

# Entwurf, Simulation und Optimierung mehrkamerabasierter 6D-Pose-Messsysteme

zur Verringerung der Positionsunsicherheit in der  
robotergestützten Koordinatenmesstechnik

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

zur Erlangung des Doktorgrades der  
INGENIEURWISSENSCHAFTEN

vorgelegt von

Michael Kreutzer

geboren am 7.4.1977 in Illingen an der Saar

## **Hauptberichterstatter**

Prof. Dr. sc. techn. habil. Oliver Zirn

## **Mitberichterstatter**

Prof. Dr.-Ing. Dr. rer. nat. habil. Harald Richter

Prof. Dr. rer. nat. Klaus Rinn

Datum der Verteidigung: 19.07.2016



---

## KURZZUSAMMENFASSUNG

Roboter gestützte Koordinatenmesssysteme haben gegenüber klassischen Koordinatenmessgeräten) viele Vorteile. Zum Beispiel die gute Integrierbarkeit in Produktionslinien und die hohe Beweglichkeit des Roboterarms, sowie die relativ niedrigen Investitionskosten. Jedoch liegt die Positionsunsicherheit eines Industrieroboters auch nach einer Kalibrierung weit über der eines typischen Koordinatenmessgeräts. Das Einsatzgebiet bleibt darum auf Messanwendungen mit geringen Genauigkeitsanforderungen beschränkt.

Abhilfe können externe kamerabasierte Zusatzmesssysteme zur Lagebestimmung der Roboterhand und des eingesetzten Koordinatenmesskopfs schaffen, wie sie teils auch zur Roboterkalibrierung eingesetzt werden. Marktübliche Systeme basieren aber meist auf teuren Spezialkameras und haben Schwächen in der Orientierungsmessung. Darum können sie nur in Ausnahmefällen wirtschaftlich betrieben werden oder erreichen keine hinreichende Genauigkeit.

In dieser Arbeit wird ein (mehr-)kamerabasiertes Pose-Messsystem (CPMS) entwickelt. Es besteht aus einem mobilen 3-Kamera-Pose-Sensor zur Montage an der Roboterhand. Dieser Sensor basiert auf Standardkameras und bestimmt seine räumliche Pose durch die Beobachtung raumfester photogrammetrischer Zielmarken.

Zur Herstellung der mathematischen Beziehung zwischen den Bildbeobachtungen der Zielmarken und der räumlichen Pose des Messsystems, wird ein Mehrkamera-Abbildungsmodell, sowie eine effiziente Vorgehensweise zur Lösung der daraus resultierenden Modellgleichungen erarbeitet.

Zur Konzeption eines optimalen Messsystemdesigns, das einen guten Kompromiss zwischen Aufwand, Kosten und Messgenauigkeit darstellt, sind zahlreiche Systemeigenschaften abzustimmen. Dies ist am realen System aufgrund unkontrollierbarer Variablen und komplexer Wechselwirkungen sehr schwierig. Aus diesem Grund wird eine Simulations-Umgebung entwickelt, mit der die Zusammenhänge zwischen Beleuchtung, Bildaufnahme und der räumlichen Kamera- und Zielmarkenanordnung systematisch untersucht werden.

Auf dieser Grundlage werden Zusammenhänge der Systemparameter aufgedeckt und Regeln für die Konzeptionierung eines CPMS erstellt. Durch eine systematische Untersuchung und Verbesserung der Kameraanordnung wurde die Pose-Messgenauigkeit bei Einsatz des gleichen Kameratyps wesentlich erhöht. Darüber hinaus konnte die Algorithmik zur Bestimmung der Lage einer Zielmarke im Kamerabild durch die Erweiterung mit Verfahren zum Ausgleich inhomogener Beleuchtung und der Kompensation von Bewegungsunschärfen verbessert werden.

Zuletzt werden anhand der Simulation praxisorientierte Verfahren zur Systemkalibrierung erarbeitet. Auch wird gezeigt, wie ein CPMS für eine spezifische Messanwendung am Rechner geplant werden und so Zeit und Kosten für aufwendige Experimentalaufbauten gespart werden kann.



---

## DANKSAGUNGEN

Diese Dissertation entstand im Rahmen einer Kooperation zwischen dem Institut für Prozess und Produktionstechnik (IPP) der Universität Clausthal und dem Institut für Technik und Informatik des Fachbereichs für Mathematik, Naturwissenschaften und Informatik der Technischen Hochschule Mittelhessen. Gefördert wurde das Projekt u.A. durch ein Stipendium der Johannes-Hübner-Stiftung Gießen. Ich möchte an dieser Stelle allen beteiligten Personen und Institutionen, meinen Dank für ihre Unterstützung aussprechen.

Ich danke meinem Betreuer Prof. Dr. Oliver Zirn, der das Promotionsvorhaben ermöglichte. Herrn Prof. Dr. Harald Richter danke ich unter anderem für seine wertvollen Tipps für die Ausfertigung professioneller Konferenzbeiträge. Ein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Klaus Wüst und Herrn Prof. Dr. Klaus Rinn, die die Betreuung vorort an der Technischen Hochschule Mittelhessen übernahmen. Insbesondere danke ich Herrn Prof. Rinn für die zahlreichen gemeinsamen Fachgespräche. Ein spezielles Dankeschön geht an meine Lebensgefährtin Sandra Obenhack und meinen langjährigen Freund Patrick Alberti.

Gießen, den 20.5.2016  
Michael Kreutzer



---

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation.....	1
1.2	Prinzip eines kamerabasierten Pose-Messsystems (CPMS).....	3
1.3	Problemstellung und Zielsetzung.....	4
1.3.1	CPMS-Abbildungsmodell und System-Kalibrierung.....	5
1.3.2	Pose-Messgenauigkeit.....	6
1.3.3	Simulations-Umgebung für CPMS.....	7
1.4	Aufbau der Arbeit.....	8
1.5	Schriftkonventionen und Formeln.....	9
<b>2</b>	<b>Stand des Arbeitsgebietes</b>	<b>11</b>
2.1	Koordinatenmesstechnik und Sensoren.....	11
2.1.1	Robotergestützte Koordinatenmesstechnik.....	12
2.1.2	Messprinzipien und Messunsicherheit typischer Sensoren.....	14
2.1.3	Anforderungen an einen Industrieroboter als Positioniersystem.....	18
2.1.4	Einfluss des Orientierungsfehlers eines Positioniersystems.....	18
2.2	Positionsgenauigkeit von Industrierobotern.....	19
2.2.1	Pose- und Bahngenauigkeit.....	20
2.2.2	Genauigkeitssteigerung durch Roboterkalibrierung.....	21
2.2.3	Erzielbare Positionsgenauigkeiten.....	22
2.3	Externe 6D-Pose-Sensoren.....	23
2.3.1	Anforderungen an externe Pose-Messsysteme.....	24
2.3.2	Gegenüberstellung berührungloser Messverfahren.....	24
2.3.3	Photogrammetrische Grundprinzipien.....	27
2.3.4	Grundkonfiguration photogrammetrischer 6D-Pose-Sensoren.....	29
2.3.5	Gegenüberstellung photogrammetrischer 6D-Pose-Sensoren.....	30
2.4	Kapitelzusammenfassung.....	34
<b>3</b>	<b>Funktionsprinzip und Architektur eines CPMS</b>	<b>35</b>
3.1	Funktionsweise und Technischer Aufbau eines CPMS.....	35
3.1.1	Funktionsprinzip.....	35
3.1.2	Funktionsweise einer Zielmarke.....	37
3.1.3	Übersicht einer robotergestützten Messanwendung.....	38
3.1.4	Zusammenwirken der CPMS-Komponenten.....	38
3.1.5	Testsystem für begleitende Versuche.....	39

---

3.2	Definition: Pose und Messgenauigkeit eines CPMS.....	40
3.2.1	Kombinierte Beschreibung von Position und Orientierung: Pose ....	40
3.2.2	Definition der Pose-Messgenauigkeit .....	41
3.3	Architektur der Mess- und Simulationssoftware.....	42
3.3.1	Aufbau der Messsoftware.....	43
3.3.2	Aufbau der Simulationsumgebung.....	44
3.3.3	Anwendung des Bildaufnahme-Simulators.....	46
3.3.4	Anwendung des Bildmess-Simulators .....	47
3.4	Weitere Eigenschaften eines CPMS.....	48
3.4.1	Messvolumen.....	49
3.4.2	Messfrequenz und Synchronisation .....	49
3.5	Kapitelzusammenfassung.....	50
<b>4</b>	<b>Simulation digitaler Bildaufnahmesysteme</b>	<b>53</b>
4.1	Anforderungen an das Bildaufnahmesystem.....	53
4.1.1	Prinzipielle Anforderungen .....	54
4.1.2	Abgeleitete Anforderungen .....	54
4.1.3	Diskussion der Anforderungen .....	55
4.2	Optisches Abbildungssystem.....	55
4.2.1	Prinzipielle Funktionsweise eines Objektivs.....	56
4.2.2	Optisches Auflösungsvermögen.....	58
4.2.3	Schärfentiefe.....	59
4.2.4	Beugungsunschärfe.....	61
4.2.5	Zusammenhang: Objektstrahlungsdichte und Bildhelligkeit .....	63
4.2.6	Abbildungsfehler.....	65
4.3	Eigenschaften von digitalen Bildsensoren .....	66
4.3.1	Funktionsprinzip.....	66
4.3.2	Fehler bei der Bildwandlung .....	67
4.3.3	Lichtempfindlichkeit und Aussteuerung .....	68
4.3.4	Modellierung eines Bildsensors .....	70
4.4	Auswahl und Untersuchung einer Versuchs-Kamera .....	72
4.4.1	Eigenschaften der DMK23G274 Kamera .....	73
4.4.2	Überprüfung der Linearität .....	74
4.4.3	Überprüfung des Bildrauschens .....	75
4.5	Beleuchtung und Fremdlichtunterdrückung.....	77
4.5.1	Konzeption einer Beleuchtung für die präzise Bildmessung .....	78
4.5.2	Geeignete Lichtquellen .....	79
4.5.3	Unterdrückung von Fremdlicht.....	80
4.5.4	Mathematische Betrachtung der Beleuchtung.....	81



---

4.6	Bildaufnahmesimulation und Systemabstimmung.....	82
4.6.1	Grundaufbau einer Bildaufnahmeeinheit .....	82
4.6.2	Simulation einer Bildaufnahmeeinheit .....	83
4.7	Analyse und Abstimmung von Bildaufnahmesystemen.....	87
4.7.1	Anforderungen und Freiheitsgrade .....	87
4.7.2	Algorithmus zur Berechnung von Optik und Beleuchtung.....	90
4.7.3	Beispielhaftes Bildaufnahmesystem .....	91
4.7.4	Analyse und Abstimmung der Bildaufnahme-Parameter.....	92
4.7.5	Einfluss der Pixelgröße .....	96
4.7.6	Wahl von Bildsensor, Optik und Beleuchtung.....	98
4.7.7	Konfigurationsvorschlag einer Kamera-/Beleuchtungseinheit.....	98
4.8	Kapitelzusammenfassung .....	99
<b>5</b>	<b>Photogrammetrische Zielmarken und Bildmessung</b>	<b>103</b>
5.1	Typen von Zielmarken.....	103
5.2	Bildmessverfahren in Open-CV .....	105
5.3	Analyse von Fehlereinflüssen der Bildmessung .....	108
5.3.1	Formulierung des Bildmessfehlers .....	109
5.3.2	Ansätze zur Analyse und Reduzierung des Bildmessfehlers .....	109
5.3.3	Auswirkung des Bildrauschens .....	110
5.3.4	Auswirkung inhomogener Ausleuchtung im allgemeinen Fall.....	112
5.3.5	Auswirkung inhomogener Ausleuchtung .....	115
5.4	Verfahren zur Beleuchtungs-Homogenisierung.....	118
5.4.1	Prinzipieller Korrekturansatz .....	118
5.4.2	Maskierung unscharfer Bildbereiche .....	120
5.4.3	Globales Bestrahlungskorrekturmodell .....	123
5.4.4	Lokale Beleuchtungskorrektur .....	128
5.5	Kompensation von Bewegungsunschärfe.....	132
5.5.1	Auswirkung auf die Bildmessung .....	133
5.5.2	Korrektur gleichförmiger Bewegungen .....	133
5.5.3	Korrektur ungleichförmiger Bewegungen.....	134
5.5.4	Auswirkung von Geschwindigkeit und Beschleunigung.....	136
5.6	Kapitelzusammenfassung .....	137
<b>6</b>	<b>Geometrisches Kameramodell und Kalibrierung</b>	<b>139</b>
6.1	Kameramodell.....	139
6.1.1	Zentralprojektion und Lochkameramodell.....	139
6.1.2	Erweitertes Lochkameramodell .....	141
6.2	Modellierung der optischen Verzeichnung.....	143
6.2.1	Mathematische Formulierung der Verzeichnung.....	143

---

6.2.2	Intrinsische Kameraparameter.....	144
6.2.3	Verwendung des Kameramodells.....	145
6.3	Kamerakalibrierung.....	146
6.3.1	Beschreibung des Kalibrierverfahrens.....	147
6.3.2	Vorbereitung der Kalibrierung.....	148
6.3.3	Durchführung der Kamerakalibrierung.....	148
6.3.4	Aufdeckung und Beseitigung von Kalibrierfehlern.....	151
6.3.5	Anpassung des Verzeichnungsmodells.....	153
6.3.6	Ergebnisse der optimierten Kamerakalibrierung.....	156
6.4	Abschätzung des normierten Bildmessfehlers.....	157
6.5	Kapitelzusammenfassung.....	158
<b>7</b>	<b>Mehrkamerabasierte 6D-Pose-Messsysteme</b>	<b>159</b>
7.1	Abbildungsmodell eines Mehrkamerasytems.....	160
7.1.1	Transformationen auf Basis homogener Koordinaten.....	160
7.1.2	Kompaktdarstellung der Rotationsmatrix.....	162
7.1.3	Formulierung des Modells.....	162
7.2	Bestimmung der Systempose.....	165
7.2.1	Formulierung des Modellgleichungssystems.....	166
7.2.2	Modelleinpassung mittels Levenberg-Marquardt-Algorithmus.....	167
7.2.3	Aufstellung der Modell-Grundgleichung.....	170
7.2.4	Aufstellung der Jakobimatrix für eine Pose-Messung.....	171
7.2.5	Aufstellung der Jakobimatrix für eine Systemkalibrierung.....	172
7.3	Schwer detektierbare Bewegungen.....	173
7.4	Analyse der Fehlerfortpflanzung zwischen Bild- und Pose-Fehler.....	174
7.4.1	Analyse des linearisierten Modells.....	175
7.4.2	Interpretation der Singulärwerte und -Vektoren.....	176
7.4.3	Mittlerer und dominanter Pose-Fehler.....	177
7.4.4	Auswirkung des dominanten Pose-Fehlers.....	178
7.5	Ermittlung einer optimalen Mehrkamerakonfiguration.....	179
7.5.1	Optimale Kamerakonfiguration.....	179
7.5.2	Grundkonfiguration der betrachteten Beispiele.....	179
7.5.3	Berechnung des theoretischen Pose-Messfehlers.....	180
7.5.4	Verhalten von 1- und 2-Kamera-Systemen.....	181
7.5.5	3-Kamera-Systeme und ihre Optimierung.....	185
7.5.6	Auswirkung von Zielmarken-Größe und -Referenzpunktzahl.....	188
7.5.7	Auswirkung des Abstands zwischen Kamera und Zielmarke.....	189
7.5.8	Varianz des Pose-Fehlers innerhalb des Messvolumens.....	190
7.6	Kalibrierverfahren und erzielbare Messabweichungen.....	191
7.6.1	Kriterien zur Bewertung der Kalibrierung.....	192

---

7.6.2	Beispiel-CPMS zur Demonstration der Kalibrierung.....	193
7.6.3	Berechnung der erforderlichen Zielmarken-Dichte.....	194
7.6.4	Vorgehen bei Kalibrierung und Prüfung.....	195
7.6.5	Kalibrierung an Referenzzielmarken oder an Referenzmesssystem	197
7.6.6	Aufstellung des Gleichungssystems .....	199
7.6.7	Bereitstellung von Startwerten .....	200
7.6.8	Erzielbare Richtigkeit & Präzision bei der Kalibrierung an Referenzmarken .....	201
7.6.9	Erzielbare Richtigkeit & Präzision bei Einsatz einer Referenzplatte .....	205
7.6.10	Erzielbare Richtigkeit & Präzision bei der Kalibrierung an einem Referenzmesssystem.....	206
7.6.11	Vorkalibrierung der Kameraposen .....	208
7.6.12	Weitere Einflussfaktoren .....	211
7.6.13	Gegenüberstellung der Kalibrierverfahren und ihrer Varianten .....	212
7.7	Kapitelzusammenfassung .....	214
<b>8</b>	<b>Schlussbetrachtungen</b>	<b>217</b>
8.1	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	217
8.1.1	Simulation und Optimierung digitaler Bildaufnahmesysteme.....	217
8.1.2	Photogrammetrische Zielmarken und präzise Bildmessung .....	218
8.1.3	Geometrisches Kameramodell und Kalibrierung: .....	219
8.1.4	Modellierung, Optimierung und Kalibrierung eines CPMS .....	219
8.2	Diskussion der Ergebnisse .....	221
8.2.1	Auge-In-Hand Ansatz zur Pose-Messung.....	221
8.2.2	Simulations-Umgebung.....	222
8.2.3	Eignung für die robotergestützte Koordinatenmesstechnik .....	223
8.3	Ausblick.....	224
8.3.1	Realisierung und Test eines Demonstrationssystems .....	224
8.3.2	Beschleunigung der Pose-Messung .....	225
8.3.3	Erweiterte Anwendungen des CPMS-Prinzips.....	226
	<b>Formelzeichen</b>	<b>227</b>
	<b>Abkürzungen</b>	<b>229</b>
	<b>Anhang</b>	<b>231</b>
A.1	Softwarearchitektur eines CPMS .....	231
A.1.1	Ablauf einer Pose-Messung .....	231
A.1.2	Detaillierte Struktur der Messsoftware .....	232

---

A.2	Messung des Auflösungsvermögens nach ISO 15775 .....	235
A.3	Passive- und Aktive-Pixel Sensoren.....	236
<b>Verzeichnisse</b>		<b>239</b>
	Tabellenverzeichnis.....	239
	Abbildungsverzeichnis.....	241
	Literaturverzeichnis.....	249
	Index .....	255

