) projizieren dazu ein aus codierten sowie uncodierten Marken aufgebautes, statisches Muster.

Die Detektion erfolgt analog zu dem Vorgehen bei physischen Zielmarken (vgl. Abschnitt 3.4.2). Dazu werden beispielsweise schwellwertbasierte oder kantensensitivere Verfahren mit nachfolgenden Identifikationsschritten zur Filterung fehlerhafter Marken-Kandidaten eingesetzt. Jedoch erschweren sich die bereits anspruchsvollen Bedingungen bei der Detektion von Zielmarken zusätzlich infolge der projizierten Darstellungsweise. Zum einen weisen projizierte Marken meist einen geringeren Kontrast auf. Dies ist unter anderem bedingt durch die technische Leistungsfähigkeit von Digital-Projektoren (JONES und PAPPA 2002; ÜRÜN et al. 2017). Zum anderen entstehen Kontrastvariationen aufgrund der relativen Lage des Projektors zur Bauteiloberfläche bzw. zum optischen Sensor (JONES und PAPPA 2002; PAPPA et al. 2003). Das kann sich in einem abermals reduzierten Kontrast oder in auftretenden Reflexionen infolge einer Überbelichtung widerspiegeln (JONES und PAPPA 2002). Es ist zu beachten, dass Projektoren prinzipbedingt starke Lichtquellen darstellen. GANCI und BROWN (2001) führen als wichtige Faktoren zur Darstellung von Projektionen auf Oberflächen deren Farbe, Oberflächenbehandlung und Krümmung auf. Die unvorteilhafte Interaktion von projizierten Zielmarken mit geometrischen Objektmerkmalen wie Kanten oder Löcher wird in der Arbeit von JONES und PAPPA (2002) thematisiert. Für Digital-Projektoren können darüber hinaus auch Bildartefakte wie Pixelierung aufgrund der begrenzten Auflösung entstehen (PAPPA et al. 2003). Die genannten Einflüsse erschweren zusätzlich die Detektion von projizierten Zielmarken. Diesem Umstand begegnen PAPPA et al. (2003) unter anderem durch eine manuelle Auswahl von Schwellwerten, FENG et al. (2012) durch die Kontrolle des Umgebungslichts und CHEN et al. (2020) durch die Konstruktion aufwändiger Routinen zur Selektion der falsch detektierten Marken-Kandidaten.

Trotz erhöhter Anforderungen an die Detektion von projizierten Zielmarken orientieren sich bestehende Methoden im Allgemeinen an Ansätzen, die sich in Bezug auf physische Zielmarken etabliert haben.

3.5 Bereitstellung von Projektionen

Da ausgehend von der Zielsetzung moderne Projektionssysteme beim Registrierungsprozess von Punktwolken unterstützen sollen, findet hier zunächst eine kurze Einführung in Digital-Projektoren statt (siehe Abschnitt 3.5.1). Anschließend werden elektronische Möglichkeiten zur Adaption von Projektionen aufgezeigt und entsprechende Anwendungen vorgestellt (vgl. Abschnitt 3.5.2).

3.5.1 Allgemeines

Aufgrund der technologischen Fortschritte im Bereich der Elektromechanik sowie von optischen Komponenten finden Digital-Projektoren zunehmend Anwendung und haben sich als Massenprodukt am Markt etabliert (BIMBER 2007, S. 1). Dies geht neben der gestiegenen technischen Leistungsfähigkeit (BIMBER 2007, S. 1; BRENNESHOLTZ und STUPP 2008, S. 2; VANDENBERGHE 2016) auch auf die gesunkenen Anschaffungskosten, die Verfügbarkeit und den großen Wiedergabebereich zurück (BIMBER 2007, S. 1; BRENNESHOLTZ und STUPP 2008, S. 2). Vor allem bei Wiedergabebereichen mit einer Diagonale von 1,5 m oder größer gelten Projektionssysteme als die präferierte Wahl (VANDENBERGHE 2016).

Ferner zeichnen sich Digital-Projektoren durch ihre kontaktlose und hochauflösende Visualisierung von Informationen in Verbindung mit einer computergestützten und damit flexiblen Darstellungsweise aus. Dies birgt großes Potenzial für industrielle Anwendungen, beispielsweise im Bereich der Fertigungsmesstechnik. Die geometrische Qualitätsprüfung von Bauteilen erfordert ein genaues Ausrichten mehrerer Teilansichten zu einer Gesamtaufnahme. Dies kann beispielsweise mithilfe von projizierten Texturen erfolgen (siehe Abschnitt 3.3). Der Einsatz von modernen Digital-Projektoren eröffnet hier neue Möglichkeiten, bestehende Ansätze weiterzuentwickeln oder neue Anwendungskonzepte zu erforschen.

In diesem Zusammenhang wird von der Fähigkeit einer computergestützten Anbindung in Verbindung mit einer räumlichen Integration von Digital-Projektoren durch deren Modellierung bisher nur vereinzelt Gebrauch gemacht, wodurch eine flexible Anpassung der darzustellenden Informationen auf die Umgebung möglich wird. Dies umfasst insbesondere die Berücksichtigung der räumlichen Positionierung und Gestalt der darstellenden Oberfläche. Als vorteilhaft ist hierbei vor allem die aktive Beeinflussung von Darstellungseigenschaften zu sehen. Im Folgenden werden daher Ansätze vorgestellt, die auf eine digitale Adaption des

Wiedergabebereichs abzielen. Die mathematischen Grundlagen zur Modellierung von Projektoren sind Abschnitt 2.1.1 zu entnehmen.

3.5.2 Ansätze zur Adaption von Projektionen

Die computergestützte Anbindung sowie die Kenntnis über den räumlichen Standort, die Abbildungseigenschaften des Systems und die Ausprägung der darstellenden Oberfläche erlauben eine gezielte Generierung von wiederzugebenden Bildern bzw. Projektionen. Dabei ist zum einen die Verzerrung des Wiedergabebereichs zu berücksichtigen (vgl. Abschnitt 2.1.1), die sich aus der relativen Lage von Projektor zu Oberfläche ergibt. Zum anderen ist der Wiedergabebereich auf die darstellende Oberfläche abzustimmen. Dies gilt insbesondere dann, wenn keine durchgehend ebene Oberfläche zur Darstellung vorliegt. Im Folgenden werden ausgewählte Ansätze zur Bildkorrektur vorgestellt. Dabei wird von einer konstanten Position des Betrachters ausgegangen. Eine photometrische Kompensation wird im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet.

Anpassung an räumliche Gegebenheiten

In der Regel ist die darstellende Oberfläche eine durchgehende, ebene Fläche. Das ist jedoch nicht immer der Fall, wie bei der Wiedergabe von Projektionen auf Bauteilen. Für nicht-triviale, also komplexere, Oberflächen ist daher eine Zuordnung von Projektor-Pixel zu einem Raumpunkt erforderlich, um geeignete Anpassungen der Projektionen vornehmen zu können.

Eine Herangehensweise besteht in dem Generieren von Projektionsbildern im Sinne eines Trial-and-Error-Vorgehens. Dabei erstellt die anwendende Person entsprechende Bilder und kontrolliert und korrigiert visuell die sich ergebenden Darstellungseigenschaften. Für einfache Visualisierungsaufgaben ist dieses interaktive und iterative Vorgehen als praktikabel einzustufen. Bei größeren Bildern, die an komplexe Oberflächen anzupassen sind, stößt das Verfahren schnell an seine Grenzen und erlaubt keine Automatisierung.

Eine andere Möglichkeit, insbesondere für nicht-triviale Oberflächen, besteht darin, die intrinsischen und extrinsischen Parameter eines Projektors durch Kalibrierung zu bestimmen und in eine perspektivische Modellierung (vgl. Abschnitt 2.1.1) zu integrieren (RASKAR et al. 1999; BIMBER 2007, S. 13). FALCAO et al. (2008) und RASKAR et al. (1999) greifen dazu beispielsweise auf zusätzliche Kamerasysteme zurück, um die notwendigen Parameter zu ermitteln. Allerdings muss auch die zugrunde liegende Oberfläche bekannt sein. Als mögliche Anwendungsbeispiele einer geometrischen Bildkorrektur zur Projektion auf verschiedene räumliche Gegebenheiten sei die verbesserte Darstellung auf einem Mauerwerk, auf gewellten Vorhängen oder bei der Projektion in eine Raumecke erwähnt (BIMBER et al. 2005). Für einen weiterführenden Überblick über die Modellierung und Kalibrierung von Digital-Projektoren sowie Korrekturansätze

zur Projektion auf komplexe Oberflächen sei an dieser Stelle auf BIMBER (2007) verwiesen.

Zur automatisierten Anpassung von Projektionen an räumliche Gegebenheiten ist in der Regel ein Zusammenhang zwischen Projektor-Pixeln und Raumpunkten herzustellen. Dabei muss auch die darstellende Oberfläche in digitaler Form vorliegen, beispielsweise in Form eines CAD-Modells. Kamerabasierte Ansätze bieten hier eine Möglichkeit, steigern aber zugleich die Komplexität. Zudem erfordert die Umsetzung ein hohes Maß an Expertise und Implementierungsfähigkeiten.

Anwendungen

Die klassische Verwendung von Digital-Projektoren beschränkt sich häufig auf die Darstellung von visuellen Informationen auf durchgehenden ebenen Oberflächen. Beispielszenarien stellen unter anderem Geschäftspräsentationen in Konferenzräumen, Inhaltsvermittlung zu schulischen und akademischen Ausbildungszwecken oder Anwendungen im Bereich von Heimunterhaltungssystemen dar (BIMBER 2007, S. 1; BRENNESHOLTZ und STUPP 2008, S. 1–11; VANDENBERGHE 2016). Dabei ist eine Perspektivkorrektur vorzunehmen, um den Verzerrungseffekt bei einer Schrägprojektion zu kompensieren.

Darüber hinaus kann die Darstellung von Inhalten in Abstimmung mit räumlichen Gegebenheiten stattfinden. Dabei wird berücksichtigt, wo sich die darstellenden Oberflächen im Arbeitsraum des Projektors befinden und welche Beschaffenheit diese aufweisen. Die darzustellenden Inhalte werden dann entsprechend dieser Bedingungen angepasst. Beispiele lassen sich unter anderem für handgehaltene Projektionssysteme im Kontext von interaktiven AR-Anwendungen (engl.: *Augmented Reality (AR)*) (BEARDSLEY et al. 2005), in der Medizin zur Unterstützung bei Operationen (GAVAGHAN et al. 2011; KOBLE et al. 2010) oder in Form von Kunstinstallationen an Häuserfassaden (EKIM 2011; REINHARDT und SIECK 2014) finden. Zudem sind auch Anwendungen in der Produktionstechnik vorhanden. Neben kalibrierten Projektoren in Streifenlicht-Sensoren zur Digitalisierung von Bauteilen (siehe Abschnitt 2.1.1) werden Digital-Projektoren auch als Werkerassistenzsysteme eingesetzt. Dabei kommen adaptierte Projektionen beispielsweise zur Anleitung und Einhaltung von manuellen Montageabläufen, beim Zusammenbau von Visitenkartenhaltern, zum Einsatz (RODRIGUEZ et al. 2015). Ebenso bestehen Anwendungen bei der visuellen Unterstützung zur präzisen Platzierung von Schweißpunkten (DOSHI et al. 2017) oder in Form einer Falschfarbendarstellung auf Bauteilen zur Visualisierung von Fertigungsabweichungen in der Qualitätsprüfung (LUHMANN et al. 2019, S. 614).

3.6 Fazit und Ableitung des Handlungsbedarfs

Die genaue, effiziente und flexible Digitalisierung von gefertigten Bauteilen gewinnt für die geometrische Qualitätsprüfung in produzierenden Unternehmen zunehmend an Bedeutung. In den letzten Jahren haben sich insbesondere kontaktlose, optische Verfahren etabliert. 3D-Sensoren erstellen dabei eine punktbasierte Repräsentation von Bauteiloberflächen, die zur Prüfung von Qualitätsmerkmalen herangezogen werden. Da das Messvolumen in seinen Dimensionen technisch begrenzt ist, wird ein Zusammenführen von mehreren Teilansichten zu einer Gesamtaufnahme notwendig.

Vor allem roboterbasierte optische Messsysteme besitzen hier großes Potenzial, da sie die positiven Eigenschaften von 3D-Sensoren und Industrierobotern vereinen. Jedoch ist dabei die hohe Ungenauigkeit der Roboterkinematik zur Ausrichtung von Teilansichten zu berücksichtigen (vgl. Abschnitt 2.1.1). Für den betrachteten Anwendungsrahmen dieser Arbeit muss daher die Kinematik von Industrierobotern konzeptionell aus der Messkette entfernt oder deren Abweichungen zuverlässig kompensiert werden.

Um dieses Defizit zu beheben, greifen gängige Verfahren zur Ausrichtung von Teilansichten (Punktwolken) bisher in der Regel auf externe Messsystemtechnik wie Lasertracker oder zusätzliche photogrammetrische Methoden in Verbindung mit physischen Zielmarken zurück. Sie erfordern signifikante Kompromisse hinsichtlich hoher Investitionskosten, Systemkomplexität, mehrstufiger Aufnahmeprozesse sowie umfangreicher manueller und zeitlicher Aufwände (vgl. Abschnitt 3.2.2), woraus sich der Handlungsbedarf dieser Arbeit ableitet. Daher soll ein neues Verfahren zur genauen Ausrichtung und Verkettung von Punktwolken für roboterbasierte optische Messsysteme erarbeitet und untersucht werden.

Basierend auf dem Stand des Wissens erweisen sich Feinregistrierungsalgorithmen als vielversprechend. Aufgrund der hohen Messgenauigkeit aktueller 3D-Sensoren sind solche Algorithmen dazu in der Lage, die verbleibenden Registrierungsabweichungen von Punktwolken zu kompensieren. Diese resultieren beispielsweise aus der Grobausrichtung auf Basis der Roboterkinematik. Ein Nachteil ist hier jedoch das erforderliche Maß an Expertise, da bestehende Algorithmen anwendungsspezifisch auszuwählen, zu implementieren und zu parametrisieren sind. Ebenso ist auch die hohe Abhängigkeit solcher Algorithmen von der zugrunde liegenden Oberflächenausprägung zu nennen.

Infolgedessen ist ein Verkettungsansatz von Punktwolken anzustreben, der auf dem „Standard“-ICP nach BESL und MCKAY (1992) aufbaut. Dieser Algorithmus erlaubt eine genaue Ausrichtung, ist weit verfügbar und verspricht eine einfache Übertragbarkeit. Gleichzeitig müssen jedoch auch geeignete Registrierungshilfen für den ICP im Hinblick auf herausfordernde Oberflächenausprägungen konzeptionell vorgesehen werden, um ein breites Bauteilspektrum zu adressieren.

Besonders geeignet sind diesbezüglich Projektionen als Registrierungshilfen. Sie erlauben eine kontaktlose und kostengünstige Bereitstellung von Referenzele-

menten auf Bauteiloberflächen (ULRICH 2018, S. 113). Der bisherige Stand der Forschung adressiert dabei überwiegend ebene und merkmalsarme Oberflächen. Ebenso wurde die Anwendung für eine Systemtechnik auf industriellem Niveau bisher noch nicht gezeigt. Für Bauteile des betrachteten Anwendungsrahmens der vorliegenden Arbeit sind jedoch meist geometrische Merkmale, wie Krümmungen, Kanten oder Löcher, in den Oberflächen vorhanden. Daher ist mit einer Verminderung der Darstellungseigenschaften von Projektionen zu rechnen (vgl. Abschnitt 3.4.3). Dadurch wird auch die Funktionalität als Registrierungshilfe beeinträchtigt.

Der zentrale Forschungsbedarf besteht darin, die Interaktion der bereitgestellten projizierten Texturen mit der zugrunde liegenden geometrischen Oberflächenprägung von Bauteilen zu berücksichtigen. In diesem Zusammenhang wurde eine vorausgehende computergestützte Analyse von Bauteiloberflächen bisher nicht betrachtet und sollte Gegenstand weiterführender Forschungsansätze sein. Durch die Bereitstellung von modifizierten Projektionen soll stets ein positiver Einfluss der Registrierungshilfe auf das Konvergenzverhalten des ICP sichergestellt werden.

In der Folge ergeben sich basierend auf dem Stand des Wissens weitere Forschungsbedarfe:

Zur Bereitstellung von Projektionen verspricht der Einsatz kommerzieller Digital-Projektoren großes Potenzial, da diese eine computergestützte Anbindung und Integration erlauben und somit adaptierte Projektionen flexibel darstellen können. Hierzu existieren aktuell jedoch keine Vorschläge, die eine einfache und praxisnahe Integration von Digital-Projektoren in die Umgebung von roboterbasierten optischen Messsystemen für die Fertigungsmesstechnik vorsehen.

Im Hinblick auf die Berücksichtigung von Intensitätsinformationen im Registrierungsprozess des ICP-Algorithmus wird ein Vorgehen in Anlehnung an ULRICH (2018) als vielversprechend erachtet. Da der ICP keine Intensitätsinformationen zur Registrierung vorsieht, werden diese zunächst umgewandelt, indem künstliche 3D-Punkte an entsprechenden Stellen in den Punktwolken hinzugefügt werden. Dafür ist ein neues Vorgehen zur Punktwolken-Augmentierung in Abhängigkeit der adaptierten Projektionen auszulegen und zu evaluieren, um die unterstützende Funktion für den Registrierungsprozess zu gewährleisten.

Ferner sind auch neue Vorgehensweisen zur Detektion von projizierten Referenzelementen zu untersuchen. Detektionsansätze, die auf die Darstellungsweise von Digital-Projektoren und auf die resultierenden komplexen Lichtbedingungen abgestimmt wurden, sind bisher nicht vorhanden oder nur unzureichend behandelt. Um dieser Herausforderung zu begegnen, könnten ML-basierte Methoden Abhilfe schaffen. Daher ist deren Einsatzfähigkeit und Nutzen für die Detektion der projizierten Referenzelemente zu prüfen.

Zusammenfassend ergibt sich der Bedarf, ein neues Konzept zum Registrieren von Punktwolken unter Verwendung von adaptierten Projektionen und mithilfe des ICP-Algorithmus für roboterbasierte optische Messsysteme zu untersuchen.

Kapitel 4

Herausforderungen, Lösungskonzept und Vorgehensweise

4.1 Herausforderungen beim Einsatz von Projektionen

Basierend auf dem Fazit und dem daraus resultierenden Handlungsbedarf aus Kapitel 3 ergibt sich die Forderung, ein neues Konzept zur Ausrichtung von Teilansichten für industriell eingesetzte roboterbasierte optische Messsysteme zu erforschen. Der Fokus liegt dabei auf dem Einsatz adaptierter Projektionen und der Feinregistrierung von Punktwolken.

Dabei gilt es zunächst, die Herausforderungen, die sich aus einem Einsatz von Projektionen ergeben, zu verstehen. Aus der Literatur bekannte Herausforderungen wurden in Abschnitt 3.4.3 aufgeführt und im abgeleiteten Handlungsbedarf thematisiert (vgl. Abschnitt 3.6). Zur Veranschaulichung der vorliegenden Ausgangssituation werden diese anhand realer Beobachtungen nachfolgend beschrieben und verdeutlicht.

Die Verwendung von Projektoren erlaubt die Modifikation der Textur von Bauteiloberflächen, die als Registrierungshilfe eingesetzt werden kann (vgl. Kapitel 3). Der Einsatz von unmodifizierten Projektionen führt dabei allerdings zu großen Herausforderungen bei der Detektion der projizierten Referenzelemente in den erfassten Bilddaten. Diese gehen im Wesentlichen auf

- die komplexeren Aufnahmebedingungen aufgrund einer zusätzlichen Lichtquelle (Projektionssystem) sowie
- die Interaktion der Projektionen mit den zugrunde liegenden geometrischen Oberflächenmerkmalen zurück.

Um die Folgen der genannten Faktoren beispielhaft zu demonstrieren, zeigt Abb. 4.1 eine vollflächige, statische Projektion, die mithilfe eines Digital-Projektors und ohne Berücksichtigung der darzustellenden Oberfläche auf ein typisches Karosserieanbauteil der Automobilindustrie appliziert wird. Das Projektionsbild

besteht aus einem repetitiven Muster aus uncodierten Zielmarken in quadratischer Form. Diese uncodierten Zielmarken werden im Folgenden auch als *Projektionsprimitive* bezeichnet. Das Bauteil weist dabei eine erhöhte Anzahl an Oberflächenmerkmalen auf.

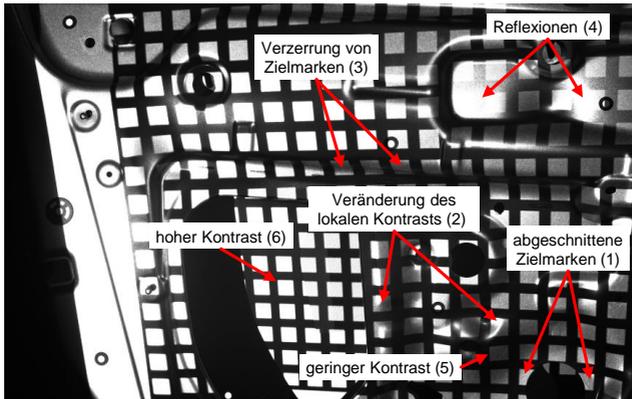


Abbildung 4.1: Herausforderungen bei der Verwendung von vollflächig applizierten Referenzprojektionen auf der Innenseite einer Automobiltür und industrieller Sensorik (angelehnt an BAUER, HECKLER et al. 2021)

In Abb. 4.1 sind dabei verschiedene Auswirkungen auf die Darstellungsqualität von Projektionsprimitiven zu beobachten. Insbesondere wird die Interaktion der Projektion mit der Bauteiloberfläche deutlich. Sie tritt beispielsweise in Form von abgeschnittenen Zielmarken (1), lokalen Kontraständerungen an gekrümmten Regionen (2) oder ausgeprägten Verzerrungen von Projektionsprimitiven (3) auf. Darüber hinaus werden Kontrast und Verzerrung auch durch die relative Lage des Projektors zum Bauteil und der Lage des optischen Sensors zur Bauteiloberfläche beeinflusst (vgl. Abschnitt 3.4.3). Bei unvorteilhafter Posenwahl von Projektor, Bauteil und Sensor können zudem flächenhafte Überstrahlungen (Reflexionen) (4) auftreten. Des Weiteren weisen industrielle Sensoren aufgrund der Sichtfeldgröße und der meist inhomogenen Lichtverhältnisse in der Umgebung zusätzlich überlagerte Kontrastschwankungen auf, siehe dazu (5) bzw. (6) in Abb. 4.1. Ferner kann die limitierte Auflösung von Digital-Projektoren bei unzureichender Belichtungsdauer auch zu Pixelierungsartefakten führen (in Abb. 4.1 nicht dargestellt) (vgl. Abschnitt 3.4.3).

Aufgrund der genannten Auswirkungen ergaben sich in experimentellen Vorstudien signifikante Herausforderungen, besonders in der Detektion der projizierten Referenzelemente. Dies wirkte sich auch auf die Registrierungsqualität von Punktwolken aus.

4.2 Lösungskonzept basierend auf bereichsspezifischen Projektionen und virtuellen Strukturen

Um eine Genauigkeitssteigerung beim Verketteten von Punktwolken für roboterbasierte optische Messsysteme zu erreichen, müssen die dargestellten Herausforderungen aus Abschnitt 4.1 in geeigneter Weise berücksichtigt werden. In der Literatur wurde die zugrunde liegende Oberflächenausprägung bei der Bereitstellung von Projektionen als Registrierungshilfe für den ICP-Algorithmus bisher nicht betrachtet (vgl. Abschnitt 3.6).

Das abgeleitete Lösungskonzept sieht daher zur genauen Registrierung von Punktwolken sogenannte „bereichsspezifische Projektionen“ und „virtuelle Strukturen“ vor. Die Forschungsidee sowie deren Integration in das Lösungskonzept für roboterbasierte optische Messsysteme werden im Folgenden erläutert. Anschließend wird auf den Betrachtungsrahmen dieser Arbeit eingegangen sowie festgelegte Anforderungen und getroffene Annahmen dargelegt.

Bereichsspezifische Projektionen ermöglichen eine gezielte räumliche Wiedergabe von Projektionsprimitiven (projizierte uncodierte Zielmarken). Da an ebenen Flächen für gewöhnlich bessere Darstellungseigenschaften von Projektionen erzielbar sind, werden im Rahmen dieser Arbeit ebene Bauteilbereiche als darstellende Oberflächen proaktiv bevorzugt. Dafür werden zunächst geeignete (möglichst ebene) Ausschnitte bzw. Bereiche auf der Bauteiloberfläche identifiziert, um dort anschließend Projektionsprimitive platzieren zu können. Dieses Konzept wird in Abb. 4.2 anhand zwei sich überlagernder Teilansichten veranschaulicht. Während Abb. 4.2b schematisch den Überlagerungsbereich mit unmodifizierten Projektionen zeigt, sind in Abb. 4.2c bereichsspezifische Projektionen dargestellt.



