

ONLINE-POSEBESTIMMUNG MITTELS MULTI-APERTUR-POSITIONIERUNG

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)

von der KIT-Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
angenommene

DISSERTATION

von
M.Sc. Luis Alexander Garcia Barth
geboren in Schorndorf

Tag der mündlichen Prüfung: 11.12.2025

Hauptreferent: Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann
Korreferent: Prof. Dr. rer. nat. Rainer Börret

Nelle prove naturali non si deve ricercar l'esattezza geometrica.
Bei naturwissenschaftlichen Versuchen darf man keine geometrische
Exaktheit verlangen.

Galileo Galilei

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	1
1.1	Ziele der Arbeit	4
1.2	Gliederung der Arbeit	5
2	Grundlagen	9
2.1	Die Lochkamera	9
2.2	Beugung an der Kreisblende	12
2.3	Projektive Geometrie	15
2.4	Kartesisches Koordinatensystem	17
2.5	Konfigurationsraum	19
2.6	Begriff der Messunsicherheit	22
3	Das Messinstrument MAPS	25
3.1	Grundlegendes Prinzip	25
3.1.1	Multi-Apertur-Technik	27
3.1.2	Berechnung der Targetpose	30
3.2	Experimenteller Aufbau	33
3.2.1	LED-Target	33
3.2.2	Detektor	36
3.3	MAPS-Vorentwicklungen	39
3.3.1	Techniken zur Bildanalyse	39
3.3.2	Kalibrierung	45
3.3.3	Simulation des Messinstruments	48
3.4	Systematische Messabweichung	52
3.4.1	Einflussfaktoren	52
3.4.2	KMG als Referenz	53
3.4.3	Messwinkel	54
3.4.4	Optische Achse	54

3.4.5	Subpixelgenauigkeit	57
3.4.6	Periodisches Aperturmaskendesign	59
3.5	Limitierung der Posebestimmung	62
3.6	Optische Koordinatenmessgeräte für Handhabungsgeräte	64
3.7	Zusammenfassung MAPS	65
4	Eindeutigkeit der Abbildung	67
4.1	Design der Aperturmaske	68
4.1.1	Arbiträres Aperturpattern	69
4.1.2	Weiterentwicklung des LED-Targets	73
4.1.3	Robustheit	74
4.2	Eindeutigkeit von Maske und Abbildung	75
4.2.1	Segmentierung	77
4.2.2	Ermittlung des Maskenausschnitts	81
4.2.3	Adaptives Template	85
4.2.4	Relation zwischen Spots und Aperturen	88
4.3	Designoptimierung	93
4.3.1	AAP-Abbildungssimulation	94
4.3.2	Simulationsergebnisse	98
4.3.3	Validierung	101
4.3.4	Sequenzielle Abbildungssimulation	103
4.4	Zusammenfassung und Diskussion	105
5	Korrespondenz zwischen Lichtquelle und Messwert	109
5.1	Einleitung	109
5.2	Korrespondenz durch spektrale Codierung	110
5.2.1	Prinzip und Motivation	110
5.2.2	Implementierung mit RGB-Kamera	111
5.2.3	Lineares Entmischen zur Korrektur von Kanal- übersprechen	114
5.2.4	Konturfilter	116
5.2.5	Auswertung und Bewertung	118

5.3	Korrespondenz durch geometrische Codierung	125
5.3.1	Design der LED-Blende	125
5.3.2	Abbildungskriterien für die Formcodierung . .	127
5.3.3	Auswertung und Bewertung	132
5.3.4	Formerkennung	137
5.4	Erweiterte Anwendungsmöglichkeit	144
5.5	Fazit und Zusammenfassung	146
6	Bewertung der Messunsicherheit	149
6.1	Messunsicherheitsanalyse	150
6.1.1	Einflussgrößen	151
6.1.2	Diskussion der Einflussgrößen	151
6.1.3	Weitere Einflussgrößen für systematische Mess- abweichungen	160
6.1.4	Modellgleichung	163
6.1.5	Monte-Carlo-Simulation	169
6.2	Alternative Kalibrierstrategie	183
6.3	Fazit und Zusammenfassung	185
7	Diskussion	189
8	Zusammenfassung und Ausblick	199
8.1	Zusammenfassung	199
8.2	Ausblick	203
Anhang	206
A	Allgemeine Ergänzungen	207
B	Galerie	215
	Abkürzungsverzeichnis	219

INHALTSVERZEICHNIS

Betreute Arbeiten	225
Wissenschaftliche Publikationen	227
Danksagung	229
Abbildungsverzeichnis	231
Tabellenverzeichnis	239
Transparenzhinweise zu KI-Nutzung	241
Literatur	243

Kapitel 1

EINLEITUNG

Industrieroboter sind aus der modernen Fertigung nicht mehr wegzudenken. In nahezu allen Bereichen der produzierenden Industrie übernehmen sie automatisierte Aufgaben, die wiederholgenau, effizient und wirtschaftlich ausgeführt werden müssen. Ihre Einsatzgebiete reichen von einfachen *pick and place*-Aufgaben bis zu komplexen Tätigkeiten wie dem Schweißen, Kleben oder Montieren. Besonders in Anwendungen, bei denen es auf hohe Stückzahlen und gleichbleibende Qualität ankommt, stellen Roboter die technologische Grundlage für automatisierte Produktionsprozesse dar. In den vergangenen Jahren hat sich ihr Anwendungsbereich jedoch deutlich erweitert. Neben diesen klassischen Aufgaben werden Roboter zunehmend auch in Bereichen eingesetzt, die höchste Anforderungen an die Positioniergenauigkeit und Wiederholpräzision stellen. Ein Beispiel hierfür ist die robotergestützte Politur von Halbleiterfertigungsoptiken für Lithografiemaschinen, bei der hohe Anforderungen an Formtreue und Oberflächenrauheit gestellt werden.

Die gestiegenen Präzisionsanforderungen lassen sich auf mehrere Entwicklungen zurückführen. Zum einen ist die Miniaturisierung technischer Bauteile in vielen Branchen vorangeschritten. Insbesondere in der Mikroelektronik, der Medizintechnik und im Bereich der optischen Präzisionsfertigung ist die Notwendigkeit entstanden, auch in der Automatisierungstechnik höhere Genauigkeiten zu realisieren. Je präziser Produkte hergestellt werden können, desto wirtschaftlicher kann produziert werden. Zum anderen hat sich die industrielle Produktion

zunehmend in Richtung flexibler und vernetzter Fertigungssysteme entwickelt. Der steigende Individualisierungsgrad von Produkten und die gleichzeitige Notwendigkeit kurzer Durchlaufzeiten bedingen eine automatisierte Fertigung, die nicht nur reproduzierbar, sondern auch präzise und adaptiv arbeiten kann. Roboter spielen in diesem Zusammenhang eine zentrale Rolle. Ihre Fähigkeit, sich programmatisch an neue Geometrien und Fertigungsbedingungen anzupassen, macht sie zu einem unverzichtbaren Bestandteil moderner Fertigungs-umgebungen. Mit dieser Entwicklung geht jedoch auch die Forderung einher, die Genauigkeit und Präzision ihrer Bewegungen zu verbessern.

Ein bewährter Ansatz zur Erhöhung der Positioniergenauigkeit besteht darin, die tatsächliche Werkzeugposition, der sogenannte Tool Center Point (TCP), mit externer Messtechnik zu erfassen und softwareseitig zu korrigieren. Je nach technischer Umsetzung kann diese Korrektur entweder online, im laufenden Betrieb erfolgen, indem die gemessene Abweichung direkt in die TCP-Konfiguration einfließt, oder offline durch vorherige Kalibrierung und entsprechende Anpassung der Bewegungsbahnen oder der hinterlegten Kinematikmodelle. In beiden Fällen stellt die externe Messtechnik die Grundlage für eine Verbesserung dar. Die bereits verwendeten Messgeräte reichen dabei von optischen Koordinatenmessgeräten [1] über Lasertracker [2] und kamerabasierte Verfahren [3] bis zu Kreisformmessgeräten [4]. Allerdings erfüllt keines dieser Messinstrumente alle Anforderungen, die an moderne Systeme zum Robotermonitoring gestellt werden: Hohe Präzision, die gleichzeitige Erfassung aller sechs Freiheitsgrade (6DOF) in Bewegung, ein kompaktes und leicht integrierbares Systemdesign sowie geringe Kosten lassen sich mit den etablierten Lösungen bislang nicht in einem einzigen Gerät vereinen.

Vor diesem Hintergrund wurde das Multi-Aperture Positioning Sys-

tem (MAPS) entwickelt, ein photogrammetrisches Messinstrument, das sich durch seine einfache Hardwarearchitektur, niedrige Kosten und hohe Skalierbarkeit auszeichnet. Besonders für Anwendungen, bei denen eine kontinuierliche Überwachung mehrerer Roboter, Werkzeuge oder Werkstücke gleichzeitig notwendig ist, bietet MAPS ein vielversprechendes Potenzial. Die bislang bestehende Einschränkung liegt jedoch darin, dass nur drei der sechs Freiheitsgrade in Bewegung erfasst werden können. Für alle sechs muss sich der Roboter im Stillstand befinden. MAPS misst nicht direkt den TCP, sondern die räumliche Lage einer punktförmigen Lichtquelle, die nahe des TCP montiert wird. Das Messprinzip basiert auf der Projektion von Lichtpunkten auf einem Kamerasensor. Hierfür wird eine Maske eingesetzt, ähnlich wie bei einer Lochkamera, nur mit mehreren tausend statt einer Apertur. Aus dem entstehenden Lichtmuster auf dem Sensor wird die Position der dedizierten Lichtquelle im Raum bestimmt. Da immer nur ein Ausschnitt der Maske auf dem Sensor abgebildet wird, werden Codierungsmarker in regelmäßigen Abständen zwischen den Aperturen platziert, um den abgebildeten Maskenausschnitt zu identifizieren. Die Lichtquellen werden nicht direkt am Roboter montiert, sondern sind Teil eines Targets. Dieses umfasst in der Regel drei Lichtquellen, aus deren Einzelpositionen die Orientierung des Targets berechnet wird. Durch die Anbringung des Targets nahe des TCP kann auf dessen Position und Orientierung (6DOF) zurückgeschlossen werden. Eine typische Roboter-Bearbeitungszelle, ausgerüstet mit MAPS als externes Messgerät, ist in Abbildung 1.1 zu sehen.

Damit MAPS die Orientierung und somit alle sechs Freiheitsgrade bestimmen kann, ist die räumliche Position aller drei Lichtquellen notwendig. Diese können entweder nacheinander gemessen werden, wobei sich das Target nicht bewegen darf, oder gleichzeitig. Ersteres schließt eine Online-Messung aktuell aus, da die Bildrate von hochauflösenden Kameras bis dato nicht hoch genug ist. Die Herausforderung

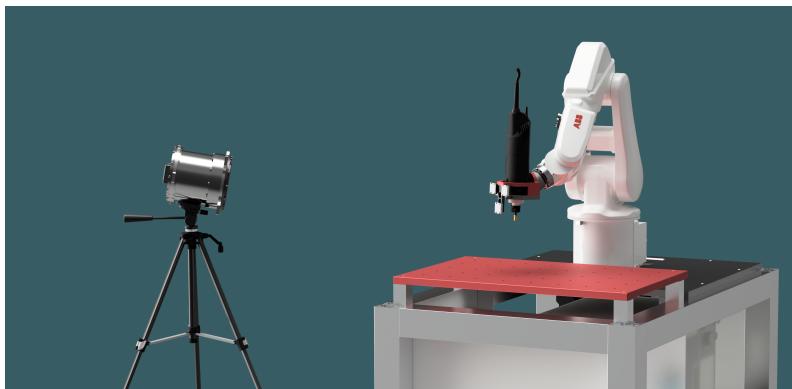


Abbildung 1.1: Gerendertes Bild einer Roboter-Bearbeitungszelle (rechts) mit Werkzeug und Target. Als externes Messgerät dient MAPS (links).

liegt im gleichzeitigen Messen der drei Lichtquellen. Werden mehrere Quellen zur selben Zeit eingeschaltet, kann die resultierende Abbildung nicht mehr ausgewertet werden. Diese Probleme stellen eine fundamentale Hürde für die Echtzeitüberwachung der Roboterpose dar.

1.1 ZIELE DER ARBEIT

Das primäre Ziel dieser Arbeit besteht darin, Methoden für das MAPS zu entwickeln, mit denen eine zuverlässige Bestimmung der sechs Freiheitsgrade von Robotern in Bewegung durch gleichzeitige Erfassung mehrerer Lichtquellenpositionen möglich ist.

Ein neuartiges, nicht periodisches Aperturmaskendesign soll das bisherige Codierungsverfahren ersetzen und die Eindeutigkeit jedes

abgebildeten Maskenausschnitts sicherstellen. Ergänzend wird ein Algorithmus entwickelt, um die Abbildungen der drei Lichtquellen voneinander zu separieren. Durch den Einsatz spektraler und geometrischer Codierung soll die Korrespondenz zwischen Messwert und Lichtquelle hergestellt werden.

Auf dieser Grundlage soll MAPS zu einem robusten und kosteneffizienten Instrument weiterentwickelt werden, das eine kontinuierliche Echtzeitüberwachung der Roboterpose in dynamischen Fertigungs-umgebungen ermöglicht.

1.2 GLIEDERUNG DER ARBEIT

In Kapitel 2 werden zunächst die Grundlagen für das Verständnis der Arbeit vorgestellt. Im Fokus stehen dabei das Funktionsprinzip der Lochkamera sowie die Beugungsmuster an der Kreisblende. Ferner wird die Definition eines Koordinatensystems anhand dreier Punkte im euklidischen Raum erläutert, die als Grundlage zur Bestimmung der 6DOF des Roboter-TCPs dient. Die Erklärung des Konfigurationsraums trägt zum Verständnis der Koordinatentransformation zwischen MAPS und Roboter bei.

Kapitel 3 widmet sich dem Messinstrument MAPS. Dabei wird das grundlegende Messprinzip erläutert und der experimentelle Aufbau beschrieben. Die bisherigen Entwicklungen am System sowie systematische Abweichungen werden zusammengefasst. Abschließend erfolgt eine Darstellung der aktuellen Limitationen und eine Einordnung von MAPS im Kontext bestehender Lösungen.

Gegenstand von Kapitel 4 ist ein neu entwickeltes, arbiträres Aperturmaskendesign. Es wird ein Algorithmus vorgestellt, mit dem der abgebildete Maskenausschnitt auf Basis des Spotmusters ermittelt wird. Verschiedene Designs werden miteinander verglichen und hinsichtlich ihrer Robustheit validiert — ein Maß für die Eindeutigkeit einzelner Maskenausschnitte. Zudem wird ein Verfahren zur Segmentierung der Spotmuster der drei Lichtquellen präsentiert. Das vollständige Verfahren wird zunächst simuliert, wofür ein digitaler Zwilling von MAPS entwickelt wird. Abschließend erfolgt eine Validierung durch Laborexperimente.

Kapitel 5 baut auf dem Aperturmaskendesign des vorangegangenen Kapitels auf, konzentriert sich jedoch auf die Zuordnung der Messwerte zu den jeweiligen Lichtquellen. Zwei Methoden werden hierzu untersucht: Die erste basiert auf spektraler Codierung, bei der drei unterschiedlich farbige LEDs und eine RGB-Kamera zum Einsatz kommen. Die zweite Methode nutzt ein monochromes Setup mit Formcodierung durch geometrisch unterschiedliche Blenden direkt an den LEDs. Am Ende des Kapitels erfolgt ein Vergleich beider Ansätze.

Kapitel 6 befasst sich mit der Bewertung der Messunsicherheit. Zunächst werden die relevanten Einflussgrößen aufgelistet und quantifiziert. Der Hauptteil des Kapitels behandelt eine Monte-Carlo-Simulation auf Basis des digitalen Zwillingss zur Abschätzung der Gesamtunsicherheit bei verschiedenen Messbereichen. Außerdem wird das Messunsicherheitsbudget aufgestellt. Ferner wird der Einfluss der Sensorlage relativ zur Aperturmase auf das Messergebnis analysiert. Abschließend wird ein auf kinematischen Ketten basierendes Kalibrierverfahren zur Anwendung auf MAPS vorgestellt.

In Kapitel 7 werden die Ergebnisse der vorangegangenen Kapitel im Gesamtzusammenhang diskutiert. Der Schwerpunkt liegt auf dem

GLIEDERUNG DER ARBEIT

Vergleich der entwickelten Methoden und deren Praxistauglichkeit außerhalb der Laborumgebung. Kapitel 8 schließt die Arbeit mit einer Zusammenfassung der zentralen Erkenntnisse und einem Ausblick auf zukünftige Entwicklungen ab.

Kapitel 2

GRUNDLAGEN

2.1 DIE LOCHKAMERA

Die Lochkamera ist die Urform aller modernen Fotoapparate. Leonardo da Vinci benutzte um 1500 eine Camera obscura, um ein kopfstezendes und seitenverkehrtes Bild zu zeichnen. Die erste dauerhaft erhaltene Fotografie *Blick aus dem Arbeitszimmer von Le Gras* wurde 1826 von Joseph Nicéphore Niépce mit einer Camera obscura auf einer mit Bitumen beschichteten Zinnplatte aufgenommen. Durch eine stundenlange Belichtung härteten die lichtempfindlichen Bereiche aus, wodurch nach dem Auswaschen ein dauerhaftes Bild entstand. In der heutigen Zeit finden Lochkameras nur noch selten Einsatz. Sie besitzen allerdings einen entscheidenden Vorteil gegenüber Linsenkameras, da ihnen aberrationsbehaftete Linsensysteme fehlen. Die Bildtreue wird aus einem Kompromiss zwischen geometrischer Schärfe und Beugungsunschärfe bestimmt. Im Vergleich zu objektivbasierten Systemen treten bei der Lochkamera keine Linsenfehler auf. Aufgrund weniger Komponenten ist der Aufbau der Lochkamera relativ einfach und flexibel.

In Abbildung 2.1 ist eine schematische Darstellung der Lochkamera dargestellt. Sie besteht lediglich aus einer lichtdichten Box mit einer Blendenöffnung einerseits und einem Schirm andererseits. Die Größe der Blende D_A ist klein gegenüber der Kameralänge b . Die Kameralänge (Bildweite) gibt den Abstand zwischen der Blende und dem Schirm

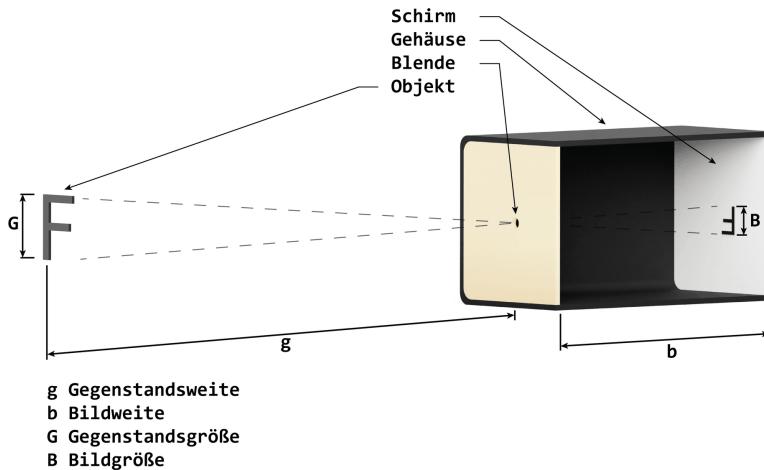


Abbildung 2.1: Schematische Zeichnung der Lochkamera (nach Schmidt-Ploch [5]).

an. Das Verhältnis der Gegenstandsweite zur Bildweite entspricht dem der Gegenstandsgroße zur Bildgröße. Aus diesem Verhältnis lässt sich nach Formel 2.1 der Abbildungsmaßstab β zwischen Objektraum und Bildraum berechnen [6]:

$$\beta = \frac{|B|}{|G|} = \frac{|b|}{|g|} \quad (2.1)$$

Eine vereinfachte, aber anschauliche Erklärung für die Bildentstehung bei der Lochkamera liefert eine Betrachtungsweise aus Sicht der geometrischen Optik. Es wird eine punktförmige, selbstleuchtende Lichtquelle im Objektraum betrachtet (der Bereich, in dem sich das abzubildende Objekt befindet). Die Punktquelle wird als divergent angenommen und nur ein Teil der Strahlen gelangt durch die Blendenöffnung. Auf dem Schirm wird ein heller Fleck in Form der

Blendenöffnung abgebildet. Die Abbildung kann skaliert werden, indem entweder die Blendenöffnung oder die Kameralänge verändert wird. Je größer die Blendenöffnung und die Kameralänge, desto größer die Abbildung auf dem Schirm.

Nach dem Prinzip der geometrischen Optik wird die Abbildung schärf-fer, wenn der Durchmesser der Blendenöffnung abnimmt [7]. Denn wenn das Loch kleiner wird, treten nur Lichtstrahlen aus einem engeren Winkelbereich durch die Apertur auf den Schirm. Dadurch wird ein Objektpunkt wieder zu einem schärferen Bildpunkt. Zur Erzeugung eines idealen Bildes muss die Apertur unendlich klein sein und die Belichtungszeit unendlich lang sein. Da dies praktisch nicht umsetzbar ist, wird zumindest ein möglichst kleines Loch angestrebt. Bei zu kleinem Lochdurchmesser tritt allerdings das Phänomen der Lichtbeugung ein und damit Beugungsunschärfe. Wird die Abbildung einer Punktquelle genauer untersucht (Abbildung 2.2), so erscheint diese nicht als Punkt oder kleine Fläche, wie es nach den Gesetzen der geometrischen Optik zu erwarten wäre. Stattdessen wird eine helle Scheibe von dunklen und hellen Ringen (Airy-Scheibchen) umgeben, die nach außen hin immer mehr an Intensität verlieren. Je kleiner die Blendenöffnung ist, desto stärker ist der Beugungsef-fekt.

Für eine optimale Bildqualität muss daher ein Kompromiss zwischen geometrischer Unschärfe (bei zu großer Blendenöffnung) und Beugungsunschärfe (bei zu kleiner Blende) gefunden werden. Der optimale Öffnungs-durchmesser ergibt sich aus der Überlagerung beider Effekte und hängt unter anderem von der Wellenlänge des verwende-ten Lichts und der Bildweite ab.

Gemäß Young [8] berechnet sich der optimale Aperturdurchmesser D_{opt} nach:

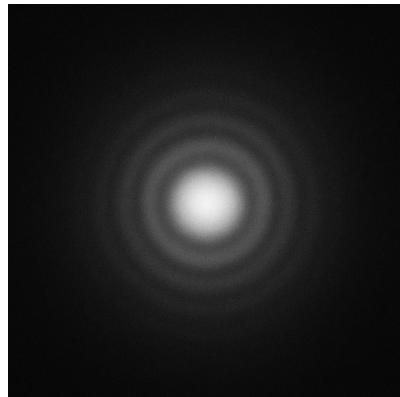


Abbildung 2.2: Beugungsscheibchen, die durch Beugung der Lichtstrahlen an einer kreisförmigen Blende entstehen.

$$D_{\text{opt}} = \sqrt{2.44} \sqrt{f\lambda} = 1.562 \sqrt{f\lambda} \quad (2.2)$$

Dabei bezeichnet f die Bildweite und λ die effektive Wellenlänge des verwendeten Lichts.

2.2 BEUGUNG AN DER KREISBLENDE

Wird eine Öffnung in einem undurchsichtigen Schirm von einer ebenen Lichtwelle beleuchtet, so würde man gemäß der geometrischen Optik erwarten, dass hinter der Öffnung ein scharf begrenzter Lichtfleck entsteht. Tatsächlich zeigt sich jedoch, dass Licht auch in den geometrischen Schattenraum eindringt. Ursache hierfür ist die Beugung der

Lichtwellen an den Rändern der Blende. Die dabei entstehenden Beugungsbilder lassen sich durch das Huygenssche Prinzip in Verbindung mit der Interferenz von Lichtwellen erklären. Ein einzelner Punkt einer Lichtquelle wird demnach nicht als Punkt, sondern stets als sein Beugungsbild abgebildet, dessen Form und Ausdehnung durch die Geometrie der Apertur bestimmt werden [9].

Das entstehende Beugungsmuster lässt sich durch die Fresnel-Zahl F beschreiben, die das Verhältnis von Aperturdurchmesser, Wellenlänge und Bildweite ausdrückt.

$$F = \frac{r_a^2}{b \cdot \lambda} \quad (2.3)$$

Dabei bezeichnet r_a den Radius der Kreisblende, λ die Wellenlänge des Lichts und b den Abstand zwischen Blende und Beobachtungsebene.

Im **Fernfeld** ($F \ll 1$) stellt sich das klassische Fraunhofer-Beugungsbild ein, welches durch das sogenannte *Airy-Muster* charakterisiert ist. Es besteht aus einem zentralen Intensitätsmaximum (Airy-Scheibe), umgeben von konzentrischen Nebenmaxima und Minima. Die Intensitätsverteilung ist rotationssymmetrisch, mit einem ausgeprägten zentralen Maximum. In diesem Bereich dominieren Interferenzeffekte, und die Form der Blende beeinflusst das Beugungsmuster deutlich.

Im **Nahfeld** ($F \gg 1$) überwiegen geometrische Effekte, die Beugung ist kaum ausgeprägt. Das Intensitätsprofil ähnelt stark der projizierten Blendenform. Es tritt kaum eine erkennbare Interferenzstruktur auf, und der Lichtverlauf folgt näherungsweise der geometrischen Optik.

Der **Übergangsbereich** ($F \approx 1$) stellt eine Mischform dar, in der sowohl Beugung als auch geometrische Effekte eine Rolle spielen. Das resultierende Intensitätsprofil ist glockenförmig, mit einem zentralen Maximum, jedoch ohne die ausgeprägten Ringe des Fernfelds [6], [10], [11].

Abbildung 2.3 zeigt exemplarisch die Intensitätsverteilungen im Nahfeld, im Übergangsbereich und im Fernfeld für eine Kreisblende bei konstanter Wellenlänge.

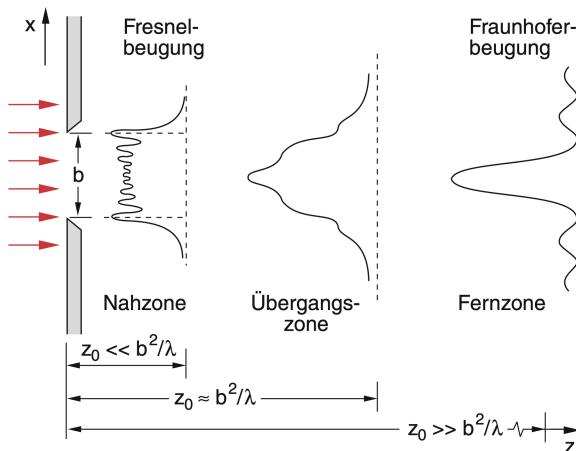


Abbildung 2.3: Beugungsmuster an der Kreisblende im Nahfeld (links), Übergangsbereich (mitte) und Fernfeld (rechts) [10].

2.3 PROJEKTIVE GEOMETRIE

Die projektive Geometrie stellt ein fundamentales Konzept zur Beschreibung bildgebender Systeme dar, bei denen räumliche Punkte durch eine Zentralprojektion auf eine Bildebene abgebildet werden. Die klassische Modellierung erfolgt mithilfe homogener Koordinaten und Transformationen, um projektive Effekte mathematisch konsistent zu erfassen [12]. Eine wichtige Anwendung findet sich in der Analyse und Auswertung optischer Systeme mit fester Kamerageometrie.

Ein Punkt im dreidimensionalen Raum wird durch einen homogenen Vektor $M = (X, Y, Z, 1)^T$ beschrieben. Die Abbildung dieses Punktes auf eine zweidimensionale Bildebene erfolgt über eine projektive Transformation, typischerweise dargestellt durch eine 3×4 -Projektionsmatrix P :

$$m = PM = K[R \mid t]M \quad (2.4)$$

Hierbei bezeichnet $K \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ die sogenannte intrinsische Kameramatrix, die Parameter wie Brennweite, Pixelmaßstab und Bildzentrum enthält. Die Matrix R beschreibt die Orientierung der Kamera (Rotation), während t für die Translation relativ zum Weltkoordinatensystem steht [13].

Im Allgemeinen handelt es sich bei dieser Abbildung um eine *projektive Transformation*. Das bedeutet, dass geometrische Invarianten wie Längen, Winkel oder Parallelität nicht erhalten bleiben. Die Projektionsmatrix bewahrt jedoch Kollinearität und das sogenannte Kreuzverhältnis, was projektive Invarianz ermöglicht [12].

Besondere Bedeutung kommt zwei idealisierten Sonderfällen zu:

- **Isometrische Transformationen** bewahren Längen und Winkel. Sie entsprechen einer Kombination aus Rotation und Translation ohne perspektivische Verzerrung. Die Abbildung bleibt in diesem Fall metrisch korrekt.
- **Perspektivische Transformationen** beinhalten zusätzlich zur Translation und Rotation eine perspektivisch bedingte Verzerrung. Diese entsteht, wenn die Projektionsstrahlen von einem einzelnen Zentrum ausgehen und nicht senkrecht auf die Bildebene treffen. Typische Effekte sind Größenverzerrung, Fluchtpunkte und perspektivische Stauchung [7].

Für die mathematische Beschreibung solcher Effekte auf der Bildebene wird die sogenannte *Homographie* verwendet. Sie beschreibt die Abbildung zwischen zwei Ebenen im Raum (z. B. einer Objekt ebene und der Bildebene) durch eine 3×3 -Matrix H , die homogene 2D-Punkte transformiert:

$$m' = Hm \quad (2.5)$$

Homographien bewahren Kollinearität und projektive Invarianten, können jedoch Affinität, Längenverhältnisse und Winkel verändern. In der Bildverarbeitung werden sie beispielsweise zur Entzerrung, Kalibrierung und Rückprojektion verwendet.

2.4 KARTESISCHES KOORDINATENSYSTEM

Ein kartesisches Koordinatensystem (KS) im dreidimensionalen euklidischen Raum \mathbb{E}^3 wird durch drei paarweise orthogonale Koordinatenachsen X , Y und Z sowie einen gemeinsamen Ursprung $O = (0,0,0)$ definiert. Die Orientierung des KS ist eindeutig festgelegt, wenn neben dem Ursprung auch die Richtungen der Achsen bekannt sind. Diese lassen sich beispielsweise durch die Position dreier nicht kollinearer Punkte im Raum definieren, wie etwa durch drei Lichtquellen. Ihre Positionen werden als dreidimensionale Spaltenvektoren angegeben.

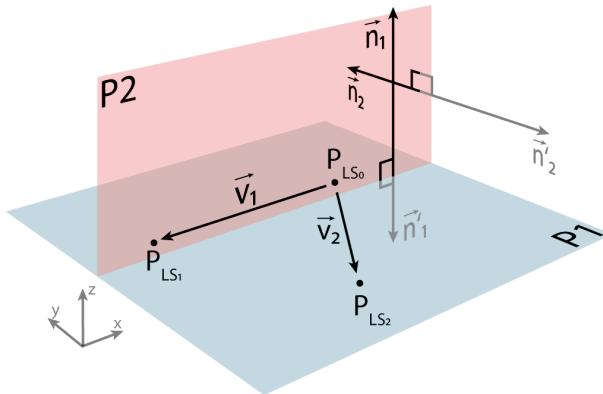


Abbildung 2.4: Definition des Koordinatensystems CS_T des LED-Targets anhand der Positionen dreier Lichtquellen im euklidischen Raum.

Abbildung 2.4 zeigt zwei Ebenen E_1 und E_2 im Raum \mathbb{E}^3 . Die Punkte P_{LS0} , P_{LS1} und P_{LS2} markieren die Positionen dreier Lichtquellen. Alle drei liegen auf der Ebene E_1 . Die Richtungsvektoren \vec{v}_1 und \vec{v}_2 verbinden P_{LS0} mit P_{LS1} bzw. P_{LS2} . Da \vec{v}_1 und \vec{v}_2 linear unabhängig sind,

spannen sie die Ebene E_1 auf. Das Kreuzprodukt der beiden Vektoren ergibt die Normale der Ebene E_1 :

$$\vec{n}_1 = \vec{v}_1 \times \vec{v}_2 \quad (2.6)$$

Die Normale \vec{n}_1 steht senkrecht auf E_1 und bildet gemeinsam mit \vec{v}_1 die Ebene E_2 . Die Normale zu E_2 ergibt sich analog als Kreuzprodukt von \vec{v}_1 und \vec{n}_1 :

$$\vec{n}_2 = \vec{v}_1 \times \vec{n}_1 \quad (2.7)$$

Diese Vorgehensweise basiert auf dem Prinzip der dreidimensionalen Kreuzproduktbildung für orthogonale Richtungen [14].

Da es sich bei Kreuzprodukten um sogenannte Pseudovektoren handelt, ist ihre Richtung abhängig von der Reihenfolge der Operanden. Das Kreuzprodukt ist antikommutativ:

$$\vec{v}_1 \times \vec{v}_2 = \vec{n}_1, \quad \vec{v}_2 \times \vec{v}_1 = -\vec{n}_1 = \vec{n}'_1 \quad (2.8)$$

Wie in Abbildung 2.4 angedeutet, sind auch die entgegengesetzten Vektoren \vec{n}'_1 und \vec{n}'_2 dargestellt. Zur eindeutigen Festlegung der Richtung wird die sogenannte Rechte-Hand-Regel angewendet [15].

Die drei Vektoren \vec{v}_1 , \vec{n}_1 und \vec{n}_2 stehen jeweils senkrecht aufeinander und können als Basisvektoren eines rechtshändigen kartesischen Koordinatensystems verwendet werden. Der Ursprung des Koordinatensystems liegt im Punkt P_{LS0} . Die Vektorkomponenten werden fortan als *Koordinaten* bezeichnet. Innerhalb des Raums \mathbb{E}^3 kann damit

jeder Punkt eindeutig durch ein Koordinatentripel $p(x, y, z)$ beschrieben werden.

2.5 KONFIGURATIONSRAUM

Ein von Vektoren aufgespanntes Koordinatensystem lässt sich als Konfigurationsraum interpretieren. Ein kartesischer Konfigurationsraum im dreidimensionalen Raum wird formal als $Q = \mathbb{R}^3 \times SO(3)$ beschrieben. Er ist sechsdimensional und umfasst sowohl die Position als auch die Orientierung eines Objekts. Ein Punkt $q \in Q$ wird durch drei Koordinaten für die Translation und drei Parameter für die Rotation dargestellt. Die Gruppe $SO(3)$ beschreibt alle möglichen Orientierungen eines starren Körpers im Raum in Form von Rotationsmatrizen. Sie umfasst alle orthogonalen 3×3 -Matrizen mit Determinante +1 und bildet eine Lie-Gruppe [16].

Ein Vektor \vec{x} kann durch Multiplikation mit einer Rotationsmatrix R in einen neuen Vektor \vec{x}' transformiert werden. Die Matrix R kann durch drei Drehungen – beispielsweise mittels Euler-Winkel – zusammengesetzt werden und wird zur Beschreibung von aktiven (Objekt wird rotiert) oder passiven Transformationen (Koordinatensystem wird rotiert) verwendet [17]. Dabei lassen sich beliebige räumliche Drehungen als Folge von drei ebenen Drehungen darstellen.

Die Erweiterung vom dreidimensionalen euklidischen Raum \mathbb{R}^3 zum Konfigurationsraum Q ändert die Beschreibung eines Punktes: Statt nur (x, y, z) werden zur vollständigen Beschreibung zusätzlich drei Orientierungsparameter benötigt, typischerweise die Euler-

Winkel ϕ, θ, ψ . Ein Punkt im Konfigurationsraum ist somit durch $q = (x, y, z, \phi, \theta, \psi)$ eindeutig bestimmt.

Euler-Winkel dienen der Definition der Orientierung eines orthogonalen Koordinatensystems relativ zu einem Bezugssystem. Es handelt sich um eine sequenzielle Kombination dreier Rotationen um bestimmte Achsen. Ziel ist die Beschreibung eines bewegten Koordinatensystems CS_A relativ zu einem Referenzsystem CS_R . Die Drehungen erfolgen schrittweise über Zwischenkoordinatensysteme (CS' , CS''). Häufig verwendet werden Konventionen wie $zy'x''$ oder $zx'z''$ [18].

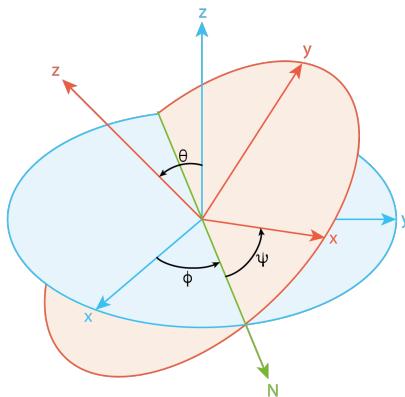


Abbildung 2.5: Definition der Orientierung durch Euler-Winkel. Basiskoordinatensystem (x,y,z) , gedrehtes System (X,Y,Z) und Knotenlinie (N) .

Abbildung 2.5 veranschaulicht die Koordinatentransformation nach der sogenannten $zx'z''$ -Konvention. Dabei erfolgt die Orientierung von CS_A zu CS_R in drei Schritten [19]:

- $R_z(\phi)$: Rotation um die ursprüngliche z -Achse,

- b) $R'_x(\theta)$: Rotation um die x' -Achse (nach erster Drehung),
- c) $R''_z(\psi)$: Rotation um die z'' -Achse (nach zweiter Drehung).

Die resultierende Rotationsmatrix R ergibt sich aus der Matrixmultiplikation der drei Einzelrotationen:

$$R(\phi, \theta, \psi) = R''_z(\psi) R'_x(\theta) R_z(\phi)$$

$$= \begin{pmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

Eine Rotationsmatrix kann sowohl zur aktiven Transformation von Vektoren als auch zur passiven Änderung der Basis verwendet werden. Bei letzterem entspricht eine Drehung der Basis um einen Winkel θ der gegensinnigen Drehung aller Vektoren um $-\theta$. Die Ergebnisse sind in beiden Fällen äquivalent.

Ein sogenannter Basiswechsel erlaubt die Darstellung eines Vektors in einer neuen Koordinatenbasis. Die Transformation der Koordinaten erfolgt durch eine Übergangsmatrix T . Ist T die Matrix zur Transformation von Basis B' zu B , so ist T^{-1} die inverse Transformation von B nach B' [20].

Ein Sonderfall des Basiswechsels ist eine reine Rotation (ggf. mit Translation) des Koordinatensystems. Sind die ursprünglichen Basisvektoren orthonormal, so bleiben es auch die neuen – die Transformation

erfolgt dann über eine orthogonale Matrix. In der Praxis werden solche Transformationen häufig durch die Verwendung von Einheitsvektoren eines starren Körpers beschrieben, die in den Spalten einer Rotationsmatrix organisiert sind [21].

2.6 BEGRIFF DER MESSUNSICHERHEIT

In der Messtechnik bezeichnet die Messunsicherheit einen Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die einer Messgröße auf der Grundlage der verfügbaren Informationen vernünftigerweise zugeordnet werden können [22]. Sie liefert somit eine quantitative Aussage über die Vertrauenswürdigkeit eines Messergebnisses. Ein Messwert ist ohne Angabe seiner Unsicherheit nicht vollständig interpretierbar und kann weder verglichen noch rückgeführt werden.

Gemäß dem *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (GUM) wird zwischen zwei grundlegenden Arten von Unsicherheiten unterschieden: Typ-A-unsicherheiten, die durch statistische Auswertung wiederholter Messungen ermittelt werden, und Typ-B-unsicherheiten, die auf andere Informationsquellen wie Kalibrierprotokolle, Spezifikationen oder numerische Simulationen zurückgehen.

Die Standardunsicherheit einer Einflussgröße entspricht der Standardabweichung, mit der diese zur Gesamtunsicherheit beiträgt. Für eine Reihe n von unabhängigen Einzelmessungen q_k ergibt sich die Standardunsicherheit des Mittelwerts zu:

$$u(\bar{q}) = s(\bar{q}) = \frac{s(q_k)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2} \quad (2.10)$$

Dabei ist $s(q_k)$ die empirische Standardabweichung, \bar{q} der Mittelwert der Messreihe. Die Standardunsicherheit $u(\bar{q})$ beschreibt die Unsicherheit in der Angabe des Mittelwerts und gehört zur Typ-A-Bewertung.

Die Beiträge $u(q_k)$ werden mit entsprechenden Sensitivitätskoeffizienten c_k gewichtet, was zu der folgenden Ausdrucksform führt:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{k=1}^N (c_k \cdot u(q_k))^2} \quad (2.11)$$

Diese quadratische Summation folgt dem Prinzip der Fehlerfortpflanzung und bildet die Grundlage für die Berechnung der Gesamtunsicherheit eines Messergebnisses.

Für eine vollständige Unsicherheitsanalyse werden die einzelnen Beiträge aus Typ A und Typ B zur sogenannten kombinierten Standardunsicherheit $u_c(y)$ zusammengeführt:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

Zur Angabe eines Vertrauensintervalls wird aus der kombinierten Standardunsicherheit die sogenannte erweiterte Unsicherheit U berechnet. Hierzu wird ein Erweiterungsfaktor k verwendet, der je nach gewünschtem Konfidenzniveau gewählt wird. Für ein Vertrauensniveau von ca. 95 % ist $k = 2$ üblich:

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (2.12)$$

Die erweiterte Unsicherheit legt somit einen Bereich fest, in dem der wahre Wert der Messgröße mit definierter Wahrscheinlichkeit zu erwarten ist.

Ein wesentliches Hilfsmittel zur strukturierten Erfassung aller relevanten Einflussgrößen ist das sogenannte *Unsicherheitsbudget*. Es listet sämtliche Einzelbeiträge zur Messunsicherheit systematisch auf, einschließlich ihrer Bewertung (Typ A oder Typ B), geschätzter Standardunsicherheit $u(q_k)$, zugehörigem Sensitivitätskoeffizienten c_k sowie ihres gewichteten Beitrags zur kombinierten Unsicherheit. Das Unsicherheitsbudget bildet somit die Grundlage für die Anwendung der Gleichung (2.11). Es ermöglicht eine transparente Darstellung der Unsicherheitsquellen und unterstützt gezielt die Identifikation dominanter Einflussgrößen, etwa zur Optimierung von Messsystemen oder Kalibrierstrategien.

Kapitel 3

DAS MESSINSTRUMENT MAPS

Dieses Kapitel stellt das Multi-Aperture Positioning System (MAPS) vor. Das beinhaltet einen grundlegenden Überblick über das Messprinzip des MAPS, seine Komponenten sowie zentrale funktionelle Aspekte. Ebenfalls werden der Laboraufbau, die eingesetzten Softwarealgorithmen sowie frühere Forschungsarbeiten bezüglich Simulation, Kalibrierung, Optimierung und Leistungsevaluierung vorgestellt.

3.1 GRUNDLEGENDES PRINZIP

Das Multi-Aperture Positioning System ist ein photogrammetrisches Koordinatenmessinstrument zur Erfassung der sechs Freiheitsgrade von Handhabungsgeräten, Werkzeugmaschinen oder Industrierobotern. Es wurde ursprünglich von der eumetron GmbH in Aalen (Deutschland) entwickelt. Weiterentwicklungen erfolgten im Rahmen mehrerer akademischer Abschlussarbeiten und Promotionen sowie durch ein ZIM-Projekt (16KN075728) und ein DFG-Projekt (326738811).

Das Messinstrument besteht im Wesentlichen aus zwei Komponenten: dem LED-Target und dem Detektor. Das Target umfasst drei Hochleistungs-LEDs, die auf einer Halterung montiert sind und nahe

dem Tool Center Point (TCP) der zu vermessenden Maschine angebracht werden. Der Detektor wird mit freier Sicht auf das Target, innerhalb des Lichtkegels der LEDs, platziert. In Abbildung 3.1 ist hierfür eine schematische Darstellung zu sehen. Der Detektor besteht aus einer Industriekamera und einer Lochmaske (auch Aperturmmaske, APM). Er ist analog zum Prinzip der Lochkamera aufgebaut; das Messprinzip basiert auf geometrischer Optik. MAPS erfassst die Position der Target-Lichtquellen und bestimmt daraus deren räumliche Lage und die Orientierung des Targets. Das Verfahren ist durch drei Patente geschützt: Grenet, Masa, Franzi u. a. [23], Hageney [24] und Office [25].

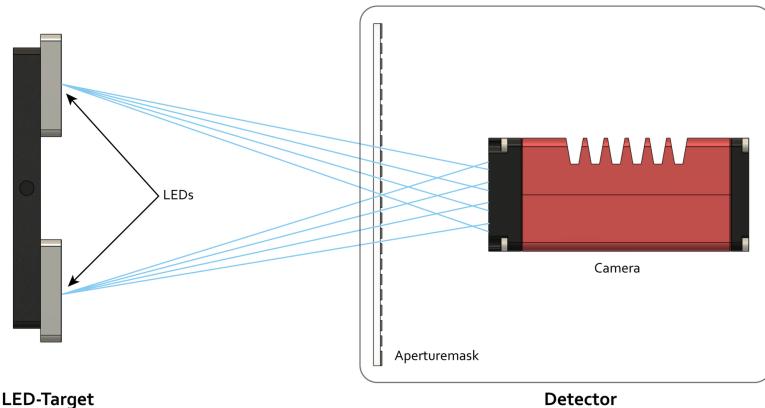


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung des MAPS: Das Licht der Target-LEDs durchscheint die Aperturen der Maske und wird auf den Kameratasensor projiziert.

3.1.1 MULTI-APERTUR-TECHNIK

Das photogrammetrische Messprinzip von MAPS lässt sich anhand des Strahlensatzes und des Prinzips der Lochkamera erklären. Abbildung 3.2 zeigt eine entsprechende schematische Darstellung. Ein Lichtbündel der Lichtquelle LQ strahlt durch die Apertur A_1 der Blendenplatte und trifft auf den Kamerasensor.

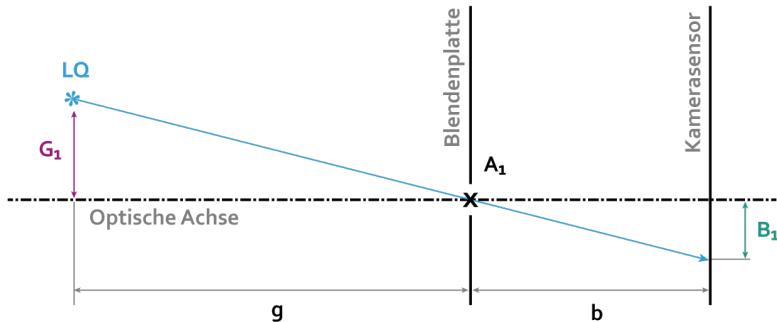


Abbildung 3.2: Abbildungsprinzip der Lochkamera mit einem Loch (nach Bielke, Garcia, Harrison u. a. [26]).

Die Gegenstandsweite g entspricht der z-Koordinate der Lichtquelle. Die Gegenstandsgröße G_1 beschreibt den lateralen Versatz zur optischen Achse und entspricht der x- oder y-Koordinate der Lichtquelle. Die Kammerkonstante b ist bekannt, und die Bildgröße B_1 kann aus der Sensorabbildung bestimmt werden. Da jedoch g und G_1 unbekannt sind, ist Gleichung 2.1 nicht direkt lösbar.

Dieses Problem wird durch das Einfügen einer zweiten Apertur behoben (vgl. Abbildung 3.3). Der bekannte Aperturabstand h ergänzt die Informationen zur Lösung.

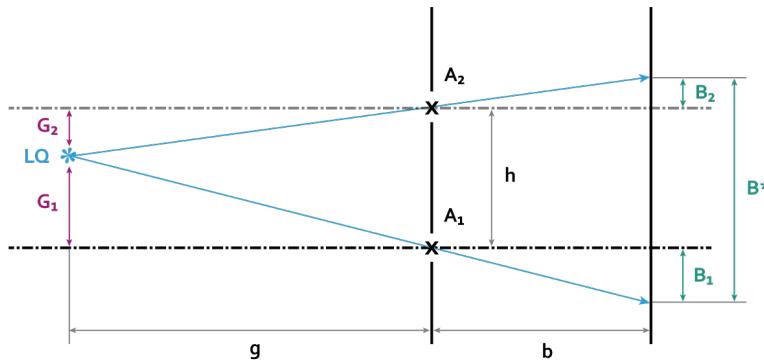


Abbildung 3.3: Geometrische Optik der Multi-Apertur Lochkamera mit zwei Löchern (nach Bielke, Garcia, Harrison u. a. [26]).

Der Abstand B^* der beiden auf dem Sensor auftreffenden Lichtbündel kann wiederum aus der Abbildung berechnet werden. B_1 und B_2 sind die Abstände der auftreffenden Lichtbündel zur optischen Achse der jeweiligen Apertur. Es handelt sich um die Orthogonale zum Sensor, die durch den Mittelpunkt der Apertur verläuft. G_2 entspricht dem Aperturabstand h abzüglich G_1 :

$$G_2 = h - G_1 \quad (3.1)$$

Gleichung 3.1 wird in Gleichung 2.1 für G eingesetzt, wobei $\frac{|b|}{|g|}$ mit $\frac{|B_1|}{|G_1|}$ substituiert wird. Umgeformt nach G_1 ergibt sich [26]:

$$G_1 = \frac{h \cdot |B_1|}{|B_1| - B_2} \quad (3.2)$$

Mit bekannten abbildungsbezogenen Größen (B_1, B_2, h, b) lassen sich G_1 und durch Einsetzen in 2.1 anschließend g berechnen. Somit kann

die Position der Lichtquelle im Raum mit nur zwei Aperturen bestimmt werden.

Wird die Blendenplatte durch eine Aperturmaske mit mehreren tausend Löchern ersetzt, kann die Position statistisch sicherer bestimmt werden. Typischerweise enthält die Maske ca. 40.000 Aperturen, von denen 700–1000 auf dem Sensor abgebildet werden (vgl. Abbildung 3.4). Die Lichtstrahlen, die durch die Aperturen scheinen, erzeugen Lichtflecken auf dem Sensor. Die sogenannten Spots sind kreisrund und weisen einen glockenförmigen Intensitätsverlauf auf. Das Muster in der Mitte der Sensorabbildung ist eine Codierung, um den abgebildeten Maskenausschnitt zu lokalisieren.

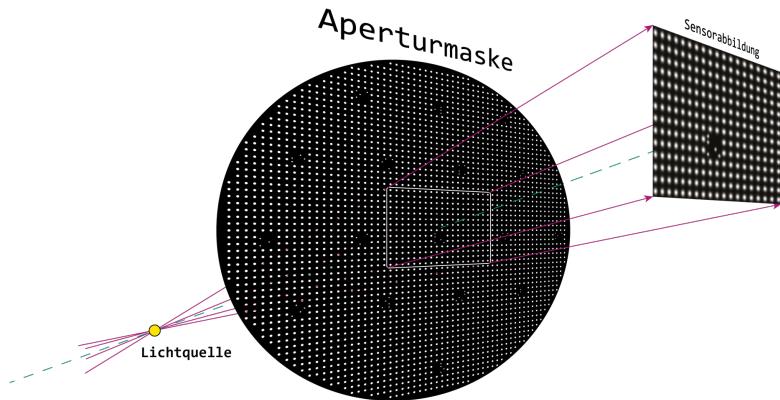


Abbildung 3.4: Darstellung der Lichtquelle, der Aperturmaske und der resultierenden Sensorabbildung.

Zu jedem Spot wird ein Vektor vom Spotzentrum durch den zugehörigen Lochmittelpunkt in den Raum aufgespannt. Alle Vektoren sind bekannt, weil sowohl die Lochkoordinaten (Maskenebene) als auch die Spotkoordinaten (Sensorebene) bekannt sind. Die Lochko-

ordinaten stammen aus dem Designfile der Aperturmaske, und die Spotkoordinaten ergeben sich aus dem Sensormesswert. Idealerweise schneiden sich alle Vektoren in einem gemeinsamen Punkt — der Position der Lichtquelle. Eine detailliertere Erklärung der eingesetzten Softwarealgorithmen folgt im nächsten Abschnitt.

Die Messpräzision steigt mit der Anzahl der Spots. Der sogenannte *Gain-of-Precision* (GoP) wird von Bielke mit

$$GoP(n) = \sqrt{n_{spots}} \quad (3.3)$$

angegeben, hergeleitet aus der Anzahl der Kombinationen ohne Wiederholungen. Typischerweise wird ein GoP von 20 bis 30 im Vergleich zu zwei Aperturen erreicht.