---

# 1 EINLEITUNG

## 1.1 Motivation

Moderne Multisensor-Koordinatenmessgeräte (KMG) erfassen unterschiedliche Messmerkmale wie Koordinaten, Formen, Konturen und Oberflächen im selben Messdurchgang, indem sie z.B. taktile und optische Sensoren in einem Messkopfsystem kombinieren. Dabei wird eine umfassende Qualitätsprüfung eines Werkstücks erreicht.<sup>1</sup> Dem gegenüber stehen eine beschränkte Integrierbarkeit eines KMG in eine Produktionslinie und die relativ hohen Investitionskosten.<sup>2</sup>

Wegen dieser Nachteile bestanden in der Industrie Bestrebungen, die Messkopfsysteme auf Industrierobotern zu betreiben, was zur Entstehung der robotergetriebenen Koordinatenmesstechnik führte. Industrieroboter haben als Messsystemträger große Vorteile, wie beispielsweise eine sehr gute Integrierbarkeit in eine Produktionslinie oder Bandstraße, wo sie eine lückenlose Kontrolle realisieren. Dabei arbeiten sie in enger Verzahnung mit Montage- und Werkzeugrobotern und können im Gegensatz zu KMG durch ihre hohe Beweglichkeit auch schwer zugängliche Messmerkmale, z.B. im Innern einer Karosserie erreichen.<sup>3</sup> Die grundlegenden Probleme eines Industrieroboters als Messsystemträger sind die, im Vergleich zum KMG weitaus geringere, Positions- und Bahngenaugigkeit, die sich mit den Daten der Antastsensorik überlagern und die erzielbare Messgenauigkeit beschränken.<sup>4</sup>

Die statische Positionsunsicherheit konnte über die Jahre durch moderne Verfahren der Roboterkalibrierung merklich verbessert werden. Beispielsweise kann ein thermisches Driften eines Roboters durch eine zyklisch wiederholte Rekalibrierung im Prozess kompensiert werden.<sup>5</sup> Dynamische Bahnfehler, wie sie u.A. durch Trägheit oder Reibung verursacht werden, haben dagegen höhere stochastische Anteile, die durch Kalibrierung nicht fassbar sind. So übersteigt die Bahnunsicherheit in der Praxis die Positionsunsicherheit leicht um eine Größenordnung.<sup>6</sup>

Gerade der hohe Bahnfehler stellt jedoch ein Problem dar, da die Sensoren eines Koordinatenmesskopfsystems i.d.R. scannend betrieben werden und zum Erreichen einer akzeptablen Prozessgeschwindigkeit ihre Daten während der Roboterbewegung aufnehmen.<sup>7</sup> Typische Anwendungsbeispiele sind Laser-Triangulations-Scanner (LTS) die u.A. zur flächenhaften Vermessung von Spaltmaßen im Karosseriebau

---

<sup>1</sup> Vgl. Weckenmann (2012, 78), Keferstein (2015, 206)

<sup>2</sup> Vgl. z.B. Gräser (1999, 139)

<sup>3</sup> Vgl. Keferstein (2015, 200), Gräser (1999, 139), Wiest (2001, 73), Beyer (2004, 104)

<sup>4</sup> Vgl. Bongardt (2004, 18), Kap. 2.1.2, 2.2.3

<sup>5</sup> Vgl. Bongardt (2004, 53), Wiest (2001, 73), Kap. 2.2.2

<sup>6</sup> Vgl. Alban (11/2000), Beyer (2004, 34), Lange (2003, 43), Kap. 2.2.1, 2.2.2

<sup>7</sup> Vgl. Kreuzer (2007b), Shaw (2012, 9), Keferstein (2015, 77), Kap. 2.1.2

eingesetzt werden und dabei mit sehr hohen Messraten die Oberfläche dreidimensional abtasten.<sup>8</sup>

Abbildung 1 zeigt zur Verdeutlichung eine Gegenüberstellung einiger Sensoren der Koordinatenmesstechnik mit der Positionsunsicherheit von Standard-Industrierobotern, zyklisch rekalierten Präzisionsrobotern und Koordinatenmessgeräten.<sup>9</sup>

Aufgrund der hohen Bahnunsicherheit und des dadurch bedingten Messfehlers sind robotergestützte Messanwendungen derzeit auf Applikationen mit geringen Anforderungen an die Genauigkeit beschränkt. Umgekehrt könnte durch eine Reduktion der Bahnunsicherheit das Einsatzgebiet des Industrieroboters als Messsystemträger erheblich ausgeweitet werden.<sup>10</sup> Prinzipbedingt sind jedoch Verbesserungen der Bahn Genauigkeit am Roboter selbst schwierig und waren bislang nur mäßig erfolgreich.<sup>11</sup>

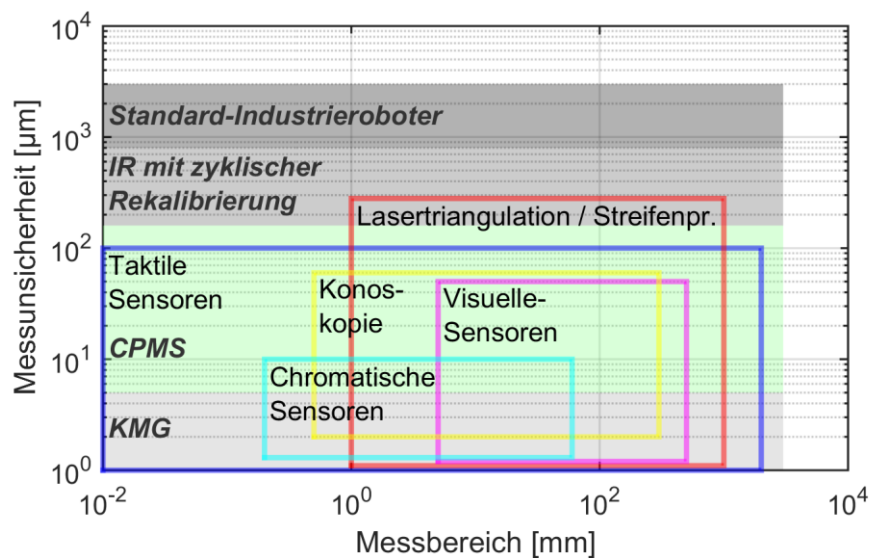


Abbildung 1: Gegenüberstellung der Messunsicherheit marktüblicher Sensoren mit der Positionsunsicherheit von Industrierobotern und KMGs.<sup>12</sup>

In dieser Arbeit soll daher die Entwicklung eines externen kamerabasierten Pose-Messsystems (*CPMS*) vorangetrieben werden, das eine von der Roboterstruktur unabhängige Information zur Verbesserung der Bahnunsicherheit liefert. Dazu könnte das CPMS das Einsatzgebiet des Roboters ab einer Bahngenauigkeit von etwa 160µm sukzessive erweitern. Ab etwa 60-30µm würden Positionsunsicherheiten erreicht, die

<sup>8</sup> Vgl. Keferstein (2015, 200), Weckenmann (2012, 128), Gräser (1999, 138–140)

<sup>9</sup> Vgl. detaillierte Beschreibung in Kap. 2.1, 2.1.2, 2.2.3

<sup>10</sup> Vgl. Kap. 2.2.3

<sup>11</sup> Vgl. Alban (2001), Kap. 2.2.2, 2.2.3

<sup>12</sup> Angelehnt an Kap. 2.1.2, 2.2.3, Keferstein (2015, 199), Shaw (2012, 11), zu KMG: Keferstein (2015, 75).

einen zufriedenstellenden Betrieb einer Vielzahl marktüblicher Messkopfsysteme erlauben und damit den Anwendungsbereich der robotergestützten Messtechnik erheblich erweitern würden.

## 1.2 Prinzip eines kamerabasierten Pose-Messsystems (CPMS)

Marktübliche optoelektronische Pose-Sensoren wie sie u.A. zur Roboterkalibrierung eingesetzt werden, erwiesen sich wegen hoher Kosten durch den Einsatz teurer Spezialkomponenten und Schwächen in der Orientierungsmessung bislang als unwirtschaftlich oder gar ungeeignet.<sup>13</sup> Eine Verbesserung bei gleichzeitiger Kostensenkung könnte hier durch den Einsatz moderner Standard-Kameras und -Bildverarbeitungssysteme erzielt werden, die in jüngerer Zeit durch große Fortschritte in der Computer- und Sensortechnik erhebliche Leistungssteigerungen erfahren und neue Anwendungsgebiete erschließen.<sup>14</sup>

Ein vielversprechender Ansatz, der im Rahmen dieser Arbeit verfolgt wird, sind kamerabasierte Pose-Sensoren nach dem sog. Auge-In-Hand-Prinzip (vgl. Abbildung 8). Dazu wird an der Roboterhand ein mobiler Kameraträger mit einer oder mehreren Kameras installiert. Dieser Kameraträger bestimmt die Pose der Roboterhand durch die Beobachtung stationär im Raum positionierter optischer Zielmarken (siehe dazu ausführliche Beschreibung in Kap. 2.3.4, 3).

Abbildung 2 verdeutlicht den Ansatz am Beispiel einer Roboter-Messanwendung, bei der ein Laser-Triangulations-Sensor über ein Messobjekt geführt wird. Der Sensor erfasst die Objektabstände entlang einer projizierten Laser-Linie (Scan-Linie). Zur Erzeugung eines flächenhaften 3D-Scans werden aus der Bewegung in kurzer zeitlicher Abfolge zahlreiche Scan-Linien erzeugt, die anschließend in einem gemeinsamen Mess-Koordinatensystem registriert werden müssen. Für die Registrierung wird die exakte Sensor-Pose zum Zeitpunkt  $t_i$  der Aufnahme der  $i$ -ten Scan-Linie benötigt, die vom CPMS bereitgestellt wird.<sup>15</sup>

---

<sup>13</sup> Vgl. Kap. 2.3.2, 2.3.5

<sup>14</sup> Vgl. z.B. Vorworte Jähne (2012) und Süsse (2014)

<sup>15</sup> Vgl. Kreutzer (2007b), Kap. 2.1.1, 2.1.2

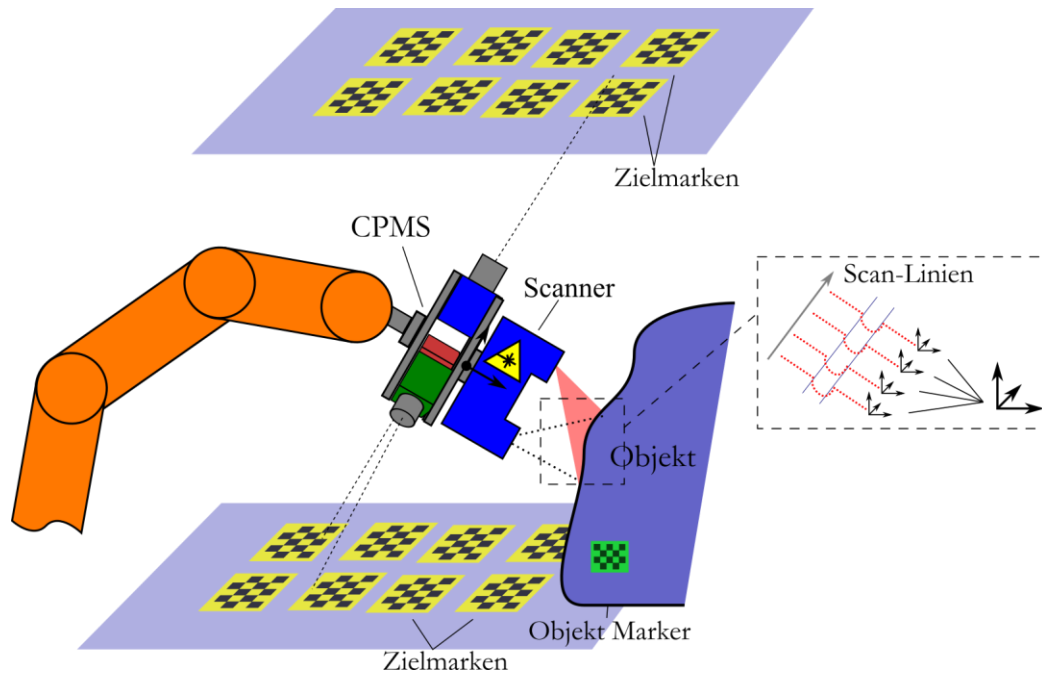


Abbildung 2: Beispielhaftes Einsatzszenario des CPMS zur verbesserten Messung der Pose eines robotergeführten Laser-Triangulations-Sensors

Eine Zielmarke liefert eine Anzahl von 3D-Referenzpunkten mit bekannter räumlicher Lage, die von einer Kamera als 2D-Koordinaten innerhalb ihrer Bildebene wahrgenommen werden. Zur Pose-Messung wird ein sog. Abbildungsmodell aufgestellt, das den Zusammenhang zwischen den 2D-Bildbeobachtungen und der eingenommenen 6D-Pose herstellt. Es entsteht ein System von Beobachtungsgleichungen, das durch eine Modellausgleichsrechnung nach der gesuchten Pose aufgelöst wird.<sup>16</sup>

Ist die Messsystem-Pose erst einmal bekannt, können umgekehrt instationäre Zielmarken (sog. Objekt-Marker) zur Identifikation und Lokalisierung an Messobjekten angetastet werden.

### 1.3 Problemstellung und Zielsetzung

Das grundlegende Problem des CPMS-Prinzips ist seine relativ hohe Komplexität, die sich über alle Teilaspekte, beginnend mit dem Systemaufbau, der Messalgorithmik bis

<sup>16</sup> Vgl. detaillierte Ausführungen in Kap. 3.1, 7.1, 7.2



hin zur Systemkalibrierung, fortsetzt. Während bei einfacheren optischen Pose-Sensoren<sup>17</sup> i.d.R. eine einzelne Kamera ein einzelnes Ziel verfolgt, wirkt beim CPMS ein komplexer Verbund aus mehreren Kameras und Zielmarken zusammen.

Um eine grundlegende theoretische Auseinandersetzung mit dem CPMS-Prinzip zu erreichen und langfristig Werkzeuge zur effizienten Planung und Optimierung solcher Systeme bereit zu stellen, wird in dieser Arbeit der Weg über die Entwicklung eines Simulations-Werkzeuges gewählt. Dazu beginnt die Simulation beim einzelnen Bildaufnahmesystem und seinen Eigenschaften und reicht bis hin zum komplexen Zusammenspiel mehrerer Kameras und Zielmarken. Durch die vollständige Transparenz und Konfigurierbarkeit der Simulation bildet sie die Basis für die Untersuchung und Verbesserung des CPMS-Prinzips.

Teilziele dieser Arbeit, die in den folgenden Abschnitten näher erläutert werden, sind die Erstellung eines CPMS-Abbildungsmodells zur Beschreibung der Beziehung zwischen Bild und Raum, die Entwicklung von Kalibrierverfahren zur praktischen Bestimmung der Zielmarken-Posen und Kamera-Parameter, sowie die Entwicklung von Methoden zur Ermittlung und Verbesserung der Messgenauigkeit.

### 1.3.1 CPMS-Abbildungsmodell und System-Kalibrierung

Um die Beziehung zwischen den stationären Zielmarken und ihrer Abbildung auf den Bildebenen der Kameras abhängig von der eingenommenen Mess-Pose zu beschreiben, muss ein mathematisches *Abbildungsmodell* formuliert werden. Fixe Parameter dieses Modells sind die *Kamera-Parameter*, die die Abbildungseigenschaften der einzelnen Kamera wie Objektivverzeichnung oder –Vergrößerung beschreiben und die sog. *System-Parameter*. Letztere formulieren die räumliche Anordnung der Zielmarken und das sog. *Messkopf-Design*, also die relative Anordnung der CPMS-Kameras auf ihrem mobilen Träger.

Ist das Abbildungsmodell erst gefunden, entsteht bei Umstellung nach der gesuchten Messsystem-Pose ein komplexes nichtlineares Gleichungssystem, das im Rahmen einer Ausgleichsrechnung gelöst werden muss. Weiter sind bei einer realen Anwendung die Kamera- und Systemparameter zunächst nicht genau bekannt, so dass Verfahren entwickelt werden müssen, mit deren Hilfe ein CPMS später am Aufstellort effizient kalibriert werden kann.

---

<sup>17</sup> Vgl. Kap. 2.3.5, Tabelle 4: Übersicht photogrammetrische 6D-Pose-Sensoren.

Daraus ergeben sich folgende Teilziele:

- a) Entwurf eines geeigneten Mehrkamera-Abbildungsmodells zur Beschreibung der Beziehungen zwischen den Zielmarken und ihrer Abbildung auf den Bildebenen der Kameras.
- b) Entwicklung einer effizienten Methode zur Lösung der Modellgleichungssysteme.
- c) Entwicklung von Verfahren zur CPMS-Kalibrierung.

### 1.3.2 Pose-Messgenauigkeit

Bekannte, dem CPMS-Prinzip ähnliche, Konzepte von Pose-Sensoren erzielten bislang noch keine Bahngenaugigkeiten, die diejenige eines kalibrierten Roboters erreichen oder gar übersteigen würden.<sup>18</sup> Dies wäre aber Voraussetzung, um neue Roboter-Messanwendungen zu erschließen. Potentielle Ursachen liegen z.B. in Schwächen der Bildaufnahme und Bildmessung, die zu einem sog. *Bildmessfehler* bei der 2D-Antastung einer Zielmarke im Kamerabild führen. Die Bildmessung steht dabei am Anfang der Verarbeitungskette, so dass sich ein Bildmessfehler unweigerlich in einen entsprechenden Pose-Messfehler fortpflanzen muss.

Erheblichen Einfluss hat das Messkopfdesign, da eine zu geringe Anzahl an Kameras oder eine ungünstige Anordnung auf dem mobilen Träger zu einer schlechten Konditionierung des Modellgleichungssystems führen kann. Dadurch vergrößert sich der Hebelfaktor, mit dem sich der Bildmessfehler in einen resultierenden Pose-Messfehler übersetzt. Dies führt, ähnlich der Singularitäten in der Robotik, im Extremfall dazu, dass für die Messsystem-Pose keine oder nur eine sehr ungenaue Lösung ermittelt werden kann. Weitere potentielle Ursachen sind fehlerbehaftete Kamera- und Systemparameter, die sich auf den Pose-Messfehler auswirken.<sup>19</sup> Das komplexe Zusammenspiel der einzelnen Fehlerquellen ist im Rahmen dieser Arbeit zu klären.

Zur Entwicklung eines CPMS-Konzepts mit verbesserter Pose-Messgenauigkeit ergeben sich folgende Teilziele:

- a) Entwicklung von Methoden zur Aufdeckung und Beseitigung der Ursachen von Bildmessfehlern.
- b) Entwicklung von Methoden zur Analyse der Fehlerfortpflanzung zwischen Bild- und Pose-Messfehler.
- c) Entwicklung eines optimalen Messkopfdesigns.