Abbildung 4.2: Illustration des Lösungskonzepts (aus BAUER, MAGAÑA FLORES et al. 2019)

Zur Bestimmung von geeigneten Bauteilbereichen sollen im Vorfeld auf Basis von CAD-Modellen computergestützte Analysen durchgeführt werden. Eine

Bereitstellung von Projektionsprimitiven auf diese Bereiche erfolgt durch die Modellierung von Digital-Projektoren und deren Integration in die Umgebung von roboterbasierten optischen Messsystemen.

Damit die bereichsspezifisch eingebrachten Intensitätsinformationen zur Ausrichtung mittels ICP-Algorithmus herangezogen werden können, wird in Anlehnung an das Vorgehen von ULRICH (2018) eine Punktwolken-Augmentierung durchgeführt (vgl. Abschnitt 3.3.3). Dabei erfolgt ein definiertes (parametrierbares) Einfügen von künstlichen Punkten in die gemessene Punktwolke auf Basis der projizierten Referenzelemente. Für jedes Projektionsprimitiv entsteht so eine charakteristische, räumliche Struktur, die als Unterstützung für den Feinregistrierungsalgorithmus dient. Diese Strukturen werden in Abgrenzung zu Punkten, die einer gemessenen Bauteiloberfläche entstammen, als „virtuelle Strukturen“ bezeichnet. In Abb. 4.3 sind beispielhaft zwei Strukturen dargestellt. Ausgehend von einem quadratischen Projektionsprimitiv können zum Beispiel säulenartige oder würfelartige Strukturen (Abb. 4.3a bzw. Abb. 4.3b) generiert werden.

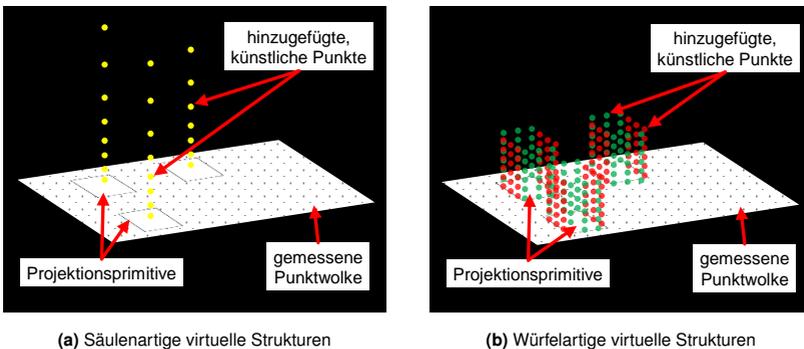


Abbildung 4.3: Schematische Darstellung von exemplarischen virtuellen Strukturen auf Basis von eingebrachten Projektionsprimitiven in einer gemessenen Punktwolke

Die neue Darstellungsweise von Projektionsprimitiven unterscheidet sich damit von unmodifizierten vollflächigen Projektionen und begegnet den beschriebenen Herausforderungen aus Abschnitt 4.1. Sie erlaubt das Antizipieren von vorteilhaften Oberflächenbereichen. In diesem Zusammenhang sollten insbesondere ebene Regionen eines Bauteils berücksichtigt werden. Dort applizierte Projektionsprimitive weisen in ihrer unmittelbaren Umgebung meist nur geringe Kontraständerungen auf. Dadurch ergeben sich verbesserte Detektionsbedingungen. Durch die computergestützte Adaption des Projektionsbildes kann zudem eine vollständige Abbildung von Projektionsprimitiven sichergestellt werden. Darüber hinaus befähigt das Lösungskonzept, Vorwissen in die Gestaltung des Detektions-, Augmentierungs- und Registrierungsprozess einfließen zu lassen. Aufgrund der Darstellung von Projektionsprimitiven auf ebenen Bereichen ist mit einem hohen Maß an Ähnlichkeit zu rechnen. Das begünstigt den Einsatz von intelligenten Methoden der Bildverarbeitung. Gleichzeitig erlauben ebene Bereiche eine stabile Normalenberechnung auf punktbasierten Oberflächen. Bei

der blickrichtungsunabhängigen Augmentierung von Punktwolken entstehen so an den Stellen erfasster Projektionsprimitive virtuelle Strukturen. Da diese ebenfalls auf nahezu ebenen Bereichen generiert werden sollen, ist stets mit einer hohen Ähnlichkeit in ihrer räumlichen Gestalt zu rechnen, wodurch simulative Ansätze zur Erprobung des Registrierungsverhaltens als vielversprechend anzusehen sind. Ferner reduziert sich der Lichteintrag aufgrund der selektiven Projektionsbereiche, wodurch Sekundärreflexionen abgeschwächt und die Aufnahmebedingungen vereinfacht werden.

Der heuristische Bezugsrahmen (vgl. Abschnitt 1.2) wird zu dem Betrachtungsrahmen des vorgestellten Lösungskonzepts konkretisiert und ergibt sich anschließend wie folgt: Es soll der Anwendungsfall eines Offline-Messsystems zur Inspektion von Blechbauteilen in der geometrischen Qualitätsprüfung der Automobilindustrie betrachtet werden, da hier der größte industrielle Nutzen erwartet wird. Zusätzlich findet die Betrachtung eines sequenziellen, paarweisen Verkettens von Punktwolken statt (vgl. Abschnitt 2.2.3), um die Komplexität beherrschbar zu halten.

Die vollständige Rekonstruktion ganzer Objekte steht somit nicht im Vordergrund dieser Arbeit. Das sequenzielle Verkettens, welches im Rahmen der Arbeit von ULRICH (2018) als *3D-Image-Stitching* bezeichnet wurde, erwies sich zur prototypischen Implementierung eines neuen Registrierungskonzepts als sinnvoll. Bei der Integration des Lösungskonzepts in ein roboterbasiertes optisches Messsystem findet zudem die Eingrenzung auf die Realisierung einer Verkettungsstrategie von Punktwolken statt. Die Implementierung einer entsprechenden automatisierten Messposenplanung liegt somit außerhalb des Betrachtungsrahmens.

Des Weiteren ergeben sich Anforderungen an das umzusetzende Lösungskonzept: Die erforderliche Analyse von CAD-Modellen und die Adaption von Projektionen soll automatisiert und vor der Messdatenerfassung durch das Messsystem stattfinden. Dabei ist nach Möglichkeit auf eine Umsetzung zu achten, die konzeptionell dazu in der Lage ist, eine Schnittstelle für eine Messposenplanung bereitzustellen. Zudem ist die projizierte Form der Referenzelemente im Hinblick auf eine geeignete Punktwolken-Augmentierung zu evaluieren. Aus diesem Grund müssen verschiedene Projektionsprimitive und virtuelle Strukturen untersucht werden. Eine Übertragbarkeit auf verschiedene 3D-Sensoren bzw. Punktwolken sollte dabei sichergestellt werden. Eine erweiterte Auflistung von sich ergebenden Anforderungen, z. B. in Bezug auf die Datenverarbeitung, Hardware oder Handlungsempfehlungen, zur technischen Umsetzbarkeit des Lösungskonzepts ist im Anhang von Publikation 5 zu finden.

Darüber hinaus werden zur Umsetzbarkeit des Lösungskonzepts folgende Annahmen getroffen: Eine ausreichende Darstellbarkeit von statischen Projektionsprimitive durch einen Digital-Projektor auf der Oberfläche von Blechbauteilen wird als gegeben angesehen. Dies bezieht sich zum einen auf das Reflexionsverhalten der Oberfläche und zum anderen auf die Bauteilgröße. Ebenso wird für das Lösungskonzept vorausgesetzt, dass eine deutlich höhere Genauigkeit des 3D-Sensors (Submillimeterbereich) im Vergleich zur Posegenauigkeit des

Industrieroboters (Millimeterbereich) vorliegt. Innerhalb des Messvolumens wird zudem von einem isotropen Messfehler¹ des 3D-Sensors ausgegangen. Des Weiteren wird die Größenordnung des zu erwartenden Messfehlers eines Punktes als gleichbleibend angesehen.

4.3 Vorgehensweise und Arbeitsziele

Das Lösungskonzept aus Abschnitt 4.2 wurde ausgehend von der Zielsetzung dieser Arbeit sowie aufbauend auf dem Stand des Wissens und aus empirischen Beobachtungen beim Einsatz von Projektionen abgeleitet. Somit erfolgte die Klärung des Forschungsziels sowie das Schaffen von Verständnis für die zugrunde liegende Situation entsprechend der angewendeten Forschungsmethodik (vgl. Abschnitt 1.2). Nachfolgend wird auf die gewählte Vorgehensweise zur Umsetzung des Lösungskonzepts für roboterbasierte optische Messsysteme eingegangen.

Das abgeleitete Lösungskonzept soll unter der Prämisse eines genauigkeitorientierten Verkettens von Punktwolken in eine entsprechende Strategie für den praktischen Einsatz überführt werden. Dafür müssen anschließend erforderliche Maßnahmen identifiziert, umgesetzt und untersucht werden, um die Ungenauigkeiten aus einer Grobausrichtung zuverlässig zu kompensieren. Der zu kompensierende Fehler wird dabei auf einen einstelligen Millimeterbereich geschätzt, was in etwa einer Grobausrichtung beispielsweise mithilfe eines Industrieroboters entspricht (vgl. Abschnitt 2.1.1). Insgesamt soll anschließend für roboterbasierte optische Messsysteme im Kontext der geometrischen Qualitätsprüfung ein Prüf-ablauf unter Verwendung des Lösungskonzepts entsprechend Abb. 4.4 möglich werden.

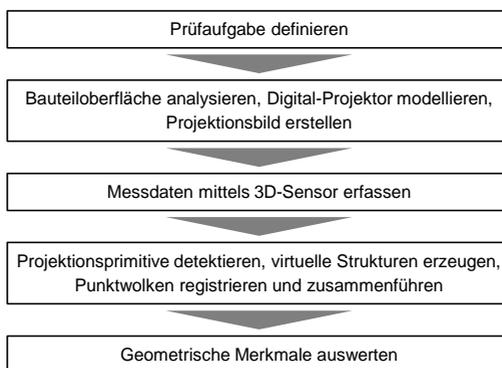


Abbildung 4.4: Prüf-ablauf unter Einsatz der Verkettungsstrategie von Punktwolken zur Evaluation geometrischer Prüfmerkmale

¹Gleiche Messunsicherheit in x-, y- und z-Richtung des Messvolumens

Ein solcher Prüfablauf sieht zunächst das Festlegen einer Prüfaufgabe durch die anwendende Person vor. Um dafür eine entsprechende digitale Repräsentation des Bauteils in Form einer Punktwolke verwenden zu können, sollte diese basierend auf mehreren Teilansichten und unter Verwendung der Verkettungsstrategie erstellt werden. Zunächst ist die Bauteiloberfläche zu analysieren, damit geeignete Bereiche zur Darstellung von Projektionsprimitive identifiziert werden können. Mithilfe eines mathematischen Modells für das Projektionssystem soll anschließend ein entsprechendes Projektionsbild generiert werden. Es zeigt Projektionsprimitive auf den vordefinierten Bauteilbereichen während der Messdatenerfassung durch den 3D-Sensor. Im Anschluss sind basierend auf den erfassten Bilddaten die Projektionsprimitive zu detektieren und die erfassten Punktwolken entsprechend zu augmentieren. Die augmentierten Punktwolken werden zur präzisen Registrierung mittels ICP-Algorithmus verwendet. Abschließend steht so eine Gesamtpunktwolke für die Prüfaufgabe zur Verfügung.

Ausgehend von dem Prüfablauf lassen sich zur Erarbeitung der Verkettungsstrategie thematische Aufgabenfelder identifizieren, deren systematische Bearbeitung und Erkenntnisgewinne den wissenschaftlichen Beitrag dieser Arbeit ausmachen. Die Implementierung bzw. Realisierung der erforderlichen Inhalte in den zu bearbeitenden Aufgabenfelder lässt sich in Form von Arbeitszielen (AZ) beschreiben und gliedert sich in

- ein detailliertes Konzept zur Verwendung von bereichsspezifischen Projektionen und virtuellen Strukturen für roboterbasierte Messsysteme (AZ 1),
- die computergestützte und automatisierte Bereitstellung von bereichsspezifischen Projektionen mithilfe von Digital-Projektoren (AZ 2),
- die Bildverarbeitungskette zur zuverlässigen Extraktion von Referenzpunkten aus bereichsspezifischen Projektionen (AZ 3) und
- die Feinregistrierung mithilfe von geeigneten virtuellen Strukturen (AZ 4).

Da bisher kein vergleichbares Konzept in der Literatur bekannt ist (vgl. Abschnitt 3.6), soll zunächst eine Detaillierung und Konkretisierung des Lösungskonzepts für roboterbasierte optische Messsysteme erfolgen (AZ 1). Daran schließt sich die Bereitstellung entsprechender adaptierter Projektionen an (AZ 2), wofür im Stand des Wissens jedoch kein passender Ansatz identifiziert werden konnte (vgl. Abschnitt 3.5). Werden projizierte Referenzelemente appliziert, müssen sie in den erfassten Bilddaten detektiert werden. Aufgrund der zu erwartenden komplexeren Lichtbedingungen infolge der projizierten Darstellungsweise durch einen Digital-Projektor sollten ML-Methoden eingesetzt werden. Dafür sind entsprechende Methoden zur Detektion von bereichsspezifisch bereitgestellten Projektionsprimitiven zu identifizieren und deren Anwendbarkeit zu evaluieren (AZ 3). Zur Feinregistrierung von Punktwolken mithilfe von virtuellen Strukturen und dem ICP-Algorithmus ist zudem eine Vorgehensweise zu konzipieren, damit geeignete virtuelle Strukturen bzw. deren Parametrierung qualifiziert werden können (AZ 4).

Zur Erreichung der gesetzten Arbeitsziele sollten geeignete Ansätze identifiziert und eine praktische Implementierung realisiert werden. Dabei ist ein systematisches Vorgehen zu wählen und die Leistungsfähigkeit der Teillösungen zu evaluieren. Währenddessen sollen Abhängigkeiten zwischen Aufgabenfeldern aufgezeigt und berücksichtigt werden. Abschließend soll die Integration der erarbeiteten Ansätze in ein technisches Gesamtsystem stattfinden. Ziel ist letztendlich die praktische Validierung der Verkettungsstrategie. Diesbezüglich sollen erste Aussagen hinsichtlich des Potenzials zur Genauigkeitssteigerung durch die realisierte Verkettungsstrategie von Punktwolken möglich werden.

Grundsätzlich ist bei der Umsetzung vorrangig ein genaukeitorientiertes Vorgehen anzustreben. Aufgrund der Leistungsfähigkeit industrieller 3D-Sensoren ist jedoch auch die Menge an digital erfassten Messdaten und deren Verarbeitungsdauer im Blick zu behalten. Ferner wird bei der Umsetzung zur Erreichung der Teilziele ein überwiegender Einsatz von Funktionsbibliotheken aus etablierten Open-Source-Software-Projekten anvisiert. Dies zielt insbesondere auf die Verarbeitung von Bilddaten und Punktwolkendaten ab (vgl. Kapitel 5). Das soll zum einen zu einer guten Software-Qualität beitragen. Zum anderen erlaubt es Anwendenden eine einfachere Übertragbarkeit und Modifikation von Ansätzen.

Die vorliegende Dissertation zielt bei der Umsetzung der Arbeitsziele darauf ab, eine Verkettungsstrategie von Punktwolken für industriell einsetzbare roboter-basierte optische Messsysteme zu erforschen, um eine genaue Digitalisierung von Bauteilen für die geometrische Qualitätsprüfung zu ermöglichen. Daher soll zudem die abschließende Evaluierung der erarbeiteten Verkettungsstrategie an einem repräsentativen Beispielbauteil der Automobilindustrie erfolgen, um die industrielle Einsatztauglichkeit und den praktischen Nutzen zu demonstrieren.

Kapitel 5

Technische Umsetzung

Das vorliegende Kapitel geht auf die hardware- und softwaretechnische Realisierung des Forschungsvorhabens ein. In Abschnitt 5.1 werden die technischen Komponenten zur Umsetzung des Lösungskonzepts aus Kapitel 4 beschrieben. Dies soll einen Einblick in die zugrunde liegende Versuchsumgebung schaffen. Darüber hinaus dient die Beschreibung und Detaillierung der entwickelten Software-Umgebung in Abschnitt 5.2 als Ergänzung zu den Ausführungen in den eingebundenen Publikationen (vgl. Kapitel 6).

5.1 Versuchsumgebung und Demonstrator

Die Verkettungsstrategie von Punktwolken wird prototypisch an einem Demonstrator realisiert. Dazu wird auf industrielle Systemkomponenten zurückgegriffen, um die Funktionsfähigkeit des Konzepts und den Nutzen für die geometrische Qualitätsprüfung zu zeigen. Diese umfassen ein roboterbasiertes optisches Messsystem auf industriellem Niveau, ein kommerzielles Projektionssystem sowie ein etabliertes Referenzbauteil aus der Automobilindustrie zur experimentellen Validierung (siehe Abb. 5.1). Die Komponenten der Systemtechnik erfüllen die erforderlichen technischen Anforderungen und werden daher beispielhaft angewendet. Für eine bessere Vergleichbarkeit gegenüber anderen einsetzbaren Geräten werden die Komponenten nachfolgend beschrieben und ein Verweis auf die entsprechenden Datenblätter zur Verfügung gestellt.

Die praktische Umsetzung erfolgt an der Messzelle *ZEISS AIBox* der Firma Carl Zeiss Optotechnik GmbH (siehe Abb. 5.1a). Das System ist auf einen Einsatz im industriellen Umfeld von produzierenden Unternehmen ausgelegt. Schiebetüren gewähren den Zugang zu der begehbaren Messzelle. Bei Betrieb des Messsystems werden diese geschlossen und tragen zusammen mit der Einhausung zur Arbeitssicherheit bei. Zusätzlich ist die Einhausung mit getönten Scheiben vorhanden, um den Einfluss von Störlicht zu verringern. Der integrierte Leitstand bietet einen direkten Blick in die Zelle und erlaubt eine sichere Steuerung des Roboters zur Sensornavigation im Arbeitsraum. Die Robotersteuerung sowie

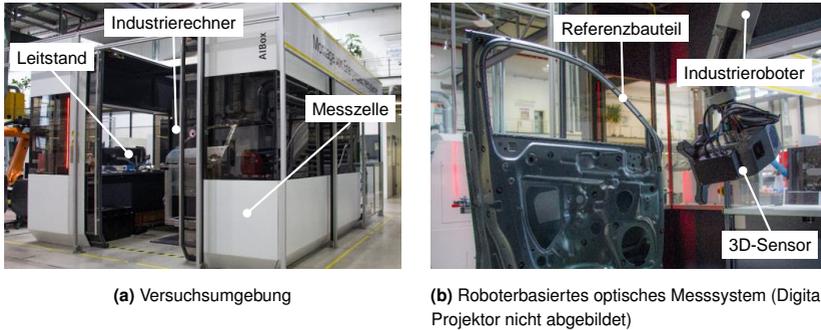


Abbildung 5.1: Technische Umsetzung zur experimentellen Validierung der konzeptionierten Verkettungsstrategie

die erforderliche Elektrik ist ebenfalls in einem dafür vorgesehenen Bereich der Messzelle untergebracht. Zur Platzierung des zu vermessenden Bauteils ist mittig eine Rotationsplattform mit einer Prüfobjektaufnahme vorgesehen, auf der die Halterung mit dem entsprechenden Bauteil befestigt wird. Die ansteuerbaren Systemkomponenten sind mit einem Industrierechner verbunden. Hierbei wird eine HP Z840 Workstation mit einem Intel Xeon Prozessor E5-2637 v4 (3.50 GHz), 128 GB Arbeitsspeicher und einer NVIDIA Quadro M4000 Grafikkarte eingesetzt. Der Industrierechner dient ebenfalls zur Projektionsbildgenerierung sowie zur Messdatenverarbeitung.

Das roboterbasierte Messsystem umfasst einen Industrieroboter, mit dem ein optischer 3D-Sensor durch den Arbeitsraum bewegbar ist (siehe Abb. 5.1b). Hierfür kommt ein Vertikal-Knickarmroboter mit sechs Achsen vom Modell M-20iA der Firma FANUC zum Einsatz.¹ Dessen maximale Reichweite beträgt 1.811 mm bei einer Posewiederholgenauigkeit von 0,03 mm. Dieser wird mithilfe der auf dem Industrierechner ausgeführten ZEISS Software Visio 7 bedient. An der mechanischen Schnittstelle des Industrieroboters ist ein 3D-Sensor COMET Pro AE von ZEISS angebracht.² Dieser misst nach dem Prinzip der Streifenlichtprojektion (vgl. Abschnitt 2.1.1) und besitzt ein Messvolumen von ungefähr $550 \times 370 \times 400 \text{ mm}^3$. Der integrierte Sensor verfügt dabei über eine Auflösung von 4.896×3.264 Pixeln bzw. Punkten bei einem angegebenen Punktabstand von 0,114 mm. Zusätzlich zur organisierten Punktwolke können zugehörige Grauwerte erfasst werden, sodass für jeden Punkt neben den 3D-Koordinaten auch Intensitätsinformationen vorliegen. Der vorgesehene Arbeitsabstand des Sensors zum Mittelpunkt des Messvolumens beträgt 570 mm.

Zur Bereitstellung von Projektionen wird ein Digital-Projektor VPL-PHZ10 von Sony eingesetzt.³ Dieser besitzt eine Laser-Phosphor-Lichtquelle und verfügt über ein 3-LCD-System (vgl. Abschnitt 2.1.1), um das Wiedergabebild zu erzeugen. Die

¹ Datenblatt des Industrieroboters: (FANUC CORPORATION 2019)

² Datenblatt des 3D-Sensors: (CARL ZEISS OPTOTECHNIK GMBH 2019)

³ Datenblatt des Digital-Projektors: (SONY CORPORATION 2022)

Auflösung beträgt dabei 1.920 x 1.200 Pixel bei 5.000 lm und einem Kontrastverhältnis von 500.000 : 1. Das Projektionssystem ist seitlich zum Industrieroboter aufgestellt. Dadurch wird die Mobilität des roboterbasierten Messsystems vor dem Prüfobjekt nicht beeinträchtigt. Eine entsprechende Darstellung der Anordnung ist in Abb. 6 der eingebundenen Publikation P 3 (BAUER, FINK et al. 2020) zu finden.

Als Prüfobjekt wird ein Blechbauteil der Automobilindustrie verwendet. Das Karosserieanbauteil (Automobiltür) wurde zur Referenzierung zusätzlich durch ein KMG hochgenau vermessen. Aufgrund der merkmalsarmen Außenseite sowie der zahlreichen Merkmale auf der Innenseite wird das Bauteil als geeignet angesehen, um zwei gegensätzliche Anwendungsfälle für die Verkettungsstrategie zu validieren.

5.2 Softwaretechnische Realisierung

Zur Realisierung und Validierung der Verkettungsstrategie von Punktwolken wird eine Software-Umgebung aufgebaut. Sie ermöglicht es, die konzipierte Strategie anhand der industriellen Systemkomponenten aus Abschnitt 5.1 für die geometrische Qualitätsprüfung praxisnah zu erproben.

Die einzelnen Funktionsmodule der Software-Umgebung orientieren sich dabei an dem Prüfablauf zur Evaluation von geometrischen Merkmalen aus Abschnitt 4.3. Dieser ist dort schematisch in Abb. 4.4 dargestellt und umfasst neben dem Definieren einer Prüfaufgabe, auch die erforderlichen Schritte zum Generieren eines geeigneten Projektionsbildes, die Messdatenerfassung, die entsprechende Verkettung der Punktwolken sowie die abschließende Auswertung der betrachteten Prüfmerkmale.

Die implementierten Funktionsmodule dienen dabei sowohl zur Ansteuerung von Hardwarekomponenten (Kommunikation) als auch zur Durchführung von Datenverarbeitungsprozessen. Deren softwaretechnische Umsetzung zur Realisierung eines Demonstrators ist schematisch in Abb. 5.2 dargestellt.