Eine ähnliche Technik wird von Haist et al. vorgestellt. Dabei wird ein computergeneriertes Hologramm (CGH) verwendet, um mehrere Bilder eines Messobjekts zu erzeugen und die Genauigkeit zu erhöhen [27]–[29].

3.1.2 BERECHNUNG DER TARGETPOSE

Die Pose des LED-Targets setzt sich aus dessen Position und Orientierung zusammen. Die Position entspricht entweder der einer einzelnen Lichtquelle oder dem Mittelwert der drei. Für die Berechnung der Orientierung werden explizit alle drei Lichtquellenpositionen benötigt. Die Orientierung beschreibt die Drehlage des Targets relativ zu einem Bezugssystem und kann als Satz von Eulerwinkel, Quaternionen oder als Rotationsmatrix angegeben werden.

Als Bezugssystem dient das Basiskoordinatensystem des MAPS-Detektors CS_{MAPS} . Um die Drehlage des Targets zu bestimmen, wird

dessen Koordinatensystem CS_T aus den drei Lichtquellenpositionen definiert. Die Definition besagt, dass die Vektoren \vec{v}_1 und \vec{v}_2 von LS_0 zu LS_1 bzw. LS_2 verlaufen. Die Orientierung des Koordinatensystems hängt somit von der Anordnung der Lichtquellen ab (vgl. Abbildung 3.5).

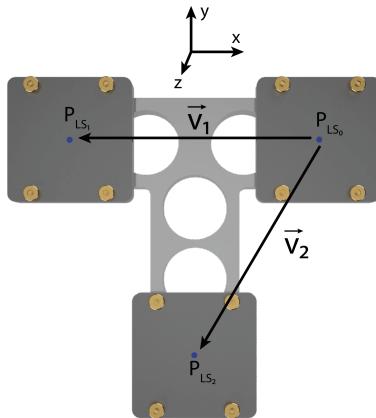


Abbildung 3.5: Schematische Darstellung des LED-Targets. Eingezeichnet sind die Lichtquellen, die Vektoren und das Koordinatensystem.

Das KS hat den Ursprung in P_{LS0} und die Basisvektoren $\vec{v}_1, \vec{n}_1, \vec{n}_2$. Jede der Lichtquellenpositionen kann als Spaltenvektor in diesem System beschrieben werden. Liegen diese Vektoren in einem zweiten Koordinatensystem vor, sei es das Basissystem CS_{MAPS} , so kann eine Übergangsmatrix T berechnet werden. Mithilfe von T kann jeder beliebige Vektor von CS_{MAPS} nach CS_T übertragen werden:

$$\vec{v}_T = T \cdot \vec{v}_{MAPS} \quad (3.4)$$

wobei die Spalten von T die Koordinatenvektoren der neuen Basisvektoren relativ zur alten Basis sind. T kann als eine Rotationsmatrix betrachtet werden. Die Basisvektoren des einen Koordinatensystems werden so gedreht, dass sie mit denen des anderen übereinstimmen. Nach dem Eulerschen Rotationssatz lassen sich die Drehwinkel oder die Rotationsmatrix R aus T mithilfe der folgenden Gleichung ableiten [30]:

$$\begin{aligned}\theta_y &= \arcsin(r_{02}) \\ \theta_x &= \arctan 2(-r_{12}, r_{22}) \\ \theta_z &= \arctan 2(-r_{01}, r_{00}) \\ R &= [r_{ij}] \text{ für } 0 \leq i \leq 2 \text{ und } 0 \leq j \leq 2\end{aligned}\tag{3.5}$$

Diese Gleichung gilt für die Konfiguration x, y', z'' ; andere Konfigurationen erfordern entsprechend angepasste Formeln.

Die Zuordnung der Messwerte zu den jeweiligen Lichtquellen wird als *Korrespondenz* bezeichnet. Dies ist für die korrekte Ausrichtung von CS_T notwendig und wird in 2.4 beschrieben. Eine falsche Zuordnung (z. B. Verwechslung von LS_0 und LS_1) führt zu einer anderen Orientierung.

Bewegt sich das Target durch den Raum (translatorisch oder rotatorisch), bewegt sich auch sein Koordinatensystem. Dessen Orientierung kann zu jeder Zeit bestimmt werden, sofern eindeutig nachvollziehbar ist, welche Lichtquelle zu welcher gemessenen Position gehört (Korrespondenz). Werden die Messwerte vertauscht, so ergibt sich ein anderer Konfigurationsraum und somit eine fehlerhafte Orientierung. Daraus folgt, dass die Anordnung der Lichtquellen mit dem

gewählten Konfigurationsraum übereinstimmen muss. Dies wird als Korrespondenzproblem bezeichnet.

3.2 EXPERIMENTELLER AUFBAU

Dieser Abschnitt beschreibt den Laboraufbau des MAPS-Messinstruments sowie dessen Komponenten. Der initiale Aufbau wurde gemeinsam mit Bielke im Rahmen von *OnPoRob* entwickelt und basiert auf einer früheren Version der ejumetron GmbH. Diese Konfiguration wird im Folgenden als *Legacy-MAPS* bezeichnet.

Abbildung 3.6 zeigt den MAPS-Laboraufbau. Das Messinstrument ist in einer schwarzen Box untergebracht, die über eine Adapterplatte am Granittisch eines Koordinatenmessgeräts (KMG) befestigt ist. Das LED-Target ist wie ein taktiler Taster montiert, sodass das KMG als Bewegungsplattform und Referenzsystem dient.

Die Bewegungssteuerung erfolgt über einen NVIDIA Jetson AGX Xavier (Messcomputer), der über GPIOs die LEDs des Targets steuert. Das KMG selbst wird über die TCP/IP-Schnittstelle und die CMM-OS-API der ZEISS-Steuerung angesprochen.

3.2.1 LED-TARGET

Das LED-Target besteht aus einer Aluminiumhalterung mit Bohrungen zur Montage an verschiedenen Bewegungssystemen. Abbildung 3.7 zeigt zwei Varianten: a) ein spezielles Roboter-Target mit optionaler Werkzeugaufnahme und b) eine gewichtsreduzierte Variante für das KMG.

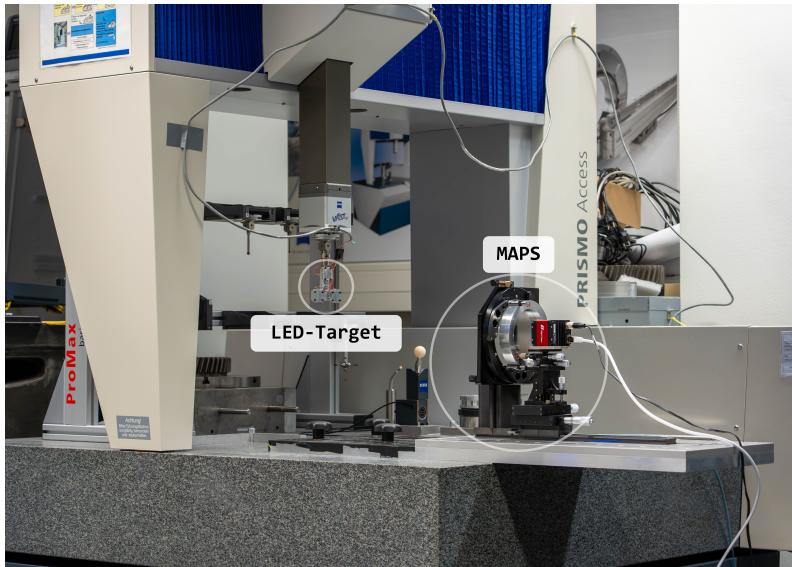
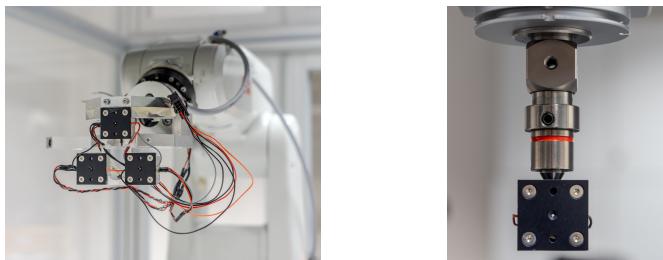


Abbildung 3.6: Fotografie des experimentellen Aufbaus, montiert an einem KMG.

Die LEDs werden auf eine Trägerplatine gelötet, die die Verbindung zum Steuerungscomputer erleichtert. Optional können Blenden auf die Platinen montiert werden, um eine runde Emissionsfläche sowie den Abstrahlwinkel zu definieren.

Als Lichtquelle kommt die monochromatische Hochleistungs-LED XLamp® XQ-E Royal Blue¹ von CREE-LED zum Einsatz. Sie bietet eine hohe optische Dichte und ein enges Emissionsspektrum. Die Emissionsfläche beträgt ca. 1 mm². Bei 700 mA Betriebsstrom erreicht sie eine typische Strahlungsleistung von etwa 1050 mW. Die dominante Wellenlänge (DWL) liegt zwischen 450 nm und 465 nm und wird

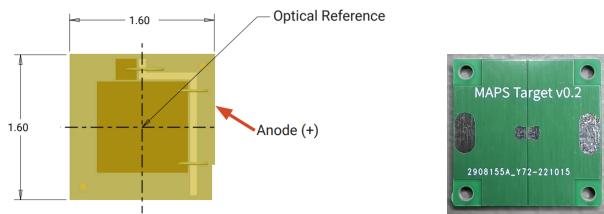
¹Teilenummer: XQEROY-H0-0000-000000P01 [31]



(a) LED-Target montiert an einem Industrieroboter. (b) LED-Target montiert wie ein Tastkopf an einem KMG.

Abbildung 3.7: Verschiedene LED-Targets für unterschiedliche Anwendungen.

in Bins mit jeweils 2,5 nm Bandbreite klassifiziert. Der große Halbstrahlwinkel von ca. 130° sorgt für eine hohe Bewegungsfreiheit des Handhabungsgeräts.



(a) Zeichnung der XQ-E LED (Draufsicht) [31]. (b) Trägerplatine für XQ-E LED.

Abbildung 3.8: Zeichnung und Montageplatte der XQ-E LED.

Links in Abbildung 3.8 sind die Maße der Lichtquelle eingezzeichnet; rechts ist die Trägerplatine zu sehen, auf die die LED aufgelötet wird. Die High-Intensity XQ-E LEDs besitzen keine Dom-Optik. Damit sie flach auf der Platine aufliegen, erfolgt die Lötung in einem Reflow-

Ofen. Beim manuellen Löten von SMD-Bauteilen sind eine exakte Ausrichtung und Ebenheit schwer zu gewährleisten.

Die LEDs werden — wie bereits erwähnt — über den Messcomputer angesteuert. Ein LED-Treiber² ist zwischengeschaltet und erlaubt die Dimmung per PWM-Signal. So lässt sich die Intensität der LEDs in Abhängigkeit von der Messdistanz einstellen. Durch die hohe Schaltfrequenz von 40–1000 kHz des LED-Treibers ist eine flimmerfreie Beleuchtung gewährleistet.

3.2.2 DETEKTOR

Das 3D-Modell in Abbildung 3.9 zeigt die Komponenten des Detektors. Ausgenommen sind die Lichtschutzabdeckung und die Basisplatte.

Auf der Basis ist eine optische Bank montiert, auf der zwei Türme beweglich gelagert sind. Am vorderen Turm ist die selbstzentrierende Halteklemme für die Aperturmaske befestigt; am hinteren befindet sich die Kamera auf einer zusammengesetzten 6DOF-Stage. Die optische Bank erlaubt ein schnelles Justieren der Kammerkonstanten (Bildweite) durch das Verschieben der Türme, während die z-Stage zur Feinjustage dient. Die x- und y-Stages ermöglichen die präzise Ausrichtung des Sensormittelpunkts zur Maskenmitte. Die 3DOF-Rotationsstage ermöglicht eine planparallele Ausrichtung der Kamera zur Maske.

²Mean Well LDD-700H [32]

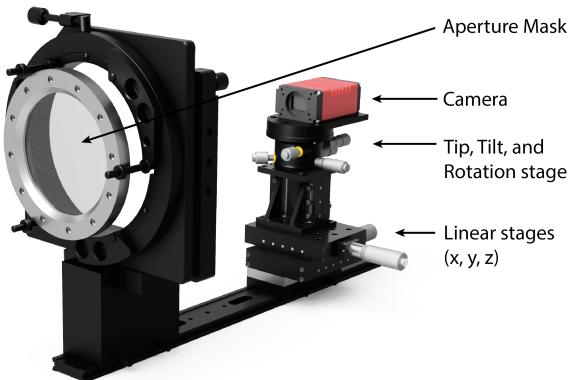


Abbildung 3.9: Gerendertes 3D-Modell des Detektors (hier ohne Abdeckung und Montageplatte).

KAMERA

Als Sensor wird eine monochrome Allied Vision Prosilica GT3300 [33] ohne Objektiv verwendet. Das Sensordeckglas wurde entfernt, um Brechungseffekte zu vermeiden. Die Kamera hat eine Auflösung von 3296 \times 2472 Pixeln bei einer Pixelgröße von 5,5 μm . Bei maximaler Auflösung werden 14,7 Bilder pro Sekunde erreicht. Die Aufnahmen werden unkomprimiert im TIFF-Format gespeichert.

PERIODISCHE APERTURMASKE

Die Aperturmaske besteht aus einer runden Glasscheibe aus Kronglas³ mit einem Durchmesser von 120 mm. Sie besitzt eine lichtundurchlässige Chrombeschichtung, in die mittels Lithografie und Ätzung

³SCHOTT B 270®

ein periodisches Muster aus ca. 40.000 Aperturen übertragen wurde. Die Gitterkonstante beträgt $478,5 \mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$. Zusätzlich sind in regelmäßigen Abständen Kodierungsmarker integriert. Eine Fotografie der Maske ist in Abbildung 3.10 dargestellt. Die Maske ist mit einem schmalbandigen optischen Filter beschichtet, der auf die Wellenlänge der Lichtquelle abgestimmt ist.

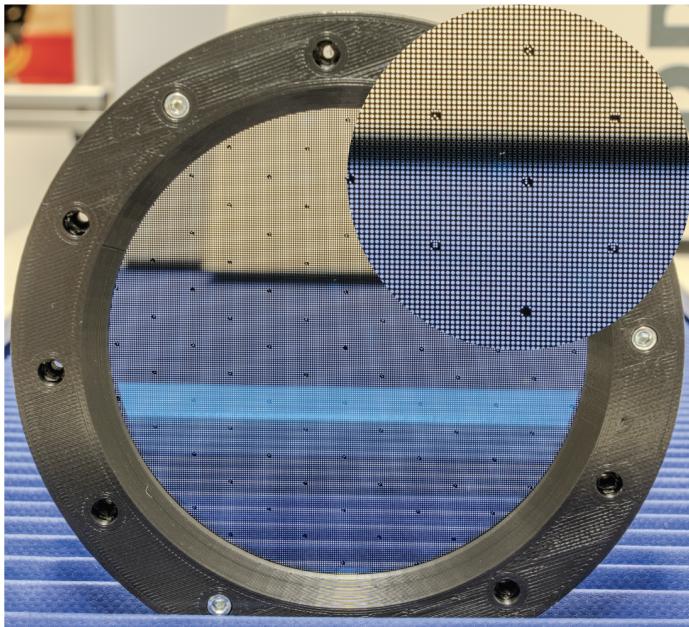


Abbildung 3.10: Gläserne Aperturmaske mit periodischem Aperturdesign.

Der Durchmesser der periodischen Maskenlöcher (Aperturen) beträgt $319 \mu\text{m}$. Die Aperturen der Codierungsmarker sind mit $250 \mu\text{m}$ etwas kleiner. Die Gitterkonstante beträgt $478,5 \mu\text{m}$ und ist damit 50 % größer als der periodische Aperturdurchmesser, um Überlappungen zu

vermeiden, während gleichzeitig die Zahl der nutzbaren Aperturen maximiert wird.

Die Codierungsmarker existieren, da der Sensor kleiner als die Maske ist und dadurch nur ein Ausschnitt der Maske auf dem Sensor abgebildet wird. Dieser beinhaltet ca. 700–1000 Aperturen. Der Abstand der Marker ist so gewählt, dass immer mindestens einer im Bild liegt. Die Software lokalisiert über diese Marker später den Ausschnitt, um die Spots mit den entsprechenden Aperturen zu verknüpfen.

3.3 MAPS-VORENTWICKLUNGEN

Dieser Abschnitt fasst die Vorarbeiten von Eberhardt und Bielke am MAPS-Messinstrument zusammen und beschreibt die bisher erreichte Messqualität sowie bekannte Limitationen [34], [35].

3.3.1 TECHNIKEN ZUR BILDANALYSE

Obwohl MAPS aus nur drei Komponenten besteht, erfordert die Software komplexe Algorithmen zur Bildverarbeitung und Positionsberechnung. Die Algorithmen zur Bildvorbereitung werden als *Image-Pipeline* bezeichnet. Sie sind von denen für die Poseberechnung abgegrenzt. Daraus ergeben sich zwei Softwaremodule, die beide in Abbildung 3.11 dargestellt sind.

Die Image-Pipeline setzt sich aus einer Reihe aufeinanderfolgender Bildverarbeitungsalgorithmen zusammen. Zunächst dient eine Gaußsche Weichzeichnung als Tiefpassfilter, um Sensorrauschen zu redu-

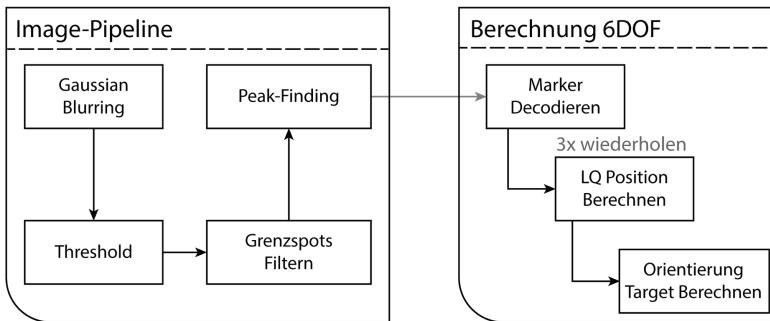


Abbildung 3.11: Übersicht über die wichtigsten MAPS-Softwarealgorithmen.

zieren sowie Hot-Pixel und einzelne Intensitätsspitzen zu glätten, die andernfalls fälschlicherweise als separate Segmente erkannt würden. Ein nachfolgender Schwellenwertalgorithmus (*Threshold*) trennt anschließend die Spots vom Hintergrund, wobei jeder Spot einem Segment entspricht. Im nächsten Schritt werden alle Spots entfernt, deren Konturen den Bildrand berühren. Danach bestimmt der Peak-Finding-Algorithmus die Kontur jedes verbleibenden Segments und berechnet dessen Schwerpunkt. Im Anschluss erfolgt die Decodierung des Markers, wodurch der abgebildete Maskenausschnitt lokalisiert wird. Damit sind die zugehörigen Aperturkoordinaten bekannt, die mit den jeweiligen Spotmittelpunktkoordinaten zu Vektoren verbunden werden. Die Position der Lichtquelle ergibt sich als Schnittpunkt dieser Vektoren. Da diese Vektoren nicht exakt in einem gemeinsamen Punkt zusammentreffen, erfolgt die Berechnung mittels der *Least-Squares-Intersection*-Methode. Zur Bestimmung der Orientierung wird dieses Verfahren für jede der drei Lichtquellen wiederholt.

Bielke [34] untersucht in seiner Arbeit unter anderem die Algorithmen der Image-Pipeline und deren Beitrag zur Messabweichung. Dafür

führt er im Labor Messreihen durch. Als Referenz dient ein KMG, das die Lichtquelle zwischen 150 und 950 mm entlang der optischen Achse in 1 mm-Schritten führt. Für jede Position werden zehn Messungen durchgeführt. Um die Messabweichung zu berechnen, wird der Sollwert (KMG) vom Istwert (MAPS) abgezogen. Um die Werte miteinander verrechnen zu können, müssen sie zuerst in ein gemeinsames Koordinatensystem gebracht werden. Dafür wird der Basiswechsel genutzt (siehe Abschnitt 2.5). Als Bewertungskriterium dient die empirische Standardabweichung als Summe aller Einzelwerte einer Messung:

$$\sigma_{tot} = \sqrt{\sigma_{sys}^2 + \sigma_{rand}^2} \quad (3.6)$$

wobei σ_{sys} die Standardabweichung der gemittelten Messabweichung und σ_{rand} die Standardabweichung der Wiederholmessungen ist.

RAUSCHREDUZIERUNG

Der Kamerasensor erzeugt neben dem Nutzsignal auch Rauschen. Zu den relevanten Rauscharten gehören Photon Noise (Schrotrauschen), Fixed Pattern Noise (FPN) und Read Noise. Das Schrotrauschen bezieht sich auf die zufällige Fluktuation des Photonenflusses, der den CCD-Sensor erreicht, und folgt der Poisson-Statistik [36]. FPN ist positions- und signalabhängig und tritt bei höheren Intensitäten stärker hervor [37]. Read Noise entsteht beim Auslesen und wird als weißes Rauschen modelliert [38]. Die Rauschintensität hängt von Faktoren wie Sensorgröße, Pixelgröße und Temperatur ab.

Da sich Rauschen physikalisch nur begrenzt unterdrücken lässt, wird es zusätzlich softwareseitig kompensiert. Am effizientesten ist dies,

wenn die unterschiedlichen Rauschkategorien modelliert und mit entsprechenden Algorithmen kompensiert werden. Zwei in Bielke [34] untersuchte Algorithmen sind das Gaußsche Weichzeichnen und der Gaußsche Fourier-Filter. Beide basieren auf der Gaußfunktion: im Ortsraum als Faltung, im Frequenzraum als Multiplikation. Dadurch lassen sich hochfrequente (rauschkhafte) Bildanteile effizient unterdrücken [39].

Der Vergleich zeigt: Das Gaußsche Weichzeichnen liefert bessere Messergebnisse bei geringerem Rechenaufwand als der gaußsche Fourier-Filter und wird daher bevorzugt eingesetzt.

SCHWELLENWERTVERFAHREN

Das Schwellenwertverfahren (Thresholding) ist ein einfaches, aber effektives Verfahren zur Segmentierung von Bildelementen. Dabei wird jeder Pixelwert mit einem vorgegebenen Schwellenwert verglichen: Liegt er darüber, wird das Pixel auf einen Maximalwert (z. B. Weiß) gesetzt, andernfalls auf einen Minimalwert (z. B. Schwarz). Dieses Verfahren wandelt Graustufenbilder in binäre Bilder um und erleichtert die Trennung von Objekt und Hintergrund.

Es wird zwischen globalem und lokalem Thresholding unterschieden. Globale Methoden verwenden einen einheitlichen Schwellenwert für das gesamte Bild, während lokale Verfahren individuelle Schwellenwerte für unterschiedliche Bildausschnitte berechnen. Erweiterte Methoden wie der Otsu-Algorithmus [40] bestimmen den optimalen Schwellenwert automatisch anhand der Histogrammverteilung.

In den Untersuchungen von Bielke werden ausschließlich globale Verfahren verglichen, da die vom Sensor gelieferten Bilder eine hohe

Homogenität aufweisen. Die Spots sind gleichmäßig hell und periodisch verteilt. Auf lokale, rechenintensivere Methoden kann daher verzichtet werden.

Von den fünf getesteten Algorithmen basieren drei auf einem Prozentwertverfahren:

- Ein konstanter Schwellenwert als Prozentsatz des maximalen 8-Bit-Pixelwerts.
- Ein Schwellenwert, der proportional zum maximalen Pixelwert im Bild (**.MaxValue**) ist.
- Ein Schwellenwert, der proportional zum Mittelwert der Bildhelligkeit (**MeanValue**) ist.

Zusätzlich wurden Verfahren nach Li et al. [41], [42] und Yen et al. [43] untersucht.

Die Analyse zeigt: Der *MeanValue*-Algorithmus hat die geringste systematische Abweichung, während beim Yen-Verfahren die zufällige Abweichung am geringsten ist. Unter Berücksichtigung der Gesamtabweichung und der Rechenzeit bietet der *MeanValue*-Algorithmus das beste Verhältnis von Genauigkeit und Effizienz und wird deshalb für MAPS bevorzugt verwendet.

PEAK-FINDING-ALGORITHMEN

Für die Berechnung der Lichtquellenposition müssen die Spotmittelpunkte (auch Schwerpunkt der Intensitätsverteilung) bestimmt werden. Hierfür eignen sich je nach Intensitätsverteilung unterschiedliche Algorithmen.

Bei MAPS kommen vorwiegend der Moments-Algorithmus (*Method of Moments*) [44] und der 2D-Gauss-Fit-Algorithmus [45] zum Einsatz. Aber auch der gewichtete Moments-Algorithmus und ein Machine-Learning-Ansatz [46] wurden untersucht.

Bielke vergleicht in seinen Voruntersuchungen die ersten drei der aufgeführten Peak-Finding-Algorithmen (PFA) hinsichtlich ihrer Messabweichung. Während bei der binären Variante des Moments-Algorithmus nur die Konturpunkte berücksichtigt werden, bezieht die gewichtete Version sämtliche Pixel unter Einbeziehung ihrer Intensitätswerte ein. Beim zweidimensionalen Gauß-Fit wird unter der Annahme einer gaußförmigen (glockenförmigen) Intensitätsverteilung ein parametrisches Modell an die Spotdaten angepasst; der Mittelpunkt des angepassten Modells entspricht dem Schwerpunkt des Spots (siehe 3.3.3).

Im Gegensatz zu den anderen Voruntersuchungen ist hier keine eindeutige Entscheidung möglich. Keiner der Algorithmen übertrifft die anderen hinsichtlich der Genauigkeit und der Rechenzeit gleichzeitig. Stattdessen führt eine höhere Rechenzeit zu höherer Genauigkeit, siehe Tabelle 3.1.

Tabelle 3.1: Gesamtstandardabweichung und durchschnittliche Berechnungszeit der verschiedenen PFA.

Algorithmus	σ_{tot} [μm]	σ_{sys} [μm]	σ_{rand} [μm]	Zeit [s]
Moments	25,9	23,8	10,0	0,151
Gew. Moments	18,6	15,9	9,4	0,882
2D-Gauß-Fit	16,3	13,3	9,3	7,922

Die Rechenzeit wirkt sich auf die Messfrequenz aus. Daher hängt die Wahl des PFA vom Einsatzzweck ab: Für stationäre Anwendun-

gen (z. B. Kalibrierung) eignet sich der 2D-Gauß-Fit, für dynamische Szenarien (z. B. Online-Korrektur) der schnellere Moments-Algorithmus.

3.3.2 KALIBRIERUNG

Die MAPS-Kalibrierung umfasst die Bestimmung der Kammerkonstante sowie die Orientierung des Sensors relativ zur Aperturmaske. Das direkte Messen der Kammerkonstante und der Drehwinkel des Sensors bzw. der Aperturmaske erwies sich als unpraktikabel, da die zur Verfügung stehende Messtechnik nicht geeignet ist. Stattdessen nutzt Bielke eine Substitutionsmessung über das KMG und das Softwaremodell, um die Unsicherheit der Größen zu bestimmen. Die Längenabweichung des verwendeten KMGs liegt bei $1,2 \mu\text{m} \pm \frac{L}{500}$.

KAMMERKONSTANTE

Die Kammerkonstante wird zunächst ungefähr auf den Sollwert von 55,64 mm mechanisch und softwareseitig eingestellt. Anschließend wird die Lichtquelle vom KMG entlang der optischen Achse zwischen zwei Positionen verfahren. MAPS vermisst an beiden Positionen die Lichtquelle und berechnet die Wegdifferenz. Das Verhältnis des verfahrenen Wegs zum gemessenen wird mit der geschätzten Kammerkonstante multipliziert und damit korrigiert. Dieses Verfahren wird so lange iterativ wiederholt, bis der Wert im Rahmen der gewünschten Messunsicherheit liegt.

Anschließend wird mit einer Monte-Carlo-Simulation der Unsicherheitsbeitrag der Kammerkonstante zum Messergebnis bei einer maximalen Abweichung von einem Mikrometer untersucht. Dafür wird ein

vereinfachtes Modell des Messprinzips erarbeitet, das auf der Multi-Aperturen-Technik aus Abschnitt 3.1.1 basiert. Das Modell ist bis auf die Kammerkonstante deterministisch, wird jedoch für Lichtquellendistanzen entlang der optischen Achse (100–2000 mm) wiederholt. Die Simulation ergibt eine relative Messabweichung von $1,8 \cdot 10^{-5}$ im gesamten Messbereich, da die Abweichung linear mit der Messdistanz zunimmt.

Wie die Simulation zeigt, muss die Kammerkonstante so genau wie möglich bestimmt werden, um auch bei großen Distanzen präzise messen zu können. Soll bei 2000 mm z. B. eine Unsicherheit von $\pm 10 \mu\text{m}$ erreicht werden, muss die Kammerkonstante mit einer Sicherheit von $\pm 0,27 \mu\text{m}$ bestimmt werden.

SENSORORIENTIERUNG

Zur Justierung der Sensororientierung ist die Kamera auf einer 6DOF-Stage montiert. Bielke beschreibt zwei Kalibrierroutinen für die Rotationswinkel zwischen Sensor und Maske. Eine für den Rollwinkel (Drehung um die optische Achse) und eine für Yaw und Pitch (Drehung um die x- und y-Achse). Dies unter der Annahme, dass Maske und Sensor mittig zueinander ausgerichtet sind.

Die Kalibrierung für Yaw und Pitch basiert auf dem Spotmuster des Kamerabilds, das bei korrekter Ausrichtung gitterförmig und parallel zu den Sensorachsen erscheint. Rotationen um die x- oder y-Achse führen zu perspektivischer Verzerrung. Der Winkel der Verzerrung wird über Näherungsgeraden zu den äußeren Reihen und Spalten bestimmt. Sie sind proportional zum Pitch und Yaw des Sensors. Der Sensor wird zuerst so justiert, dass beide Winkel kleinstmöglich sind. Ein konkreter Kalibrierwert wird nicht erwähnt. Stattdessen wird der

Sensor absichtlich um $0\text{--}0,03^\circ$ verstellt und der zufälligen Messabweichung gegenübergestellt. Daraus folgt, dass die Messabweichung bei einem Pitch-Fehler von $0,03^\circ$ um den Faktor 1,68 (z-Richtung), 1,3 (x), 1,1 (y) größer wird. Bei Yaw sind es 7,92 (z), 2,11 (x), 1,24 (y). Der Unterschied wird durch das nicht quadratische Sensorformat (4:3) erklärt. Eine weitere Erkenntnis ist, dass die Messabweichung bei 0° nicht am geringsten ist, sondern bei $0,01^\circ$. Dies wird dadurch erklärt, dass eine Fehlausrichtung der Sensor-Pixel gegenüber den Lichtpunkten zu einem besseren Messergebnis führen kann.

Der Rollwinkel bewirkt keine perspektivische Verzerrung, sondern eine Isometrie. Das Spotmuster ist um die optische Achse aus Sicht des Sensors verdreht. Auch hier wird die Abweichung über Näherungsgeraden bestimmt. Die empirische Analyse ergibt, dass eine Abweichung von $0,01^\circ$ Roll die systematische Abweichung um die Faktoren 3,92 (z), 1,78 (x) und 1,09 (y) verstärkt.

FAZIT

Die Kalibrierverfahren ermöglichen eine Schätzung der Kammerkonstante und der Sensorlage, ohne diese direkt messen zu müssen. Da diese auf MAPS-Messwerten beruhen, ergeben sich Unsicherheiten durch Rückkopplung. Dazu kommt die Unsicherheit der externen Referenz (hier KMG). Die Sensitivitätsanalysen geben ein Gefühl dafür, wie sich die Unsicherheit der Kammerkonstante und der Sensorlage auf das Messergebnis auswirkt. Da keine konkreten Kalibrierwerte angegeben werden, ist bisher unklar, wie groß die Abweichung tatsächlich ist.

Bielkes Arbeit fokussiert sich im Weiteren auf die Optimierung des Moments-Algorithmus. Dieser liefert eine schlechtere Performance als die übrigen PFA, hat allerdings eine deutlich kürzere Rechenzeit. Die

Abbildungssimulation zur Analyse der systematischen Abweichungen des Moments-Algorithmus bildet die Grundlage für die Simulation dieser Arbeit.

3.3.3 SIMULATION DES MESSINSTRUMENTS

Die Motivation für die Simulation ist die Analyse systematischer und zufälliger Messabweichungen des MAPS-Messinstruments. Infolgedessen sollen die Genauigkeit, die Präzision und die Messfrequenz erhöht werden. Bielke entwickelt hierfür einen vereinfachten digitalen Zwilling des MAPS-Aufbaus, der wesentliche mechanische und optische Komponenten parametrisiert abbildet. Dazu zählen Lichtquelle, Sensor, Aperturmaske sowie die Positionierung und Ausrichtung zueinander. Komplexe optische Effekte wie Diffraction, Interferenz, geometrische Unschärfe, Vignettierung oder Projektionseffekte werden nicht modelliert. Das Modell wird schrittweise erweitert, bis es die zu untersuchenden systematischen Effekte des realen Systems zuverlässig reproduziert. Es ist bis auf das Sensorrauschen deterministisch.

Im Mittelpunkt von Bielkes Arbeit steht die Analyse systematischer Fehler beim Messen entlang der optischen Achse, insbesondere bei der Verwendung des Moments-Algorithmus. Es wird nicht der Messvorgang an sich simuliert, sondern das resultierende Sensorbild für definierte Lichtquellenpositionen. Dafür wird eine fiktive Lichtquelle erzeugt, die, wie im Labor, entlang der optischen Achse bewegt wird. Hierbei können ebenfalls die MAPS-Parameter beliebig eingestellt werden.

Die Simulation basiert auf dem Multi-Apertur-Prinzip, rückwärts betrachtet. Es wird die Abbildung simuliert, anstatt die Position der

Lichtquelle zu berechnen. Dafür wird zuerst die Position der Lichtquelle im Raum festgelegt. Anschließend werden von dieser Position aus Strahlen durch die Aperturen der Maske gesendet. Daraus ergeben sich die lateralen Koordinaten der Spots auf der Sensorebene. Für jede Koordinate, die innerhalb der Sensorfläche liegt, wird ein Spot generiert. Dafür wird die Spotform durch eine zweidimensionale Normalverteilung angenähert. Das Ergebnis ist eine vollständige MAPS-Abbildung. Dieser Ray-Tracing-Ansatz ist stark vereinfacht. Es wird nur ein einziger Strahl durch das Zentrum jeder Apertur geschickt. Aus diesem Grund können auch keine optischen Effekte simuliert werden.

Für die Erzeugung der Spots hat Bielke im Vorfeld eine Analyse der Spot-Intensitätsverteilung durchgeführt. Dabei stellte er fest, dass bei geringer Messdistanz die Spots eine glockenförmige Intensitätsverteilung zeigen, entgegen dem theoretisch erwarteten Beugungsmuster (vgl. Abbildung 2.3). Der Grund dafür ist die partielle räumliche Kohärenz der Lichtquelle im Nahbereich.

Die ausgedehnte, zeitlich inkohärente Lichtquelle kann als räumlich kohärent angesehen werden, wenn die Distanz r zur Aperturmaske entsprechend groß ist. Bei einer ausgedehnten Lichtquelle sind die Punktquellen kontinuierlich verteilt, und für $d < \frac{r\lambda}{D_A}$ sind die einzelnen Streifensysteme aufgelöst [6]. Hiermit ist der maximale Aperturdurchmesser D_A für einen vorgegebenen Durchmesser d der Quelle festgelegt, und es kann für die räumliche Kohärenzlänge l_r ($= D_A$) geschrieben werden:

$$l_r < \frac{r\lambda}{d} \approx \frac{\lambda}{\alpha} \quad (3.7)$$

um Interferenzmuster mit vollem Kontrast abilden zu können. Der Kontrast verschwindet erst bei dem doppelten Durchmesser

2d:

$$l_r \geq \frac{r\lambda}{2 \cdot d} \quad (3.8)$$

Im Übergangsbereich dazwischen:

$$\frac{r\lambda}{2 \cdot d} > l_r \geq \frac{r\lambda}{d} \quad (3.9)$$

können Interferenzmuster mit schwachem Kontrast beobachtet werden. Anhand der Formeln können Aperturdurchmesser und -abstand bestimmt werden, sodass in einem gewünschten Messbereich keine Interferenz auftritt. Oder umgekehrt: Ab welcher Distanz tritt Interferenz bei gegebenem Aperturdurchmesser auf? Die drei Kohärenzbereiche sind in Grafik 3.12 abgebildet. Links sind die Kohärenzbereiche für den Aperturdurchmesser und rechts für den Aperturabstand zu sehen. Geplottet ist die Kohärenzlänge (hier Durchmesser und Distanz der Aperturen) gegenüber der Distanz der Lichtquelle r zur Aperturmase.

Im hellblauen Bereich ist das Kohärenzkriterium nicht erfüllt, und Interferenz kann nicht beobachtet werden. Im violettfarbenen Bereich ist räumliche Kohärenz gegeben, und Interferenz mit vollem Kontrast setzt ein. Der blaue Bereich stellt den Übergangsbereich mit kontrastarmer Interferenz dar. Die gestrichelten Linien sind der Aperturdurchmesser und der Aperturabstand des experimentellen Aufbaus. r_1 und r_2 sind die Grenzdistanzen der Lichtquelle.

Aus der Grafik kann abgelesen werden, dass bis zu einer Messdistanz von ca. 698 mm bzw. 1046 mm keine Interferenz auftritt. Damit ist geklärt, warum die im Labor gemessene Spot-Intensitätsverteilung einer Normalverteilung und nicht dem Beugungsmuster ähnelt. Ab

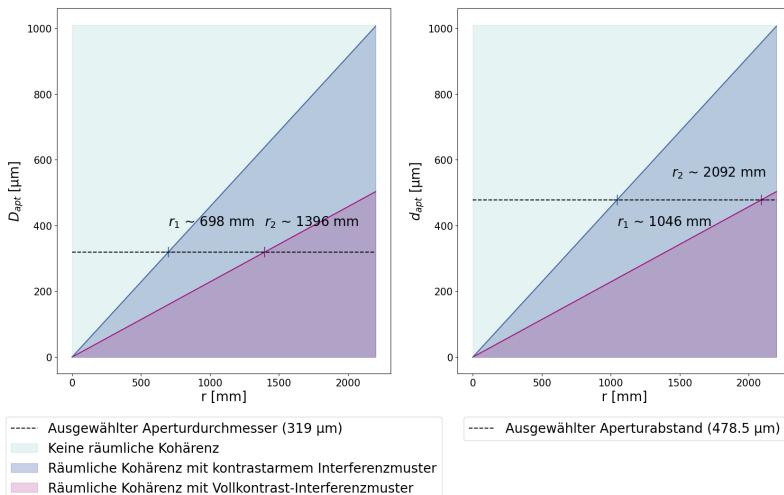


Abbildung 3.12: Kohärenzbereiche in Abhängigkeit von Aperturabstand d_A und Aperturdurchmesser D_A in Relation zur Messdistanz r .

der Distanz, ab der das Kohärenzkriterium erfüllt ist, nimmt die Intensitätsverteilung allmählich die Form des Beugungsmusters an. Die Lochkameraparameter des Detektors sind auf den Übergangsbereich ($F \approx 1$) eingestellt, das Spotbild ist dadurch sowohl durch Fresnel- als auch durch Fraunhoferbeugung geprägt. Bielke kann dies durch ein Experiment beweisen, indem er die Spotform bei Messdistanzen von 350 mm bis 1050 mm untersucht.

Für die eingesetzten PFA ist es wichtig, dass der Intensitätsverlauf ein zentrales Maximum aufweist. Dies ist dank des Fraunhoferanteils gewährleistet. Zudem wird festgestellt, dass nach dem Weichzeichnen (vgl. 3.3.1) die Spotform gaußähnlich erscheint und der Fresnelanteil verschwindet. Die in der Simulation verwendete Normalverteilung ist demnach eine passende Näherung, die den Rechenaufwand gegenüber komplexen Beugungsmodellen reduziert.

Um eine naturgetreue Abbildung simulieren zu können, wird außerdem das Sensorrauschen unter Laborbedingungen bestimmt. Hierfür wird ein idealisierter Spot gebildet, indem alle Spots eines Bildes überlagert und normalisiert werden. Wird dieser von den einzelnen Spots abgezogen, ergibt sich das Rauschbild. Das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) wird für alle Messdistanzen verrechnet und beträgt im Mittel 23,79 oder 4,2 % relativ zur 8-Bit-Dynamik.

Die Validierung des digitalen Zwillinges erfolgt durch den Vergleich der simulierten mit den gemessenen Daten. Dabei werden sowohl die Intensitätsverteilung als auch die Messabweichungen entlang der optischen Achse betrachtet. Die Ergebnisse zeigen eine hohe Übereinstimmung der relevanten systematischen Effekte des Moments-Algorithmus [47], [48].

3.4 SYSTEMATISCHE MESSABWEICHUNG

Dieser Abschnitt bietet einen detaillierten Einblick in die systematischen Messabweichungen des Instruments sowie in die verschiedenen Einflussfaktoren.

3.4.1 EINFLUSSFAKTOREN

In den vorangegangenen Arbeiten wurden verschiedene Ursachen systematischer Messabweichungen untersucht. Ein zentraler Faktor ist die thermische Expansion, die sowohl am LED-Target (aufgrund der Lichtquellen) als auch am Detektor (aufgrund der Kamera) auftritt. Im Labor erwärmen sich die Komponenten bis zu einer stabilen Betriebstem-

peratur. Deshalb sollte mit der Messung erst begonnen werden, wenn die Warmlaufphase vorüber ist. Außerhalb der Laborbedingungen, hauptsächlich unter wechselnder Umgebungstemperatur, sollte eine Korrektur der temperaturbedingten Längenausdehnung vorgenommen werden. An Target und Detektor sind dafür Sensoren angebracht; eine Korrektur wurde bisher nicht umgesetzt.

Weitere Einflüsse wie mechanische Vibrationen, Luftströmungen oder Fremdlicht wirken sich primär auf die Präzision, nicht aber auf die Genauigkeit aus, es sei denn, sie treten systematisch auf. Als optisches Messinstrument ist MAPS besonders anfällig für parasitäres Licht (z. B. Raumbeleuchtung, Signallampen, Streulicht, Reflexionen oder Tageslicht). Zum Schutz ist der Detektor in einem lichtdichten Gehäuse untergebracht, das im Inneren schwarz-matt ausgekleidet ist. Der Einsatz einer schmalbandigen Target-Lichtquelle in Kombination mit einer dünnenschichtoptischen Bandpassfilterbeschichtung der Aperturmaske verhindert zusätzlich das Eintreten von Fremdlicht durch die Öffnung des Detektors.

Verschmutzungen der Aperturmaske durch Öl, Staub oder Partikel können das Messergebnis erheblich beeinträchtigen. Blockierte Marker verhindern die Lokalisierung des Maskenausschnitts, während verunreinigte Aperturen zu fehlerhaften Spotmittelpunkten führen.

3.4.2 KMG ALS REFERENZ

Eberhard [35] hat außerdem die Langzeitstabilität des KMGs als Referenzsystem untersucht. Das KMG wurde zuvor interferometrisch kalibriert. In einem 50-Stunden-Experiment wurden 500 Messwerte erfasst. Das Experiment wurde in einem DAkkS-Kalibrierlabor bei 20 °C durchgeführt, während sich das KMG im Stillstand befand. Drifts von

bis zu $10 \mu\text{m}$ in x-Richtung und $8 \mu\text{m}$ in z-Richtung konnten festgestellt werden — vermutlich aufgrund von Wärmeausdehnung und der asymmetrischen Lagerung der KMG-Achsen. Die Drifts der Achsen sind in Abbildung 3.13 dargestellt.

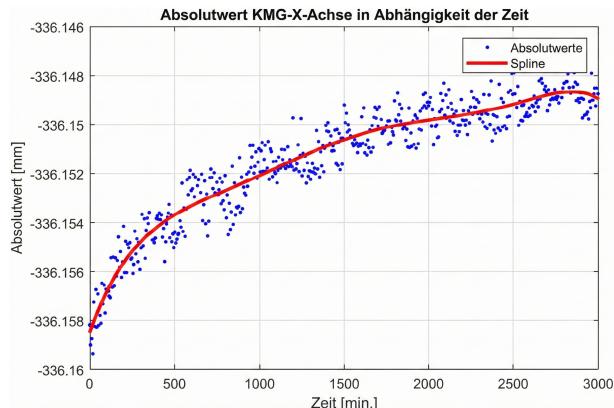
3.4.3 MESSWINKEL

Ein weiterer Punkt ist der Winkel zwischen der Lichtquelle und dem Detektor. In zwei Experimenten werden einmal an 51 und einmal an 100 Positionen jeweils zehn Messwerte bei $\pm 10^\circ$ von MAPS aufgenommen. Betrachtet wird die Standardabweichung der Messwerte gegenüber dem Messwinkel; siehe Abbildung 3.14.

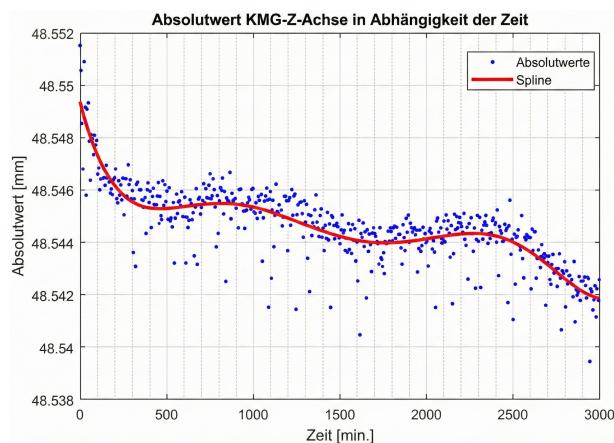
Das Experiment zeigt eine steigende Standardabweichung bei zunehmendem Winkel. Außerdem ist eine sinusförmige Schwingung erkennbar. Die Periode beträgt ca. $2,9^\circ$ bei 51 Messpositionen und $1,5^\circ$ bei 100. Die Standardabweichung erreicht Peaks bis $20 \mu\text{m}$. Die Schwingung wird durch die Bewegungscharakteristik des KMGs erklärt, da Peaks in beiden Versuchsläufen zur gleichen Zeit auftreten — möglicherweise infolge einer trügen Positioniereinregelung bei der vergleichsweise hohen Masse des Targets.

3.4.4 OPTISCHE ACHSE

Die von Bielke durchgeführte Kalibrierung der Kammerkonstante sowie der Sensororientierung ermöglicht die Identifikation systematischer Messabweichungen infolge von Fehlstellungen (vgl. 3.3.2). Dabei wurde angenommen, dass Sensor und Maske zueinander zentriert sind. Das bedeutet, dass die optische Achse durch die jeweiligen Mittelpunkte verläuft und senkrecht auf den Ebenen von Sensor und Maske steht.



(a) Drift der x-Achse.



(b) Drift der z-Achse.

Abbildung 3.13: Achsdrift des KMGs im Stillstand uber eine Zeitspanne von 50 Stunden [35].

Standardabweichung bei unterschiedlicher Anzahl an Messpositionen

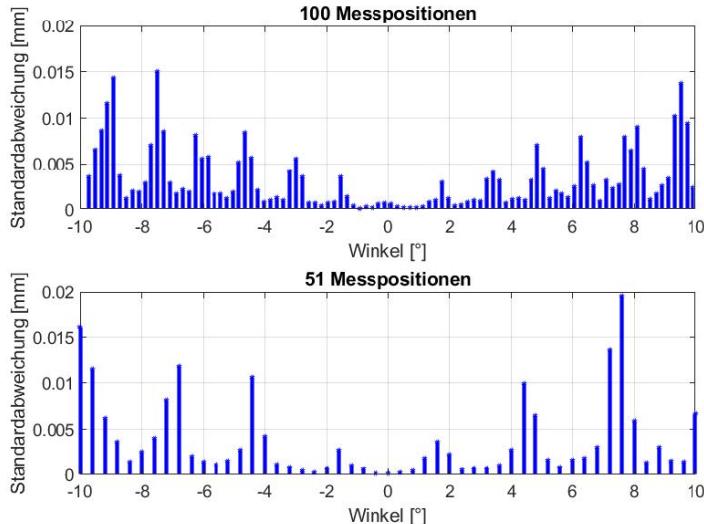


Abbildung 3.14: Standardabweichung des Messwerts gegenüber dem Messwinkel zwischen Lichtquelle und Detektor [35].

Weicht diese Ausrichtung ab, also sind Maske und Sensor nicht exakt zueinander positioniert, verändert sich der Verlauf der optischen Achse. Welche Auswirkungen das auf das Messergebnis hat, wurde bislang nicht untersucht.

Allerdings weist Bielke darauf hin, dass die Kammerkonstante bei unterschiedlichen Messdistanzen nicht konstant bleibt. So beträgt sie bei einer Messdistanz von 464 mm etwa 55,624 mm und bei 1693 mm nur noch 55,541 mm. Eine mögliche Ursache ist einerseits die Art der eingesetzten Kalibrierung, andererseits die Nichtparallelität der optischen Achse zur entsprechenden KMG-Achse. Diese Hypothese wird in Kapitel 6 näher untersucht.

3.4.5 SUBPIXELGENAUIGKEIT

In einem weiteren Experiment wurde die Subpixelgenauigkeit (SPG) der PFA untersucht. Anlass dieser Untersuchung sind die ausgeprägten Extremwerte der Messabweichung an bestimmten Messpositionen, die insbesondere beim Moments-Algorithmus deutlich hervortreten. Ein direkter Vergleich zwischen dem Gauß- und dem Moments-Algorithmus in Abbildung 3.15 macht diesen Effekt sichtbar.

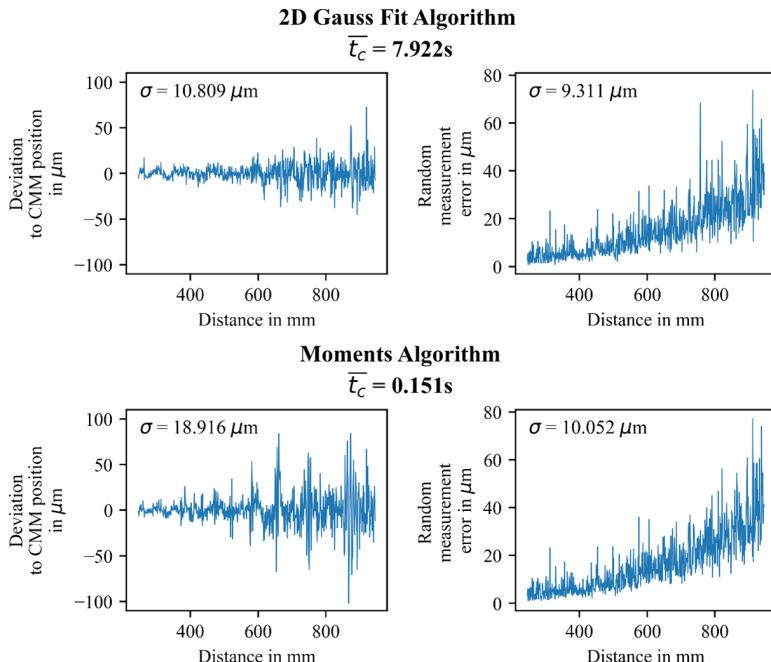


Abbildung 3.15: Vergleich der systematischen und zufälligen Messabweichung zwischen dem Moments- und dem Gauß-Algorithmus [34].

Bis auf einzelne Extremwerte ähneln sich die Graphen der beiden Algorithmen. Die Subpixelgenauigkeit der Spotmittelpunktberechnung wird mithilfe der zuvor entwickelten Simulation analysiert. Dabei wird nur ein einzelner Spot simuliert. Zuerst in Abhängigkeit von der Anzahl der Pixel pro Spot. Diese schrumpft mit zunehmender Distanz der Lichtquelle und liegt im Bereich 2250–4300 Pixel, bei einer Distanz von 250 bis 950 mm.

Das Experiment zeigt, dass die SPG asymptotisch verläuft, mit einem Tiefpunkt bei ca. 1000–1500 Pixel, je nach Algorithmus. Bei mehr als 1500 Pixeln ist keine Verbesserung mehr sichtbar, jedoch verbessert sich die Standardabweichung. Dies ist in Abbildung 3.16 dargestellt.