---

<sup>18</sup> Vgl. Kap. 2.3.5: Tabelle 4

<sup>19</sup> Vergl. Kap. 5.3, 7.3, 7.4, 7.6

### 1.3.3 Simulations-Umgebung für CPMS

Die oben genannten Ziele, wie die Entwicklung von Verfahren zur Systemkalibrierung, Verbesserung der Pose-Genauigkeit und des Messkopfdesigns, können am ehesten auf Grundlage einer realitätsnahen Systemsimulation erreicht werden.

Es gibt zahlreiche Variationsmöglichkeiten bei der Konzeptionierung eines CPMS, wobei sich die einzelnen Parameter vielfältig auf die Systemeigenschaften und Messleistung auswirken. So wirkt beispielsweise eine veränderte Beleuchtung auf den Bildmessfehler oder das Messkopfdesign auf den Pose-Messfehler.<sup>20</sup> Hinzu kommt, dass eine CPMS-Konfiguration immer in enger Verbindung mit der angestrebten Messapplikation konzipiert werden muss, da die Anwendung bestimmte Randbedingungen wie Messvolumen oder Messgenauigkeit vorgibt. So ist beispielsweise für ein größeres Messvolumen unter Umständen eine höhere optische Vergrößerung, eine stärkere Beleuchtung oder eine andere Verteilung der Zielmarken vorzusehen.<sup>21</sup>

Mittels Simulation können im Computer sehr schnell unterschiedliche CPMS-Konfigurationen aufgebaut werden, um ihre Eigenschaften zu untersuchen. Dabei kann z.B. der Pose-Messfehler für ein bestimmtes Messvolumen und Kamerasystem abgeschätzt werden. Oder es können einzelne Parameter, wie Beleuchtung, Kamera-Optik und Messkopfdesign kontrolliert verändert werden, um z.B. die Auswirkung auf den Bild- oder Pose-Messfehler zu ermitteln. Ebenso wird eine systematische Optimierung von Parameter oder Parameter-Kombinationen, z.B. auf geringsten Messfehler, aber auch auf andere Systemeigenschaften wie Lichtleistung oder Zielmarkenzahl ermöglicht.

Experimentieraufbauten haben dagegen den Nachteil, dass nicht alle Systemeigenschaften bekannt sind. Beispielsweise unterliegen die eingesetzten Komponenten Fertigungstoleranzen. Dadurch sind solche Aufbauten für eine systematische Untersuchung intransparent. Sie spielen jedoch eine wichtige Rolle bei der Überprüfung von Simulationsergebnissen und der Ermittlung realitätsnaher Simulationsparameter.

Eine besondere Herausforderung bei der Konzeptionierung von CPMS stellt die Entwicklung von Verfahren zur System-Kalibrierung dar. Hier handelt es sich im übertragenen Sinne um ein Henne-Ei-Problem, da ohne ein geeignetes Verfahren ein reales CPMS nicht kalibriert und dementsprechend auch nicht in Betrieb genommen werden kann, um daran Untersuchungen vorzunehmen. Diese Problematik kann durch eine System-Simulation vermieden werden, da hier in der Entwicklungsphase das Zusammenspiel der System-Parameter an einem transparenten Modell untersucht werden kann.

Sind die elementaren Probleme des CPMS-Prinzips erst einmal gelöst, verbleibt mit der Systemsimulation ein wertvolles Werkzeug zur effizienten computergestützten Planung konkreter CPMS-Anwendungen.

---

<sup>20</sup> Vgl. Kap. 5.3.4, 7.5.3

<sup>21</sup> Vgl. Kap. 4.6, 7.6.2

Ein übergeordnetes Teilziel dieser Arbeit ist damit die Entwicklung einer Simulations-Umgebung und simulationsbasierter Methoden zur Konzeptionierung, Leistungsabschätzung und Optimierung kamerabasierter Pose-Messsysteme.

Die Simulations-Umgebung soll dazu aus zwei elementaren Teil-Modulen aufgebaut werden:

- a) Einem *Bildaufnahme-Simulator* (BAS) zur Simulation eines einzelnen Kamerateams und Ermittlung des Bildmessfehlers. Er ist die Basis für die Untersuchung und Optimierung der Zielmarkenentastung und Bildmessalgorithmik.
- b) Dem *Bildmess-Simulator* (BMS) zur Simulation einer kompletten CPMS-Konfiguration, bestehend aus mehreren Zielmarken und Kameras und Ermittlung des Pose-Messfehlers. Er ist die Basis zur Untersuchung und Optimierung komplexer anwendungsspezifischer CPMS-Konfigurationen.

## 1.4 Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit ist in acht Kapitel gegliedert die für eine gute Übersicht kurz skizziert werden:

**Kapitel 2, Stand des Arbeitsgebietes:** Es wird ein Einblick in den Stand der robotergestützten Koordinatenmesstechnik, sowie der eingesetzten Sensoren gegeben. Es werden Ansätze erläutert, wie die Positionsunsicherheit aktueller Roboter durch externe Pose-Sensoren verbessert werden kann, um so ihr Einsatzgebiet zu erweitern. Eine ökonomische Umsetzung kann am ehesten mit kamerabasierten Pose-Messsystemen erfolgen, deren aktueller technologischer Stand erläutert wird.

**Kapitel 3, Funktionsprinzip und Architektur:** Das Funktionsprinzip, sowie der hard- und softwaretechnische Aufbau eines CPMS werden erläutert. Wichtige Kenngrößen eines CPMS wie Pose und Pose-Fehler, sowie Messvolumen werden definiert. Die Architektur der Simulations-Umgebung für Planung und Test anwendungsspezifischer CPMS-Anwendungen wird erläutert.

**Kapitel 4, Simulation digitaler Bildaufnahmesysteme:** Hier wird die Erzeugung möglichst realitätsnaher synthetischer Bilder des CPMS vorgestellt. Beschrieben werden wichtige physikalische Eigenschaften von optischen Abbildungssystemen, Beleuchtung und Bildsensoren, die unter Zuhilfenahme von Daten und Messwerten einer realen Kamera in ein Simulationsmodell der Bildaufnahme überführt werden. Ein simulationsbasierter Algorithmus zur effizienten Ermittlung der Kamera- und Beleuchtungsparameter unter Vorgabe anwendungsspezifischer Anforderungen wird vorgestellt.

**Kapitel 5, Photogrammetrische Zielmarken und Bildmessung:** Eigenschaften diverser Zielmarkentypen werden diskutiert und eine geeignete Zielmarkenform mit zugehörigem Bildmessverfahren zur Antastung im Digitalbild ausgewählt. Mittels der in Kap. 4 vorgestellten Bildaufnahmesimulation werden die durch Bildrauschen und Inhomogenität der Beleuchtung verursachten Bildmessfehler detailliert untersucht. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse werden geeignete Fehlerkompensationsverfahren entwickelt und ihre Leistungsfähigkeit untersucht. Zuletzt wird ein Verfahren zur Kompensation von durch die Bewegungsunschärfe bedingter Bildmessfehler entwickelt.

**Kapitel 6, Geometrisches Kameramodell und Kalibrierung:** Ein Kameramodell zur Beschreibung der Abbildungseigenschaften und Objektivverzerrung einer einzelnen Kamera wird vorgestellt. Der Kalibrierprozess wird erörtert, es wird gezeigt, wie Kalibrierfehler erkannt und vermieden werden können und wie das Kameramodell für eine präzise Bildmessung auf die Eigenschaften einer speziellen Kamera optimiert werden kann. Der mit der Kamera nach Kalibrierung erreichte Bildmessfehler dient als Ausgangsgröße für die spätere Simulation und Leistungsbewertung von Mehrkameranensystemen.

**Kapitel 7, Mehrkamerabasierte 6D-Pose-Messsysteme:** Dieses Kapitel stellt das Zentrum dieser Arbeit dar. Das mathematische Abbildungsmodell eines Mehrkamera-Pose-Sensors nach dem Auge-In-Hand-Prinzip wird erstellt und es wird gezeigt, wie mittels eines nichtlinearen Ausgleichsverfahrens aus den digitalen Abbildungen der anvisierten Zielmarken die Messsystem-Pose errechnet wird. Das zentrale Problem dieses Sensortyps, das (von der Kamerakonfiguration abhängige) Auftreten schwer detektierbarer Bewegungen, im weitesten Sinne vergleichbar mit Singularitäten in der Robotik, wird untersucht und erklärt. Zum Auffinden einer idealen Kamerakonfiguration, wird ein auf der Singulärwertzerlegung basierendes Verfahren entwickelt. Zuletzt werden praxistaugliche Verfahren zur Kalibrierung eines CPMS am Aufstellort vorgestellt und gezeigt, welche Pose-Messunsicherheiten auf Basis der in Kap. 4 vorgestellten realen Kamera theoretisch erreichbar sind bzw. welcher Aufwand dazu betrieben werden muss.

**Kapitel 8, Schlussbetrachtungen:** Dieses abschließende Kapitel gibt eine Zusammenfassung und Diskussion der erzielten Ergebnisse und einen Ausblick auf die weiterführenden Anwendungen der entwickelten Systeme. Zukünftig geplante Forschungsaktivitäten in die Richtung dieser Arbeit werden genannt.

## 1.5 Schriftkonventionen und Formeln

In allen aufgeführten Formeln dient die Hervorhebung **Fett** zur Kennzeichnung von Vektoren und Matrizen, sofern nicht anders angegeben. Matrizen werden zusätzlich

durch Großbuchstaben gekennzeichnet. Die Hervorhebung gilt in gleicher Weise für Funktionen, deren Resultat ein Vektor oder eine Matrix ist.

**Beispiel:**  $\mathbf{p} = \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix}$ ,  $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}$ ,  $\mathbf{f}(\mathbf{p}) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{p}$

Wichtige Formelzeichen sowie Abkürzungen werden am Ende der Arbeit in Form eines Formel- bzw. Abkürzungsverzeichnis (Tabelle 20 und Tabelle 21) zusammengefasst. Wichtige *Begriffsdefinitionen* werden in einem Index verzeichnet.

---

## 2 STAND DES ARBEITSGEBIETES

Dieses Kapitel gibt zunächst eine kurze Einführung in die Entwicklung und die Hintergründe der robotergestützten Koordinatenmesstechnik. Anschließend werden die Messprinzipien und Leistungsmerkmale typischer Sensoren zur taktilen und optischen Antastung von Messmerkmalen besprochen und gezeigt, warum die Positionsgenauigkeit eines Industrieroboters die erzielbare Messleistung begrenzt.

Weiter wird erörtert, in welchem Umfang die Robotergenauigkeit durch Methoden der Roboterkalibrierung gesteigert werden kann. Zuletzt wird der Einsatz externer Pose-Messsysteme für die präzisere Positionsbestimmung des Messkopfsystems besprochen.

### 2.1 Koordinatenmesstechnik und Sensoren

Zu Beginn werden elementare Eigenschaften der Koordinatenmesstechnik, sowie der eingesetzten Sensorik und die Anforderungen an einen Industrieroboter als Messsystemträger erörtert.

Ein *Koordinatenmessgerät*<sup>22</sup> (KMG) basiert auf einem Messkopfsystem, dessen Messbereich durch ein Verfahrssystem mit Positions- oder Winkelsensoren erweitert wird, so dass die Position und Orientierung (Pose) dieses Messkopfes jederzeit in einem Bezugssystem bekannt sind.

Im *Messkopfsystem*<sup>23</sup> können taktile (Messtaster) oder berührungslose (z.B. optische) Messaufnehmer eingebaut sein, die schaltend oder messend in ein bis drei Freiheitsgraden (1-3D) agieren und nach unterschiedlichen Messprinzipien arbeiten (vgl. Kap. 2.1.2). Berührungslos arbeitende Messaufnehmer haben dabei den Vorteil, dass eine sehr schnelle automatische Messwertaufnahme erfolgen kann, bis hin zur Aufnahme dichter Koordinatennetze von Freiformflächen mit scannenden Verfahren wie z.B. dem Laser-Lichtschnitt.<sup>24</sup>

Mit modernen Multisensor KMGs können unterschiedlichste Messmerkmale wie Koordinaten, Formen und Lagen, sowie Konturen oder Oberflächen erfasst werden, indem z.B. taktile und optische Sensoren kombiniert werden. Die unterschiedlichen Bauformen von KMGs zeichnen sich im Allgemeinen durch einen massiven und steifen Aufbau der Strukturteile mit i.d.R. drei kartesisch angeordneten Verfahrsachsen (ähnlich Werkzeugmaschinen) aus, die in klimatisierten Messräumen Genauigkeiten in einer Größenordnung von etwa 5-50µm (pro 1m Messbereich) erreichen.<sup>25</sup>

---

<sup>22</sup> Vgl. Weckenmann (2012, 13), Wikipedia

<sup>23</sup> Vgl. Weckenmann (2012, 78), Keferstein (2015, 206)

<sup>24</sup> Vgl. Keferstein (2015, 206)

<sup>25</sup> Vgl. Keferstein (2015, 75)

Nach Keferstein<sup>26</sup> wird in den nächsten Jahren eine rasante Entwicklung im Bereich der optischen Koordinatenmesstechnik erwartet. Bestehende Verfahren werden weiterentwickelt und neue Messprinzipien werden hinzukommen. Aufgrund fortschreitender Standardisierung ist weiter zu erwarten, dass zukünftig Sensoren beliebiger Hersteller in ein KMG integriert werden können, wodurch teure Sondermessgeräte zunehmend von kostengünstigen universellen KMGs verdrängt werden.<sup>27</sup>

### 2.1.1 Robotergestützte Koordinatenmesstechnik

Seit einiger Zeit bestehen in der Industrie Bestrebungen, klassische Aufgaben von Koordinatenmessgeräten durch Standard-Industrieroboter (IR) zu erfüllen. Dabei ist die Reduktion der Investitionskosten nur ein Aspekt.

Eine Bauteilprüfung mit KMGs geschieht meist in separaten Messräumen, die speziell thermostatiert oder sogar schwingungsbedämpft sein müssen. Aufgrund der langen Messzeiten und der Erfordernis das Bauteil aus der Produktionslinie zu entnehmen, können Prüfungen bestenfalls stichprobenartig erfolgen. Gewünscht wird aber meist eine umfassende Kontrolle direkt in der Produktionslinie.

Ein erster Schritt in diese Richtung waren sog. Messtunnel in Form von Stahlrohrgestellen, die mit zahlreichen fest installierten Sensoren bestückt wurden, um beispielsweise Messmerkmale im Karosseriebau direkt in der Produktionslinie („Inline“) zu ermitteln. Thermische Einflüsse in der Produktionshalle führen zu Längenausdehnung und Verzug des Gestells und müssen durch ein kalibriertes Temperaturmodell eliminiert werden. Die Nachteile eines solchen Messtunnels sind unter anderem die hohe Komplexität des Messaufbaus, da ein stationärer Sensor jeweils nur ein Merkmal misst. Außerdem generiert das Stahlrohrgestell Fehler, wenn zur Kalibrierung zu wenige Temperaturwerte zur Verfügung stehen.<sup>28</sup>

Viele Nachteile von KMGs und Messtunneln können durch in die Fertigungslinie integrierte Messroboter beseitigt werden. Ein solcher Roboter ist weitaus flexibler, da er die auf ihm montierten Sensoren dynamisch an variablen Messmerkmalen einsetzen kann, was eine erhebliche Kostenreduktion zur Folge hat. Auch kann ein Industrieroboter schwer zugängliche Stellen, z.B. im Innern einer Karosserie, erreichen, die für Messtunnel oder KMGs unzugänglich wären. Ein weiterer Vorteil von Robotern als Messsystemträger ist die flexible Programmierung, die eine leichte Anpassung an geänderte Produktionsbedingungen ermöglicht, beispielsweise bei einer Produktumstellung. Auch können Messprogramme automatisch aus den CAD-Daten erzeugt

---

<sup>26</sup> Vgl. Keferstein (2015, 195)

<sup>27</sup> Vgl. Keferstein (2015, 197)

<sup>28</sup> Vgl. Gräser (1999, 139), Wiest (2001, 73), Beyer (2004, 104)



werden, was insbesondere bei kleinen Losgrößen, z.B. bei der individualisierten Produktion (Industrie 4.0)<sup>29</sup>, vorteilhaft ist.<sup>30</sup>

Ein weiterer Schritt in diese Richtung ist eine automatische Identifikation von Messmerkmalen. Abbildung 3 zeigt dazu eine Modell-Anwendung eines Roboter-gestützten Laser-Messsystems zur Bestimmung von Spaltmaßen im Karosseriebau. Früher mussten für diese Aufgabe für jedes Modell spezielle Stahllehren angefertigt werden, wodurch sehr hohe Investitionskosten und Rüstaufwände entstanden. Im vorliegenden Beispiel werden Spaltmaß und Bündigkeit durch zwei in einem Gehäuse verbaute Laser-Lichtschnitt-Scanner lückenlos erfasst. Der zweite Scanner erkennt dabei Messmerkmale, die aus der Perspektive des ersten Scanners verdeckt sind und umgekehrt.

Um Rüstaufwand bei einem Modellwechsel zu vermeiden und einen Positionierfehler beim Fördersystem auszugleichen, wird der Spalt durch eine Software automatisch aufgefunden und der Sensor durch einen Trackingalgorithmus am Spalt entlang geführt. Zugleich erfolgt eine automatische Toleranzprüfung. Zusätzliche LED-Leuchtbalken erlauben neben der Lasermessung den Einsatz des Sensors als Stereokamera zur bildbasierten Antastung weiterer Messmerkmale.<sup>31</sup>

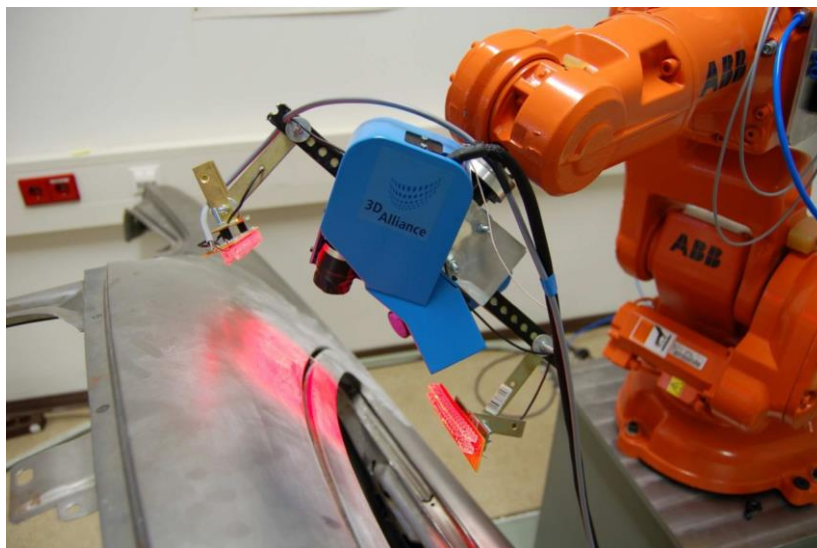


Abbildung 3: Roboter-gestütztes Inline-Messsystem zur Vermessung von Spaltmaßen an Karosserien mit dualen Laser-Lichtschnitt-Sensoren und intelligenter Bildverarbeitung zur automatischen Spaltverfolgung (Bild: Institut für Technik und Informatik, TH-Mittelhessen).