Die Software-Umgebung in Abb. 5.2 umfasst ein Steuerungsmodul sowie mehrere Funktionsmodule. Zur Erleichterung der Anwendung des Systems wird eine grafische Benutzeroberfläche (engl.: *Graphical User Interface (GUI)*) bereitgestellt. Diese wird in der Programmiersprache C# entwickelt und dient der Kontrolle über das Gesamtsystem. Je nach gewählter Funktion werden dort die einzugebenden Parameter erfasst, an die jeweiligen Funktionsmodule übergeben und die entsprechenden Datenverarbeitungsprozesse initiiert. Bei Bedarf wird auch die Kommunikation zu den erforderlichen Systemkomponenten aufgebaut. Im Rahmen der softwaretechnischen Umsetzung ergeben sich fünf übergeordnete Funktionsmodule, die den Ablauf der Verkettungsstrategie von Punktwolken widerspiegeln: *Projektionsbildgenerierung* (1), *Messdatenerfassung* (2) und *Projektor-Wiedergabe* (3), *Verkettung von Punktwolken* (4) sowie *Auswertung* (5). Diese

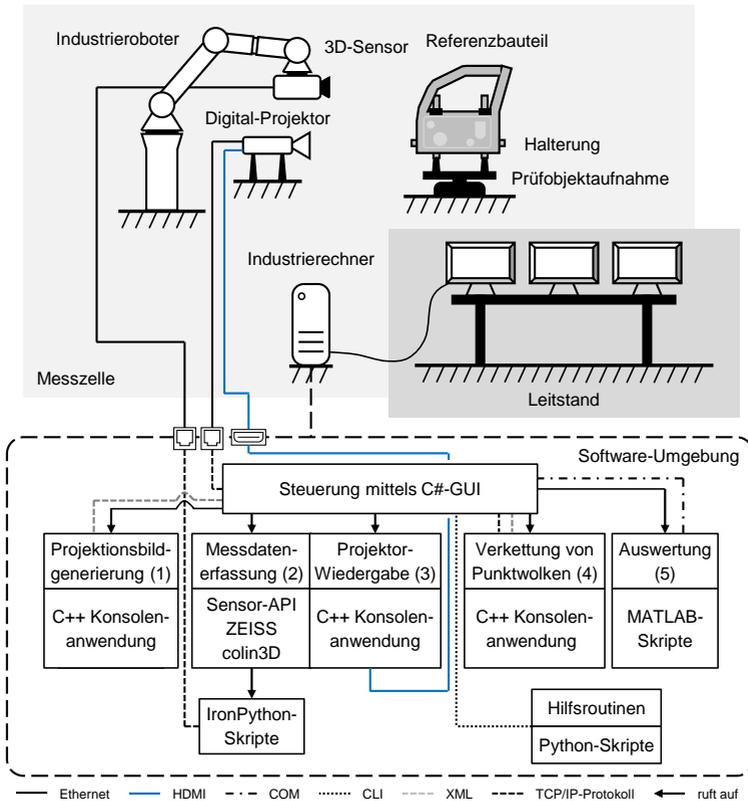


Abbildung 5.2: Systemaufbau sowie Kommunikation zwischen Hardwarekomponenten und Software-Modulen

werden im Folgenden beschrieben. Als Ergänzung sei auch auf die Ausführungen in den eingebundenen Publikationen P 3, P 4 und P 5 hingewiesen.

Zur Darstellung von bereichsspezifischen Referenzprojektionen auf der Bauteiloberfläche ist ein entsprechendes Projektionsbild erforderlich. Dieses muss zunächst generiert werden, was durch das Funktionsmodul *Projektionsbildgenerierung* (1) ermöglicht wird (siehe Abb. 5.2). Die anwendende Person gibt neben den ermittelten Parametern aus der durchgeführten Kalibrierung des Digital-Projektors auch den Pfad zum digitalen Bauteil in die GUI ein. Zusätzlich sind Segmentierungsparameter anzugeben, um geeignete Bereiche auf der Bauteiloberfläche für die Wiedergabe von Projektionen zu identifizieren. Darüber hinaus ist die Gestalt, die Größe und der Abstand der darzustellenden Zielmarken zu wählen. Alle festgelegten Parameter werden anschließend mittels *Extensible Markup Language (XML)*-Datei der Konsolenanwendung bereitgestellt. Die Implementierung des Anwendungsprogramms erfolgt in C++. Neben den verfügbaren

Standardfunktionen wird zur Verarbeitung von Bilddaten und Punktwolkendaten auf die Open-Source-Bibliotheken Open Computer Vision (OpenCV)⁴ bzw. Point Cloud Library (PCL)⁵ zurückgegriffen. Als Resultat wird ein digitales Bild generiert, welches bei der Wiedergabe durch den Digital-Projektor zu einer Darstellung von Zielmarken ausschließlich auf definierten Oberflächenbereichen des Bauteils führt.

Die Akquisition von 3D-Aufnahmen im Sichtbereich des 3D-Sensors geschieht mit dem Modul *Messdatenerfassung* (2) (siehe Abb. 5.2). Dabei sind Messposen und Aufnahmeparameter wie Belichtungszeiten durch die anwendende Person anwendungsspezifisch festzulegen. Die Ansteuerung des Roboters erfolgt dabei, wie in Abschnitt 5.1 dargelegt, mithilfe von proprietärer Software. Nach dem Prinzip der Streifenlichtprojektion wird zunächst die Geometrie im Sichtbereich erfasst. Im Anschluss wird das generierte Projektionsbild durch das Funktionsmodul *Projektor-Wiedergabe* (3) auf der Bauteiloberfläche angezeigt und es erfolgt währenddessen die Messung der Intensitätswerte. Zur Durchführung wird ein semiautomatisches Vorgehen gewählt, wobei der Anwendende die Datenerfassung ausgehend von der GUI steuert. Ein Interpreter führt dazu ein entsprechendes Skript aus und kommuniziert auf Basis eines *Transmission Control Protocol/Internet Protocol (TCP/IP)* mit der Programmierschnittstelle (engl.: *Application Programming Interface (API)*) der ZEISS colin3D-Software zur Bedienung des 3D-Sensors. Zusätzlich erfolgt über die GUI die Bedienung des Projektors. Zur Ansteuerung des Projektors wird auf den Funktionsumfang der PJLink-Bibliothek zurückgegriffen, die eine Kommunikation basierend auf dem TCP/IP-Protokoll über ein Ethernet-Kabel erlaubt. Darüber hinaus übernimmt eine weitere Konsolenanwendung die Darstellung eines hinterlegten Projektionsbildes. Das Bildsignal wird dabei mithilfe eines *High Definition Multimedia Interface (HDMI)*-Kabels an den Digital-Projektor übertragen. Nach erfolgreicher Akquisition von 3D-Aufnahmen stehen für jede Messpose Punktwolken mit zugehörigen Grauwerten zur Verfügung.

Das Zusammenführen von Punktwolken zu einer Gesamtaufnahme findet mithilfe des Moduls *Verkettung* (4) statt (siehe Abb. 5.2). Die zu verkettenden Punktwolken sowie Detektions- und Registrierungsparameter werden dabei über die Bedienoberfläche spezifiziert. Dies umfasst beispielsweise das Vorgehen zur Detektion von projizierten Zielmarken, Vorgaben zur Punktwolken-Augmentierung oder Abbruchkriterien des ICP-Algorithmus. Hilfsroutinen in Form von Python-Skripten werden dann zunächst zur Daten-Vorverarbeitung aufgerufen. Die auf der Bedienoberfläche getätigten Eingaben werden anschließend mithilfe einer XML-Datei an die in C++ implementierte Konsolenanwendung übergeben. In dieser findet die Verarbeitung von Bild- und Punktwolkendaten zur Registrierung statt. Dabei werden die bereits genannten Bibliotheken OpenCV und PCL herangezogen. Abschließend werden alle entsprechend der Verkettungsstrategie ausgerichteten Punktwolken in einer Gesamtpunktwolke abgespeichert.

⁴ OpenCV: <https://opencv.org> (besucht am 11.02.2022)

⁵ PCL: <https://pointclouds.org> (besucht am 11.02.2022)

Im Zuge des zu realisierenden Prüfablaufs ist auch ein Modul zur *Auswertung* (5) vorgesehen (vgl. Abb. 5.2). Hierfür wird das digitalisierte Bauteil in Form der verketteten Gesamtpunktwolke herangezogen. Der Anwendende wählt diese aus und legt fest, welche geometrischen Merkmale zu bestimmen sind. Über die vorhandene *Component Object Model (COM)*-Schnittstelle wird das Programm MATLAB R2019b aufgerufen und implementierte Skripte gestartet. Diese extrahieren die festgelegten Merkmale und bestimmen die Messgröße. Anschließend werden die Messergebnisse auf der Bedienoberfläche ausgegeben. Die ausgewerteten Größen lassen sich zur weiteren Verarbeitung als Excel-Datei exportieren.

Die prototypische Implementierung des in Kapitel 4 vorgestellten Lösungskonzepts erlaubt dessen Untersuchung anhand industriell relevanter Systemtechnik. Im Rahmen dieser Dissertation steht die effektive Realisierung und sinnvolle Ausgestaltung der Verkettungsstrategie von Punktwolken im Fokus, um die Machbarkeit und den Nutzen aufzuzeigen. Die automatisierte Umsetzung einer entsprechenden Messposenplanung oder Sensor-Parametrierung ist dabei außerhalb des Betrachtungsrahmens.

Kapitel 6

Kumulative Darstellung der eingebundenen Publikationen

6.1 Übersicht

Im Rahmen dieser Dissertation sollte ein neues Registrierungsverfahren für roboterbasierte optische Messsysteme erforscht werden. Dies mündete in die Konzeption und Umsetzung einer Verkettungsstrategie von Punktwolken. Die erarbeiteten Inhalte haben sich dabei an der in Abschnitt 4.3 skizzierten Vorgehensweise orientiert. Auf Basis identifizierter Aufgabenfelder wurden dort entsprechende Arbeitsziele (AZ) formuliert. Die inhaltliche Modularität ermöglichte es, die erarbeiteten Ergebnisse in Form von einzelnen Publikationen aufzubereiten.

Abb. 6.1 illustriert die eingebundenen Publikationen in einer sachlogischen Anordnung.

Publikation 1 (P1) führt das Lösungskonzept zur Verkettung von Punktwolken basierend auf bereichsspezifischen Projektionen für die geometrische Qualitätsprüfung ein. Im Zuge dessen wird das Konzept für roboterbasierte optische Messsysteme detailliert beschrieben und konkretisiert. Die Ergebnisse aus P1 adressierten AZ1 entsprechend der dargelegten Vorgehensweise aus Abschnitt 4.3.

Da für dieses Konzept eine Grobausrichtung von Punktwolken erforderlich ist, wurden in Publikation 2 (P2) verschiedene Verfahren für die Initialtransformation auf Basis von Bilddaten untersucht als mögliche Alternative zur Roboterkinematik.

Publikation 3 (P3) beschreibt den erarbeiteten Ansatz zur Darstellung bereichsspezifischer Projektionen in roboterbasierten optischen Messsystemen und entspricht AZ2. Er umfasst die Modellierung und Kalibrierung des Projektors und die Generierung eines entsprechenden Projektionsbildes. Die Darstellung von Projektionsprimitiven erfolgte dabei in Abhängigkeit der Umgebung bzw. eines Bauteils und dessen Oberflächenausprägung.

In Publikation 4 (P4) wird auf die Bildverarbeitungskette eingegangen (AZ3), um aus den aufgenommenen Bildern die erforderlichen Referenzpunkte der

Projektionsprimitive zuverlässig zu extrahieren. Hierbei wurde insbesondere die Möglichkeit einer intelligenten Vordetektion untersucht. Diese sollte die anschließend angewendeten Algorithmen zur exakten Lokalisation von Referenzpunkten unterstützen.

In Publikation 5 (P 5) wird die Feinregistrierung von Punktwolken mithilfe von geeigneten virtuellen Strukturen gezeigt. Dies adressiert AZ 4. Die Strukturen wurden auf Grundlage der Projektionsprimitive in den Punktwolken künstlich generiert und für die iterative Ausrichtung mittels ICP-Algorithmus herangezogen. Zudem erfolgte in P 5 eine Validierung der Verkettungsstrategie von Punktwolken anhand eines Anwendungsbeispiels.

Abschließend wurden in Publikation 6 (P 6) eine Technologiepotenzialanalyse und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt, die das im Rahmen dieser Dissertation erarbeitete Lösungskonzept mit etablierten Messsystemen verglichen.

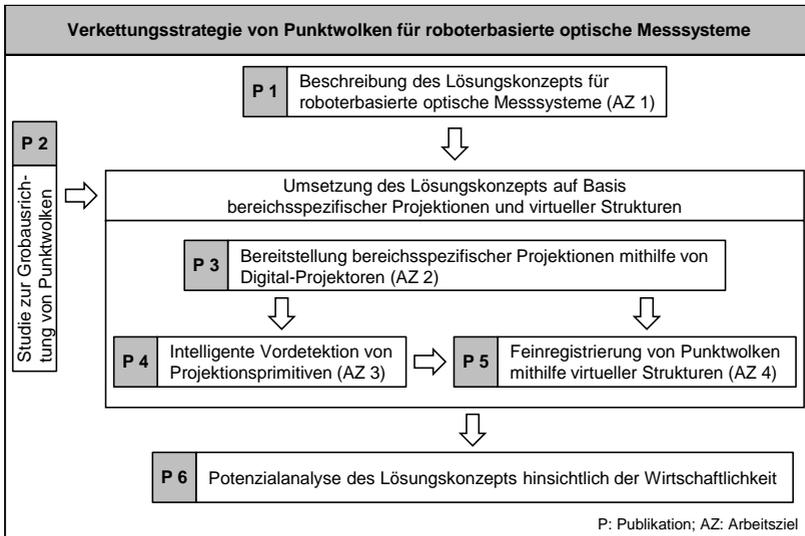


Abbildung 6.1: Übersicht und Zusammenhang der eingebundenen Publikationen

Nachfolgend wird eine detaillierte Zusammenfassung für jede eingebundene Publikation aufgeführt, die die wesentlichen Inhalte und Erkenntnisse darlegt. Eine Übersicht über betreute Studienarbeiten, die einen Bezug zur vorliegenden Arbeit aufweisen, und eine Auflistung aller Veröffentlichungen des Autors sind den Anhängen A.1 und A.2 zu entnehmen.

6.2 Publikation 1 – Beschreibung des Lösungskonzepts

Free-Form Surface Analysis and Linking Strategies for High Registration Accuracy in Quality Assurance Applications

(BAUER, MAGAÑA FLORES und REINHART 2019)

Die eingebundene Publikation 1 mit dem Titel *Free-Form Surface Analysis and Linking Strategies for High Registration Accuracy in Quality Assurance Applications* (BAUER, MAGAÑA FLORES et al. 2019) motiviert das der Dissertation zugrunde liegende Forschungsvorhaben und beschreibt das zu erarbeitende Lösungskonzept im Kontext der geometrischen Qualitätsprüfung für roboterbasierte optische Messsysteme. Insbesondere werden die einzelnen Aufgabenfelder vorgestellt, Umsetzungsalternativen aufgezeigt und erste experimentelle Untersuchungen zur Realisierung thematisiert.

Zunächst erfolgt eine kurze Einführung in die geometrische Qualitätsprüfung von produzierenden Unternehmen, dort vorherrschenden Trends und deren Auswirkungen auf die Konkurrenzfähigkeit eines Unternehmens im globalen Wettbewerb. Es wird dargelegt, dass sich infolgedessen roboterbasierte optische Messsysteme in den vergangenen Jahren hervor getan haben. Diese stellen häufig eine kostengünstigere und flexiblere Alternative gegenüber den konventionellen KMGs dar. Gleichzeitig wird auch auf die unzureichende absolute Posegenauigkeit herkömmlicher Industrieroboter hingewiesen, wodurch ein geeignetes Registrierungsverfahren zur präzisen Ausrichtung von Teilansichten (Punktwolken) für größere Prüfobjekte erforderlich geworden ist. Bestehende Verfahren wie Tracking-Systeme, physische Zielmarken oder Roboterkalibrierung sind dabei häufig sehr kostenintensiv und/oder zeitaufwendig, worin sich die Notwendigkeit eines neuen Konzepts begründet hat.

Daher wird anschließend in Anknüpfung an den Registrierungsansatz von (ULRICH 2018; ULRICH et al. 2015) ein neues Lösungskonzept vorgestellt. Dabei wird die zugrunde liegende Forschungsidee beschrieben, die im Kern eine Berücksichtigung von ebenen (homogenen) Bauteilbereichen für Projektionen vorsieht. Auf diese sollen geeignete Projektionsprimitive dargestellt werden, die für eine anschließende sequenzielle, paarweise Feinregistrierung von sich überlagernden 3D-Aufnahmen herangezogen werden. In Kombination mit experimentell bestimmten Parametern und Handlungsanweisungen, beispielsweise zur Augmentierung der gemessenen Punktwolken, ergibt sich eine Strategie zum paarweisen Verknüpfen, die vor allem auf eine hohe Ausrichtungsgenauigkeit von Punktwolken abzielt. Das skizzierte Konzept verspricht außerdem die Möglichkeit einer automatisierbaren Umsetzung unter Einbeziehung von CAD-Bauteildaten und einem Digital-Projektor. Zudem erlaubt es die Anwendbarkeit auf ein breites Bauteilspektrum – von ebenen bis hinzu merkmalsreichen Bauteiloberflächen.

Das Konzept wird in P 1 in Form einer Offline-Lösung für roboterbasierte optische Messsysteme vorgestellt. Auf Basis vorhandener CAD-Modelle sollen notwendige

Datenverarbeitungsprozesse wie Oberflächenanalyse oder Projektionsbildgenerierung vor dem eigentlichen Messprozess stattfinden. Zudem werden konzeptionell Schnittstellen zur vorgelagerten Messposenplanung und zum nachgelagerten Registrierungsvorgang vorgesehen. Im Wesentlichen beinhaltet das Konzept drei Module: die Bauteiloberflächenanalyse, die Bereitstellung von bereichsspezifischen Projektionen und die Strategie zum Verknüpfen von Punktwolken. Die Analyse von Oberflächen bezieht sich dabei auf den Bereich zweier sich überlagernder Punktwolken (gemeinsamer Sichtbereich des 3D-Sensors) und dient der Identifizierung von nahezu ebenen Bereichen. In P 1 wird dazu ein Vorgehen mithilfe von simulierten Bauteildaten und geometrischen Oberflächendeskriptoren beschrieben, um geeignete Bauteilregionen zu extrahieren und diese im Arbeitsraum mit dem Projektor in Beziehung zu setzen. Im Ergebnis wird auf diese Weise ein Projektionsbild generiert, das ausschließlich auf den zuvor bestimmten Bereichen Projektionsprimitive wie Quadrate darstellt. Nach Durchführung der Messdatenerfassung ist eine geeignete Strategie zum paarweisen Verknüpfen erforderlich. Diese sieht unter anderem eine entsprechende Datenverarbeitungskette mit abgestimmter Detektion von bereichsspezifischen Projektionen, eine Auswahl zu verwendender Projektionsprimitive für die spätere Registrierung sowie eine geeignete Augmentierung der Punktwolken vor. Abschließend wird in P 1 die Erprobung des Konzepts anhand von Bauteilen aus der Automobilindustrie vorgeschlagen.

Der Registrierungsansatz greift das Vorgehen einer Punktwolken-Augmentierung basierend auf Projektionen in Anlehnung an ULRICH (2018) und ULRICH et al. (2015) auf. Das Konzept in P 1 stellt jedoch in sich eine neuartige Vorgehensweise zum präzisen Verketteten von Punktwolken dar, da erstmalig die zugrunde liegende Oberflächenausprägung von Bauteilen bei der Bereitstellung von Projektionen mit berücksichtigt wurde. Ebenso war die Integration von Digital-Projektoren und deren Anwendungsmöglichkeiten für roboterbasierte optische Messsysteme neu zu konzeptionieren. Insbesondere sollten damit die großen Herausforderungen adressiert werden, die sich aus der Verwendung von Projektionen bei Blechbauteilen mit unterschiedlichen Oberflächenausprägungen ergeben.

Die Realisierung einer entsprechenden Verkettungsstrategie von Punktwolken auf industriellem Niveau verspricht zum einen eine genaue Digitalisierung respektive Möglichkeit zur Inspektion von gefertigten Bauteilen. Zum anderen erlaubt sie auch eine Anwendbarkeit auf ein breites Bauteilspektrum. Aufgrund der Neuheit der Forschungsidee und des voraussichtlichen Nutzens für industrielle Anwendungen wurde ein Verfahren entsprechend des Lösungskonzepts sowie eine mögliche Systemtechnik zur Umsetzung durch die TUM patentrechtlich geschützt, siehe (BAUER und MAGAÑA 2020).

Der Leistungsbeitrag des Erst-Autors Philipp Bauer an der eingebundenen Publikation P 1 ist in Tabelle 6.1 dargelegt.

Tabelle 6.1: Prozentuale Beiträge des Autors an der Publikation P 1

	Konzeption	Erarbeitung der Inhalte	Ausarbeitung
Philipp Bauer	90 %	90 %	90 %

6.3 Publikation 2 – Studie zur Grobausrichtung von Punktwolken

Accuracy Analysis of Alignment Methods based on Reference Features for Robot-Based Optical Inspection Systems Applications

(BAUER, LI, MAGAÑA FLORES und REINHART 2020)

Die eingebundene Publikation 2 mit dem Titel *Accuracy Analysis of Alignment Methods based on Reference Features for Robot-Based Optical Inspection Systems Applications* (BAUER, LI et al. 2020) untersucht verschiedene Verfahren zur Grobausrichtung von Teilansichten basierend auf den erfassten Bild- und 3D-Messdaten als mögliche Alternative zur Ausrichtung mittels Roboterkinematik. Im Kontext roboterbasierter optischer Messsysteme ist dieser Schritt von Interesse, da über die handhabende Kinematik des Roboters zwar stets eine Grobausrichtung verschiedener Teilansichten möglich ist – wenngleich dieses Vorgehen durch inhärente Fehlereinflüsse und hohe Ungenauigkeiten gekennzeichnet ist. Motiviert wird die Studie zur Genauigkeitsanalyse durch die gängige Annahme, dass eine verbesserte Grobausrichtung sich auch positiv auf das Konvergenzverhalten nachfolgender iterativer Algorithmen auswirken kann.

Um die realisierbare Genauigkeit einer Grobausrichtung ausschließlich auf Basis gemessener Bild- und 3D-Messdaten bestimmen und einordnen zu können, wurde im Rahmen der Veröffentlichung eine experimentelle Studie mit industrieller Systemtechnik durchgeführt. Außerdem wurden verschiedene Vorgehensweisen zur Transformationsberechnung zwischen zwei Messposen evaluiert.

Zunächst wird in P 2 der Versuchsaufbau beschrieben, der eine Relativbewegung von gedruckten Zielmarken bei stationärem 3D-Sensor ermöglicht. Translatorische bzw. rotatorische Bewegungen wurden dabei mithilfe einer Linearachse und einer Drehvorrichtung gesteuert. Als Ergebnis der Messdatenerfassung stand eine geordnete Punktwolke mit zugeordneten Grauwerten zur Verfügung. Es wurde eine pixelgenaue Extraktion der Referenzpunkte durchgeführt und es erfolgte die Berechnung der Relativtransformationen in Abhängigkeit der zu untersuchenden Vorgehensweisen. Abschließend wird in P 2 ein Vergleich der berechneten Transformationen mit den vorgegebenen Bewegungsdaten vorgenommen.

Die Genauigkeitsuntersuchungen wurden anhand von drei Vorgehensweisen zur Transformationsberechnung durchgeführt. Diese umfassten einerseits ein

implementiertes Kameramodell. Andererseits wurde auf Basis von korrespondierenden 3D-Punkten eine Transformationsberechnungsmethode basierend auf einer Singulärwertzerlegung (engl.: *Singular Value Decomposition (SVD)*) (vgl. Abschnitt 2.2.2) sowie das Lösen eines aufgestellten, einfachen Gleichungssystems zur Berechnung der Transformation betrachtet. Letzteres wurde mithilfe von drei verschiedenen Solvern gelöst, die jedoch zu gleichen Ergebnissen führten. Das Vorgehen zur Transformationsberechnung mittels SVD hat sich dabei hinsichtlich Genauigkeit und Robustheit den anderen Vorgehensweisen als überlegen erwiesen. Insbesondere für translatorische Bewegungen konnte dabei eine hohe Genauigkeit erzielt werden. Diese lag unterhalb von 0,16 mm. Im Vergleich dazu ist die absolute Posegenauigkeit von Industrierobotern eher im Millimeterbereich anzunehmen (vgl. Abschnitt 2.1.1). Auf Grundlage der in P 2 durchgeführten Studie und im Rahmen der betrachteten Anwendungsfälle konnte somit geschlussfolgert werden, dass eine Grobausrichtung basierend auf den erfassten Bild- und 3D-Messdaten eine höhere Genauigkeit erzielen könnte als mithilfe der Roboterkinematik. Abschließend wird in P 2 darauf hingewiesen, dass das untersuchte Vorgehen noch auf projizierte Zielmarken zu übertragen ist. Die Übertragbarkeit wird allerdings im Rahmen der Veröffentlichung nicht mehr betrachtet.

Der Leistungsbeitrag des Erst-Autors Philipp Bauer an der eingebundenen Publikation P 2 ist in Tabelle 6.2 dargelegt.