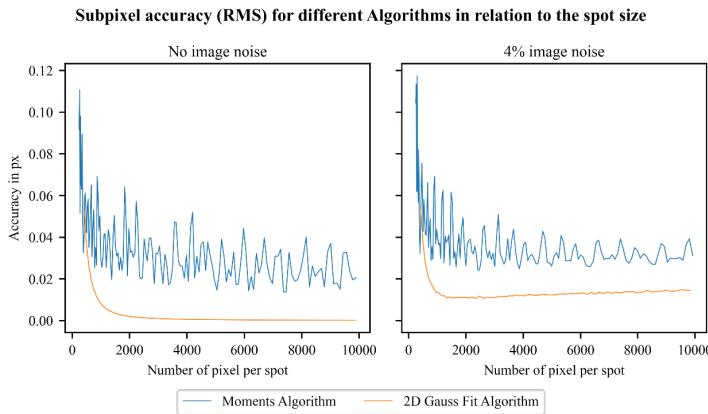


Abbildung 3.16: Vergleich der Subpixelgenauigkeit gegenüber der Spotpixelgröße zwischen dem Moments- und dem Gauß-Algorithmus [34].

Bei einem weiteren Experiment wird das Zentrum des Spots zwischen 0 und 1 Pixel horizontal mit einer Schrittweite von 0,001 px verschoben.

ben. Der Ausgangspunkt ist der Mittelpunkt eines Pixels. Simuliert wird ein Spot mit ca. 3400 px, von dem der Gauß- und der Moments-Algorithmus jeweils das Zentrum berechnen. Die Abweichung des berechneten Zentrums zum Sollzentrum wird über den Offset geplottet, siehe Grafik 3.17.

Die Systematik wird vor allem sichtbar, wenn eine Abbildung ohne Sensorrauschen simuliert wird. Beim Moments-Algorithmus wird hierbei eine langwellige sinusförmige Schwingung im Graphen mit zusätzlich höheren Frequenzen sichtbar. Die Standardabweichung liegt bei 0,017 px, die des Gauß-Algorithmus bei nur 0,001 px. Bielke setzt diese systematische Abweichung eines einzelnen Spots in Relation zu den systematischen Peaks in der Messabweichung entlang der optischen Achse.

3.4.6 PERIODISCHES APERTURMASKENDESIGN

Das Spotmuster ist bei guter Justage reihen- und spaltenweise parallel zu den Pixelreihen und -spalten des Sensors. Die Periodenlänge der Sensorpixel ist deren Größe und bleibt damit konstant. Die der Spots ändert sich jedoch mit der Distanz der Lichtquelle zum Detektor. Wird die Lichtquelle an eine Position bewegt, an der die Periodenlänge des Spotmusters ein Vielfaches des Sensors ist (spalten- oder zeilenweise), addieren sich die systematischen Abweichungen der einzelnen Spots, und eine prägnante Differenz des Messwerts zum Sollwert wird deutlich. Aufgrund dieser Relation muss die Formel des *Gain-of-Precision* von $\sqrt{n_{spots}}$ auf $\sqrt{n_{cols} + n_{rows}}$ geändert werden [34]. Bei einer Abbildung mit ca. 700 Spots (23 x 31) ergibt das einen GoP von etwa 7,35.

Um diese Effekte zu vermeiden, muss die periodische Relation aufgelöst werden. Bielke schlägt hierfür zwei Strategien vor. Zum Ersten soll

ein zufälliger Offset zwischen 0 und 2,2 μm in (x- und y-Richtung) auf die Positionen der Aperturkoordinaten addiert werden. Dementsprechend muss eine neue Aperturmaseke gefertigt werden. Dagegen wird eine zweite Methode getestet, bei der der Sensor absichtlich zur Maske, um die optische Achse, um $0,02^\circ$ verdreht wird. Beide Methoden werden erneut durch die Simulation geprüft und erzielen fast das gleiche Ergebnis. Die Standardabweichung der systematischen Messabweichung kann von $38 \mu\text{m}$ ohne Offset oder Rotation auf $12 \mu\text{m}$ reduziert werden. Bei der Rotation des Sensors erhöht sich allerdings die zufällige Messabweichung, während dies bei der anderen Methode nicht der Fall ist. Da das Instrument auf die Fehlstellung der Sensororientierung empfindlich reagiert, empfiehlt Bielke ein neues Aperturmaskendesign.

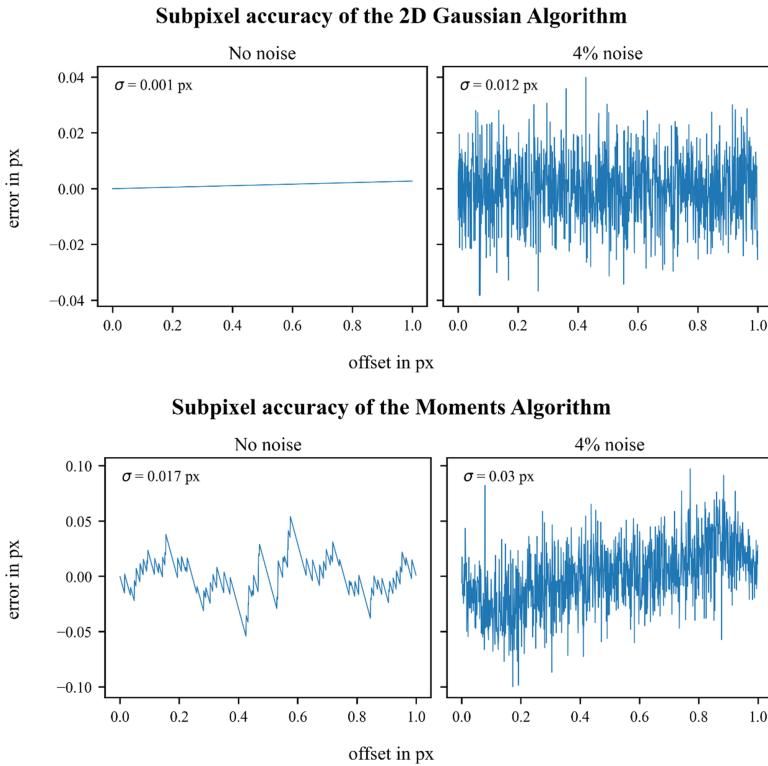


Abbildung 3.17: Vergleich der Subpixelgenauigkeit gegenüber dem Spotzentrumsoffset zwischen dem Moments- und dem Gauß-Algorithmus [34].

3.5 LIMITIERUNG DER POSEBESTIMMUNG

Der aktuelle Entwicklungsstand von MAPS erlaubt jeweils nur die Vermessung einer einzelnen Lichtquelle zur selben Zeit. Dabei kann die Position der Lichtquelle auch in Bewegung bestimmt werden. Für die Berechnung der Orientierung des Targets müssen jedoch die drei Lichtquellen nacheinander geschaltet und einzeln gemessen werden. Dies setzt zwingend voraus, dass sich das Target während des Messvorgangs im Stillstand befindet, da andernfalls die zwischenzeitliche Positionsänderung zu einer fehlerhaften Orientierung führt.

Eine Alternative hierzu stellt das simultane Schalten und Messen der LEDs dar. Damit lassen sich die Lichtquellenpositionen zum exakt selben Zeitpunkt erfassen, wodurch die Berechnung der 6DOF auch in Bewegung möglich wird. Im Fall der periodischen Aperturmaske führt diese Methode allerdings zu einer Überlagerung der Spotmuster, wodurch die Abbildung nicht mehr ausgewertet werden kann. Abbildung 3.18 zeigt exemplarisch einen Ausschnitt einer solchen MAPS-Aufnahme.

In der Kameraaufnahme ist die Überlagerung der Spotmuster der drei Lichtquellen deutlich zu erkennen. Aufgrund der eng gewählten Gitterkonstanten der periodischen Aperturmaske überlappen sich die Spots teilweise. Das Ausmaß dieser Überlappung hängt vom Winkel der Lichtquellen relativ zum Detektor ab. Eine Voruntersuchung zeigte, dass bei simultan aktivierte LEDs in einem Großteil der MAPS-Abbildungen solche Überlagerungen auftreten.

Liegen zwei benachbarte Spots zu nah beieinander oder überlappen sie sich, verschmelzen diese zu einem gemeinsamen Segment. In solchen Fällen treten entweder zwei lokale Intensitätsmaxima innerhalb eines

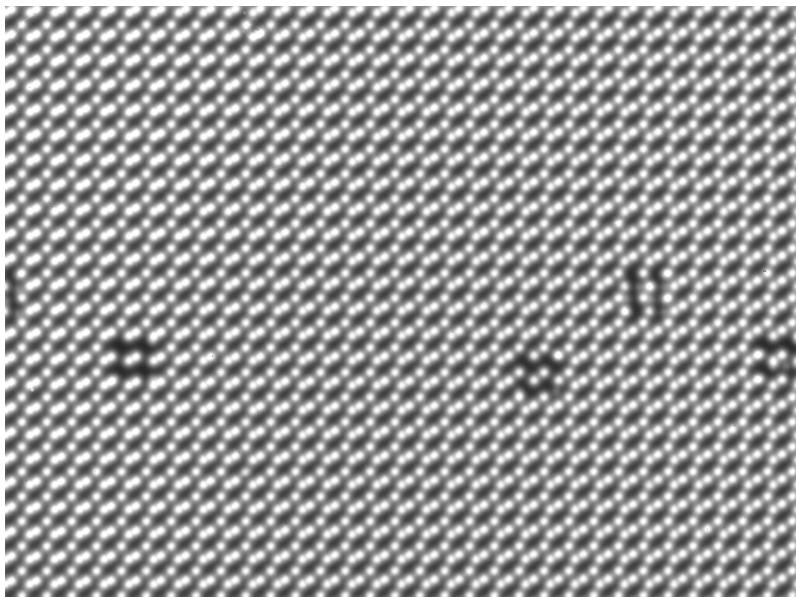


Abbildung 3.18: Ausschnitt einer MAPS-Aufnahme bei drei gleichzeitig eingeschalteten Lichtquellen unter Einsatz der periodischen Aperturmase.

Segments auf, oder es resultiert ein falscher gemeinsamer Schwerpunkt. Dadurch kann keine eindeutige Zuordnung zwischen Aperaturen und Spots hergestellt werden. Das führt dazu, dass fehlerhafte Vektoren aufgespannt werden, deren Schnittpunkt — und somit die berechnete Lichtquellenposition — verfälscht ist.

Zusätzlich sind die Marker der drei Spotmuster nicht mehr eindeutig identifizierbar, da sie von den Spots anderer Lichtquellen überdeckt werden. Eine zuverlässige Decodierung der Marker ist somit nicht mehr möglich, wodurch der zugehörige Maskenausschnitt nicht lokalisiert werden kann.

Vor diesem Hintergrund ist es mit dem aktuellen MAPS-System nicht

möglich, die Position von drei oder mehr Lichtquellen gleichzeitig zu bestimmen. Folglich kann auch keine vollständige 6DOF-Erfassung in Bewegung realisiert werden.

3.6 OPTISCHE KOORDINATENMESSGERÄTE FÜR HANDHABUNGSGERÄTE

Um MAPS in aktuelle Lösungen einzuordnen, wird nachfolgend eine Übersicht mit Geräten erstellt, die Vergleichbares leisten. Hierbei handelt es sich sowohl um kommerzielle als auch um experimentelle optische Messgeräte, die sich zum Erfassen der 3DOF oder 6DOF des Roboter-TCP eignen.

Von den in Tab. A.1 aufgeführten Messgeräten sind hinsichtlich Leistung und Qualität vor allem *Lasertracker* (Leica AT960, FARO Vantage, API Radian) sowie *optische CMMs* (Creform C-Track+HandyPROBE, KEYENCE XM-5000) mit MAPS vergleichbar. Lasertracker erreichen im 3DOF-Betrieb auf kurzen Distanzen Positionsunsicherheiten im Bereich von $\leq 20 \mu\text{m}$, liegen im 6DOF-Betrieb jedoch typischerweise darüber und erfordern einen aufwendigeren Aufbau mit durchgängiger Sichtlinie. Optische CMM-Lösungen liefern in praxisnahen Shopfloor-Szenarien 6DOF-Messungen im zweistelligen Mikrometerbereich und sind damit qualitativ ähnlich robust, zielen jedoch primär auf punktweise Antastung statt kontinuierlicher Bewegungsmessung. Multi-Kamera-Mocap-Systeme (Vicon, OptiTrack) sowie strukturierte-Licht-Lösungen (KEYENCE 3D Robot Vision) und IR-Stereosysteme (z. B. Camsense S) erreichen meist nur submillimetergenaue bis millimetergenaue 6DOF-Trajektorien und stehen daher

nicht in direkter Konkurrenz zu MAPS, wenn eine mikrometergenaue Positionsbestimmung oder eine hochpräzise 6DOF-Erfassung im Fokus steht.

3.7 ZUSAMMENFASSUNG MAPS

In diesem Kapitel wurde das Multi-Aperture Positioning System als photogrammetrisches Messinstrument zur Bestimmung der sechs Freiheitsgrade von Handhabungssystemen vorgestellt. Nach der Erläuterung des physikalischen Messprinzips wurden sowohl die Hardwarekomponenten, bestehend aus LED-Target, Kamera und Aperturmaske, als auch zentrale Softwarealgorithmen beschrieben. Anschließend wurde ein umfassender Überblick über die wesentlichen Aspekte bisheriger Arbeiten am MAPS gegeben, wobei der Fokus insbesondere auf jenen Vorarbeiten lag, an die im Rahmen dieser Arbeit angeknüpft wird.

Ein zentrales Element des Kapitels stellt der digitale Zwilling mit-samt der Abbildungssimulation dar. Diese wird im Verlauf der Arbeit durch mehrere Erweiterungen ergänzt und dient als zentrales Entwicklungswerkzeug für die in dieser Arbeit vorgestellten Methoden.

Ein weiterer Abschnitt widmet sich den bekannten systematischen Messabweichungen sowie den bislang eingesetzten Kalibrierverfahren. Da sich vorangegangene Arbeiten vorrangig auf die Steigerung der Genauigkeit und Präzision konzentrierten, wurde entsprechender Aufwand investiert. Dies ist insbesondere für die spätere Bewertung der Messunsicherheit von Relevanz.

DAS MESSINSTRUMENT MAPS

Insgesamt liefert dieses Kapitel eine fundierte Grundlage für das Verständnis der Funktionsweise, Leistungsfähigkeit und der bestehenden Limitationen des MAPS-Messinstruments.

Kapitel 4

EINDEUTIGKEIT DER ABBILDUNG

Die Relation zwischen den abgebildeten Spots und den Aperturen der Maske bildet die Grundlage für die Berechnung der Lichtquellenposition. Die Herstellung dieser Relation stellt bei einem periodischen Maskendesign und bei mehreren gleichzeitig eingeschalteten Lichtquellen eine zentrale Herausforderung dar: Die Spotmuster überlappen und verdecken die Codierungsmarker. Aufgrund dessen ist es weder möglich, die Spotmuster voneinander zu separieren, noch die Positionen der Lichtquellen zu berechnen.

Der Einsatz eines neuartigen, aperiodischen Aperturmasksdesigns adressiert dieses Problem. Durch die arbiträre Anordnung der Aperturen entsteht in jeder Abbildung ein eindeutig identifizierbares Spotmuster. Dies macht die Verwendung von Codierungsmarkern überflüssig, da das Spotmuster selbst zur Lokalisierung des Maskenausschnitts genutzt werden kann. Ein weiterer Vorteil zeigt sich bei mehreren gleichzeitig aktiven Lichtquellen: Aufgrund der unregelmäßigen Aperturanordnung wird die statistische Wahrscheinlichkeit reduziert, dass sich Spots überlappen. Zudem lässt sich durch Variation der Anzahl der Aperturen gezielt steuern, wie viele Spots auf den Sensor projiziert werden und infolgedessen, wie häufig Überlappungen auftreten. Die zentrale Herausforderung besteht darin, die drei abgebildeten Spotmuster voneinander zu trennen und die Zuordnung zum entsprechenden Maskenausschnitt herzustellen.

Dieses Kapitel befasst sich mit dem arbiträren Aperturmasksdesign und dessen Optimierung zur gleichzeitigen Messung mehrerer Licht-

quellen. Es werden die entwickelten Methoden vorgestellt, um die Spotmuster voneinander zu trennen und die Relation zwischen Spots und Aperturen herzustellen. Zur Lokalisierung des Maskenausschnitts wird ein Template-Matching-Algorithmus (TMA) eingesetzt. Die Zuordnung der Spots zu den entsprechenden Aperturen erfolgt mittels eines speziell entwickelten Algorithmus, der auf dem Konzept des *kd-Trees* basiert. Ebenso wird die Image-Pipeline um mehrere Komponenten erweitert.

In den folgenden Abschnitten werden zunächst die Designaspekte der Aperturmaske erläutert. Danach folgt die Integration der Aperturmaske in die Abbildungssimulation sowie die Generierung synthetischer Kamerabilder. Der Schwerpunkt dieses Kapitels liegt auf der Entwicklung der Algorithmen zur Spotmuster-Separation und Relation. Anschließend wird eine Simulation des gesamten 6DOF-Messprozesses vorgestellt. Das Kapitel schließt mit einem Laborexperiment, in dem die entwickelte Aperturmaske praktisch eingesetzt wird.

4.1 DESIGN DER APERTURMASKE

Die Anforderungen an ein neues Maskendesign bestehen darin, drei voneinander trennbare Spotmuster ohne zusätzliche Codierungsmarker zu erzeugen. Zudem soll die Periodizität der Aperturanordnung aufgehoben und gleichzeitig eine hohe Spotdichte sichergestellt werden, um einen höheren GoP zu erzielen.

Enthält eine Abbildung eine hinreichend große Anzahl von Spots, so sinkt die Wahrscheinlichkeit, dass sich identische Muster mehrfach

wiederfinden. Dies lässt sich mit der Einzigartigkeit von Sternbildern am Nachthimmel vergleichen, die ebenfalls durch die spezifische Anordnung vieler einzelner Punkte charakterisiert werden.

4.1.1 ARBITRÄRES APERTURPATTERN

Das Arbiträre Aperturpattern (AAP) ist ein neu entwickeltes Maskendesign zur Lösung der zuvor beschriebenen Herausforderungen. Im Gegensatz zur bisherigen periodischen Anordnung der Aperturen erfolgt deren Platzierung nun aperiodisch, hier konkret zufällig, um jegliche systematische Struktur zu vermeiden. Abbildung 4.1 zeigt ein beispielhaftes AAP-Design sowie den resultierenden Ausschnitt auf dem Sensor.

Ein wesentlicher Vorteil des AAP-Designs liegt in seiner Robustheit gegenüber Fremdeinflüssen. Wenn einzelne Aperturen beispielsweise durch Staubpartikel oder andere Verunreinigungen blockiert werden, bleibt die Eindeutigkeit des Spotmusters in der Regel dennoch erhalten. Das liegt daran, dass nur ein Teil der Spots für die Lokalisierung eines Maskenausschnitts erforderlich ist [49].

Systematische Interferenzmuster, wie sie bei gitterartigen Aperturanordnungen typischerweise auftreten, können ebenfalls vermieden werden (vgl. 3.12). Da alle Aperturen denselben Durchmesser besitzen, ergibt sich zudem eine einheitliche Regelung der räumlichen Kohärenz.

Ein weiterer Vorteil des arbiträren Maskendesigns liegt in der Skalierbarkeit. Während beim periodischen Design das Verhältnis von Markern zu Aperturen abgestimmt werden muss, kann die AAP-Maske in

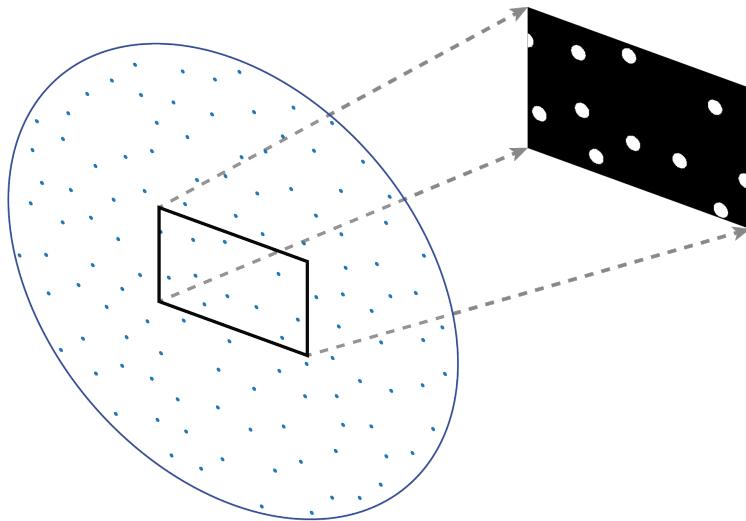


Abbildung 4.1: Arbiträres Aperturmaskendesign und abgebildeter Ausschnitt auf dem Sensor.

beliebigem Durchmesser, mit beliebiger Aperturdichte und Aperturgröße design werden. Dadurch ist das Design flexibel für unterschiedliche Anwendungen und Messvolumen einsetzbar.

Die zentrale Herausforderung beim Entwurf eines AAP-Designs liegt in der Wahl eines geeigneten Verhältnisses zwischen Aperturdurchmesser und -abstand bei gegebenen LK-Parametern. Um eine Vergleichbarkeit mit bestehenden Designs zu gewährleisten, werden dieselbe Kamera und dieselbe Lichtquelle verwendet.

Um das Parametrisieren von Aperturmasken zu erleichtern, wurde ein spezielles Softwaretool entwickelt. Der sogenannte *Aperturmasken-Designer* ist direkt im digitalen MAPS-Zwilling integriert. Über eine

grafische Benutzeroberfläche lassen sich relevante Parameter wie Aperturdurchmesser, Mindestabstand und Maskendurchmesser definieren. Das Aperturmuster wird mithilfe eines *Random-Placement-Algorithmus* (*RPA*) erzeugt. Dabei werden innerhalb der Maskenfläche Aperturen zufällig platziert, wobei der definierte Mindestabstand zwischen den Punkten eingehalten wird. Der Algorithmus terminiert, sobald eine vorgegebene Anzahl an Aperturen generiert wurde oder der Mindestabstand nicht mehr eingehalten werden kann.

Das Design wird in einer Textdatei gespeichert, die ausschließlich die Koordinaten der Aperturen enthält. Ergänzend dazu sind alle relevanten Parameter in einer separaten Konfigurationsdatei hinterlegt. Das Design kann später sowohl in die Messsoftware importiert als auch in der Abbildungssimulation verwendet werden. Auf Basis der Koordinatendatei kann die Aperturmase von einem Fertigungsunternehmen hergestellt werden.

Die Fertigung der Maske erfolgt durch ein externes Unternehmen. Die Kontur der Maske wird per Laserschnitt aus 0,2 mm starkem Edelstahlblech¹ hergestellt, die Aperturen werden CNC-gebohrt. Zur rotatorischen Ausrichtung dient ein 3 mm großes Referenzloch am Rand der Maske, das über einen Passstift im Maskenhalter positioniert wird. Eine Fotografie der fertigen Maske und der Zentrierhalterung ist in Abbildung 4.2 dargestellt.

Da der Hersteller keine Angabe zur Unsicherheit der Aperturposition und deren Durchmesser macht, wurde eine stichprobenbasierte Vermessung gemäß DIN ISO 3951-1 [50] mit einem ZEISS O-Inspect Messgerät durchgeführt. Dazu wurde das Soll-Koordinatenfile in die Messsoftware geladen und der optische Messtaster automatisch auf

¹Das Material der Blende sollte so dünn wie möglich sein, um Vignettierung zu vermeiden [5].

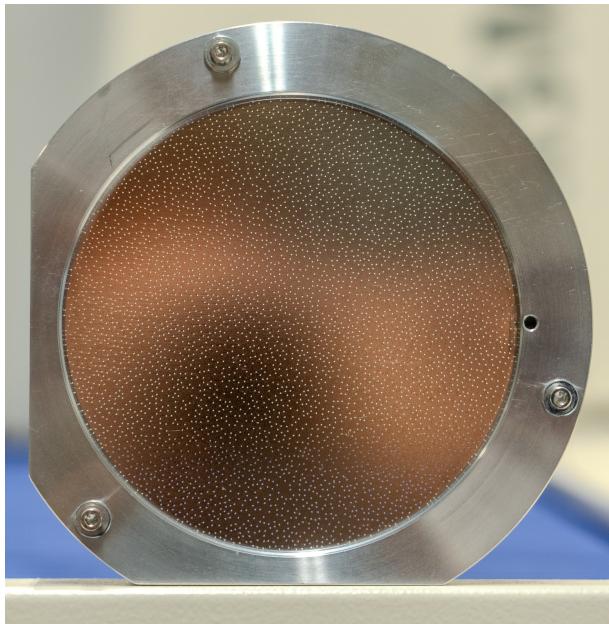


Abbildung 4.2: Arbiträre Aperturmaske aus Edelstahl in der Zentrierhalterung.

die jeweiligen Aperturpositionen verfahren². Der gemessene Aperturdurchmesser beträgt $302,6 \mu\text{m} \pm 6,2 \mu\text{m}$, die mittlere Positionsabweichung $64,5 \mu\text{m}$. Aufgrund der hohen Positionsabweichung sollten alle Aperturkoordinaten nachgemessen und in der Koordinatendatei korrigiert werden. Aufgrund technischer Hürden wurde darauf verzichtet. Entsprechend kann von einer höheren Unsicherheit bei der Positions berechnung im Vergleich zur lithografischen Maske ausgegangen werden.

²Unter Verwendung eines AQL-Werts von 1,0 und Annahmestufe II gemäß DIN ISO 2859-1 ergab sich eine Stichprobengröße von 80.

4.1.2 WEITERENTWICKLUNG DES LED-TARGETS

Im Zuge der AAP-Entwicklung wurde auch das LED-Target überarbeitet. Ziel war es, die mechanische Stabilität, thermische Überwachung und Handhabung des Targets zu verbessern sowie die elektrische Integration zu vereinfachen. Das bisherige Target besteht aus einer Edelstahlkonstruktion, auf der die einzelnen LED-Platinen montiert und über separate Kabel versorgt werden. Die Montage ist aufwendig, und das separate Löten der LEDs hat höhere Positionstoleranzen zur Folge.

Das neue Target basiert auf einer durchgehenden Trägerplatine (PCB), auf der die LEDs direkt gelötet sind. Die Positionierung der LEDs erfolgt im Layoutprozess, wodurch die Fertigungstoleranzen reduziert und die Reproduzierbarkeit erhöht wird. Zusätzlich sind in unmittelbarer Nähe jeder LED Temperatursensoren integriert, die eine Überwachung der Temperatur ermöglichen. Für eine schnelle Ab- und Anbindung wurde auf der Rückseite der Platine ein standardisierter Molex-Steckverbinder platziert. Dieser ermöglicht eine einfache, steckbare Verbindung zur Spannungsversorgung und Datenleitung, wodurch der Wechsel von verschiedenen Targets vereinfacht wird. Eine Fotografie des Targets ist in Abbildung 4.3 zu sehen.

Die Weiterentwicklung des Targets stellt damit einen wichtigen Beitrag zur Skalierbarkeit und Modulation von MAPS dar. Insbesondere im Hinblick auf den Betrieb mehrerer unterschiedlicher Targets, die während der Forschung und Entwicklung oft gewechselt werden.

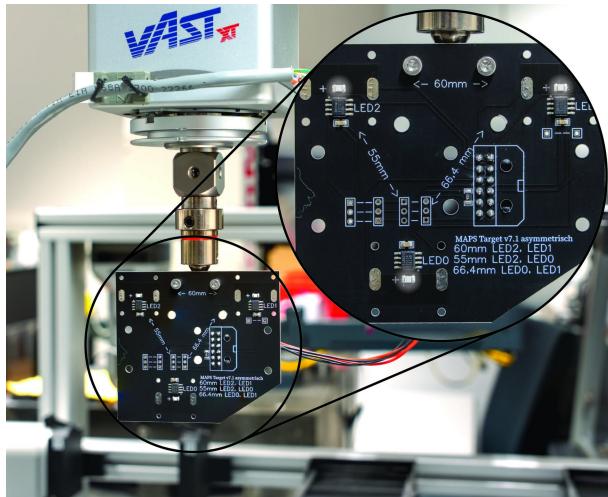


Abbildung 4.3: PCB-Target montiert an einem KMG.

4.1.3 ROBUSTHEIT

Da das AAP auf einer zufälligen Verteilung der Aperturen basiert, können sich Spotmuster innerhalb der Maske wiederholen. Je mehr Spots in einer Aufnahme abgebildet werden, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass dieses Muster mehrfach in der Maske vorkommt. Eine Mehrdeutigkeit beeinträchtigt die Zuverlässigkeit, den richtigen Ausschnitt zu identifizieren.

Die Anzahl der Aperturen pro Flächeneinheit stellt somit einen zentralen Parameter dar, dessen Wahl direkten Einfluss auf die Eindeutigkeit der Abbildung hat. Die Bestimmung einer geeigneten Aperturdichte ist eine Optimierungsaufgabe, die sich aus dem Aperturdurchmesser und der Sensorauflösung ergibt.

Eine hohe Aperturdichte erhöht die Zahl verfügbarer Spots und führt

zu komplexeren Mustern; in kombinierten Abbildungen steigt jedoch auch die Überlappungswahrscheinlichkeit. Eine zu geringe Anzahl reduziert hingegen die Eindeutigkeit des Musters. Während bei Einzel-LED-Messungen eine große Zahl an Aperturen unkritisch ist (keine Überlappung), erfordert der simultane Betrieb mehrerer Lichtquellen einen Kompromiss: Das Design muss genügend Spots liefern, um die Messpräzision zu maximieren, gleichzeitig aber so ausgelegt sein, dass überlappende Spots auf ein tolerierbares Maß begrenzt bleiben. Diese Abwägung bildet einen zentralen Teil der Maskenoptimierung für das Messen mehrerer gleichzeitig eingeschalteter Lichtquellen.

Zur Bewertung eines Maskendesigns wird das Kriterium der *Robustheit* eingeführt. Unter Robustheit wird ein Maß für die eindeutige Identifizierbarkeit eines abgebildeten Spotmusters innerhalb des Gesamtdesigns verstanden. Sie ergibt sich aus dem Verhältnis der erfolgreich identifizierten Muster zur Gesamtzahl der getesteten Muster.

4.2 EINDEUTIGKEIT VON MASKE UND ABBILDUNG

Die MAPS-Simulationsumgebung ist ein wichtiges Werkzeug bei der Optimierung der AAP-Parameter. Wie bereits in früheren Arbeiten gezeigt wurde, kann die Software reale MAPS-Abbildungen mit hinreichender Realitätsnähe nachbilden [47], [48].

Im Zuge der Entwicklung der AAP-Methode wurden sowohl der digitale Zwilling als auch die Abbildungssimulation grundlegend überarbeitet. Es ist nun möglich, ein LED-Target flexibel zu definieren,

wobei sowohl die Anzahl als auch die räumliche Anordnung der LEDs parametrisiert werden können. Über die integrierte Bahnplanung lässt sich die Position des Targets, für die eine Abbildung simuliert werden soll, frei wählen. Zusätzlich wurde die Möglichkeit geschaffen, Punktelisten aus externen Programmen zu importieren. Durch die Einbindung des Aperturmasken-Designers kann zudem eine beliebige Aperturanordnung erzeugt und direkt in der Abbildungssimulation verwendet werden. Die eigentliche Abbildungssimulation erfolgt mit dem bestehenden Raytracing-Ansatz. Eine simulierte Abbildung der AAP-Maske bei einer eingeschalteten Lichtquelle ist in Abbildung 4.4 dargestellt.



Abbildung 4.4: Simulierte Abbildung einer Lichtquelle mit arbiträrer Aperturmaske (AAP).

Die zentrale Herausforderung des AAP-Designs besteht darin, den auf dem Sensor abgebildeten Maskenausschnitt eindeutig zu identifizieren und daraus die Relation zwischen den detektierten Spots und den

zugehörigen Aperturen abzuleiten. Zu diesem Zweck wurden die bestehenden MAPS-Algorithmen und die Image-Pipeline um zusätzliche Verarbeitungsschritte ergänzt. Der neu entwickelte TMA spielt hierbei eine entscheidende Rolle. Abbildung 4.5 zeigt den Gesamtworkflow: von der Bildvorverarbeitung über den TMA bis zur anschließenden Poseberechnung. Die im Rahmen dieser Arbeit implementierten Module sind fett hervorgehoben. Nachfolgend werden die einzelnen, neu entwickelten Algorithmen im Detail erläutert.

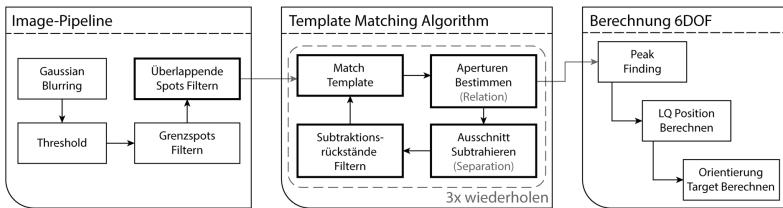


Abbildung 4.5: Übersicht der MAPS-Algorithmen: erweiterte Image-Pipeline, Template-Matching-Algorithmus (TMA) und Poseberechnung. Die in dieser Arbeit entwickelten Komponenten sind fett markiert.

4.2.1 SEGMENTIERUNG

Die Rohbilder durchlaufen vor der Auswertung eine Reihe von Verarbeitungsschritten — die sogenannte *Image-Pipeline* (siehe Kapitel 3). Zur Segmentierung der Spots vom Hintergrund wird ein globales Schwellenwertverfahren eingesetzt. Der Schwellenwertfaktor τ_{seg} ist an die Intensität und den Abstand der Spots anzupassen:

- Ist τ_{seg} zu niedrig, verschmelzen benachbarte Spots zu einem

größeren Segment und lassen sich nicht mehr getrennt auswerten.

- Ist τ_{seg} zu hoch, schrumpfen schwache Spots oder verschwinden ganz aus dem Binärbild.

Bei periodischen Masken lässt sich der optimale Schwellenwert relativ einfach bestimmen, da die Spotabstände konstant sind.

Im AAP-Design hingegen variieren die Abstände. Ein globaler Schwellenwert kann deshalb dazu führen, dass dicht beieinanderliegende Spots im Binärbild zu einem Segment zusammenfallen. Bei Einzel-LED-Aufnahmen lässt sich τ_{seg} noch spezifisch einstellen, bei kombinierten Abbildungen mehrerer Lichtquellen wird dies problematisch: Treffen Lichtbündel mehrerer LEDs nahezu an derselben Sensorposition auf, führt ein zu kleiner Schwellenwert zum Verschmelzen der Spots.

Alternativ ließe sich ein *lokales* Schwellenwertverfahren einsetzen, z. B. Region-Growing [51] oder Clustering [52]. Diese Verfahren erhöhen jedoch den Rechenaufwand deutlich. Stattdessen wird der Schwellenwert als zusätzlicher Designparameter in die Maskenoptimierung einbezogen, um einen Kompromiss zwischen Segmentierungsqualität und Rechenzeit zu erreichen.

Abbildung 4.6 verdeutlicht exemplarisch den Einfluss unterschiedlicher Schwellenwerte auf dicht benachbarte Spots innerhalb einer kombinierten Abbildung. Gezeigt ist ein Ausschnitt zweier Spots: links das Rohbild, mittig das Binärbild mit $\tau_{seg} = 4,0$, rechts mit $\tau_{seg} = 5,0$. Damit die Spots im Binärbild separiert werden, muss der Schwellenwert ausreichend hoch gewählt werden. Ist τ_{seg} hingegen zu groß, schrumpft der Durchmesser der Spots. Dadurch besitzen sie weniger Konturpunkte, und die Schwerpunktberechnung ist ungenauer.

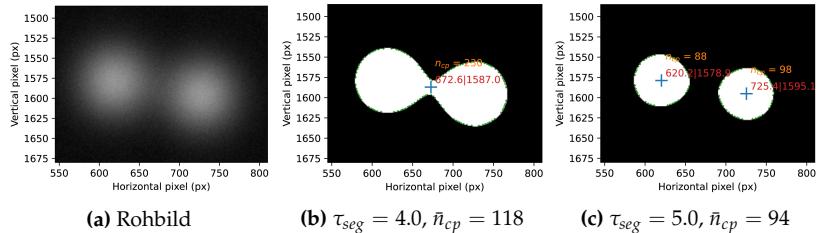


Abbildung 4.6: Einfluss des Schwellenwerts auf zwei eng benachbarte Spots. Blaue Kreuze markieren die berechneten Schwerpunkte; grün eingezeichnet sind die vom `findContours`-Algorithmus ermittelten Konturpunkte (n_{cp}).

Aus Abbildung (b) wird ersichtlich, dass bei $\tau_{seg} = 4,0$ der Schwellenwert zu niedrig gewählt ist: Die beiden Spots verschmelzen zu einem Segment. Bei $\tau_{seg} = 5,0$ (c) gelingt die Trennung. Die Wahl von τ_{seg} ist daher eine Optimierungsaufgabe, die wesentlich von der Anzahl an Spots pro Fläche abhängt.

Mit dem Schwellenwert τ_{seg} lässt sich nicht nur die Segmentgröße im Binärbild steuern, sondern auch der Mindestabstand, ab dem zwei benachbarte Spots zu einem Segment verschmelzen. Die Spotgröße kann durch den Flächeninhalt A_s der hellen Pixel, durch den äquivalenten Durchmesser oder durch die Anzahl der Konturpunkte beschrieben werden. Letztere wird im Folgenden mit n_{cp} bezeichnet und entspricht der Anzahl der vom `findContours`-Algorithmus [53]³ erkannten Randpixel. Der arithmetische Mittelwert pro Bild, \bar{n}_{cp} , verhält sich, wie auch der mittlere Flächeninhalt \bar{A}_s , reziprok proportional zum Schwellenwert:

³Der Algorithmus ermittelt sämtliche Konturpunkte entlang der Grenzlinie zwischen Spotsegment und Hintergrund; in den Abbildungen grün dargestellt.

$$\tau_{\text{seg}} \propto \frac{1}{\bar{n}_{\text{cp}}} \quad (4.1)$$

Eine hohe Konturpunktzahl pro Spot ist wünschenswert, weil sie die Genauigkeit der Momentenmethode zur Schwerpunktbestimmung erhöht. Für eine gegebene Maske genügt es, τ_{seg} einmalig festzulegen; distanzabhängige Intensitätsänderungen der Spots können durch Anpassung der Kamerabelichtungszeit kompensiert werden.

Unabhängig von der Wahl des Schwellenwerts bleiben in kombinierten Abbildungen gelegentlich verschmolzene Spotsegmente zurück. Damit diese nicht zu Fehlzuordnungen in späteren Verarbeitungsschritten führen, werden sie gefiltert. Hierzu wird zunächst der mittlere Flächeninhalt \bar{A}_s aller Segmente bestimmt; anschließend werden Segmente mit überdurchschnittlicher Fläche eliminiert. Über τ_{seg} lässt sich somit die minimale Verschmelzdistanz $\delta_{s\text{min}}$ einstellen, während das Flächenkriterium definiert, ab welcher Größe ein Segment als Überlagerung verworfen wird:

$$\tau_{\text{seg}} \propto \frac{1}{\delta_{s\text{min}}}. \quad (4.2)$$

Abbildung 4.7 zeigt das vollständige Binärbild nach dem Schwellenwertverfahren (a) sowie das Ergebnis nach der Entfernung überlappender Segmente (b). Im linken Bild sind verschmolzene Spots rot markiert; sie werden vom Algorithmus zuverlässig erkannt und gefiltert, sodass sie im rechten Bild nicht mehr vorhanden sind. Obwohl dadurch einzelne Aperturen nicht mehr repräsentiert sind, beeinträchtigt dies das nachfolgende Template-Matching nicht, wie im nächsten Abschnitt gezeigt wird. Der Algorithmus benötigt für eine eindeutige

Zuordnung nur einen Teil des ursprünglichen Musters, und es sind ausreichend Spots vorhanden.

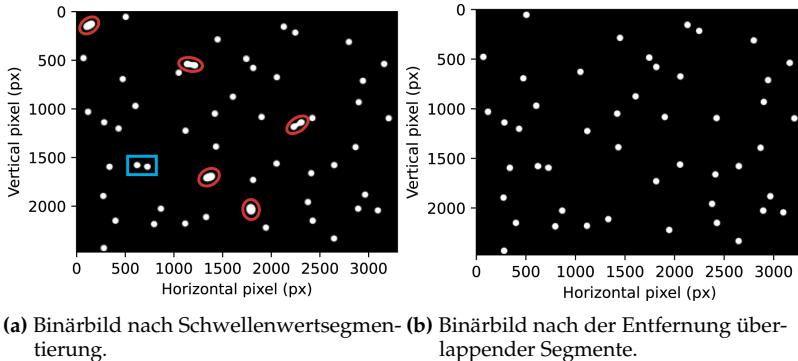


Abbildung 4.7: Kombinierte Abbildung nach zwei Verarbeitungsschritten. Rot: verschmolzene Spots, die entfernt werden; blau: Referenzausschnitt aus Abbildung 4.6.

4.2.2 ERMITTlung DES MASKAUSSCHNITTS

Der *Template-Matching-Algorithmus* besteht aus mehreren Schritten. Die Mustererkennung basiert auf der OpenCV-Funktion `matchTemplate()` [53]. Die Sensoraufnahme ist hierbei das Template. Die simulierte Abbildung der gesamten AAP-Maske dient als Referenz.

Die Simulation der Abbildung der gesamten Maske dient zur Projektion der Aperturen in die Sensorebene (Abbildung 4.8).

Ein direkter Vergleich zwischen der Sensorabbildung und dem Maskendesign kann durch das Template-Matching nicht durchgeführt werden, da Letzteres eine tabellarische Datei darstellt.

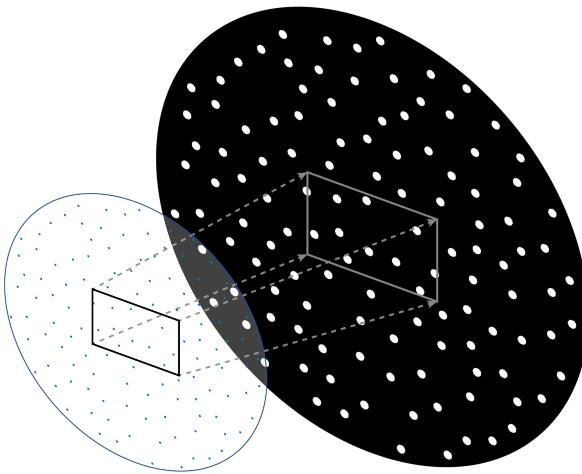


Abbildung 4.8: Projektion der Aperturmaske in die Bildebene durch die MAPS-Abbildungssimulation. Ein beispielhafter Kameraausschnitt ist eingezeichnet.

Die simulierte Referenz durchläuft dieselbe Image-Pipeline wie eine reguläre Kameraaufnahme und wird als Binärbild abgespeichert. Allerdings wird die Auflösung um den Faktor zehn reduziert, um die Berechnungszeit beim Template Matching in einem angemessenen Rahmen zu halten. Das Downsampling hat keinen messbaren Einfluss auf den TMA, da die Muster im Template relativ trivial sind.

Das Ergebnis der Mustererkennung ist eine nicht-binäre Ergebnismatrix mit derselben Dimension wie die Referenz, erweitert um die Dimensionen des Templates. Der markanteste Extremwert der Ergebnismatrix (Heatmap) wird als Eckpunkt des abgebildeten Maskenausschnitts interpretiert. Ausgehend von diesem Punkt wird ein Rechteck in der Größe der Sensorfläche in das Referenzbild eingezeichnet. Die darin liegenden Aperturen sind diejenigen, deren Spots auf

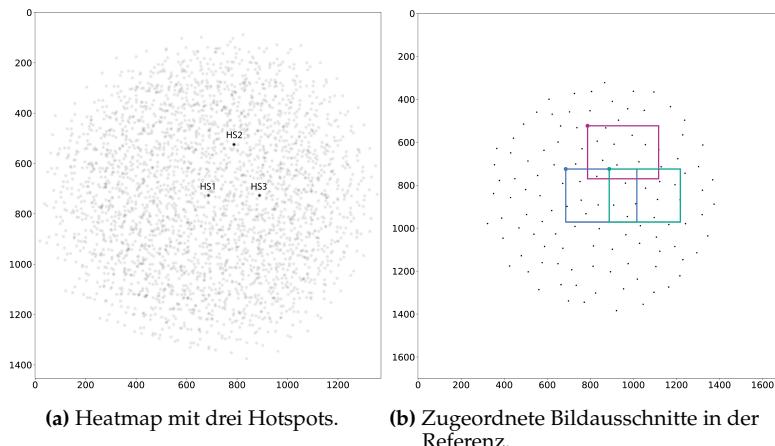
dem Sensor erscheinen. Abbildung 4.9 veranschaulicht das Verfahren: In der Heatmap (a) hebt sich der Extremwert deutlich ab; seine Position lässt sich zuverlässig per Extremwertsuche bestimmen. Der selbe Punkt definiert den eingezeichneten Ausschnitt im Referenzbild (b).



Abbildung 4.9: Ermittlung des Maskenausschnitts bei einer Einzelabbildung. Links: Heatmap mit eindeutigem Extremwert. Rechts: zugehöriger Ausschnitt im Referenzbild.

Bei kombinierten Aufnahmen erscheinen in der Heatmap drei ausgeprägte Hotspots, die jeweils den Eckpunkt eines Maskenausschnitts markieren (Abbildung 4.10). Diese können beispielsweise über ein Schwellenwertverfahren ermittelt werden.

Anstelle dessen wird hier ein iterativer Ansatz genutzt: Die Sensorabbildung durchläuft den TMA dreimal hintereinander. In jedem Durchlauf wird der Ausschnitt mit der höchsten Übereinstimmung (intensivster Hotspot) vom Sensorbild subtrahiert, sodass dessen Beitrag aus der Abbildung entfernt wird. Dadurch existiert im nächsten Durchlauf



(a) Heatmap mit drei Hotspots.

(b) Zugeordnete Bildausschnitte in der Referenz.

Abbildung 4.10: Bestimmung der drei Maskenausschnitte in einer kombinierten Abbildung. Die hellen Punkte kennzeichnen die Hotspots (links); die entsprechenden Ausschnitte sind im Referenzbild eingezeichnet (rechts).

ein Spotmuster und damit auch ein Hotspot weniger. Nach der zweiten Subtraktion bleibt nur noch ein Hotspot übrig. Auf diese Weise werden in drei Iterationen die Koordinaten aller Maskenausschnitte ermittelt und gleichzeitig die kombinierte Abbildung in ihre Einzelabbildungen separiert. Abbildung 4.11 illustriert das Vorgehen.

Das linke Bild zeigt das ursprüngliche Binärbild; das vom ersten TMA-Lauf erkannte Muster ist violett markiert. Leere Stellen kennzeichnen Spots, die zuvor in der Image-Pipeline aussortiert wurden. Die mittlere und rechte Abbildung zeigen das zweite bzw. dritte erkannte Muster nach jeweils einer Subtraktion.

Die Subtraktion hinterlässt kleine halbmondförmige Rückstände, weil die Spotgröße im Sensorbild nicht identisch mit der in der Referenz ist. Das sorgt für Rauschen in der Ergebnismatrix und kann sich negativ auf die Identifizierung der Hotspots auswirken.

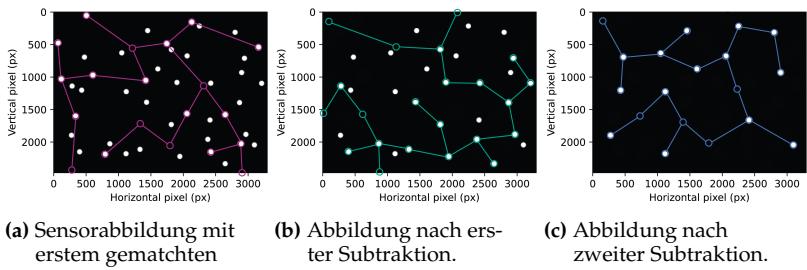


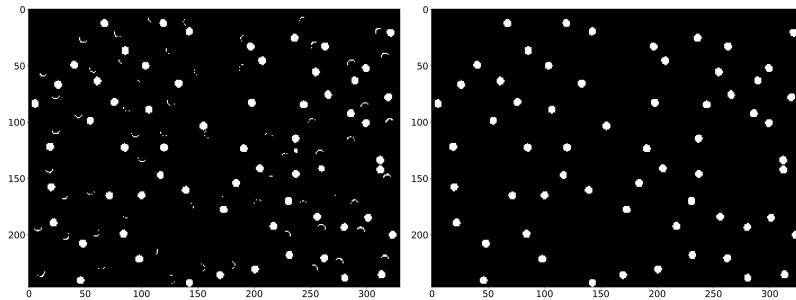
Abbildung 4.11: Iteratives Template-Matching bei einer kombinierten Aufnahme: Nach jedem Durchlauf wird der erkannte Ausschnitt subtrahiert; das jeweils gematchte Muster ist farblich hervorgehoben.

Um das Rauschen zu reduzieren, werden die Subtraktionsrückstände in einem zusätzlichen Schritt entfernt: Segmente, deren Flächeninhalt deutlich unter dem Mittelwert \bar{A}_s eines regulären Spots liegt, werden verworfen. Abbildung 4.12 zeigt den Effekt vor und nach dem Filter.

4.2.3 ADAPTIVES TEMPLATE

Die bisherige Implementierung der Abbildungssimulation erzeugt für eine feste Lichtquellenposition ein statisches Template, das anschließend für das Template-Matching verwendet wird. Dieses Verfahren ist jedoch in seiner Gültigkeit auf einen begrenzten axialen Bereich von etwa ± 50 mm um die Referenzdistanz beschränkt. Außerhalb dieses Bereichs führen die veränderten Abbildungsgeometrien zu einer Verschiebung der Spotpositionen, wodurch die Übereinstimmung zwischen aufgenommenem Bildausschnitt und statischem Template abnimmt.

Eine naheliegende Lösung bestünde darin, für den gesamten Mess-



(a) Sensorbild (Template) nach erster Subtraktion.

(b) Gefiltertes Bild ohne Rückstände.

Abbildung 4.12: Entfernung der halbmondförmigen Subtraktionsrückstände durch Flächenfilterung.

bereich eine Vielzahl von Templates im Voraus zu simulieren und abzuspeichern, um während der Messung das passende Template auszuwählen. Dieser Ansatz wäre jedoch speicherintensiv und unflexibel. Es wird daher angestrebt, das Template dynamisch an die aktuelle Messdistanz anzupassen, sodass nur ein einziges Template benötigt wird.

Die zentrale Herausforderung besteht zunächst darin, aus dem aufgenommenen Messbild die Abweichung der aktuellen Lichtquellenposition von der Referenzdistanz zu bestimmen, ohne dabei auf das Template-Matching selbst zurückzugreifen. Da der mittlere Abstand der Spots zueinander mit der axialen Distanz der Lichtquelle korreliert, kann die Messdistanz abgeschätzt werden. Je näher die Lichtquelle an der Maske positioniert ist, desto größer ist der Abstand der Spots im Kamerabild.

Die eigentliche Transformation des Templates erfordert eine Anpassung, die über eine einfache proportionale Skalierung hinausgeht. Bei einer Änderung der Messdistanz variiert nicht nur der Abstand zwi-

schen den Spots, sondern auch deren Anzahl im Bildausschnitt. Am geschicktesten ist das Simulieren eines neuen Templates auf die gleiche Weise, wie das Referenztemplate generiert wurde. Dafür wird die geschätzte Messdistanz eingesetzt. Da diese nicht exakt mit der tatsächlichen LQ-Distanz übereinstimmen muss, funktioniert das Template-Matching trotzdem.

Untersuchungen mit einem 1000 mm Referenztemplate an den beiden axialen Distanzen (250 mm und 1000 mm) zeigen, dass das adaptive Template-Matching in beiden Fällen eine bessere Übereinstimmung von Template und Messbild erreicht als das statische Verfahren. Während bei 1000 mm beide Verfahren noch Ergebnisse lieferten, konnte bei 250 mm nur mit dem adaptiven Template die korrekte Position gefunden werden. Beim statischen Template lagen die ermittelten Ausschnitte dagegen deutlich daneben, siehe Abbildung 4.13.