---

<sup>29</sup> Vgl. z.B. Bauernhansl (2014)

<sup>30</sup> Vgl. Keferstein (2015, 200), Gräser (1999, 139), Wiest (2001, 73), Beyer (2004, 104)

<sup>31</sup> Kreutzer (2007b)

Der Nachteil von Industrierobotern (IR) ist die gegenüber KMGs stark reduzierte Positionsgenauigkeit, die den Einsatz als Messsystemträger erheblich einschränkt, sobald die Position des Sensors in das Messergebnis eingeht. Dies ist beispielsweise beim Antasten von Messpunkten mit einem Messtaster oder einem Laser-Lichtschnittscanner der Fall, aber auch bei vielen weiteren Messanwendungen (vgl. Kap. 2.1.2).<sup>32</sup>

Ursachen für die eingeschränkte Genauigkeit sind u.A. die geringe strukturelle und thermische Stabilität von Knickarmrobotern, die sich in Positionierfehlern und insbesondere Bahnfehlern bei dynamischen Bewegungen auswirken (vgl. Kap. 2.2). Hier gibt es zahlreiche Bemühungen, die Genauigkeit des Robotermesssystems zu steigern, beispielsweise durch fortgeschrittene Verfahren der Roboterkalibrierung. Die so verbesserte Positionsunsicherheit ist jedoch noch immer zu groß, um das Potential üblicher Sensoren und Messaufnehmer ausschöpfen zu können und es entstehen teils hohe Kosten und Aufwände für die notwendigen Zusatzkomponenten (vgl. Kap. 1.1 Abbildung 1, Kap. 2.2.2).

### 2.1.2 Messprinzipien und Messunsicherheit typischer Sensoren

Auf dem Markt existiert eine Vielzahl kommerzieller Sensoren, die in ein Messkopfsystem zur Montage auf einem IR oder KMG integriert werden können. Detaillierte Übersichten sind z.B. bei Shaw und Keferstein<sup>33</sup> zu finden. Im Folgenden werden einige wichtige Messprinzipien und die damit in kommerziellen Produkten erzielten Messbereiche und Messunsicherheiten beschrieben.

Integrierbare Sensoren zur Antastung von Messmerkmalen werden berührend (klassischer Messtaster) oder berührungslos (moderne optische Sensoren) ausgelegt und erweitern das Positioniersystem mit einem eigenen (kleinen) Messbereich. Die Messunsicherheit des Gesamtsystems ergibt sich entsprechend aus der Überlagerung der Unsicherheit des Positioniersystems und des Antastfehlers des Sensors.

Die meisten Sensoren erlauben, neben einer Einzelmessung im Stillstand, einen scannenden Messbetrieb, der die Messwertaufnahme aus der Bewegung heraus ermöglicht. Neben der Möglichkeit, dichte Messdaten z.B. über Freiformflächen zu erhalten, beschleunigt das Scanning den Messprozess erheblich, da das zeitaufwendige Abstoppen und Ausschwingen des Positioniersystems entfällt.<sup>34</sup>

Unterschieden werden zunächst taktile und berührungslose optische Messprinzipien und Verfahren: Taktile Tastsysteme werden zur Erfassung von 3D-Geometrien und Freiformflächen verwendet, wenn keine hohe Punktdichte erforderlich ist.

Bei den klassischen Messtastern dient meist eine Rubinkugel als Antastelement, die über einen Schaft mit einer messend oder schaltend ausgelegten Sensorik verbunden

---

<sup>32</sup> Vgl. Keferstein (2015), Gräser (1999)

<sup>33</sup> Shaw (2012), Keferstein (2015)

<sup>34</sup> Vgl. Shaw (2012, 9), Keferstein (2015, 77)

ist.<sup>35</sup> Moderne Bauarten wie das *Zeiss VAST System* erlauben Einzelpunktaufnahme und Scanbetrieb in bis zu drei Freiheitsgraden.<sup>36</sup>

Spezielle optoelektronische Bauformen sind die sog. Fasertaster, die als Tasterelement die kugelförmige Spitze einer feinen Glasfaser verwenden. Die durch ein Kamerasystem lokalisierte Spitze wird durch einen in die Faser eingebrachten Lichtstrom zum Leuchten angeregt. Durch die geringe Größe der Tastkugel zwischen 20µm und einigen 100µm können sehr kleine Strukturen mit sehr geringen Antastkräften im µ-Newton Bereich und Unsicherheiten um 0,5µm angetastet werden.<sup>37</sup>

Tabelle 1 zeigt eine Übersicht ausgewählter Messprinzipien und -Verfahren, sowie die Messbereiche und Messunsicherheiten, die mit gängigen kommerziellen Sensoren erreicht werden.

Tabelle 1: Übersicht ausgewählter Messprinzipien und Verfahren für Sensoren der Koordinatenmesstechnik.<sup>38</sup>

Messprinzip	Antastung	Verfahren	Messunsicherheit	Messbereich	Eigenschaften
Taktile	1-3D	Messtaster	0,1-10µm	Wenige mm	Im Mittel langsamer als optische Verfahren.
		Fasertaster			
Visuelle	2D	Bildverarbeitung	0,5-50µm	5-500mm	Besonders geeignet für laterale Messungen.
	1-3D	Fokusvariation	1-100µm	1-100mm	Flexible Einzelpunktmessung, kein Scanning - daher langsam.
Triangulationsbasierte	1-2D	Laser-Triangulation	10-300µm	1-1.000mm	Derzeit <b>wichtigster Sensortyp</b> für industrielle Anwendungen.
	3D	Streifenprojektion	10-300µm	1-1.000mm	Linearer Zusammenhang: Messfeldgröße zu Messunsicherheit.
Interferometrische	1-2D	Konoskopische Holografie	2-50µm	0,5-300mm	Robust durch redundante Abstandsinformation im Interferenzmuster.
Chromatische	1-2D	Chrom. Aberration	30nm-10µm	0,02-60mm	Geeignet auch für spiegelnde Oberflächen.

Berührungsfreie optoelektronische Sensoren lassen sich nach Art der Antastung in Punktsensoren (1D-Antastung), Liniensensoren (2D-Antastung) oder Flächensensoren (3D-Antastung) klassifizieren. Für die Erfassung von dreidimensionalen

<sup>35</sup> Vgl. Weckenmann (2012, 95)

<sup>36</sup> Weckenmann (2012, 113)

<sup>37</sup> Weckenmann (2012, 116), Keferstein (2015, 78)

<sup>38</sup> Vgl. Keferstein (2015, 199)

Werkstücken mit Punkt oder Liniensensoren sind mindestens ein oder zwei mechanische Achsen notwendig, mit deren Hilfe der Sensor über die Werkstückoberfläche bewegt werden kann. Dabei bestimmt das Verfahrenssystem einerseits die Größe des (lateralen) Messbereichs. Andererseits addiert sich die Unsicherheit der Positionsmessung zur Messunsicherheit des Sensors.<sup>39</sup> Anwendung finden beispielsweise visuelle, triangulationsbasierte oder chromatische Messprinzipien, die sich in Eigenschaften wie Messbereich und Messunsicherheit oder Dimensionalität unterscheiden.

*Visuelle Sensoren* werten, ähnlich dem menschlichen Auge, ein zweidimensionales Bild des zu messenden Objekts aus. Dazu wird die Intensitätsverteilung im Bild mit einem Sensor (z.B. einer Kamera) gemessen und durch eine Bildverarbeitungssoftware Form oder Lage von Messmerkmalen in der Bildebene bestimmt. Als Abgrenzung zu den Abstandssensoren werden diese Sensoren auch als lateral messende Sensoren bezeichnet. Ein scannender Messbetrieb ist in Kombination kurzer Belichtungszeiten und blitzender Beleuchtung möglich und reduziert erheblich die Messzeiten. Dies erfordert aber eine gute Synchronisation von Bildaufnahme und Auslesen des Positionsmesssystems.<sup>40</sup>

Die laterale Ortsauflösung ist bei realen Systemen etwa 10-fach besser als das Pixelraster der Kamera, so dass sich die Messauflösung näherungsweise aus der Größe des Bildfeldes und der Anzahl der Sensorpixel ergibt. Ein üblicher Bildsensor mit einer Bildgröße von beispielsweise 1600x1200 Pixeln erreicht damit in einem Bildfeld von (160x120)mm<sup>2</sup> einer Ortsauflösung von etwa 10µm.<sup>41</sup>

Die laterale 2D-Bildmessung kann durch Ergänzung einer Abstandsmessung relativ einfach auf die dritte Dimension erweitert werden. Ein gängiges Verfahren hierzu ist die sog. Fokusvariation, bei der unter Einsatz eines Objektivs geringer Schärfentiefe der Abstand zwischen Kamera und Objekt entlang der optischen Achse variiert wird, während eine Bilderserie aufgenommen wird. Anschließend wird durch eine Kontrastauswertung festgestellt, bei welchem Abstand ein Messmerkmal in der Fokusebene lag. Erweiterte Verfahren ersetzen die Abstandsvariation durch ein Autofokus-Objektiv und/oder setzen einen fokussierten Laserstrahl ein, der eine sehr genaue punktuelle Abstandsmessung erlaubt.<sup>42</sup>

Die *Lasertriangulationssensoren* (LTS) sind derzeit die am weitesten verbreiteten optischen Abstands-Sensoren in industriellen Anwendungen.<sup>43</sup> Sie werden als 1D-Punkt- oder 2D-Liniensensor ausgelegt, wobei letzteres auch als *Laser-Lichtschnitt-Sensor* bezeichnet wird. Abbildung 4 verdeutlicht das Prinzip.

Der diffus zurückgestreute Anteil einer kollinierten Punkt- bzw. Linienförmigen Strahlquelle wird unter einem Triangulationswinkel von meist 25-30° auf einem

---

<sup>39</sup> Vgl. Shaw (2012, 9:3)

<sup>40</sup> Vgl. Weckenmann (2012, 119,130)

<sup>41</sup> Vgl. Weckenmann (2012, 128)

<sup>42</sup> Vgl. Keferstein (2015, 200), Weckenmann (2012, 128)

<sup>43</sup> Keferstein (2015, 204)

Detektor abgebildet. Bei einer Distanzänderung zwischen der betrachteten Objekt-  
 oberfläche und dem Sensor verschiebt sich die Lage des Laserpunktes bzw. der Linie.  
 Bei bekannter Sensorgeometrie wird diese Lageänderung durch eine Kamera detektiert  
 und in ein Distanzmaß umgerechnet. Die Empfindlichkeit hängt dabei vom Triangu-  
 lationswinkel ab, da größere Winkel eine größere abstandsabhängige Verschiebung be-  
 wirken. Kommerzielle Sensoren sind mit Messbereichen bis ca. 1000mm erhältlich und  
 erreichen Messunsicherheiten von etwa 10-300 $\mu$ m. Zur Aufnahme von 3D-Freiform-  
 flächen werden Laser-Lichtschnitt-Sensoren in einem Scan-Modus über das Werk-  
 stück geführt, wobei sie bis zu 500 3D-Linien pro Sekunde aufnehmen.<sup>44</sup>

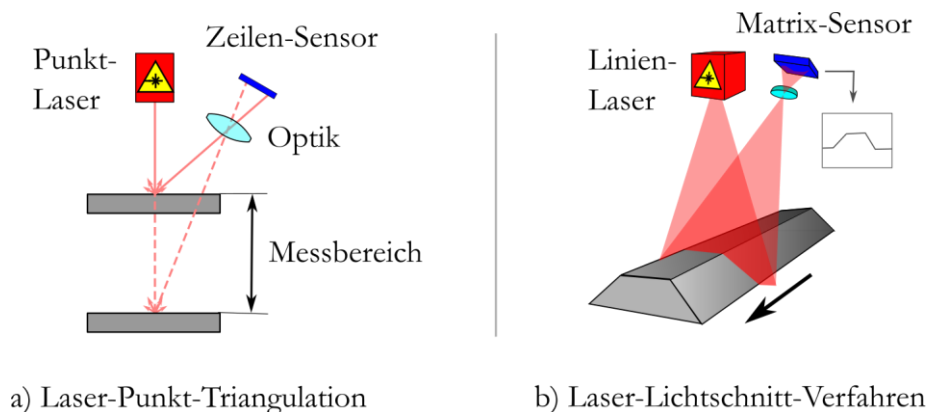


Abbildung 4: Prinzip der Laser-Triangulation zur 1D- und 2D-Abstandsmessung.

Eine Erweiterung des Laser-Lichtschnitt-Prinzips durch die parallele Auf-  
 nahme mehrerer Lichtschnitte stellt die sog. *Streifenprojektion* dar. Hier wird statt einer  
 einzelnen Laserlinie durch einen Videoprojektor ein flächenhaftes Streifen- oder Wel-  
 lenmuster auf das Messobjekt projiziert. Unter einem Triangulationswinkel von etwa  
 15-30° wird mittels Kamera und Bildverarbeitungssoftware die durch die 3D-Oberflä-  
 che bedingte Deformation des Musters beobachtet und ausgewertet. Als Ergebnis liegt  
 eine dichte Punktwolke aus 3D-Koordinaten vor. Erreicht werden Messauflösungen  
 bis zu 10 $\mu$ m. Wegen des linearen Zusammenhangs zwischen Auflösung und Messfeld-  
 gröÙe, kann die Auflösung durch eine Messfeldverkleinerung gesteigert werden.<sup>45</sup>

Die *Konoskopische Holografie* ist ein Abstandsmessverfahren, das als Punkt- oder  
 Liniensensor ausgeführt werden kann und auf der Interferenz von polarisiertem Licht  
 basiert. Dazu wird ein Laserpunkt auf das Messobjekt projiziert und das zurück ge-  
 streute Licht durch Polfilter und einen doppelbrechenden Kristall auf eine Kamera  
 geleitet. Dort erzeugt es kreisförmige Interferenzmuster. Die Auswertung dieser Mus-  
 ter ergibt die Distanz zwischen Oberflächenpunkt und Sensor. Übliche Sensoren er-

<sup>44</sup> Vgl. Shaw (2012, 4), Keferstein (2015, 204), Weckenmann (2012, 137)

<sup>45</sup> Vgl. Keferstein (2015, 235), Weckenmann (2012, 139)

reichen Messunsicherheiten von 2-50 $\mu\text{m}$  in Messabständen von 0,5-300mm und Messfrequenzen bis zu mehreren kHz, wodurch sie gut für scannenden Betrieb geeignet sind.<sup>46</sup>

Bei *Chromatischen Verfahren* wird das Werkstück mit einer punktförmigen Weißlichtquelle beleuchtet. Durch eine spezielle Optik mit axialem Achromatismus (Farbfehler) wird das weiße Licht abhängig vom Abstand in seine Spektralfarben aufgetrennt, was durch ein Spektrometer ausgewertet wird. Die Messunsicherheit liegt bei einem Messbereich von 0,02-60mm bei etwa 0,03-10 $\mu\text{m}$ .

### 2.1.3 Anforderungen an einen Industrieroboter als Positioniersystem

Ein Industrieroboter als Messsystemträger wird eingesetzt, falls man Einzelmessungen eines bewegten Sensors zueinander referenzieren möchte. Dabei ergibt sich die Messunsicherheit immer als Summe des Antastfehlers des Sensors und des Positionsfehlers des Verfahrens.

Übliche Sensoren haben, je nach Typ und Anwendung, Antastfehler im Bereich von etwa 0,5-300 $\mu\text{m}$  (vgl. Kap. 2.1.2). Damit die Messunsicherheit der einzelnen Messmerkmale nach der Registrierung in einem gemeinsamen Koordinatensystem erhalten bleibt, muss die Unsicherheit des Positioniersystems zumindest in einer ähnlichen Größenordnung liegen.

Idealerweise erfolgt die Messwertaufnahme im scannenden Betrieb (also während des Verfahrens des Positioniersystems) um Haltezeiten zu vermeiden oder eine möglichst dichte Messwertaufnahme zu erreichen. Diese Vorgehensweise stellt besondere Anforderungen an die dynamische Bahngenauigkeit des Positioniersystems und fordert die exakte zeitliche Synchronisation von Messwertaufnahme und Positionsmessung.<sup>47</sup>

### 2.1.4 Einfluss des Orientierungsfehlers eines Positioniersystems

Häufig sind Messmerkmale nur erfassbar, wenn sie aus unterschiedlichen Orientierungen angetastet werden (z.B. bei Hinterschnidungen). Entsprechend ist eine 6D-Positionierung mit frei wählbarer Orientierung wünschenswert, was dem IR gegenüber der klassischen kartesischen KMG einen Vorteil verschafft.

Allerdings wirkt hier der Abstand zwischen Sensor und Messmerkmal wie ein Hebel, mit dem sich ein Fehler in der Roboterorientierung in einen erheblichen Fehler in der Position des Messmerkmals übersetzen kann.

Abbildung 5 zeigt beispielhaft die Auswirkung einer, um einen Winkel  $\delta$ , fehlerhaft bestimmten Orientierung zwischen Sensor-Koordinatensystem (SKS) und

---

<sup>46</sup> Vgl. Keferstein (2015, 208), Weckenmann (2012, 145)

<sup>47</sup> Vgl. Shaw (2012, 9), Keferstein (2015, 77)

Weltkoordinatensystem (WKS). Die Folge der fehlerhaften Orientierungsmessung ist, dass ein Messmerkmal um einen, mit dem Abstand  $a$  (Hebellänge) zunehmenden, Positionsfehler  $\Delta x$  wahrgenommen wird.

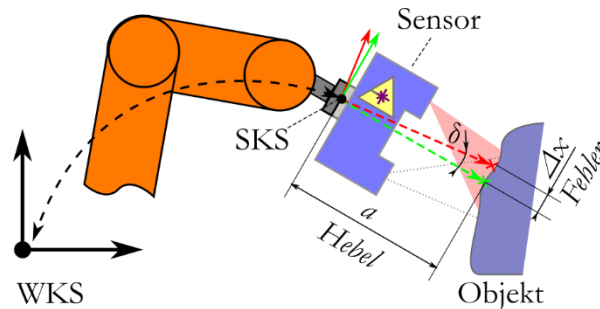


Abbildung 5: Auswirkung des Orientierungsfehlers zwischen Sensor- und Weltkoordinatensystems auf die Positionsbeurteilung eines Messmerkmals.