Tabelle 6.2: Prozentuale Beiträge des Autors an der Publikation P 2

	Konzeption	Erarbeitung der Inhalte	Ausarbeitung
Philipp Bauer	70 %	60 %	80 %

6.4 Publikation 3 – Bereitstellung bereichsspezifischer Projektionen

Spatial interactive projections in robot-based inspection systems

(BAUER, FINK, MAGAÑA und REINHART 2020)

Die eingebundene Publikation 3 mit dem Titel *Spatial interactive projections in robot-based inspection systems* (BAUER, FINK et al. 2020) zeigt zunächst die Vorteile von Projektionssystemen insbesondere für die geometrische Qualitätsprüfung produzierender Unternehmen auf, die sich aus der kontaktlosen Darstellung von visualisierten Informationen ergeben. Darüber hinaus wird auf das bisher noch weitestgehend ungenutzte Potential verwiesen, welches sich ergibt, wenn

Projektionen zusätzlich auf ihre Umgebung bzw. auf die darstellenden Oberflächen abgestimmt werden. Demnach besteht das Ziel dieser Veröffentlichung darin, einen praxisnahen Ansatz zu realisieren und zu untersuchen, der eine automatisierte Bereitstellung von bereichsspezifischen Projektionen im Arbeitsraum von roboterbasierten optischen Messsystemen auf Basis der computergestützten Anbindung und Integration eines Digital-Projektors ermöglicht.

Um Projektionen ausschließlich auf Bauteilbereichen mit charakteristischen geometrischen Oberflächeneigenschaften darzustellen, wird in P 3 ein Projektionsmodell und eine Kalibrierungsmethode für herkömmliche Digital-Projektoren vorgestellt. Dabei wird die mathematische Modellierung in Form eines Projektionsvolumens beschrieben, die beispielsweise ausgewählte Bereiche eines Bauteils im Arbeitsraum mit den jeweiligen Projektorpixeln in Zusammenhang bringt. Im Rahmen der Umsetzung wurde eine punktbasierte Repräsentation der entsprechenden Bauteilbereiche gewählt. Zur Festlegung notwendiger Modell-Parameter wird in P 3 eine abgeleitete Kalibrierungsmethode vorgestellt. Darüber hinaus wird der eingeführte Ansatz um ein Vorgehen zur Integration von entsprechenden Projektionsprimitiven in das zu generierende Projektionsbild ergänzt.

Die Funktionsfähigkeit des im Rahmen der Veröffentlichung eingeführten Ansatzes wurde durch bereichsspezifisch applizierte Quadrate auf der Innenseite eines Karosserieanbauteils der Automobilindustrie als Anwendungsbeispiel nachgewiesen. Entsprechende Oberflächen wurden dabei hinsichtlich ihrer Krümmung automatisiert ausgewählt. Im Ergebnis wurden helle Quadrate dann ausschließlich auf vordefinierten, nahezu ebenen Bauteilbereichen dargestellt. Darüber hinaus wurde in einer Genauigkeitsuntersuchung eine durchschnittliche laterale Abweichung von ungefähr 0,75–1,5 mm festgestellt, welche durch Maßnahmen bei der Projektionsbildgenerierung konzeptionell ausgeglichen werden können. Zudem zeigte sich ein exponentieller Anstieg der Rechenlaufzeit bei zunehmender Größe der punktbasierten Umgebung. Die Punktwolkenverarbeitung verantwortete dabei den Großteil des erforderlichen Rechenaufwands und bedarf einer Optimierung im Falle zeitkritischer Applikationen.

In Summe demonstriert die Veröffentlichung P 3 einen praxisnahen Ansatz, der ein roboterbasiertes optisches Messsystem mit integriertem Digital-Projektor dazu befähigt, beliebige bereichsspezifische Projektionen auf Prüfobjekten automatisiert zu platzieren. Darüber hinaus verspricht der Ansatz weitere Anwendungsmöglichkeiten, die über den betrachteten Anwendungsfall der geometrischen Qualitätsprüfung von Blechbauteilen hinausgehen.

Der Leistungsbeitrag des Erst-Autors Philipp Bauer an der eingebundenen Publikation P 3 ist in Tabelle 6.3 dargelegt.

Tabelle 6.3: Prozentuale Beiträge des Autors an der Publikation P 3

	Konzeption	Erarbeitung der Inhalte	Ausarbeitung
Philipp Bauer	75 %	70 %	80 %

6.5 Publikation 4 – Intelligente Vordetektion von Projektionsprimitiven

Intelligent predetection of projected reference markers for robot-based inspection systems

(BAUER, SCHMITT, DIRR, MAGAÑA und REINHART 2022)

Die eingebundene Publikation 4 mit dem Titel *Intelligent predetection of projected reference markers for robot-based inspection systems* (BAUER et al. 2022) stellt zu Beginn die Vorteile projizierter Zielmarken für roboterbasierte optische Messsysteme heraus. Anhand von ausgewählten Bildbeispielen wird jedoch auch die Notwendigkeit einer abgestimmten Bildverarbeitungskette zur Detektion dieser Marken ersichtlich. Die teils stark abweichenden Darstellungseigenschaften resultieren zum einen aus schwierigen Lichtbedingungen, die häufig im industriellen Umfeld vorhanden sind. Zum anderen ergeben sich diese jedoch auch aus der projizierten Darstellungsweise. Im Hinblick auf den Ansatz zur Bereitstellung von bereichsspezifischen Projektionen (siehe P 3) zeigt diese Veröffentlichung auf, wie eine Methode des ML zur verbesserten Detektion von projizierten Zielmarken genutzt werden kann. Klassische Segmentierungsverfahren werden dazu um eine geeignete intelligente Vordetektion ergänzt, sodass projizierte Zielmarken sowie deren Referenzpunkte unter erschwerten Lichtbedingungen aus Bildern zuverlässig extrahiert werden können.

Auf Basis der präsentierten Literatur in P 4 wurde ein geeigneter ML-Ansatz ausgewählt, welcher einen Kaskadenklassifizierer nach der Viola-Jones-Methode in Kombination mit Haar-ähnlichen Merkmalen umfasste (vgl. Abschnitt 2.3.1). Dabei wurde die Adaptierbarkeit hinsichtlich der Detektion von projizierten Zielmarken im Sinne der zu erarbeitenden Verkettungsstrategie von Punktwolken (P 1) berücksichtigt. Um die Leistungsfähigkeit des gewählten Ansatzes aufzuzeigen, wurden verschiedene Projektionsprimitive bereichsspezifisch auf Blechbauteile der Automobilindustrie projiziert. Diese wurden anschließend mithilfe der trainierten Modelle in erfassten Bildern detektiert. Die Übertragbarkeit auf andere optische Sensoren wurde anhand verschiedener Kamerasysteme gezeigt. Darüber hinaus wurden auch synthetische Datensätze während des Trainingprozesses herangezogen. Neben der Leistungsfähigkeit wurde dabei in P 4 der Fragestellung nachgegangen, welche realen Einflüsse zu modellieren sind, um hohe Detektionsraten zu erzielen.

Die im Rahmen von P 4 präsentierten Ergebnisse zeigen, dass der gewählte Ansatz für die Detektion von bereichsspezifisch projizierten Zielmarken geeignet war und eine zuverlässige Vordetektion ermöglichte. So wurden für die untersuchten Projektionsprimitive Sensitivitäten (engl.: *recall*) sowie Genauigkeiten (engl.: *precision*) von über 90 % erreicht. Bei der Generierung von synthetischen Trainingsdaten (computergenerierte Abbilder von Zielmarken) hat sich gezeigt,

dass neben der Einflussmodellierung wie Intensitätsvariation, Unschärfe und Rauschen insbesondere auch die Berücksichtigung von perspektivischer Verzerrung als vorteilhaft zu werten ist. Des Weiteren hat sich eine etwas erschwerte Detektierbarkeit von überbelichteten Projektionsprimitiven im Vergleich zu unterbelichteten abgezeichnet.

Zusammenfassend ermöglicht der neue Detektionsansatz ein robustes Vordektieren von projizierten Zielmarken trotz erschwelter Lichtbedingungen, die unter anderem aus dem Einsatz eines Digital-Projektors resultieren. Durch die intelligente Vordetektion ist es anschließend möglich, klassische Bildverarbeitungsverfahren auf die lokalen Bildbereiche einzelner Marken abzustimmen und infolge einen Prozess zur zuverlässigen Extraktion von Referenzpunkten zu implementieren. Dies wird abschließend in P 4 anhand ausgewählter Beispiele illustriert.

Der Leistungsbeitrag des Erst-Autors Philipp Bauer an der eingebundenen Publikation P 4 ist in Tabelle 6.4 dargelegt.

Tabelle 6.4: Prozentuale Beiträge des Autors an der Publikation P 4

	Konzeption	Erarbeitung der Inhalte	Ausarbeitung
Philipp Bauer	75 %	60 %	75 %

6.6 Publikation 5 – Feinregistrierung von Punktwolken

Registration strategy of point clouds based on region-specific projections and virtual structures for robot-based inspection systems

(BAUER, HECKLER, WORACK, MAGAÑA und REINHART 2021)

Die eingebundene Publikation 5 mit dem Titel *Registration strategy of point clouds based on region-specific projections and virtual structures for robot-based inspection systems* (BAUER, HECKLER et al. 2021) überführt das in P 1 vorgestellte Lösungskonzept dieser Dissertation mithilfe der erarbeiteten Ansätze aus P 3 und P 4 in die Praxis.

Zunächst werden in P 5 globale Trends und deren Auswirkungen auf die Fertigungsmesstechnik von produzierenden Unternehmen skizziert. Diesbezüglich wird anschließend das vielversprechende Potenzial roboterbasierter optischer Messsysteme in Verbindung mit ICP-basierten Ansätzen zur Feinregistrierung von Punktwolken beschrieben, womit das Lösungskonzept dieser Arbeit motiviert ist. Dabei werden auch die auftretenden Probleme von vollflächig dargestellten Projektionen als Referenzen thematisiert. Es wird ebenfalls aufgezeigt, wie das

Lösungskonzept basierend auf bereichsspezifischen Projektionen und virtuellen Strukturen diesen Herausforderungen begegnet. Im Ergebnis zielt diese Veröffentlichung auf die konkrete Umsetzung des Lösungskonzepts sowie die Erarbeitung von Handlungsempfehlungen ab, wodurch die praktische Anwendung und die Validierung der Verkettungsstrategie realisiert wird.

Dazu wird in P 5 ein Vorgehen vorgestellt, um Projektionsprimitive und virtuelle Strukturen auszuwählen, zu qualifizieren und für reale Anwendungsbeispiele einsetzen zu können. Auf Basis von definierten Anforderungen wurde eine geeignete Auswahl an Kombinationen von Projektionsprimitiven und virtuellen Strukturen abgeleitet. Diese wurden anschließend durch simulative und experimentelle Untersuchungen hinsichtlich der Registrierungseigenschaften analysiert. Hierfür wurden im Vorfeld relevante Einflussfaktoren auf die Ausrichtung von Punktwolken anhand der Literatur sowie mithilfe eines Ishikawa-Diagramms identifiziert. Auf Basis eingeführter Leistungsindikatoren zur Beurteilung von Registrierungen, wie durchschnittlicher translatorischer oder rotatorischer Fehler, erfolgte eine finale Auswahl an geeigneten Kombinationen. Diese wurden abschließend für die Validierung an einem realen Bauteil verwendet. Mit dieser Vorgehensweise wird in P 5 ein systematischer Ansatz zur geeigneten Parametrierung des Lösungskonzepts verfolgt.

Im Zuge der Untersuchungen wurde auf eine programmierte Simulationsumgebung zurückgegriffen. Diese erlaubte eine simulative Generierung und Registrierung von zwei sich überlagernden Punktwolken mit parametrierbaren virtuellen Strukturen. Zudem wird ein Testaufbau beschrieben, der für die experimentellen Versuche mit einem integrierten Digital-Projektor verwendet wurde. Die Validierung der Verkettungsstrategie erfolgte an einem Anwendungsbeispiel der Automobilindustrie (Automobiltür) mit industrieller Systemtechnik im Kontext der geometrischen Qualitätsprüfung.

Aus den Ergebnissen der simulativen und experimentellen Untersuchungen ist hervorgegangen, dass drei virtuelle Strukturen, die aus einer säulenartigen, punktbasierten Struktur mit zunehmendem Punktabstand bestehen und in einem Dreieck angeordnet sind, eine hohe Eignung aufweisen. Dies zeigte sich auch in der Validierung am realen Anwendungsbeispiel der Automobilindustrie. Zur Beurteilung der Qualität in Bezug auf die Ausrichtung von Punktwolken wurde die etablierte Kenngröße *Kugelabstandsabweichung* herangezogen. Für ausgewählte Prüfmerkmale (verschiedene Kugelabstandsabweichungen) erzielte eine Dreiecksanordnung von drei säulenartigen Strukturen eine Steigerung der Genauigkeit um den Faktor 14,1–23,7 im Vergleich zur Registrierung mithilfe der Roboterkinematik. Hingegen erreichte eine einzelne würfelartige Struktur eine Genauigkeitssteigerung um den Faktor 1,4–4,7 gegenüber der Roboterkinematik. Referenziert wurde dabei zu hochgenauen Vergleichsmessungen eines KMG. Ebenso wurde in P 5 die Einsatzegnung der Verkettungsstrategie von Punktwolken sowohl an überwiegend ebenen Oberflächenbereichen als auch an Bereichen mit einer hohen Anzahl an Oberflächenmerkmalen demonstriert.

Diese Veröffentlichung weist somit die Praxistauglichkeit des Lösungskonzepts unter Einbezug der Ansätze aus P 3 und P 4 nach. Daneben wird die Eignung der identifizierten virtuellen Strukturen für weitere Punktwolkendichten mittels Simulation aufgezeigt, wodurch deren Einsatz auch in Verbindung mit anderen 3D-Sensoren als geeignet anzusehen ist. In Anbetracht der erzielten Genauigkeiten und Robustheit im Rahmen des betrachteten Anwendungsbeispiels ist die untersuchte Verkettungsstrategie von Punktwolken für roboterbasierte optische Messsysteme als neue Alternative für die Fertigungsmesstechnik einzuordnen.

Der Leistungsbeitrag des Erst-Autors Philipp Bauer an der eingebundenen Publikation P 5 ist in Tabelle 6.5 dargestellt.

Tabelle 6.5: Prozentuale Beiträge des Autors an der Publikation P 5

	Konzeption	Erarbeitung der Inhalte	Ausarbeitung
Philipp Bauer	85 %	65 %	90 %

6.7 Publikation 6 – Potenzialanalyse des Lösungskonzepts hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit

A Technological and Economic Potential Analysis of Measurement Systems in Geometrical Quality Assurance

(BAUER, GOTTSCHALL, MAGAÑA FLORES, HOFER und REINHART 2021)

Die eingebundene Publikation 6 mit dem Titel *A Technological and Economic Potential Analysis of Measurement Systems in Geometrical Quality Assurance* (BAUER, GOTTSCHALL et al. 2021) motiviert sich aus der Notwendigkeit heraus, generell einen zielgerichteten und effizienten Einsatz von Ressourcen anzustreben, um die Wettbewerbsfähigkeit von produzierenden Unternehmen aufrechtzuerhalten. Unter diesem Gesichtspunkt und mit Bezug auf die geometrische Qualitätsprüfung von Blechbauteilen wird daher im Rahmen dieser Veröffentlichung (P 6) eine Analyse von verschiedenen Messsystemen durchgeführt, um deren technologische wie auch wirtschaftliche Potenziale aufzuzeigen. Neben den etablierten Inspektionsverfahren wie KMGs, roboterbasierten optischen Messsystemen mit Lasertrackern oder roboterbasierten optischen Messsystemen in Kombination mit Photogrammetrieansätzen wird dazu ebenfalls das in P 1 eingeführte Lösungskonzept für einen Vergleich aufgegriffen.

Ziel der Veröffentlichung ist es daher, zunächst ein Vorgehen zur Evaluierung der genannten Messsysteme aufzuzeigen. Dazu wurden geeignete Ansätze in der Literatur identifiziert, entsprechend adaptiert und zu einem Vorgehensmodell

synthetisiert. Zum einen wurde dabei eine Evaluierung nach technologischen Aspekten vorgenommen, beispielsweise hinsichtlich Automatisierbarkeit oder Messgeschwindigkeit. Insgesamt wurden hierfür 15 identifizierte Dimensionen als relevant eingestuft, deren Bewertung für jedes Messsystem qualitativ durch Fachkundige vorgenommen wurde. Zum anderen erfolgte eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Messsysteme. Auf Grundlage der mit Fachkundigen durchgeführten Studie (mit 36 bzw. 27 Teilnehmenden) wurden auch Kenngrößen ermittelt, die in Ergänzung zu Kennzahlen aus der Literatur und getroffenen Abschätzungen in die Finanzkalkulation einfließen. Die Studie erfolgte in Form einer Online-Umfrage. Bei Fragen, die auf den Grad der Zustimmung abzielten, wurde eine Likert-Skala verwendet. Um einen einheitlichen Bezugsrahmen für die Bewertung herzustellen, wurde ein hypothetisches Anwendungsbeispiel aus der Automobilindustrie eingeführt. Insgesamt erlaubte dieses Vorgehen eine erweiterte technologische Einschätzung bzw. Beurteilung der Messsysteme neben der Investitionsbetrachtung.

Anhand der Portfolio-Darstellung in P 6 wird deutlich, dass das technologische und wirtschaftliche Potenzial heutiger roboterbasierter optischer Messsysteme das von KMGs bereits überschritten hat. Als vorteilhaft wurden KMGs lediglich bei sehr hohen Genauigkeitsanforderungen oder bei Normen und Standards gesehen. Unter den betrachteten roboterbasierten Ansätzen wies das in P 1 vorgestellte Lösungskonzept das höchste Potenzial auf. Im Rahmen der in P 6 getroffenen Annahmen und des betrachteten Anwendungsbeispiel ergaben sich aus der Studie hierbei die geringsten Kosten. Darüber hinaus wurde nach Meinung der Fachkundigen das technologische Potenzial des Lösungskonzepts unter anderem in der Automatisierbarkeit, der automatischen Messspesenplanung, in dem Weiterentwicklungspotenzial und in der Reduktion von Ressourcen gesehen.

Das in P 6 eingeführte Vorgehen demonstriert zunächst eine Möglichkeit, wie eine Vergleichbarkeit zwischen etablierten Messsystemen aber auch Forschungsansätzen auf Basis wirtschaftlicher und technologischer Aspekte grundsätzlich hergestellt werden kann. Dies erlaubt einerseits, die Einsatzreife von verschiedenen Messsystemen besser abzuschätzen. Zum anderen kann es den Entscheidungsprozess für künftige Investitionen unterstützen. Im Zuge dessen wird auch darauf hingewiesen, dass die richtige Auswahl von Messsystemen ebenfalls zu einer effektiven und ressourcenschonenden Qualitätsprüfung beitragen kann und so die Wettbewerbsfähigkeit von produzierenden Unternehmen stärkt.

Der Leistungsbeitrag des Erst-Autors Philipp Bauer an der eingebundenen Publikation P 6 ist in Tabelle 6.6 dargelegt.

Tabelle 6.6: Prozentuale Beiträge des Autors an der Publikation P 6

	Konzeption	Erarbeitung der Inhalte	Ausarbeitung
Philipp Bauer	70 %	70 %	70 %

Kapitel 7

Themenübergreifende Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse der kumulativen Dissertation werden in diesem Kapitel anhand einer themenübergreifenden Diskussion eingehend beleuchtet. Die zur Umsetzung der Verkettungsstrategie beigetragenen Publikationen P 1 – P 5 werden dazu in einen Zusammenhang mit dem Stand des Wissens gesetzt sowie im Hinblick auf die Zielsetzung kritisch reflektiert. Eine wirtschaftliche Betrachtung wird in Abschnitt 7.2 durchgeführt und diskutiert. Dabei wird auf die Ergebnisse aus der Publikation P 6 zurückgegriffen.

7.1 Kritische Reflexion

In diesem Abschnitt findet zunächst eine Reflexion der eingebundenen Publikationen P 1 – P 5 statt. Im Anschluss an P 5 erfolgt zudem eine anwendungsbezogene Betrachtung der realisierten Verkettungsstrategie, welche weiterführende praktische Einsatzmöglichkeiten aufzeigen soll. Abschließend werden die erzielten Ergebnisse hinsichtlich der Zielsetzung dieser Arbeit (vgl. Abschnitt 1.1) beleuchtet.

Das Lösungskonzept der Dissertation adressiert die Genauigkeitssteigerung bei der Verkettung von Punktwolken für roboterbasierte optische Messsysteme. Dabei kommen projizierte Referenzelemente zum Einsatz, deren Anwendung für die Fertigungsmesstechnik in der Literatur bisher nur vereinzelt behandelt worden ist (vgl. Abschnitt 3.4.3).

Im Zuge der Realisierung einer entsprechenden Verkettungsstrategie von Punktwolken entstanden fünf Publikationen: P 1 beschreibt dabei das erarbeitete Lösungskonzept, P 2 beinhaltet eine Studie zur Grobausrichtung von Punktwolken, P 3 behandelt die Bereitstellung bereichsspezifischer Projektionen, P 4 stellt eine intelligente Vordetektion von Projektionsprimitiven vor und P 5 untersucht die Feinregistrierung von Punktwolken mithilfe virtueller Strukturen. Eine Übersicht über die eingebundenen Publikationen und deren sachlogischer Zusammenhang findet sich in Abschnitt 6.1.

Anhand der Ausführungen in Abschnitt 3.2 wird deutlich, dass die Ausrichtungsgenauigkeit von Teilansichten auf Basis der Roboterkinematik für die geometrische Qualitätsprüfung von Blechbauteilen nicht ausreichend ist. Etablierte Ansätze setzen infolgedessen vorwiegend externe Systemtechnik oder physische Zielmarken in Verbindung mit photogrammetrischen Methoden ein. Der Einsatz von Projektionen als Referenz in Verbindung mit iterativen Methoden ist bisher nur wenig untersucht worden. Daher beschreibt Publikation 1 ein neues Konzept zur Verwendung von geeigneten Projektionen als Registrierungshilfe für den ICP-Algorithmus, um erfasste Punktwolken präzise zu registrieren. PITO (1997) und HUANG et al. (2017) verwendeten in dieser Hinsicht physische Registrierungshilfen. Während PITO (1997) ein Objekt mit spezifischer Formgestaltung entwickelte, nutzten HUANG et al. (2017) eingebrachte Referenzkugeln. ULRICH (2018) untersuchte die Verwendung von unmodifizierten, vollflächigen Projektionen zur Registrierung von Punktwolken im Labormaßstab.

Vor allem die Berücksichtigung der zugrunde liegenden Oberflächenausprägung von Bauteilen bei der Bereitstellung von Projektionen ging in dem beschriebenen Lösungskonzept in P 1 über den Stand des Wissens hinaus. Diesbezüglich wurde zum ersten Mal in der Literatur eine computergestützte Analyse von Bauteiloberflächen vorgeschlagen, um geeignete Bereiche zur Darstellung von Projektionsprimitiven zu identifizieren. Dabei wurde auch der Einsatz, die Modellierung und die Integration von modernen Digital-Projektoren in roboterbasierte Messsysteme thematisiert, um bereichsspezifische Projektionen darzustellen zu können. P 1 adressierte zusätzlich relevante Fragestellungen, beispielsweise im Hinblick auf eine neu zu untersuchende Punktwolken-Augmentierung, damit eine entsprechende Verkettungsstrategie von Punktwolken erstmalig realisiert und untersucht werden konnte. Der Einsatz von projizierten Referenzelementen erforderte jedoch auch eine freie Sichtlinie von dem Projektor zu dem Bauteil, um Verdeckungen der Projektionen, z. B. durch den Roboter, zu vermeiden. Dies hat die Festlegung von Messposen erschwert. Das in P 1 eingeführte Lösungskonzept sieht zudem die Darstellung von Projektionsprimitiven auf ebene Bauteilbereiche vor, wodurch eine gewisse Beschränkung des vorgestellten Ansatzes auf flächenhaft ausgeprägte Bauteiloberflächen bestand. Weiterführend gilt es nun, die Verkettungsstrategie konzeptionell zu erweitern und in ein vollautomatisiertes roboterbasiertes optisches Messsystem einzugliedern. Insbesondere sollte eine automatisierte Messposenplanung mit in die Verkettungsstrategie integriert werden.

In P 2 dieser Dissertation fand eine experimentelle Untersuchung zur Grobausrichtung von Teilansichten statt. Anstelle der in der Literatur sonst häufig genutzten Roboterkinematik zur Grobausrichtung von Punktwolken wurden alternative Registrierungsmethoden vorgestellt und erprobt, wobei die Nutzung von erfassten Bild- und 3D-Messdaten im Vordergrund stand. Zentrale Erkenntnis der Untersuchungen ist es gewesen, dass bereits pixelgenau identifizierte Referenzpunkte, wie detektierte Ecken von gedruckten quadratischen Zielmarken, genutzt werden könnten, um Registrierungsgenauigkeiten im Submillimeterbereich zu erreichen. Darüber hinaus wurde aufgezeigt, dass die Methode zur Transformationsberech-

nung basierend auf SVD die beste Eignung für den betrachteten Anwendungsfall der Studie verspricht. Die Studie sollte zukünftig auf weitere Zielmarken, wie runde oder codierte Zielmarken, ausgedehnt werden und darüber hinaus verstärkt die Zielmarkendetektion in den Bilddaten adressieren.