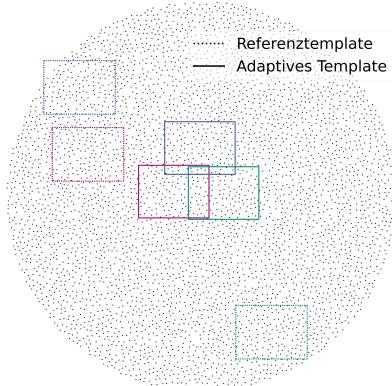


Abbildung 4.13: Template-Matching Vergleich zwischen dem Referenztemplate (1000 mm) und dem adaptiven Template bei einer Messdistanz von 250 mm auf der optischen Achse.

Die Heatmaps der Korrelationswerte belegen zudem, dass das adaptive Template einen klaren, eindeutigen Peak aufweist, während das statische Template zu unscharfen Maxima und erhöhtem Rauschen neigt [54].

4.2.4 RELATION ZWISCHEN SPOTS UND APERTUREN

Durch den Abgleich von Template (Sensorabbildung) und Referenz (projizierte Maskenabbildung) wird der aufgenommene Ausschnitt der Aperturmaske lokalisiert. Die Referenz enthält jedoch keine Informationen über die realen Aperturkoordinaten, da diese durch die Projektion in die Sensorebene verloren gehen. Genau wie bei einer regulären Kameraaufnahme handelt es sich nur um eine Matrix mit Pixelwerten.

Da die Referenz lediglich eine vergrößerte Darstellung der Aperturmaske darstellt, können die Aperturkoordinaten ebenso in die Sensorebene projiziert werden. Umgekehrt lassen sich auch die Pixelkoordinaten der detektierten Spots zurück in die Maskenebene transformieren. Dies erfordert eine lineare Transformation zwischen Bild- und Maskenebene, ausgedrückt durch folgende Beziehung:

$$P_M = T_E \cdot P_B \quad (4.3)$$

Dabei bezeichnet P_M einen Punkt auf der Maskenebene, P_B den zugehörigen Punkt auf der Sensorebene, und T_E ist die lineare Transformationsmatrix, die Skalierungs- und Lagebeziehungen beider Ebenen beschreibt.

Auf Grundlage dieser Beziehung kann jedem Spot in der Kameraaufnahme eine Apertur zugeordnet werden, vorausgesetzt, diese hat einen auswertbaren Spot abgebildet. In der simulierten Referenzaufnahme bildet jede Apertur einen Spot ab. In der realen Aufnahme ist dies nicht der Fall: Schmutzpartikel, Maskenfehler oder die Filter in der Image-Pipeline führen dazu, dass einige Spots ausbleiben.

Um zu identifizieren, welche Aperturen tatsächlich einen Spot abgebildet haben, müssen die projizierten Aperturkoordinaten mit den detektierten Spotpositionen abgeglichen werden.

Für diesen Abgleich wird ein *Nearest-Neighbor-Algorithmus* (NNA) eingesetzt. Dabei werden die Spots der Referenz- und der Kameraabbildung als zweidimensionale Punktwolken interpretiert. Durch Formel 4.2.4 liegen beide Punktmengen im selben Koordinatenraum vor.

Zur Distanzberechnung könnte ein einfacher Brute-Force-Ansatz verwendet werden, bei dem sämtliche Abstände berechnet werden. Effizienter ist jedoch der Einsatz von anwendungsoptimierten Algorithmen: Für diese Arbeit wurde ein kd-Tree-basierter NNA aus der Python-Bibliothek `scikit-learn` [55] implementiert.

Ziel dieses *Pairing-Algorithmus* ist es, zu jedem Spot der einen Punktmenge den nächstgelegenen Punkt der anderen Menge zu finden. Die so gebildeten Paare entsprechen der wahrscheinlichsten Spot-Apertur-Relation. Ist die Anzahl der Spots in beiden Mengen identisch, entsteht eine vollständige Paarung. In realen Szenarien ist die Anzahl jedoch meist unterschiedlich oder die Paarung nicht eindeutig. Deshalb wird der Algorithmus so konzipiert, dass nur so viele Paare gebildet werden, wie Spots in der kleineren Punktmenge enthalten sind.

Zur Umsetzung wird der Algorithmus in zwei Schritten ausgeführt:

1. Im ersten Durchlauf werden alle paarweisen Distanzen zwischen den Punkten beider Wolken berechnet und gespeichert.
2. Im zweiten Durchlauf wird für jeden Punkt der kleinere Distanzwert selektiert, sodass keine Mehrfachzuordnungen entstehen.

Abbildung 4.14 illustriert zwei Punktmengen unterschiedlicher Größe: Die grünen Punkte repräsentieren die Spots der Kameraaufnahme, die weißen Punkte die projizierten Referenzspots der Aperturmaske. Der relative Versatz der Punktwolken simuliert typische Abweichungen in realen Aufnahmen. In diesem Beispiel lassen sich die Paare eindeutig zuordnen. Bei mehreren Hundert Spots ist dies jedoch nicht mehr gegeben — benachbarte Spots liegen dann so nahe beieinander, dass fehlerhafte Paarbildungen durch den NNA auftreten können.

Aufgrund der linearen Beziehung beider Punktwolken können die validen Paarungen des Distanzverhältnisses ermittelt werden. Zur Trennung dieser von zufälligen Paarungen wird ein adaptiver *kd-Tree-Radius* r_T eingeführt:

$$r_T = \bar{D}_P - \sigma_{D_P} \cdot k_D \quad (4.4)$$

Dabei ist \bar{D}_P der Mittelwert, σ_{D_P} die Standardabweichung der Abstände D_P zwischen allen potenziellen Paaren und k_D ein justierbarer Dämpfungsfaktor. Der Radius r_T legt fest, in welchem Abstand um einen Referenzpunkt (weiß) ein Spot der Kamerapunktmenge (grün) liegen muss, um als valides Paar akzeptiert zu werden. Der Wert von k_D wird in Abhängigkeit von der Punktzahl gewählt, um den Radius an die Aperturdichte anzupassen.

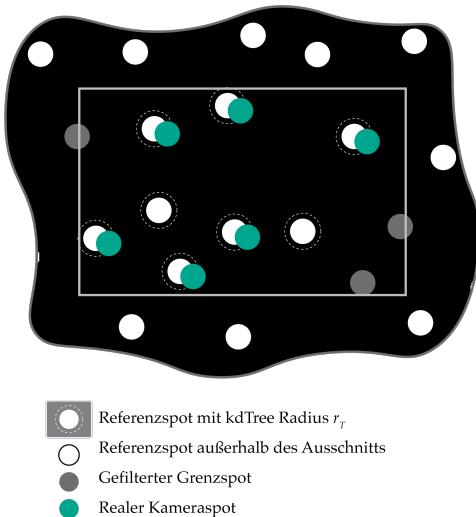


Abbildung 4.14: Veranschaulichung des Pairing-Prinzips mit adaptivem Radius. Grüne Punkte: Spots der Kameraaufnahme. Weiße Punkte: projizierte Referenzaperturen.

Im zweiten Durchlauf des Pairing-Algorithmus wird der zuvor berechnete Radius r_T als Suchparameter übergeben. Dadurch werden nur noch Punktpaare berücksichtigt, deren Abstand unterhalb dieser Schwelle liegt. Spots ohne gültigen Nachbarn werden verworfen, was das Risiko fehlerhafter Verknüpfungen deutlich reduziert.

Das Ergebnis ist eine Liste plausibler Spotpaare aus beiden Punktmenigen. Die implementierte Methode ist insbesondere für große Punktzahlen geeignet, bei denen ein vollständiger Vergleich aller Distanzen (Brute-Force) zu rechenintensiv wäre. Die verwendete `scikit-learn`-Implementierung erlaubt einen automatischen Wechsel zwischen kd-Tree- und Brute-Force-Verfahren anhand eines

Schwellenwerts. Dadurch kann der jeweils effizienteste *Nearest-Neighbor*-Ansatz abhängig von der Maskengröße gewählt werden.

Nachdem feststeht, welche Aperturen einen auswertbaren Spot abgebildet haben, erfolgt im letzten Schritt die Rücktransformation in die Maskenebene. Hierfür wird die Inverse der Transformationsmatrix aus Gleichung (4.2.4) verwendet:

$$P_M = T_E^{-1} \cdot P_B$$

Dabei werden die Pixel-Koordinaten der projizierten Referenzspots mit T_E^{-1} multipliziert, um die Aperturkoordinaten in Millimetern zu erhalten. Wichtig ist: Es werden nicht die Kameraspots rücktransformiert, sondern die gültigen Referenzspots, da diese zu den ursprünglichen Aperturkoordinaten zurückführen.

Abbildung 4.15 veranschaulicht das Prinzip: In der Bildebene sind die gültigen Referenzspots weiß dargestellt, während pinkfarbene Pfeile deren Rücktransformation in die Maskenebene andeuten. Invalide Spots (grau), die den Pairing-Algorithmus nicht passiert haben, werden ignoriert.

Nach der Rücktransformation liegt ein Satz mit Aperturkoordinaten und ein Satz mit Kameraspots vor. Zur Berechnung der Lichtquellenposition müssen nun lediglich die bereits implementierten MAPS-Algorithmen eingesetzt werden.

Dieser Abschnitt veranschaulicht die Komplexität der Zuordnung von Spot zu Apertur bei einem aperiodischen Maskendesign. Für ein leichteres Verständnis sind einige der gezeigten Abbildungen deutlich vereinfacht, mit einer Lichtquelle und wenigen Aperturen. Die

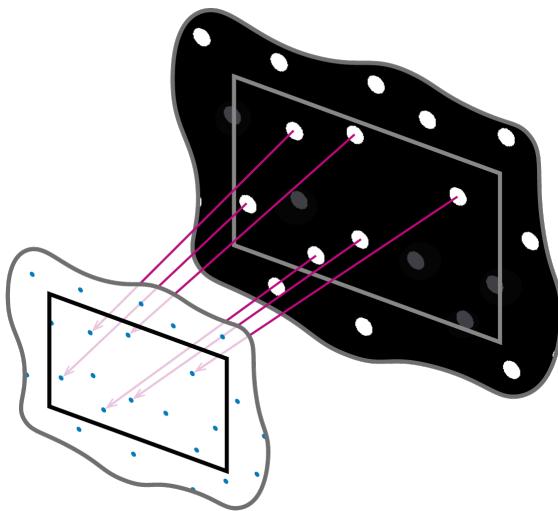


Abbildung 4.15: Rücktransformation der projizierten Referenzspots in die Maskenebene mittels T_E^{-1} . Nur gültige Spots (weiß) werden berücksichtigt.

beschriebenen Algorithmen sind jedoch vollumfänglich für komplexe Maskendesigns mit hoher Aperturdichte und für kombinierte Abbildungen mehrerer Lichtquellen ausgelegt.

4.3 DESIGNOPTIMIERUNG

Im Folgenden wird eine Parameteroptimierung des AAP-Designs durchgeführt. Das Ziel ist, das optimale Verhältnis von Aperturdurchmesser D_A und -abstand δ_A für drei gleichzeitig eingeschaltete Lichtquellen zu finden. Dies erfolgt mithilfe der Abbildungssimu-

lation, wofür der digitale Zwilling um zwei Betriebsmodi erweitert wird.

4.3.1 AAP-ABBILDUNGSSIMULATION

Im sogenannten Simultan-Modus sind drei Lichtquellen gleichzeitig aktiviert. Deren Position wird durch das virtuelle Target angegeben. Die kombinierte Abbildung wird erzeugt, indem zunächst drei Einzelabbildungen simuliert und anschließend addiert werden. In 4.16 sind exemplarisch die drei separaten Abbildungen sowie die resultierende kombinierte Abbildung dargestellt. Die Spots sind farblich markiert und ermöglichen die Zuordnung zur jeweiligen Lichtquelle.

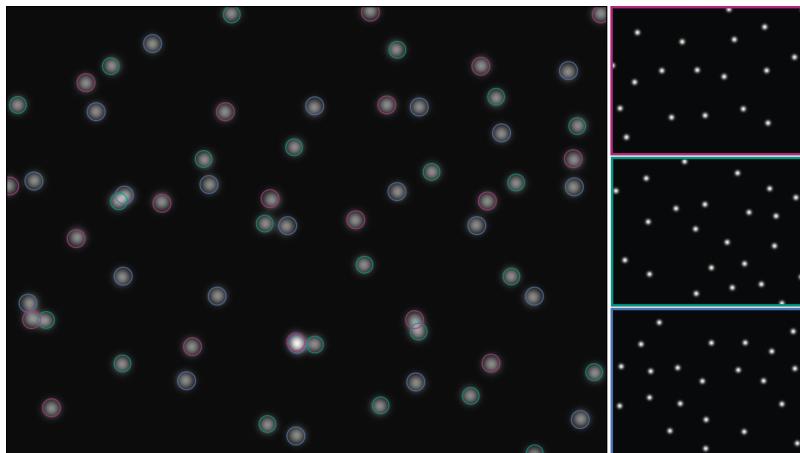


Abbildung 4.16: Simulierte kombinierte Abbildung (links) und die drei zugehörigen Einzelabbildungen (rechts). Die farbige Codierung dient der visuellen Trennung der Lichtquellen.

Die Einzelabbildungen werden in diesem Modus ausschließlich zur Generierung der kombinierten Abbildung verwendet; sie stehen in einer realen Messung nicht zur Verfügung.

Im zweiten Betriebsmodus, dem sequenziellen Modus, werden ebenfalls Einzelabbildungen der drei Lichtquellen erzeugt, jedoch nicht überlagert. Es entstehen drei separat auswertbare Aufnahmen. Dieser Simulationsmodus entspricht dem 6DOF-Messmodus, der im Legacy-MAPS implementiert ist. Er bietet ein wertvolles Vergleichskriterium für die Qualität der Separation im Simultan-Modus. Da hier keine Subtraktion überlagerter Muster erforderlich ist, repräsentiert der sequenzielle Modus die bestmögliche erreichbare Messqualität des simultanen Modus.

Beide Simulationsmodi liefern dasselbe Ergebnis: die Positionen der Lichtquellen sowie die Orientierung des Targets und somit alle sechs Freiheitsgrade. Sowohl die simultan als auch die sequenziell erzeugten Abbildungen durchlaufen die weiterentwickelte Image-Pipeline, den TMA und die anschließende Poseberechnung. Nur die kombinierte Abbildung durchläuft die Separation.

Dabei ist zu beachten, dass in der Simulation nicht der Messwert selbst, sondern die zugrunde liegende Sensorabbildung generiert wird. Der eigentliche Messwert wird daraus algorithmisch berechnet. Der einzige Unterschied zur realen Messung liegt somit im Ursprung des Kamerabilds. Da der digitale Zwilling denselben Quellcode wie das reale MAPS-Messinstrument verwendet, lassen sich beide Modi direkt auf Laborexperimente übertragen. Voraussetzung hierfür ist lediglich die Fertigung und Integration der AAP-Maske in das Messinstrument.

Im Fokus der Designoptimierung steht die Robustheit. Von allen Designs, die ein gewisses Robustheitskriterium erfüllen, wird jenes mit

der höchsten Messpräzision ausgewählt.

Die Robustheit R^* wird als Prozentsatz fehlerfreier Messwerte einer Messreihe definiert:

$$R^* = 100 \% - \frac{N_F \cdot 100 \%}{N_T} \quad (4.5)$$

Dabei ist N_T die Gesamtanzahl der Messwerte und N_F die Anzahl fehlerhafter Ergebnisse. Falsche Positionsdaten resultieren typischerweise aus missinterpretierten Spotmustern oder fehlerhaften Spot-Apertur-Paarungen. Als Schwellenwert für ein valides Design wird eine Robustheit von $R^* \geq 95 \%$ festgelegt. Dieser Wert erlaubt eine gewisse Toleranz für algorithmische Diskrepanzen der experimentellen Software. Im Hinblick auf die Produktreife empfiehlt sich eine konservative Anhebung des Wertes.

Die möglichen Aperturdurchmesser sind durch die verfügbaren Werkzeuge des Fertigungsunternehmens limitiert (Bohrergrößen: 150, 300, 600 und 900 μm). Vorab durchgeführte Stichproben-Simulationen zeigen:

- 150 μm : unzureichendes Signal-Rausch-Verhältnis, niedrige Präzision
- 900 μm : häufige Spotüberlappung trotz vergrößertem Abstand, geringe Ausbeute

Entsprechend werden diese Werte ausgeschlossen. Auch Kombinationen wie $D_A = 600 \mu\text{m}$ mit $\delta_A \leq 2 \text{ mm}$ sind ungeeignet. Acht praktikable Parameterkombinationen werden schließlich untersucht (vgl. Tabelle 4.1).

Mithilfe der Bahnplanungssoftware wird ein Pfad mit Messpunkten innerhalb eines Quaders der Dimension 350 \times 350 \times 750 mm ($x \times y \times z$)

Trial #	D_A [μm]	δ_A [mm]	τ_{seg}	r_{Tree}
1	300	0,5	1,55	0,5
2	300	0,75	2,0	0,5
3	300	1,0	2,75	0,5
4	300	1,5	4,5	0,5
5	300	2,0	5,5	0,25
6	300	3,0	6,3	0,25
7	600	2,0	3,0	0,5
8	600	3,0	4,6	0,25

Tabelle 4.1: Versuchsübersicht zur Optimierung der AAP-Parameter.

geplant. Der Quader ist zentriert zur optischen Achse von MAPS für eine laterale symmetrische Verteilung der Messpunkte. Die laterale Auflösung beträgt 10 mm, die axiale 250 mm; daraus resultieren 5184 Messpositionen pro Versuch. An jeder Position werden zehn Bilder simuliert.

Die hohe laterale Auflösung stellt sicher, dass viele unterschiedliche Spotmuster simuliert und bewertet werden können. Die axiale Auflösung wird geringer gewählt, da sich bei achsparalleler Verschiebung lediglich die Skalierung ändert, nicht das Muster selbst. So lässt sich die Rechenzeit reduzieren, die pro Versuch etwa acht Stunden beträgt.

Alle acht Versuche werden im simultanen Messmodus des digitalen Zwillings durchgeführt. Vor jedem Versuch werden die Parameter der Image-Pipeline manuell angepasst. Wesentlich sind:

- τ_{seg} : Schwellenwert zur Spotsegmentierung
- r_{Tree} : Radius zur Spot-Apertur-Zuordnung

Die Parameter τ_{ov} und τ_{rm} zeigen bei korrekter Einstellung von τ_{seg} und r_{Tree} keinen zusätzlichen Einfluss und werden konstant gehalten:

$$\tau_{ov} = 0.25, \quad \tau_{rm} = 25$$

alle anderen Parameter stellen sich automatisch ein.

Die Qualität eines Maskendesigns wird anhand der relativen Messabweichung $\Delta\bar{x}_{rel}$ und der -unsicherheit u_{rel} bewertet. Die Soll-Punktliste mit den geplanten x , y und z -Koordinaten dient dabei als Referenz. Die Standardunsicherheit der Wiederholmessungen wird als Schätzwert der Messunsicherheit verwendet. Angegeben ist die erweiterte Messunsicherheit ($k = 2$).

4.3.2 SIMULATIONSERGEBNISSE

Die Ergebnisse der Simulationen zeigen, dass drei der acht getesteten Maskendesigns das Robustheitskriterium erfüllen. Wie in Abbildung 4.17 zu erkennen ist, liegen fünf der acht Designs nahe an der definierten Toleranzgrenze von 95 %. Die Designs vier und sechs zeigen signifikante Schwächen in der Robustheit: Mehr als 50 % der simulierten Abbildungen sind nicht auswertbar und würden zu fehlerhaften Messwerten führen. Auch Design acht verfehlt mit weniger als 85 % auswertbaren Bildern deutlich die Mindestanforderung und wird ausgeschlossen.

Die Designs eins und drei weisen mit ca. $R^* = 99\%$ die höchste Robustheit auf. Dies entspricht etwa 50 fehlerhaften Auswertungen bei insgesamt 5184 simulierten Abbildungen. Design zwei liegt mit

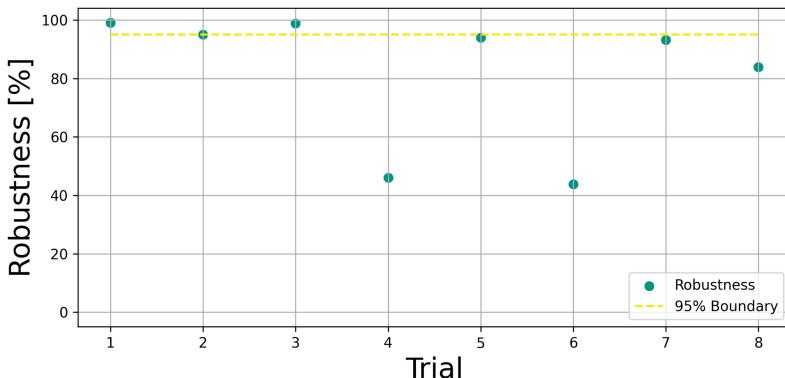


Abbildung 4.17: Robustheit der acht Maskendesigns. Die Toleranzgrenze von 95 % ist als Referenz eingezeichnet.

einer Robustheit von knapp 95 % oberhalb der Toleranzgrenze und liefert vergleichsweise stabile Ergebnisse.

Abbildung 4.18 zeigt die relative Messabweichung aller Designs, getrennt nach den drei Raumachsen. Die relative Unsicherheit ist in Abbildung 4.19 dargestellt. Ergänzende Zahlenwerte sind in Tabelle A.2 zu finden; die durchschnittliche Anzahl ausgewerteter Spots pro Abbildung sowie die genauen Robustheitswerte sind in Tabelle A.3 zusammengefasst.

Design eins zeigt trotz hoher Robustheit die größte Messabweichung und die geringste Präzision der drei Favoriten. Eine manuelle Bildanalyse zeigt, dass die hohe Spotdichte die Segmentierung erschwert. Zudem variieren die Flächeninhalte der Spots so stark, dass das Filtern überlappender Spots nicht zuverlässig funktioniert. Die resultierenden Spots weisen oft eine verzerrte, tropfenähnliche Geometrie auf, was die Schwerpunktbestimmung beeinträchtigt.

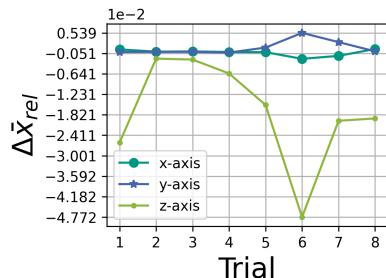


Abbildung 4.18: Relative Messabweichung aller acht Versuche pro Raumachse.

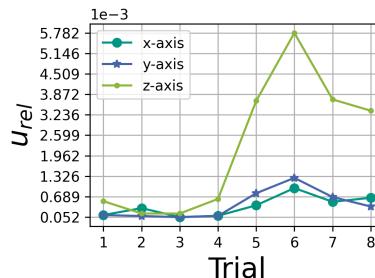


Abbildung 4.19: Relative Messunsicherheit aller acht Versuche pro Raumachse.

Auch Design zwei ist von stark schwankenden Spotflächen betroffen, wodurch die Filterung verschmolzener Spots unzuverlässig wird. Eine Absenkung von τ_{seg} könnte dies zwar verbessern, würde jedoch auch viele valide Spots entfernen. Beide Designs bilden zwar viele Spots ab, jedoch können die Abbildungen nicht zuverlässig ausgewertet werden.

Ab einem Mindestabstand von $D_A \geq 1,0$ mm verbessert sich die Separation der Spots. Das Spotbild erscheint kreisförmig, und die Anzahl gefilterter Überlappungen nimmt ab. Design drei bietet mit durchschnittlich 144 Spots pro Abbildung ein gutes Verhältnis zwischen Aperturdichte und -durchmesser. Designs fünf bis acht erzeugen durch den hohen Aperturabstand deutlich weniger Spots (nur 16–49 pro Abbildung), was etwa einem Drittel pro Einzelabbildung entspricht und nicht ausreichend ist. In der Folge kommt es zu häufiger fehlerhafter Mustererkennung und einer Abnahme von Robustheit und Genauigkeit.

Designs vier und sechs zeigen eine signifikant reduzierte Robustheit. Ob dies auf den Parameterwerten oder dem zufälligen Designlayout

beruht, bleibt unklar. Eine Wiederholung mit gleicher Parametrisierung, aber neu generiertem Layout wäre denkbar. Da ihre Genauigkeit und Präzision vergleichsweise schlecht sind, wird auf weitere Untersuchungen verzichtet.

Aus dem Experiment ergeben sich folgende Schlussfolgerungen: Der optimale Bereich für den Mindestabstand der Aperturen liegt zwischen 0,75 mm und 1,0 mm, kombiniert mit einem Aperturdurchmesser von $300 \mu\text{m}$. Eine zu hohe Spotdichte beeinträchtigt die Trennung und Segmentierung der Spots, während ein zu großer Aperturabstand die Anzahl der auswertbaren Spots reduziert und damit sowohl die Robustheit als auch die Genauigkeit verschlechtert. Die Designs zwei und drei erzielen insgesamt die besten Resultate, wobei aufgrund der höheren Robustheit Design drei für die weiterführenden Untersuchungen ausgewählt wird.

4.3.3 VALIDIERUNG

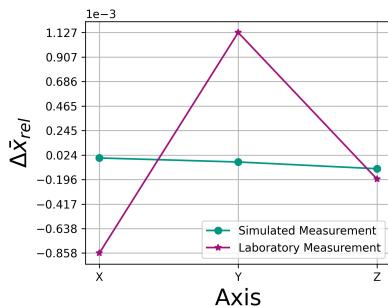
Die Validierung erfolgt durch ein Laborexperiment unter Einsatz von Maskendesign #3. Das LED-Target wird an einem ZEISS Prismo Koordinatenmessgerät befestigt, wobei es anstelle eines Tasters eingespannt ist. Die Positionsdaten des KMG dienen als Referenz zur Berechnung der Messabweichung. Das KMG ist gemäß DIN EN ISO 10360 [56] kalibriert⁴.

Die Labormessung erfolgt in einem klimatisierten Messraum des Zentrums für Optische Technologien (ZOT) der Hochschule Aalen bei einer stabilen Raumtemperatur von $20,5 \pm 0,2^\circ\text{C}$ ⁵. Der Messaufbau

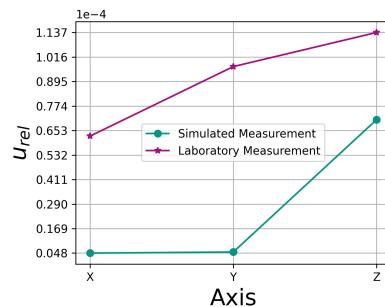
⁴ $MPE_E = 1,7 + L/300 \mu\text{m}$, $MPE_P = 0,6 \mu\text{m}$

⁵Rückführung: DE3300440003, $k = 2$

und das Messvolumen orientieren sich am Öffnungswinkel des MAPS-Instruments und den Grenzen des Maschinenraums. Das Messvolumen ist damit kleiner als in der vorhergehenden Simulation, der Ablauf ist aber weitgehend gleich.



(a) Relative Messabweichung.



(b) Relative Messunsicherheit.

Abbildung 4.20: Vergleich der relativen Messabweichung und -Unsicherheit zwischen Simulation und Laborexperiment für Maskendesign #3.

Um eine direkte Vergleichbarkeit zwischen Labor und Simulation zu gewährleisten, wird die Simulation mit denselben Punktkoordinaten wie im Labor erneut durchgeführt.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.20 sowie in Tabelle A.4 dargestellt. Die gemessene relative Messunsicherheit im Laborexperiment ist erwartungsgemäß etwa eine Größenordnung höher als in der Simulation. Das ist vergleichbar mit der Simulation des Legacy-MAPS. Besonders ausgeprägt ist die Unsicherheit in z-Richtung, was ebenfalls den Erwartungen entspricht, da entlang der optischen Achse die größte Unsicherheit auftritt.

Die Differenz zur Simulation lässt sich durch nicht modellierte optische Effekte wie Reflexion, Brechung und Beugung erklären, ist jedoch

in erster Linie auf das deterministische Simulationsmodell zurückzuführen. Hinzu kommen allgemeine Einflussfaktoren im Labor sowie systematische Abweichungen.

Die relative Messabweichung variiert abhängig von der Raumachse um ein bis zwei Größenordnungen. Eine Abweichung von zwei Größenordnungen ist im Vergleich zu bisherigen MAPS-Simulationen ungewöhnlich. Dies ist vermutlich auf die erstmals eingesetzte Edelstahl-Aperturmaske sowie auf eine unzureichende Kalibrierung des MAPS-Systems zurückzuführen.

Die Rotationswinkel des Targets ergeben sich indirekt aus den Positions値en der drei Lichtquellen. Ihre Messunsicherheit überträgt sich daher unmittelbar auf die berechnete Orientierung. Wie erwartet weist der Rollwinkel (Rotation um die optische Achse) die höchste Genauigkeit auf, da eine laterale Positionsänderung von MAPS präziser gemessen werden kann. Die Unsicherheit der beiden anderen Rotationsachsen fällt entsprechend höher aus. Dieses Verhalten zeigt sich sowohl in der Simulation als auch im Experiment.

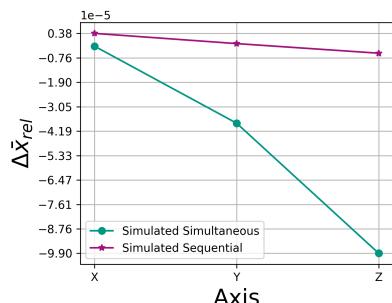
Das Laborexperiment bestätigt die Praxistauglichkeit der AAP-Maske im MAPS-Instrument. In Kombination mit der erweiterten Softwarearchitektur erlaubt MAPS erstmals die gleichzeitige Erfassung von drei Lichtquellenpositionen *in situ*. Damit ist eine 6DOF-Messung des TCPs in Bewegung möglich.

4.3.4 SEQUENZIELLE ABBILDUNGSSIMULATION

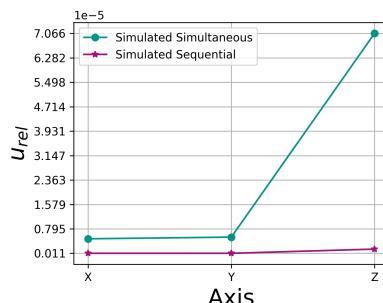
Im sequenziellen Modus entfällt die Notwendigkeit zur Separation durch Subtraktion, da die drei Maskenausschnitte jeweils einzeln vorliegen und sich die Spots somit nicht überlappen. Dadurch geht keine Information durch das Filtern verschmolzener Spots verloren.

Ein Maskendesign, das ein vergleichbares Ergebnis auch bei simultan aktiven Lichtquellen ermöglicht, kann als ideal angesehen werden. Der Vergleich mit dem sequenziellen Modus bietet daher einen wertvollen Einblick in das Potenzial der AAP-Methode, insbesondere für den Fall, dass ein alternativer Ansatz zur Separation entwickelt wird.

Wird die Simulation aus Abschnitt 4.3.2 im sequenziellen Modus wiederholt, lässt sich die Performance des Relationsalgorithmus gezielt isoliert bewerten, ohne die Einflüsse der Separation zu berücksichtigen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.21 sowie in Tabelle A.4 dargestellt.



(a) Relative Messabweichung.



(b) Relative Messunsicherheit.

Abbildung 4.21: Vergleich der relativen Messabweichung und -Unsicherheit zwischen simultaner und sequenzieller Simulation für das ausgewählte Maskendesign #3.

Der direkte Vergleich mit der simultanen Simulation zeigt, dass die relative Messunsicherheit im sequenziellen Modus um ein bis zwei Größenordnungen geringer ist. Auch hier ist die Unsicherheit in z-Richtung am größten, während die Präzision des Rollwinkels am höchsten ist. Diese Ergebnisse bestätigen, dass der Separationsalgo-

rithmus im Simultanmodus einen maßgeblichen Beitrag zur Messabweichung und Unsicherheit leistet.

Ein weiterer Faktor ist die im Simultanbetrieb reduzierte Anzahl verwertbarer Spots, da überlappende Spots von der Image-Pipeline gefiltert werden. Im sequenziellen Modus erreicht das AAP-Design eine Präzision, die der des periodischen Legacy-Designs entspricht.

Vor dem Hintergrund dieser Ergebnisse erscheint eine Überarbeitung des Separationsalgorithmus sinnvoll. Ob der Rückgang der Messqualität im Simultanmodus ausschließlich auf die verringerte Spotanzahl und den Separationsalgorithmus zurückzuführen ist, muss durch zukünftige Untersuchungen geklärt werden.

4.4 ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION

Die durchgeführten Simulationen und das begleitende Laborexperiment bestätigen die grundsätzliche Funktionsfähigkeit des MAPS mit arbiträrer Aperturmase. Der entwickelte Template-Matching-Algorithmus ist in der Lage, für das abgebildete Spotmuster den zugehörigen Maskenausschnitt zu bestimmen und damit die Relation zwischen detektierten Spots und Aperturen herzustellen. Damit entfällt die Notwendigkeit von Referenzmarkern, ein erheblicher Vorteil, insbesondere bei gleichzeitig eingeschalteten Lichtquellen, bei denen Marker aufgrund von Überschattung oft nicht erfasst werden.

In Kombination mit dem Separationsalgorithmus ermöglicht das AAP-Design somit die simultane Positionsbestimmung dreier parallel ein-

geschalteter LEDs und die anschließende Berechnung der 6DOF des Targets.

Die Zuordnung des Messwerts zur jeweiligen Lichtquelle erfolgt bislang geometriebasiert, anhand der Längenverhältnisse der LEDs zueinander (vgl. Abbildung 4.10). Dieses Verfahren ist jedoch nur zuverlässig, solange sich diese Verhältnisse durch die Rotation des Targets nicht verändern. Die möglichen Konsequenzen einer Verwechslung wurden bereits in Abschnitt 3.1.2 erläutert. Zwei Lösungsansätze werden im folgenden Kapitel vorgestellt.

Die erreichte Messpräzision ist für den angestrebten Einsatzzweck, die Korrektur von Robotersystemen, jedoch bisher nicht ausreichend. Hauptursachen hierfür sind die neuen mechanischen Komponenten, die mangelnde Software-Reife und eine unzureichende Kalibrierung des MAPS-Instruments.

Die Positionsgenauigkeit wird maßgeblich durch Toleranzen in der Maskenherstellung beeinflusst. Selbst kleine Abweichungen in der Position einzelner Aperturen können, insbesondere bei größeren Messdistanzen, zu erheblichen Messabweichungen führen. Die Edelstahlmaske ist aufgrund ihrer gewollten geringen Materialstärke sehr flexibel im Vergleich zur gläsernen Maske und unterliegt Formabweichungen durch Wölbung, Biegung oder Verdrehung, trotz Einspannung. Die gemessene Ebenheitsabweichung im eingespannten Zustand beträgt 0,7278 mm (siehe Anhang). Diese Kegelform führt zu axialen und lateralen Lagefehlern der Aperturen. Zur Korrektur kann die reale Form der Maske softwareseitig berücksichtigt werden, indem die nominale Punkteliste geometrisch auf die gemessene Form projiziert wird.

Die mittlere Positionsabweichung der Aperturen beträgt mit 65 μm etwa ein Fünftel des Aperturdurchmessers. Diese Abweichung wirkt

sich primär auf die Messunsicherheit aus, da keine systematische Abweichung der Koordinaten festgestellt werden konnte. Zum Vergleich: Die Positionsunsicherheit der lithografisch gefertigten Maske liegt bei lediglich $2\text{ }\mu\text{m}$. Um ein vergleichbares Genauigkeitsniveau zu erreichen, müssten die Koordinaten aller Aperturen der Edelstahlmaske vermessen und anschließend im Designfile entsprechend korrigiert werden. Alternativ könnte die Maske wieder im ursprünglichen lithografischen Verfahren und aus Glas gefertigt werden.

Ein weiterer Unsicherheitsfaktor liegt im fehlenden Feedback-Mechanismus zwischen Messaufnahmen und Softwareparametern. Während das Legacy-MAPS iterativ optimiert wurde, erfolgte die Parametrisierung der neuen Algorithmen bislang primär simulationsbasiert. Für eine Optimierung der Algorithmen ist jedoch eine Rückkopplung mit realen Daten erforderlich. Zudem könnten bisher manuell einzustellende Parameter künftig durch eine automatische Kalibrierroutine ersetzt werden.

Trotz des robusten Designs und der adaptiven Parametrisierung ist der Pairing-Algorithmus nicht immer in der Lage, die Spots den korrekten Aperturen zuzuordnen. Besonders bei hoher Spotdichte, kleinen Aperturabständen oder unvollständiger Separation kann es zu Fehlzuordnungen kommen. Solche fehlerhaften Paarungen führen zwangsläufig zu Ausreißern, da sie die Richtung des resultierenden Vektors und somit den rekonstruierten Schnittpunkt verfälschen.

Ein direkter Vergleich zwischen simultanem und sequenziellem Modus zeigt, dass das AAP-Design in diesem Betriebsmodus dieselbe Messqualität wie das periodische Design erreichen kann. Zwar lässt sich in diesem Modus die Orientierung nicht in Bewegung erfassen, doch ist die Positionsermittlung mit höherer Genauigkeit möglich. Für Handhabungsgeräte im Stillstand stellt der sequenzielle Mo-

dus daher eine valide Alternative dar. Denkbar wäre auch ein Maskendesign mit höherer Aperturdichte, das speziell für den 3DOF-Modus optimiert ist, parallel zu einer Version für simultane 6DOF-Messungen.

Die eingesetzten Algorithmen erfüllen grundsätzlich ihre Funktion, können aber hinsichtlich Genauigkeit und Rechenaufwand noch optimiert werden. Weiterhin existiert ein breites Spektrum alternativer Ansätze, die zukünftig gegenübergestellt werden können. Hierzu zählen auch Verfahren mit neuronalen Netzen.

Ein weiteres Potenzial ergibt sich aus der vielversprechenden Messqualität des sequenziellen Modus: Durch den Einsatz eines RGB-Sensors und farbcodierter Lichtquellen (RGB-Target) könnte die Separation der Lichtquellen über die Farbkanäle erfolgen. Damit wäre eine automatische Zuordnung von Spots zur Lichtquelle möglich, ohne dass sich die Muster überlagern und separiert werden müssten. Dies würde eine höhere Aperturdichte und damit eine verbesserte Präzision bei gleichzeitig geringerer Rechenkomplexität ermöglichen.

Das hier vorgestellte Verfahren zur gleichzeitigen Messung mehrerer Lichtquellen mittels arbiträrer Aperturmasken und digitaler Abbildungssimulation wurde in einer wissenschaftlichen Konferenzpublikation veröffentlicht [49]. Die dort gezeigten Ergebnisse basieren auf einem früheren Entwicklungsstand der Software und weichen daher in Teilen von den in dieser Arbeit präsentierten Resultaten ab.

Kapitel 5

KORRESPONDENZ ZWISCHEN LICHTQUELLE UND MESSWERT

5.1 EINLEITUNG

Die Korrespondenz bezeichnet die Zuordnung der Spots zu der Lichtquelle, die diese abgebildet hat. Bei einer eingeschalteten Lichtquelle ist die Verknüpfung eindeutig. Sind etwa drei Lichtquellen gleichzeitig eingeschaltet, existieren drei Einzelabbildungen, die den Lichtquellen korrekt zugeordnet werden müssen. Bei gleichfarbigen Lichtquellen kann die Korrespondenz über die Geometrie des Targets hergestellt werden, wenn z. B. die LEDs in unterschiedlichen Abständen zueinander angebracht sind. Sobald sich jedoch die Orientierung des Targets ändert, ändern sich auch die Längenverhältnisse aus der Sicht des Detektors und die Beziehung geht verloren.

In diesem Kapitel werden zwei Methoden zur Herleitung der Korrespondenz untersucht. Beide basieren auf der neu entwickelten arbiträren Aperturmaske. Die erste nutzt spektrale Codierung über unterschiedlich farbige Lichtquellen, die zweite geometrische Codierung durch Blenden direkt an der Lichtquelle. Beide Verfahren sollen in der Lage sein, die kombinierte Abbildung zu separieren und dabei die Eindeutigkeit zu bewahren, sodass die Lichtquellenpositionen berechnet werden können. Zusätzlich soll die Korrespondenz hergestellt werden, sodass eine fehlerfreie Berechnung der Orientierung gewährleistet ist.

5.2 KORRESPONDENZ DURCH SPEKTRALE CODIERUNG

Die spektrale Codierung nutzt Lichtquellen unterschiedlicher Farben, um die Identität der jeweiligen Quelle im kombinierten Bildmuster wiederherzustellen. Durch den Einsatz einer RGB-Kamera können die Muster durch die Farbkanäle getrennt werden, sodass jedem Kanal Spots einer bestimmten LED zugeordnet sind. Damit lässt sich die Korrespondenz zur Lichtquelle aus der spektralen Information ableiten.

5.2.1 PRINZIP UND MOTIVATION

Die spektrale Codierung ist eine naheliegende Lösung des Korrespondenzproblems. Durch das Austauschen der monochromen Hardware gegen eine Farbkamera und verschiedenfarbige LEDs kann die Korrespondenz vergleichsweise unkompliziert hergestellt werden.

Farbkameras basieren typischerweise auf dem sogenannten Bayer-Pattern, einem Farbfiltermosaik, das direkt über dem Bildsensor liegt. Jeder Pixel des Sensors ist mit einem Farbfilter (Rot, Grün oder Blau) versehen. Dadurch ist jeder Sensorpixel nur für eine bestimmte Wellenlänge (Farbe) empfindlich [57]. Etwa 50 % der Pixel sind für Grün empfindlich, je 25 % für Rot bzw. Blau (vgl. Abbildung 5.1).

Da jeder Pixel nur Informationen über eine Farbkomponente liefert, muss die vollständige Farbinformation durch Interpolation benachbarter Pixel rekonstruiert werden (Demosaicing) [58]. Das führt zu

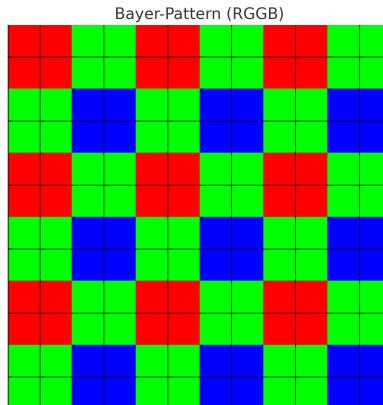


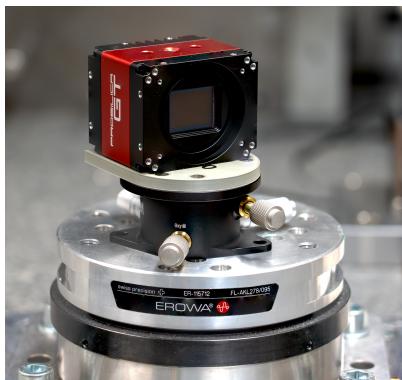
Abbildung 5.1: Visualisierung des typischen RGGB-Bayer-Patterns.

einer reduzierten Auflösung und potenziellen Farbfehlern im Vergleich zu einer monochromen Aufnahme mit identischer Sensorauflösung.

Monochromkameras hingegen haben keine Farbfilter und detektieren das einfallende Licht über das gesamte Spektrum. Das steigert die Lichtempfindlichkeit und sorgt für eine bessere räumliche Auflösung. Dadurch eignen sie sich grundsätzlich besser für Einsatzzwecke, bei denen eine subpixelgenaue Auswertung erforderlich ist, wie es beim MAPS der Fall ist.

5.2.2 IMPLEMENTIERUNG MIT RGB-KAMERA

Für die Umsetzung wird das MAPS um eine Allied Vision GT6400C erweitert, deren spektrale Quanteneffizienz die Auswahl geeigneter Lichtquellen bestimmt. Diese werden wie zuvor auf das PCB-Target gelötet, siehe Abbildung 5.2.



(a) RGB-Kamera; ausgebaut.



(b) RGB-Target im Betrieb.

Abbildung 5.2: RGB-Setup: Allied Vision GT6400C und RGB-Target.

Für die spektrale Codierung kommen drei Lichtquellen unterschiedlicher Wellenlängen zum Einsatz. Es handelt sich um hochintensive CREE-LEDs mit einer dominanten Wellenlänge (DWL) im roten, grünen und blauen Bereich. Die genauen optischen Parameter sind in Tabelle 5.1 aufgeführt.

Farbe	DWL [nm]	Binbreite [nm]	Halbstruwinkel [°]	Strahlungsleistung @ 700 mA
Royal Blue	457	2,5	130	1050 mW
HE Photo Red	660	5,0	130	730 mW
Grün	527	5,0	130	160 lm

Tabelle 5.1: Optische Hauptparameter der Cree XLamp® XQ-E LEDs.

Die Auswahl erfolgt im besten Fall unter Berücksichtigung der spektralen Empfindlichkeit der verwendeten Kamera sowie der maxima-

len spektralen Trennschärfe der Farbkanäle. Jedoch waren zu diesem Zeitpunkt keine Lichtquellen verfügbar, die beide Kriterien und die mechanisch notwendigen Eigenschaften erfüllten. Die beste Option wird nachfolgend untersucht.

Für ein besseres Verständnis sind in Abbildung 5.3 die DWL der Lichtquellen in das Quanteneffizienzdiagramm der Kamera eingezeichnet. Das Diagramm zeigt die Lichtempfindlichkeit der Kamera in Abhängigkeit von der Wellenlänge des Lichts. Hierbei fällt auf, dass der grüne Kanal etwa 10 % effizienter ist als der blaue und 5 % als der rote. Da die drei Lichtquellen ebenfalls unterschiedliche Lichtstärken aufweisen, werden diese über die LED-Treiber so gedimmt, dass die drei Farbkanäle gleichmäßig belichtet sind.

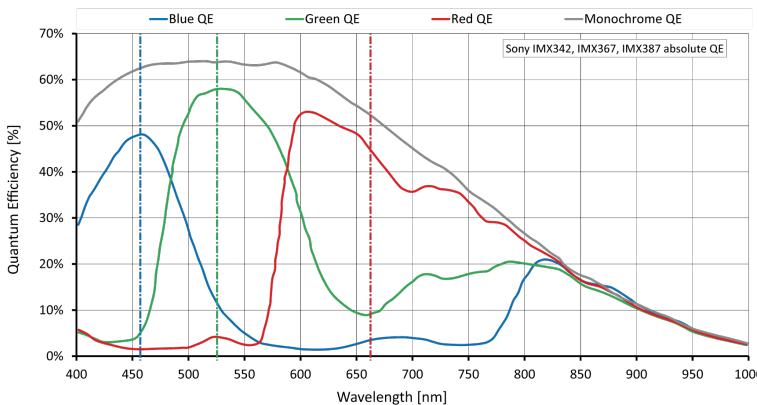


Abbildung 5.3: Quanteneffizienz der Prosilica GT6400 (Sony IMX342) [59].

Problematisch ist aber, dass eine Lichtquelle nicht nur von einem Kanal wahrgenommen wird, sondern auch in die anderen überspricht. Das sog. Kanalübersprechen (engl. channel crosstalk) bei RGB-Sensoren ist

physikalisch bedingt durch die Überlappung der spektralen Empfindlichkeitskurven der Farbfilter. Aus dem Diagramm geht hervor, dass die grüne LQ zu ca. 10 % in den blauen Kanal überspricht und die rote ebenfalls zu ca. 10 % in den grünen. Für eine genaue Quantifizierung wurden eigene Messungen durchgeführt, wobei ein deutliches Übersprechen im grünen und roten Kanal festgestellt werden kann. Dieser Effekt führt zu nicht vernachlässigbaren Problemen, die im Abschnitt 5.2.5 genauer beschrieben werden.

5.2.3 LINEARES ENTMISCHEN ZUR KORREKTUR VON KANALÜBERSPRECHEN

Eine effektive Methode zur Reduktion des Kanalübersprechens ist das sogenannte *lineare Entmischen*, das auch in der hyperspektralen Bildverarbeitung etabliert ist [60]. Die Methode basiert auf einem linearen Mischmodell, das beschreibt, wie die idealen Farbanteile durch das optische System in die drei RGB-Kanäle projiziert werden. Dieses Verhalten kann durch eine *Mischmatrix* $M \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ modelliert werden:

$$\begin{bmatrix} R_{\text{cam}} \\ G_{\text{cam}} \\ B_{\text{cam}} \end{bmatrix} = M \cdot \begin{bmatrix} R_{\text{ideal}} \\ G_{\text{ideal}} \\ B_{\text{ideal}} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Hierbei stellen $R_{\text{cam}}, G_{\text{cam}}, B_{\text{cam}}$ die im Sensor detektierten Farbkanalwerte dar, während $R_{\text{ideal}}, G_{\text{ideal}}, B_{\text{ideal}}$ die idealen, überschneidungsfreien Farbanteile der Szene bezeichnen. Die Matrix M wird empirisch bestimmt, indem drei Kalibrierbilder aufgenommen werden, bei denen jeweils nur eine LED gleichzeitig aktiviert ist. Aus diesen Bildern lassen sich durch Mittelwertbildung der RGB-Kanalantworten pro LED-Farbe die Spalten von M rekonstruieren.

Nach der Kalibrierung wird die Inverse der Mischmatrix M^{-1} berechnet und auf jedes nachfolgende RGB-Bild angewendet. Dies geschieht durch eine pixelweise Matrixmultiplikation, welche die entmischten Farbanteile ergibt:

$$\begin{bmatrix} R_{\text{unmixed}} \\ G_{\text{unmixed}} \\ B_{\text{unmixed}} \end{bmatrix} = M^{-1} \cdot \begin{bmatrix} R_{\text{cam}} \\ G_{\text{cam}} \\ B_{\text{cam}} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Um zu bewerten, wie effektiv das lineare Entmischen ist, werden die drei Kalibrierbilder betrachtet. Dafür werden die RGB-Werte extrahiert und als Balkendiagramm nebeneinander dargestellt. Abbildung 5.4 zeigt die mittleren Kanalintensitäten und den Crosstalk für die drei Einzelbilder, vor und nach dem Entmischen.

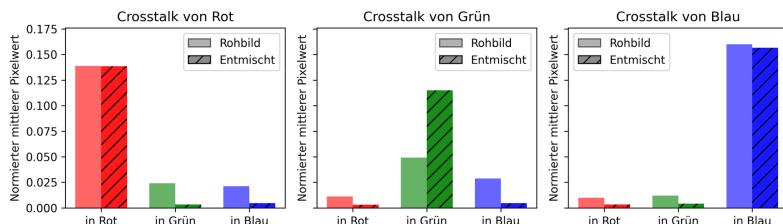


Abbildung 5.4: Einfluss des Entmischens auf das Kanalübersprechen. Verglichen werden die mittleren Kanalintensitäten der drei Einzelbilder mit jeweils einer aktivierten LED (Rot, Grün, Blau).

Jeder Graph zeigt ein Kalibrierbild; die Balken repräsentieren die mittlere Intensität der drei Kanäle. Das Kanalübersprechen ist daran zu erkennen, dass auch in den jeweils inaktiven Farbkanälen der Intensitätswert nicht null ist. Es kann abgelesen werden, dass der Crosstalk im Rohbild der blauen LED verhältnismäßig gering ist. Ebenso ist der

Crosstalk von Grün in Blau relativ hoch. Das Übersprechen von Rot in Grün und Blau ist ungefähr gleich und verhältnismäßig gering. Dies entspricht den Erwartungen, ausgehend vom Quanteneffizienzdiagramm.

Um zu verstehen, wie sich das Übersprechen auf das RGB-Bild auswirkt, muss das Verhältnis der drei gleichfarbigen Balken betrachtet werden. Dies entspricht dem Signal-Rausch-Verhältnis. Im blauen Kanal des RGB-Bildes muss mit einem starken Crosstalk aus der grünen und roten LED gerechnet werden. Das bedeutet, dass vermutlich ein zweites oder sogar drittes Spotmuster sichtbar sein wird. Auf der anderen Seite übersprechen weder Grün noch Blau signifikant in Rot, womit dieser Kanal störungsfrei sein sollte. Im grünen Kanal kann mit einer Störung der roten LED gerechnet werden. Diese wird deutlich sichtbar sein, da deren Intensität im Verhältnis 2:1 steht.

Durch das lineare Entmischen kann der Crosstalk signifikant reduziert werden, wodurch die einzelnen Kanäle des RGB-Bildes beinahe störungsfrei sein sollten. Eventuell kann Crosstalk in Form von Rauschen wahrgenommen werden, welches jedoch ohnehin von den Filtern der Image-Pipeline bereinigt wird.