Bei bekanntem Abstand  $a$  zwischen Sensor-Koordinatensystem und Messmerkmal, sowie dem Orientierungsfehler  $\delta$ , kann für kleine  $\delta$  der resultierende Positionsfehler  $\Delta x$  in guter Näherung als Produkt aus Abstand  $a$  und Tangens des Winkelfehlers  $\delta$  geschätzt werden:

$$\Delta x \approx a \cdot \tan \delta \approx a \cdot \delta, \text{ falls } \delta \text{ klein.} \quad (2.1)$$

## 2.2 Positionsgenauigkeit von Industrierobotern

Über die sog. Sensorkalibrierung<sup>48</sup> kann die Beziehung zwischen Sensorkoordinatensystem (SKS) des Messkopfsystems und des Handkoordinatensystems (HKS) des Roboters ermittelt werden. Bei bekannter Position und Orientierung (Pose) der Roboterhand können also mit dem Messkopfsystem Messmerkmale angetastet und in einem gemeinsamen Koordinatenraum registriert werden.

Die einfachste Möglichkeit, die Pose der Roboterhand festzustellen, ist das Auslesen des robotereigenen Messsystems. Dabei treten jedoch Positionsunsicherheiten auf, die u.A. durch die Struktur des Roboters und seine Kinematik bedingt sind und im Folgenden näher betrachtet werden. Weiter wird erörtert, wie die Positionsunsicherheit durch fortgeschrittene Verfahren der Roboterkalibrierung verbessert werden kann.

Letztlich wird gezeigt, dass die Positionsunsicherheit zwar gesenkt werden kann, jedoch nicht bis in den Bereich der Antastunsicherheit üblicher Messkopfsysteme, weshalb der Einsatz des Roboters als KMG-Ersatz eingeschränkt bleibt.

<sup>48</sup> Keferstein (2015)

### 2.2.1 Pose- und Bahngenauigkeit

Die Norm ISO-9283<sup>49</sup> beschreibt die Leistungskenngrößen von Industrierobotern (IR), sowie die zugehörigen Prüfmethode. Die Genauigkeit eines IR wird durch seine Pose-Genauigkeit und seine Bahngenauigkeit beschrieben.

Die *Pose-Genauigkeit* (engl. Accuracy of Pose: *AP*) ist die Abweichung zwischen der Soll-Pose und dem Mittelwert der Ist-Pose bei häufig wiederholtem Anfahren aus derselben Richtung. Ergänzt wird dieses absolute Genauigkeitsmaß durch die *Pose-Wiederholgenauigkeit* (engl. Repeatability of Pose: *RP*). Sie beschreibt die Streuung der Ist-Werte bei wiederholtem Anfahren derselben Pose ohne Bezug zum Soll-Wert.

Die Pose-Genauigkeit bezieht sich immer auf einen angefahrenen Haltepunkt. Dagegen bezeichnet die Bahngenauigkeit die Fähigkeit eines IR, sich entlang einer räumlichen Bahn zu bewegen. Die Definition der *Bahngenauigkeit* (engl. Accuracy of Trajectory: *AT*) und der *Bahnwiederholgenauigkeit* (engl. Repeatability of Trajectory: *RT*), erfolgt analog zur Pose-Genauigkeit. Zur Ermittlung wird das gleiche Bahnstück wiederholt abgefahren.

Abbildung 6 verdeutlicht die Definition von Pose- und Bahngenauigkeit nach ISO-9283.

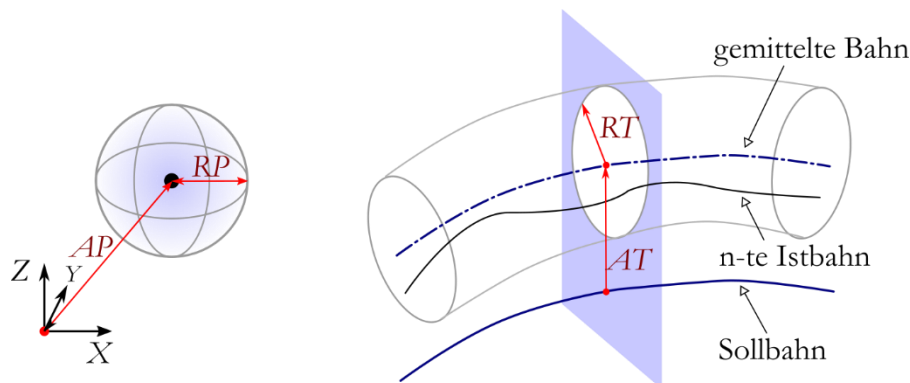


Abbildung 6: Pose-Genauigkeit (AP), Pose-Wiederholgenauigkeit (RP), Bahngenauigkeit (AT) und Bahnwiederholgenauigkeit (RT) von Industrierobotern nach ISO-9283.

Die Pose- und Bahnfehler eines IR werden wesentlich durch seine mechanischen Komponenten wie z.B. Armteile, Getriebe und Lager beeinflusst, deren Fertigungstoleranzen und Montagefehler sich negativ auswirken.<sup>50</sup>

Das Messsystem zur Bestimmung der Achspositionen basiert auf Drehgebern, die unmittelbar an den Servomotoren montiert werden. Neben Justagetoleranzen, die

<sup>49</sup> Vgl. ISO, E. N., 9283, Industrieroboter – Leistungsgrößen und zugehörige Prüfmethode.

<sup>50</sup> Vgl. Bongardt (2004), Beyer (2004)



zu Nulllagenfehlern und Exzentrizitäten zwischen Motor- und Drehgeberachse führen, erfolgt damit die Winkelmessung einer Achse nur indirekt und wird beispielsweise durch Getriebe- und Achslagerspiel verfälscht. Der mit der Zeit eintretende Lagerverschleiß verstärkt diesen Effekt, so dass die Präzision mit der Betriebsdauer sinkt.<sup>51</sup>

Thermische Einflüsse führen u.A. zu Ausdehnung und (bei Einsatz von Materialien unterschiedlicher Wärmeausdehnung) zur Verwindung von Strukturkomponenten und können bereits bei einer Roboterreichweite von 2m Fehler im Millimeterbereich verursachen.<sup>52</sup>

Ein grundsätzliches Problem ist der serielle kinematische Aufbau eines IR, der zur Summation der Fehler über die sechs Einzelachsen führt und zusätzlich die Steifigkeit des Systems verringert.<sup>53</sup> Entsprechend kann ein an der Werkzeugaufnahme (Tool Center Point, TCP) angebrachtes Gewicht oder auch das Eigengewicht des Roboters selbst seine Struktur verformen. Wird der Roboter bewegt, kommen dynamische, von der Verfahrsituation abhängige Kräfte und Momente wie Beschleunigungs- und Fliehkräfte hinzu, welche die Bahnengenauigkeit verschlechtern.<sup>54</sup>

## 2.2.2 Genauigkeitssteigerung durch Roboterkalibrierung

Zur Genauigkeitssteigerung von IR wurden verschiedene Kalibrieransätze entwickelt, die sich in der Komplexität des zu Grunde gelegten kinematischen Robotermodells unterscheiden. Ziel der Kalibrierung ist die Bestimmung der Parameter der Robotermechanik zwecks Steigerung der Absolutgenauigkeit. Dazu wird meist mittels eines externen Messsystems der Pose-Fehler innerhalb des Arbeitsraums erfasst und die Parameter auf minimalen Fehler optimiert. Häufig wird auch eine Modellierung und Kalibrierung des dynamischen Verhaltens angestrebt.<sup>55</sup> Die theoretische Untergrenze der Pose-Genauigkeit liegt etwa bei der Pose-Wiederholgenauigkeit, die selbst aufgrund ihrer stochastischen Eigenschaften durch Kalibrierung nicht gemindert werden kann.<sup>56</sup>

Ist ein Roboter als Teil eines Messsystems mit einem hochgenauen optischen Sensor ausgestattet, der ihm die Antastung eines im Messraum positionierten Maßkörpers erlaubt, so können durch eine *zyklische Rekalibrierung* Drifterscheinungen (Temperaturdrift, Verschleiß, ...) kompensiert werden. Durch diese aufwendige Maßnahme kann die Genauigkeit für einen begrenzten Arbeitsraum in die Größenordnung der Wiederholgenauigkeit gebracht werden.<sup>57</sup>

---

<sup>51</sup> Vgl. Beyer (2004)

<sup>52</sup> Vgl. Wiest (2001, 8,73)

<sup>53</sup> Vgl. Beyer (2004)

<sup>54</sup> Vgl. Bongardt (2004, 20), Beyer (2004, 34), Alban (2001), Lange (2003, 43)

<sup>55</sup> Vgl. Alban (2001), Bongardt (2004, 37)

<sup>56</sup> Wiest (2001, 8)

<sup>57</sup> Vgl. Bongardt (2004, 53), Wiest (2001, 73)

### 2.2.3 Erzielbare Positionsgenauigkeiten

Einen Überblick über die Genauigkeit von Robotern unterschiedlicher Hersteller gibt beispielsweise Bongardt<sup>58</sup>. Die Positionsunsicherheit eines konventionellen, mittelgroßen IR ist in der ersten Zeile von Tabelle 2 aufgeführt. Maßgebend ist bei Verwendung scannender Sensoren zur Messwertaufnahme die absolute Bahngenauigkeit  $AT$  des Positioniersystems (vgl. Kap. 2.1.3).

Tabelle 2: Pose- und Bahnunsicherheiten konventioneller, kalibrierter und zyklisch rekali-  
brierter Industrieroboter.

Typ	$AP$ [ $\mu\text{m}$ ]	$RP$ [ $\mu\text{m}$ ]	$AT$ [ $\mu\text{m}$ ]	$RT$ [ $\mu\text{m}$ ]	Anmerkung
Konventionell	400- 1300	40-200	500- 1300	200-400	Durchschnittlicher, mittelgroßer IR mit ca. 2m Reichweite
Kalibrierter Präzisions IR	100- 500	25-100	700-800	160-300	Roboter für Präzisionsaufgaben (z.B. <i>ABB, Kuka</i> )
Zyklisch rekali- briert	25-100*	25-100	160- 300*	160-300	Wiederholgenauigkeit bildet untere Schranke der Absolutgenauigkeit

\* theoretisch erreichbarer Wert in beschränktem Arbeitsvolumen (vgl. Kap. 2.2.2).

Ein für Präzisionsaufgaben optimierter neuer und sorgfältig kalibrierter IR erreicht abhängig von der Baugröße etwa eine Pose-Genauigkeit von  $AP=100-300\mu\text{m}$ .<sup>59</sup> Ein ABB Roboter des Typs IRB-2600ID<sup>60</sup> mit einer Reichweite von 1,85m wird im Datenblatt beispielsweise mit einer Pose-Genauigkeit von  $AP=100\mu\text{m}$  bei einer Wiederholgenauigkeit von  $RP=25\mu\text{m}$  angegeben.

Um beispielsweise mit einem Laser-Lichtschnittscanner in endlicher Zeit einen Flächenscan zu erzeugen, muss die Datenaufnahme jedoch aus der Bewegung heraus erfolgen, so dass hier die Bahn-Genauigkeit ausschlaggebend wird. Durch den Einfluss dynamischer Effekte liegt diese weit unter der Pose-Genauigkeit. Die Bahn-Genauigkeit wird beim IRB-2600ID mit  $AT=800\mu\text{m}$  angegeben. Da auch die Bahn-Wiederholgenauigkeit mit  $RT=300\mu\text{m}$  bereits höher ausfällt als die Antastunsicherheit des schlechtesten Sensors (vgl. Tabelle 1), ist eine Driftkompensation durch Antasten eines Maßkörpers von vorneherein nicht sinnvoll.

<sup>58</sup> Bongardt (2004, 18)

<sup>59</sup> Vgl. Wiest (2001, 8,80)

<sup>60</sup> ABB (2015, 2)

Einige Hersteller, wie Kuka-Robotics, bieten Präzisionsroboter für hochgenaue Bahnprozesse an, die u.A. für den Betrieb als Messsystemträger optimiert wurden. Der Typ KR-30-HA<sup>61</sup> mit einer Reichweite von ca. 2m erreicht Pose-Wiederholgenauigkeiten von  $RP=50\mu\text{m}$  und eine Bahn-Wiederholgenauigkeit von  $RT=160\mu\text{m}$ . Die Absolutgenauigkeit liegt mit  $AP=700\mu\text{m}$  und  $AT=500\mu\text{m}$  deutlich darunter.

Durch den Einsatz der Methode der zyklischen Rekalibrierung an einem im Messraum platzierten Maßkörper (vgl. Kap. 2.2.2), kann die absolute Bahngenauigkeit des KR-30-HA für ein begrenztes Arbeitsvolumen bestenfalls bis zur Bahnwiederholgenauigkeit gesteigert werden. Es ist nicht bekannt, ob dieser theoretische Optimalwert in der Praxis erreicht wird.

Wegen der großen Diskrepanz zwischen der Positionsunsicherheit von KMG und Industrieroboter, die auch durch fortgeschrittene Verfahren der Roboterkalibrierung nicht überwunden werden kann, erscheint die Installation eines externen, von der Roboterstruktur unabhängigen, Positions- bzw. Pose-Messsystems der beste Weg, den Einsatzbereich des IR als KMG-Ersatz zu erweitern.

### 2.3 Externe 6D-Pose-Sensoren

Die relativ hohe Positionsunsicherheit eines IR ist wesentlich durch seinen strukturellen Aufbau und die serielle Kinematik und die damit verbundene geringe Steifigkeit und Stabilität gegen thermischen Drift bedingt (vgl. Kap. 2.2.1). Daher liegt die Idee nahe, das Robotermesssystem durch ein externes, von der Roboterstruktur unabhängiges, Messsystem zu ersetzen bzw. zu ergänzen. Dazu eignen sich besonders berührungslöse (z.B. optische) Pose-Messsysteme, da sie die Beweglichkeit des Roboters nicht durch zusätzliche mechanische Komponenten im Arbeitsraum behindern oder einschränken.

Die mechanischen Kräfte, die auf einen Roboter als Träger eines relativ leichten und langsam bewegten Messkopfsystems einwirken, sind gering. Durch den Einsatz eines externen Pose-Messsystems entfallen die hohen Anforderungen an die Roboterengenauigkeit, so dass statt der teuren Präzisionsroboter kostengünstige Standard oder Leichtbau-Roboter eingesetzt werden könnten. Der ökonomische Vorteil kommt jedoch nur zum Tragen, wenn er nicht durch hohe Kosten des externen Pose-Messsystems zunichte gemacht wird.

Marktübliche optoelektronische Positions- und Pose-Messsysteme bestehen meist aus einem stationären Messaufnehmer und Messmarkern zur Signalisierung des Messobjekts (z.B. der Roboterhand). Sie werden häufig als eigenständige Koordinatenmessgeräte oder zur Kalibrierung von Robotern- und Werkzeugmaschinen eingesetzt. Bekannte Messansätze sind entweder sehr aufwendig und damit kostenintensiv oder erreichen keine ausreichende Messgenauigkeit. Insbesondere die Orientierungserfassung unterliegt auch bei den teuren Systemen deutlichen Einschränkungen (vgl.

---

<sup>61</sup> Vgl. KUKA (2015, 3)

Kap. 2.3.2). Das größte Potential zur Entwicklung kosteneffizienter 6D-Pose-Sensoren bietet das photogrammetrische Messprinzip auf der Basis marktüblicher Standard-Bildverarbeitungskameras (vgl. Kap. 2.3.3).

### 2.3.1 Anforderungen an externe Pose-Messsysteme

Zunächst sollen einige Anforderungen zur Beurteilung der Eignung externer Pose-Messsysteme als Ergänzung robotergestützter Koordinatenmesssysteme formuliert werden:

1. **Positions-Unsicherheit:** Die Messunsicherheit der externen Pose-Messung sollte geringer sein als die Bahngenaugigkeit eines kalibrierten Industrieroboters (vgl. 2.2.3), damit sich ein Nutzen ergibt.
2. **Orientierungs-Unsicherheit:** Ein Orientierungsfehler des Positioniersystems übersetzt sich abhängig vom Abstand zwischen Sensor und Messobjekt in einen Registrierungsfehler von Messmerkmalen. Dabei wirkt der Abstand zwischen Sensor und Messmerkmal in erster Näherung als Übersetzungsfaktor zwischen Winkel- und Positionsfehler (vgl. Kap. 2.1.4).  
Damit der Beitrag des Orientierungsfehlers nicht dominant wird, sollte das Produkt aus Messabstand  $a$  und dem Orientierungsfehler (im Bogenmaß), den Positionsfehler nicht übersteigen. Wird ein mittlerer Messabstand von  $a=1\text{m}$  angenommen, können beide Größen als nahezu äquivalent betrachtet werden.
3. **Dynamik:** Um den scannenden Betrieb des Messkopfsystems zu gewährleisten, muss eine Pose-Messung mit ausreichender Frequenz erfolgen und mit dem Messkopf synchronisierbar sein.
4. **Flexibilität:** Die Pose-Messung sollte berührungslos geschehen, um die Beweglichkeit des Roboters nicht einzuschränken. Die flexible Montage an unterschiedlichen Robotertypen sollte möglich sein.
5. **Ökonomie:** Die Kosten des externen Pose-Messsystems sollten so gering sein, dass sein Einsatz rentabel ist.

### 2.3.2 Gegenüberstellung berührungsloser Messverfahren

Es existieren zahlreiche Messprinzipien für die berührungsfreie Positions- bzw. Pose-Messung, die teils auch in marktgängigen Systemen Verwendung finden. Die wichtigsten Prinzipien werden hier aufgeführt und in Bezug auf ihre Eignung als externe Pose-Sensoren bewertet. Ein geeignetes Verfahren sollte eine dynamische 6D-Pose-Messung ausreichender Genauigkeit bei akzeptablen Kosten erlauben.

Das Prinzip der *Trilateration*<sup>62</sup> bezeichnet die Lokalisierung eines 3D-Zielpunktes durch eine Abstandsmessung zu drei Referenzpunkten. Die Messung einer 6D-Pose erfordert, analog zum Hexapod als Positionierungssystem, sechs Abstandsmessungen zwischen jeweils drei Referenz- und drei Zielpunkten.

Trilaterationssysteme auf Basis der *Ultraschall-Laufzeitmessung* lassen zwar eine 6D-Messung zu, sind aber wegen auftretenden Dopplereffekten für dynamische Messungen ungeeignet und erreichen wegen starker Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit zu Umweltfaktoren wie Druck, Feuchte und Temperatur nur unzulängliche Genauigkeit. Weitere Probleme können durch Interferenzen der Schallquellen untereinander oder zu Reflektionen entstehen.<sup>63</sup>

Kommerzielle Systeme höherer Genauigkeit, wie das zur Maschinenprüfung entwickelte  $\mu$ GPS der Firma  $\mu$ -GPS Optics GmbH, basieren auf der *Weißlicht-Interferometrie* zur Abstandsmessung und erreichen in einem eng begrenzten Messvolumen von  $(0,5\text{m})^3$  Genauigkeiten um  $5\mu\text{m}$ . Als Zielkörper (Target) zur Pose-Messung dient eine Gruppe aus drei retroreflektierenden Spiegeln. Aufgrund hoher Kosten der Interferometer-Bauweise, des kleinen Arbeitsvolumens und der niedrigen Messfrequenz von 1Hz sind solche Systeme jedoch für die Pose-Bestimmung von Messkopfsystemen weniger geeignet.<sup>64</sup>

Die *Triangulation* beschreibt analog zur Trilateration eine Methode zur Lokalisierung eines 3D-Zielpunktes durch Peilung des Horizontal- und Vertikalwinkels ausgehend von mindestens zwei Referenzstandorten.