Die veröffentlichte Studie in P 2 hat somit den Stand des Wissens um experimentell ermittelte Ergebnisse zur Grobausrichtung unter Verwendung von merkmalsbasierten Verfahren für roboterbasierte optische Messsysteme erweitert. Dabei war insbesondere die Verwendung von Systemtechnik auf industriellem Niveau und Open-Source-Software hervorzuheben. Hinsichtlich der eingebrachten Referenzelemente ergänzte P 2 bestehende Forschungsansätze wie die Arbeiten von BARONE et al. (2012) oder VON ENZBERG et al. (2016), die auf kreisförmige Zielmarken bzw. die natürlich vorliegende Oberflächentextur von Bauteilen zur Ausrichtung von Punktwolken zurückgriffen. Eine Beschränkung der in P 2 durchgeführten Studie besteht jedoch darin, dass der Versuchsaufbau an einer zentralen Position im Arbeitsraum des Industrieroboters platziert wurde. Um Aussagen für den gesamten Arbeitsraum, bspw. auch an den Randbereichen, abzuleiten, müssten weitere Positionen untersucht werden. Ebenso wurden die Ergebnisse für eine Translation und eine Rotation vorgestellt. Für die Betrachtung komplexerer Bewegungszustände, wie Überlagerungen von translatorischen und rotatorischen Bewegungen, sind weiterführende Validierungsversuche notwendig. Nun sollte die verwendete Methodik aus P 2 auf den Einsatz von Projektionsprimitiven übertragen werden, um die Leistungsfähigkeit der Verfahren für eine Grobausrichtung von Punktwolken zu ermitteln und in der Folge Aussagen hinsichtlich der Eignung als Alternative zur roboterbasierten Ausrichtung treffen zu können.

Die Inhalte in P 3 behandeln die Integration von Digital-Projektoren in die Umgebung von roboterbasierten optischen Messsystemen und zeigen dabei ein Vorgehen zur Darstellung von bereichsspezifischen Projektionen auf Blechbauteilen auf. Neben dem praktischen Nachweis der Funktionsfähigkeit des entwickelten Ansatzes für kommerziell erhältliche Digital-Projektoren konnten auch die räumlichen Abweichungen in der Positionierung von Projektionsprimitiven quantifiziert werden. Sie lagen in den experimentellen Untersuchungen lateral bei ca. 0,75–1,5 mm. Diese Erkenntnis floss anschließend konzeptionell in die Projektionsbildgenerierung ein, sodass der laterale Darstellungsfehler berücksichtigt werden konnte.

P 3 präsentierte damit erstmalig in der Literatur einen Ansatz zum gezielten Darstellen von projizierten Referenzelementen (Projektionsprimitive) auf vordefinierten Bauteilbereichen für roboterbasierte optische Messsysteme. Im Hinblick auf eine Anpassung von Projektionen unterschied sich P 3 von anderen Forschungsarbeiten, zum Beispiel FALCAO et al. (2008), RASKAR et al. (1999) und SUKTHANKAR et al. (2000), darin, dass keine zusätzlichen Kamerasysteme eingesetzt wurden. Die in der Literatur beschriebenen Ansätze zielten meist auf die Bestimmung der intrinsischen Projektorparameter ab. Dagegen zeigt P 3 einen einfachen und praxisnahen Ansatz auf, der es erlaubt, ein Projektionsvolumen zu modellieren. Dieser Ansatz wurde mithilfe des verwendeten Projektionssystems in einer Positi-

on seitlich des Industrieroboters validiert (vgl. Abb. 2.1). Für signifikant spitzere Einstrahlwinkel (Winkel zwischen Projektionsachse und Bauteiloberfläche) sind weiterführende Analysen hinsichtlich der lateralen Genauigkeit erforderlich, da hier mit einer höheren Ausprägung der Darstellungsfehler zu rechnen ist und der vorhandene Tiefenschärfenbereich auf der Oberfläche kleiner wird. Der Einsatz von Digital-Projektoren mit höheren Pixel-Auflösungen könnte Pixelierungsartefakte vor allem bei erfassten, unterbelichteten Projektionsprimitiven reduzieren und so zu einer verbesserten Darstellungsqualität beitragen. Eine Optimierung der Rechenlaufzeit bei der Verarbeitung der punktbasierten Umgebung würde die Dauer zur Projektionsbildgenerierung verkürzen. Diesbezüglich sollten für den Forschungsansatz Oberflächenrepräsentationen in Form von Dreiecksnetzen betrachtet werden.

In P 4 wird die erarbeitete digitale Bildverarbeitungskette zur Detektion von bereichsspezifischen Projektionen vorgestellt. Dabei wurde die auf ML basierende Viola-Jones-Methode identifiziert und zur Vordetektion von verschiedenen Projektionsprimitiven eingesetzt. Unter komplexen Lichtbedingungen, wie infolge der projizierten Darstellungsweise, hat die Vordetektion von Projektionsprimitiven einen wichtigen Beitrag zu einer genauen Lokalisation von Referenzpunkten geleistet. Die Ergebnisse der Vordetektion zeigten, dass Sensitivitäten und Genauigkeiten von über 90 % erreicht werden konnten.

Die in P 4 untersuchte Viola-Jones-Methode wurde erstmalig auf Projektionsprimitive bzw. projizierte Zielmarken im Kontext von roboterbasierten optischen Messsystemen angewendet. Bisherige Anwendungen dieser Methode waren vor allem im Bereich der Gesichtserkennung zu finden (VIOLA und JONES 2001, 2004) oder wurden unter anderem zum Finden von QR-Codes in Bildern eingesetzt (BELUSSI und HIRATA 2011). P 4 zeigte somit einen neuen Anwendungsfall dieser Methode für die Fertigungsmesstechnik auf. Durch eine verstärkte Berücksichtigung von überbelichteten Projektionsprimitiven während des Trainings könnten dabei die Detektionsraten weiter gesteigert werden. Darüber hinaus ist die Vordetektion von Primitiven nicht rotationsinvariant. Bei nicht-rotationssymmetrische Formen muss dies berücksichtigt werden, bspw. durch die Darstellung der Projektionsprimitive unter Berücksichtigung der Sensorpose oder durch Trainieren von Modellen mit gedrehten Bilddaten, wobei letzteres im Rahmen von P 4 nicht untersucht wurde. Eine weitere Einschränkung besteht im Hinblick auf die Oberflächeneigenschaften der betrachteten Bauteile. Während die Vordetektion anhand von unbehandelten Blechbauteilen aus der Automobilindustrie erprobt und validiert wurde, ist deren Anwendung für stärker spiegelnde Oberflächen noch mit erhöhten Unsicherheiten verbunden und sollte daher zukünftig tiefergehend betrachtet werden. Zudem sollte auch die Leistungsfähigkeit der Methode hinsichtlich der Detektion komplexerer Formen untersucht werden, um Projektionsprimitive auch in Abstimmung auf die projizierte Darstellungsweise gestalten zu können.

Die Parametrierung geeigneter virtueller Strukturen zur paarweisen Feinregistrierung von Punktwolken mittels ICP-Algorithmus wird in P 5 präsentiert, wodurch in Verbindung mit P 3 und P 4 erst eine für die Praxis anwendbare Verkettungs-

strategie des Lösungskonzepts aus P 1 ermöglicht wurde. Dafür wurde zunächst eine konzipierte Vorgehensweise zur Auswahl und Evaluierung geeigneter Projektionsprimitive bzw. virtueller Strukturen vorgestellt. Auf Basis simulativer und experimenteller Untersuchungen wurden anschließend verschiedene virtuelle Strukturen qualifiziert, wobei zwei Konfigurationen als vielversprechend für praktische Anwendungen identifiziert worden sind: zum einen drei säulenartige Strukturen mit zunehmenden Punktabstand, wobei diese in einem Dreieck angeordnet sein sollten, und zum anderen eine einzelne würfelartige Struktur. Für diese Strukturen wurde die Leistungsfähigkeit der realisierten Verkettungsstrategie von Punktwolken erstmalig an einem realen Anwendungsbeispiel der Automobilindustrie und unter Einsatz industrieller Systemtechnik demonstriert.

P 5 zeigt somit eine geeignete Punktwolken-Augmentierung für bereichsspezifisch bereitgestellte Projektionsprimitive auf. In der Literatur fand sich ein Vorgehen zur Umwandlung von projizierten Referenzelementen in räumliche Strukturen von ULRICH (2018), wobei dieser die Textur des gesamten Überlagerungsbereichs heranzog und damit Punktwolken anhand einer festgelegten Parametrierung augmentierte und registrierte. Das in P 5 eingeführte Vorgehen unterscheidet sich darin, dass die Augmentierung ausschließlich für die selektiv eingebrachten Projektionsprimitive erfolgte. Dazu wurden für bereichsspezifisch applizierte Projektionsprimitive erstmalig relevante Einflussfaktoren erfasst und in einer Vorgehensweise zur Qualifizierung zusammengetragen. Die durchgeführte Qualifizierung virtueller Strukturen hat somit einen wichtigen Beitrag zu einem tiefgreifenderen Verständnis auf das Registrierungsverhalten von augmentierten Punktwolken auf Basis virtueller Strukturen und des ICP-Algorithmus geleistet. Durch eine quantitative Modellierung der Einflussfaktoren auf die Registrierung könnte der zu erwartende Ausrichtungsfehler genauer spezifiziert werden. Zudem sollte die Registrierung mithilfe von virtuellen Strukturen, die auf einem einzelnen Projektionsprimitiv aufbauen, optimiert werden, da diese zu einer flexibleren Anwendung der Verkettungsstrategie beitragen.

Die Evaluierung in P 5 untersuchte abschließend die Genauigkeitssteigerung der Verkettungsstrategie. Eine paarweise Ausrichtung von Punktwolken erreichte dabei auf der merkmalsarmen Außenseite der Automobiltür mithilfe der drei säulenartigen Strukturen eine durchschnittliche Kugelabstandsabweichung von 0,034 mm. Im Gegensatz dazu lag der Fehler bei der Ausrichtung mittels Roboterkinematik bei 0,809 mm. Unter der Annahme, dass der Fehler sich überwiegend aus translatorischen Abweichungen zusammensetzt, sind die Simulationsergebnisse (translatorischer Fehler von 0,046 mm bei einem Gauß'schen Rauschen von $\sigma = 0,015$ mm und einer Punktdichte von 0,114 mm) somit als erste konservative Schätzung für den zu erwartenden Ausrichtungsfehler durch die Verkettungsstrategie einzuordnen. Darüber hinaus ließ sich die Fehlerfortpflanzung infolge der sequenziellen Verkettungen beobachten. Dies zeigte sich durch die erhöhten Abweichungen von 0,054 mm bzw. 0,070 mm bei der Verkettung von drei Punktwolken. Obwohl der Gesamtfehler mit zunehmender Anzahl an paarweisen Ausrichtungen zunahm, war die Abweichung im Vergleich zur Roboterkinematik (0,762 mm bzw. 1,089 mm) für den betrachteten Anwendungsfall

dennoch als deutlich geringer einzustufen. Darüber hinaus konnte im betrachteten Validierungsszenario beobachtet werden, dass eine Registrierung mittels ICP-Algorithmus aber ohne Berücksichtigung der Verkettungsstrategie ebenfalls höhere Abweichungen aufwies (siehe P 5), was den Einsatz bereichsspezifischer Projektionen als Registrierungshilfe bzw. den Einsatz der Verkettungsstrategie bekräftigte. Bei der Validierung wurden unterschiedlich komplexe flächenhafte Bauteiloberflächen untersucht (vgl. P 5). Oberflächen, mit bspw. sehr starken Tiefenschwankungen, Hinterschneidungen oder Ecken, stellen für gewöhnlich eine erhöhte Herausforderung für optische 3D-Sensoren in Bezug auf die Messdatenerfassung dar. Für derartige Szenarien sind weiterführende Versuche notwendig, um die Einsetzbarkeit zu erproben und die genannten Genauigkeiten dort zu bestätigen. Darüber hinaus liegen erzielbare Messunsicherheiten von industriellen KMGs beispielsweise bei ungefähr 0,020 mm, vgl. verwendete Systemtechnik in (BAUER, HECKLER et al. 2021). Diese Genauigkeit konnte im Rahmen der Verkettungsstrategie nicht erreicht werden. Zu einer ähnlichen Erkenntnis gelangte auch ULRICH (2018, S. 133) im Zuge der Validierung seines Registrierungsansatz im Labormaßstab.

In Ergänzung zur vorangegangenen Reflexion der eingebundenen Publikationen P 1–P 5 wird im Folgenden eine weiterführende Betrachtung der realisierten Verkettungsstrategie von Punktwolken durchgeführt, um die praktischen Einsatzmöglichkeiten für die geometrische Qualitätsprüfung weiter aufzuzeigen, tieferes Verständnis für die Anwendbarkeit aufzubauen und die Übertragbarkeit zu plausibilisieren.

Die Evaluierung der realisierten Verkettungsstrategie von Punktwolken erfolgte an einem Karosserieanbauteil. Die gewählte Automobiltür wies dabei anspruchsvolle Oberflächenprägungen auf, da die Außenseite aus einer überwiegend merkmalarmen Oberfläche bestand, wohingegen die Innenseite durch viele Merkmale, wie gekrümmte Flächen oder Löcher, gekennzeichnet war. Die Anwendbarkeit und der Nutzen der untersuchten Strategie basierend auf bereichsspezifischen Projektionen und virtuellen Strukturen konnte auf beiden Seiten des Bauteils belegt werden (vgl. P 5). Eine Übertragbarkeit auf ähnliche Bauteile hinsichtlich der geometrischen Gestalt und innerhalb des Spektrums der beschriebenen Ausprägungsformen ist als wahrscheinlich anzunehmen, da mit vergleichbaren Anwendungsbedingungen für die Verkettungsstrategie zu rechnen ist. So lassen sich weitere Einsatzmöglichkeiten finden, beispielsweise bei der Digitalisierung von Dächern oder Motorhauben. Dabei sind stellenweise verfügbare, möglichst ebene Bauteilbereiche erforderlich sowie eine diffus-reflektierende Oberfläche zu bevorzugen, um die Darstellbarkeit von Projektionsprimitiven auf Bauteilen und deren Erfassung durch einen 3D-Sensor zu gewährleisten. Mit zunehmender Anzahl an Oberflächenmerkmalen reduzieren sich die Möglichkeiten, Projektionsprimitive bereichsspezifisch bereitzustellen. Infolgedessen resultieren erhöhte Anforderungen an die Messposenplanung, um den Registrierungsvorgang entsprechend der Verkettungsstrategie durchzuführen. Für stark spiegelnde oder absorbierende Oberflächen ist der Einsatz der präsentierten Verkettungsstrategie zu erproben.

Abschließend wird nun das übergeordnete Ergebnis der Dissertation – die realisierte und validierte Verkettungsstrategie von Punktwolken – im Kontext der in Kapitel 1 formulierten Zielsetzung betrachtet. Dafür werden die aufgestellten Forschungsfragen (FF) herangezogen und hinsichtlich deren Beantwortung im Rahmen dieser Arbeit beleuchtet.

FF 1 adressiert die Fragestellung, in welcher Weise moderne Projektoren eingesetzt werden können, um zu einer präzisen Ausrichtung von Teilansichten für roboterbasierte optische Messsysteme beizutragen. Diesbezüglich wurde aufbauend auf dem Stand des Wissens ein Lösungskonzept abgeleitet, welches bereichsspezifische Projektionen und virtuelle Strukturen in Verbindung mit einem ICP-Algorithmus vorsieht. Die detaillierte Beschreibung des Konzepts in P 1 sowie der Nachweis der technischen Machbarkeit in P 5 zeigten somit erfolgreich eine Möglichkeit auf, wie Digital-Projektoren zur genauen Registrierung von Punktwolken eingesetzt werden können.

FF 2 thematisiert die Umsetzbarkeit einer automatisierten und flexiblen Bereitstellung von adaptierten Projektionen im Kontext roboterbasierter optischer Messsysteme. Diesbezüglich wurde in P 3 ein neuartiger Ansatz zur Kalibrierung und Modellierung von Digital-Projektoren erarbeitet, um anschließend abgestimmte Projektionsbilder zu generieren.

FF 3 adressiert die Fragestellung hinsichtlich einer abgestimmten Bildverarbeitungskette zur Detektion von projizierten Referenzelementen. Im Hinblick auf bereichsspezifische Projektionen wird in P 4 ein geeignetes Vorgehen vorgestellt. Dieses basiert auf einer ML-Methode zur Vordetektion von Projektionsprimitiven und sieht anschließend klassische Methoden zur Referenzpunktbestimmung vor (vgl. Abschnitt 3.4.2). Diese Kombination erwies sich bei zahlreichen Untersuchungen und Experimenten als zielführend, um den anspruchsvollen Lichtbedingungen in zuverlässiger Weise gerecht zu werden. Bei der Detektion konnten Sensitivitäten und Genauigkeiten von über 90 % erreicht werden (vgl. P 4). In den übrigen Fällen (ca. 10 %) fand kein oder nur ein unzureichendes Detektieren der projizierten Referenzelemente statt. An dieser Stelle ist nicht auszuschließen, dass andere Methoden oder Methodenkombinationen ähnliche oder gegebenenfalls noch bessere Detektionsergebnisse erreichen können. Nachdem dies die Leistungsfähigkeit der untersuchten Verkettungsstrategie von Punktwolken jedoch weiter steigern dürfte, ist dieser Umstand nicht als limitierender Faktor oder Einschränkung zu werten.

FF 4 greift die Zielsetzung dieser Arbeit auf und beinhaltet die Frage nach der möglichen Genauigkeitssteigerung bei der Verkettung von Punktwolken für roboterbasierte optische Messsysteme unter Einsatz von Digital-Projektoren. Zum Vergleich wurde eine Ausrichtung von Teilansichten auf Basis der Roboterkinematik herangezogen. Als Gütemaß für die Ausrichtungsqualität von Punktwolken wurde die etablierte Kenngröße Kugelabstandsabweichung verwendet, die an einem Beispielbauteil anhand verschiedener Verkettungsszenarien ermittelt wurde (vgl. P 5). Für die qualifizierte Konfiguration bestehend aus drei säulenartigen virtuellen Strukturen in Dreiecksanordnung konnte dabei eine Genauigkeits-

steigerung um den Faktor 14,1–23,7 gegenüber der Ausrichtung auf Basis der Roboterkinematik erzielt werden. Eine einzelne würfelartige virtuelle Struktur erreichte dabei ebenfalls eine Genauigkeitssteigerung um den Faktor 1,4–4,7 gegenüber der Roboterkinematik.

Für die in dieser Arbeit untersuchte Verkettungsstrategie lässt sich somit eine Genauigkeitssteigerung bei der Ausrichtung von Punktwolken attestieren. Damit kann auch das gesetzte Ziel der vorliegenden Dissertation als erreicht angesehen werden. Im Hinblick auf eine Prüfmittleignung ist der zu erwartende Gesamt-messfehler in Verbindung mit dem zulässigen Toleranzbereich des jeweiligen Prüfmerkmals zu betrachten. Daher ist stets eine anwendungsspezifische Prüfung der Einsetzignung von Messsystemen vorzunehmen und auch bei der Anwendung der Verkettungsstrategie von Punktwolken für roboterbasierte optische Messsysteme zu empfehlen.

Die vorliegende Dissertation leistet insgesamt einen Beitrag zur Verbesserung von roboterbasierten optischen Messsystemen. Insbesondere die ganzheitliche Betrachtung von projizierten Referenzelementen im Hinblick auf die genaue Ausrichtung von Teilansichten optischer 3D-Sensoren stellt dabei den Kern dieser Arbeit dar. Dies umfasst zum einen die computergestützte Anbindung und Integration von modernen Digital-Projektoren in roboterbasierte optische Messsysteme. Zum anderen wird die Interaktion von Projektionen mit der zugrunde liegenden Bauteiloberfläche tiefergehend betrachtet und konzeptionell in den entsprechenden Datenverarbeitungsprozessen berücksichtigt. In der Folge wurden neue Ansätze zur Bereitstellung von Projektionen, zur Detektion von projizierten Referenzelementen sowie zur Registrierung von Punktwolken erarbeitet und wissenschaftlich untersucht. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden der wissenschaftlichen Gemeinschaft in Form von Publikationen zugänglich gemacht und bieten Anregungen für weitere Innovationen in der Fertigungsmesstechnik.

7.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Bei dem Einsatz von produktionstechnischen Systemen ist neben der technischen Befähigung auch deren Wirtschaftlichkeit von Bedeutung. Daher wird das der Dissertation zugrunde liegende Lösungskonzept (Abschnitt 4.2) aus ökonomischer Perspektive betrachtet. Dazu soll der monetäre Nutzen im Vergleich zu etablierten Verfahren der geometrischen Qualitätsprüfung eingeordnet werden.

Diesbezüglich wurde in der eingebundenen Publikation P 6 eine umfassende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung unter Einbezug einer mit Fachkundigen durchgeführten Studie veröffentlicht. Auf das methodische Vorgehen und die Ergebnisse wird in den nachfolgenden Ausführungen Bezug genommen. Die Wirtschaftlichkeit wird dabei anhand der entstehenden Kosten für ein Prüfzenario bestimmt (Kostenvergleichsrechnung). Ziel dieser Betrachtung ist es, eine Einschätzung auf Basis von Fachkundigen für einen repräsentativen Anwendungsfall mit Bezug zu realen Rahmenbedingungen und praxisnahen Gegebenheiten abzuleiten.

Neben dem Lösungskonzept dieser Arbeit werden dazu folgende etablierte Messsysteme als Technologiealternativen (TA) für die geometrische Qualitätsprüfung betrachtet: ein KMG, ein roboterbasiertes Messsystem unter Einsatz eines Lasertrackers sowie ein roboterbasiertes Messsystem unter Einsatz von physischen Zielmarken und photogrammetrischen Methoden. Diese sind schematisch zur Veranschaulichung in Abb. 7.1 dargestellt.

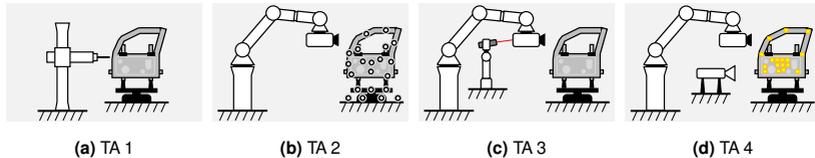


Abbildung 7.1: Betrachtete Technologiealternativen (TA) für die Kostenvergleichsrechnung: KMG (TA 1), roboterbasiertes Messsystem mit physischen Zielmarken (TA 2), mit Lasertracker (TA 3) oder mit bereichsspezifischen Projektionen und virtuellen Strukturen (TA 4).

Für einen einheitlichen Bezugsrahmen der Bewertung wurde anschließend ein repräsentativer hypothetischer Prüfauftrag der Automobilindustrie definiert. Diesbezüglich wird eine Automobiltür als Prüfobjekt eingeführt, das erstmalig inspiziert wird und 500 Prüfmerkmale umfasst. Das Szenario schafft ein einheitliches Verständnis der zugrunde liegenden Situation für Fachkundige, wodurch eine praxisnahe Beurteilung und Abschätzung von Kenngrößen möglich wird. Für diesen Prüfauftrag werden die entstehenden Kosten in Abhängigkeit der einzelnen TA ermittelt.

Das Vorgehen zur Kostenrechnung ist angelehnt an die vorgestellten Methodiken zur strategischen Bewertung von Fertigungstechnologien nach REINHART et al. (2011) und SCHINDLER (2014), wobei im Rahmen dieser Bewertung überwiegend die Methoden zur finanziellen Evaluation aufgegriffen und auf Messsysteme adaptiert wurden (vgl. P 6).

Dabei wurden die Personalkosten pro Stunde \mathcal{K}_P , Installations- und Inbetriebnahmekosten (Entwicklungskosten) der Messsysteme pro Stunde \mathcal{K}_{In} sowie der entsprechende Maschinenstundensatz \mathcal{K}_M berücksichtigt. Letzteres wurde nach HORSCH (2020, S. 146 ff.) kalkuliert. Der Zusammenhang der Kosten pro Prüfauftrag $\mathcal{K}_{Prüfauftrag}$ ist vereinfacht in Gleichung (7.1) dargestellt.

$$\mathcal{K}_{Prüfauftrag} = (\mathcal{K}_P + \mathcal{K}_{In} + \mathcal{K}_M) \cdot t_{Dauer} \quad (7.1)$$

Für eine Aufschlüsselung der einzelnen Kostenpunkte und die Zeitangaben t_{Dauer} pro Prüfauftrag für alle TA wird an dieser Stelle auf die tabellarische Übersicht in Veröffentlichung P 6 verwiesen. Die jeweiligen Zahlenwerte basieren dabei auf Angaben aus der Literatur, fundierten Schätzwerten der Autoren oder wurden anhand einer Studie mit 27 teilnehmenden Fachkundigen ermittelt.