5.2.4 KONTURFILTER

Neben dem linearen Entmischen wurde ein weiteres Verfahren untersucht. Es entfernt das Übersprechen anhand der lateralen Koordinaten der Spots. Die Sensorabbildung wird digital als ein Stack von drei Matrizen (entsprechend den Farbkanälen) betrachtet. Dabei liegt jeder Farbkanal als separate Matrix vor. Jede dieser Matrizen hat die Dimension des Sensors und speichert in jeder Zelle den Digitalwert des entsprechenden Sensorpixels. Wird für jeden Spot in jedem Farbkanal der Perimeter bestimmt, kann anhand der lateralen Koordinaten

überprüft werden, ob sich Spots kanalübergreifend überlappen. Ist dies der Fall, werden überlappende Spots entfernt.

Dieses Verfahren ist in Abbildung 5.5 veranschaulicht. Die Grafik zeigt die drei übereinanderliegenden Farbkanäle. Einige Spots sind exemplarisch in Vollfarbe eingezeichnet. Das Kanalübersprechen wird durch transparente Spots angedeutet; an den Stellen, an denen sich Spots überlappen, ist ein hellgrauer Balken eingezeichnet.

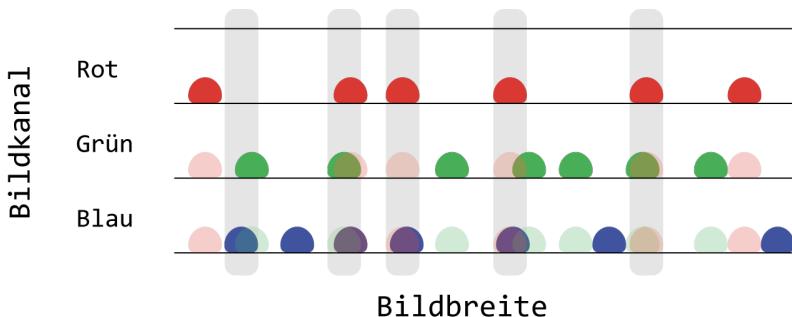


Abbildung 5.5: Konturfilter: Verfahren zum Entfernen von überlappenden Spots durch Kanalübersprechen.

Diese Methode führt zu Informationsverlust. Im Durchschnitt wird ein Viertel der Spots pro Kanal entfernt. Dieser Filter bietet jedoch den Vorteil, dass er unter veränderlichen Lichtbedingungen und ohne vorherige Kalibrierung funktioniert. Er stellt somit eine praktische Alternative zum linearen Entmischen dar. Aufgrund der beschriebenen Limitationen wird dieses Verfahren nicht weiter untersucht.

5.2.5 AUSWERTUNG UND BEWERTUNG

Ob die spektrale Codierung geeignet ist, um die Korrespondenz und die Eindeutigkeit zu gewährleisten, wird anhand eines Laborexperiments bewertet. Es wird untersucht, wie gut sich die drei Einzelabbildungen voneinander separieren lassen und ob die Abbildungen nach dem linearen Entmischen noch auswertbar sind.

Die Methode wird zuerst anhand der Legacy-Aperturmaske getestet. Unter unveränderten MAPS-Parametern wurde ein Bild aufgenommen und in die drei einzelnen Kanäle unterteilt. Das RGB-Bild und die drei Einzelabbildungen sind in Abbildung 5.6(a) zu sehen.

Wie erwartet ist im grünen Kanal deutlicher Crosstalk von mindestens einer weiteren LED vorhanden. Ein zweiter Satz von Spots ist im gesamten Bild sichtbar und überschattet sogar den Codierungsgeber. Im blauen Kanal ist ebenfalls Crosstalk von beiden anderen Lichtquellen zu erkennen. Die Muster überlappen teilweise, wodurch sich die Form der Spots ändert. Die Intensität des dritten Musters ist so schwach, dass die Spots kaum sichtbar sind, außer bei genauerer Betrachtung des Markers. Im roten Kanal kann kein Übersprechen festgestellt werden. Die Ergebnisse des Laborexperiments spiegeln somit die zuvor getroffenen Annahmen wider, und das Kanalübersprechen deckt sich mit dem Diagramm 5.4 der Voruntersuchung.

In der rechten Spalte von Abbildung 5.6(b) ist die entmischte RGB-Aufnahme abgebildet. Auch diese wird wieder in die drei Einzelkanäle zerlegt, die darunter dargestellt sind. Wie bereits vermutet, ist dank des Entmischens der Crosstalk nicht mehr messbar. Allerdings sind die Marker im roten und grünen Kanal nur schlecht zu erkennen und teilweise fehlerhaft abgebildet. Sie sind damit nicht decodierbar und

die Abbildung ist nicht eindeutig. Dieser Effekt würde bei zunehmender Messdistanz aufgrund von Beugung noch verstärkt werden. Im blauen Kanal sind die Marker scharf abgebildet und können decodiert werden. Das ist zu erwarten, da die Lochkameraparameter von MAPS auf die Wellenlänge der blauen LED abgestimmt sind. Ein relevanter Einfluss des Demosaicings auf die Abbildungsschärfe kann hier nicht festgestellt werden.

Das lineare Entmischen liefert insbesondere dann zuverlässige Ergebnisse, wenn das Intensitätsverhältnis der Lichtquellen während der Messreihe gleich bleibt. In solchen Fällen ist die Anwendung der inversen Mischmatrix auf alle Bilder der Messreihe gültig, und eine einmalige Kalibrierung ist ausreichend. Wenn sich die Messbedingungen ändern, sollte die Mischmatrix durch wiederholte Kalibrierung angepasst werden.

Um die Eindeutigkeit der Abbildung zu gewährleisten, müssen die Marker decodierbar sein. Dafür können etwa die Lochkameraparameter, z. B. der Mittelwert der drei Wellenlängen, abgestimmt werden. Es ist allerdings unrealistisch, dass dabei in einem breiten Messvolumen scharfe Aufnahmen erzielt werden können. Diese Option ist zukünftigen Arbeiten vorbehalten. Besser ist der Einsatz der zuvor entwickelten AAP-Maske. Sie ist zwar auch für die Wellenlänge von 457 nm abgestimmt, allerdings beinhaltet sie keine Codierungsmarker, und alle Aperturen haben denselben Durchmesser.

Der Vorteil des RGB-Setups im Vergleich zum monochromen ist, dass sich die überlappenden Spotmuster der einzelnen LEDs über die Farbkanäle trennen lassen. Dadurch kann ein Maskendesign mit deutlich höherer Aperturdichte eingesetzt werden. In den folgenden Experimenten wird die APM mit einem Mindestaperturabstand von 0,5 mm eingesetzt. Dadurch werden durchschnittlich 550 Spots pro Kanal abgebildet. Abbildung 5.7 zeigt den Vergleich eines RGB-Bildes mit

AAP-Maske und dessen Einzelkanäle vor (links) und nach (rechts) Anwendung der linearen Entmischung.

Auch für Aufnahmen mit der AAP-Maske lässt sich das lineare Entmischen erfolgreich einsetzen. Die Notwendigkeit beruht nicht auf der Eindeutigkeit. Der TMA funktioniert auch, wenn ein zweites Spotmuster im Bild sichtbar ist, wie im grünen und blauen Kanal in Abbildung 5.7(a). In der Heatmap finden sich dann zwei statt eines Hotspots, wobei der korrekte anhand der höheren Intensität identifiziert werden kann. Dasselbe Prinzip wird bei der monochromen AAP-Methode eingesetzt.

Das Entmischen ist hierbei hauptsächlich notwendig, da durch das Übersprechen von Spots unterschiedlicher Lichtquellen teilweise Überlappungen entstehen und zu einem Segment verschmelzen. Das führt zu einem fehlerhaften Schwerpunkt. Dieser Effekt wurde zwar bereits im Abschnitt 4.2.1 untersucht und mithilfe eines Filters gelöst; das Problem der Methode ist jedoch der Informationsverlust.

Abschließend wird untersucht, wie das lineare Entmischen das Spotbild beeinflusst. Hierfür werden alle Spots eines Kanals gemittelt. In Abbildung 5.8 ist der Querschnitt des Spotbilds (Intensitätsverteilung) dargestellt. Die gestrichelte Kurve ist vor dem linearen Entmischen, die durchgezogene danach.

Durch das lineare Entmischen wird der Intensitätsverlauf steiler und die Amplitude höher. Darauf ließ Abbildung 5.4 bereits schließen. Es hat jedoch keine Auswirkung auf die Breite oder die grundlegende Form. Letzteres ähnelt dem erwarteten Beugungsmuster im Übergangsbereich (vgl. 2.3). Die Intensitätsverteilung weist auch keine Schiefe auf und zeigt nur einen Extremwert. Aufgrund dessen gibt

es keine Anzeichen dafür, dass Spots verschmelzen und das Kanalübersprechen nicht korrekt gefiltert wurde. Für die Berechnung des Spotmittelpunkts nach bisherigen Verfahren ist ein glockenförmiger Intensitätsverlauf mit einem zentralen Maximum notwendig, so wie er hier zu sehen ist.

Der Spottdurchmesser beträgt ca. 50 Pixel (in allen Kanälen) und ist damit ähnlich groß wie der des Legacy-MAPS (nach Umrechnung in mm). Das Maximum der Kanäle variiert, weil die Strahlungsleistung der LEDs nicht optimal eingestellt ist. Diese kann jedoch mit den richtigen LED-Treibern angepasst werden.

Aufgrund des Bayer-Farbfilters wird bei der Bildaufnahme nur ein Farbkanal pro Pixel detektiert. Die fehlenden Farbwerte werden im Zuge des Demosaicing-Verfahrens interpoliert, was insbesondere bei kleinen, intensitätsstarken Lichtspots zu Verzerrungen im Intensitätsverlauf führen kann. Diese Effekte können das Spotbild stören und Lageabweichungen des zentralen Intensitätsmaximums im Subpixelbereich verursachen. Für MAPS, das auf eine hochpräzise Detektion der Spotmittelpunkte angewiesen ist, stellt dies eine Herausforderung dar. Bisher wurde der Effekt des Demosaicings nicht untersucht, und der Einfluss ist unbekannt. Es wird empfohlen, zukünftig eine Untersuchung des Demosaicings auf die Lage des Spotmittelpunkts durchzuführen.

Der Informationsverlust der monochromen AAP-Methode wird durch die spektrale Codierung hinfällig. Es kann sogar eine Steigerung der Spottdichte von ca. 144 auf 550 Spots pro Lichtquelle erzielt werden. Die Korrespondenz ist eindeutig über die Wellenlänge gegeben, und die Berechnung der 6DOF funktioniert in Bewegung.

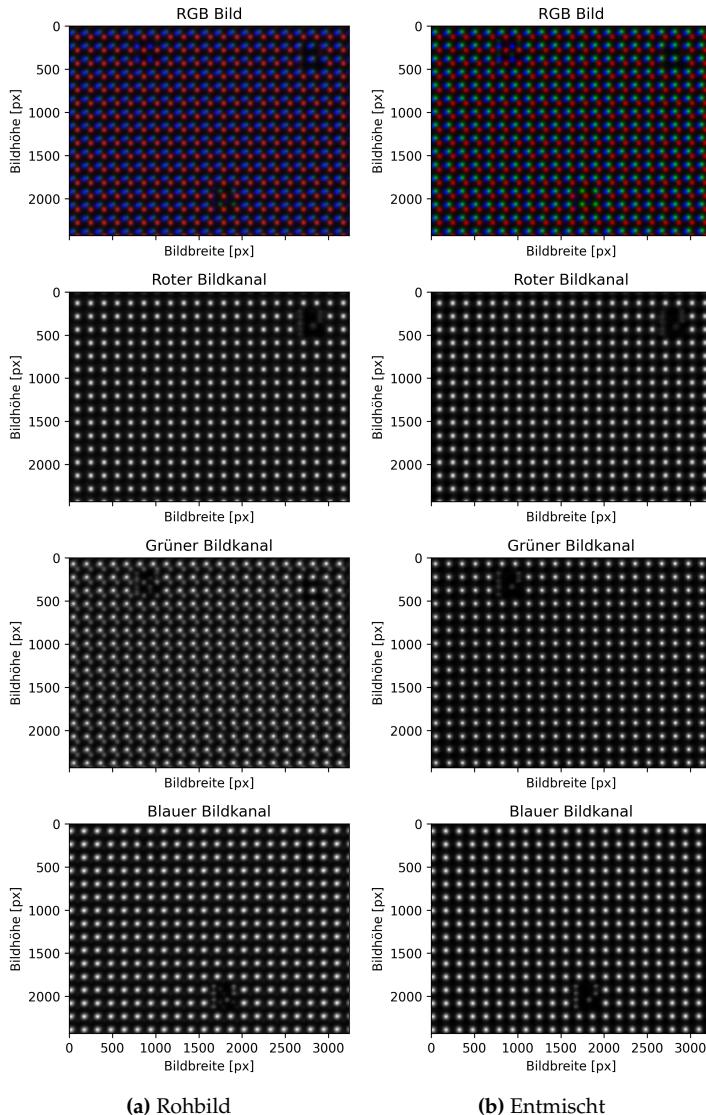


Abbildung 5.6: Vergleich eines RGB-Bildes und dessen Einzelkanäle vor (links) und nach (rechts) dem linearen Entmischen (gezeigt ist jeweils nur ein Bildausschnitt).

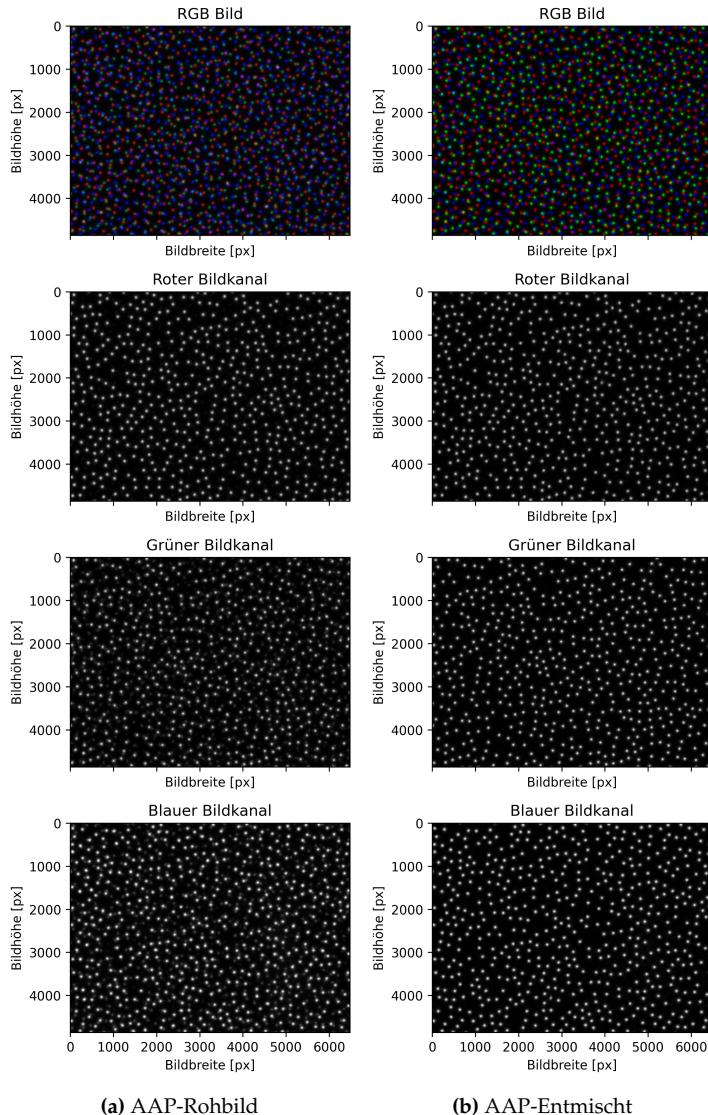


Abbildung 5.7: Vergleich zwischen RGB-Rohbild (links) und dem linear entmischten (rechts) sowie deren Einzelkanälen unter Einsatz der AAP-Maske.

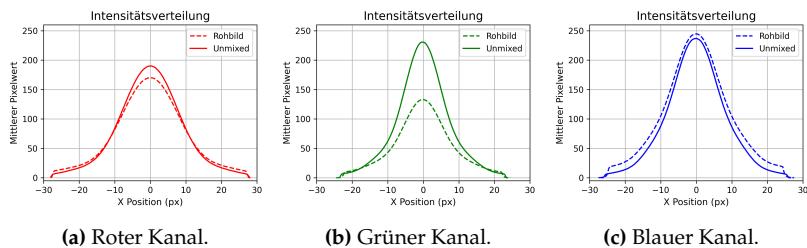


Abbildung 5.8: Vergleich der Spot-Intensitätsverteilung der einzelnen Bildkanäle vor (gestrichelt) und nach (durchgezogen) dem linearen Entmischen.

5.3 KORRESPONDENZ DURCH GEOMETRISCHE CODIERUNG

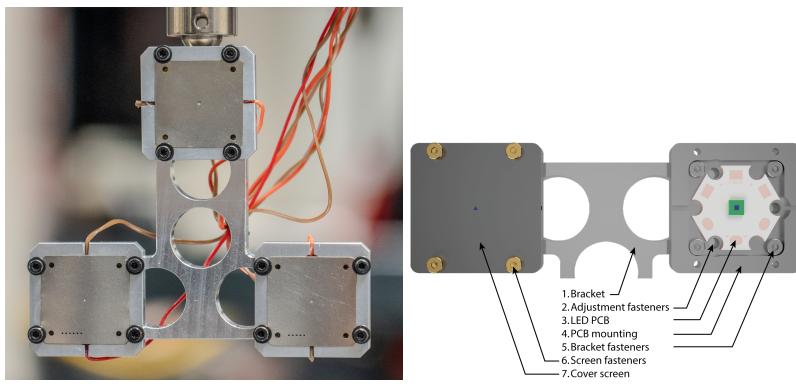
Die geometrische Codierung nutzt Blenden mit sich unterscheidenden Formen an der Lichtquelle, um charakteristische Spotbilder zu erzeugen. Unterschiedliche Blendengeometrien (z. B. Dreieck, Viereck, Kreis) führen zur Übertragung der Form ins Spotbild. Diese Spotformen lassen sich algorithmisch unterscheiden und erlauben so die Zuordnung jedes Spots zur korrespondierenden Lichtquelle, unabhängig von deren Farbe. Dieses Verfahren wurde in *Solution to preserve correspondence of measurement and light source using multiple simultaneously with MAPS* publiziert [61].

Im Gegensatz zur spektralen Codierung setzt dieser Ansatz auf Unterschiede in der Abbildungsgeometrie. Durch gezielte Modifikation der Lichtquelle selbst entstehen auf dem Sensor differenzierbare Spotformen. Somit kann ein monochromes Setup verwendet werden. Dies spart Kosten, und die MAPS-Parameter können für eine Wellenlänge optimiert werden.

5.3.1 DESIGN DER LED-BLENDE

Die LED-Blenden bestehen aus 0,25 mm starkem Edelstahlblech, das mittig eine gelaserte Aussparung mit unterschiedlicher Geometrie aufweist. Unter den verschiedenen untersuchten Geometrien erwiesen sich das gleichschenklige Dreieck, der Kreis sowie das Rechteck (Seitenverhältnis 1 : 2) als besonders robust. Die Kantenlängen des Rechtecks betragen dabei 1 mm und 0,5 mm, die des Dreiecks 1 mm. Der Durchmesser der Kreisblende beträgt ebenfalls 1 mm.

Für die Montage der Blenden an den LEDs wurde ein neues Target entwickelt. Es besteht aus einer Aluminium-Grundkonstruktion, auf der drei LED-Halterungen befestigt sind. In diese Halterungen wird jeweils eine sternförmige LED-Platine mithilfe eines thermisch leitfähigen Klebers eingeklebt. Die kleine blaue Fläche kennzeichnet dabei die Leuchtfäche. Zur Fixierung während der Aushärtung des Klebers dienen drei Schrauben. Anschließend wird die LED-Blende direkt darüber platziert und mittels vier Zylinderkopfschrauben geklemmt. Dadurch lässt sich die Position der Blende einfach und präzise arretieren. Das Target ist links in Abbildung 5.9 dargestellt, rechts zeigt ein gerendertes Bild die einzelnen Bauteile.



(a) LED-Target für die Formcodierung. **(b)** Darstellung der Target-Komponenten.

Abbildung 5.9: Foto des LED-Targets für die Formcodierung links und gerenderte Darstellung der Komponenten rechts.

5.3.2 ABBILDUNGSKRITERIEN FÜR DIE FORMCODIERUNG

Damit die abgebildeten Geometrien voneinander unterschieden werden können, müssen diese mit ausreichender Schärfe abgebildet werden. Die Lichtquelle darf eine gewisse Grenzdistanz zum Detektor g_{\max} nicht überschreiten; ansonsten überlagern sich geometrische Unschärfe und Beugung. Die ursprünglich scharfen Kanten werden zunehmend geglättet, die Intensitätsverteilung nähert sich einer rotationssymmetrischen Glocke, und die Forminformation geht verloren. Um dies zu verhindern, müssen drei Bedingungen erfüllt sein:

1. Geometrisches Kriterium

Die projizierte Formbreite auf dem Sensor

$$s_{\text{img}} = m \cdot s_{\text{obj}} = \frac{b}{g} s_{\text{obj}} \quad (5.3)$$

muss größer sein als der Durchmesser des Unschärfekreis (Zerstreuungskreis) S

$$s_{\text{img}} \geq S \quad (5.4)$$

damit die Kontur der Formblende im Sensorbild überhaupt sichtbar ist. Nach der strahlenoptischen Betrachtung nimmt die Größe des Zerstreuungskreis linear mit der Blendengröße ab. Aus dem Strahlensatz ergibt sich mit der Bildweite für den Zerstreuungskreisdurchmesser S [5]

$$S = D_A \cdot \frac{g + b}{g} \quad (5.5)$$

Dieser ist reziprok proportional zur Gegenstandweite, konvergiert aber für $g \gg b$ zum Durchmesser der Apertur D_A :

$$S \approx D_A \quad (5.6)$$

Durch Einsetzen von (5.3) und (5.6) in (5.4) ergibt sich die maximal erlaubte Distanz der Lichtquelle

$$g_{\max} \lesssim \frac{b s_{\text{obj}}}{D_A} \quad (5.7)$$

2. Beugungskriterium

Die Kanten dürfen durch Beugung an den Aperturen von der zentralen Airy-Scheibe nicht *überstrahlt* werden. Mit dem Airy-Radius $r_{\text{Airy}} = 1.22 \lambda b / D_A$ [11] ergibt sich

$$s_{\text{img}} \gtrsim 2 r_{\text{Airy}}, \quad (5.8)$$

was nach Einsetzen von (5.3) in (5.8)

$$g_{\max} \lesssim \frac{D_A s_{\text{obj}}}{2.44 \lambda} \quad (5.9)$$

ergibt.

3. Auflösungskriterium

Laut Literatur benötigen Softwarealgorithmen zur Formerkennung in der Regel eine minimale Objektgröße zwischen $50 \times 50 \text{ px}$ [62]

und 128×128 px [63]. Um die erforderliche Pixelanzahl pro Spotbild im MAPS-Fall zu bestimmen, wurde empirisch eine Kameraaufnahme schrittweise durch Downsampling reduziert. Dabei zeigte sich, dass bereits bei einer Kantenlänge von etwa $n_{px} \approx 16$ Pixeln (bei $5,5\mu\text{m}$ Pixelpitch) eine stabile Formerkennung gewährleistet ist.

Das praktische Auflösungskriterium für den Form-Klassifizierer lautet somit

$$s_{img} \gtrsim p \cdot n_{px,min}, \quad n_{px,min} \approx 16,$$

wobei p der Pixelpitch des Sensors ist. Bei Sensoren mit kleinem Pixelpitch sind entsprechend mehr Pixel notwendig. Durch Einsetzen von (5.3) ergibt sich für die maximale Objektweite

$$g_{max} \lesssim \frac{b s_{obj}}{p \cdot n_{px,min}}. \quad (5.10)$$

EMPFOHLENE OBJEKTWEITE

Aus der Kombination der drei Kriterien ergibt sich die maximal empfohlene Objektweite

$$g_{max} \lesssim \min \left\{ \frac{b s_{obj}}{D_A}, \frac{D_A s_{obj}}{2.44 \lambda}, \frac{b s_{obj}}{p \cdot n_{px,min}} \right\}. \quad (5.11)$$

Daraus folgt, dass MAPS bei Verwendung der Formcodierung ausschließlich innerhalb dieser Grenze zuverlässig messen kann.

ABHÄNGIGKEIT VON b UND D_A

Die Gleichungen zeigen zwei gegenläufige Effekte:

- *Wird der Aperturdurchmesser D_A vergrößert*, verbessert sich das Beugungskriterium ($\propto D_A$), während das geometrische Kriterium verschärft wird.
- *wird die Bildweite b vergrößert*, wächst s_{img} linear ($\propto b$); Formdetails bleiben daher auch bei größerem g sichtbar. Zugleich vergrößert sich aber der Airy-Radius ($r_{\text{Airy}} \propto b$) und schränkt g gemäß (5.9) wieder ein.

BEUGUNGSSINTEGRAL

Bei einer Lochkamera mit festem Aperturradius und konstanter Wellenlänge ist die Fresnel-Zahl allein vom Abstand b zwischen Apertur und Bildebene abhängig und skaliert daher invers proportional zu b . Im Legacy-Setup ($b \approx 55.6$ mm) gilt $F \approx 1$; die Beugung liegt damit im *Übergangsbereich*: Das Intensitätsprofil enthält noch feine Fresnel-Ringe, während das Hauptmaximum bereits der Airy-Scheibe ähnelt.

Vergrößert man b (z. B. auf 300 mm), ohne D_A oder λ zu ändern, so erhält man $F \propto 1/b \Rightarrow F \approx 0.16 \ll 1$. Die Bildebene rückt damit in das *Fraunhofer-Regime* (Fernfeld). Hier dominiert reine Fraunhofer-Beugung: Kleinskalige Fresnel-Strukturen verschwinden, und die Punktantwort wird zu einer nahezu idealen Airy-Scheibe, deren Hauptmaximum r_{Airy} linear mit b wächst [64].

Praktisch bedeutet dies, dass bei großen Bildweiten die konturgetreue Abbildung der LED-Form zwar aufgrund des höheren Abbildungs-

maßstabes verbessert wird, ihr Kantentransfer jedoch durch die Beugungsunschärfe limitiert ist.

PRAKTISCHE ARBEITSBEREICHE

Die maximale Messdistanz wird nach Formel (5.11) für unterschiedliche LK-Parameter berechnet; die Ergebnisse sind in Tabelle 5.2 dargestellt. Für das Legacy-MAPS mit AAP-Maske ($b \approx 55,6$ mm, $D_A = 0,3$ mm) liegt der robuste Messbereich unterhalb von 200 mm. In diesem Bereich dominiert die geometrische Unschärfe, welche bei größerem Aperturdurchmesser noch verstärkt wird. Erhöht man die Bildweite b auf den Labor-Maximalwert von 300 mm, so können die Formen bis zu einer Distanz von ebenfalls knapp 300 mm aufgelöst werden, bevor Beugungseffekte überwiegen. Ein größerer Aperturdurchmesser verschiebt diese Grenze zugunsten der Beugung, allerdings nur bis zu einem Punkt, ab dem erneut die geometrische Unschärfe vorherrscht. Daraus wird ersichtlich, dass die maximale Messdistanz durch Erhöhung der Bildweite und des Aperturdurchmessers erweitert werden kann.

Die in der Tabelle angegebenen Werte für g_{\max} beziehen sich auf Objektgrößen von einem und einem halben Millimeter. Da in der Praxis Geometrien mit einer Kantenlänge von 0,5 mm–1 mm aufgelöst werden sollen, ist es sinnvoll, das Kriterium für $s_{\text{obj}} = 1,0$ mm und $s_{\text{obj}} = 0,5$ mm zu berechnen. Streng genommen muss der geometrische Unterschied zwischen der Form und der Punktabbildung betrachtet werden, genauer gesagt die Differenz der Kantenlängen.

Tabelle 5.2: Maximal zulässige Objektweiten g_{\max} für $s_{\text{obj}} = 1,0 \text{ mm}$ (Vorderwert) und $s_{\text{obj}} = 0,5 \text{ mm}$ (Wert in Klammern). Wellenlänge $\lambda = 457 \text{ nm}$.

b [mm]	D_A [mm]	Geometrisch [mm]	Beugung [mm]	Auflösung [mm]
55,64	0,3	185 (93)	269 (135)	632 (316)
55,64	0,6	93 (46)	538 (269)	632 (316)
55,64	0,9	62 (31)	808 (404)	632 (316)
300	0,3	1000 (500)	269 (135)	3409 (1700)
300	0,6	500 (250)	538 (269)	3409 (1700)
300	0,9	333 (167)	808 (404)	3409 (1700)

5.3.3 AUSWERTUNG UND BEWERTUNG

Unter Berücksichtigung der in Tabelle 5.2 aufgelisteten Parameter werden im Labor Messungen bei den jeweiligen Grenzdistanzen g_{\max} durchgeführt. Diese Messungen erfolgen sowohl für die Grenzdistanzen der Objektgröße 0,5 mm als auch 1 mm. Eingesetzt wird hierfür die monochrome Kamera (GT3300) des Legacy-Setups in Kombination mit der AAP-Maske ($\delta_A = 1,5 \text{ mm}$). Die Aufnahmen durchlaufen die Image-Pipeline und anschließend die Formerkennung. Die resultierenden Kameraaufnahmen sind in Abbildung 5.10 dargestellt.

Da ein Aperturdurchmesser von 0,9 mm keine Verbesserung der maximalen Objektdistanz bewirkt, werden mit diesem Design keine Versuche durchgeführt. Gleiches gilt für die Parameterkombination der zweiten Tabellenzeile; hinzu kommt hier, dass der minimal realisierbare Abstand etwa 60 mm beträgt.

Die erste Reihe der Abbildung 5.10 zeigt Aufnahmen unter Standardeinstellungen. Aufgrund des geringen Abbildungsverhältnisses bei

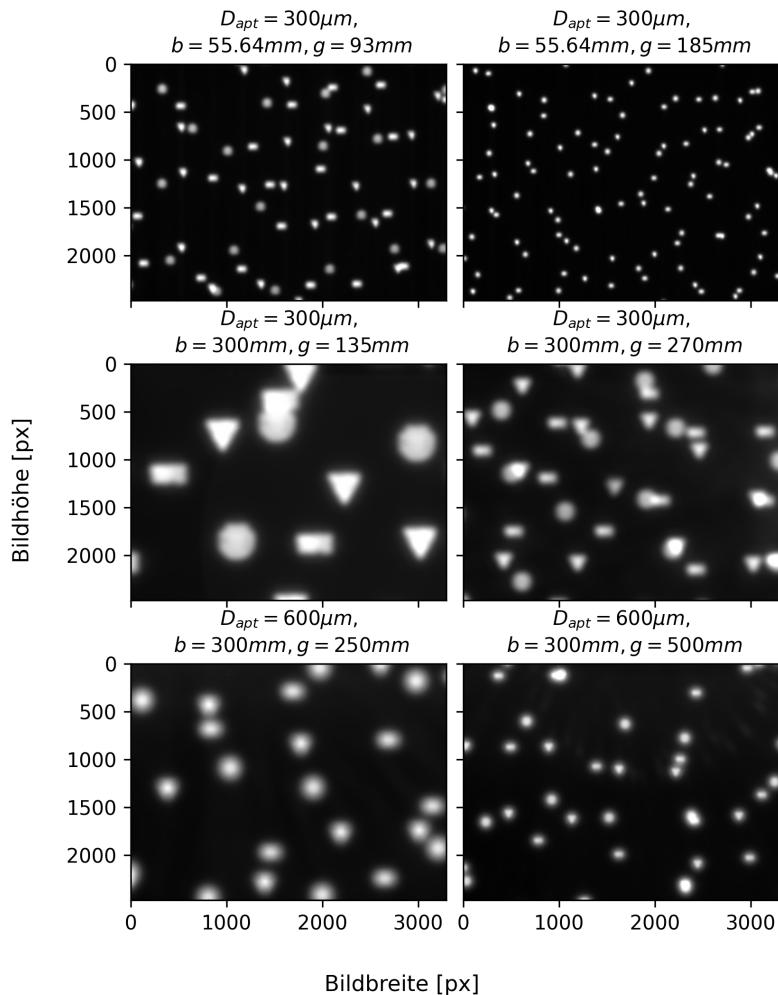


Abbildung 5.10: Kameraaufnahmen bei maximalen Objektweiten g_{\max} und unterschiedlichen LK-Parametern.

diesen Lochkameraparametern werden die Formen entsprechend klein abgebildet. Bei einer Distanz von $g = 93$ mm ist die Bildschärfe ausreichend, um eine algorithmische Unterscheidung der Formen zu ermöglichen. Hingegen tritt bei $g = 185$ mm eine ausgeprägte Penumbra auf, wodurch insbesondere die Kanten und Ecken von Dreieck und Rechteck stark verrundet erscheinen. In diesem Zustand ist eine korrekte Identifikation der Formen nicht mehr möglich.

In der zweiten Reihe ist die maximale Bildweite $b = 300$ mm eingestellt. Für das strengere Limit von $g = 135$ mm werden die Formen deutlich abgebildet. Aufgrund des großen Abbildungsverhältnisses erscheinen diese allerdings sehr groß auf dem Sensor. Dies hat den Nachteil, dass teilweise zu wenige Spots abgebildet werden und eine Positionsberechnung unmöglich ist. Wird der Abstand der Lichtquelle auf das weniger strenge Limit von $g = 269$ mm vergrößert, bleiben die Formen mit ausreichender Schärfe erkennbar. Die Spotgröße halbiert sich dabei in etwa, sodass ungefähr viermal so viele Spots abgebildet werden. Jedoch kommt es hierbei sichtbar zu Überlappungen einzelner Spots.

Die letzten beiden Aufnahmen wurden mit verdoppeltem Aperturdurchmesser von 0,6 mm bei maximaler Bildweite aufgenommen. Diese Einstellung verdoppelt theoretisch die maximale Objektweite. Beim konservativen Limit von $g = 250$ mm ist die geometrische Unschärfe jedoch so stark, dass die Formen nicht mehr erkennbar sind. Wird die Distanz der Lichtquelle weiter erhöht, wie in diesem Fall auf $g = 500$ mm, wird die projizierte LED-Form so klein, dass sie vollständig im Zerstreuungskreis verschwindet und wieder rund erscheint. Auch im Bereich $250 \text{ mm} < g < 500 \text{ mm}$ sind die abgebildeten Formen nicht zuverlässig auswertbar. Unter diesen Parametern kann daher kein sinnvoller Einsatzbereich definiert werden.

Das Experiment bestätigt die konservativ berechneten Grenzen. Insbe-

sondere das geometrische Kriterium lässt nur wenig Spielraum zu, da die geometrische Unschärfe bereits bei der berechneten Grenzdistanz dominierend ist. Im Vergleich dazu ist die Beugungsunschärfe im zweiten Versuch bei der weniger strengen Grenzdistanz von $g = 270$ mm schwächer ausgeprägt.

Es bestätigt sich außerdem, dass die maximale Messdistanz durch eine Erhöhung der Bildweite erweitert werden kann. Dieses Abbildungsverhältnis bei $b = 300$ mm führt jedoch insbesondere im Nahbereich zu einer starken Vergrößerung der Abbildung. Daher sollte stets auch die Mindestmessdistanz berücksichtigt und berechnet werden. Eine Vergrößerung des Aperturdurchmessers führt hingegen zu keiner praktischen Erweiterung der Messdistanz.

Die beste Formabbildung wird mit den Parametern $b = 55,64$ mm und $D_A = 0,3$ mm bei $g_{\max} \leq 185$ mm erzielt. Da nur sehr wenige Spots überlappen, kann ein Maskendesign mit höherer Aperturdichte eingesetzt werden. Abbildung 5.11 zeigt eine Kameraaufnahme mit den optimierten Parametern bei einer Distanz von 130 mm.

Dabei werden ca. 40–50 Spots pro Lichtquelle abgebildet. Das ist vergleichbar mit dem Standard AAP-Verfahren und bildet damit etwa achtmal weniger Spots pro Lichtquelle ab als die spektrale Codierung auf derselben Sensorfläche.

Die Schärfe der Abbildung hängt von den LK-Parametern ab, die im Standard-MAPS-Setup auf die eingesetzte Lichtquelle und den vorgesehenen Messbereich optimiert sind. Da der Aperturdurchmesser von der Bildweite abhängt, muss bei einer beliebigen Änderung von b zu b_{bel} auch der Aperturdurchmesser D_A entsprechend zu $D_{A_{\text{bel}}}$ angepasst werden ($b \propto D_A$), um eine maximal scharfe Abbildung zu erzielen.

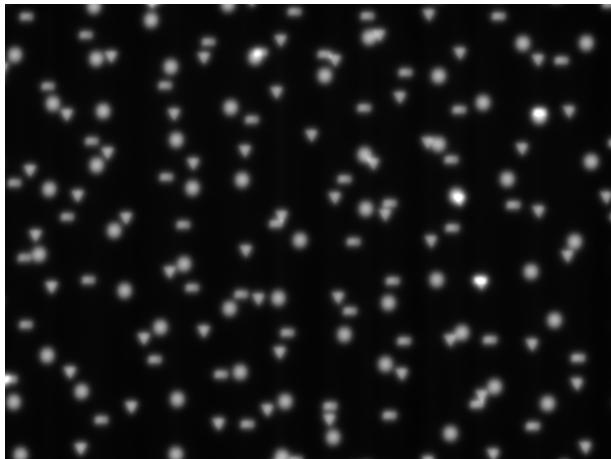


Abbildung 5.11: Formcodierte Kameraaufnahme mit optimierten LK-Parametern und AAP-Maskendesign ($\delta_A = 1\text{mm}$).

Für eine Bildweite von 300 mm entspricht der optimale Aperturdurchmesser 0,578 mm. Das ist annähernd der Durchmesser, der in Versuch zwei eingesetzt wurde und erklärt die scharfe Abbildung der Formen. Die optimale Bildweite b_{opt} hängt wiederum von der Gegenstandsweite sowie der Wellenlänge der Lichtquelle ab. Soll also eine bestimmte Messdistanz g_{bel} realisiert werden, sind zunächst die entsprechende Bildweite b_{bel} und anschließend der zugehörige Aperturdurchmesser $D_{A_{\text{bel}}}$ zu bestimmen.

Die Optimierung der Lochkameraparameter ist ein aufwendiges Unterfangen, das in dieser Arbeit nur angeschnitten wurde. Viele der hierbei verwendeten Näherungen basieren auf idealisierten Annahmen, die zum Zeitpunkt dieser Untersuchung nicht realisierbar waren — etwa unendlich dünne Blenden ohne Maßabweichung oder rein monochromatisches Licht. In zukünftigen Arbeiten kann die Methode der Formcodierung durch eine gezielte Optimierung der LK-Parameter wei-

ter verfeinert und spezifisch auf definierte Messbereiche abgestimmt werden. Eine ausführliche Beschreibung der Kameraoptimierung findet sich bei Schmidt-Ploch Schmidt-Ploch [5] in den Abschnitten 3.3 und 3.4.

5.3.4 FORMERKENNUNG

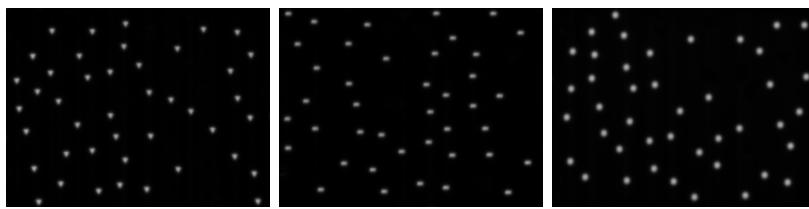
Auf der Basis des Laborexperiments unter optimierten Lochkamera-Parametern wird der Algorithmus für die formcodierte LED-Methode entwickelt. Dieser gliedert sich in vier aufeinanderfolgende Schritte:

1. **Vorverarbeitung:** Die Sensorsaufnahme durchläuft die MAPS-Image-Pipeline, wobei der Weichzeichnungsfaktor und der Schwellenwert an die neuen Spotformen angepasst werden. Wie zuvor werden die Konturen der Spots ermittelt. Dies ist unter anderem notwendig für die spätere Schwerpunktberechnung, aber auch für die Formdetektion. Das Verfahren zum Entfernen überlappender Spots wird ebenfalls in diesem Schritt durchgeführt.
2. **Separation:** Ein naheliegender Ansatz wäre, zunächst die Form aller Spots zu bestimmen, anschließend die kombinierte Abbildung anhand dieser Formen zu trennen und schließlich die Korrespondenzen herzustellen. Da es jedoch vereinzelt zu fehlerhafter Formerkennung kommt, ist dieses Vorgehen fehleranfällig. Stattdessen erfolgt die Separation wie im Standard-AAP-Verfahren über den TMA.
3. **Formdetektion und Korrespondenz:** In den drei Einzelabbildungen ist dann nur jeweils eine Spotform vorhanden. Diese wird ermittelt, indem die Form ausgewählt wird, die am häufigsten

erkannt wird. Zur Formbestimmung werden die zuvor extrahierten Spotkonturen polygonal angenähert, basierend auf dem Ramer–Douglas–Peucker–Algorithmus [65]. Dieser reduziert die Anzahl der Konturpunkte (n_{cp}), indem er jene entfernt, die nur einen geringen Beitrag zur Gesamtkontur leisten. Das Ergebnis ist eine Polygonapproximation, deren Anzahl an Kanten Rückschlüsse auf die Form erlaubt: Drei Kanten deuten auf ein Dreieck hin, vier auf ein Rechteck, fünf oder mehr auf einen Kreis. Die Genauigkeit der Approximation wird über den Parameter ϵ gesteuert, der entsprechend der Eckenverrundung angepasst wird. Die identifizierte geometrische Form wird schließlich der jeweiligen Lichtquelle zugeordnet.

4. **Positionsbestimmung:** Abschließend wird der Schwerpunkt jedes Spots mit dem Moments–Algorithmus bestimmt und die Position der Lichtquelle per Triangulation berechnet.

Die Vorverarbeitung sowie die Separation der kombinierten Abbildung aus Abbildung 5.11 sind in Abbildung 5.12 dargestellt. Dabei hat die Image-Pipeline die randnahen sowie die sich überlappendenden Spots entfernt.



(a) Dreieckige LQ.

(b) Rechteckige LQ.

(c) Kreisförmige LQ.

Abbildung 5.12: Separation der formcodierten Abbildung mit dem TMA.

Ein Ausschnitt der Dreieck-Einzelabbildung (links) sowie der entsprechend verarbeitete Ausschnitt (rechts) sind in Abbildung 5.13 dargestellt. Anhand dieses Beispiels wird gezeigt, wie die Formerkennung für die dreieckige Lichtquelle funktioniert.

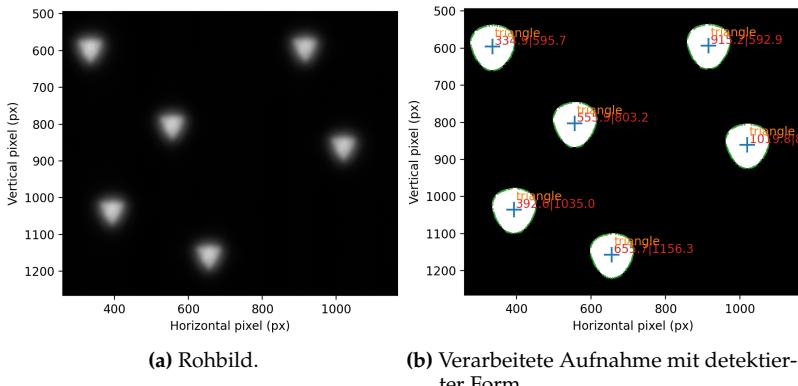


Abbildung 5.13: Separierte Kameraaufnahme vor und nach der Image-Pipeline. Die vom Algorithmus erkannte Form ist etikettiert.

In der verarbeiteten Abbildung sind die Konturpunkte, die detektierte Form und der Spotmittelpunkt mit Koordinaten eingetragen. Wird die Formerkennung für die gesamte Abbildung betrachtet, liegt die korrekte Erkennungsrate zwischen 90 und 95 %. Je schärfer die Abbildung, desto höher der Wert. Das hat jedoch keinen Einfluss auf die Korrespondenz oder die Messpräzision, solange die korrekte Form dominant erkannt wird.

Anschließend folgt die Analyse der Spot-Intensitätsverteilung. Die Simulation des 3D-Spotbilds stellt eine Alternative zur Bestimmung des Messbereichs dar.

Eine gute Näherung liefert dabei die Faltung der Blendengeometrie mit dem Beugungsmuster der jeweiligen Zone [66]. Zunächst wird die Point-Spread-Funktion (PSF) für gegebene LK-Parameter simuliert. Anschließend wird s_{img} der entsprechenden Geometrie bei $g = 130 \text{ mm}$ berechnet und mit der PSF gefaltet. Die Ergebnisse dieser Simulation sind in Abbildung 5.14 dargestellt.

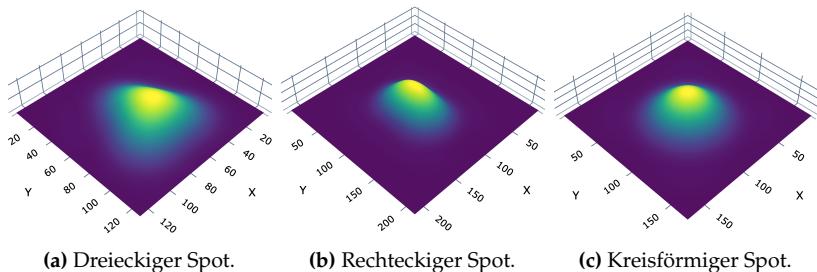


Abbildung 5.14: Simulierte 3D-Spotbilder der formcodierten Lichtquellen.

Die Simulation ermöglicht es, das Spotbild bei unterschiedlichen Bild- und Objektweiten zu analysieren. Die Objektweite geht über s_{img} (Gleichung (5.3)) ein, während die Bildweite die PSF beeinflusst. Die dabei auftretenden Beugungerscheinungen hängen von der Fresnel-Zahl ab [64]; siehe hierzu Abbildung 2.3.

Das zweidimensionale Spotbild ergibt sich durch die Betrachtung in der XY-Ebene; siehe Abbildung 5.15(a). Dieses Bild entspricht dem, was in der Kameraaufnahme sichtbar ist, und ist somit für den Formerkennungsalgorithmus relevant. Wird die Simulation mit der Formerkennung verknüpft, kann unter verschiedenen Parameterkombinationen getestet werden, ob die geometrischen Formen zuverlässig identifiziert werden. Zukünftig ließe sich dieses Verfahren in die MAPS-Simulation integrieren, sodass vollständige Kameraaufnahmen mit

geometrischer Spotform simuliert werden können.

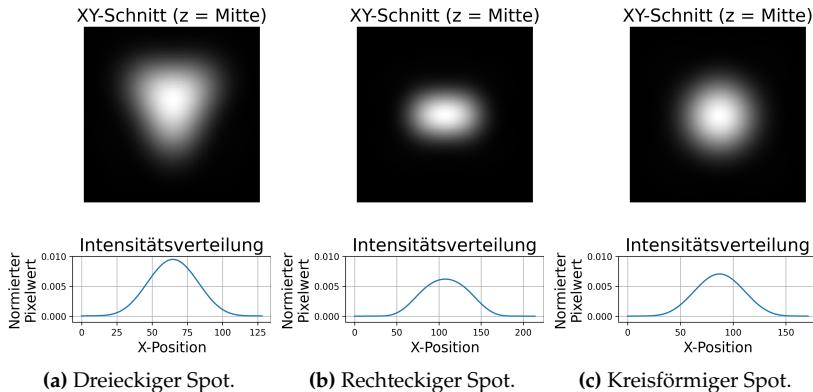


Abbildung 5.15: Simulierte Spotbilder der geometrisch codierten Lichtquellen mit Intensitätsverlauf.

Zur Validierung der Simulation dient der Vergleich mit den Spots aus einer Labor-Kameraaufnahme. Dazu wird für jede Form ein einzelner Spot ausgeschnitten. Abbildung 5.16 zeigt diese exemplarisch in einer 3D-Darstellung.

Die Spots aus der Kameraaufnahme der Labormessung zeigen ein vergleichbares Spotbild. Trotz Abweichungen der Intensitätsverteilungen bestätigen die Laborergebnisse, dass auch geometrisch codierte Spots eine glockenähnliche Intensitätsverteilung mit einem zentralen Intensitätsschwerpunkt aufweisen. Ohne diesen wäre eine zuverlässige Bestimmung des Spotmittelpunkts mit den derzeit eingesetzten PFAs nicht möglich — und daher keine Positionsbestimmung. Die dreieckige und rechteckige Codierung beeinflusst darüber hinaus die Symmetrie der Intensitätsverteilung. Dieser Effekt muss berücksichtigt werden, sollte ein alternativer PFA zum Einsatz kom-

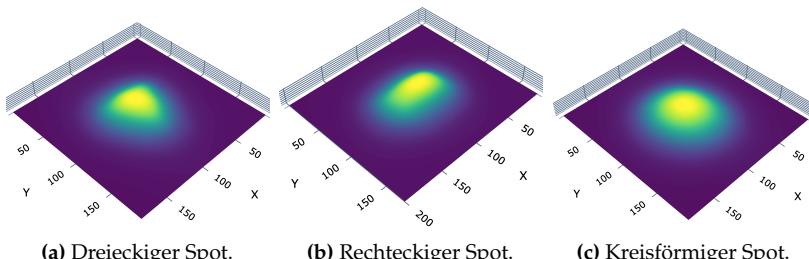


Abbildung 5.16: Im Labor gemessene 3D-Spotbilder der formcodierten Lichtquellen.

men.

Beim rechteckigen Spot fällt zudem auf, dass der Intensitätsschwerpunkt nicht mittig im Rechteck liegt. Es wird angenommen, dass die geometrische Blende nicht zentrisch zur LED ausgerichtet ist und somit ein Teil der Blende nicht vollständig beleuchtet wird. Da die LED eine Lambert-ähnliche Abstrahlcharakteristik besitzt, verweist der Intensitätsschwerpunkt nicht auf den hellsten Punkt der LED, sondern auf den Mittelpunkt der geometrischen Blende. Dieser verschiebt sich jedoch, wenn die Blendengeometrie infolge eines Versatzes nicht homogen ausgeleuchtet wird. Daraus resultiert ein systematischer Richtungsfehler: Der gemessene Spot-Schwerpunkt und damit auch der daraus berechnete Vektor zeigen nicht mehr exakt auf den geometrischen Mittelpunkt der Blende, sondern leicht versetzt. Dies verdeutlicht die Bedeutung einer präzisen Ausrichtung der Blende zur Lichtquelle und macht deutlich, dass zukünftig eine verbesserte Montagelösung entwickelt werden muss.

In Abbildung 5.17 sind das zweidimensionale Spotbild sowie die Intensitätsverteilung der im Labor gemessenen Spots zum Vergleich mit den Simulationsergebnissen dargestellt. Das Intensitätsprofil der dreieckigen und kreisförmigen Spots zeigt eine weitgehend achsen-

symmetrische Struktur. Beim rechteckigen Spot hingegen äußert sich der Positionsversatz der Blende als asymmetrische Verformung mit einer charakteristischen Ausbuchtung. Die gemessenen Intensitätsverteilungen sind insgesamt weniger ideal als die simulierten: Abweichungen zeigen sich insbesondere in der Achsensymmetrie und der Form der Verläufe. Diese Unterschiede sind vorwiegend auf Fertigungstoleranzen, Ausrichtungsfehler der Blende sowie optische Effekte zurückzuführen, die in der Simulation nicht berücksichtigt wurden.

In dieser Darstellung wird erneut deutlich, dass die Spots eine glockenförmige Struktur aufweisen und somit ein zentrales Intensitätsmaximum besitzen. Dass die Spots überhaupt glockenförmig und nicht mit einem harten Rechteckprofil abgebildet werden, liegt daran, dass die LED-Geometrie mit dem Beugungsmuster im Übergangsbereich gefaltet wird. Wird im Nahfeld gemessen, dominiert die Fresnelbeugung, und das Ergebnis der Faltung ähnelt einer Top-Hat-Verteilung. Auch wenn der Lochdurchmesser sehr groß im Vergleich zur Wellenlänge gewählt wird, zeigt die auf dem Sensor registrierte Intensität einen ähnlichen Verlauf.

Der letzte Schritt besteht in der Berechnung der 6DOF des Targets, wofür die Positionen der drei Lichtquellen benötigt werden. Wie Abbildung 5.13 zeigt, kann der Spotmittelpunkt auch bei formcodierten Spots mithilfe des Moments-Algorithmus zuverlässig bestimmt werden. Dieser Vorgang muss lediglich für die drei separierten Abbildungen wiederholt werden. Mit den Positionen der Lichtquellen und der Korrespondenz durch die Form erfolgt die etablierte 6DOF-Berechnung.