Eine klassische Umsetzung ist der *Theodolit*, der üblicherweise aus einer optischen Peilvorrichtung und zwei Winkelmessern aufgebaut wird. Motorbetriebene Ausführungen zur automatischen Verfolgung eines geeigneten Targets werden selten allein stehend eingesetzt, sind aber ein wichtiges Bauteil in Laser-Trackern. Eine 6D-Messung ist durch Peilung von drei Zielpunkten auf dem gleichen Target theoretisch möglich, würde aber dreifachen technischen Aufwand bedingen.<sup>65</sup>

Theodoliten sind technisch aufwendig und können jeweils nur ein Ziel anpeilen. Diese Nachteile können auf sehr elegante Weise überwunden werden, wenn eine Kamera als Winkelmesssystem eingesetzt wird. Hier erlaubt die computergestützte Identifikation zahlreicher Zielmarker in Digitalbildern eine effiziente Messung von 6D-Posen. Die dazu notwendige Methodik beschreibt die Photogrammetrie, die in Kap. 2.3.3 ausführlich besprochen wird.

Das *Trägheits-* oder *Inertial-Messprinzip* kommt ohne zusätzliche Targets aus und basiert auf der Erfassung von Beschleunigung und Drehraten, durch deren Integration eine relative Änderung von Position und Orientierung ermittelt werden kann. Aufgrund der Fehlersummation bei der Integration ist ein solches System nur für sehr

---

<sup>62</sup> Vgl. Wiest (2001, 248)

<sup>63</sup> Vgl. Hesse (2014, 55)

<sup>64</sup> Müller (2008), Gumbrell (2011)

<sup>65</sup> Vgl. Keferstein (2015, 241)

kurze Zeitintervalle genau und eignet sich nicht für eine absolute 6D-Pose-Bestimmung. Durch die hohen Messraten wird ein Inertialmesssystem als Ergänzung für ein langsames Präzisionssystem interessant, indem es den Zeitraum zwischen zwei Einzelmessungen füllt. Mit Beschleunigungs- und Drehratensensoren auf Basis der Mikrosystemtechnik (MEMS) sind kleine und kostengünstige Sensoren verfügbar.<sup>66</sup>

Durch die Kombination von Trilateration- und Triangulationsprinzip ergeben sich hybride Systeme wie der sog. Laser-Tracker. Ein *Laser-Tracker* verfolgt mittels einer Strahlableitvorrichtung (Laser-Scanner) ein retroreflektierendes Target und bestimmt dessen Abstand durch ein Laser-Interferometer. Die 3D-Koordinate des meist kugelförmigen Targets ergibt sich als Polar-Koordinate aus dem mit Drehgebern gemessenen Strahlwinkel und der Entfernungsinformation.

Das Interferometer basiert auf einer Laser-Quelle, die mittels eines Strahlteilers auf eine Referenzstrecke und die eigentliche Messstrecke aufgeteilt wird. Der reflektierte Messstrahl wird anschließend mit dem Referenzstrahl überlagert, mit dem er abhängig von der Laufzeitdifferenz zwischen Mess- und Referenzstrecke konstruktiv oder destruktiv interferiert. Die damit verbundene Helligkeitsänderung wird durch eine Fotodiode detektiert. Der Eindeutigkeitsbereich einer interferometrischen Abstandsmessung ist sehr gering (eine Wellenlänge,  $<1\mu\text{m}$ ), weshalb man von einem inkrementellen Messprinzip sprechen kann. Zur Messung größerer Abstände wird das Target an einer Referenzposition mit der Lasereinheit kontaktiert, die bei Bewegung des Targets die Zahl der durchschrittenen Eindeutigkeitsintervalle in einem Inkrementzähler erfasst. Bei einer Strahlunterbrechung muss das Target an die Referenzposition zurückgeführt und erneut kontaktiert werden.<sup>67</sup>

Um diesen Nachteil auszugleichen, ergänzen absolut messende Laser-Tracker das Interferometer durch ein absolutes Abstandsmessverfahren (engl. Absolute Distance Measuring: ADM). Das Verfahren erreicht hohe Genauigkeit, jedoch bei erhöhter Messzeit, weshalb bei Systemen für hohe Messraten Absolutmessung und Interferometrie häufig kombiniert werden.<sup>68</sup>

Laser-Tracker erreichen hohe Positions-Genauigkeiten im Bereich einiger  $10\mu\text{m}$  bei Arbeitsradien bis zu mehreren 10m und Messraten bis 1000Hz.<sup>69</sup> Ein großer Nachteil sind die Gerätekosten, die im 6-stelligen €-Bereich liegen können, so dass sich ein ökonomischer Einsatz auf wenige Anwendungen wie der Maschinenkalibrierung beschränkt. Zur Messung von 6D-Posen bieten einige Anbieter spezielle Messsonden (sog. Probes) an, die zusätzliche Messverfahren zur Orientierungsmessung ergänzen. Ein Beispiel ist die Leica Positioning Technologie, die den Laser-Tracker durch eine Kamera (T-Cam) erweitert, die zur Orientierungsmessung drei an der Messsonde montierte LEDs beobachtet. Um über einen größeren Entfernungsbereich eine akzeptable

---

<sup>66</sup> Vgl. Ahrens (2001), Fox (2005), Hesse (2014, 176)

<sup>67</sup> Vgl. Illemann (2015), Nguyễn (2014), Hesse (2014, 294)

<sup>68</sup> Vgl. Bridges (2015), Illemann (2015), Hesse (2014, 303)

<sup>69</sup> Vgl. Leica (2015a), Illemann (2015),

Genauigkeit zu erzielen, ist die T-Cam mit einem aufwendigen variablen Zoom ausgestattet. Dennoch kann mit dieser Methode die Orientierung nur in einem begrenzten Winkelbereich von  $\pm 45^\circ$  mit eingeschränkter Genauigkeit von etwa  $0,01^\circ$  gemessen werden.<sup>70</sup> Aufgrund hoher Kosten und der stark eingeschränkten Orientierungs-Messung sind Laser-Tracker als ergänzende 6D-Messsysteme für IR eher ungeeignet.

Tabelle 3 zeigt eine Gegenüberstellung der diversen Messprinzipien und der darauf basierenden Verfahren zur Positions- bzw. Pose-Messung. Aufgrund des Fortschritts in der Kamera und Computertechnik, bieten photogrammetrische Pose-Sensoren das größte Potential und werden im Rahmen dieser Arbeit intensiv untersucht. Die anderen Verfahren erfüllen die Anforderungen (Kap. 2.3.1), die an ein externes Pose-Messsystem gestellt werden nicht, da sie (mit vertretbarem Aufwand) keine 6D-Messung erlauben, nicht ausreichend präzise sind (insbesondere in der Orientierungsmessung) oder schlicht einen sehr hohen technischen Aufwand bedingen und hohe Kosten verursachen.

Tabelle 3: Übersicht der Messprinzipien zur Messung von Position bzw. Pose.

Messprinzip	Verfahren	Eigenschaften	Anmerkung
Trilateration	Ultraschall	3-6D, statisch	Aufwendig, umweltabhängig und daher ungenau.
	Weißlicht-Interferometrie ( $\mu$ GPS)	6D, dynamisch	Sehr aufwendig und teuer, sowie beschränktes Messvolumen.
Triangulation	Theodolit	3D, bedingt dynamisch	Aufwendige aktive Präzisionsmechanik, daher teuer.
	Photogrammetrie	6D, dynamisch	Kostengünstig bei Einsatz von Standard-Matrixkameras und passiver Markertechnik.
Trägheit	Beschleunigungs- und Drehratenmessung	6D, dynamisch	Nur für kurze Zeitintervalle stabil, aber interessant als Ergänzung langsamer Präzisionsmesssysteme.
Hybride	Laser-Tracking Interferometer	3D, dynamisch	Nur in 3D genau, sehr teuer, 6D nur mit Photogrammetrie-Zusatz.

### 2.3.3 Photogrammetrische Grundprinzipien

Die *Photogrammetrie* bezeichnet Methoden, um auf der Grundlage genauer Messbilder die räumliche Lage oder Form von Objekten zu bestimmen. Zur Bildaufnahme werden

<sup>70</sup> Vgl. Leica (2015a), Leica (2015b)

kalibrierte Messkameras mit bekanntem Abbildungsverhalten verwendet (vgl. auch Kap. 5).

Abbildung 7 zeigt die beiden wichtigsten Grundprinzipien. Mit Hilfe des räumlichen *Vorwärtsschnitts*<sup>71</sup> können bei mindestens zwei bekannten Kamera-Posen und Bildkoordinaten die 3D-Koordinaten von Objektpunkten berechnet werden. Für genau zwei Kameras wird dieses Vorgehen auch als Stereotriangulation bezeichnet. Ist die relative Lage von wenigstens drei Objektpunkten zueinander bekannt, so kann durch diese ein Koordinatensystem aufgespannt und indirekt eine 6D-Pose definiert werden.

Durch den räumlichen *Rückwärtsschnitt*<sup>72</sup> kann für eine Beobachtung von mindestens drei Referenzpunkten eines bekannten Zielobjekts (Target) die Pose einer Kamera relativ zu diesem Objekt berechnet werden.

Als Rekonstruktionsmethode wird meist die sog. *Bündelblockausgleichung* angewendet, bei der das Abbildungsverhalten des gesamten Systems modelliert wird. Die gesuchten Kamera- und Objekt-Posen sind dann unbekannte Parameter dieses Modells, die durch Methoden der Ausgleichsrechnung unter Abgleich von Modell und Bildbeobachtungen bestimmt werden können.<sup>73</sup>

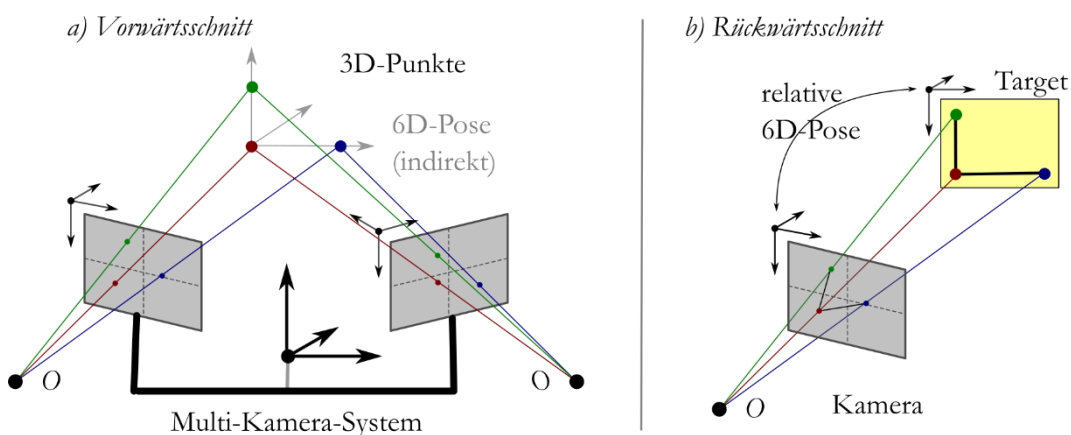


Abbildung 7: Photogrammetrischer Vorwärtsschnitt a) zur Messung von 3D-Punkten bei zwei oder mehr bekannten Kamera-Posen und Rückwärtsschnitt b) zur Berechnung der Kamera-Pose relativ zu einem Objekt (Target) mit min. drei bekannten 3D-Punkten.

Beide Varianten haben als Pose-Sensoren Schwächen in der Orientierungs- und Abstandsbestimmung, die durch ausgedehnte Targets bzw. große Referenzpunkt-abstände und große Kameraabstände (beim Vorwärtsschnitt) kompensiert werden müssen.

<sup>71</sup> Vgl. Luhmann (2010, 329)

<sup>72</sup> Vgl. Luhmann (2010, 239)

<sup>73</sup> Vgl. Luhmann (2010, 266)



Bei der indirekten Pose-Bestimmung mittels des Vorwärtsschnitts (Abbildung 7a), kann die Drehung des beobachteten Referenzkreuzes umso weniger gut im Kamerabild beobachtet werden, je geringer der Abstand der Referenzpunkte zueinander ausfällt. Dabei steigt der Orientierungsfehler stark an. Fallen alle drei Punkte im Beispiel zusammen (Abstand 0) wäre eine Drehung in den Kamerabildern nicht mehr zu erkennen. Eine kleine *Stereobasis* (Abstand der beiden Kameras zueinander) führt zu kleinen Triangulationswinkeln, durch die wiederum eine Änderung des Abstands zwischen Target und Kamera nur noch wenig Bildänderung bewirkt und schwerer bzw. ungenauer messbar wird. Bei der Pose-Bestimmung nach dem Prinzip des Rückwärtschnitts (Abbildung 7b) treten vergleichbare Probleme auf, die später im Rahmen dieser Arbeit ausführlich analysiert und besprochen werden (vgl. Kap. 7.3, 7.5.4).

### 2.3.4 Grundkonfiguration photogrammetrischer 6D-Pose-Sensoren

Kamerabasierte Pose-Sensoren können in die Funktionsprinzipien *Auge-In-Hand* (AIH) und *Auge-Zu-Hand* (AZH) unterteilt werden, je nachdem, ob eine bewegte Kamera ein statisches Target beobachtet (AIH) oder eine raumfeste Kamera ein am Messsystemträger montiertes mobiles Target (AZH). Abbildung 8 zeigt die beiden Grundkonfigurationen im Beispiel einer Messanwendung zur Lokalisierung der Roboterhand in einem Weltkoordinatensystem ( $WKS$ ), wobei jeweils derselbe kreisrunde Arbeitsraum abgedeckt werden soll.

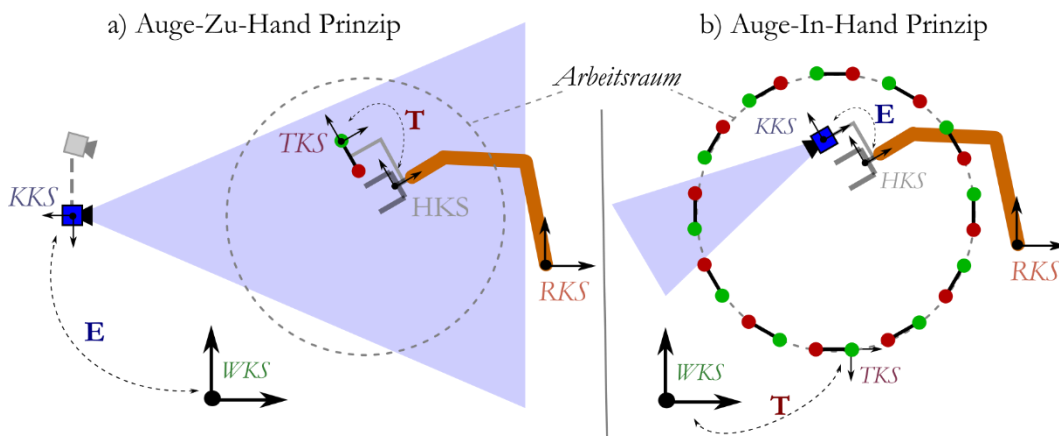


Abbildung 8: Gegenüberstellung von a) Auge-Zu-Hand und b) Auge-In-Hand-Prinzip (Draufsicht von oben).

Anzutastende Zielobjekte (Targets, rot-grüne Punkte) haben jeweils ein lokales *Target-Koordinatensystem* ( $TKS$ ), dessen Pose im *Kamerakoordinatensystem* ( $KKS$ ) gemessen wird. Durch die Bestimmung der konstanten Transformationen  $E$  und  $T$ , von Kamera

und Target gegenüber der Roboterhand (*HKS*) bzw. dem *WKS* durch Messung oder Kalibrierung, kann die Hand-Pose im *WKS* ermittelt werden.

Eine fest im Raum montierte Referenzkamera (*AZH-Prinzip*) kann größer und aufwendiger konstruiert sein, hat aber den Nachteil, dass das gesamte Messvolumen abgedeckt werden muss, was ein sehr großes Bildfeld erfordert. Eine Fläche von 1m Kantenlänge, könnte ein Standardbildsensor mit 1000 Pixeln gerade einmal mit 1 Pixel/mm auflösen. Akzeptable Messauflösungen können nur mit teuren hochauflösenden Spezialkameras erreicht werden, wobei häufig das Prinzip des Vorwärtsschnitts mit einer Stereo oder Multikamerakonfiguration umgesetzt wird (vgl. Kap. 2.3.5).

Dem gegenüber kann ein Auge-In-Hand-Sensor auf der Basis von Standardkameras sehr viel kleiner, leichter und günstiger umgesetzt werden, sofern es gelingt kostengünstige passive Targets einzusetzen, die in ausreichender Zahl am Rand des Arbeitsvolumens angeordnet werden. In diesem Fall kann durch ein kleines Bildfeld bei Einsatz eines niedrig auflösenden Bildsensors noch eine hohe Ortsauflösung erreicht werden. Ein potentieller Nachteil des *AIH-Prinzips* ist, dass theoretisch die Lage jedes Einzeltargets relativ zum *WKS* bekannt sein muss. Diesem Problem wird in der Literatur oft durch große Kombinationstargets oder Ansätze der sog. Selbstkalibrierung begegnet, die eine automatisierte Lokalisierung der Referenzpunkte erlauben. Das Konzept des Vorwärtsschnitts mit mehreren Kameras ist hier selten anzutreffen, vermutlich wegen des zumeist begrenzten Bauraums, der ausreichende Triangulationswinkel zwischen mehreren Kameras nicht erlaubt (vgl. Kap. 2.3.5).

### 2.3.5 Gegenüberstellung photogrammetrischer 6D-Pose-Sensoren

Photogrammetrische Pose-Sensoren basieren bei 1-Kamera-Sensoren häufig auf dem Prinzip des Rückwärtsschnitts, während Sensoren mit zwei oder mehr Kameras auf dem Vorwärtsschnitt basieren.