Des Weiteren erfolgt die Berechnung in Form einer statischen Investitionsrechnung, sodass der zeitliche Verlauf bei finanziellen Aufwänden, beispielsweise bei der Ermittlung des Maschinenstundensatzes, nicht berücksichtigt wird. Die Kostenvergleichsrechnung wurde anschließend für den definierten Anwendungsfall und die einzelnen TA durchgeführt. Tabelle 7.1 beinhaltet die resultierenden Kosten. Diese zeigen den finanziellen Aufwand pro Prüfauftrag sowie für ein einzelnes Prüfmerkmal.

Tabelle 7.1: Resultierende Kosten für die betrachteten Messsysteme und das zugrunde gelegte Prüfzenario (basierend auf der Kostenvergleichsrechnung aus Publikation P 6)

Technologiealternative (TA)	TA 1	TA 2	TA 3	TA 4
Kosten pro Prüfauftrag	2238 €	1312 €	1640 €	1066 €
Kosten pro Prüfmerkmal	4,48 €	2,62 €	3,28 €	2,13 €

Die Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Technologien spiegelt sich in den resultierenden Kosten für den gleichen Prüfauftrag wider. Infolge wird das Einsparpotenzial deutlich. Dieser Aspekt ist in Abb. 7.2a graphisch verdeutlicht, wobei die Kostenreduktion auf TA 4 bezogen dargestellt wird. In Abhängigkeit der jeweiligen Dauer für einen Prüfauftrag und unter der Annahme einer Vollauslastung der Messsysteme über ein Jahr hinweg zeigt Abb. 7.2b die resultierende Anzahl an theoretisch durchführbaren Prüfaufträgen. Mit dem Ziel einer ressourcenschonenden Qualitätsprüfung sind beide Aspekte relevant. Einerseits sollen generell Kosten jeglicher Art reduziert werden. Andererseits sind in Abstimmung mit der Produktion auch die notwendigen Kapazitäten eines Messsystems abzuschätzen.

Aus Abb. 7.2a geht hervor, dass sich durch den Einsatz des Lösungskonzepts auf Basis von bereichsspezifischen Projektionen und virtuellen Strukturen für roboterbasierte optische Messsysteme (TA 4) im Vergleich zu einem KMG Kosteneinsparungen von 52 % erreichen lassen. Zu alternativen roboterbasierten Verfahren (TA 2 und TA 3) liegt die Reduktion der Kosten bei 19 % bzw. 35 %. Aufgrund kürzerer Prüfzeiten lässt sich auch die Kapazität an durchführbaren Prüfaufträgen steigern, was in Abb. 7.2b dargestellt ist. Im Vergleich zu TA 1

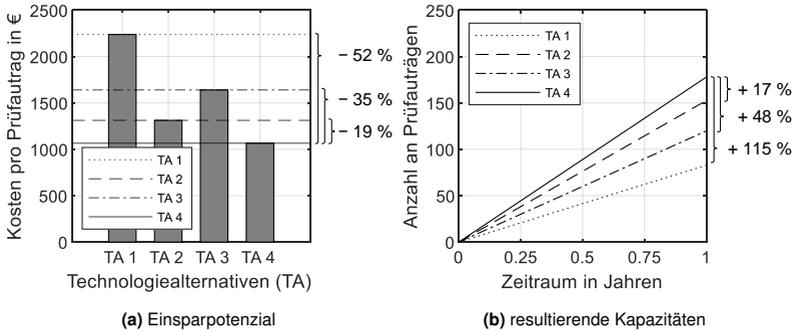


Abbildung 7.2: Kostenvergleich und Kapazitätsauslastung verschiedener Technologiealternativen für das zugrunde gelegte Prüfzenario

erlaubt das Lösungskonzept dieser Arbeit (TA 4) ein gesteigertes Volumen an Prüfaufträgen pro Jahr um 115 %, bzw. um 17 % für TA 2 und um 48 % für TA 3.

Zur Durchführbarkeit der Kostenvergleichsrechnung wurden vereinfachende Annahmen getroffen. So wurde für TA 4 eine vergleichbare Technologiereife zu den anderen Technologien und die technische Machbarkeit für den Prüfauftrag als gegeben angesehen. Dabei wurde für TA 4 eine Messunsicherheit von 0,1 mm/m kommuniziert. Dies ist in Anbetracht der Validierungsergebnisse aus P 5 als realistisch einzustufen.

Darüber hinaus wurden keine Synergieeffekte zu anderen Prüfaufträgen berücksichtigt. Ebenso wurde die Möglichkeit, einzelne Arbeitsschritte zu parallelisieren, nicht betrachtet. Ferner wurden einige Werte zur Kostenrechnung über eine Abfrage von Fachkundigen und deren Einschätzungen erhoben, die auch individuellen Erfahrungswerten und unterschiedlich ausgeprägten Expertisen unterliegen. Des Weiteren ist im Hinblick auf die Prognosefähigkeit der beschriebenen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung auf andere Szenarien die Wahl des Bauteils als repräsentative Referenz sowie die vorherrschenden Produktionsbedingungen zu reflektieren. Für Bauteile gleicher Dimensionen sowie vergleichbarer Komplexität und Anzahl an Prüfmerkmalen in einer variantenreichen Produktion ist von einem geringen Anpassungsaufwand der Kalkulation auszugehen. Für stark abweichende Szenarien ist die Kostenrechnung entsprechend zu modifizieren und erneut durchzuführen, wobei auf die Methodik aus P 6 zurückgegriffen werden kann. Grundsätzlich sind für die Auswahl geeigneter Messsysteme in industriellen Anwendungen sowohl die technischen als auch die wirtschaftlichen Aspekte zu berücksichtigen und gegeneinander abzuwägen. Dabei gilt es vor allem, die individuellen Stärken anwendungsspezifisch bestmöglich einzusetzen.

Für Messsysteme ist es zudem von Vorteil, wenn diese in verschiedenen Industrien bzw. Anwendungsbereichen eingesetzt werden können. Daher wurde eine Einschätzung für ein potenzielles Messsystem basierend auf dem Lösungskonzept dieser Arbeit (TA 4) durch 36 Fachkundige hinsichtlich der besten Einsetzungen

vorgenommen. Dafür wurden vier etablierte Anwendungsindustrien zur Auswahl gestellt: Automobilbereich, Reverse Engineering, Werkzeugbau oder Luftfahrt. Die Auswertung ist in Abb. 7.3 dargestellt.

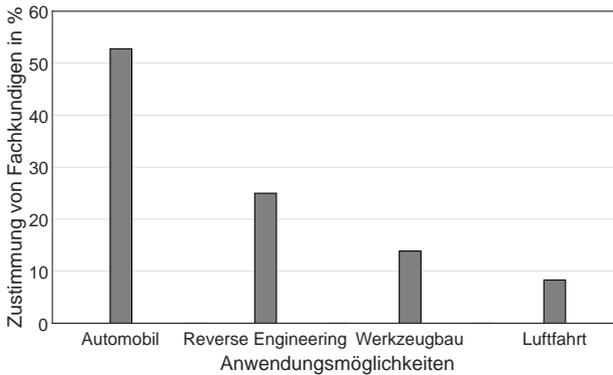


Abbildung 7.3: Einschätzung von Fachkundigen hinsichtlich der besten Einsatzgebung von TA 4

Im Rahmen der Dissertation wurde der Anwendungsfall eingangs auf die Automobilindustrie festgelegt, da hier mit dem größten Nutzen für die Verkettungsstrategie von Punktwolken für roboterbasierte optische Messsysteme (TA 4) gerechnet wurde. Diese Einschätzung wird auch von 53 % aller befragten Fachkundigen geteilt. 25 % sehen das größte Potenzial von TA 4 im Bereich des Reverse Engineerings. Vereinzelt wurde eine äußerst hohe Eignung auch für den Formen- und Werkzeugbau oder die Luftfahrt bekundet. Letztere weist Bauteile von sehr hohen Dimensionen auf, beispielsweise ein Flugzeugrumpf oder Tragflügel. Daher wird vom Autor der vorliegenden Arbeit vermutet, dass Fachkundigen aufgrund der Fehlerfortpflanzung des zugrunde liegenden Registrierungsprinzips von TA 4 die Einsatzgebung verstärkt in den anderen Anwendungen sehen.

Insgesamt lässt sich für die Verkettungsstrategie von Punktwolken für roboterbasierte optische Messsysteme (TA 4) ein wirtschaftliches Potenzial gegenüber etablierten Verfahren der Fertigungsmesstechnik festhalten.

Kapitel 8

Schlussbetrachtung

8.1 Zusammenfassung

Die Produktion sieht sich veränderten Rahmenbedingungen ausgesetzt. Diese Veränderungen haben Auswirkungen auf die Fertigungsmesstechnik als technischer Befähiger der Qualitätsprüfung. Daraus resultieren vor allem erweiterte Systemanforderungen und die Forderung nach neuartigen Messsystemen.

Roboterbasierte optische Messsysteme, bei denen ein flexibler, aber kinematisch ungenauer Industrieroboter einen optischen 3D-Sensor durch den Arbeitsraum führt, bergen großes Potenzial. Für die geometrische Qualitätsprüfung größerer Prüfobjekte steht dabei als zentrale Herausforderung das präzise Ausrichten mehrerer Teilansichten zu einer Gesamtaufnahme im Vordergrund. Als besonders vielversprechend werden im Rahmen dieser Arbeit Feinregistrierungsansätze zur Ausrichtung von Teilansichten (Punktwolken) erachtet. Sie vollziehen ein algorithmisches (iteratives) Ausrichten auf Basis zweier sich überlagernder Punktwolken und nutzen dabei die hohe Messgenauigkeit aktueller 3D-Sensoren aus. Da die Teilansichten zur Prüfung geometrischer Oberflächenmerkmale ohnehin erfasst werden müssen und somit zur Verfügung stehen, bieten solche Ansätze die Chance, zu einer effektiven und ressourcenschonenden Qualitätsprüfung beizutragen. Infolgedessen gilt es, geeignete Alternativen zu etablierten Verfahren wie kostenintensive Lasertracker oder das manuelle und zeitaufwändige Aufbringen von physischen Zielmarken in Verbindung mit photogrammetrischen Methoden zu entwickeln.

Mit dieser Arbeit wurde somit das Ziel verfolgt, einen neuartigen Registrierungsansatz zum präzisen Ausrichten von Teilansichten für roboterbasierte optische Messsysteme zu erforschen. Da der Erfolg von Algorithmen zur Feinregistrierung in der Regel von der Ausprägung der auszurichtenden Oberflächen abhängt, ist eine geeignete Bereitstellung unterstützender Informationen für den Registrierungsprozess vorzusehen. Diesbezüglich soll die Einsatzfähigkeit und die Leistungsfähigkeit von modernen Digital-Projektoren erprobt werden. Daher wurde aufbauend auf dem Stand des Wissens ein geeignetes Lösungskonzept erarbeitet und in einer Strategie zum Verketten von Punktwolken für roboterbasierte optische Messsysteme umgesetzt.

Zur Realisierung des abgeleiteten Lösungskonzepts wurde eine Vorgehensweise festgelegt, welche die Bearbeitung definierter Aufgabenfelder vorsieht. Aufgrund der inhaltlichen Modularität konnten die erarbeiteten Ergebnisse und Erkenntnisse in thematisch abgegrenzten Veröffentlichungen für die wissenschaftliche Gemeinschaft aufbereitet werden. Infolgedessen wurde auch die Ausarbeitung der vorliegende Arbeit in Form einer publikationsbasierten Dissertation für sinnvoll erachtet.

Das Lösungskonzept sieht den Einsatz von bereichsspezifischen Projektionen und virtuellen Strukturen vor. Dabei handelt es sich um projizierte Zielmarken, die ausschließlich auf dedizierten Bauteilregionen dargestellt werden. Diese werden von einem 3D-Sensor zusätzlich zu den Punktwolken in Form von Grauwertinformationen erfasst. Anhand der aufgenommenen Zielmarken und mithilfe einer geeigneten Bildverarbeitungskette werden Referenzpunkte extrahiert, um virtuelle Strukturen in den gemessenen Punktwolken künstlich zu generieren. Die augmentierten Punktwolken werden anschließend mit einem Feinregistrierungsalgorithmus ausgerichtet und erzielen so ein deutlich verbessertes Konvergenzverhalten. Infolgedessen wird die Ausrichtungsqualität zweier Punktwolken gesteigert.

Neben der theoretischen Ausarbeitung des neuen Konzepts für roboterbasierte optische Messsysteme (P 1) wurde auch ein praxisnaher Ansatz zur Modellierung und Kalibrierung eines Digital-Projektors eingeführt und umgesetzt (P 3). Dieser ermöglicht es, bereichsspezifische Projektionen in Form von Zielmarken automatisiert und flexibel auf Bauteilen darzustellen. Darüber hinaus wurde eine geeignete Bildverarbeitungskette erarbeitet (P 4), die unter komplexen Lichtbedingungen eine zuverlässige Detektion von projizierten Zielmarken erlaubt. Des Weiteren wurde in P 5 das Registrierungsverhalten für verschiedene projizierte Zielmarken und virtuelle Strukturen untersucht, um Handlungsanweisungen für den praktischen Einsatz zu erarbeiten. Die realisierte Verkettungsstrategie von Punktwolken erzielte an einem Anwendungsbeispiel aus der Automobilindustrie eine deutliche Genauigkeitssteigerung im Vergleich zu Ausrichtungen auf Basis der Roboterkinematik.

Für die genauigkeitorientierte Verkettungsstrategie von Punktwolken wurden sowohl die technische Machbarkeit als auch der Nutzen im Rahmen dieser Dissertation herausgearbeitet. Das zugrunde liegende Lösungskonzept adressierte dabei zum einen die Anwendbarkeit der Strategie auf ein breites Bauteilspektrum. Zum anderen wurde der Anspruch gehegt, die Einsetzbarkeit des Konzepts an industriell eingesetzter Systemtechnik zu demonstrieren. Für den Betrachtungsrahmen einer sequenziellen, paarweisen Verkettung konnte die zugrunde liegende Arbeit somit den praktischen Nutzen für die industrielle Anwendung erstmalig aufzeigen. Insofern ist die Verkettungsstrategie als Alternative zu etablierten Verfahren für die Ausrichtung von Teilansichten einzuordnen, wobei hohe Investitionskosten vermieden sowie zeitliche und manuelle Aufwände reduziert werden können. Die vorliegende Dissertation leistet somit einen Beitrag zu einer effektiven, ressourcenschonenden geometrischen Qualitätsprüfung.

8.2 Ausblick

Abschließend werden mögliche Anknüpfungspunkte an die vorliegende Dissertation und weiterführende Forschungstätigkeiten aufgezeigt. Der Ausblick soll diesbezüglich vor allem zu weiterführenden Lösungen, neuen Fragestellungen und Forschungsideen anregen, um innovative Ansätze für die geometrische Qualitätsprüfung voranzubringen.

Der Einsatz neuer Generationen an optischen Geräten mit verbesserten technischen Spezifikationen – sowohl von 3D-Sensoren als auch von Digital-Projektoren – verspricht einen positiven Einfluss auf die erarbeitete Verkettungsstrategie von Punktwolken. Diesbezüglich könnte beispielsweise mit einem 4K-Projektor die Auflösung im Vergleich zu dem eingesetzten Projektionssystem vervierfacht werden. Infolgedessen wird die Darstellungsqualität von Projektionsprimitiven signifikant gesteigert. Darüber hinaus könnte noch stärker die Fähigkeit zur Modifikation von darzustellenden Projektionen in Betracht gezogen werden. Eine photometrische Kalibrierung im Arbeitsbereich des roboterbasierten optischen Messsystems würde zusätzlich eine Anpassung der Helligkeit in Abhängigkeit des Projektionsortes auf einem Bauteil erlauben. Dies könnte die Anzahl an erfassten überbelichteten Projektionsprimitiven deutlich reduzieren. Im Zuge der erprobten Bildverarbeitungskette (P 4) erwies sich die zuverlässige Detektion derartiger Zielmarken als schwierig.

Im Rahmen der Arbeit wurde von einem stationären Projektionssystem Gebrauch gemacht. Zur erstmaligen Umsetzung und Erprobung des Lösungskonzepts war dies zielführend. Um die Einsetzbarkeit der Verkettungsstrategie weiter zu steigern, wird die Verwendung eines zweiten Industrieroboters als vielversprechend erachtet. Dieser könnte das Projektionssystem in Abstimmung mit den entsprechenden Messposen im Arbeitsraum bewegen. Dabei ist zunächst der Einfluss der Posegenauigkeit des zweiten Industrieroboters auf die Bereitstellung von bereichsspezifischen Projektionen zu untersuchen. Ebenso wäre eine Projektorposenplanung zu konzipieren, sodass Referenzprojektionen stationär bei der Erfassung zweier sich überlagernder 3D-Aufnahmen bereitgestellt werden können. Die gesteigerte Flexibilität kommt jedoch mit einer erhöhten Systemkomplexität einher, die es durch entsprechende Lösungen zu beherrschen gilt. Dieser Aspekt wurde auch von ULRICH (2018, S. 143) als mögliche Weiterentwicklungsmaßnahme beim Einsatz von Projektionen thematisiert.

Des Weiteren sollte in Zukunft die vollständige Integration der Verkettungsstrategie in roboterbasierte optische Messsysteme anvisiert werden. Dies umfasst die Implementierung einer automatischen Offline-Messposenplanung. Neben den zu prüfenden Merkmalen sind dabei auch die Anforderungen aus der Verkettungsstrategie zu berücksichtigen. Insbesondere ist hierbei ein Überlagerungsbereich benachbarter Ansichten vorzusehen. Zusätzlich ist zu diesem eine freie Sichtlinie des Projektionssystems zu gewährleisten sowie eine ausreichende Anzahl an Projektionsprimitiven sicherzustellen. Im Falle, dass eine vollständige digitale Objektrekonstruktion angestrebt wird, ist die Verkettungsstrategie auf eine Si-

multanregistrierung zu erweitern, sodass mehr als zwei Punktwolken gleichzeitig im Verbund zueinander ausgerichtet werden können. Dabei entstehen neue Anforderungen, die im Hinblick auf die bestehenden Handlungsanweisungen zu prüfen sind und anschließend entsprechend berücksichtigt werden müssen.

Ferner könnte als weiterführende Forschungstätigkeit auch die Eignung untersucht werden, inwieweit sich ein derartiges System als autonomes Prüfsystem umsetzen lässt, beispielsweise in Anlehnung an das Konzept einer skill-basierten Modellierung, wie es in (BAUER, GONNERMANN et al. 2019) konzeptionell für roboterbasierte optische Messsysteme angedacht wurde.

Literaturverzeichnis

- ABELE, E. und REINHART, G., (2011). *Zukunft der Produktion. Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen*. München: Carl Hanser Verlag. ISBN: 978-3-446-42595-8. DOI: 10.3139/9783446428058.
- AHN, S. J., (1997). „Kreisförmige Zielmarke (Circular Target)“. In: *Proceedings: 4. ABW Workshop Optische 3D-Formerfassung*.
- ALTINISIK, A. und BOLOVA, E., (2021). „A comparison of off-line laser scanning measurement capability with coordinate measuring machines“. In: *Measurement* 168.108228. ISSN: 0263-2241. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108228.
- ANDZIULIS, A., DRUNGILAS, D., GLAZKO, V. und KISELIOVAS, E., (2015). „Resource saving approach of visual tracking fiducial marker recognition for unmanned aerial vehicle“. In: *Advances in Electrical and Electronic Engineering* 13.4, S. 359–366. DOI: 10.15598/aeec.v13i4.1492.
- ARUN, K. S., HUANG, T. S. und BLOSTEIN, S. D., (1987). „Least-Squares Fitting of Two 3-D Point Sets“. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* PAMI-9.5, S. 698–700. ISSN: 1939-3539. DOI: 10.1109/TPAMI.1987.4767965.
- BARONE, S., PAOLI, A. und RAZIONALE, A. V., (2012). „Three-dimensional point cloud alignment detecting fiducial markers by structured light stereo imaging“. In: *Machine Vision and Applications* 23.2, S. 217–229. ISSN: 0932-8092. DOI: 10.1007/s00138-011-0340-1.
- BAUER, P., GONNERMANN, C., MAGAÑA, A. und REINHART, G., (2019). „Autonome Prüfsysteme in der digitalen Fabrik. Skill-basierte Modellierung in der geometrischen Qualitätsprüfung für roboterbasierte Messsysteme“. In: *wt Werkstattstechnik online* 109.5, S. 321–328. ISSN: 1436-4980. DOI: 10.37544/1436-4980-2019-05-23.
- BAUER, P., FINK, F., MAGAÑA, A. und REINHART, G., (2020). „Spatial interactive projections in robot-based inspection systems“. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 107.5-6, S. 2889–2900. ISSN: 0268-3768. DOI: 10.1007/s00170-020-05220-1.

- BAUER, P., GOTTSCHALL, L., MAGAÑA FLORES, A., HOFER, A. und REINHART, G., (2021). „A Technological and Economic Potential Analysis of Measurement Systems in Geometrical Quality Assurance“. In: *Procedia CIRP* 104, S. 1263–1268. ISSN: 2212–8271. DOI: 10.1016/j.procir.2021.11.212.
- BAUER, P., HECKLER, L., WORACK, M., MAGAÑA, A. und REINHART, G., (2021). „Registration strategy of point clouds based on region-specific projections and virtual structures for robot-based inspection systems“. In: *Measurement* 185.1:109963. ISSN: 0263-2241. DOI: 10.1016/j.measurement.2021.109963.
- BAUER, P., LI, F., MAGAÑA FLORES, A. und REINHART, G., (2020). „Accuracy Analysis of Alignment Methods based on Reference Features for Robot-Based Optical Inspection Systems“. In: *Procedia CIRP* 93, S. 1115–1120. ISSN: 2212-8271. DOI: 10.1016/j.procir.2020.04.105.
- BAUER, P. und MAGAÑA, A., (2020). „Verfahren und System zur dreidimensionalen Erfassung einer Szene“. (DE102019114572B3). Deutsches Patent- und Markenamt. (besucht am 26.01.2022). URL: <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=bibdat&docid=DE102019114572B3>.
- BAUER, P., MAGAÑA FLORES, A. und REINHART, G., (2019). „Free-Form Surface Analysis and Linking Strategies for High Registration Accuracy in Quality Assurance Applications“. In: *Procedia CIRP* 81, S. 968–973. ISSN: 2212-8271. DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.236.
- BAUER, P., SCHMITT, S., DIRR, J., MAGAÑA, A. und REINHART, G., (2022). „Intelligent predetection of projected reference markers for robot-based inspection systems“. In: *Production Engineering*. ISSN: 1863-7353. DOI: 10.1007/s11740-022-01118-x.
- BEARDSLEY, P., RASKAR, R., FORLINES, C. und VAN BAAR, J., (2005). „Interactive Projections“. In: *IEEE Computer Graphics and Applications (CG&A)* 25.1, S. 39–43. ISSN: 0272-1716.
- BELUSSI, L. F. F. und HIRATA, N. S. T., (2011). „Fast QR Code Detection in Arbitrarily Acquired Images“. In: *2011 24th SIBGRAPI Conference on Graphics, Patterns and Images*. IEEE, S. 281–288. ISBN: 978-0-7695-4548-6. DOI: 10.1109/SIBGRAPI.2011.16.
- BENNAMOUN, M. und MAMIC, G. J., (2002). *Object Recognition. Fundamentals and Case Studies. Advances in Pattern Recognition*. London Berlin Heidelberg: Springer. ISBN: 1-85233-398-7. DOI: 10.1007/978-1-4471-3722-1.
- BERTAGNOLLI, F., (2006). „Robotergestützte automatische Digitalisierung von Werkstückgeometrien mittels optischer Streifenprojektion“. Dissertation. Universität Karlsruhe.
- BESL, P. J. und MCKAY, N. D., (1992). „A Method for Registration of 3-D Shapes“. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 14.2, S. 239–256. DOI: 10.1109/34.121791.
- BIMBER, O., (2007). „Projector-Based Illumination and Display Techniques“. Habilitation. 406. Technische Universität München.