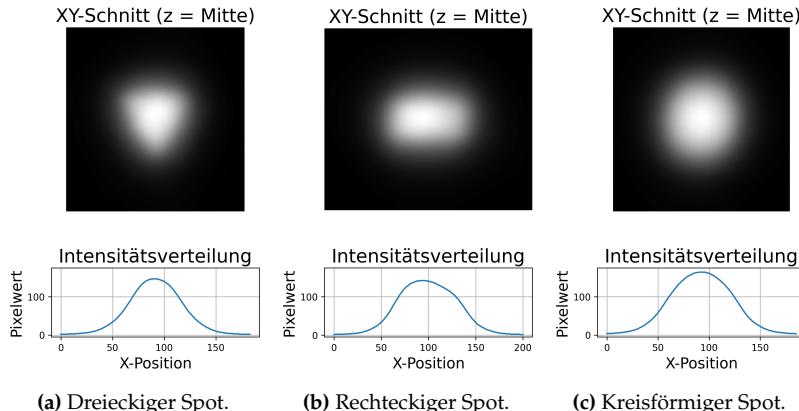


Abbildung 5.17: Vergleich der Intensitätsprofile der formcodierten Spots.

5.4 ERWEITERTE ANWENDUNGSMÖGLICHKEIT

Die in diesem Kapitel vorgestellten Codierungsverfahren, kombiniert mit dem neuartigen arbiträren Aperturmaskendesign, eröffnen MAPS neue Einsatzmöglichkeiten. Ein besonders vielversprechendes Anwendungsfeld ist die simultane Vermessung mehrerer Handhabungseinheiten oder Robotersysteme innerhalb eines gemeinsamen Arbeitsraums.

Hierbei wird an jedes Handhabungsgerät ein eigenes Target montiert. Die Identität der einzelnen Targets wird über spektrale Codierung sichergestellt: Jedes Target verwendet LEDs mit einer spezifischen Wellenlänge (z. B. rot, grün, blau). Die RGB-Kamera ermöglicht die kanalspezifische Trennung dieser Targets über das Sensorbild, sodass eine eindeutige Unterscheidung zwischen den Geräten gewährleistet ist.

In jedem Farbkanal befindet sich dann eine kombinierte Abbildung von drei Lichtquellen. Hier greift die zuvor entwickelte monochrome AAP-Methode mit dem Separationsverfahren ein, um die drei Positionsgrade zu bestimmen.

Dieses kombinierte Verfahren erlaubt es, mehrere Roboter gleichzeitig im Sichtfeld zu erfassen und dabei deren 6DOF in Bewegung zu bestimmen. Der Einsatzbereich von MAPS erweitert sich dadurch auf komplexe Szenarien wie Rüstplätze, Multi-Roboterzellen oder kollaborative Fertigungsumgebungen, in denen mehrere Systeme gleichzeitig erfasst und überwacht werden müssen.

In Abbildung 5.18 ist dies beispielhaft dargestellt: Das Werkstück auf dem Hexapod wird von zwei Industrierobotern bearbeitet, wobei jedes der drei Handhabungssysteme mit einem eigenen Target ausgestattet ist. Die Bewegungsabläufe der beiden Roboter sind dabei mit der Bewegung des Hexapods synchronisiert und erlauben eine präzise Bearbeitung des Werkstücks. Da MAPS die 6DOF aller drei Handhabungssysteme erfasst, lässt sich durch entsprechende Koordinatentransformationen deren relative Ausrichtung zueinander bestimmen und gegebenenfalls anpassen. Da dies nun während des laufenden Prozesses möglich ist, können Abweichungen vom Sollwert unmittelbar erkannt und noch während der Bearbeitung korrigiert werden.

Ein Nachteil dieser Methode ist der eingeschränkte Bewegungsfreiraum. Da die Korrespondenz ausschließlich über das Längenverhältnis der LEDs hergestellt werden kann, sind die Handhabungsgeräte in ihrer Orientierung eingeschränkt. Dennoch eignet sich diese Methode für Anwendungen, in denen ohnehin nur geringe, jedoch hochpräzise Bewegungen erforderlich sind.



Abbildung 5.18: Beispielhafter Einsatz für MAPS in einer Multi-Roboterzelle. Sowohl die beiden Industrieroboter als auch der Hexapod sind mit einem Target ausgestattet.

5.5 FAZIT UND ZUSAMMENFASSUNG

Mit beiden vorgestellten Methoden ist es möglich, die Korrespondenz zwischen Lichtquelle und Messwert herzustellen. Die Formcodierung stellt dabei höhere Anforderungen. Die MAPS-Parameter müssen auf das gewünschte Messvolumen abgestimmt sein, damit die Formcodierung in der Abbildung zuverlässig erkennbar ist. Zu diesem Zweck wurden zwei Methoden vorgestellt: Die erste berechnet die maximale Messdistanz als Kompromiss zwischen geometrischer und optischer Unschärfe. Die zweite Methode simuliert das Spotbild durch Faltung der PSF mit der Blendengeometrie, um die Erkennbarkeit der Codierung zu beurteilen. Durch das Berechnen der maximalen und minimalen Messdistanz wird das Messvolumen bestimmt.

Mit dem TMA wird die kombinierte Abbildung in drei Einzelabbildun-

gen separiert, die jeweils eine spezifische Formcodierung enthalten. Mithilfe des Formerkennungsalgorithmus werden diese decodiert und der jeweiligen Lichtquelle zugeordnet. Auf diese Weise ist die Korrespondenz sichergestellt, und die korrekte Orientierung der Targets kann berechnet werden.

Trotz des höheren Aufwands bietet die Formcodierung einen entscheidenden Vorteil: Sie kommt mit einem monochromen Kamerasensor und einfarbigen LEDs aus, wodurch insbesondere Kosten eingespart werden können. Das aktuelle Design des Targets ist nicht optimal und vergleichsweise aufwendig in der Fertigung. Eine alternative Lösung bietet ein PCB-basiertes Target mit einer einfacheren und präziseren Montagemöglichkeit der geometrischen Blenden.

In zukünftigen Arbeiten sollte die Simulation des Spotbilds in die MAPS-Simulation eingebaut werden, sodass komplett Kameraabbildungen mit verschiedenen LK-Parametern simuliert und ausgewertet werden können. Durch die Verknüpfung mit dem Formerkennungsalgorithmus kann das nutzbare Messvolumen effektiver bestimmt werden.

Die spektrale Codierung ist praktisch einfacher umzusetzen. Die maximale Messdistanz ist, ähnlich wie bei der monochromen AAP-Methode, kein beschränkender Faktor und muss daher nicht berechnet werden. Ebenso müssen die LK-Parameter nicht für unterschiedliche Messdistanzen angepasst werden, sondern sind konstant. Durch die Verwendung von drei unterschiedlich farbigen LEDs kann die Korrespondenz direkt über die Farbkanäle des Kamerabildes hergestellt werden. Da sich Spots unterschiedlicher Lichtquellen aufgrund der Farbcodierung nicht überlappen, wie es bei den monochromen Verfahren der Fall ist, kann eine Aperturmaske mit deutlich höherer Aperturdichte eingesetzt werden. Dies ermöglicht einen höheren GoP und somit potenziell eine höhere Messpräzision.

Das Übersprechen der LEDs zwischen mehreren Farbkanälen wurde durch lineares Entmischen gelöst. Hierfür müssen einmalig drei einfarbige Referenzaufnahmen erstellt werden, um die Mischmatrix zu kalibrieren. Ein alternativer Ansatz, bei dem Spots anhand ihres Perimeters gefiltert werden, wurde ebenfalls vorgestellt.

Offen bleibt die Frage, welchen Einfluss das Demosaicing auf die SPG und damit auf die Messunsicherheit hat. Ebenso sollten die LK-Parameter als Kompromiss zwischen den drei Wellenlängen gezielt optimiert werden.

Beide Methoden bauen auf dem zuvor entwickelten AAP-Maskendesign auf. Dies bietet den Vorteil, dass keine Codierungsmarker benötigt werden, die Aperturdichte optimiert ist und die Relation mittels TMA hergestellt werden kann. Beide Ansätze wurden so weit entwickelt, dass die Berechnung der drei Lichtquellenpositionen sowie die Herstellung der Korrespondenz möglich ist. Damit ist MAPS mit beiden Verfahren grundsätzlich in der Lage, die sechs Freiheitsgrade des Targets zu bestimmen.

Eine vollständige Integration der Korrespondenz-Methoden in die MAPS-Messsoftware erfolgte bislang aus zeitlichen Gründen nicht, weshalb keine Messreihen durchgeführt wurden. Folglich ist auch die experimentelle Bestimmung von Präzision und Genauigkeit beider Verfahren noch offen. Die Präzision lässt sich dennoch näherungsweise über den *Gain-of-Precision* abschätzen: Mit der Formcodierung wird ein GoP von etwa 6,5 erreicht, mit der spektralen Codierung etwa 19 (auf Sensorfläche korrigiert). Zum Vergleich: Das Legacy-MAPS-System erreicht einen GoP von 7,35, die monochrome AAP-Methode etwa 6,9.

Kapitel 6

BEWERTUNG DER MESSUNSICHERHEIT

Die Bewertung der Messunsicherheit stellt einen essenziellen Bestandteil jeder metrologischen Untersuchung dar. Sie liefert eine quantitative Aussage über die Vertrauenswürdigkeit eines Messergebnisses und bildet die Grundlage für dessen Vergleichbarkeit sowie Rückführbarkeit. Die Relevanz einer systematischen Unsicherheitsanalyse ist insbesondere dann hoch, wenn ein Messinstrument nicht ausschließlich in Forschungskontexten, sondern auch im industriellen Umfeld eingesetzt werden soll — wie im vorliegenden Fall des MAPS-Messinstruments angestrebt.

Die Unsicherheitsbewertung dient nicht allein der quantitativen Angabe von Messabweichungen, sondern auch der Identifikation dominanter Einflussgrößen, der Bewertung systematischer Fehlerquellen sowie der Weiterentwicklung von Auswertealgorithmen und Kalibrierstrategien. Eine solche Analyse fungiert somit sowohl als Validierungsinstrument als auch als Grundlage für Optimierungsmaßnahmen. Ihre besondere Relevanz ergibt sich nicht zuletzt aus der Zielsetzung, das MAPS-Messinstrument perspektivisch in Kalibrierprozesse und automatisierte Fertigungsstraßen zu integrieren.

Dieses Kapitel verfolgt das Ziel, die mit dem MAPS-Messinstrument verbundenen Unsicherheiten systematisch zu identifizieren, zu klassifizieren und zu quantifizieren. Grundlage der methodischen Vorgehensweise bildet der *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (GUM). Zur Quantifizierung der Einflussgrößen kommen

sowohl experimentelle Verfahren zur statistischen Auswertung (Typ-A-Bewertung) als auch modellgestützte Abschätzungen auf Basis technischer Spezifikationen, Kalibrierungen oder Erfahrungswerte (Typ-B-Bewertung) zum Einsatz. Die eigentliche Unsicherheitsanalyse erfolgt anschließend mittels *Monte-Carlo-Simulation*, da sich dieses numerische Verfahren insbesondere für komplexe, nichtlineare Modelle und dreidimensionale Messgrößen, wie sie im vorliegenden Fall auftreten, eignet [67]. Die gewonnenen Erkenntnisse ermöglichen eine spätere Einordnung der Messqualität und unterstützen die Weiterentwicklung von Kalibrierstrategien. Ein Teil der hier dargestellten Untersuchungen basiert auf der studentischen Projektarbeit von H. Steinmetz [68], die im Rahmen der vorliegenden Promotion durchgeführt wurde.

6.1 MESSUNSICHERHEITSANALYSE

Die zu bestimmende Messgröße ist die räumliche Position der Lichtquelle relativ zum Messsystem. Diese wird nicht direkt erfasst, sondern aus geometrischen Relationen zwischen bekannten Aperturkoordinaten und gemessenen Spotpositionen auf der Sensorfläche berechnet. Grundlage bildet ein geometrisches Modell, in dem die Position der Lichtquelle über eine projektive Rückrechnung aus den Schnittpunkten mehrerer Strahlen bestimmt wird. Jeder dieser Strahlen verläuft von einem Spot durch die zugehörige Apertur.

Die Messungen erfolgen unter festgelegten Rahmenbedingungen in einem klimatisierten Messlabor. Die Aperturmaske ist mechanisch definiert, und der Sensor ist in einem definierten Abstand zur Aperturmaske montiert. Die Lichtquelle ist als Taster an einem Koordina-

tenmessgerät (KMG) befestigt, das als Referenz dient. Die Messunsicherheitsanalyse bezieht sich auf den in Abbildung 3.6 dargestellten Laboraufbau. Zusätzlich werden das AAP-Monochrom und das AAP-RGB-Setup analysiert.

6.1.1 EINFLUSSGRÖSSEN

Die Bestimmung der Messunsicherheit setzt die Ermittlung und Quantifizierung aller relevanten Einflussgrößen voraus. Nur wenn bekannt ist, welche Parameter das Messergebnis in welcher Weise beeinflussen, lässt sich das Vertrauensniveau in das Ergebnis belastbar angeben. Jeweils nicht berücksichtigte Einflussgrößen führen potenziell zu einer Unterschätzung der Unsicherheit. Die transparente Modellierung dieser Einflussgrößen ist daher nicht nur für die Bewertung der Messqualität, sondern auch für die Vergleichbarkeit und Rückführbarkeit von Messergebnissen unerlässlich. Das Ishikawa-Diagramm in Abbildung 6.1 gibt eine Übersicht der für das MAPS-Messinstrument relevanten Einflussgrößen.

6.1.2 DISKUSSION DER EINFLUSSGRÖSSEN

Systematische Abweichungen sind Einflüsse auf das Messergebnis, die über alle Wiederholungen hinweg konstant bleiben und somit durch statistische Auswertung allein nicht erkannt werden können. Sie führen zu einer Verschiebung des Ergebnisses in eine bestimmte Richtung und sind reproduzierbar. Da Wiederholmessungen lediglich die Streuung, nicht jedoch eine gleichbleibende Verzerrung aufdecken, ist es notwendig, systematische Abweichungen gesondert zu identifizieren

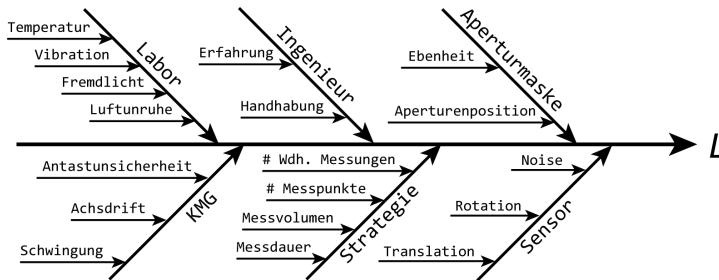


Abbildung 6.1: Ishikawa-Diagramm relevanter Einflussgrößen für das MAPS-Instrument [69].

und zu bewerten. Dies erfolgt typischerweise durch externe Kalibrierungen, den Vergleich mit Normmaßen oder durch herstellerseitig angegebene Genauigkeitsspezifikationen [70], [71].

In diesem Abschnitt werden die für die Messqualität relevanten Einflussgrößen diskutiert. Dazu zählen auch die Methoden zur Quantifizierung des Schätzwerts und der zugehörigen Standardunsicherheit. Ziel dieser ausführlichen Betrachtung ist es, ein möglichst hohes Vertrauen in die Messunsicherheitsanalyse zu gewährleisten.

EINFLUSSGRÖSSE BILDWEITE δ_b

Die Bildweite b ist definiert als der Abstand zwischen der Sensorfläche und der Aperturmäsk. Zur Bestimmung dieses Abstands wurde mit einem KMG die Strecke zwischen Kameragehäuse und Aperturmäsk gemessen. Die zusätzliche Distanz zwischen Kameragehäuse und Sensor wurde aus dem CAD-Modell entnommen.

Aus diesen Messungen ergibt sich eine Bildweite von

$$b = 55,638 \text{ mm} \pm 1,89 \mu\text{m}$$

einschließlich der Längenmessunsicherheit MPE_E des KMG. Da die Strecke nur einmal gemessen wurde, wird eine Rechteckverteilung angenommen. Die Halbbreite der Einflussgröße beträgt somit

$$a_b = 0,00189 \text{ mm}, \quad G_b = \frac{1}{3} \text{ (Typ B).}$$

Die Standardunsicherheit ergibt sich zu

$$u(b) = a_b \cdot \sqrt{G_b} = 0,00109 \text{ mm.}$$

EINFLUSSGRÖSSE SENSORTRANSLATION δt

Die translatorische Position des Sensors setzt sich aus der lateralen Position in x - und y -Richtung sowie der Bildweite b zusammen. Die laterale Position des Sensors wird über die Position des Spots aus der zentralen Apertur im Bild bestimmt. Die Unsicherheit des eingesetzten PFA wirkt sich hierbei unmittelbar auf die laterale Unsicherheit aus.

Die laterale Position des Sensors wird als Mittelwert einer Vielzahl von Einzelmessungen bestimmt. Hierzu werden 20 Messbilder auf der optischen Achse aufgenommen und ausgewertet. Die Standardabweichung des Mittelwerts ist dabei normalverteilt.

Der Mittelwert für die x -Position des Sensors beträgt $lat_x = -0,0009$ mm, der für die y -Achse $lat_y = -0,0002$ mm. Die Standardunsicherheiten betragen:

$$u(lat_x) = 0,00016 \text{ mm}, \quad u(lat_y) = 0,00010 \text{ mm}.$$

Unter Berücksichtigung der Bildweitenunsicherheit $u(b)$ ergibt sich die vollständige translatorische Unsicherheit zu:

$$u(t) = \begin{bmatrix} u(lat_x) \\ u(lat_y) \\ u(b) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,00016 \\ 0,00010 \\ 0,00109 \end{bmatrix} \text{ mm.}$$

Es zeigt sich, dass die Unsicherheit der Bildweite etwa um den Faktor zehn höher ist als die der lateralen Sensorposition. Da die Bildweite unmittelbar aus der Längenmessunsicherheit des KMG abgeleitet wird, lässt sich diese Diskrepanz durch Messungen mit einem präziseren Messinstrument reduzieren, beispielsweise durch den Einsatz eines Interferometers.

Die frühere Methode, bei der die Lichtquelle vom KMG entlang der optischen Achse verfahren wurde und die Bildweite aus den aufgenommenen Abbildungen berechnet wurde, unterliegt derselben Unsicherheit. Da hierbei zusätzlich die Unsicherheiten von MAPS berücksichtigt werden müssen, kann mit dieser Methode die Bildweite nicht mit höherer Genauigkeit bestimmt werden.

EINFLUSSGRÖSSE SENSORROTATION δR

Die Rotationswinkel *Yaw* und *Pitch* des Sensors werden anhand der perspektivischen Verzerrung des Spotmusters bestimmt. Der *Roll*-

Winkel wird aus der Verdrehung des Musters relativ zum Sensor berechnet. Hierzu werden lineare Fits an die äußersten Spotreihen und -spalten gelegt, deren Orientierung relativ zu den Sensorrändern den jeweiligen Rotationswinkel liefert. Die Unsicherheiten der Winkelbestimmung hängen im Wesentlichen von der Genauigkeit der Spotmittelpunktbestimmung, vom Sensorformat sowie von der Ausdehnung des Spotmusters ab.

Die Sensororientierung wurde analog zur Positionsbestimmung empirisch ermittelt. Dazu wurden dieselben 20 Messbilder auf der optischen Achse ausgewertet. Die Standardabweichung des Mittelwerts ist normalverteilt.

Die Mittelwerte der Rotationswinkel betragen: $roll = -0,0010^\circ$, $yaw = 0,0034^\circ$ und $pitch = 0,0019^\circ$. Die Standardunsicherheiten lauten:

$$u(R) = \begin{bmatrix} u(\text{roll}) \\ u(\text{yaw}) \\ u(\text{pitch}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,00027^\circ \\ 0,00018^\circ \\ 0,00028^\circ \end{bmatrix}.$$

EINFLUSSGRÖSSE APERTURENKOORDINATEN δa_i

Die Aperturenkoordinaten a_i beschreiben die x - und y -Position einer Apertur innerhalb der Maske. Da die Maske in der Praxis keine perfekte Ebenheit aufweist, liegen die Aperturen nicht exakt in derselben Ebene; daher wird zusätzlich die z -Komponente angegeben.

Für die lithografisch gefertigte periodische Aperturmaske gibt der Hersteller die Gitterkonstante mit

$$478,5 \mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$$

an. Da die Maske etwa 40 000 Aperturen umfasst, erfolgt keine Angabe zur Positionsunsicherheit einzelner Aperturen. Es ist zudem unklar, ob jede Apertur vermessen wurde oder lediglich eine Stichprobe. Folglich kann kein individueller Schätzwert für die einzelnen Koordinaten angegeben werden, und es wird stattdessen mit dem Sollwert gearbeitet. Eine präzisere Vorgehensweise wäre die Vermessung jeder einzelnen Aperturposition mit einem optischen KMG. Aufgrund des extremen Zeitaufwands wird darauf jedoch verzichtet.

Zur Verteilung der Messwerte liegen keine Herstellerangaben vor. Daher wird eine Rechteckverteilung angenommen. Die Halbbreite der Einflussgröße δa_i beträgt:

$$a_{\text{apt}} = 0,002 \text{ mm}, \quad G_{\text{apt}} = \frac{1}{3} \text{ (Typ B).}$$

Die Standardunsicherheit ergibt sich zu:

$$u(x_{a,i}) = a_{\text{apt}} \cdot \sqrt{G_{\text{apt}}} = 0,0012 \text{ mm} \quad (6.1)$$

$$u(y_{a,i}) = a_{\text{apt}} \cdot \sqrt{G_{\text{apt}}} = 0,0012 \text{ mm.} \quad (6.2)$$

Für die AAP-Maske wurden die Aperturenkoordinaten empirisch bestimmt (siehe Kapitel 4). Es wurden stichprobenartig 80 Aperturpositionen gemessen, um die Streuung der Fertigung zu ermitteln. Diese Messungen charakterisieren nicht die Unsicherheit einer einzelnen Aperturposition, sondern die Fertigungstoleranzen über das gesamte

Maskenlayout. Die Stichprobe ist groß genug, um eine Normalverteilung der Messwerte anzunehmen.

Die mittlere Abweichung beträgt $64,5 \mu\text{m}$. Sie beschreibt die zufällige Streuung dieser Positionen um den Sollwert und geht als Unsicherheit $u(x|y_{a,i})$ der Einflussgröße $\delta \mathbf{a}_i$ in die Modellgleichung ein:

$$u(x|y_{a,i}) = 0,0645 \text{ mm.}$$

Mangels Mehrfachmessungen einzelner Aperturen wird für alle s_i dieselbe Unsicherheit $\delta \mathbf{a}_i$ angesetzt. Ebenso kann kein individueller Schätzwert für jedes a_i bestimmt werden.

Im Vergleich zur gläsernen Aperturmaske weist die Edelstahlmaske eine mit dem taktilen KMG messbare Ebenheitsabweichung auf, wie das Messprotokoll (vgl. Abbildung A.1) zeigt. Die Standardabweichung der Ebenheit aus 9 276 Einzelmesspunkten fließt als Unsicherheit der Aperturen in z -Richtung ein:

$$u(z_{a,i}) = 0,2091 \text{ mm.}$$

Genau genommen beeinflusst die gemessene Ebenheit der Edelstahlscheibe auch die x/y -Koordinaten der Aperturen. Dadurch ist mit einer Unterschätzung der Messunsicherheit zu rechnen. Eine geeignete Korrektur dieser Form wurde bereits in Kapitel 4 erläutert, jedoch nicht in das vorliegende Modell implementiert, um den Rechenaufwand beherrschbar zu halten.

EINFLUSSGRÖSSE LICHTQUELLENPOSITION δ_L

Die Position der Lichtquelle L im Raum entspricht aus Sicht des MAPS dem Abstand zum Detektor, genauer gesagt zum Mittelpunkt der Aperturmaske. Obwohl die Lichtquellenposition den eigentlichen Messwert darstellt, wird sie in der Unsicherheitsanalyse als Einflussgröße einbezogen, um die resultierenden Unsicherheiten und die Empfindlichkeit des Verfahrens gegenüber Positionsabweichungen abzubilden.

Im Laborexperiment wurde ein Koordinatenmessgerät als Bewegungsapparat eingesetzt. Die Unsicherheit der Positionierung der Lichtquelle wird durch die volumetrische Antastabweichung des KMG beschrieben, die für das verwendete Gerät

$$MPE_P = 0,6 \mu\text{m}$$

beträgt.

Für die anschließende Monte-Carlo-Simulation wurden die Sollpositionen, beispielsweise

$$L_0 = (0|0|1000) \text{ mm},$$

über die KMG-Steuerung angefahren. Die ausgelesene Lichtquellenposition hatte den Schätzwert

$$L = (0,028| - 0,020|1000,033) \text{ mm}$$

Die Unsicherheit der Lichtquellenposition entspricht der Unsicherheit der Positionsantastung des KMG. Da die Verteilung der Werte unbekannt ist, wird eine Rechteckverteilung angenommen. Die Halbbreite der Rechteckverteilung beträgt:

$$a_L = 0,0006 \text{ mm}, \quad G_L = \frac{1}{3} \text{ (Typ B).}$$

Die Standardunsicherheit ergibt sich zu:

$$u(\mathbf{L}) = a_L \cdot \sqrt{G_L} = 0,0003 \text{ mm.}$$

EINFLUSSGRÖSSE PFA-SUBPIXELGENAUIGKEIT δ_{PFA}

Die Subpixelgenauigkeit des Peak-Finding-Algorithmus (PFA) beschreibt, mit welcher Genauigkeit die Schwerpunkte der Spots in der Abbildung bestimmt werden können. Die Genauigkeit und die Unsicherheit des PFA wurden empirisch ermittelt. Hierzu wurde mittels Abbildungssimulation eine MAPS-Aufnahme generiert, sodass die vom PFA bestimmten Ist-Koordinaten der Spotmittelpunkte mit den Soll-Koordinaten verglichen werden konnten. In diesem Fall wird ausschließlich der *Moments-Algorithmus* betrachtet. Durch den Einsatz eines 2D-Gauß-Fits konnte keine Verbesserung festgestellt werden.

Aus 300 Einzelmessungen ergab sich eine mittlere Abweichung von

$$5,5 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$$

bei einer Pixelgröße von $5,5 \mu\text{m}$. Dieser Wert kann als Subpixelgenauigkeit interpretiert werden. Da dieser Wert mehr als drei Größenordnungen kleiner ist als die übrigen Schätzwerte, hat er in der Prozessgleichung keine Relevanz.

Die Standardabweichung des Mittelwerts ist normalverteilt; die Standardunsicherheit beträgt:

$$u(\text{PFA}) = 0,0013 \text{ mm.}$$

6.1.3 WEITERE EINFLUSSGRÖSSEN FÜR SYSTEMATISCHE MESSABWEICHUNGEN

Weitere nicht erfasste systematische Messabweichungen, auf die hier nicht näher eingegangen wird, treten z.B. auf:

- Die Berücksichtigung der räumlichen Ausdehnung infolge thermischer Effekte gestaltet sich im Rahmen der Monte-Carlo-Simulation bei einem komplexen mechanischen Aufbau mit unterschiedlichen Materialien als äußerst aufwendig. Aufgrund der Vielzahl an Bauteilen mit jeweils unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten und potenziellen lokalen Temperatureffekten ist eine vereinfachte Modellierung nicht zielführend. Eine realitätsnahe Abbildung thermisch induzierter Verformungen erfordert vielmehr eine Finite Elemente Methode (FEM), um die Temperaturverteilung und deren mechanische Auswirkungen präzise simulieren zu können. Aus diesem Grund wird der Temperatureinfluss im Rahmen der Monte-Carlo-Simulation nicht berücksichtigt. Es ist mit einer moderaten Unterschätzung der Messunsicherheit zu rechnen.

- Sensorrauschen stellt ebenfalls eine potenzielle Einflussgröße dar, insbesondere in Form von Shot Noise (Photonenrauschen) und Intensitätsrauschen. In der vorliegenden Monte-Carlo-Simulation wurde diese Einflussgröße zunächst nicht berücksichtigt, da sie in empirischen Versuchsreihen keine signifikante Unsicherheitsbeeinflussung erkennen ließ. Es ist jedoch anzumerken, dass das Ausmaß des Sensorrauschens temperaturabhängig ist. Bei erhöhten Kameratemperaturen kann das Rauschverhalten deutlich zunehmen, wodurch die Einflussgröße unter ungünstigeren Umgebungsbedingungen durchaus relevant werden könnte.
- Das Mikrolinsenarray auf dem Sensor dient dazu, das einfalende Licht möglichst effizient auf die lichtempfindliche Fläche jedes Pixels zu lenken, um die Quanteneffizienz zu steigern. Dabei wird die Intensitätsverteilung des Spots auf dem Sensor durch die Mikrolinsen beeinflusst. Da die Position des registrierten Lichtmittelpunkts mit Subpixelgenauigkeit bestimmt wird, kann bereits eine minimale asymmetrische Umlenkung des Lichts durch das Mikrolinsenarray zu einer systematischen Verschiebung des berechneten Spotmittelpunkts führen. Der Effekt nimmt typischerweise mit der Pixelgröße zu, da größere Pixel stärkere laterale Einflüsse auf die Lichtleitung zulassen.

Um den Einfluss des Mikrolinsenarrays zu untersuchen, wäre ein Vergleich zwischen zwei identischen Kamerasystemen erforderlich, bei dem bei einer der Sensor von Deckglas und Mikrolinsenarray befreit wird. Eine solche Modifikation ließ sich jedoch technisch nicht realisieren, da sie mit erheblichen Risiken für den Sensor und hohen Kosten verbunden ist. Im vorliegenden Fall verfügt die AV GT3300 des Legacy-MAPS über einen Sensor, der bereits werkseitig ohne Deckglas und Mikrolinsen-

array geliefert wurde. Im Gegensatz dazu ist der Sensor der AV GT6400 nicht modifiziert und besitzt sowohl Deckglas als auch Mikrolinsenarray.

- Das Deckglas eines Bildsensors kann zu systematischen Abweichungen bei der Positionsbestimmung führen. Einfallendes Licht erfährt beim Übergang von Luft in das Deckglas sowie beim Austritt in das Sensormaterial jeweils eine Brechung, wodurch sich der effektive Einfallswinkel und somit der geometrische Pfad des Lichtstrahls verändert. Dieser Effekt wurde bereits von Bielke beschrieben [34]. Besonders kritisch wirkt sich dies bei schrägem Lichteinfall — etwa abseits der optischen Achse — aus. Zusätzlich kann eine Unebenheit oder nicht parallele Ausrichtung des Deckglases den Effekt verstärken. Um diesen Einfluss zu untersuchen, wurden zwei identische Kameras des Typs Manta G504B verglichen, von denen bei einer das Deckglas mechanisch entfernt wurde. In den Messdaten der Kamera mit Deckglas zeigten sich bei großen Einfallswinkeln zum Teil sprunghafte Abweichungen, die bei der Kamera ohne Deckglas nicht auftraten. Ein vergleichbarer Effekt ließ sich bei der AV GT6400 jedoch nicht feststellen, weshalb in diesem Fall auf eine Entfernung des Deckglases verzichtet wurde.
- Fremdlicht stellt eine weitere potenzielle Einflussgröße dar, insbesondere wenn es sich spektral oder räumlich nicht eindeutig von der eigentlichen Lichtquelle unterscheiden lässt. Solche unerwünschten Lichtanteile können zu falschen Intensitätsverteilungen auf dem Sensor führen und damit die Bestimmung des Spotmittelpunkts verfälschen. Der Einfluss von Fremdlicht ist jedoch stark abhängig von der Umgebungsbeleuchtung, den verwendeten optischen Filtern sowie den Reflexionseigenschaften der beteiligten Oberflächen. Aufgrund dieser Vielzahl an unkon-

trollierbaren und schwer vorhersagbaren Faktoren ist eine realitätsnahe Modellierung im Rahmen der Monte-Carlo-Simulation nicht sinnvoll möglich und wurde daher nicht berücksichtigt.

Eine pragmatische Maßnahme gegen Fremdlicht besteht im Einsatz von Filtern oder lichtdichten Umhautungen, wie sie etwa in Schweißroboterzellen üblich sind.

6.1.4 MODELLGLEICHUNG

Die Analyse der Messunsicherheit erfordert die Formulierung einer *Prozessgleichung*. Sie beschreibt die mathematischen und physikalischen Beziehungen zwischen den Eingangsgrößen und der Zielgröße (Messgröße). Über die Prozessgleichung wird festgelegt, wie die zu bestimmende Messgröße aus den direkt erfassten Größen (z. B. Aperturkoordinaten, Sensorlage) berechnet wird. Erst diese mathematische Abbildung ermöglicht es, die Unsicherheiten der Eingangsgrößen systematisch auf die Ausgangsgröße zu propagieren.

Dies gilt sowohl für die Verfahren nach GUM (Typ A/B) als auch für die Monte-Carlo-Methode, bei der Zufallsstichproben der Eingangsgrößen durch die Prozessgleichung propagiert werden. Aus der Prozessgleichung wird durch die explizite Berücksichtigung der Unsicherheiten die *Modellgleichung* entwickelt, in der die Eingangsgrößen als Zufallsvariablen mit zugeordneten Verteilungen modelliert werden.

In Kapitel 3 wurde das Prinzip der Positions berechnung der Lichtquelle mit MAPS bereits erläutert. Im Folgenden wird die mathematische Berechnung detailliert beschrieben.

Die Lichtquellenposition \mathbf{L} wird mathematisch als der Schnittpunkt von N Geraden $g_i(t)$ modelliert. Jede Gerade repräsentiert einen

Strahl, der von einer Apertur \mathbf{a}_i über die zugehörige Spotposition \mathbf{s}_i auf dem Sensor verläuft. Formal lässt sich eine solche Gerade durch

$$g_i(t) = \mathbf{a}_i + t \cdot \mathbf{v}_i$$

beschreiben, wobei \mathbf{a}_i den Startpunkt (Position der Apertur) und \mathbf{v}_i den Richtungsvektor darstellt.

Zur Bestimmung der Richtungsvektoren \mathbf{v}_i werden zunächst die Verbindungsvektoren zwischen Aperturen und Spots gebildet:

$$\mathbf{v}_i = \frac{\mathbf{s}_i - \mathbf{a}_i}{\|\mathbf{s}_i - \mathbf{a}_i\|}. \quad (6.3)$$

Durch diese Normierung enthält \mathbf{v}_i ausschließlich die Richtungsinformation, nicht jedoch die Länge.

Da sich die Geraden $g_i(t)$ in der Praxis nicht exakt in einem Punkt schneiden, wird das Problem als Ausgleichsaufgabe formuliert. Hierfür wird für jede Gerade eine Projektionsmatrix P_i definiert:

$$P_i = I - \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^T,$$

wobei I die 3×3 -Einheitsmatrix ist. Diese Matrix projiziert einen Punkt orthogonal zur Geraden $g_i(t)$.

Die gesuchte Position \mathbf{L} der Lichtquelle ist der Punkt, der im Mittel den kleinsten Abstand zu allen Geraden aufweist. Sie ergibt sich durch das Lösen des linearen Gleichungssystems

$$A \mathbf{L} = b,$$

wobei

$$A = \sum_{i=1}^N P_i, \quad b = \sum_{i=1}^N P_i \mathbf{a}_i.$$

Die Lösung lautet:

$$\mathbf{L} = A^{-1}b. \quad (6.4)$$

Dieses Verfahren kombiniert die Aperturkoordinaten mit den Spotmittelpunktkoordinaten, um den Schnittpunkt der Strahlen im Sinne einer kleinsten quadratischen Abweichung zu bestimmen. Die Projektionsmatrizen P_i gewichten dabei die Abweichungen senkrecht zu den Geraden, sodass \mathbf{L} optimal zwischen allen Richtungen liegt. Die dargestellte Prozessgleichung beschreibt den idealisierten, deterministischen Fall ohne Berücksichtigung der Unsicherheiten der Einflussgrößen.

Unter Berücksichtigung der Unsicherheiten in (6.3) ergibt sich:

$$\mathbf{v}_i = \frac{(\mathbf{s}_i + \delta\mathbf{s}_i) - (\mathbf{a}_i + \delta\mathbf{a}_i)}{\|(\mathbf{s}_i + \delta\mathbf{s}_i) - (\mathbf{a}_i + \delta\mathbf{a}_i)\|} \quad (6.5)$$

Die Terme $\delta\mathbf{a}_i$ und $\delta\mathbf{s}_i$ repräsentieren die Unsicherheiten der Apertur- bzw. Spotkoordinaten.

Die Unsicherheit der Aperturkoordinaten kann entweder aus Herstellerangaben oder durch empirische Messungen ermittelt werden. Die Spotpositionen auf dem Sensor werden typischerweise mit einem Peak-Finding-Algorithmus bestimmt. Wie in den vorherigen Abschnitten dargestellt, spielen auch weitere Einflussgrößen, wie Lage und Orientierung des Sensors oder die Subpixelgenauigkeit des PFA, eine

Rolle. Um diese Unsicherheiten in das Modell zu integrieren, werden nicht die direkt vom PFA ermittelten Spotkoordinaten verwendet, sondern sie werden auf Basis eines Abbildungsmodells berechnet.

Die Position eines Spots \mathbf{s}_i auf der Sensorfläche ergibt sich aus der räumlichen Lage der Lichtquelle \mathbf{L} , den Aperturkoordinaten \mathbf{a}_i und der Lage der Sensorfläche. Ein Strahl von der Lichtquelle trifft zunächst auf die Apertur \mathbf{a}_i und wird anschließend auf die Sensorfläche projiziert. Die Spotposition \mathbf{s}_i ist somit der Schnittpunkt des Strahls $\overline{\mathbf{La}_i}$ mit der Sensorebene.

Zunächst wird der Richtungsvektor des Strahls berechnet:

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{a}_i - \mathbf{L}$$

Die Parameterform des Strahls lautet:

$$g_i(t) = \mathbf{L} + t \cdot \mathbf{v}_i$$

Der Schnittpunkt mit der Sensorebene $z = 0$ ergibt sich aus:

$$t_i = -\frac{L_z}{v_{i,z}}$$

Das Einsetzen von t_i liefert:

$$\mathbf{s}_i = \mathbf{L} + t_i \cdot \mathbf{v}_i$$

Da der Sensor in der Praxis nicht exakt ideal ausgerichtet ist, wird die berechnete Spotposition um eine feste Rotation R und eine Translation \mathbf{t} transformiert:

$$\boxed{\mathbf{s}_i = R \cdot (\mathbf{L} + t_i \cdot \mathbf{v}_i) + \mathbf{t}}$$

In kompakter Form:

$$\boxed{\mathbf{s}_i = R \cdot \left(\mathbf{L} - \frac{L_z}{a_{i,z} - L_z} \cdot (\mathbf{a}_i - \mathbf{L}) \right) + \mathbf{t}} \quad (6.6)$$

Die beteiligten Größen sind:

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} x_L \\ y_L \\ z_L \end{bmatrix} \text{ mm}, \quad \mathbf{a}_i = \begin{bmatrix} x_{a,i} \\ y_{a,i} \\ z_{a,i} \end{bmatrix}$$

- R Rotation des Sensors (Yaw, Pitch, Roll)
- \mathbf{t} Translation des Sensors (lateral und axial/Bildweite)
- \mathbf{a}_i Nominale Aperturkoordinaten
- \mathbf{L} Nominale Lichtquellenposition

Die Translation:

$$\mathbf{t} = \begin{bmatrix} \text{lat},x \\ \text{lat},y \\ b \end{bmatrix}$$

Die Rotationsmatrix:

$$R = R_z(\text{roll}) \cdot R_y(\text{yaw}) \cdot R_x(\text{pitch})$$

Unter Berücksichtigung aller relevanten Unsicherheiten ergibt sich:

$$\begin{aligned} \mathbf{s}_i = & (R + \delta R) \cdot \left[\mathbf{L} + \delta \mathbf{L} - \frac{L_z + \delta L_z}{a_{i,z} + \delta a_{i,z} - L_z - \delta L_z} \cdot (\mathbf{a}_i + \delta \mathbf{a}_i - \mathbf{L} - \delta \mathbf{L}) \right] \\ & + \mathbf{t} + \delta \mathbf{t} + \delta_{\text{PFA}} \end{aligned} \quad (6.7)$$

Hierbei sind:

- $\delta \mathbf{L}$ Unsicherheit der Lichtquellenposition (KMG MPE-P)
- $\delta \mathbf{a}_i$ Unsicherheit der Aperturkoordinaten
- $\delta \mathbf{t}$ Translatorische Unsicherheit des Sensors
- δR Rotationsunsicherheit des Sensors
- δ_{PFA} Subpixel-UNSicherheit (PFA)

Die translatorische Unsicherheit:

$$\delta \mathbf{t} = \begin{bmatrix} \delta_{\text{lat},x} \\ \delta_{\text{lat},y} \\ \delta_b \end{bmatrix}$$

Die Rotationsunsicherheit:

$$\delta R = R_z(\delta \text{roll}) \cdot R_y(\delta \text{yaw}) \cdot R_x(\delta \text{pitch})$$

Die Terme δyaw , δpitch und δroll sind die Unsicherheiten der jeweiligen Rotationswinkel.

Durch Einsetzen von (6.7) in (6.5) ergibt sich die vollständige Modellgleichung von MAPS.

6.1.5 MONTE-CARLO-SIMULATION

Die Monte-Carlo-Methode stellt eine flexible Erweiterung der klassischen GUM-Analyse (Typ A und B) dar, insbesondere wenn Eingangsgrößen nicht normalverteilt sind, der Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen nichtlinear ist oder die Zielgröße mehrdimensional vorliegt. Im vorliegenden Fall handelt es sich um eine mehrdimensionale Zielgröße, deren Komponenten gleichzeitig auf die Einflussgrößen reagieren können.

Anstelle von Ableitungen wird bei der Monte-Carlo-Simulation eine große Anzahl (typischerweise 10^3 bis 10^6) zufälliger Stichproben aus den Verteilungen der Eingangsgrößen erzeugt. Für jede dieser Realisierungen wird die Zielgröße berechnet; aus der empirischen Verteilung ergeben sich unmittelbar Mittelwert und Standardunsicherheit. Aufgrund ihrer Robustheit bei nichtlinearen Systemen und heterogen verteilten Unsicherheiten wird die Monte-Carlo-Methode für die Unsicherheitsanalyse im Rahmen des MAPS-Modells [67] eingesetzt.

Neben der Modellgleichung sind für die Monte-Carlo-Simulation insbesondere die Unsicherheiten der einzelnen Einflussgrößen erforderlich. Diese wurden zu Beginn des Kapitels detailliert diskutiert und sind in Tabelle 6.1 in kompakter Form zusammengefasst.

Bei der Positionsbestimmung mittels MAPS handelt es sich um eine indirekte Messgröße mit distanzabhängiger Unsicherheit. Das bedeutet, dass sowohl die Genauigkeit des Schätzwerts als auch dessen Unsicherheit von der Distanz der Lichtquelle zum Messinstrument abhängen. Mit zunehmender Distanz sinkt die Genauigkeit, während die Unsicherheit zunimmt. Darüber hinaus steigt die Unsicherheit mit wachsendem Messwinkel.

Tabelle 6.1: Zusammenfassung relevanter Messgrößen und zugehöriger Unsicherheiten.

Messgröße	Bez.	Schätzwert	Std.-Uns. (u) / Halbbreite (a)
Bildweite	b	55,638 mm	a: 0,00189 mm
Horizontale Sensorlage	lat,x	-0,0009 mm	u: 0,00016 mm
Vertikale Sensorlage	lat,y	-0,0002 mm	u: 0,00010 mm
Sensor Roll	$roll$	-0,0010°	u: 0,00027°
Sensor Yaw	yaw	0,0034°	u: 0,00018°
Sensor Pitch	$pitch$	0,0019°	u: 0,00028°
Apt.-Koord. litho.	$x y_{a,i}$	-	a: 0,002 mm
Apt.-Koord. gebohrt	$x y_{a,i}$	-	u: 0,0645 mm
Ebenheit APM	$z_{a,i}$	0 mm	u: 0,2091 mm
Position der Lichtquelle	L	(0,028 -0,020 250,033) mm	a: 0,0006 mm
PFA	PFA	$5,5 \cdot 10^{-6}$ mm	u: 0,0013 mm

Da die Messunsicherheit nicht für jeden Punkt im Raum bestimmt werden kann, werden üblicherweise charakteristische Messbereiche definiert. Im Fall von MAPS sind dies vier Bereiche: bis 250 mm, bis 500 mm, bis 1 000 mm und bis 2 000 mm. Diese Werte geben die maximale Unsicherheit bis zu der jeweiligen Distanz an. In einigen Fällen wird nachfolgend nur die Unsicherheit des Bereichs bis 1 000 mm angegeben, um die Darstellung zu vereinfachen.

Die angegebenen Messbereiche beziehen sich ausschließlich auf die Entfernung entlang der optischen Achse. Die maximal mögliche laterale Auslenkung der Lichtquelle hängt ebenfalls von der Messdistanz

ab; der Öffnungswinkel von MAPS im Laborexperiment beträgt etwa 28,8°.

Die Monte-Carlo-Simulation (MCS) wird für drei verschiedene MAPS-Setups durchgeführt: das Legacy-MAPS sowie das neue AAP-Maskendesign, jeweils in der RGB-Variante und in der monochromen Variante.

Beim RGB-Setup der AAP-Maske beträgt der Mindestabstand der Aperturen 0,5 mm, beim monochromen Aufbau 1,5 mm. Dadurch wird genau die Anzahl an Spots pro Abbildung erzeugt, wie sie im simultanen 6DOF-Messmodus des jeweiligen Setups verwendet wird. Für die beiden AAP-Modelle werden die Sensorparameter der AV GT6400 verwendet, für das Legacy-MAPS die der AV GT3300.

Im ersten Schritt wird das vollständige Messergebnis mittels MCS ermittelt. Hierzu wird die Lichtquelle im Modell auf die nominale Position

$$\mathbf{L}_0 = (0|0|1\,000) \text{ mm}$$

gesetzt. Die MCS umfasst 50 000 Iterationen. Diese Stichprobengröße reicht aus, um eine kontinuierlich erscheinende Wahrscheinlichkeitsdichte der Zielgröße zu erhalten. Zunächst wird die Simulation mit allen Einflussgrößen gleichzeitig durchgeführt, um die kombinierte Messunsicherheit der Zielgröße zu bestimmen.

Als Mittelwert für die Position der Lichtquellen ergibt sich:

$$\mathbf{L} = (0,043| -0,017|999,945) \text{ mm.}$$

Das vollständige Messergebnis für alle drei MAPS-Setups ist in Tabelle 6.2 dargestellt.

Tabelle 6.2: Durch die MCS ermittelte Lichtquellenposition bei 1 000 mm Abstand auf der optischen Achse, mit erweiterter Messunsicherheit ($k = 2$).

Setup	L [mm]
Legacy-MAPS	$(0,043 \pm 0,003 \mid -0,017 \pm 0,003 \mid 999,945 \pm 0,432)$
AAP-RGB	$(0,031 \pm 0,089 \mid -0,022 \pm 0,088 \mid 996,091 \pm 10,766)$
AAP-Mono.	$(0,026 \pm 0,262 \mid -0,017 \pm 0,261 \mid 996,500 \pm 30,345)$

In Tabelle A.5 im Anhang sind zusätzlich die Messergebnisse für die Distanzen 250 mm, 500 mm und 2 000 mm aufgeführt.

Die Messabweichungen in x - und y -Richtung liegen bei allen drei Setups im zweistelligen Mikrometerbereich. In z -Richtung beträgt die Messabweichung der AAP-Setups bis zu 4 mm. Die zum Legacy-MAPS vergleichsweise hohe Messabweichung der z -Komponente lässt sich durch mehrere Faktoren erklären. Zum einen ist die Tiefenbestimmung in MAPS aufgrund der geometrischen Sensitivität des Triangulationsverfahrens grundsätzlich anfälliger für Eingangsunsicherheiten als die lateralen Komponenten. Mit zunehmender Messdistanz werden die aus den Spotverschiebungen resultierenden Winkeländerungen gering, sodass sich bereits geringe Abweichungen in den Apertur- oder Spotkoordinaten stark auf die berechnete z -Position auswirken. Dadurch, dass die Edelstahlaperturmaske des AAP-Setups im Vergleich zur lithografischen Glasmaske des Legacy-MAPS eine größere Ebenheitsabweichung aufweist, wirkt sich das besonders auf die z -Komponente des Messwerts aus.

Hinzu kommt, dass die geringere Aperturdichte der AAP-Maske die Anzahl unabhängiger Strahlen reduziert, wodurch die statistische

Mittelung weniger effektiv ist. Auch Unsicherheiten in der Bildweite und in der Sensortranslation wirken sich mit einem größeren Hebel auf die z -Komponente aus als auf die lateralen Koordinaten, was die gemessene Diskrepanz zusätzlich verstärkt.

Das AAP-RGB-Modell weist eine etwa dreimal kleinere Unsicherheit auf als das AAP-Monochrom-Modell. Da sich beide Modelle lediglich in der Aperturdichte der Maske unterscheiden, lässt sich daraus schließen, dass die Anzahl der auf dem Sensor abgebildeten Spots mit der Messunsicherheit korreliert. Diese Beobachtung stimmt mit der Theorie des *Gain-of-Precision* überein (siehe Abschnitt 3.1).

Die Unsicherheit des Legacy-MAPS ist im Vergleich zu den AAP-Modellen deutlich geringer. Da die gläserne, lithografisch hergestellte Aperturmaske geringere Standardunsicherheiten der Aperturkoordinaten aufweist, ist dies vermutlich die Hauptursache.

Um den Beitrag der einzelnen Einflussgrößen zur Gesamtunsicherheit zu quantifizieren, wird ein Messunsicherheitsbudget erstellt. Dazu wird die Monte-Carlo-Simulation jeweils mit nur einer aktiven Einflussgröße durchgeführt, während die Unsicherheiten aller übrigen Größen auf null gesetzt werden. Die so ermittelte Standardunsicherheit entspricht dem isolierten Beitrag der jeweiligen Einflussgröße. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.3 zusammengefasst.

Die Budgetanalyse zeigt, dass die laterale Unsicherheit der Aperturkoordinaten den größten Beitrag zur Gesamtunsicherheit liefert, sowohl bei der lithografisch gefertigten Glasmasken als auch bei der gebohrten Edelstahlmaske. Besonders stark wirkt sich dieser Einfluss auf die z -Komponente der Unsicherheit aus.

Tabelle 6.3: Messunsicherheitsbudget bei 1000 mm Distanz auf der optischen Achse. Die Einflussgrößen sind nach absteigender Standardunsicherheit ($k = 1$) sortiert.

Einflussgröße δ	Standardunsicherheit u [mm]
$\delta a_{i,\text{Stahl(Mono)}}$	(0,131 0,130 15,122)
$\delta a_{i,\text{Stahl(RGB)}}$	(0,044 0,044 5,300)
$\delta z_{a,i,\text{Stahl}}$	(0,001 0,001 0,179)
$\delta a_{i,\text{Glas}}$	(0,001 0,001 0,182)
δ_{PFA}	(0,001 0,001 0,114)
$\delta_{\text{lat},x}$	(0,000 0,000 0,011)
$\delta_{\text{lat},y}$	(0,000 0,000 0,005)
δb	(0,000 0,000 0,001)
$\delta \mathbf{L}$	(0,000 0,000 0,000)
δ_{roll}	(0,000 0,000 0,000)
δ_{yaw}	(0,000 0,000 0,000)
δ_{pitch}	(0,000 0,000 0,000)

Setup	Kombinierte Messunsicherheit $u_{c(k=1)}$
Legacy-MAPS	(0,001 0,001 0,216)
AAP-RGB	(0,044 0,044 5,286)
AAP-Mono.	(0,130 0,131 15,194)

Bei der Edelstahlmaske kommt hinzu, dass ihre Ebenheitsabweichung deutlich größer ist als bei der gläsernen APM, deren Ebenheitsabweichung im Messbereich des KMG nicht nachweisbar war. Der Unsicherheitsanteil des Peak-Finding-Algorithmus liegt in derselben Größenordnung wie die Unsicherheit der Glasaperturmase und fällt im Vergleich zu den übrigen Einflussgrößen deutlich ins Gewicht.