Die Signalisierung von Referenzpunkten geschieht entweder passiv<sup>74</sup> (durch Marker oder Retroreflektoren) oder aktiv<sup>75</sup> (z.B. durch LED-Marker). Beide Varianten können planar (Flächentarget) oder dreidimensional (z.B. als Koordinatenkreuz aus drei Markerkugeln oder drei LEDs) angeordnet werden. Aktive Targets verfügen meist über komplexe Steuer- und Synchronisierungsmechanismen, wodurch zwar der Bildverarbeitungsaufwand reduziert wird, jedoch die Fertigungskosten steigen.

Abbildung 9 zeigt Bauweisen von aktiven Targets für Auge-Zu-Hand-Systeme mit drei LED-Markern a), Auge-In-Hand-Systeme als LED-Flächentarget b) und ein passives Schachbrett-Target c).

---

<sup>74</sup> Vgl. Armstrong (2002), Du (2013)

<sup>75</sup> Vgl. Nikon (2015), NDI (2015), Ryberg (2006a)

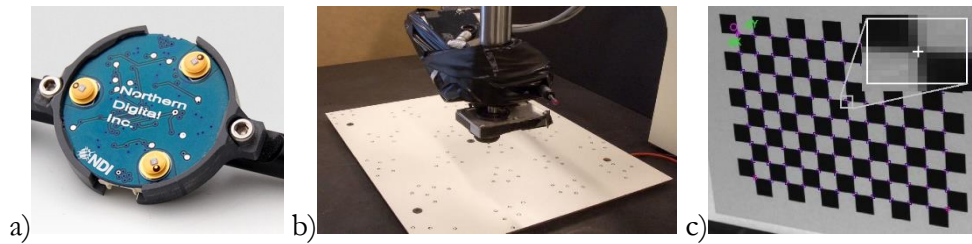


Abbildung 9: Varianten von Targets für die 6D-Pose-Messung: a) aktives LED-Target zur Objekt-Targetierung bei AZH-Prinzip (NDI<sup>76</sup>), b) raumfestes aktives LED-Flächentarget für einen AIH-Sensor (Pose-Eye<sup>77</sup>), c) passives Target<sup>78</sup>.

Weitere Unterscheidungsmerkmale photogrammetrischer Pose-Sensoren sind die Messrate und die Messgenauigkeit. Die Messrate kann sich von  $<1\text{Hz}$  bei Systemen mit Reseau-Scanning-Kameras (Rollei) bis zu mehreren Kilohertz bei Zeilenkamerabasierten Systemen (Nikon, NDI) bewegen. Die Messgenauigkeit ist in Positions- und Orientierungsgenauigkeit zu unterscheiden, da die Orientierung bei vielen Systemen mit erhöhtem Fehler bestimmt wird (vgl. Tabelle 4).

Beispiele für Pose-Sensoren nach dem Auge-Zu-Hand-Prinzip sind das Reseau-Scanning-Messsystem der Firma Rolle, das mittels Rückwärtsschnitt ein passives an der Roboterhand montiertes Target lokalisiert. Die erforderliche Auflösung wird durch eine sog. *Reseau-Scanning-Kamera* (RSC) erzeugt, bei der nach dem Prinzip eines Kamera-Scanners der Bildsensor mechanisch hinter einer mit Referenzkreuzen versehenen Glasplatte (Reseau) verschoben wird. Eine Aufnahme entsteht aus 100 Einzelbildern, die mittels der Referenzkreuze in einem Gesamtbild registriert werden. Die hohe Messzeit lässt nur eine statische Datenerfassung zu.

Die optischen Koordinatenmesssysteme der Firma Nikon Metrology arbeiten dagegen nach dem Prinzip des Vorwärtsschnitts mit einem Set aus drei hochauflösenden Zeilenkameras, die in einem gemeinsamen Gehäuse kalibriert werden und ein aktives Referenzkreuz aus mindestens drei synchronisierten Infrarot-LEDs verfolgen. Auf diese Weise werden dynamische Messungen mit Genauigkeiten um  $90\mu\text{m}$  (Nikon K600) ermöglicht. Vergleichbare 6D Trackingsysteme wie das Optotrak Certus (NDI) erreichen in Messabständen bis 2m mit  $100\mu\text{m}$  ähnliche Positionsgenauigkeit. Die Orientierungsgenauigkeit liegt jeweils etwa eine Größenordnung darüber.

Tabelle 4 zeigt eine Übersicht ausgewählter kommerzieller und aus der Literatur bekannter Systeme mit ungefährender Angabe des Messfehlers und ihren markanten Eigenschaften.

<sup>76</sup> NDI (2015)

<sup>77</sup> Ryberg (2006c), Ryberg (2006b), Ryberg (2006a)

<sup>78</sup> Vgl. Zhengyou (2000), Du (2013)

Tabelle 4: Übersicht photogrammetrische 6D-Pose-Sensoren.

Prinzip	Verfahren	Messfehler ca.	Anmerkung
Auge-zu-Hand (statisches Kamerasystem)	Reseau-Scanning-Kamera (ResoScan/Rollei) <sup>79</sup>	100 $\mu$ m/1000 $\mu$ rad	nur statische Messung, eingeschränkte Genauigkeit, teuer
	3-fach Zeilenkamera + aktive IR-Marker (K600/Nikon, Optotrack/NDI) <sup>80</sup>	100 $\mu$ m/1000 $\mu$ rad	eingeschränkte Genauigkeit, hohe Messraten >1000Hz, teuer
Auge-In-Hand (mobiles Kamerasystem)	Einzelkamera beobachtet aktives Flächentarget (PoseEye) <sup>81</sup>	500 $\mu$ m/- $\mu$ rad	ungenau, aufwendige aktive Markertechnik
	Ergänzende Winkel-messung mittels Moiré-Target (Armstrong) <sup>82</sup>	1000 $\mu$ m/660 $\mu$ rad	ungenau, passives Moiré-Target aus beidseitig bedruckter Glasplatte

Bei den Pose-Sensoren nach dem Auge-in-Hand-Prinzip, wird das Kamerasystem mobil an der Roboterhand montiert und beobachtet ein oder mehrere Referenz-Targets, die fest im Raum positioniert sind.

Während AIH-Sensoren im Bereich der aktiven Roboternachführung (engl. Visual-Servoing), beispielsweise zur automatischen Positionsnachführung an Schweißnähten<sup>83</sup>, große kommerzielle Verbreitung finden, sind 6D-Pose-Sensoren nach diesem Prinzip käuflich kaum zu erwerben. In der wissenschaftlichen Literatur wird dieser Sensortyp häufig zur Anwendung bei der kamerabasierten Roboterkalibrierung beschrieben<sup>84</sup> und seltener auch zur expliziten Anwendung als 6D-Pose-Sensor<sup>85</sup>. Die Leistung dieser Pose-Sensoren ist den teuren Auge-Zu-Hand-Systemen jedoch meist unterlegen (vgl. Tabelle 4).

Die Pose-Messung geschieht zumeist auf Basis eines Abbildungsmodells der eingesetzten Kamera (Kameramodell) unter bekannter räumlicher Lage der Target-Referenzpunkte. Zuvor werden die Modellparameter im Rahmen einer sog. *Selbstkalibrierung* ermittelt. In diesem Prozess werden aus Kalibrieraufnahmen in einem simultanen Ausgleichsverfahren Kameraparameter und Referenzpunktlagen bestimmt. Bei

<sup>79</sup> Vgl. Wiest (2001, 41), Bongardt (2004, 26), Beyer (2004, 22)

<sup>80</sup> Vgl. Nikon (2015), NDI (2015)

<sup>81</sup> Ryberg (2006c), Ryberg (2006b), Ryberg (2006a)

<sup>82</sup> Armstrong (2002)

<sup>83</sup> Vgl. z.B. Scansonic (2016), Micro Epsilon (2016)

<sup>84</sup> vgl. Du (2013), van Albada (1994)

<sup>85</sup> Vgl. Armstrong (2002), Ryberg (2006c)

Spezialsystemen zur Roboterkalibrierung wird zusätzlich das Robotermodell in das Ausgleichsverfahren einbezogen und dessen Parameter optimiert.

Unter der Bezeichnung *Pose-Eye* stellte eine Gruppe um Ryberg<sup>86</sup> eine Reihe von Arbeiten vor, die sich mit der Entwicklung und Evaluation eines 6D-Pose-Sensors zur Unterstützung von Schweißanwendungen beschäftigen. Der Sensor besteht aus einer an der Roboterhand befestigten Kamera mit Weitwinkelobjektiv, die sich an einem großen planaren aktiven Target orientiert (vgl. Abbildung 9b). Das Target besteht aus zahlreichen einzeln angesteuerten Infrarot-LEDs, die mit der Kamera synchronisiert werden. Nach einer initialen Selbstkalibrierung wurden Messraten bis zu 50Hz (Bildfrequenz der Kamera) erreicht. Im Test mit einem Koordinatenmessgerät (KMG) erreichte Pose-Eye eine Positionsgenauigkeit von ca. 0,5mm in 1m Abstand vom Target (ein Orientierungsfehler wurde nicht ermittelt). Diese Genauigkeit wird heute zu meist auch von einem kalibrierten Roboter erreicht (vgl. Kap. 2.2.1).

Armstrong<sup>87</sup> identifiziert die prinzipbedingte Schwäche des Auge-In-Hand Ansatzes indem er feststellt, dass eine relative Orientierungsänderung zwischen einer Kamera und einem planaren Target sich lediglich in einer geringen Bildänderung aufgrund der Perspektive wieder spiegelt, aber zu keinem aussagekräftigen Messsignal führt. Der Entwurf eines speziellen auf dem Moiré-Effekt basierenden Targets soll die ungenaue Pose-Messung mittels des Rückwärtsschnitts durch eine zusätzliche Messung der horizontalen und vertikalen Orientierung ergänzen. Das Target besteht aus einer Glasplatte der Dicke  $d$  die auf Vorder- und Rückseite mit einer Linienstruktur unterschiedlicher Ortsfrequenz bedruckt wird. Bei Betrachtung von vorne ergibt sich so ein winkelabhängiges Moiré-Muster, das durch Bildverarbeitungsalgorithmen ausgewertet wird.

Eine wesentliche Genauigkeitssteigerung gelingt jedoch nicht. Wahrscheinlich, da weitere wichtige Aspekte eines 1-Kamera AIH Pose-Sensors, wie z.B. die große Messunsicherheit des Abstandes zwischen Target und Kamera, wie sie in Kap. 7.5.4 dieser Arbeit identifiziert werden, keine Beachtung fanden.

Als Fazit bleibt festzuhalten, dass kommerziell verfügbare dynamische 6D-Pose-Messsysteme nach dem Auge-Zu-Hand-Prinzip aufwendig und teuer sind und dabei die Bahngenauigkeit eines zyklisch kalibrierten Roboters nur in der Positionsgenauigkeit übertreffen, während deutliche Mängel in der Orientierungsgenauigkeit bestehen bleiben (vgl. Tabelle 4).

Systeme nach dem Auge-In-Hand-Prinzip können zwar kostengünstiger realisiert werden und erreichen ausreichende Messraten, bekannte Ansätze erzielen jedoch Messgenauigkeiten mit denen sie der Bahngenauigkeit eines kalibrierten Roboters derzeit unterlegen sind, so dass ihr Einsatz nur selten ökonomisch sinnvoll sein dürfte. Gelänge es jedoch, die Probleme des Auge-In-Hand-Prinzips zu überwinden, um mit einem kostengünstigen Pose-Sensor den Einsatzbereich beispielsweise eines Industrieroboters zu erweitern, würde ein ökonomisch hoch interessanter Sensortyp entstehen.

---

<sup>86</sup> Ryberg (2006c), Ryberg (2006b), Ryberg (2006a)

<sup>87</sup> Armstrong (2002)

## 2.4 Kapitelzusammenfassung

Ein Koordinatenmessgerät basiert auf einem Messkopfsystem, dessen Messbereich durch ein Verfahrssystem mit Positions- oder Winkelsensoren erweitert wird, so dass die Position und Orientierung (Pose) dieses Messkopfes jederzeit in einem Bezugssystem bekannt sind (Kap. 2.1).

Es bestehen große Bemühungen, anstelle klassischer KMG Standard-Industrieroboter als Verfahrssysteme einzusetzen, um eine 100%-Kontrolle direkt in der Produktionslinie zu realisieren. Vorteile von IR sind u.A. die hohe Beweglichkeit, die beispielsweise das Antasten von Messmerkmalen im Innern einer Karosserie ermöglicht, aber auch die flexible Programmierbarkeit und Integrierbarkeit in die Produktionslinie (Kap. 2.1.1).

Gegen den Einsatz von Industrierobotern in der Koordinatenmesstechnik spricht deren hohe Positionsunsicherheit. Sie liegt teils um Größenordnungen über der Antastunsicherheit üblicher Messkopfsysteme, so dass deren Messleistung nicht annähernd ausgeschöpft werden kann und der robotergestützten Messtechnik eine große Zahl von Anwendungen verschlossen bleibt (Kap. 2.1.2, 2.2). Moderne Verfahren wie die zyklische Rekalibrierung zur Driftkompensation verbessern im Wesentlichen die Positioniergenauigkeit des Roboters, während die für scannende Messkopfsysteme ausschlaggebende Bahngenauigkeit unzureichend bleibt (Kap. 2.2.2, 2.2.3).

Ein anderer Ansatz zur Verringerung der Pose-Messunsicherheit ist die Ergänzung eines externen, von der Roboterstruktur unabhängigen optoelektronischen Pose-Messsystems. Ein solches System sollte für dynamische Messung geeignet sein und neben der Positionsgenauigkeit auch über eine angemessene Orientierungsgenauigkeit verfügen. Marktübliche Messsysteme, wie sie z.B. zur Roboterkalibrierung eingesetzt werden, basieren auf sehr teuren Technologien (z.B. Laser-Interferometer) und erlauben entweder keine 6D-Messung oder nur mit eingeschränkter Orientierungsgenauigkeit (Kap. 2.3.2, 2.3.5).

Viel versprechende Ansätze, die bislang noch nicht in kommerzielle Produkte umgesetzt wurden, sind photogrammetrische Pose-Messsysteme nach dem Auge-In-Hand-Prinzip. Hier können durch die Notwendigkeit eines lediglich kleinen Bildfeldes mit günstigen Standard-Matrixkameras theoretisch hohe Messauflösungen erreicht werden. Bisherige Implementierungsansätze, beispielsweise mit großflächigen LED-Targets (PoseEye), erreichten bislang jedoch nur Messunsicherheiten, die der eines kalibrierten Industrieroboters unterlagen (Kap. 2.3.4, 2.3.5).

---

## 3 FUNKTIONSPRINZIP UND ARCHITEKTUR EINES CPMS

In diesem Kapitel werden die Funktionsweise und der hard- und softwaretechnische Aufbau eines CPMS nach dem Auge-In-Hand-Prinzip (im Sinne der Aufgabenstellung, Kap. 1.3) beschrieben. Nach Definition wichtiger Eigenschaften wie Mess-Pose und Pose-Messgenauigkeit (vgl. Kap. 3.2) wird die Funktion der CPMS-Messsoftware erläutert. Im Anschluss wird die Architektur und Funktionsweise der Simulations-Umgebung erklärt, mit deren Hilfe im späteren Verlauf das Verhalten unterschiedlicher CPMS-Messanwendungen simuliert, analysiert und optimiert werden soll (vgl. Kap. 3.3).

### 3.1 Funktionsweise und Technischer Aufbau eines CPMS

Nach Erläuterung des CPMS-Funktionsprinzips wird das Zusammenspiel der Teilkomponenten eines robotergestützten Messsystems, also des Roboters, des CPMS und des Messkopfsystems (am Beispiel eines Laser-Lichtschnittscanners) dargelegt. Der Aufbau eines Versuchs-Systems wird vorgestellt.

#### 3.1.1 Funktionsprinzip

Das Funktionsprinzip eines CPMS wurde im Ansatz bereits in der Einleitung (siehe Abbildung 2) am Beispiel einer robotergestützten Messanwendung mittels eines Laser-Lichtschnittscanners (vgl. auch Abbildung 4, Kap. 2.1.2) skizziert. Der Laser-Scanner dient nur der Verdeutlichung und ist durch beliebige andere Messkopfsysteme ersetzbar.

Das CPMS besteht aus einem mit ein oder mehreren Bildaufnahmeeinheiten bestückten Kameraträger, der zusammen mit dem zu trackenden Sensor am Handflansch des Roboters montiert wird. Es liefert unabhängig vom Roboter-Messsystem die Position und Orientierung (Pose) des Sensors in einem raumfesten Referenzkoordinatensystem. Dazu beobachten die Kameras fest im Raum positionierte optische Zielmarken (vgl. Kap. 3.1.2, 5), deren Anzahl und Platzierung in einem Referenzkoordinatensystem so gewählt wird, dass auf jeder CPMS-Kamera mindestens eine Zielmarke abgebildet wird. Die Zielmarke selbst wird so ausgelegt, dass sie im Kamerabild durch einen Bildmessalgorithmus äußerst präzise<sup>88</sup> angetastet werden kann (vgl. Kap. 3.1.2, 5).

Abbildung 10 zeigt das Grundschemata eines 3-Kamera-Systems. Die Positionierung der stationären Zielmarken wird durch ihre Posen  $\mathbf{t}_i$  im Welt-Koordinatensystem (*Welt-KS*) beschrieben. Das Messsystem beobachtet jeweils eine Untergruppe

---

<sup>88</sup> Durch Interpolation- und statistische Verfahren werden Antastunsicherheiten um 0,02 Pixel erreicht (vgl. Kap. 5),

der bekannten Zielmarken und bestimmt so die Lage seines lokalen Koordinatensystems (*System-KS*) als eigene Messsystem-Pose  $\mathbf{g}$ . Dabei kann das System-KS auch in den zu trackenden Sensor verlegt werden (vgl. Kap. 7.6.13).

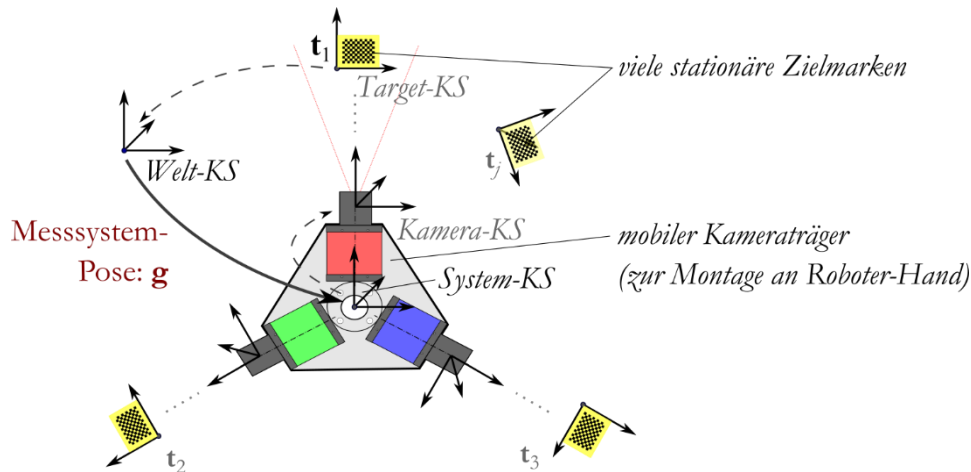


Abbildung 10: Grundschemata der (mehr-)kamerabasierten Pose-Messung nach dem Auge-In-Hand-Prinzip.