- BIMBER, O., EMMERLING, A. und KLEMMER, T., (2005). „Embedded Entertainment with Smart Projectors“. In: *Computer* 38.1, S. 48–55. ISSN: 1558-0814. DOI: 10.1109/MC.2005.17.
- BLESSING, L. T. und CHAKRABARTI, A., (2009). *DRM, a Design Research Methodology*. London: Springer-Verlag London. ISBN: 978-1-84882-586-4. DOI: 10.1007/978-1-84882-587-1.
- BREDIES, K. und LORENZ, D., (2011). *Mathematische Bildverarbeitung. Einführung in Grundlagen und moderne Theorie*. 1. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner. ISBN: 978-3-8348-9814-2. DOI: 10.1007/978-3-8348-9814-2.
- BRENNESHOLTZ, M. S. und STUPP, E. H., (2008). *Projection Displays*. 2. Auflage. Wiley series in display technology. Chichester, U.K: J. Wiley and Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-51803-8. DOI: 10.1002/9780470770894.
- BURGESS, G., SHORTIS, M. R. und SCOTT, P., (2011). „Photographic assessment of retroreflective film properties“. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 66.5, S. 743–750. ISSN: 0924-2716. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2011.07.002.
- CALLIERI, M., FASANO, A., IMPOCO, G., CIGNONI, P., SCOPIGNO, R., PARRINI, G. und BIAGINI, G., (2004). „RoboScan: an Automatic System for Accurate and Unattended 3D Scanning“. In: *Proceedings. 2nd International Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission, 2004. 3DPVT 2004*. IEEE, S. 805–812. ISBN: 0-7695-2223-8. DOI: 10.1109/TDPVT.2004.1335398.
- CANNY, J., (1986). „A Computational Approach to Edge Detection“. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence PAMI-8.6*, S. 679–698. DOI: 10.1109/TPAMI.1986.4767851.
- CARL ZEISS OPTOTECHNIK GMBH, (2019). In: *ZEISS COMET Pro AE. Datenblatt*. Hrsg. von CARL ZEISS OPTOTECHNIK GMBH. URL: https://bettamachinetools.com.au/wp-content/uploads/2019/10/ZEISS_COMET_Pro_AE_EN_60_022_0015III.pdf (besucht am 09.02.2022).
- CHEN, J., CRANTON, W. und FIHN, M., Hrsg., (2016). *Handbook of Visual Display Technology*. 2. Auflage. Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG. ISBN: 978-3-319-14345-3. DOI: 10.1007/978-3-319-14346-0.
- CHEN, Y. und MEDIONI, G., (1991). „Object Modeling by Registration of Multiple Range Images“. In: *Proceedings. 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation 3*, S. 2724–2729. DOI: 10.1109/ROBOT.1991.132043.
- CHEN, Z. P., LIN, X. X., LING, X., WANG, Y., HUANG, C. L., LI, Z. W. und SUN, Z. J., (2020). „Design and Detection Algorithm of White-Light Markers in Close-Range Photogrammetry“. In: *Proceedings of the Seventh Asia International Symposium on Mechatronics*. Hrsg. von DUAN, B., UMEDA, K. und HWANG, W. Bd. 589. Lecture Notes in Electrical Engineering. Singapore: Springer Singapore, S. 654–662. ISBN: 978-981-32-9440-0. DOI: 10.1007/978-981-32-9441-7_68.

- CHENG, G. und HAN, J., (2016). „A survey on object detection in optical remote sensing images“. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 117, S. 11–28. ISSN: 0924-2716. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2016.03.014.
- CHOU, T.-H., HO, C.-S. und KUO, Y.-F., (2015). „QR Code Detection Using Convolutional Neural Networks“. In: *2015 International Conference on Advanced Robotics and Intelligent Systems (ARIS)*. IEEE, S. 1–5. ISBN: 978-1-4799-1851-5. DOI: 10.1109/ARIS.2015.7158354.
- CLAUS, D. und FITZGIBBON, A. W., (2005). „Reliable automatic calibration of a marker-based position tracking system“. In: *2005 Seventh IEEE Workshops on Applications of Computer Vision (WACV/MOTION'05) - Volume 1*. IEEE, S. 300–305. ISBN: 0-7695-2271-8. DOI: 10.1109/ACVMOT.2005.101.
- CLAUS, D. und FITZGIBBON, A. W., (2004). „Reliable Fiducial Detection in Natural Scenes“. In: *Computer Vision - ECCV 2004*. Hrsg. von PAJDLA, T. und MATAS, J. Bd. 3024. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, S. 469–480. ISBN: 978-3-540-21981-1. DOI: 10.1007/978-3-540-24673-2_38.
- CRONK, S. und FRASER, C. S., (2006). „Hybrid measurement scenarios in automated close-range photogrammetry“. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVII.Pt B3b*, S. 745–749.
- DEGOL, J., BRETL, T. und HOIEM, D., (2017). „ChromaTag: A Colored Marker and Fast Detection Algorithm“. In: *2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*. IEEE, S. 1481–1490. ISBN: 978-1-5386-1032-9. DOI: 10.1109/ICCV.2017.164.
- DÍEZ, Y., ROURE, F., LLADÓ, X. und SALVI, J., (2015). „A Qualitative Review on 3D Coarse Registration Methods“. In: *ACM Computing Surveys* 47.3, S. 1–36. ISSN: 0360-0300. DOI: 10.1145/2692160.
- DIN EN ISO 10218-1 (2012). *Industrieroboter – Sicherheitsanforderungen – Teil 1: Roboter (ISO 10218-1:2011); Deutsche Fassung EN ISO 10218-1:2011*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 9283 (1998). *Industrieroboter – Leistungskenngrößen und zugehörige Prüfmethoden – (ISO 9283:1998); Deutsche Fassung EN ISO 9283:1998*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DOSHI, A., SMITH, R. T., THOMAS, B. H. und BOURAS, C., (2017). „Use of projector based augmented reality to improve manual spot-welding precision and accuracy for automotive manufacturing“. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 89.5, S. 1279–1293. ISSN: 1433-3015. DOI: 10.1007/s00170-016-9164-5.
- DOSIL, R., PARDO, X. M., FDEZ-VIDAL, X. R., GARCÍA-DÍAZ, A. und LEBORÁN, V., (2013). „A new radial symmetry measure applied to photogrammetry“. In: *Pattern Analysis and Applications* 16.4, S. 637–646. DOI: 10.1007/s10044-012-0281-y.

- DRUON, S., ALDON, M.-J. und CROSNIER, A., (2006). „Color Constrained ICP for Registration of Large Unstructured 3D/Color Data Sets“. In: *2006 IEEE International Conference on Information Acquisition*, S. 249–255. DOI: 10.1109/ICIA.2006.306004.
- DUTSCHKE, W., (2002). *Fertigungsmesstechnik*. 4., überarbeitete Auflage. Stuttgart Leipzig Wiesbaden: Teubner. ISBN: 978-3-519-36322-4. DOI: 10.1007/978-3-322-96810-4.
- EKIM, B., (2011). „A video projection mapping conceptual design and application: YEKPARE“. In: *The Turkish Online Journal of Design, Art and Communication* 1, S. 10–19. DOI: 10.7456/10101100/002.
- FABIJAŃSKA, A., (2012). „A survey of subpixel edge detection methods for images of heat-emitting metal specimens“. In: *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science* 22.3, S. 695–710. DOI: 10.2478/v10006-012-0052-3.
- FALCAO, G., HURTOS, N. und MASSICH, J., (2008). „Plane-based calibration of a projector-camera system“. In: *VIBOT Master* 9.1, S. 1–12.
- FANUC CORPORATION, (2019). In: *M-20iA. Datenblatt*. Hrsg. von FANUC CORPORATION. URL: <https://www.fanuc.eu/~media/files/pdf/products/robots/robots-datasheets-de/m-20ia/ds-m20ia-de.pdf?la=de> (besucht am 09. 02. 2022).
- FENG, T., BINGGUO, L., FENGDONG, C. und GUODONG, L., (2012). „Dots-array Photogrammetry of Flexible Antenna Surfaces“. In: *2012 International Conference on Image Analysis and Signal Processing (IASP)*, S. 1–5. DOI: 10.1109/IASP.2012.6425067.
- FIALA, M., (2005). „ARtag, a fiducial marker system using digital techniques“. In: *2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)*. Bd. 2. IEEE, S. 590–596. ISBN: 0-7695-2372-2. DOI: 10.1109/CVPR.2005.74.
- FIALA, M., (2010). „Designing Highly Reliable Fiducial Markers“. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 32.7, S. 1317–1324. DOI: 10.1109/TPAMI.2009.146.
- FITZGIBBON, A. W., (2003). „Robust registration of 2D and 3D point sets“. In: *Image and Vision Computing* 21.13, S. 1145–1153. ISSN: 0262-8856. DOI: 10.1016/j.imavis.2003.09.004.
- FRASER, C. S., (1997). „Innovations in automation for vision metrology systems“. In: *The Photogrammetric Record* 15.90, S. 901–911. DOI: 10.1111/0031-868X.00099.
- FREUND, Y. und SCHAPIRE, R. E., (1997). „A Decision-Theoretic Generalization of On-Line Learning and an Application to Boosting“. In: *Journal of Computer and System Sciences* 55.1, S. 119–139. ISSN: 0022-0000. DOI: 10.1006/jcss.1997.1504.
- GANCI, G. und BROWN, J., (2001). „Developments in Non-Contact Measurement Using Videogrammetry“. In: *Boeing Large Scale Metrology Seminar*.

- GARRIDO-JURADO, S., MUÑOZ-SALINAS, R., MADRID-CUEVAS, F. J. und MARÍN-JIMÉNEZ, M. J., (2014). „Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion“. In: *Pattern Recognition* 47.6, S. 2280–2292. ISSN: 0031-3203. DOI: 10.1016/j.patcog.2014.01.005.
- GAVAGHAN, K. A., PETERHANS, M., OLIVEIRA-SANTOS, T. und WEBER, S., (2011). „A Portable Image Overlay Projection Device for Computer-Aided Open Liver Surgery“. In: *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 58.6, S. 1855–1864. DOI: 10.1109/TBME.2011.2126572.
- GERKE, W., (2014). *Technische Assistenzsysteme: vom Industrieroboter zum Roboterassistenten*. Berlin, München, Boston: De Gruyter Oldenbourg. ISBN: 978-3-11-034370-0. DOI: 10.1515/9783110343717.
- GODIN, G., RIOUX, M. und BARIBEAU, R., (1994). „Three-dimensional registration using range and intensity information“. In: *Videometrics III*. Hrsg. von EL-HAKIM, S. F. Bd. Proceedings SPIE 2350. International Society for Optics and Photonics. SPIE, S. 279–290. DOI: 10.1117/12.189139.
- HOLZ, D., ICHIM, A.-E., TOMBARI, F., RUSU, R. B. und BEHNKE, S., (2015). „Registration with the Point Cloud Library: A Modular Framework for Aligning in 3-D“. In: *IEEE Robotics & Automation Magazine* 22.4, S. 110–124. ISSN: 1070-9932. DOI: 10.1109/MRA.2015.2432331.
- HORN, B. K. P., (1987). „Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions“. In: *Journal of the Optical Society of America A* 4.4, S. 629–642. DOI: 10.1364/JOSAA.4.000629.
- HORSCH, J., (2020). *Kostenrechnung. Klassische und neue Methoden in der Unternehmenspraxis*. 4. Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler. ISBN: 978-3-658-28238-7. DOI: 10.1007/978-3-658-28239-4.
- HUANG, J., WANG, Z., GAO, J., HUANG, Y. und TOWERS, D. P., (2017). „High-Precision Registration of Point Clouds Based on Sphere Feature Constraints“. In: *Sensors* 17(1).72, S. 1–14. DOI: 10.3390/s17010072.
- IMKAMP, D., SCHMITT, R. und BERTHOLD, J., (2012). „Blick in die Zukunft der Fertigungsmesstechnik“. Die VDI/VDE-GMA Roadmap Fertigungsmesstechnik 2020. In: *tm - Technisches Messen* 79.10, S. 433–439. ISSN: 0171-8096. DOI: 10.1524/teme.2012.0251.
- JÄHNE, B., (2005). *Digitale Bildverarbeitung*. 6., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-540-24999-3. DOI: 10.1007/b138991.
- JOHNSON, A. E. und HEBERT, M., (1999). „Using Spin Images for Efficient Object Recognition in Cluttered 3D Scenes“. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 21.5, S. 433–449. ISSN: 0162-8828. DOI: 10.1109/34.765655.
- JOHNSON, A. E. und BING KANG, S., (1999). „Registration and integration of textured 3D data“. In: *Image and Vision Computing* 17.2, S. 135–147. ISSN: 0262-8856. DOI: 10.1016/S0262-8856(98)00117-6.

- JONES, T. W. und PAPPAS, R. S., (2002). „Dot Projection Photogrammetric Technique for Shape Measurements of Aerospace Test Articles“. In: *40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit*, S. 532. DOI: 10.2514/6.2002-532.
- JOUNG, J. H., AN, K. H., KANG, J. W., CHUNG, M. J. und YU, W., (2009). „3D Environment Reconstruction Using Modified Color ICP Algorithm by Fusion of a Camera and a 3D Laser Range Finder“. In: *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, S. 3082–3088. ISBN: 978-1-4244-3803-7. DOI: 10.1109/IROS.2009.5354500.
- KATO, H. und BILLINGHURST, M., (1999). „Marker Tracking and HMD Calibration for a Video-based Augmented Reality Conferencing System“. In: *Proceedings 2nd IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality (IWAR'99)*. IEEE, S. 85–94. ISBN: 0-7695-0359-4. DOI: 10.1109/IWAR.1999.803809.
- KEFERSTEIN, C. P., MARXER, M. und BACH, C., (2018). *Fertigungsmesstechnik. Alles zu Messunsicherheit, konventioneller Messtechnik und Multisensorik*. 9., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-658-17755-3. DOI: 10.1007/978-3-658-17756-0.
- KIM, H., SONG, S. und MYUNG, H., (2019). „GP-ICP: Ground Plane ICP for Mobile Robots“. In: *IEEE Access* 7, S. 76599–76610. ISSN: 2169-3536. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2921676.
- KIRACI, E., FRANCIOSA, P., TURLEY, G. A., OLIFENT, A., ATTRIDGE, A. und WILLIAMS, M. A., (2017). „Moving towards in-line metrology: evaluation of a Laser Radar system for in-line dimensional inspection for automotive assembly systems“. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 91, S. 69–78. ISSN: 0268-3768. DOI: 10.1007/s00170-016-9696-8.
- KLASING, K., ALTHOFF, D., WOLLHERR, D. und BUSS, M., (2009). „Comparison of Surface Normal Estimation Methods for Range Sensing Applications“. In: *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, S. 3206–3211. ISSN: 1050-4729. DOI: 10.1109/ROBOT.2009.5152493.
- KOBLER, J.-P., HUSSONG, A. und ORTMAIER, T., (2010). „Mini-Projektor basierte Augmented Reality für medizinische Anwendungen“. In: *CURAC 2010*.
- KÖHLER, J., PAGANI, A. und STRICKER, D., (2011). „Detection and Identification Techniques for Markers Used in Computer Vision“. In: *Visualization of Large and Unstructured Data Sets – Applications in Geospatial Planning, Modeling and Engineering (IRTG 1131 Workshop)*. Hrsg. von MIDDEL, A., SCHELER, I. und HAGEN, H. Bd. 19. OpenAccess Series in Informatics (OASISs). Schloss Dagstuhl–Leibniz-Zentrum für Informatik, S. 36–44. ISBN: 978-3-939897-29-3. DOI: 10.4230/OASIS.VLUDS.2010.36.
- KOUTECKÝ, T., PALOUŠEK, D. und BRANDEJS, J., (2016). „Sensor planning system for fringe projection scanning of sheet metal parts“. In: *Measurement* 94, S. 60–70. ISSN: 0263-2241. DOI: 10.1016/j.measurement.2016.07.067.

- LI, T., GAO, L., PAN, Q. und LI, P., (2018). „Free-form surface parts quality inspection optimization with a novel sampling method“. In: *Applied Soft Computing* 62, S. 550–570. ISSN: 1568-4946. DOI: 10.1016/j.asoc.2017.11.010.
- LIENHART, R. und MAYDT, J., (2002). „An Extended Set of Haar-like Features for Rapid Object Detection“. In: *Proceedings. International Conference on Image Processing*, S. I-900–I-903. ISSN: 1522-4880. DOI: 10.1109/ICIP.2002.1038171.
- LOW, K.-L., (2004). „Linear Least-Squares Optimization for Point-to-Plane ICP Surface Registration“. In: *Technical Report TR04-004, Department of Computer Science, Chapel Hill, University of North Carolina* 4.10, S. 1–3.
- LUDWIG, R., (2010). „Robotergestützte Qualitätsprüfung in der Automobilfertigung“. Dissertation. Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg.
- LUHMANN, T., (2010). „Close range photogrammetry for industrial applications“. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 65.6, S. 558–569. ISSN: 0924–2716. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2010.06.003.
- LUHMANN, T., ROBSON, S., KYLE, S. und BOEHM, J., (2019). *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*. 3rd Edition. De Gruyter STEM. Berlin Boston: De Gruyter. ISBN: 978-3-11-060738-3. DOI: 10.1515/9783110607253.
- LUX-GRUENBERG, G., (2020). „Selbst-Kalibrierung roboterbasierter Koordinatenmesssysteme“. Dissertation. Technische Universität München.
- MAGAÑA, A., GEBEL, S., BAUER, P. und REINHART, G., (2020). „Knowledge-Based Service-Oriented System for the Automated Programming of Robot-Based Inspection Systems“. In: *2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, S. 1511–1518. ISSN: 1946-0740. DOI: 10.1109/ETFA46521.2020.9212033.
- MAGAÑA, A., WU, H., BAUER, P. und REINHART, G., (2020). „PoseNetwork: Pipeline for the Automated Generation of Synthetic Training Data and CNN for Object Detection, Segmentation, and Orientation Estimation“. In: *2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, S. 587–594. ISSN: 1946-0740. DOI: 10.1109/ETFA46521.2020.9212064.
- MAGAÑA FLORES, A., BAUER, P. und REINHART, G., (2019). „Concept of a learning knowledge-based system for programming industrial robots“. In: *Procedia CIRP* 79, S. 626–631. ISSN: 2212-8271. DOI: 10.1016/j.procir.2019.02.076.
- MAISELI, B., GU, Y. und GAO, H., (2017). „Recent developments and trends in point set registration methods“. In: *Journal of Visual Communication and Image Representation* 46, S. 95–106. ISSN: 1047-3203. DOI: 10.1016/j.jvcir.2017.03.012.

- MONDÉJAR-GUERRA, V., GARRIDO-JURADO, S., MUÑOZ-SALINAS, R., MARÍN-JIMÉNEZ, M. J. und MEDINA-CARNICER, R., (2018). „Robust identification of fiducial markers in challenging conditions“. In: *Expert Systems with Applications* 93, S. 336–345. ISSN: 0957-4174. DOI: 10.1016/j.eswa.2017.10.032.
- MUTZ, F., VERONESE, L. P., OLIVEIRA-SANTOS, T., DE AGUIAR, E., AUAT CHEEIN, F. A. und FERREIRA DE SOUZA, A., (2016). „Large-scale mapping in complex field scenarios using an autonomous car“. In: *Expert Systems with Applications* 46, S. 439–462. ISSN: 0957-4174. DOI: 10.1016/j.eswa.2015.10.045.
- NAIMARK, L. und FOXLIN, E., (2002). „Circular Data Matrix Fiducial System and Robust Image Processing for a Wearable Vision-Inertial Self-Tracker“. In: *Proceedings. International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. IEEE, S. 27–36. ISBN: 0-7695-1781-1. DOI: 10.1109/ISMAR.2002.1115065.
- NUBIOLA, A. und BONEV, I. A., (2013). „Absolute calibration of an ABB IRB 1600 robot using a laser tracker“. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 29.1, S. 236–245. ISSN: 0736-5845. DOI: 10.1016/j.rcim.2012.06.004.
- OTSU, N., (1979). „A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms“. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 9.1, S. 62–66. DOI: 10.1109/TSMC.1979.4310076.
- PAPPA, R. S., BLACK, J. T., BLANDINO, J. R., JONES, T. W., DANEHY, P. M. und DORRINGTON, A. A., (2003). „Dot-Projection Photogrammetry and Videogrammetry of Gossamer Space Structures“. In: *Journal of Spacecraft and Rockets* 40.6, S. 858–867. ISSN: 0022-4650. DOI: 10.2514/2.7047.
- PARK, J., ZHOU, Q.-Y. und KOLTUN, V., (2017). „Colored Point Cloud Registration Revisited“. In: *2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, S. 143–152. ISSN: 2380-7504. DOI: 10.1109/ICCV.2017.25.
- PARK, S.-Y. und PARK, G. G., (2010). „Active Calibration of Camera-Projector Systems based on Planar Homography“. In: *2010 20th International Conference on Pattern Recognition*. IEEE, S. 320–323. ISBN: 978-1-4244-7542-1. DOI: 10.1109/ICPR.2010.87.
- PFEIFER, T. und SCHMITT, R., (2010). *Fertigungsmesstechnik*. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag. ISBN: 978-3-486-59202-3. DOI: 10.1524/9783486711356.
- PITO, R. A., (1997). „Automated surface acquisition using range cameras“. Dissertation. University of Pennsylvania.
- POMERLEAU, F., COLAS, F., SIEGWART, R. und MAGNENAT, S., (2013). „Comparing ICP variants on real-world data sets“. In: *Autonomous Robots* 34.3, S. 133–148. ISSN: 1573-7527. DOI: 10.1007/s10514-013-9327-2.
- RASKAR, R., BROWN, M. S., YANG, R., CHEN, W.-C., WELCH, G., TOWLES, H., SEALES, B. und FUCHS, H., (1999). „Multi-Projector Displays Using Camera-Based Registration“. In: *Proceedings Visualization '99 (Cat. No.99CB37067)*. IEEE, S. 161–522. DOI: 10.1109/VISUAL.1999.809883.

- RASTOGI, O., (2020). *Haar Cascade Classifiers*. URL: <https://medium.datadriverinvestor.com/haar-cascade-classifiers-237c9193746b> (besucht am 10.03.2022).
- REICH, C., RITTER, R. und THESING, J., (2000). „3-D shape measurement of complex objects by combining photogrammetry and fringe projection“. In: *Optical Engineering* 39.1, S. 224–231. DOI: 10.1117/1.602356.
- REINHARDT, J. und SIECK, J., (2014). „Dynamische Projektion auf Gebäudefassaden“. In: *Wireless Communication and Information: Digitale Gesellschaft*. Hrsg. von SIECK, J. Glückstadt: Hülsbusch, W, S. 151–173. ISBN: 978-3-864-88071-1.
- REINHART, G., MAGAÑA FLORES, A. und ZWICKER, C., (2018). *Industrieroboter. Planung, Integration, Trends: Ein Leitfaden für KMU*. 1. Auflage. Würzburg: Vogel Communications Group. ISBN: 978-3-8343-3401-5.
- REINHART, G., SCHINDLER, S. und KREBS, P., (2011). „Strategic Evaluation of Manufacturing Technologies“. In: *Globalized Solutions for Sustainability in Manufacturing. Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*. Hrsg. von HESSELBACH J. und HERRMANN C. Bd. 56. Springer Berlin, Heidelberg, S. 179–184. DOI: 10.1007/978-3-642-19692-8_31.
- RODRIGUEZ, L., QUINT, F., GORECKY, D., ROMERO, D. und SILLER, H. R., (2015). „Developing a Mixed Reality Assistance System based on Projection Mapping Technology for Manual Operations at Assembly Workstations“. In: *Procedia Computer Science* 75, S. 327–333. ISSN: 1877-0509. DOI: 10.1016/j.procs.2015.12.254.
- RUSINKIEWICZ, S. und LEVOY, M., (2001). „Efficient Variants of the ICP Algorithm“. In: *Proceedings Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, S. 145–152. DOI: 10.1109/IM.2001.924423.
- RUSU, R. B., BLOWOW, N. und BEETZ, M., (2009). „Fast Point Feature Histograms (FPFH) for 3D Registration“. In: *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, S. 3212–3217. DOI: 10.1109/ROBOT.2009.5152473.
- RUSU, R. B. und COUSINS, S., (2011). „3D is here: Point Cloud Library (PCL)“. In: *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, S. 1–4. ISSN: 1050-4729. DOI: 10.1109/ICRA.2011.5980567.
- RUSU, R. B., BLOWOW, N., MARTON, Z. C. und BEETZ, M., (2008). „Aligning Point Cloud Views using Persistent Feature Histograms“. In: *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, S. 3384–3391. ISSN: 2153-0866. DOI: 10.1109/IROS.2008.4650967.
- SALTI, S., TOMBARI, F. und DI STEFANO, L., (2014). „SHOT: Unique signatures of histograms for surface and texture description“. In: *Computer Vision and Image Understanding* 125, S. 251–264. ISSN: 1077-3142. DOI: 10.1016/j.cviu.2014.04.011.