Die laterale Positionsunsicherheit des Sensors sowie die Unsicherheit

der Bildweite beeinflussen vorwiegend die z-Komponente im zweistelligen Mikrometerbereich. Ihr Beitrag zu den x- und y-unsicherheiten liegt dagegen unter einem Mikrometer und fällt durch Rundung in der Darstellung weg. Gleiches gilt für die Sensorrotation und die Antastunsicherheit des KMG, deren Beiträge im Nanometerbereich liegen.

Die in Tabelle 6.3 mit Null angegebenen Standardunsicherheiten wurden auf drei Nachkommastellen gerundet und sind nicht exakt null. Angesichts der deutlich dominanteren Einflüsse anderer Größen ist eine detaillierte Analyse im Nanometerbereich derzeit nicht erforderlich.

Anmerkung: Die Summe der einzelnen Standardunsicherheiten im Budget kann größer sein als die kombinierte Unsicherheit. Werden bei der Simulation alle Einflussgrößen gleichzeitig berücksichtigt, heben sich manche Effekte teilweise gegenseitig auf.

Aus dem Messunsicherheitsbudget wird ersichtlich, dass vor allem die Unsicherheit der Aperturkoordinaten der Edelstahlaperturmaske reduziert werden muss. Eine praktikable Lösung wäre die lithografische Fertigung, wie beim Legacy-MAPS, auf die bislang aus Kostengründen verzichtet wurde.

Selbst mit einer lithografisch gefertigten Maske bleibt der Beitrag der Aperturkoordinaten dominierend, wie die Werte für $\delta a_{i,glass}$ mit

$$u(\mathbf{L}) = (0,001 \mid 0,001 \mid 0,182)$$

zeigen. Das Verfahren reduziert zwar den größten Beitrag, eliminiert ihn jedoch nicht vollständig. Präzisere lithografische oder alternative

Fertigungstechniken sind verfügbar und könnten durch entsprechenden finanziellen Aufwand eingesetzt werden, um die Unsicherheit weiter zu reduzieren. Eine weitere Möglichkeit wäre, jede Aperturposition einzeln zu vermessen. Mit einem präzisen optischen Messsystem, wie dem ZEISS O-Inspect, ließe sich nicht nur die Positionsunsicherheit der Aperturen verringern, sondern auch ein individueller Schätzwert für jede Apertur bestimmen, der anstelle der nominalen Koordinaten bei der Berechnung genutzt werden könnte.

GAIN-OF-PRECISION

Der von Bielke et al. eingeführte *Gain-of-Precision* (früher *Gain of Accuracy*) beschreibt den Zugewinn an Präzision, der durch eine Erhöhung der Anzahl ausgewerteter Spots erzielt wird. Theoretisch gilt hierfür der Zusammenhang

$$GoP(n) = \sqrt{n},$$

wobei n die Anzahl der Spots ist.

Der *Gain-of-Precision* wurde bereits in den Grundlagenkapiteln diskutiert und kann nun erstmalig mithilfe der Monte-Carlo-Simulation experimentell bestimmt werden. Dazu werden Maskendesigns mit unterschiedlicher Aperturdichte in das Modell eingesetzt und die jeweils resultierende Gesamtunsicherheit ermittelt. Zum Einsatz kommen die Designs aus der AAP-Vorentwicklung. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.2 dargestellt.

Die Grafik zeigt den normierten GoP in Abhängigkeit von der Spotsanzahl. Zum Vergleich ist der theoretisch erwartete Verlauf nach

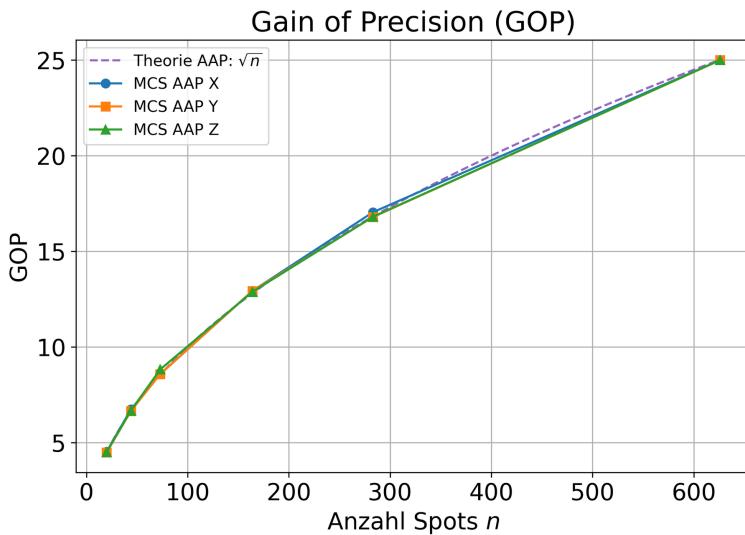


Abbildung 6.2: Vergleich des experimentell bestimmten GoP aus der Monte-Carlo-Simulation mit dem theoretisch erwarteten Verlauf \sqrt{n} . Der GoP beschreibt den relativen Zugewinn an Präzision in Abhängigkeit von der Anzahl erkannter Spots.

\sqrt{n} dargestellt. Das Experiment zeigt, dass die mit der Monte-Carlo-Simulation ermittelten Werte in enger Übereinstimmung mit dem theoretischen Verlauf stehen.

Der GoP folgt einem Wurzelverlauf. Dies bedeutet, dass insbesondere bei kleinen Spotanzahlen ein deutlicher Präzisionsgewinn durch zusätzliche Spots erzielt werden kann. Die Steigung der GoP-Kurve, also der Gewinn pro weiterem Spot, nimmt jedoch mit wachsender Spotanzahl kontinuierlich ab und verhält sich annähernd linear. Mathematisch entspricht die Steigung der Ableitung

$$\frac{d}{dn} \sqrt{n} = \frac{1}{2\sqrt{n}},$$

welche für große n gegen Null strebt. Folglich ist der zusätzliche Nutzen weiterer Spots bei sehr großen Spotanzahlen begrenzt. Für praktische Anwendungen heißt das, dass bereits eine moderate Anzahl (< 100) an Spots pro Abbildung ausreicht. Eine höhere Aperturendichte oder ein größerer Sensor führt daher nicht unbedingt zu einer proportionalen Präzisionssteigerung. Dies sollte bei zukünftigen Systemoptimierungen berücksichtigt werden.

Für das periodische Maskendesign wurde der GoP nach Bielke zu

$$GoP_{\text{periodisch}} = \sqrt{n_{\text{cols}} + n_{\text{rows}}}$$

modifiziert. Eine experimentelle Bestimmung wäre möglich, da der Aperturmaskendesigner periodische Masken mit variabler Gitterkonstante generieren kann. Da jedoch kein zukünftiger Einsatz eines periodischen Designs vorgesehen ist, wird auf eine Validierung verzichtet.

RÄUMLICHER ZUSAMMENHANG ZWISCHEN SENSORLAGE UND MESSABWEICHUNG

Sowohl Laborbeobachtungen als auch die Ergebnisse der MCS zeigen, dass ein eindimensionaler Versatz des Sensors eine dreidimensionale Verschiebung der berechneten Lichtquellenposition bewirkt. Ursache hierfür ist, dass sich bei einer lateralen Bewegung des Sensors die relative Lage zwischen Sensor und Aperturmase ändert. Dadurch rotiert das Strahlenbündel um den Schnittpunkt der optischen Achse mit der

Maske, was eine Verschiebung der berechneten Lichtquellenposition in allen drei Raumrichtungen bewirkt.

Dieser Effekt ist in Abbildung 6.3 schematisch dargestellt.

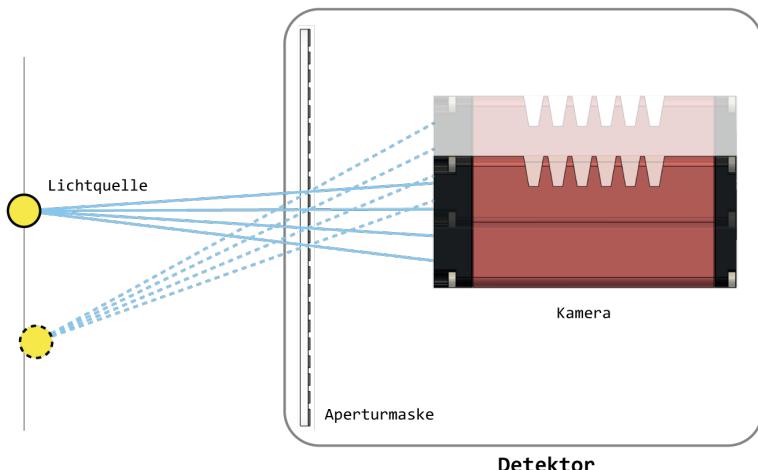


Abbildung 6.3: Illustration des Strahlenverlaufs und der dreidimensionalen Positionsänderung der LQ bei einem eindimensionalen lateralen Sensorversatz.

Bei einer axialen Bewegung des Sensors, also einer Veränderung der Bildweite, ändert sich der Abstand der Spots auf dem Sensor. Dies beeinflusst wiederum den berechneten Schnittpunkt der Strahlen im Raum und damit die ermittelte Lichtquellenposition.

Dieses Phänomen wurde in einem gezielten Laborexperiment untersucht. Hierzu wurde die Lichtquelle entlang der optischen Achse verfahren, wobei Messwerte für Distanzen zwischen ca. 475 mm und 800 mm aufgenommen wurden. Anschließend wurde der Sensor zu-

nächst in horizontaler, danach in vertikaler Richtung um jeweils 10 mm verschoben. Danach wurden erneut identische Messreihen aufgenommen. Der vergleichsweise große Versatz wurde bewusst gewählt, um den Effekt deutlicher sichtbar zu machen.

Das MAPS-Prinzip beruht auf der Annahme, dass die optische Achse durch die Mittelpunkte von Sensor und Maske verläuft. Eine laterale Verschiebung des Sensors führt jedoch dazu, dass diese Achse im Raum schiefsteht. Genau dies konnte im Laborexperiment beobachtet werden.

In Abbildung 6.4 zeigt die blaue Gerade die optische Achse bei zentrierten Komponenten. Die orangefarbene Gerade entspricht einem horizontalen Versatz von 10 mm, die grüne einem vertikalen Versatz.

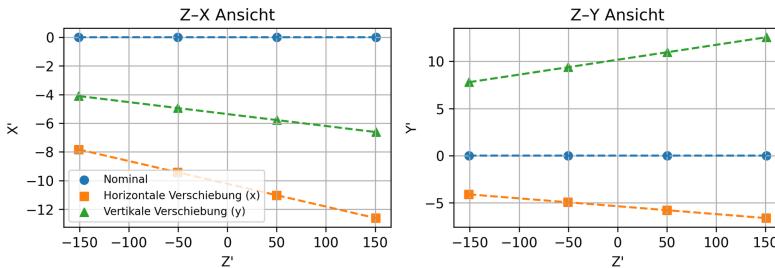


Abbildung 6.4: Optische Achsen bei nominaler und verschobener Sensorlage, normiert auf Z' (nach Steinmetz [68]).

Die Visualisierung verdeutlicht, weshalb eine laterale Verschiebung des Sensors zu einer dreidimensionalen Abweichung der Lichtquellenposition führt: Die optische Achse verläuft nun diagonal im Raum und ist nicht mehr parallel zur z-Achse und damit auch nicht orthogonal

zu den x- und y-Achsen. Die Messwerte weichen entsprechend dieser geometrischen Diskrepanz ab.

Der gleiche Effekt lässt sich auch bei einer Rotation des Sensors beobachten. Hierfür wurden in zwei Laborexperimenten systematisch Yaw- und Pitch-Winkel variiert und jeweils Messwerte entlang der optischen Achse aufgenommen. Die detaillierten Ergebnisse sind im Projektarbeitsbericht von H. Steinmetz [68] dokumentiert.

Der räumliche Zusammenhang zwischen der Sensorlage und der Messabweichung ist von besonderer Bedeutung. Bereits ein eindimensionaler Versatz oder eine reine Rotationsänderung des Sensors können systematische Abweichungen in allen drei Koordinaten der Zielgröße verursachen. Jede Lageänderung des Sensors verändert die Winkel aller erfassten Strahlen zu sämtlichen Raumachsen, nicht nur in Richtung der Bewegung.

Dies wirkt sich unmittelbar auf die Bewertung der Messunsicherheit aus: Soll etwa die Unsicherheit der Z-Koordinate reduziert werden, reicht es nicht aus, nur die unmittelbar zugeordneten Einflussgrößen wie die Bildweite zu optimieren. Stattdessen ist eine ganzheitliche Be trachtung aller relevanten geometrischen Einflussgrößen erforderlich, da diese über die räumliche Kopplung auf sämtliche Komponenten der Zielgröße wirken.

CHARAKTERISIERUNG DES MESSINSTRUMENTS

Abschließend wird MAPS hinsichtlich seiner Messunsicherheit charakterisiert. Dafür wird die MCS erneut für die vier definierten Messdistanzen durchgeführt, dieses Mal jedoch mit maximaler lateraler Auslenkung der Lichtquelle. Die Messpunkte liegen somit auf der Diagonalen, die sich aus dem Öffnungswinkel von $28,8^\circ$ ergibt. Das Modell

ist dabei auf das AAP-RGB-Setup eingestellt. Die Messbereiche, die zugehörigen axialen und diagonalen Distanzen sowie die resultierenden Unsicherheiten sind in Abbildung 6.5 dargestellt.

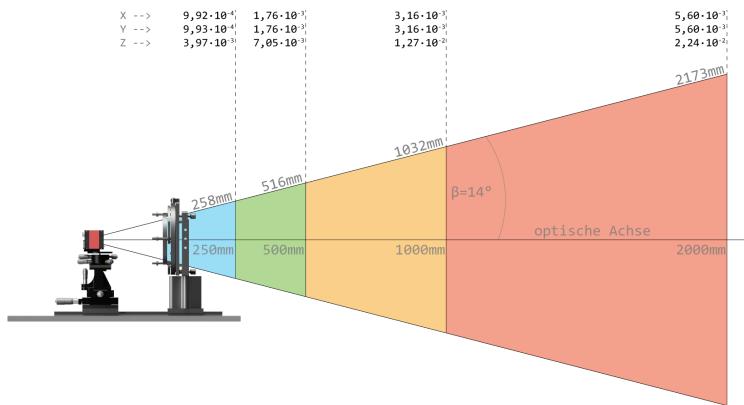


Abbildung 6.5: Vier Messbereiche entlang der optischen Achse mit zugehörigen axialen und diagonalen Distanzen sowie relativer Messunsicherheit ($k = 2$) der Diagonale. Die Messunsicherheit gilt für das AAP-RGB-Setup.

In diesem Fall wird die *relative erweiterte Messunsicherheit* ($k = 2$) angegeben. Da es sich um eine distanzabhängige Größe handelt, wird die Messunsicherheit nicht auf den Messwert, sondern auf die jeweilige Messdistanz bezogen.

Mit zunehmendem Winkel zur optischen Achse steigt die Messunsicherheit; der maximale laterale Versatz führt daher zum größten Unsicherheitswert. Die in Abbildung 6.5 dargestellten Werte stellen somit die maximal zu erwartende Unsicherheit innerhalb des farblich markierten Bereichs dar.

6.2 ALTERNATIVE KALIBRIERSTRATEGIE

Eine Möglichkeit zur Verbesserung der Genauigkeit des MAPS besteht in der Übertragung kinematischer Kalibrierverfahren aus der Robotik. Dort wird die Geometrie des Roboters als kinematische Kette modelliert, deren Parameter durch gezielte Messungen und anschließende Parameteridentifikation präzisiert werden [72], [73]. Für MAPS lässt sich ein analoges kinematisches Modell mit parametrisierbaren Freiheitsgraden aufstellen, das die relativen Positionen und Orientierungen von Sensor, Maske und Lichtquelle beschreibt. In einem ersten Schritt wird das nominelle geometrische Modell definiert, beispielsweise durch die bekannten Abstände und Ausrichtungen der Systemkomponenten. Anschließend werden gezielt Messkonfigurationen gewählt, die eine hohe Sensitivität bezüglich der zu bestimmenden Parameter aufweisen. Diese Konfigurationen können, analog zu robotischen Verfahren, unter Berücksichtigung von Erfassungsbereich, Öffnungswinkel und möglichen Abschattungen optimiert werden. Aus den aufgenommenen Messdaten werden dann mittels geeigneter Optimierungsverfahren (z. B. Gauss-Newton oder Levenberg–Marquardt) die Modellparameter so angepasst, dass die Abweichung zwischen Modellvorhersage und Messwerten minimiert wird.

Der Mehrwert dieses Ansatzes liegt in der systematischen Erfassung und Korrektur geometrischer Modellabweichungen, wie z. B. Sensor- und Maskenversatz oder Verkippung, die sich direkt auf die Messabweichung auswirken. Durch eine einmalige oder periodische Kalibrierung kann die absolute Positioniergenauigkeit verbessert und die Langzeitstabilität des Systems erhöht werden, ohne dass allein auf eine Reduktion der Einzelunsicherheiten im Unsicherheitsbudget gesetzt werden muss.

Ein weiterer Vorteil der Modellierung von MAPS als kinematische Kette liegt darin, dass die Struktur bereits aus „Links“ (z. B. Sensor, Maske, Lichtquelle) und deren Verbindungen besteht. Diese Ketten lassen sich beispielsweise im *Unified Robot Description Format* (URDF) beschreiben, das insbesondere im ROS-Umfeld verbreitet ist [74]. Damit eröffnen sich mehrere Nutzen:

- Durch die Nutzung eines URDF-Modells mit ROS-Tools kann die aktuelle Lage aller Komponenten (Translation & Rotation) einfach visualisiert und in Simulationen (etwa mit Gazebo oder RViz) eingebunden werden [75].
- Thermische Expansionen lassen sich als Änderungen in den Gelenkparametern (Längen, Abstände) abbilden — etwa durch temperaturabhängige Skalierung der Linklängen oder Gelenkköpfungen. Solche Effekte könnten über ein ROS-basiertes Setup simuliert und quantitativ bewertet werden.
- Dies erlaubt eine systematische Untersuchung der Auswirkungen thermischer Effekte auf die Gesamtunsicherheit, einschließlich der Kopplungseffekte auf alle Achskoordinaten, ohne zusätzlichen Modellierungsaufwand.

Im Rahmen künftiger Unsicherheitsanalysen würde die Erweiterung des MAPS-Modells um thermische Simulationen über URDF und ROS (z. B. in Gazebo) gezielte Einblicke in thermische Effekte liefern. Dieser Ansatz bietet eine modulare, nachverfolgbare und simulationsbasierte Erweiterung und ist deshalb zur Ergänzung empfohlen.

6.3 FAZIT UND ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Kapitel wurde die Messunsicherheitsanalyse des MAPS auf Basis einer Modellgleichung und einer Monte-Carlo-Simulation durchgeführt. Ziel war es, die relevanten Einflussgrößen systematisch zu identifizieren, deren quantitative Beiträge zur Gesamtunsicherheit zu bestimmen und das Messinstrument in verschiedenen Konfigurationen zu charakterisieren.

Ausgehend von der Modellierung der Geometrie und der Signalverarbeitungskette wurden sämtliche relevanten Einflussgrößen erfasst, die sich auf die Positionsbestimmung der Lichtquelle auswirken. Dazu gehören sowohl geometrische Größen wie Bildweite, laterale und axiale Sensorlage, Rotationslagen des Sensors sowie die Aperturkoordinaten, als auch algorithmische Komponenten wie die Subpixelgenauigkeit des Peak-Finding-Algorithmus. Für jede Einflussgröße wurden realistische Unsicherheiten ermittelt, entweder durch Herstellerangaben, empirische Messungen oder Simulationen. Einige dieser Unsicherheiten wurden indirekt ermittelt — beispielsweise ergeben sich die Lage- und Rotationsparameter des Sensors aus der Bildauswertung und sind daher unmittelbar von der Unsicherheit des PFAs abhängig.

Durch die Budgetanalyse auf Basis der MCS konnte der relative Beitrag jeder Einflussgröße isoliert und quantifiziert werden. Dabei zeigte sich, dass die laterale Unsicherheit der Aperturkoordinaten der Edelstahlmaske den größten Einzelbeitrag zur Gesamtunsicherheit liefert. Selbst bei Verwendung einer lithografisch gefertigten Maske bleiben die Aperturkoordinaten die dominierende Einflussgröße, wenn auch auf deutlich niedrigerem Niveau. Weitere signifikante Beiträge stammen von der Ebenheit der Maske und der Subpixelunsicherheit des

PFA. Die übrigen Einflussgrößen wirken sich überwiegend im Mikro- bis Nanometerbereich aus und haben somit einen geringeren Einfluss.

Ein wesentlicher wissenschaftlicher Mehrwert besteht in der erstmaligen experimentellen Bestimmung des GoP mittels MCS. Die Ergebnisse zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit dem theoretischen Verlauf $GoP(n) = \sqrt{n}$. Daraus folgt, dass insbesondere bei kleinen Spotzahlen ein signifikanter Präzisionsgewinn möglich ist, während der Nutzen zusätzlicher Spots bei sehr hohen Spotzahlen abnimmt. Dies liefert eine fundierte Grundlage für zukünftige Designentscheidungen zur Aperturdichte und Sensorgröße.

Sowohl Simulationen als auch Laborexperimente belegen, dass ein eindimensionaler Versatz oder eine Rotation des Sensors systematische Abweichungen in allen drei Raumrichtungen der Zielgröße verursacht. Dies ist auf die geometrische Kopplung im Strahlengang zurückzuführen, die zu einer Verschiebung des Sensors in einen veränderten Schnittwinkel der Strahlen führt. Die Erkenntnis verdeutlicht, dass zur Reduktion einer einzelnen Komponentenunsicherheit stets auch geometrisch gekoppelte Einflussgrößen betrachtet werden müssen.

Die abschließende Charakterisierung des MAPS-Systems zeigt die distanz- und winkelabhängige Entwicklung der relativen Messunsicherheit. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Unsicherheit mit zunehmendem Abstand sowie mit steigendem Messwinkel zunimmt und bei maximaler lateraler Auslenkung der Lichtquelle ihr Maximum erreicht. Für das AAP-RGB-Setup konnten so verlässliche Kenngrößen für vier definierte Messbereiche abgeleitet werden.

Die Analyse liefert eine umfassende quantitative Grundlage für die Bewertung und Optimierung des MAPS-Systems. Sie identifiziert die

entscheidenden Einflussgrößen, quantifiziert deren relative Bedeutung und belegt den theoretischen Zusammenhang zwischen Spontanzahl und Präzisionsgewinn experimentell. Der räumliche Kopp lungseffekt zwischen Sensorlage und Messabweichung stellt einen wichtigen Aspekt für zukünftige Systemkalibrierungen dar. Die gewonnenen Erkenntnisse ermöglichen gezielte Maßnahmen zur Reduktion der Messunsicherheit, sei es durch präzisere Fertigung der Aperturmaske, verbesserte Sensorjustage oder optimierte Maskendesigns.

Kapitel 7

DISKUSSION

Nachdem die vorigen Kapitel verschiedene Methoden und deren Anwendung zum Messen der 6DOF von Industrierobotern in Bewegung vorgestellt haben, findet in diesem Kapitel eine Diskussion der Ergebnisse im Gesamtzusammenhang statt. Im Fokus steht die Anwendbarkeit der entwickelten Methoden unter realen Einsatzbedingungen, insbesondere im Hinblick auf ihre Überführung in ein funktionsfähiges System außerhalb der Laborumgebung.

6DOF MIT MAPS

Die präzise Erfassung der Roboterpose ist in der Hochpräzisionsbearbeitung moderner Fertigungsprozesse unverzichtbar. Insbesondere bei Einzelstücken, deren Bearbeitung zeitintensiv ist und einen Großteil der Produktionskosten verursacht, sind In Situ-Messlösungen von zentraler Bedeutung. Die Möglichkeit, die Werkzeugpose während des Prozesses zu erfassen und bei Bedarf zu korrigieren, spart Zeit und Kosten, die sonst für Vorabkalibrierungen und Nachbearbeitungen anfallen würden. Obwohl aktuelle Messsysteme bereits die Bestimmung der Roboterpose in Bewegung erlauben, bestehen diese Lösungen oft aus kostenintensiven und schwer integrierbaren Teilsystemen. Einschränkungen ergeben sich zusätzlich durch die begrenzte Anzahl messbarer Freiheitsgrade, die erreichbare Präzision und die mangelnde Flexibilität.

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Methoden erweitern MAPS in sämtlichen genannten Aspekten. Das neu entwickelte, arbiträre Aperturmaskendesign sowie die Lichtquellencodierung befähigen MAPS dazu, die 6DOF-Pose von bis zu drei Targets simultan und in Bewegung zu erfassen. Dies gelingt mit nur einem einzigen, kostengünstig produzierbaren Detektor. Durch die direkte Anbindung an die Robotersteuerung ist eine Echtzeitkorrektur der Werkzeugpose während der Bearbeitung möglich [76]. Der Aperturmasken-Designer erlaubt darüber hinaus die flexible Skalierung der Maskengröße und daher des gesamten Detektors, was die Integration in kompakte Bauräume erleichtert. Die Aperiodizität der Maske erhöht den *Gain-of-Precision*, der durch die zusätzliche spektrale Codierung weiter gesteigert werden konnte.

Ein zentrales Limit von MAPS ist die erreichbare Messpräzision. Mit dem Legacy-MAPS wurde bereits eine Präzision im ein- bis zweistelligen Mikrometerbereich erreicht (abhängig von Achse und Messdistanz). Dies genügt, um die Bahngenaugkeit der meisten Robotermodelle im Zielsegment signifikant zu verbessern. Da die Präzision von der Messdistanz abhängt, sollte die Distanz zwischen Detektor und Target so klein wie möglich gehalten werden.

Mit dem AAP-Design können nun drei Lichtquellen simultan erfasst werden. Die geringere Aperturdichte reduziert zwar die Spotanzahl, jedoch erhöht das aperiodische Design den GoP. Durch die spektrale Codierung kann die Aperturdichte zusätzlich erhöht werden, und im 6DOF-Betrieb wird ein GoP erreicht, das etwa dem Dreifachen des Legacy-MAPS entspricht.

ABBILDUNGSSIMULATION

Die Abbildungssimulation bildet das Fundament der Methodenentwicklung. Der in dieser Arbeit weiterentwickelte digitale Zwilling erlaubt die realistische Simulation der Sensorabbildung. Dabei können beliebige Aperturmaskendesigns mit variablen Lichtquellen und LK-Parametern kombiniert werden, wodurch eine Vielzahl von Konfigurationen getestet werden kann. Besonders hilfreich ist dies bei simultan aktivierte Lichtquellen, deren Überlagerung realitätsnah simuliert werden kann. Neben der Optimierung der AAP-Maskenparameter erlaubt das System auch die Anpassung von Targetgröße, LED-Abständen sowie deren Anordnung im Hinblick auf Sichtbarkeit und Einsatzszenario. Auch die LK-Parameter des Detektors können skaliert und kontextbezogen validiert werden.

Ein wesentlicher Nachteil der aktuellen Simulation liegt in der fehlenden Berücksichtigung optischer Effekte, da deren Umsetzung komplex ist. Das verwendete Raytracing verfolgt lediglich einen zentralen Strahl je Apertur. Aus dessen Schnittpunkt mit der Sensorebene ergibt sich die Spotposition. Die Spotform selbst wird über eine zweidimensionale Gaußverteilung angenähert. Diese Näherung ist im Fernfeld und im Übergangsbereich ausreichend, da das reale Beugungsprofil ebenfalls glockenförmig mit zentralem Maximum ist. Im Nahfeld oder bei der Formcodierung hingegen weicht das tatsächliche Spotbild ab. In der aktuellen Simulation bleibt die Spotform unabhängig von der Objektweite konstant; lediglich die Intensität wird skaliert. Da sich jedoch auch das Beugungsmuster mit der Distanz zur Lichtquelle verändert, beeinflusst dies sowohl die Auswertealgorithmen als auch die erreichbare Messpräzision.

Für die Formcodierung wurde ein alternativer Ansatz erfolgreich eingesetzt: die Faltung der PSF mit der geometrischen Blendenform. Die-

ser Ansatz kann auch für jede MAPS-Methode im Nah- und Fernfeld verwendet werden, indem die PSF bei gegebener Objektweite berechnet und anstelle der Gaußverteilung als Spotbild eingesetzt wird. MAPS eignet sich ideal für diese Methode, da sich außer der Lochblende keine optischen Komponenten im Strahlengang befinden. Das stellt eine effiziente Alternative zum klassischen Raytracing dar, das typischerweise Millionen bis Milliarden Lichtstrahlen simulieren muss, um realistische Helligkeitsverteilungen zu erzeugen.

Der digitale Zwilling basiert zwar auf einem stochastischen Modell; dieses wurde bisher jedoch nur zur Ermittlung der Messunsicherheit genutzt. Für die reguläre Abbildungssimulation wird ein deterministisches Modell verwendet. Für statistisch belastbare Aussagen müsste jede Abbildung, wie bei der MCS, mehrere Tausend Mal simuliert werden. Da dies für jede LQ-Position wiederholt werden müsste, würde es bei vielen Messpositionen zu enormen Rechenzeiten führen. In den meisten Fällen wurde daher deterministisch gearbeitet. Lediglich das Sensor-Intensitätsrauschen wurde berücksichtigt, um die Auswertealgorithmen besser abstimmen zu können. Die Vereinfachung durch das deterministische Modell bewirkt, dass die Messqualität in der Simulation erheblich über der im Labor liegt.

EINDEUTIGKEIT UND KORRESPONDENZ

Das arbiträre Aperturmaskendesign stellt das zentrale Ergebnis dieser Arbeit dar. Es ermöglicht die Trennung überlagerter Abbildungen simultan aktiver Lichtquellen und macht Codierungsmarker hinfällig. Außerdem bildet es die Grundlage für die Bildung der Korrespondenz zwischen Messwert und Lichtquelle. In Kombination mit den entwickelten LQ-Codierungsverfahren ist erstmals eine zuverlässige Berechnung der Targetpose online möglich.

Zur Lösung der Limitation des periodischen Maskendesigns gibt es alternative Ansätze zum AAP. Versuche wurden etwa mit reduzierter Aperturdichte und größeren Markern durchgeführt; diese verliefen jedoch größtenteils erfolglos. Periodische Strukturen führen bei mehreren Lichtquellen häufig zu vollständigen Musterüberlagerungen, und die Reduktion der Aperturanzahl senkt zusätzlich die Messpräzision. Damit erweist sich die zufällige Verteilung der Aperturen als derzeit vielversprechendste Lösung.

Auch das Legacy-MAPS war grundsätzlich in der Lage, die 6DOF eines Targets zu erfassen, jedoch nur durch nacheinander geschaltete Lichtquellen. Aufgrund der vergleichsweise niedrigen Bildwiederholrate (hier ca. 14 Hz) und der Rechenzeit pro Bild ist bei bewegten Targets die Positionsabweichung zwischen den Einzelmessungen groß, um eine verlässliche Orientierung zu berechnen. Damit ist das Verfahren auf statische Messsituationen beschränkt.

Ein früher Ansatz bestand darin, die Lichtquellen hochfrequent zu schalten und die Bilder mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufzunehmen. Solche Kameras können die Limitierung teilweise kompensieren, doch ihre geringe Auflösung reduziert die Präzision. Leistungsfähige Industriekameras sind teuer und daher nur eingeschränkt praxistauglich.

Die in dieser Arbeit entwickelten Verfahren ermöglichen die Berechnung der 6DOF aus einer einzigen Abbildung. Somit gibt es keine Limitation hinsichtlich der Bewegungsgeschwindigkeit des zu messenden Roboters. Dies wurde sowohl simulativ als auch experimentell validiert. Während die monochrome AAP-Methode vollständig in die Messsoftware implementiert wurde, wurden die Spektralcodierung und die Formcodierung nur bis zu einem Proof of Concept ausgearbeitet. In zukünftigen Arbeiten sollten diese Methoden daher

weiter ausgearbeitet und durch systematische Messreihen validiert werden.

Ein weiterer Punkt künftiger Forschung sollte die Untersuchung der Praxistauglichkeit unter realen Umgebungsbedingungen sein. Fremdlicht, insbesondere bei großen Messdistanzen oder ungünstigen Winkeln, stellt eine Herausforderung dar. Die Laborexperimente wurden immer bei eingeschalteter Deckenbeleuchtung durchgeführt; zumindest konnten hierbei keine Probleme festgestellt werden. Bei starker Umgebungshelligkeit reduziert sich das SNR der Abbildung, was die Auswertung durch die Algorithmen erschwert. Mögliche Lösungen bestehen in der optischen Abschirmung, spektralen Filterung oder leistungsstärkeren LEDs. Von einer dynamischen Adaption der Algorithmen könnte ebenfalls profitiert werden.

Auch Temperaturschwankungen beeinflussen MAPS negativ, da diese zu einer Längenausdehnung der mechanischen Komponenten führen. Zwar sind Sensoren an Target und Detektor vorhanden, eine softwareseitige Korrektur ist bisher nicht implementiert. Die Umsetzung ist nicht trivial, da die verschiedenen Materialien unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten besitzen und sich damit auch unterschiedlich volumetrisch ausdehnen. Kameraseitig ist noch zu berücksichtigen, dass mit steigender Temperatur das Signal-Rausch-Verhältnis des Sensors abnimmt.

Die Software bildet den umfangreichsten Bestandteil von MAPS und ist wesentlich für die Messqualität. Die Algorithmen des Legacy-MAPS wurden über mehrere Forschungsarbeiten hinweg optimiert. Die neuen Verfahren (AAP, Spektralcodierung, Formcodierung) sind komplexer und umfangreicher, wobei viele Algorithmen nur teilweise oder gar nicht optimiert wurden. Für die meisten Algorithmen existieren außerdem Alternativen. Ein Vergleich der unterschiedlichen Lösungen und eine anschließende Optimierung können die hier erforschten

Methoden weiter verbessern.

Bezüglich des Detektors bleiben zwei Aspekte offen. Der Einfluss des Demosaicings bei RGB-Kameras auf die subpixelgenaue Schwerpunktbestimmung ist nicht untersucht. Ebenso wurde der Einfluss des Sensordeckglases auf die Messergebnisse nur für ältere Kameramodelle getestet. Dort zeigten sich systematische Fehler infolge ungleichmäßiger Lichtbrechung, die bei neueren Modellen wie der Prosilica GT6400C jedoch nicht reproduzierbar waren.

Auch die Wirkung des Mikrolinsenarrays wurde bislang nicht analysiert. Diese Struktur lenkt das Licht auf den lichtsensitiven Teil der Pixel und verändert damit die Strahlrichtung. Das kann potenziell zu einem Positionsfehler des Spotmittelpunkts führen. Bis zu welcher Pixelgröße dieser Effekt noch relevant ist, ist unklar. Während die Kamera des Legacy-MAPS weder Deckglas noch Mikrolinsenarray besitzt, sind aktuell Industriekameras meist nicht ohne diese Komponenten erhältlich. Eine nachträgliche Entfernung ist technisch anspruchsvoll, teuer oder sogar unmöglich.

MESSUNSICHERHEIT

Bei der Bewertung der Messunsicherheit sind einige Rahmenbedingungen und methodische Aspekte zu berücksichtigen, die für die Interpretation der Ergebnisse von Bedeutung sind.

Einige Unsicherheiten, wie die Bildweite (bestimmt aus KMG-Messung und CAD-Modell) sowie die Lage- und Rotationsparameter des Sensors, wurden nicht direkt, sondern aus den ermittelten Spotpositionen abgeleitet. Ihre Genauigkeit hängt daher unmittelbar von der Subpixelgenauigkeit des Peak-Finding-Algorithmus ab und ist entsprechend mit dessen Unsicherheit verknüpft.

Anstatt ausschließlich auf Fertigungsverfahren mit höherer Präzision für die Aperturmasken zu setzen, erscheint es zweckmäßiger, die Lage jeder einzelnen Apertur zu vermessen. Wenn diese mit hoher Präzision gemessen werden, kann diese Methode sogar bessere Ergebnisse liefern als ein Hochpräzisionsherstellungsverfahren.

Nach der Eliminierung der dominanten Unsicherheitsbeiträge verschiebt sich der Schwerpunkt der Analyse rasch in den Nanometerbereich. In diesem Regime gewinnen bisher vernachlässigte Einflussgrößen wie Vibration oder Luftunruhe an Bedeutung. Eine zukünftige Erweiterung des Messunsicherheitsmodells um weitere Einflussgrößen steigert nicht nur das Verständnis der Unsicherheiten von MAPS, sondern auch das Vertrauen in das Messergebnis.

Die Steigerung der Messpräzision der neuen Verfahren sollte ebenfalls Ziel künftiger Arbeiten sein. Eine vergleichbare Präzision wie beim Legacy-MAPS würde ausreichen, um den Großteil der industriell eingesetzten Roboter im vorgesehenen Zielsegment zu korrigieren. Dies kann beispielsweise durch eine lithografisch gefertigte Aperturmaseke erreicht werden. Eine deutlich höhere Präzision, wie sie etwa durch interferometrische Systeme erzielt wird, ist mit MAPS nicht realistisch. Die Stärke von MAPS liegt in seiner Flexibilität, und darauf sollten zukünftige Entwicklungen den Fokus legen.

Die Modellierung von MAPS als kinematische Kette (beispielsweise im *Unified Robot Description Format*) wurde bereits als Alternative zum Modellansatz vorgestellt. Zusätzlich zu den besseren Kalibriermöglichkeiten ist durch dieses Verfahren auch die Simulation thermischer Effekte möglich. Da Material und Dimension für jede Komponente einzeln angegeben werden, kann die volumetrische Ausdehnung der gesamten Kette berechnet werden. Werden die Längenänderungen dann in der Messsoftware berücksichtigt, kann die Genauigkeit der Messung gesteigert werden. Dieser Ansatz bietet ein modulares und

dynamisches Modell, das für zukünftige Erweiterungen empfohlen wird.

Kapitel 8

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

8.1 ZUSAMMENFASSUNG

Ziel dieser Arbeit war es, Methoden für das MAPS zu entwickeln, die durch die gleichzeitige Erfassung mehrerer Lichtquellenpositionen die Bestimmung der sechs Freiheitsgrade von Robotern in Bewegung ermöglichen.

Um die limitierenden Faktoren des bestehenden MAPS zu identifizieren, wurden dessen Funktionsprinzip, Algorithmen und die zugehörigen Komponenten im online 6DOF-Modus analysiert. Dabei zeigten sich drei Hauptprobleme:

- Die Spots mehrerer Lichtquellen überlappen; die Abbildung ist nicht mehr auswertbar.
- Die Codierungsmarker sind verdeckt; die Eindeutigkeit ist nicht gegeben.
- Es ist unklar, zu welcher Lichtquelle die einzelnen Spots zugeordnet werden sollen — die Korrespondenz ist nicht gegeben.

Das wichtigste Werkzeug zur Lösung dieser Probleme war der digitale MAPS-Zwilling. Durch dessen Weiterentwicklung war es möglich,

Abbildungen für beliebige LED-Konfigurationen und Aperturmaskendesigns zu simulieren. Ergänzend hierzu wurde der Aperturmasken-Designer entwickelt. Mit diesem Programm können Masken, periodisch oder arbiträr, mit beliebigen Parametern erstellt werden. In Kombination mit dem digitalen Zwilling lassen sich somit Abbildungen für frei wählbare MAPS-Parameter und Maskendesigns simulieren und evaluieren. Überdies dient dieses Modell als Werkzeug der Unsicherheitsanalyse. Durch die Implementierung der Monte-Carlo-Simulation wurde aus dem ursprünglich deterministischen Modell ein stochastisches Abbild des Messsystems erstellt, mit dem sich sowohl die kombinierte Messunsicherheit als auch ein vollständiges Unsicherheitsbudget nach GUM ermitteln ließen.

Von den drei ursprünglich definierten Herausforderungen konnten die ersten beiden durch das AAP-Maskendesign bewältigt werden. Durch die zufällige Anordnung der Aperturen entsteht ein eindeutiges Spotmuster in jeder Abbildung. Zusätzliche Codierungsmarker werden überflüssig, und die Abbildung ist auswertbar. Die Designparameter wurden mithilfe der Abbildungssimulation für den 6DOF-Messbetrieb optimiert. Der Fokus lag dabei auf der Messqualität und der Robustheit der Muster. Abschließend wurde das beste Design in einem Laborexperiment validiert.

Diese dritte Herausforderung, das Korrespondenzproblem, wurde durch zwei Verfahren gelöst, die jeweils mit der AAP-Maske kombiniert wurden. Das Erste basiert auf der spektralen Codierung der Lichtquellen und einer RGB-Kamera. In diesem Rahmen wurde außerdem eine Methode zum Reduzieren des Kanalübersprechens entwickelt. Das tritt auf, wenn eine Lichtquelle von mehreren Farbkanälen gleichzeitig wahrgenommen wird. Durch die spektrale Codierung können die Abbildungen über die Farbkanäle getrennt werden, was

eine höhere Aperturdichte ermöglicht und damit einen höheren GoP. In Kombination mit dem AAP-Design stellt sie die beste Methode dar.

Die Formcodierung bietet eine monochrome Alternative zur Lösung des Korrespondenzproblems. Dafür wurden geometrische Blenden zur Begrenzung der Leuchtfläche direkt auf den LEDs montiert. Dieses Verfahren ist kostengünstiger, schränkt allerdings das Messvolumen ein und erfordert eine Anpassung der MAPS-Parameter. Im Zuge der Formcodierung wurde eine Methode zur Simulation des Spotbildes entwickelt. Diese konnte neben der analytischen Methode ebenfalls zur Bestimmung des nutzbaren Arbeitsbereichs der Formcodierungsmethode genutzt werden.

Im letzten Hauptkapitel wurde eine Analyse der Messunsicherheit durchgeführt. Hierfür wurde die Prozessgleichung aus dem digitalen MAPS-Zwilling extrahiert. Es wurden die für die Messqualität relevanten Einflussgrößen diskutiert und quantifiziert. Durch das Einbringen der Unsicherheiten wurde aus der Prozessgleichung die Modellgleichung entwickelt. Mit der darauf basierenden Monte-Carlo-Simulation wurden die Gesamtunsicherheit und eine Budgetanalyse von MAPS durchgeführt.

Letzteres ermöglichte eine quantitative Bewertung der Beiträge einzelner Einflussgrößen. Die Budgetanalyse ergab, dass die Unsicherheit der Aperturkoordinaten den größten Beitrag zur Gesamtunsicherheit leistet. Weitere wesentliche Beiträge stammen von der Ebenheit der Maske und der Subpixelgenauigkeit des Peak-Finding-Algorithmus.

Über die MCS konnte erstmalig der *Gain-of-Precision* experimentell bestimmt werden und bestätigte den theoretischen Zusammenhang

$GoP(n) = \sqrt{n}$. Zudem konnte ein Zusammenhang zwischen der Sensorspose und der dreidimensionalen Abweichung der Lichtquellenposition nachgewiesen werden.

Durch die abschließende Charakterisierung des Instruments konnten die distanz- und winkelabhängigen Messunsicherheiten für festgelegte Messbereiche definiert werden. Die Systemcharakterisierung ermöglicht die Einordnung gegenüber dem Stand der Technik.

In der Diskussion wurden abschließend alle entwickelten Methoden und die erreichten Ergebnisse im Gesamtzusammenhang erläutert. Alternative Verfahren, Algorithmen und Ideen sowie die Limitationen der eigenen Methoden wurden kritisch diskutiert, um Grenzen und Möglichkeiten aufzuzeigen.

Diese Arbeit entwickelt MAPS zu einem photogrammetrischen Messinstrument weiter, das die 6DOF mehrerer Handhabungsgeräte gleichzeitig und in Bewegung erfassen kann. Die vorliegende Forschung verschiebt den Schwerpunkt auf die online 6DOF-Messung mehrerer Targets innerhalb des Sichtfelds und auf eine robuste sowie industrietaugliche Methode.

Die Möglichkeit, mehrere Industrieroboter gleichzeitig zu tracken, bietet einen entscheidenden Vorteil gegenüber interferometrischen Systemen. Mit MAPS ist dies nun auch erstmals online und für sechs Freiheitsgrade möglich. Dadurch eröffnen sich neue Einsatzmöglichkeiten, wie das Überwachen und die Echtzeitkorrektur von Bearbeitungs- oder Handlingprozessen mit mehreren Industrierobotern. Im Vergleich zu existierenden photogrammetrischen Systemen hebt sich MAPS zusätzlich durch eine höhere Messpräzision, die Skalierbarkeit und das große Messvolumen ab.

Die Software von MAPS ist konsequent auf eine hohe Messfrequenz im 6DOF-Betrieb ausgelegt: schlanke, performante Algorithmen und eine optimierte Bildauswertung minimieren Berechnungszeiten und Ressourcenverbrauch. Damit wurde nicht nur die Machbarkeit adressiert, sondern auch die Effizienz, die für eine Echtzeitanwendung entscheidend ist.

8.2 AUSBLICK

Im Folgenden werden ausgewählte Ideen und Ansatzpunkte vorgestellt, die mögliche Erweiterungen der in dieser Arbeit entwickelten Methoden aufzeigen. Im Mittelpunkt stehen dabei:

- Gleichzeitiges Messen mehrerer Geräte
- Erweiterung des digitalen Zwillings und der Simulation
- Modellierung als kinematische Kette
- Skalierbarkeit.

Mit der spektralen AAP-Methode können bis zu drei 6DOF-Targets simultan erfasst werden, da jeder RGB-Kanal wie eine unabhängige monochrome Kamera fungiert. Auf diese Weise lassen sich beispielsweise bis zu drei Industrieroboter oder andere Handhabungssysteme parallel im laufenden Betrieb vermessen. Dies ermöglicht eine kontinuierliche Verfolgung der Werkzeuge auch bei komplexen Bearbeitungsprozessen mit mehreren Geräten, wie exemplarisch in Abbildung 5.18 dargestellt. Darüber hinaus erlaubt die Methode eine präzise relative Ausrichtung von Werkstück und Werkzeug, was insbesondere bei alternierenden Prozessabläufen von hoher Relevanz ist. Mit dem

aktuellen Entwicklungsstand von MAPS ist das prinzipiell möglich, das Verfahren ist allerdings nicht ausgereift und erfordert weitere Arbeit.

Der digitale Zwilling bildet die Grundlage für Optimierungen von MAPS im Hinblick auf Messqualität und Messfrequenz. Eine Erweiterung der Auswertealgorithmen sowie der Methoden zur Analyse der Messunsicherheit würde das Messinstrument künftig deutlich aufwerten. Insbesondere die Einbeziehung optischer Effekte oder der Einsatz von realistischem Raytracing könnten die Qualität der Abbildungssimulation steigern. Gerade dann, wenn die bestehenden Grenzen von MAPS perspektivisch erweitert werden sollen, erweist sich ein präziseres Modell als wesentlicher Vorteil.

Anstelle eines rein mathematischen Modells wäre auch der Einsatz eines kinematischen Modells denkbar. Für solche Modelle existieren bereits etablierte Beschreibungsformate, die vor allem in der Robotik Anwendung finden. Eine Übertragung dieser Ansätze auf MAPS hätte den Vorteil, dass auf bestehende Werkzeuge zurückgegriffen werden kann. Dazu zählen unter anderem Kalibrierverfahren, Methoden zur Kompensation von Wärmeausdehnung und Unsicherheitsanalysen. Zudem ließe sich die mit kinematischen Modellen verbundene Modularität nutzen, um die Anpassungs- und Erweiterungsfähigkeit des Systems zu erhöhen.

Der letzte Aspekt betrifft die Skalierbarkeit des MAPS. Da der MAPS-Detektor lediglich aus zwei Kernkomponenten besteht, ist die Anpassung der Systemgröße vergleichsweise einfach umsetzbar. Dank des Aperturmasken-Designers können Masken beliebiger Größe entworfen und für die Fertigung vorbereitet werden. Dies eröffnet die Möglichkeit, einen kompakten, handgroßen Detektor zu realisieren, der sich flexibel in bestehende Maschinenumgebungen integrieren lässt. Durch die Verteilung mehrerer solcher Detektoren innerhalb

einer Roboterzelle kann die Sichtbarkeit des Targets verbessert und dadurch der nutzbare Bewegungsfreiraum des Roboters erhöht werden. Auf der anderen Seite ist auch eine Vergrößerung des Detektors denkbar. Über das Größenverhältnis zwischen Aperturmaske und Sensor lässt sich der Öffnungswinkel des Detektors einstellen. Eine größere Aperturmaske würde ein erweitertes Messvolumen ermöglichen, während eine größere Sensorfläche den *Gain-of-Precision* erhöht. Denkbar wäre darüber hinaus der Einsatz eines Sensorarrays nach dem Vorbild großskaliger astronomischer Teleskope, etwa dem Large Synoptic Survey Telescope (LSST) des Vera C. Rubin Observatory in Chile [77].

Prinzipiell lässt sich mit MAPS jedes Objekt tracken, an dem eine LED befestigt werden kann; der Anwendungsbereich ist damit nicht auf Bearbeitungs- oder Handlingaufgaben beschränkt. MAPS eignet sich auch für den Einsatz in vollautomatisierten, sogenannten *Dark Factories*, die ohne menschliches Personal betrieben werden und daher keine Umgebungsbeleuchtung erfordern. Denkbar ist etwa eine Deckeninstallation des Detektors zur übergeordneten Überwachung von autonomen mobilen Robotern, die sich frei im Raum orientieren und Kisten oder Behälter transportieren, wie sie typischerweise in Lager- und Produktionsumgebungen eingesetzt werden. Insgesamt ermöglicht MAPS damit eine sichtfeldbasierte, skalierbare und infrastrukturugliche Lösung für die simultane Erfassung zahlreicher Komponenten in industriellen Anwendungen.

Anhang A

ALLGEMEINE ERGÄNZUNGEN

Tabelle A.1: Mit MAPS vergleichbare optische Messgeräte — Verfahren und spezifizierte Leistungsdaten.

Name	Messverfahren	DOF	Genauigkeit / Präzision (Auszug)
Leica Absolute Tracker AT960 (SMR)	Lasertracker (ADM/IFM)	3DOF	MPE: $\pm (15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m}/\text{m})$ [78].
Leica AT960 + T-Probe	Lasertracker + 6DOF-Probe	6DOF	T-Probe-Unsicherheit je nach Konfiguration typ. $30 - 100 \mu\text{m}$ [79].
FARO Vantage S/E (SMR)	Lasertracker (ADM)	3DOF	Distanz-MPE: $16 \mu\text{m} + 0.8 \mu\text{m}/\text{m}$ [80].
FARO Vantage + 6Probe	Lasertracker + 6DOF-Probe	6DOF	Probing-MPE: $50 - 95 \mu\text{m} + 5 \mu\text{m}/\text{m}$ [81].
API Radian (Core/Plus/Pro)	Lasertracker (ADM/IFM)	3DOF	Volumetrische MPE ab $10 - 15 \mu\text{m} + 5 \mu\text{m}/\text{m}$ [82].
Creaform C-Track + HanddyPROBE	Optisches CMM (Stereo + Handtaster)	6DOF	Punktgenauigkeit typ. $25 - 30 \mu\text{m}$; $> 60 \mu\text{m}$ [83].
KEYENCE 3D Robot Vision (CV-X + RB-500/800/1200)	Strukturlicht (Streifenprojektion) mit 4 Kameras	6DOF	Wiederholgenauigkeit ($\pm 3\sigma$): $\pm 0,1 \text{ mm}$ (RB-500), $\pm 0,2 \text{ mm}$ (RB-800), $\pm 0,4 \text{ mm}$ (RB-1200) [84].

Tabelle A.1: Mit MAPS vergleichbare optische Messgeräte — Verfahren und spezifizierte Leistungsdaten (Fortsetzung).