- SALVI, J., MATABOSCH, C., FOFI, D. und FOREST, J., (2007). „A review of recent range image registration methods with accuracy evaluation“. In: *Image and Vision Computing* 25.5, S. 578–596. ISSN: 0262-8856. DOI: 10.1016/j.imavis.2006.05.012.
- SCHINDLER, S., (2014). „Strategische Planung von Technologieketten für die Produktion“. Dissertation. Technische Universität München.
- SCHNEIDER, C.-T. und SINNREICH, K., (1993). „Optical 3-D measurement systems for quality control in industry“. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 29, S. 56–59.
- SEGAL, A. V., HAEHNEL, D. und THRUN, S., (2009). „Generalized-ICP“. In: *Robotics: science and systems* 2.4. DOI: 10.15607/RSS.2009.V.021.
- SENIN, N., COLOSIMO, B. M. und PACELLA, M., (2013). „Point set augmentation through fitting for enhanced ICP registration of point clouds in multisensor coordinate metrology“. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 29.1, S. 39–52. ISSN: 0736-5845. DOI: 10.1016/j.rcim.2012.07.003.
- SHI, Q. und XI, N., (2008). „Automated Data Processing for a Rapid 3D Surface Inspection System“. In: *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, S. 3939–3944. DOI: 10.1109/ROBOT.2008.4543816.
- SHORTIS, M. R. und SEAGER, J. W., (2014). „A practical target recognition system for close range photogrammetry“. In: *The Photogrammetric Record* 29.147, S. 337–355. DOI: 10.1111/phor.12070.
- SONG, L., LI, X., YANG, Y.-g., ZHU, X., GUO, Q. und LIU, H., (2018). „Structured-Light Based 3D Reconstruction System for Cultural Relic Packaging“. In: *Sensors* 18.9:2981. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s18092981.
- SONKA, M., HLAVAC, V. und BOYLE, R., (1993). *Image processing, Analysis and Machine Vision*. 1. Auflage. Chapman & Hall Computing Series. Springer, Boston, MA. ISBN: 978-0-412-45570-4. DOI: 10.1007/978-1-4899-3216-7.
- SONY CORPORATION, (2022). In: *VPL-PHZ10. Datenblatt*. Hrsg. von SONY CORPORATION. URL: https://pro.sony/en_HN/pdf/vpl-phz10 (besucht am 09.02.2022).
- STAVROULAKIS, P., BIS-KONG, Y., DOYEN, E., HARTMAN, T. und LEACH, R., (2018). „Digital Preservation of the Nottingham Ichthyosaur Using Fringe Projection“. In: *Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection*. 7th International Conference, EuroMed 2018. Hrsg. von IOANNIDES, M., FINK, E., BRUMANA, R., PATIAS, P., DOULAMIS, A., MARTINS, J. und WALLACE, M. Lecture Notes in Computer Science 11197 Proceedings, Part II. Springer Nature Switzerland AG, S. 38–44. DOI: 10.1007/978-3-030-01765-1_5.
- SUKTHANKAR, R., STOCKTON, R. G. und MULLIN, M. D., (2001). „Smarter Presentations: Exploiting Homography in Camera-Projector Systems“. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision* 2, S. 247. DOI: 10.1109/ICCV.2001.10045.

- SUKTHANKAR, R., STOCKTON, R. G. und MULLIN, M. D., (2000). „Automatic Keystone Correction for Camera-Assisted Presentation Interfaces“. In: *Advances in Multimodal Interfaces - ICMI 2000. Third International Conference*. Hrsg. von TAN, T., SHI, Y. und GAO, W. Lecture Notes in Computer Science 1948. Springer Berlin Heidelberg, S. 607–614. ISBN: 978-3-540-40063-9. DOI: 10.1007/3-540-40063-X_79.
- SUZUKI, S. und ABE, K., (1985). „Topological Structural Analysis of Digitized Binary Images by Border Following“. In: *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 30.1, S. 32–46. ISSN: 0734-189X. DOI: 10.1016/0734-189X(85)90016-7.
- SZELISKI, R., (2011). *Computer Vision. Algorithms and Applications*. Texts in Computer Science. London Dordrecht Heidelberg New York: Springer, London. ISBN: 978-1-84882-934-3. DOI: 10.1007/978-1-84882-935-0.
- TOMBARI, F., SALTI, S. und DI STEFANO, L., (2013). „Performance Evaluation of 3D Keypoint Detectors“. In: *International Journal of Computer Vision* 102.1, S. 198–220. ISSN: 1573-1405. DOI: 10.1007/s11263-012-0545-4.
- ULRICH, M., (2018). „3D-Image-Stitching für roboterbasierte Messsysteme“. Dissertation. Technische Universität München.
- ULRICH, M., FORSTNER, A. und REINHART, G., (2015). „High-accuracy 3D image stitching for robot-based inspection systems“. In: *2015 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, S. 1011–1015. DOI: 10.1109/ICIP.2015.7350952.
- ULRICH, M., LUX, G. und PIPEK, T., (2014). „Analysis and Visualisation of the Positioning Accuracy and Underlying Effects of Industrial Robots“. In: *Advanced Materials Research* 1018, S. 15–22. ISSN: 1662-8985. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1018.15.
- ULRICH, P. und HILL, W., (1976). „Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil I)“. In: *Wirtschaftswissenschaftliches Studium: Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt* 5.7, S. 304–309.
- ÜRÜN, M., WIGGENHAGEN, M., NITSCHKE, H. und HEIPKE, C., (2017). „Stabilitätsprüfung projizierter Referenzpunkte für die Erfassung großvolumiger Messobjekte“. In: *Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2017*. Hrsg. von LUHMANN, T. und SCHUMACHER, C. Wichmann – VDE Verlag, S. 377–388. ISBN: 978-3-87907-625-3.
- VAN DEN HEUVEL, F. A., KROON, R. und LE POOLE, R. S., (1993). „Digital close-range photogrammetry using artificial targets“. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 29, S. 222–229.
- VANDENBERGHE, P., (2016). „Data Projectors“. In: *Handbook of Visual Display Technology*. Hrsg. von CHEN, J., CRANTON, W. und FIEHN, M. 2. Auflage. Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG, S. 2919–2926. ISBN: 978-3-319-14345-3. DOI: 10.1007/978-3-319-14346-0_133.

- VINCZE, M., PRENNINGER, J. P. und GANDER, H., (1994). „A Laser Tracking System to Measure Position and Orientation of Robot End Effectors Under Motion“. In: *The International Journal of Robotics Research* 13.4, S. 305–314. ISSN: 0278-3649. DOI: 10.1177/027836499401300402.
- VIOLA, P. und JONES, M., (2001). „Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features“. In: *Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR 2001*. IEEE, S. I-511–I-518. ISBN: 0-7695-1272-0. DOI: 10.1109/CVPR.2001.990517.
- (2004). „Robust Real-Time Face Detection“. In: *International Journal of Computer Vision* 57.2, S. 137–154. DOI: 10.1023/B:VISI.0000013087.49260.fb.
- VON ENZBERG, S., AL-HAMADI, A. und GHONEIM, A., (2016). „Registration of Feature-Poor 3D Measurements from Fringe Projection“. In: *Sensors* 16.3:283. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s16030283.
- WAGNER, D. und SCHMALSTIEG, D., (2007). „ARToolKitPlus for Pose Tracking on Mobile Devices“. In: *Proceedings of 12th Computer Vision Winter Workshop CVWW07*. Hrsg. von GRABNER, H. und GRABNER, M. Technische Universität Graz.
- WECKENMANN, A., (2012). *Koordinatenmesstechnik. Flexible Strategien für funktions- und fertigungsgerechtes Prüfen*. 2., vollständig überarbeitete Auflage. Carl Hanser Verlag München Wien. ISBN: 978-3-446-40739-8. DOI: 10.3139/9783446429475.
- WIJENAYAKE, U., CHOI, S.-I. und PARK, S.-Y., (2014). „Automatic Detection and Decoding of Photogrammetric Coded Targets“. In: *2014 International Conference on Electronics, Information and Communications (ICEIC)*. IEEE, S. 1–2. ISBN: 978-1-4799-3942-8. DOI: 10.1109/ELINFOCOM.2014.6914413.
- YUAN, B., LI, Y., JIANG, F., XU, X., ZHAO, J., ZHANG, D., GUO, J., WANG, Y. und ZHANG, S., (2019). „Fast QR code detection based on BING and AdaBoost-SVM“. In: *2019 IEEE 20th International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR)*. IEEE, S. 1–6. ISBN: 978-1-7281-1686-0. DOI: 10.1109/HPSR.2019.8808000.
- ZINSSER, T., SCHMIDT, J. und NIEMANN, H., (2003). „A refined ICP algorithm for robust 3-D correspondence estimation“. In: *Proceedings 2003 International Conference on Image Processing (Cat. No.03CH37429)* 2, S. II–695. ISSN: 1522-4880. DOI: 10.1109/ICIP.2003.1246775.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Angewendete Forschungsmethodik entsprechend dem DRM-Framework nach BLESSING und CHAKRABARTI (2009, S. 15)	4
1.2	Aufbau der vorliegenden Arbeit mit Zuordnung der Kapitel zu den Resultaten des DRM-Frameworks nach BLESSING und CHAKRABARTI (2009, S. 15)	6
2.1	Roboterbasiertes optisches Messsystem (aus BAUER, FINK et al. 2020 in adaptierter Form)	8
2.2	Kenngößen in Bezug auf die Genauigkeit von Industrierobotern (nach REINHART et al. 2018, S. 22)	9
2.3	Übersicht über verschiedene Messverfahren von kontaktlosen 3D-Messmitteln (nach LUHMANN et al. 2019, S. 6)	9
2.4	Schematische Darstellung einer frontalen Projektion sowie einer Schrägprojektion mit dem auftretenden Effekt der Trapezverzerrung (nach VANDENBERGHE 2016)	11
2.5	Lochkameramodell (nach LUHMANN et al. 2019, S. 8)	12
2.6	Ablauf der Digitalisierung eines Prüfobjekts (in Anlehnung an BENNAMOUN und MAMIC 2002, S. 103)	13
2.7	Verkettung von Punktwolken zur Erfassung eines geometrischen Prüfmerkmals (in Anlehnung an BAUER, MAGAÑA FLORES et al. 2019)	18
2.8	Veranschaulichung des Detektionsablaufs mithilfe eines Kaskaden-Klassifikators auf Basis von Haar-ähnlichen Merkmalen nach der Viola-Jones-Methode (VIOLA und JONES 2001, 2004) (in Anlehnung an RASTOGI 2020)	19
2.9	Verfahren zur Lokalisation von Kanten am Beispiel einer projizierten Zielmarke	21

2.10	Exemplarische Darstellung einer subpixelgenauen Referenzpunktbestimmung mittels Kurven- oder Linien-Anpassung (engl.: <i>fitting</i>) (in Anlehnung an FABIJANŠKA 2012). Die Beschriftung aus 2.10a gilt analog für 2.10b.	23
3.1	Überblick über die zugrunde liegenden Themenbereiche	25
3.2	Verfahren zur Ausrichtung von Teilansichten für roboterbasierte optische Messsysteme	28
3.3	Verfahrensschritte zur Ausrichtung von Teilansichten auf Basis photogrammetrischer Methoden mit Zielmarken (in Anlehnung an ÜRÜN et al. 2017)	31
3.4	Zusammenfassende Darstellung ausgewählter ICP-Varianten entsprechend der Einteilung von iterativen Algorithmen nach RUSINKIEWICZ und LEVOY (2001)	38
3.5	Exemplarische Zielmarkensysteme aus dem Bereich der optischen Messtechnik (in Anlehnung an SHORTIS und SEAGER 2014) . . .	42
4.1	Herausforderungen bei der Verwendung von vollflächig applizierten Referenzprojektionen auf der Innenseite einer Automobiltür und industrieller Sensorik (angelehnt an BAUER, HECKLER et al. 2021)	56
4.2	Illustration des Lösungskonzepts (aus BAUER, MAGAÑA FLORES et al. 2019)	57
4.3	Schematische Darstellung von exemplarischen virtuellen Strukturen auf Basis von eingebrachten Projektionsprimitiven in einer gemessenen Punktwolke	58
4.4	Prüfablauf unter Einsatz der Verkettungsstrategie von Punktwolken zur Evaluation geometrischer Prüfmerkmale	60
5.1	Technische Umsetzung zur experimentellen Validierung der konzeptionierten Verkettungsstrategie	64
5.2	Systemaufbau sowie Kommunikation zwischen Hardwarekomponenten und Software-Modulen	66
6.1	Übersicht und Zusammenhang der eingebundenen Publikationen	70
7.1	Betrachtete Technologiealternativen (TA) für die Kostenvergleichsrechnung: KMG (TA 1), roboterbasiertes Messsystem mit physischen Zielmarken (TA 2), mit Lasertracker (TA 3) oder mit bereichsspezifischen Projektionen und virtuellen Strukturen (TA 4).	89

7.2	Kostenvergleich und Kapazitätsauslastung verschiedener Technologiealternativen für das zugrunde gelegte Prüfzenario	91
7.3	Einschätzung von Fachkundigen hinsichtlich der besten Einsatz-eignung von TA 4	92

Tabellenverzeichnis

6.1	Prozentuale Beiträge des Autors an der Publikation P 1	73
6.2	Prozentuale Beiträge des Autors an der Publikation P 2	74
6.3	Prozentuale Beiträge des Autors an der Publikation P 3	75
6.4	Prozentuale Beiträge des Autors an der Publikation P 4	77
6.5	Prozentuale Beiträge des Autors an der Publikation P 5	79
6.6	Prozentuale Beiträge des Autors an der Publikation P 6	80
7.1	Resultierende Kosten für die betrachteten Messsysteme und das zugrunde gelegte Prüfzenario (basierend auf der Kostenvergleichsrechnung aus Publikation P 6)	90

Begriffserklärung

Bereichsspezifische Projektionen	Unter bereichsspezifischen Projektionen wird im Rahmen dieser Arbeit eine Wiedergabe von visuellen Informationen durch einen Digital-Projektor ausschließlich auf vordefinierten Bauteilbereichen verstanden.
Oberflächenmerkmal	In Anlehnung an den definierten <i>Feature</i> -Begriff in (BERTAGNOLLI 2006) wird unter einem Oberflächenmerkmal ebenfalls ein geometrisches Detailelement verstanden, welches in die Oberfläche von Blechbauteilen integriert ist, beispielsweise gekrümmte Flächen, Kanten, Löcher oder Bohrungen.
Pose	Position und Lage (Orientierung) eines Objekts oder eines Geräts in einem Koordinatensystem
Projektionsprimitiv	Im Hinblick auf gängige physische Zielmarkensysteme mit überwiegend kreisförmigen oder quadratischen Grundformen (geometrische Primitive) (KÖHLER et al. 2011) wird der Begriff <i>Projektionsprimitiv</i> für projizierte Grundformen ohne Codierung (projizierte Zielmarke) eingeführt.
Punktwolke	In einem lokalen Koordinatensystem vorliegende Anzahl an dreidimensionalen Punkten
Referenzpunkt	Als Referenzpunkt wird ein Pixel oder Subpixel-Punkt verstanden, der auf Basis einer physischen oder projizierten Zielmarke aus einem 2D-Bild abgeleitet wird. Den 2D-Bildkoordinaten werden im Rahmen dieser Arbeit 3D-Punktkoordinaten der zugehörigen geordneten Punktwolke zugeordnet.

Registrierung	Das Ausrichten bzw. Zusammenführen von Teilansichten in Form von Punktwolken in ein gemeinsames Koordinatensystem wird als Registrierung bezeichnet (BENAMOUN und MAMIC 2002, S. 101 f.; ULRICH 2018, S. 9).
Virtuelle Struktur	Die „Virtuelle Struktur“ ergibt sich im Zuge der Punktwolken-Augmentierung. Es findet eine charakteristische Umwandlung eines detektierten Referenzmerkmals wie der Kante einer projizierten Zielmarke in eine virtuelle räumliche punktbasierte Struktur statt. Dazu werden künstliche (nicht-gemessene) Punkte eingefügt.
Zielmarke	Eine Zielmarke dient als künstlich eingebrachte Referenz auf Bauteilen, deren Halterung oder in einer Szene, um Referenzpunkte in Bildern einfacher bestimmen zu können. Neben physisch applizierten Marken können diese auch projiziert werden, verschiedene Formen annehmen (bspw. rund oder quadratisch) und ggf. auch über eine Codierung zur Identifikation verfügen.

Anhang A

Anhang

A.1 Betreute Studienarbeiten

Im Rahmen der vorliegenden Dissertation wurden die nachfolgend aufgeführten studentischen Arbeiten am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München angefertigt. Diese entstanden im Zeitraum von 2017 bis 2021 unter der wissenschaftlichen Anleitung und Betreuung des Autors. Deren Ergebnisse und Erkenntnisse sind teilweise in die vorliegende Arbeit eingeflossen. Der Autor dankt sehr herzlich allen Studierenden für ihren Fleiß, das große Engagement sowie die Unterstützung bei der Durchführung seines Promotionsvorhabens.

In direktem Zusammenhang mit den eingebundenen Publikationen (s. Kapitel 6) stehen folgende Studienarbeiten (chronologische Auflistung):

- Fink, F., (2019). „Konzeptentwicklung für bereichsspezifische Projektionen beim robotergestützten 3D-Image-Stitching“. (Semesterarbeit TUM)
- Worack, M., (2019). „Konzeptentwicklung zur Evaluierung des Registrierungsverhaltens von Projektionsprimitiven in Abhängigkeit von der Oberflächenkrümmung“. (Masterarbeit TUM)
- Li, F., (2020). „Evaluation of approaches for the retrieval of relative transformations based on 2D and 3D imaging data“. (Semesterarbeit TUM)
- Gottschall, L., (2020). „Potentialanalyse und -bewertung der Messmethode 3D-Image-Stitching mithilfe bereichsspezifischer Projektionen für roboterbasierte Messsysteme“. (Masterarbeit TUM)
- Heckler, L., (2021). „Konzeptentwicklung zur Analyse des Einflusses virtueller 3D-Strukturen auf die Genauigkeit der Feinregistrierung mithilfe des ICP-Algorithmus“. (Semesterarbeit TUM)

- Schmitt, S., (2021). „Evaluation von KI-Ansätzen zur Vordetektion von Referenzmarken in der geometrischen Qualitätssicherung“. (Semesterarbeit TUM)

Des Weiteren entstanden unter der Betreuung des Autors weitere studentische Arbeiten, die sich inhaltlich und thematisch in den erweiterten Kontext der vorliegende Dissertation eingliedern lassen. Diese sind nachfolgend in chronologischer Reihenfolge aufgeführt:

- Wagner, F., (2018). „Analyse, Implementierung und Vergleich von Registrierungsalgorithmen für das 3D-Image-Stitching“. (Semesterarbeit TUM)
- Zhang, W., (2018). „Research on the Error Propagation of 3D-Image Stitching“. (Masterarbeit TUM)
- Haslinger, P., (2018). „Genauigkeitsuntersuchungen von Bildverarbeitungsalgorithmen und Konzepterstellung zu Projektionsmustern für das 3D-Image-Stitching“. (Semesterarbeit TUM)
- Menara, M., (2018). „Implementierung eines Analyseprogramms für Genauigkeitsuntersuchungen an einem optischen 3D-Sensor“. (Semesterarbeit TUM)
- Mittermeier, F., (2018). „Erstellung eines Konzepts zur Positionierung eines Projektors sowie Untersuchungen von Projektionsmustern für das 3D-Image-Stitching“. (Bachelorarbeit TUM)
- Worack, M., (2018). „Entwicklung eines Konzepts zur Ermittlung der Fehlerfortpflanzung für sequentielle Verkettungen beim 3D-Image-Stitching“. (Semesterarbeit TUM)
- Schwarz, A., (2019). „Konzept zur Analyse der Oberflächenstruktur simulierter Punktwolken“. (Bachelorarbeit TUM)
- Meyl, J., (2019). „Methode zur subpixelgenauen Erkennung virtueller Referenzen für ausgewählte Projektionsprimitive beim 3D-Image-Stitching“. (Semesterarbeit TUM)
- Skiba, F., (2020). „Methode zur hochgenauen und robusten Erkennung von virtuellen Referenzen durch Kompensation schwankender Intensitätsinformationen beim 3D-Image-Stitching“. (Masterarbeit TUM)
- Wagersshauer, F., (2020). „Potentialanalyse zu KI-Ansätzen in der Kanten- und Objekterkennung für die Messmethode 3D-Image-Stitching“. (Bachelorarbeit TUM)
- Schmitt, S., (2020). „Ansatz zur Evaluierung von geometrischen Primitiven hinsichtlich der Registrierungs-genauigkeit für das bereichsspezifische 3D-Image-Stitching“. (Bachelorarbeit TUM)

- Günther, N., (2020). „Evaluation des Einflusses von subpixelgenau detektierten Merkmalen auf die Registrierungsgenauigkeit im Kontext des bereichsspezifischen 3D-Image-Stitching“. (Bachelorarbeit TUM)
- Fink, F., (2020). „Konzeptentwicklung zur automatisierten Datenverarbeitung für die Messmethode „3D-Image-Stitching mithilfe von bereichsspezifischen Projektionen“ in robotergestützten Messsystemen“. (Masterarbeit TUM)
- Kircher, T., (2020). „Konzept zur automatisierten Parametrisierung der Messmethode „3D-Matching mittels bereichsspezifischer Projektionen“ auf Basis des Reinforcement Learnings“. (Semesterarbeit TUM)

A.2 Veröffentlichungen des Autors

Im Rahmen der wissenschaftlichen Tätigkeit am *iwb* leistete der Autor einen Beitrag zu folgenden Publikationen:

- (MAGAÑA FLORES et al. 2019)
MAGAÑA FLORES, A., BAUER, P. und REINHART, G., (2019). „Concept of a learning knowledge-based system for programming industrial robots“. In: *Procedia CIRP* 79, S. 626–631. ISSN: 2212-8271. DOI: 10.1016/j.procir.2019.02.076.
- (BAUER, GONNERMANN et al. 2019)
BAUER, P., GONNERMANN, C., MAGAÑA, A. und REINHART, G., (2019). „Autonome Prüfsysteme in der digitalen Fabrik. Skill-basierte Modellierung in der geometrischen Qualitätsprüfung für roboterbasierte Messsysteme“. In: *wt Werkstattstechnik online* 109.5, S. 321–328. ISSN: 1436-4980. DOI: 10.37544/1436-4980-2019-05-23.
- (BAUER, MAGAÑA FLORES et al. 2019)
BAUER, P., MAGAÑA FLORES, A. und REINHART, G., (2019). „Free-Form Surface Analysis and Linking Strategies for High Registration Accuracy in Quality Assurance Applications“. In: *Procedia CIRP* 81, S. 968–973. ISSN: 2212-8271. DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.236. (Eingebundene Publikation P 1, s. Kapitel 6).
- (BAUER und MAGAÑA 2020)
BAUER, P. und MAGAÑA, A., (2020). „Verfahren und System zur dreidimensionalen Erfassung einer Szene“. (DE102019114572B3). Deutsches Patent- und Markenamt. (besucht am 26.01.2022). URL: <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=bibdat&docid=DE102019114572B3>.

- (BAUER, LI et al. 2020)
BAUER, P., LI, F., MAGAÑA FLORES, A. und REINHART, G., (2020). „Accuracy Analysis of Alignment Methods based on Reference Features for Robot-Based Optical Inspection Systems“. In: *Procedia CIRP* 93, S. 1115–1120. ISSN: 2212-8271. DOI: 10.1016/j.procir.2020.04.105. (Eingebundene Publikation P 2, s. Kapitel 6).
- (BAUER, FINK et al. 2020)
BAUER, P., FINK, F., MAGAÑA, A. und REINHART, G., (2020). „Spatial interactive projections in robot-based inspection systems“. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 107.5-6, S. 2889–2900. ISSN: 0268-3768. DOI: 10.1007/s00170-020-05220-1. (Eingebundene Publikation P 3, s. Kapitel 6).
- (MAGAÑA, WU et al. 2020)
MAGAÑA, A., WU, H., BAUER, P. und REINHART, G., (2020). „PoseNetwork: Pipeline for the Automated Generation of Synthetic Training Data and CNN for Object Detection, Segmentation, and Orientation Estimation“. In: *2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, S. 587–594. ISSN: 1946-0740. DOI: 10.1109/ETFA46521.2020.9212064.
- (MAGAÑA, GEBEL et al. 2020)
MAGAÑA, A., GEBEL, S., BAUER, P. und REINHART, G., (2020). „Knowledge-Based Service-Oriented System for the Automated Programming of Robot-Based Inspection Systems“. In: *2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, S. 1511–1518. ISSN: 1946-0740. DOI: 10.1109/ETFA46521.2020.9212033.
- (BAUER, HECKLER et al. 2021)
BAUER, P., HECKLER, L., WORACK, M., MAGAÑA, A. und REINHART, G., (2021). „Registration strategy of point clouds based on region-specific projections and virtual structures for robot-based inspection systems“. In: *Measurement* 185.1:109963. ISSN: 0263-2241. DOI: 10.1016/j.measurement.2021.109963. (Eingebundene Publikation P 5, s. Kapitel 6).
- (BAUER, GOTTSCHALL et al. 2021)
BAUER, P., GOTTSCHALL, L., MAGAÑA FLORES, A., HOFER, A. und REINHART, G., (2021). „A Technological and Economic Potential Analysis of Measurement Systems in Geometrical Quality Assurance“. In: *Procedia CIRP* 104, S. 1263–1268. ISSN: 2212–8271. DOI: 10.1016/j.procir.2021.11.212. (Eingebundene Publikation P 6, s. Kapitel 6).
- (BAUER et al. 2022)
BAUER, P., SCHMITT, S., DIRR, J., MAGAÑA, A. und REINHART, G., (2022). „Intelligent predetection of projected reference markers for robot-based inspection systems“. In: *Production Engineering*. ISSN: 1863-7353. DOI: 10.1007/s11740-022-01118-x. (Eingebundene Publikation P 4, s. Kapitel 6).