Name	Messverfahren	DOF	Genauigkeit / Präzision (Auszug)	
KEYENCE XM-5000 (3D-Fertigungs-messsystem)	Optisches CMM (IR-Marker-Tracking, Dualkamera, handgeführter Messstaster)	3DOF	Messgenauigkeit: $\pm(7 + 9L/1000) \mu\text{m}$ (ISO 10360-2); Wiederholgenauigkeit: $\pm 3 \mu\text{m}$ [85]	
Vicon (Vantage/VALK)	Multi-Kamera IR-Mocap	6DOF	Sub-mm; in kleinen Volumina teils $\approx 0.02 - 0.1 \text{ mm}$ [86].	
OptiTrack (Prime/Motive)	Multi-Kamera IR-Mocap	6DOF	Typisch $\leq 0.2 - 0.3 \text{ mm}$ (setup-abhängig) [87].	
ZEISS/GOM TRITOP	Photogrammetrie 3DOF (targetbasiert)	3DOF	Richtwert: $\pm (5 + L/50) \mu\text{m}$ (mit L in mm) [88].	
Camsense S	IR-Stereokamera, aktive Marker	6DOF	$\approx 0.08 - 0.21 \text{ mm}$ ($2 - 5 \text{ m}$ Distanz) [89].	
HTC vive	VI- (Light- + house/Tracker)	IR-Sweep + IMU (VR-Tracking)	6DOF	Statisch $\sim 0.2 \text{ mm}$; dynamisch i. d. R. $2 - 5 \text{ mm}$ [90].

Hinweis: Werte sind hersteller- bzw. literaturabhängig und vom Messvolumen, der Kalibrierung und der Szenenkonfiguration abhängig.

Tabelle A.2: Ergebnis der relativen Messabweichung und -unsicherheit der acht Mas-kendesigns aus den Simulationen mit jeweils 5184 Messwerten.

Versuch #	Δx_{rel_x}	u_{rel_x}	Δx_{rel_y}	u_{rel_y}	Δx_{rel_Z}	u_{rel_Z}
1	$6,4 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$-1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$-2,6 \cdot 10^{-2}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$
2	$-1,2 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-4}$	$-9,0 \cdot 10^{-5}$	$8,7 \cdot 10^{-5}$	$-2,0 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$
3	$6,3 \cdot 10^{-5}$	$5,5 \cdot 10^{-5}$	$-8,1 \cdot 10^{-5}$	$5,2 \cdot 10^{-5}$	$-2,3 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$
4	$-1,1 \cdot 10^{-4}$	$9,5 \cdot 10^{-5}$	$-2,8 \cdot 10^{-4}$	$8,9 \cdot 10^{-5}$	$-6,3 \cdot 10^{-3}$	$6,2 \cdot 10^{-4}$
5	$-1,6 \cdot 10^{-4}$	$4,2 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$8,0 \cdot 10^{-4}$	$-1,5 \cdot 10^{-2}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$
6	$-2,1 \cdot 10^{-3}$	$9,6 \cdot 10^{-4}$	$5,4 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$-4,8 \cdot 10^{-2}$	$5,8 \cdot 10^{-3}$
7	$-1,2 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$6,8 \cdot 10^{-4}$	$-2,0 \cdot 10^{-2}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$
8	$7,5 \cdot 10^{-4}$	$6,5 \cdot 10^{-4}$	$8,4 \cdot 10^{-5}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$	$-1,9 \cdot 10^{-2}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$

Tabelle A.3: Ergebnis der Robustheit und von der Software ausgewertete Spots der acht Maskendesigns aus den Simulationen mit jeweils 5184 Messwerten.

Versuch #	Robustheit [%]	\emptyset Spots
1	99,09	279
2	95,04	241
3	98,86	144
4	46,05	94
5	94,00	53
6	43,77	16
7	93,11	49
8	83,89	23

Tabelle A.4: Vergleich der relativen Messabweichung und -unsicherheit zwischen simultaner und sequenzieller Simulation sowie dem Laborexperiment mit jeweils 1640 Messwerten.

Experiment	Δx_{rel_X}	u_{rel_X}	Δx_{rel_Y}	u_{rel_Y}	Δx_{rel_Z}	u_{rel_Z}
Simultan	-2,2 · 10 ⁻⁶	4,8 · 10 ⁻⁶	-3,8 · 10 ⁻⁵	5,3 · 10 ⁻⁶	-9,9 · 10 ⁻⁵	7,1 · 10 ⁻⁵
Labor	-8,6 · 10 ⁻⁴	6,3 · 10 ⁻⁵	1,1 · 10 ⁻³	9,7 · 10 ⁻⁵	-1,9 · 10 ⁻⁴	1,1 · 10 ⁻⁴
Sequenziell	3,8 · 10 ⁻⁶	1,1 · 10 ⁻⁷	-9,6 · 10 ⁻⁷	1,1 · 10 ⁻⁷	-5,5 · 10 ⁻⁶	1,5 · 10 ⁻⁶
$\Delta x_{rel_{pitch(X)}}$	$u_{rel_{pitch(X)}}$	$\Delta x_{rel_{yaw(Y)}}$	$u_{rel_{yaw(Y)}}$	$\Delta x_{rel_{roll(Z)}}$	$u_{rel_{roll(Z)}}$	
Simultan	2,8 · 10 ⁻⁴	9,3 · 10 ⁻⁵	-9,6 · 10 ⁻⁵	1,3 · 10 ⁻⁴	-4,9 · 10 ⁻⁵	9,0 · 10 ⁻⁶
Labor	4,6 · 10 ⁻²	3,9 · 10 ⁻³	-4,4 · 10 ⁻³	2,4 · 10 ⁻⁴	-8,6 · 10 ⁻⁵	6,9 · 10 ⁻⁵
Sequenziell	-1,2 · 10 ⁻⁵	3,3 · 10 ⁻⁶	1,1 · 10 ⁻⁵	3,2 · 10 ⁻⁶	-1,1 · 10 ⁻⁵	1,4 · 10 ⁻⁶

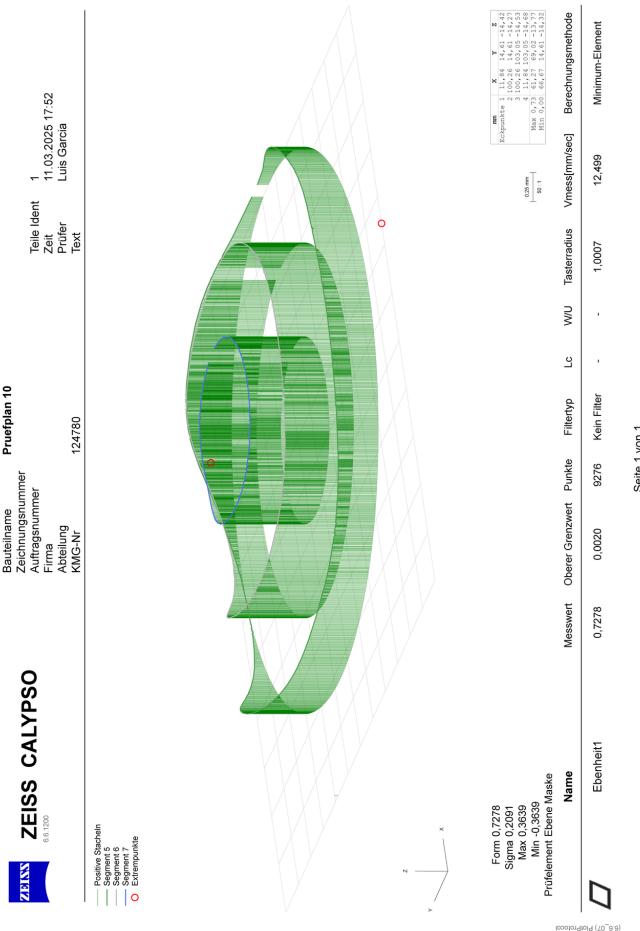


Abbildung A.1

Tabelle A.5: Durch die MCS ermittelte Lichtquellenposition bei vier Distanzen auf der optischen Achse, mit erweiterter Messunsicherheit ($k = 2$).

Setup	L [mm] bei 250 mm Distanz
Legacy-MAPS	(0,028 \pm 0,001 -0,020 \pm 0,001 250,032 \pm 0,030)
AAP-RGB	(0,028 \pm 0,028 -0,020 \pm 0,028 249,386 \pm 0,877)
AAP-Mono.	(0,029 \pm 0,087 -0,021 \pm 0,087 249,408 \pm 2,699)
Setup	L [mm] bei 500 mm Distanz
Legacy-MAPS	(0,028 \pm 0,001 -0,020 \pm 0,002 500,023 \pm 0,114)
AAP-RGB	(0,027 \pm 0,048 -0,020 \pm 0,048 498,925 \pm 2,989)
AAP-Mono.	(0,030 \pm 0,148 -0,014 \pm 0,148 498,049 \pm 9,138)
Setup	L [mm] bei 1000 mm Distanz
Legacy-MAPS	(0,043 \pm 0,003 -0,017 \pm 0,003 999,945 \pm 0,432)
AAP-RGB	(0,031 \pm 0,089 -0,022 \pm 0,088 996,091 \pm 10,766)
AAP-Mono.	(0,026 \pm 0,262 -0,017 \pm 0,261 996,500 \pm 30,345)
Setup	L [mm] bei 2000 mm Distanz
Legacy-MAPS	(0,086 \pm 0,028 -0,033 \pm 0,028 1999,324 \pm 1,684)
AAP-RGB	(0,042 \pm 0,156 -0,033 \pm 0,153 1992,073 \pm 33,485)
AAP-Mono.	(0,081 \pm 0,462 +0,008 \pm 0,460 1992,101 \pm 98,237)

Anhang B

GALERIE



Abbildung B.1: Kompakter Prototyp zur Platzierung in einer Roboterzelle oder extern auf einem Stativ.

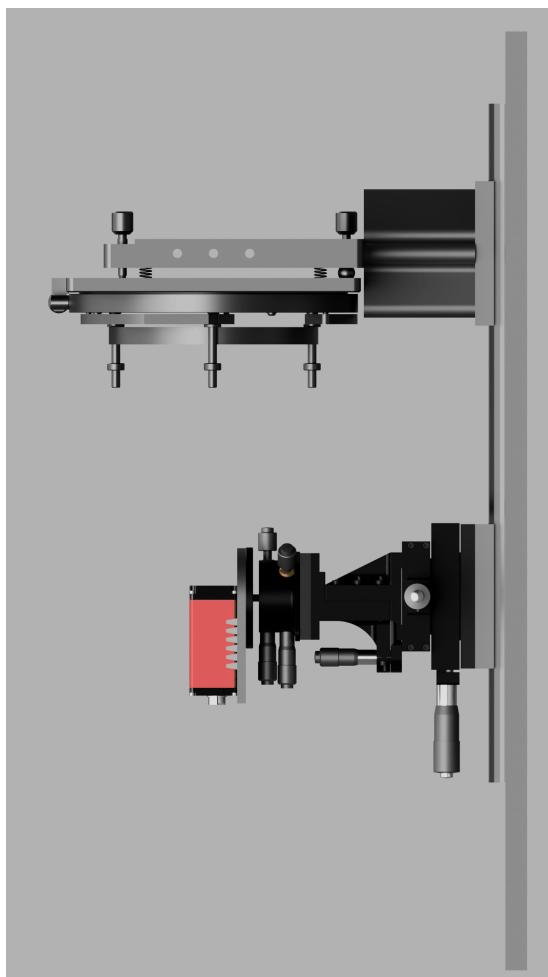


Abbildung B.2: Seitenansicht des Laborexperiments.



Abbildung B.3: Gerenderte Darstellung des Laborexperiments mit Umhausung (hier mit transparenten Scheiben).



Abbildung B.4: Schnittbild eines MAPS-Prototyps und Ansicht auf das Roboter-Target.

ABKÜRZUNGEN, FORMELZEICHEN UND BEGRIFFE

ABKÜRZUNGEN

Abkürzung/Begriff	Bedeutung
AAP	Arbiträres Aperturpattern
APM	Aperturmaske
AQL	Acceptable Quality Level
AV	Allied Vision
CCD	Charge-Coupled Device
CGH	Computergeneriertes Hologramm
CNC	Computer numerical control
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DIN	Deutsches Institut für Normung
DOF	Degrees of Freedom (Freiheitsgrade)
DWL	Dominant Wavelength
Eindeutigkeit	Eindeutigkeit eines abgebildeten Maskenausschnitts
FEM	Finite-Elemente-Methode
FDN	Fixed Pattern Noise
GoP	<i>Gain-of-Precision</i>
GPIO	General Purpose Input/Output
GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
ISO	Internationale Organisation für Normung
kd-Tree	<i>k-dimensional-Tree</i>
KMG	Koordinatenmessgerät
Korrespondenz	Beziehung zwischen Lichtquelle und Messwert

KS/CS	Koordinatensystem
LED	Light-Emitting Diode
LK	Lochkamera
LQ/LS	Lichtquelle
MAPS	Multi-Aperture Positioning System
MCS	Monte-Carlo-Simulation
MPE_E	Längenmessunsicherheit
MPE_P	Volumetrische Antastabweichung
NNA	<i>Nearest neighbour algorithm</i>
Pairing	Schafft die Relation zwischen Lichtspot und Apertur
PCB	Printed circuit board
PFA	Peak Finding Algorithm
PSF	Point-Spread-Function
PWM	Pulse-Width Modulation
Relation	Verknüpfung zwischen Lichtspot und Apertur
RGB	Rot-Grün-Blau
ROS	Robot Operating System
RPA	<i>Random-Placement-Algorithm</i>
Separation	Trennung der kombinierten Abbildung in die Einzelabbildungen
SMD	Surface-Mounted Device
SNR	Signal-Rausch-Verhältnis
SPG	Subpixel Accuracy
TIF/TIFF	Tagged Image File Format
TMA	Template Matching Algorithmus
TCP	Tool Center Point
URDF	Unified Robot Description Format
ZIM	Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand

FORMELZEICHEN

Formelzeichen	Bedeutung
A_s	Flächeninhalt eines Spots
B, s_{img}	Bildgröße
B^*	Abstand der Spots auf dem Sensor
B_1, B_2	Abstand Spot zur optischen Achse der Blende
C_k	Anzahl Kombinationen ohne Wiederholung
CS_A	Bewegtes Koordinatensystem
CS_{MAPS}	Koordinatensystem MAPS
CS_R	Koordinatensystem Referenz
D_A	Durchmesser der Aperturen
D_{opt}	Optimaler Aperturdurchmesser
D_P	Distanz zwischen Punkten einer Punktewolke
F	Fresnel-Zahl
G, s_{obj}	Gegenstandsgröße
$GoP(n)$	<i>Gain-of-Precision</i>
G_1, G_2	Abstand LQ zur optischen Achse der Blende
LS_n	Lichtquelle; $n \in \{0, 1, 2\}$
\mathbf{L}_0, \mathbf{L}	(Nominal) Lichtquellenposition
M	Mischmatrix
N_F	Anzahl der fehlerhaften Messwerte
N_T	Anzahl der gesamten Messwerte
P_B	Punkt auf der Sensorebene
P_M	Punkt auf der Maskenebene
R	Rotationsmatrix, Sensorrotation
R^*	Robustheit
R, G, B_{cam}	Gemessener Sensor-Farbkanalwert
R, G, B_{ideal}	Idealer Sensor-Farbkanalwert

R, G, B_{unmixed}	Entmischter Sensor-Farbkanalwert
S	Durchmesser Zerstreuungskreis
T	Übergangsmatrix
T_E	Transformationsmatrix zwischen Sensorebene und Maskenebene
\mathbf{a}_i	Aperturkoordinaten
b	Bildweite, Axiale Sensorposition
β	Abbildungsverhältnis
$\delta \mathbf{a}_i$	Einflussgröße Aperturkoordinaten
δb	Einflussgröße Bildweite
$\delta \mathbf{L}$	Einflussgröße Lichtquellenposition
δPFA	Einflussgröße PFA-Subpixelgenauigkeit
δR	Einflussgröße Sensorrotation
δt	Einflussgröße Sensortranslation
g	Gegenstandsweite
g_{\max}	Maximale Gegenstandsweite
$g(t)$	Gerade von Spot zu Apertur
h	Abstand der Aperturen
k	Erweiterungsfaktor
k_D	Justierbarer Dämpfungsfaktor
λ	Lichtwellenlänge
l_r	Räumliche Kohärenzlänge
lat_x, lat_y	Laterale Position des Sensors
n_A	Anzahl der Aperturen einer Maske
n_{eff}	Effektive Stichprobengröße
$n_{\text{cols}}, n_{\text{rows}}$	Anzahl Spalten bzw. Reihen im Spotmuster
n_{cp}	Anzahl der Konturpunkte eines Spots im Binärbild
n_{px}	Anzahl Pixel je Kontur
n, n_{spots}	Anzahl Spots im Spotmuster

p	Pixelpitch
r	Distanz zwischen Lichtquelle und Detektor
r_a	Radius der Kreisblende
r_1, r_2	Grenzdistanz für räumliche Kohärenz
r_{Airy}	Airy-Radius
r_T	Adaptiver kd-Tree Radius
r_{Tree}	kd-Tree Radius
$\mathbf{s_i}$	Spotkoordinaten
σ_D	Standardabweichung der Distanz zwischen den Punkten einer Punktwolke
σ_{rand}	Standardabweichung der zufälligen Messabweichung
σ_{sys}	Standardabweichung der systematischen Messabweichung
σ_{tot}	Standardabweichung der Gesamtmessabweichung
t	Sensortranslation
τ_{ov}	Schwellenwert bei Spotfilterung nach Flächeninhalt [px]
τ_{rm}	Schwellenwert für das Entfernen von Subtraktionsrückständen [px]
τ_{seg}	Schwellenwert für Segmentierung
θ	Eulersche Drehwinkel (x, y, z)
δ_A	Mindestabstand zwischen zwei Aperturen
$\delta_{s_{\min}}$	Minimale Verschmelzdistanz [px]
u	Messunsicherheit
u_c	Kombinierte Messunsicherheit
u_{rel}	Relative Messunsicherheit
x_{rel}	Relative Messabweichung
$yaw, pitch, roll$	Sensordrehwinkel

BETREUTE ARBEITEN

- H. Steinmetz, *Geometrical Description, Calibration and Determination of Measurement Uncertainty Budget for MAPS by Monte-Carlo-Simulation*, Projektarbeit, betreut im Rahmen der vorliegenden Dissertation, 2024
- E. Foorden, *MAPS - Utilizing Multiple Wavelengths of Light*. Projektarbeit, betreut im Rahmen der vorliegenden Dissertation, 2024
- F. Schneider, *Adaptives Template-Matching beim MAPS-Messinstrument*, Projektarbeit, betreut im Rahmen der vorliegenden Dissertation, 2025

WISSENSCHAFTLICHE PUBLIKATIONEN

- L. Garcia, U. Bielke, C. Neumann und R. Börret, „Machine Learning Based Position Prediction of a Target Tracked by Multi-Aperture Positioning System,“ *International Journal of Automation Technology*, Jg. 17, Nr. 3, S. 305–313, 2023.
- L. Garcia, C. Neumann und R. Börret, „Online 6DOF metrology with MAPS utilizing a unique aperture pattern mask,“ *Optical Sensing and Precision Metrology*, J. Scheuer, Hrsg., International Society for Optics und Photonics, Bd. 13380, 2025, S. 1 338 005.
- L. Garcia, C. Neumann und R. Börret, „Solution to preserve correspondence of measurement and light source using multiple simultaneously with MAPS,“ *2024 IEEE 33rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2024, S. 1–8.
- L. Garcia, U. Bielke, C. Neumann u. a., „Online position correction approach of an industrial robot by using a new photogrammetric measurement system,“ *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Jg. 237, Nr. 13, S. 2119–2129, 2023. eprint: <https://doi.org/10.1177/09544054221131156>.
- L. Garcia, U. Bielke und R. Boerret, „Accuracy evaluation of a new 3D photogrammetric position measurement system for 6D printing,“ *Photonic Instrumentation Engineering X*, L. E. Busse und Y. Soskind, Hrsg., International Society for Optics und Photonics, Bd. 12428, 2023, S. 124280D.

PUBLIKATIONEN ALS CO-AUTHOR

- U. Bielke, L. Garcia, D. Harrison u. a., „Photogrammetric approach for measuring the position of a Tool-Center-Point using pinhole optics,“ *To be published: The 41st MATADOR Conference*, 2022.
- U. Bielke, L. Garcia, D. Harrison u. a., „Entwicklung einer Simulationsmethodik für das Multi-Aperture-Positioning-System,“ in, *Photogrammetrie - Laserscanning - Optische 3D-Messtechnik*, T. Luhmann und C. Schumacher, Hrsg., 2022, S. 344–356,
- U. Bielke, L. Garcia, D. Harrison u. a., „Simulation and accuracy evaluation of a new 3D photogrammetric position measurement system,“ in, *22nd International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology*, 2022.

DANKSAGUNG

Mein herzlicher Dank geht an alle, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben und mich während der Promotion unterstützt haben.

Dazu gilt mein besonderer Dank zunächst gleichermaßen meinem Doktorvater Dr. Cornelius Neumann, der mich als Doktorand am LTI aufgenommen und betreut hat, sowie meinem Chef und Korreferenten Dr. Rainer Börret, der mich hochschulseitig immer unterstützt hat. Ohne euren Rückwind und das mir entgegengebrachte Vertrauen wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Ein weiterer Dank geht an Dr. Klaus Trampert für die vielen konstruktiven Gespräche und Diskussionen über die Messtechnik, die mein Verständnis weit über mein Hochschulniveau katapultierten.

Des weiteren danke ich allen meinen Kollegen am ZOT, die mich während meiner Arbeit unterstützt und ertragen haben. Mein besonderer Dank geht an Uwe Bielke, Adam Wilczek, Dominik Grupp, Christian Alexander Schmidt, Saskia Sichermann, Nico Zettler und Lukas Schwörer. Euer vielseitiger Input und die Unterstützung hardware- und softwareseitig haben mir sehr geholfen. Darüber hinaus bedanke ich mich bei meinen Studis: Hendrik Steinmetz, Eike Foorden und Felix Schneider, die einen nicht unerheblichen Teil zu meiner Arbeit beigetragen haben.

Außerdem danke ich der Arbeitsgruppe Neumann am LTI und meinen Doktorbrüdern und -schwestern für die offenen Ohren und Ideen innerhalb der wöchentlichen Runde.

DANKSAGUNG

Weiter möchte ich Horst Müller und dem Team der Fakultät Optik und Mechatronik danken, die mich in vielerlei Hinsicht unterstützt haben. Zudem danke ich Dr. Ralf von Baer für die Möglichkeit, mich während meiner Promotion an der Lehre zu beteiligen.

Schließlich möchte ich meiner Familie für deren Rückhalt und die Unterstützung, die sie mir jederzeit gegeben hat, bedanken.

Luis Alexander Garcia Barth

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1.1:	Gerendertes Bild einer Roboter-Bearbeitungszelle (rechts) mit Werkzeug und Target. Als externes Messgerät dient MAPS (links).	4
Abbildung 2.1:	Schematische Zeichnung der Lochkamera (nach Schmidt-Ploch [5]).	10
Abbildung 2.2:	Beugungsscheibchen, die durch Beugung der Lichtstrahlen an einer kreisförmigen Blende entstehen.	12
Abbildung 2.3:	Beugungsmuster an der Kreisblende im Nahfeld (links), Übergangsbereich (mitte) und Fernfeld (rechts) [10].	14
Abbildung 2.4:	Definition des Koordinatensystems CS_T des LED-Targets anhand der Positionen dreier Lichtquellen im euklidischen Raum.	17
Abbildung 2.5:	Definition der Orientierung durch Euler-Winkel. Basiskoordinatensystem (x,y,z) , gedrehtes System (X,Y,Z) und Knotenlinie (N)	20
Abbildung 3.1:	Schematische Darstellung des MAPS: Das Licht der Target-LEDs durchscheint die Aperturen der Maske und wird auf den Kamerasensor projiziert.	26
Abbildung 3.2:	Abbildungsprinzip der Lochkamera mit einem Loch (nach Bielke, Garcia, Harrison u. a. [26]).	27

Abbildung 3.3: Geometrische Optik der Multi-Apertur Lochkamera mit zwei Löchern (nach Bielke, Garcia, Harrison u. a. [26]).	28
Abbildung 3.4: Darstellung der Lichtquelle, der Aperturmaske und der resultierenden Sensorabbildung.	29
Abbildung 3.5: Schematische Darstellung des LED-Targets. Eingezeichnet sind die Lichtquellen, die Vektoren und das Koordinatensystem.	31
Abbildung 3.6: Fotografie des experimentellen Aufbaus, montiert an einem KMG.	34
Abbildung 3.7: Verschiedene LED-Targets für unterschiedliche Anwendungen.	35
Abbildung 3.8: Zeichnung und Montageplatte der XQ-E LED.	35
Abbildung 3.9: Gerendertes 3D-Modell des Detektors (hier ohne Abdeckung und Montageplatte).	37
Abbildung 3.10: Gläserne Aperturmaske mit periodischem Aperturdesign.	38
Abbildung 3.11: Übersicht über die wichtigsten MAPS-Softwarealgorithmen.	40
Abbildung 3.12: Kohärenzbereiche in Abhängigkeit von Aperturabstand d_A und Aperturdurchmesser D_A in Relation zur Messdistanz r	51
Abbildung 3.13: Achsdrift des KMGs im Stillstand über eine Zeitspanne von 50 Stunden [35].	55
Abbildung 3.14: Standardabweichung des Messwerts gegenüber dem Messwinkel zwischen Lichtquelle und Detektor [35].	56
Abbildung 3.15: Vergleich der systematischen und zufälligen Messabweichung zwischen dem Moments- und dem Gauß-Algorithmus [34].	57

Abbildung 3.16: Vergleich der Subpixelgenauigkeit gegenüber der Spotpixelgröße zwischen dem Moments- und dem Gauß-Algorithmus [34].	58
Abbildung 3.17: Vergleich der Subpixelgenauigkeit gegenüber dem Spotzentrumoffset zwischen dem Moments- und dem Gauß-Algorithmus [34].	61
Abbildung 3.18: Ausschnitt einer MAPS-Aufnahme bei drei gleichzeitig eingeschalteten Lichtquellen unter Einsatz der periodischen Aperturmaske.	63
Abbildung 4.1: Arbiträres Aperturmaskendesign und abgebildeter Ausschnitt auf dem Sensor.	70
Abbildung 4.2: Arbiträre Aperturmaske aus Edelstahl in der Zentrierhalterung.	72
Abbildung 4.3: PCB-Target montiert an einem KMG.	74
Abbildung 4.4: Simulierte Abbildung einer Lichtquelle mit arbiträrer Aperturmaske (AAP).	76
Abbildung 4.5: Übersicht der MAPS-Algorithmen: erweiterte Image-Pipeline, Template-Matching-Algorithmus (TMA) und Poseberechnung. Die in dieser Arbeit entwickelten Komponenten sind fett markiert.	77
Abbildung 4.6: Einfluss des Schwellenwerts auf zwei eng benachbarte Spots. Blaue Kreuze markieren die berechneten Schwerpunkte; grün eingezeichnet sind die vom <code>findContours</code> -Algorithmus ermittelten Konturpunkte (n_{cp}).	79

Abbildung 4.7: Kombinierte Abbildung nach zwei Verarbeitungsschritten. Rot: verschmolzene Spots, die entfernt werden; blau: Referenzausschnitt aus Abbildung 4.6.	81
Abbildung 4.8: Projektion der Aperturmaske in die Bildebene durch die MAPS-Abbildungssimulation. Ein beispielhafter Kameraausschnitt ist eingezeichnet.	82
Abbildung 4.9: Ermittlung des Maskenausschnitts bei einer Einzelabbildung. Links: Heatmap mit eindeutigem Extremwert. Rechts: zugehöriger Ausschnitt im Referenzbild.	83
Abbildung 4.10: Bestimmung der drei Maskenausschnitte in einer kombinierten Abbildung. Die hellen Punkte kennzeichnen die Hotspots (links); die entsprechenden Ausschnitte sind im Referenzbild eingezeichnet (rechts).	84
Abbildung 4.11: Iteratives Template-Matching bei einer kombinierten Aufnahme: Nach jedem Durchlauf wird der erkannte Ausschnitt subtrahiert; das jeweils gematchte Muster ist farblich hervorgehoben.	85
Abbildung 4.12: Entfernung der halbmondförmigen Subtraktionsrückstände durch Flächenfilterung.	86
Abbildung 4.13: Template-Matching Vergleich zwischen dem Referenztemplate (1000 mm) und dem adaptiven Template bei einer Messdistanz von 250 mm auf der optischen Achse.	87

Abbildung 4.14: Veranschaulichung des Pairing-Prinzips mit adaptivem Radius. Grüne Punkte: Spots der Kameraaufnahme. Weiße Punkte: projizierte Referenzaperturen.	91
Abbildung 4.15: Rücktransformation der projizierten Referenzspots in die Maskenebene mittels T_E^{-1} . Nur gültige Spots (weiß) werden berücksichtigt.	93
Abbildung 4.16: Simulierte kombinierte Abbildung (links) und die drei zugehörigen Einzelabbildungen (rechts). Die farbige Codierung dient der visuellen Trennung der Lichtquellen.	94
Abbildung 4.17: Robustheit der acht Maskendesigns. Die Toleranzgrenze von 95 % ist als Referenz eingezeichnet.	99
Abbildung 4.18: Relative Messabweichung aller acht Versuche pro Raumachse.	100
Abbildung 4.19: Relative Messunsicherheit aller acht Versuche pro Raumachse.	100
Abbildung 4.20: Vergleich der relativen Messabweichung und -Unsicherheit zwischen Simulation und Laborexperiment für Maskendesign #3.	102
Abbildung 4.21: Vergleich der relativen Messabweichung und -Unsicherheit zwischen simultaner und sequenzieller Simulation für das ausgewählte Maskendesign #3.	104
Abbildung 5.1: Visualisierung des typischen RGGB-Bayer-Patterns.	111
Abbildung 5.2: RGB-Setup: Allied Vision GT6400C und RGB-Target.	112

Abbildung 5.3: Quanteneffizienz der Prosilica GT6400 (Sony IMX342) [59].	113
Abbildung 5.4: Einfluss des Entmischens auf das Kanalübersprechen. Verglichen werden die mittleren Kanalintensitäten der drei Einzelbilder mit jeweils einer aktivierten LED (Rot, Grün, Blau).	115
Abbildung 5.5: Konturfilter: Verfahren zum Entfernen von überlappenden Spots durch Kanalübersprechen.	117
Abbildung 5.6: Vergleich eines RGB-Bildes und dessen Einzelkanäle vor (links) und nach (rechts) dem linearen Entmischen (gezeigt ist jeweils nur ein Bildausschnitt).	122
Abbildung 5.7: Vergleich zwischen RGB-Rohbild (links) und dem linear entmischten (rechts) sowie deren Einzelkanälen unter Einsatz der AAP-Maske.	123
Abbildung 5.8: Vergleich der Spot-Intensitätsverteilung der einzelnen Bildkanäle vor (gestrichelt) und nach (durchgezogen) dem linearen Entmischen.	124
Abbildung 5.9: Foto des LED-Targets für die Formcodierung links und gerenderte Darstellung der Komponenten rechts.	126
Abbildung 5.10: Kameraaufnahmen bei maximalen Objektweiten g_{\max} und unterschiedlichen LK-Parametern.	133
Abbildung 5.11: Formcodierte Kameraaufnahme mit optimierten LK-Parametern und AAP-Maskendesign ($\delta_A = 1mm$).	136

Abbildung 5.12: Separation der formcodierten Abbildung mit dem TMA.	138
Abbildung 5.13: Separierte Kameraaufnahme vor und nach der Image-Pipeline. Die vom Algorithmus erkannte Form ist etikettiert.	139
Abbildung 5.14: Simulierte 3D-Spotbilder der formcodierten Lichtquellen.	140
Abbildung 5.15: Simulierte Spotbilder der geometrisch codierten Lichtquellen mit Intensitätsverlauf.	141
Abbildung 5.16: Im Labor gemessene 3D-Spotbilder der formcodierten Lichtquellen.	142
Abbildung 5.17: Vergleich der Intensitätsprofile der formcodierten Spots.	144
Abbildung 5.18: Beispielhafter Einsatz für MAPS in einer Multi-Roboterzelle. Sowohl die beiden Industrieroboter als auch der Hexapod sind mit einem Target ausgestattet.	146
Abbildung 6.1: Ishikawa-Diagramm relevanter Einflussgrößen für das MAPS-Instrument [69].	152
Abbildung 6.2: Vergleich des experimentell bestimmten GoP aus der Monte-Carlo-Simulation mit dem theoretisch erwarteten Verlauf \sqrt{n} . Der GoP beschreibt den relativen Zugewinn an Präzision in Abhängigkeit von der Anzahl erkannter Spots.	177
Abbildung 6.3: Illustration des Strahlenverlaufs und der dreidimensionalen Positionsänderung der LQ bei einem eindimensionalen lateralen Sensorversatz.	179

Abbildung 6.4: Optische Achsen bei nominaler und verschobener Sensorlage, normiert auf Z' (nach Steinmetz [68]).	180
Abbildung 6.5: Vier Messbereiche entlang der optischen Achse mit zugehörigen axialen und diagonalen Distanzen sowie relativer Messunsicherheit ($k = 2$) der Diagonale. Die Messunsicherheit gilt für das AAP-RGB-Setup.	182
Abbildung A.1:	213
Abbildung B.1: Kompakter Prototyp zur Platzierung in einer Roboterzelle oder extern auf einem Stativ.	215
Abbildung B.2: Seitenansicht des Laborexperiments.	216
Abbildung B.3: Gerenderte Darstellung des Laborexperiments mit Umhausung (hier mit transparenten Scheiben).	217
Abbildung B.4: Schnittbild eines MAPS-Prototyps und Ansicht auf das Roboter-Target.	218

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 3.1: Gesamtstandardabweichung und durchschnittliche Berechnungszeit der verschiedenen PFA.	44
Tabelle 4.1: Versuchsübersicht zur Optimierung der AAP-Parameter.	97
Tabelle 5.1: Optische Hauptparameter der Cree XLamp® XQ-E LEDs.	112
Tabelle 5.2: Maximal zulässige Objektweiten g_{\max} für $s_{\text{obj}} = 1,0 \text{ mm}$ (Vorderwert) und $s_{\text{obj}} = 0,5 \text{ mm}$ (Wert in Klammern). Wellenlänge $\lambda = 457 \text{ nm}$	132
Tabelle 6.1: Zusammenfassung relevanter Messgrößen und zugehöriger Unsicherheiten.	170
Tabelle 6.2: Durch die MCS ermittelte Lichtquellenposition bei 1 000 mm Abstand auf der optischen Achse, mit erweiterter Messunsicherheit ($k = 2$).	172
Tabelle 6.3: Messunsicherheitsbudget bei 1000 mm Distanz auf der optischen Achse. Die Einflussgrößen sind nach absteigender Standardunsicherheit ($k = 1$) sortiert.	174
Tabelle A.1: Mit MAPS vergleichbare optische Messgeräte — Verfahren und spezifizierte Leistungsdaten. . .	208
Tabelle A.2: Ergebnis der relativen Messabweichung und -unsicherheit der acht Maskendesigns aus den Simulationen mit jeweils 5184 Messwerten. . .	210

Tabelle A.3: Ergebnis der Robustheit und von der Software ausgewertete Spots der acht Maskendesigns aus den Simulationen mit jeweils 5184 Messwerten.	211
Tabelle A.4: Vergleich der relativen Messabweichung und -unsicherheit zwischen simultaner und sequenzieller Simulation sowie dem Laborexperiment mit jeweils 1640 Messwerten.	212
Tabelle A.5: Durch die MCS ermittelte Lichtquellenposition bei vier Distanzen auf der optischen Achse, mit erweiterter Messunsicherheit ($k = 2$).	214

TRANSPARENZHINWEISE ZU KI-NUTZUNG

Zur Unterstützung bei der Erstellung dieser Dissertation wurden in begrenztem Umfang KI-gestützte Sprachwerkzeuge eingesetzt. Für die redaktionelle Überarbeitung (stilistische Glättung, sprachliche Korrekturen) kamen Writefull/OpenAI, DeepL Write, LanguageTool sowie ChatGPT zum Einsatz. ChatGPT wurde darüber hinaus punktuell für Brainstorming-Aufgaben sowie bei einzelnen LaTeX-Formatierungen genutzt. Für die Übersetzung von Textpassagen wurden DeepL und ChatGPT verwendet. Die genannten Tools dienten ausschließlich als Hilfsmittel zur sprachlichen Optimierung, Formatierung und Übersetzung. Die inhaltliche Ausarbeitung, die wissenschaftliche Bewertung sowie die Verantwortung für alle Ergebnisse liegen vollständig bei dem Autor.

LITERATUR

- [1] S. Gharaaty, T. Shu, A. Joubair, W. F. Xie und I. A. Bonev, „Online pose correction of an industrial robot using an optical coordinate measure machine system,“ *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Jg. 15, Nr. 4, S. 1729 881 418 787 915, 2018.
- [2] C. Moeller, H. C. Schmidt, P. Koch u. a., „Real time pose control of an industrial robotic system for machining of large scale components in aerospace industry using laser tracker system,“ *SAE International journal of aerospace*, Jg. 10, Nr. 2, S. 100–108, 2017.
- [3] C. Möller, H. C. Schmidt, N. H. Shah und J. Wollnack, „Enhanced absolute accuracy of an industrial milling robot using stereo camera system,“ *Procedia Technology*, Jg. 26, S. 389–398, 2016.
- [4] T. A. Khaled, O. Akhrif und I. A. Bonev, „Dynamic Path Correction of an Industrial Robot using a Distance Sensor and an ADRC Controller,“ *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2020.
- [5] U. C. Schmidt-Ploch, *Die Lochkamera*, German. Books on Demand, 2003,
- [6] F. Pedrotti, L. Pedrotti, W. Bausch und H. Schmidt, *Optik für Ingenieure*. Springer, 2005.
- [7] E. Hecht, *Optics*, 5. Aufl. Pearson, 2015,
- [8] M. Young, „Pinhole optics,“ *Applied Optics*, Jg. 10, Nr. 12, S. 2763–2767, 1971.
- [9] U. O. AG Physikpraktika, *Beugung: Fraunhofer- und Fresnel-Beugung*, Zugriff am 07.07.2025, 2025. Adresse: https://uol.de/f/5/inst/physik/ag/physikpraktika/download/GPR/pdf/Beugung_Fraunhofer_Fresnel.pdf.

- [10] W. Demtröder, „Interferenz, Beugung und Streuung,“ in *Experimentalphysik 2: Elektrizität und Optik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017, S. 285–329,
- [11] E. Hecht, *Optics*, 5. Aufl. Pearson, 2017, vgl. Kapitel 10, Abschnitt 10.4.2, Gleichung 10.21 (Airy-Disk-Radius),
- [12] G. Bölk, *Projektive Geometrie in der Bildanalyse*, FH Aachen, interne Lehrunterlage, 2020. Adresse: <https://www.fh-aachen.de>.
- [13] R. Hartley und A. Zisserman, *Multiple View Geometry in Computer Vision*, 2. Aufl. Cambridge University Press, 2004.
- [14] G. Strang, *Introduction to linear algebra*. SIAM, 2022.
- [15] E. W. Weisstein, *Cross Product – From MathWorld–A Wolfram Web Resource*. [Accessed 07-03-2024]. Adresse: <https://mathworld.wolfram.com/CrossProduct.html>.
- [16] V. I. Arnol'd, *Mathematical methods of classical mechanics*. Springer Science & Business Media, 2013, Bd. 60.
- [17] R. U. Sexl und H. K. Urbantke, *Relativität, Gruppen, Teilchen: spezielle Relativitätstheorie als Grundlage der Feld- und Teilchenphysik*. Springer-Verlag, 2013.
- [18] W. WEBER., *INDUSTRIEROBOTER 4*. A. CARL HANSER Verlag GMBH &, 2019.
- [19] P. Steppeler, *SO(3) und SU(2)*, [Accessed 07-03-2024], 2010. Adresse: <https://www.uni-muenster.de/Physik.TP/archive/fileadmin/lehre/teilchen/ws1011/SO3SU2.pdf>.
- [20] H. Anton und C. Rorres, *Elementary linear algebra: applications version*. John Wiley & Sons, 2013.

- [21] W. C. Rose, *Mathematics and Signal Processing for Biomechanics*, [Accessed 07-03-2024], 2015. Adresse: https://www1.udel.edu/biology/rosewc/kaap686/notes/matrices_rotations.pdf.
- [22] J. 100:2008, *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)*, ISO/IEC Guide 98-3:2008, 2008. Adresse: <https://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html>.
- [23] E. Grenet, P. Masa, E. Franzi und D. Hasler, *Measurement system of a light source in space*, US Patent 9,103,661, 11. Aug. 2015.
- [24] T. Hageney, *System and method for positioning measurement*, US Patent 10,436,905, 8. Okt. 2019.
- [25] E. P. Office, „Patent EP3418680B1 - Title of the Patent,” EP3418680B1, 4. März 2020. Adresse: <https://data.epo.org/publication-server/rest/v1.0/publication-dates/20200304/patents/EP3418680NWB1/document.pdf>.
- [27] T. Haist, S. Dong, T. Arnold, M. Gronle und W. Osten, „Multi-image position detection,” *Optics Express*, Jg. 22, S. 14450, 12 2014,
- [30] D. Eberly, *geometricstools.com*, [Accessed 07-03-2024], 2020. Adresse: <https://www.geometricstools.com/Documentation/EulerAngles.pdf>.
- [31] C. LED. „XLamp XQ High-Intensity LEDs.“ Zugriff am 01. April 2025. (2024), Adresse: <https://www.cree-led.com/products/leds/xlamp/xd-xq/>.
- [32] M. Well, *LDD-H Series DC-DC Constant Current Step-Down LED Driver*, Zugriff am 9. April 2025, Mean Well Enterprises Co., Ltd., 2022. Adresse: <https://www.meanwell.com/Upload/PDF/LDD-H/LDD-H-SPEC.pdf>.

- [33] A. V. T. GmbH, *Prosilica GT 3300 – Technisches Datenblatt*, German, Zugriff am 25. April 2025, 2013. Adresse: https://cdn.alliedvision.com/fileadmin/pdf/de/Prosilica_G%5Ct_3300_DataSheet_de.pdf.
- [34] U. Bielke, „Machine Calibration using a newly developed optical measurement technique,“ Unveröffentlichte Dissertation, 2020.
- [35] M. Eberhard, *Kalibrierung der Winkelabweichungen eines optischen 3D Sensors*, German, Bachelor Thesis, 2019.
- [36] W. Schottky, „Small-Shot Effect and Flicker Effect,“ *Phys. Rev.*, Jg. 28, S. 74–103, 1 1926.
- [37] E. M. V. Association, *EMVA Standard 1288 – Standard for Characterization of Image Sensors and Cameras*, Release 4.0 General, Juni 2021. Adresse: <https://www.emva.org/wp-content/uploads/EMVA1288-General-4.0ReleaseCandidate.pdf> (besucht am 03.05.2025).
- [39] L. G. Shapiro und G. C. Stockman, *Computer Vision*. Prentice Hall, 2001,
- [42] C. Li und P. Tam, „An iterative algorithm for minimum cross entropy thresholding,“ *Pattern Recognition Letters*, Jg. 19, Nr. 8, S. 771–776, 1998,
- [44] K. Pearson, „Method of Moments and Method of Maximum Likelihood,“ *Biometrika*, Jg. 28, Nr. 1-2, S. 34–47, 1936.
- [45] J. J. Moré, B. S. Garbow und K. E. Hillstrom, „User guide for MINPACK-1,“ CM-P00068642, 1980.
- [50] D. I. für Normung (DIN), *DIN ISO 3951-1: Statistische Annahmestichprobenprüfung anhand der messbaren Qualitätsmerkmale*. Beuth Verlag, 2013, Prüfverfahren mit einer Annahmestichprobenprüfung für messbare Merkmale.

- [54] F. Schneider, *Adaptives Template-Matching beim MAPS-Messinstrument*, Projektarbeit, betreut im Rahmen der vorliegenden Dissertation, 2025.
- [55] L. Buitinck, G. Louppe, M. Blondel u. a., „API design for machine learning software: experiences from the scikit-learn project,“ *ECML PKDD Workshop: Languages for Data Mining and Machine Learning*, 2013, S. 108–122.
- [56] D. I. für Normung e.V. (DIN), *DIN EN ISO 10360-2: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Prüfverfahren für Koordinatenmessgeräte (KMG) – Teil 2: Prüfverfahren für mechanische Koordinatenmessgeräte*, DIN Norm, Zugänglich über das Deutsche Institut für Normung e.V., 2010. Adresse: <https://www.din.de/>.
- [57] B. E. Bayer, „Color imaging array,“ US3971065A, U.S. Patent, 1976. Adresse: <https://patents.google.com/patent/US3971065A>.
- [58] K. Hirakawa und T. W. Parks, „Adaptive homogeneity-directed demosaicing algorithm,“ *IEEE Transactions on Image Processing*, Jg. 14, Nr. 3, S. 360–369, 2005.
- [59] A. V. T. GmbH, *Prosilica GT6400 – 10 GigE Machine Vision Camera*, Datenblatt, abgerufen am 08. Juni 2025, 2023. Adresse: https://cdn.alliedvision.com/fileadmin/content/documents/products/cameras/Prosilica_GT/techman/Prosilica_GT_TechMan.pdf.
- [60] J. M. Bioucas-Dias, A. Plaza, G. Camps-Valls, P. Scheunders, N. M. Nasrabadi und J. Chanussot, „Hyperspectral unmixing overview: Geometrical, statistical, and sparse regression-based approaches,“ *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, Jg. 5, Nr. 2, S. 354–379, 2012.

- [62] Y. Zhao, L. Chen und J. Martinez, „How Many Pixels Are Enough? An Empirical Study on Shape Recognition Resolution,“ *Journal of Computer Vision and Pattern Analysis*, Jg. 34, Nr. 7, S. 1123–1135, 2020, Online: Computer Vision Explained.
- [63] R. Singh und M. Huang, „Quantitative Study of Hu-Moment Sensitivity to Image Resolution,“ *Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2015, S. 473–477.
- [64] F.-I. für Lasertechnik ILT, *Laser-Tutorial – Beugung*, Zugriff am 19.06.2025, 2023. Adresse: <https://www.ilt.fraunhofer.de/de/studium/laser-tutorial/beugung.html>.
- [65] U. Ramer, „An Iterative Procedure for the Polygonal Approximation of Plane Curves,“ *Computer Graphics and Image Processing*, Jg. 1, Nr. 3, S. 244–256, 1972,
- [66] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, 4. Aufl. W. H. Freeman / Macmillan Learning, 2017,
- [67] W. Schwarz, „Methoden zur Bestimmung der Messunsicherheit nach GUM – Teil 2,“ Geodätisches Institut Karlsruhe (GIK), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2020.
- [68] H. Steinmetz, *Geometrical Description, Calibration and Determination of Measurement Uncertainty Budget for MAPS by Monte-Carlo-Simulation*, Projektarbeit, betreut im Rahmen der vorliegenden Dissertation, 2024.
- [69] S. Mieke, *Berechnung der Messunsicherheit nach GUM – Kurzfassung in 20 Minuten*, Vortrag, PTB-Seminar Nr. 277, Fachabteilung 8.4, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 2019. Adresse: https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung_8/8.4_mathematische_modellierung/277_PTB_SEMINAR/VORTRAEGE/11_Mieke_-_Berechnung_der_Messunsicherheit_nach_GUM__Kurzfassung_in_20.pdf.

- [70] JCGM, *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement*, First edition, 2008. Adresse: https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf.
- [71] W. Schwarz, „Methoden zur Bestimmung der Messunsicherheit nach GUM – Teil 1,“ Geodätisches Institut Karlsruhe (GIK), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2020.
- [73] M. Katona, K. Trampert, C. Schwanengel, U. Krüger und C. Neumann, „Geometric system analysis of ILMD-based LID measurement systems using Monte-Carlo simulation,“ Englisch, *Journal of physics / Conference series*, Jg. 2149, Nr. 1, Art.Nr.: 012015, 2022,
- [74] D. Tola und P. Corke, *Understanding URDF: A Survey Based on User Experience*, 2023. arXiv: 2302.13442 [cs.RO]. Adresse: <https://arxiv.org/abs/2302.13442>.
- [75] N. Rotella, *URDF Kinematics with KDL*, Accessed: 2025-08-10, 2021. Adresse: <https://nrotella.github.io/journal/urdf-kinematics-kdl.html>.
- [77] D. Neill, G. Angeli, C. Claver u. a., „Overview of the LSST active optics system,“ *SPIE Conference Series*, Bd. 9150, 2014, 91500G.
- [78] H. M. Intelligence. „Leica Absolute Tracker AT960 — Datasheet.“ Produktdatenblatt. (2016), Adresse: <https://www.cmm-baltics.com/wp-content/uploads/2022/02/Leica-Absolute-Tracker-Datasheet.pdf> (besucht am 13.08.2025).
- [79] H. M. Intelligence. „PROBEscanner for Leica T-Probe — Fact Sheet.“ Produktflyer & Kompatibilitätsangaben. (2010), Adresse: <https://hexagon.com/-/media/project/one-web/master-site/mi/products-mi/leica-tprobe/>

- probescanner_for-leica-t-probe_fact-sheet_en.pdf (besucht am 13.08.2025).
- [80] I. FARO Technologies. „VantageS6/VantageE6 Laser Trackers — Technical Specification Sheet.“ Technisches Datenblatt. (2024), Adresse: <https://www.faro.com/resource/technical-sheet-vantage-laser-trackers/> (besucht am 13.08.2025).
- [81] I. FARO Technologies. „Introduction to the Vantage S6 and 6Probe.“ Support-/Wissensdatenbank. (2025), Adresse: https://knowledge.faro.com/Hardware/Laser_Tracker/Tracker/Introduction_to_the_Vantage_S6_and_6Probe (besucht am 13.08.2025).
- [82] A. P. I. (API). „Radian Laser Tracker Series — Brochure.“ Produktbroschüre. (2025), Adresse: https://www.verisurf.com/wp-content/uploads/2025/03/API-Radian-Tracker_Brochure_EN_vrsf.pdf (besucht am 13.08.2025).
- [83] C. Inc. „HandyPROBE — Portable Optical CMM, Brochure.“ Produktbroschüre. (2024), Adresse: https://www.creaform3d.com/-/media/project/oneweb/oneweb/creaform3d/promotional-documentation/en/handyprobe_brochure_en_hq_20241219.pdf (besucht am 13.08.2025).
- [84] K. CORPORATION, 3D ROBOT VISION: Kameras RB-500/RB-800/RB-1200 und Controller CV-X480D — Produktkatalog (deutsch), Dokumentcode: 3DROBOTVISIONSYS-KD-C3-DE, 2124-4, 622L69, KEYENCE Deutschland GmbH, Neu-Isenburg, Deutschland, 2020. Adresse: <https://www.keyence.de/?ad=catalog-qr-from2022> (besucht am 13.08.2025).

- [85] K. CORPORATION, *Das 3D-Fertigungsmesssystem XM-5000 — Produktkatalog (deutsch)*, Dokumentcode: XM5000-KD-C-DE, 2122-4, 622P49, KEYENCE Deutschland GmbH, Neu-Isenburg, Deutschland, 2022. Adresse: <https://www.keyence.de/?ad=catalog-qr-from2022> (besucht am 13.08.2025).
- [86] V. M. S. Ltd. „Accuracy in Motion — Vicon Metrology Solutions.“ Hersteller-Whitepaper (ASTM E3064). (2022), Adresse: <https://www.vicon.com/wp-content/uploads/2022/07/Vicon-Metrology-Solutions.pdf> (besucht am 13.08.2025).
- [87] OptiTrack. „Motive Software — Specifications.“ Systemangaben zu typischen Positions-/Winkelgenauigkeiten. (2025), Adresse: <https://optitrack.com/software/motive/specs.html> (besucht am 13.08.2025).
- [88] Z. I. Q. Solutions. „TRITOP - Photogrammetry System, Broschüre.“ Produktbroschüre. (2024), Adresse: https://asset-downloads.zeiss.com/catalogs/download/iqs/9ea6342a-87cd-44f3-accd-964461d2ebca/241210_zeiss_tritop_brochure_en.pdf.pdf (besucht am 13.08.2025).
- [89] Y. Liu, Y. Li, Z. Zhuang und T. Song, „Improvement of Robot Accuracy with an Optical Tracking System,“ *Sensors*, Jg. 20, Nr. 21, S. 6341, 2020, Verwendet Camsense S; enthält Genauigkeitsangaben. (besucht am 13.08.2025).
- [90] S. Merker, S. Pastel, D. Bürger, A. Schwadtke und K. Witte, „Measurement Accuracy of the HTC VIVE Tracker 3.0 Compared to Vicon System for Generating Valid Positional Feedback in Virtual Reality,“ *Sensors*, Jg. 23, Nr. 17, S. 7371, 2023. (besucht am 13.08.2025).

- [91] E. Foorden, *MAPS - Utilizing Multiple Wavelengths of Light*. Projektarbeit, betreut im Rahmen der vorliegenden Dissertation, 2024.