Unter der Voraussetzung, dass:

1. die Posen der Einzelkameras relativ zum *System-KS* bekannt sind,
2. das exakte Abbildungsverhalten jeder Kamera bekannt ist und
3. die exakten Posen der Zielmarken relativ zum Referenzkoordinatensystem bekannt sind,

kann ein *Abbildungsmodell* aufgestellt werden, das den mathematischen Zusammenhang zwischen den Bildbeobachtungen der Kameras und der Pose des getrackten Sensors herstellt. Die gesuchte Sensor-Pose kann dann durch geeignete Verfahren im Rahmen einer Modellausgleichsrechnung bestimmt werden (vgl. Kap. 7.1 u. 7.2).

Aus Gründen der Statistik erreicht ein Abbildungsmodell mit einer größeren Anzahl an Zielpunktbeobachtungen eine höhere Genauigkeit. Dazu kann entweder die Anzahl der Kameras oder alternativ der Zielmarken erhöht werden (vgl. Kap. 7.6.12).

Durch den begrenzten Platz an der Roboterhand bietet sich bei einem Auge-In-Hand-System die Erhöhung der Zielmarkendichte im Raum an, die einfach und kostengünstig umzusetzen ist. Dies ist ein Vorteil gegenüber dem Auge-Zu-Hand-Prinzip, bei dem komplementär die statistische Genauigkeit eine größere Anzahl im Raum positionierter Kameras fordern würde.

Das Abbildungsverhalten eines einzelnen Bildaufnahmesystems wird durch ein kalibriertes Kameramodell beschrieben (vgl. Kap. 6). Die Lagen der Zielmarken im Referenzkoordinatensystem und die relative Lage der CPMS-Kameras zueinander



bzw. zum getrackten Sensor werden in einer vorlaufenden Systemkalibrierung bestimmt (vgl. Kap. 7.6).

### 3.1.2 Funktionsweise einer Zielmarke

Eine *Zielmarke* ist ein künstliches Objekt, das eine Reihe von 3D-Referenzpunkten anbietet, deren Positionen in einem lokalen (an die Marke gebundenen) Koordinatensystem bekannt sind und deren Lage aufgrund ihrer speziellen Struktur in einer digitalen fotografischen Abbildung besonders leicht vermessen werden kann (vgl. Kap. 5.1).

Der Vorgang der Vermessung der Referenzpunktlagen im Bild wird im Folgenden als *Bildmessung* bezeichnet. Die Bildmessung geschieht dabei auf einem Computer durch Anwendung eines geeigneten *Bildmessalgorithmus* und liefert als Ergebnis die Bildkoordinaten  $\mathbf{u}_i = (u_i, v_i)$  eines zugehörigen 3D-Referenzpunktes  $\mathbf{R}_i(X, Y, Z)$  (vgl. Kap. 5.2, 7.1).

Abbildung 11 a) zeigt den schematischen Aufbau am Beispiel einer planaren Zielmarke in Schachbrettform. Die 3D-Referenzpunkte werden durch die Stoßstellen der Quadrate gebildet. Das lokale Koordinatensystem (rot) wird so gelegt, dass seine X/Y-Ebene in der Ebene der Zielmarke liegt. Im Spezialfall einer planaren Zielmarke haben so alle  $\mathbf{R}_i$  (grün) die Z-Koordinate 0. Zur automatischen Identifizierung der Marke kann ein maschinenlesbarer Code (blau) aufgebracht werden.

Abbildung 11 b) zeigt die Abbildung der Zielmarke im Kamerabild. Die Bildmessung lokalisiert die Projektionen der Raumpunkte  $\mathbf{R}_i$  als Bildkoordinaten  $\mathbf{u}_i$  im Bildkoordinatensystem (rot) der zugehörigen Kamera.

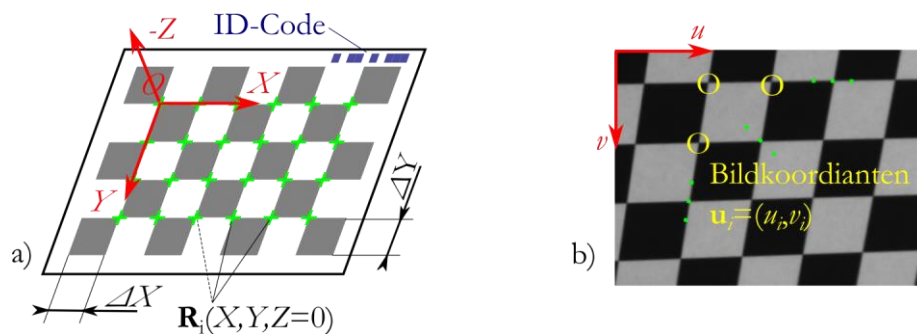


Abbildung 11: a) Schematischer Aufbau einer Zielmarke und b) ihre Abbildung im Kamerabild.

Eine detaillierte Beschreibung photogrammetrischer Zielmarken und dem verwendeten Bildmessalgorithmus gibt Kap. 5.

### 3.1.3 Übersicht einer robotergestützten Messanwendung

Abbildung 12 zeigt das Zusammenwirken von Roboter, CPMS und Messkopfsystem (am Beispiel des Laser-Lichtschnittscanners). Während des Messprozesses beobachtet das CPMS die Zielmarken. Aus den Markenpositionen wird zu jeder Scanlinie die zugehörige Pose des Scanners ermittelt, wodurch die Einzellinien zu einem Flächenscan zusammengefügt werden können. Ein Synchronsignal (*Sync.*) ermöglicht die Zuordnung eines genauen Zeitstempels zur jeweiligen Scan-Linie.

Das interne Messsystem des Trägerroboters liefert in der Regel, nach einer sog. Hand-Auge-Kalibrierung (zur Feststellung der Transformation zwischen Roboterhand und Sensor), zumindest eine „grobe“ Pose-Information. Diese kann als Startwert eingesetzt werden, wodurch eine Beschleunigung der im CPMS ablaufenden nicht-linearen Modellausgleichsrechnung (vgl. Kap. 7.2) bewirkt wird.

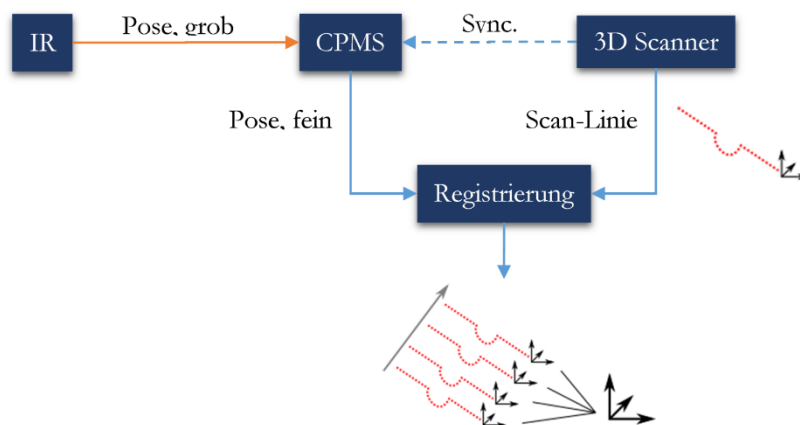


Abbildung 12: Beispielhaftes Einsatzszenario des CPMS zur verbesserten Messung der Pose eines Robotergeführten Lichtschnittscanners und Registrierung der einzelnen Scan-Linien in einem gemeinsamen Koordinatensystem.

### 3.1.4 Zusammenwirken der CPMS-Komponenten

Abbildung 13 zeigt den schematischen Grundaufbau des CPMS und den Informationsfluss zwischen den einzelnen Komponenten: Die zentrale Komponente ist ein leistungsfähiger PC, der rechenaufwendige aber nicht in Echtzeit zu bearbeitende Aufgaben übernimmt. Dazu gehört im Wesentlichen die Bildverarbeitung zur Lokalisierung der Zielmarken und die Berechnung des aufwendigen Modellausgleichs zur Pose-Bestimmung. Dabei muss die Pose-Bestimmung nicht immer unmittelbar sofort erfolgen. Für viele Messanwendungen, z.B. für die Registrierung von Scan-Linien, stellt eine zeitliche Verzögerung der Pose-Messung und damit der Messwert-Registrierung kein

Problem dar, da die Daten erst zu einem späteren Zeitpunkt benötigt werden. Bei unzureichender Rechenkapazität können Messpausen und Offline-Phasen zur Fertigstellung der Berechnung genutzt werden.

Zeitkritische Aufgaben zur Synchronisation übernimmt dagegen ein echtzeitfähiger Mikrocontroller. Dieser triggert über elektrische Signale die Bildaufnahme und LED-Blitzbeleuchtung aller beteiligten Kameras und weist jedem aufgenommenen Bildset einen genauen Zeitstempel zu. Über eine Kommunikations-Schnittstelle (COM) wird dieser Zeitstempel an den zentralen PC propagiert, wo er dem Bildset und der daraus errechneten Pose zugeordnet und gespeichert wird. Über weitere digitale Ports desselben Controllers können bei Bedarf zusätzliche Systeme wie Roboter oder Messgeräte in die Synchronisation einbezogen werden.

Für die Bildübertragung zum Industrie-PC wurde beim Versuchs-Prototypen eine auf Gigabit-Ethernet basierende GigE-Vision-Schnittstelle (vgl. 4.4.1) eingesetzt, während für die Kommunikation mit einem Roboter (bzw. einem Linear-Kreuztisch als Verfahrenssystem) auf eine gewöhnliche serielle COM-Schnittstelle zurück gegriffen wurde.

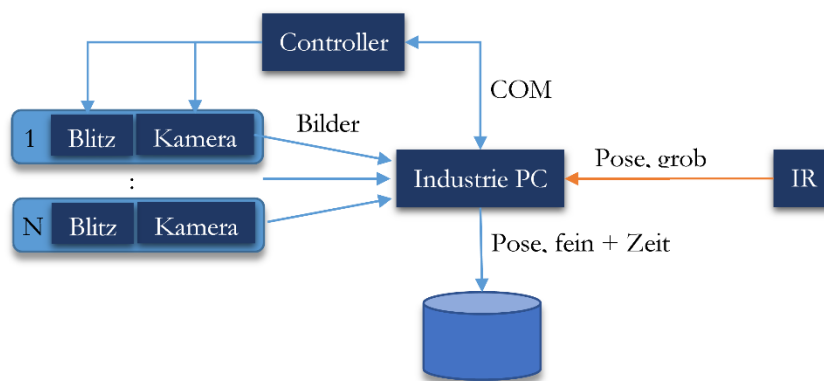


Abbildung 13: Zusammenwirken der einzelnen Komponenten des CPMS. Die Steuerung zeitkritischer Abläufe übernimmt ein Mikrocontroller. Durch die Zuordnung eines Zeitstempels wird die Pose-Messung eindeutig.

### 3.1.5 Testsystem für begleitende Versuche

Für begleitende Versuche und zur Evaluation von Simulationsergebnissen wurde im Verlauf der Arbeit ein 3-Kamera-Pose-Sensor aus CCD-Kameras des Typs DMK23G274 (vgl. Kap. 4.4.1) aufgebaut. Das Testsystem diente insbesondere zur Abschätzung des mit marktüblichen Kameras erreichbaren Bildmessfehlers und zur Untersuchung von (mathematischen) Kameramodellen und Kalibrierverfahren (vgl. Kap. 5 u. 6). Auch wurde damit die Eigenschaften des in Kap. 4.3 beschriebenen Bildsensor-Modells geprüft.

Abbildung 14 a) zeigt das 3-Kamera Test-System. Der mittig erkennbare Kabelstrang enthält die Leitungen zur Synchronisation und Stromversorgung der Kameras, sowie die Ethernet-Kabel für die Bildübertragung zum Industrie-PC. LED-Blitzsysteme wie sie in Kap. 4.5 zur Beleuchtung vorgeschlagen werden sind hier noch nicht installiert, stattdessen wird auf eine diffuse (schattenarme) Raumbeleuchtung zurückgegriffen.

Die CCD-Kameras (vgl. Kap. 4.4.1) sind für eine gleichmäßige Temperaturverteilung und zur mechanischen Stabilisierung fest auf einer 10mm dicken Aluminiumplatte verschraubt. Diese kann über einen Montageadapter mit Passtiften auf ein Trägersystem (Roboter oder XYZ-Lineartisch) montiert werden.

Teil b) zeigt einen exemplarischen Testaufbau für Versuche zur Bildmessung nach Installation auf einem XYZ-Lineartisch.

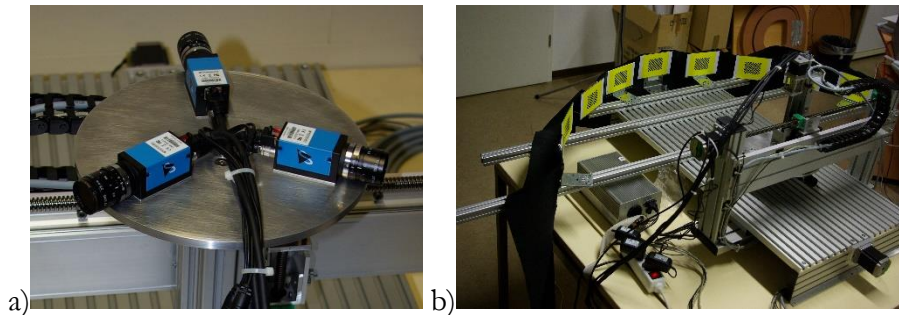


Abbildung 14: a) 3-Kamera Test-System und b) Testaufbau auf einem XYZ Lineartisch für Versuche zur Bildmessung und Kalibrierung.

## 3.2 Definition: Pose und Messgenauigkeit eines CPMS

Im Folgenden wird das Messergebnis eines CPMS in Form der Pose und der Pose-Genauigkeit definiert. Ziel ist eine quantitative Beschreibung zur späteren Bewertung der CPMS-Simulation, mit deren Hilfe die System-Konfiguration und -Genauigkeit verbessert werden soll.

### 3.2.1 Kombinierte Beschreibung von Position und Orientierung: Pose

Nach ISO 8373<sup>89</sup> ist die *Pose* die Kombination von Position und Orientierung im dreidimensionalen Raum. Die Position eines Punktes relativ zu einem kartesischen Koordinatensystem  $\mathbf{K}_i$  definiert sich durch die Abstände in den Koordinatenrichtungen X, Y und Z. Wird an diesem Punkt ein zweites Koordinatensystem  $\mathbf{K}_{+j}$  aufgespannt, so definiert sich dessen Orientierung durch den Winkelversatz seiner Koordinatenachsen

<sup>89</sup> Vgl. ISO, 8373, Manipulating industrial robots – Vocabulary.

zu den entsprechenden Achsen des Basiskoordinatensystems. Abbildung 15 verdeutlicht diese Vorgehensweise.

Da eine Rotation im Raum in unterschiedlicher Art beschrieben werden kann und auch die Reihenfolge von Rotation und Translation eine Rolle spielt, wird an dieser Stelle folgende Konvention getroffen. Zur Beschreibung einer Pose  $\mathbf{p}_i(\alpha, \beta, \gamma, x, y, z)$  in einem Referenzsystem  $\mathbf{K}_i$ , wird dieses System:

1. um einen Winkel  $\alpha$  um die  $X$ -Achse gedreht,
2. um einen Winkel  $\beta$  um die  $Y$ -Achse gedreht,
3. um einen Winkel  $\gamma$  um die  $Z$ -Achse gedreht,
4. und zuletzt um einen Vektor  $(x, y, z)$  verschoben.

Dabei werden Winkel im Bogenmaß und Längen in Meter angegeben. Diese Darstellung der Orientierung wird auch als *Euler-Winkel*<sup>90</sup> (hier speziell Euler-XYZ-Variante) bezeichnet.

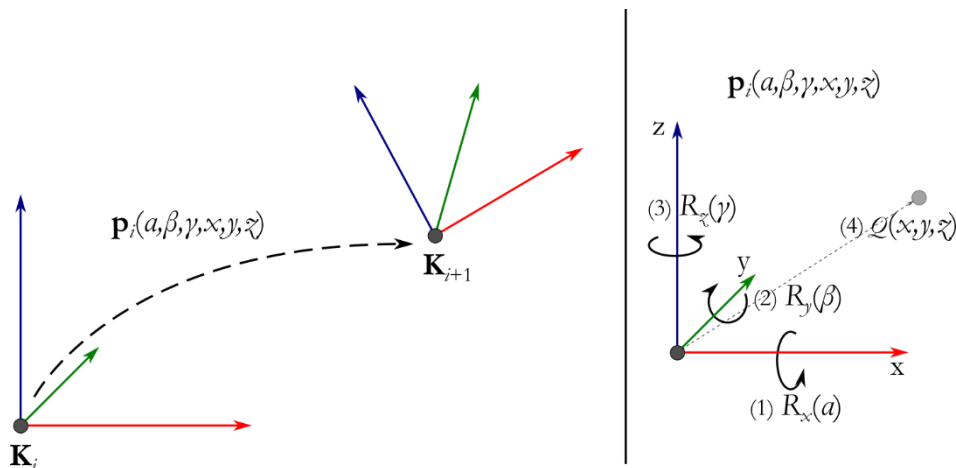


Abbildung 15: Pose eines Punktes  $\mathbf{p}_i$  im Basiskoordinatensystem  $\mathbf{K}_i$ . Durch eine Pose wird zugleich ein neues System  $\mathbf{K}_{i+1}$  aufgespannt.

### 3.2.2 Definition der Pose-Messgenauigkeit

Die Pose-Messgenauigkeit eines CPMS wird angelehnt an DIN ISO 5725<sup>91</sup> in die Komponenten *Richtigkeit* und *Präzision* unterteilt. Der Begriff *Richtigkeit* bezieht sich auf das Ausmaß der Annäherung zwischen dem arithmetischen Mittelwert einer großen Anzahl von Messergebnissen und dem wahren (richtigen) Wert. Die *Präzision*

<sup>90</sup> Vgl. Süsse (2014, 272)

<sup>91</sup> vgl. ISO, 5725, Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen..

(auch Wiederholgenauigkeit) bezieht sich auf das Ausmaß der (zufälligen) Streuung von Messergebnissen und wird im Rahmen dieser Arbeit in Form der einfachen Standardabweichung angegeben.

Eng verwandt mit der Präzision ist die sog. *Messunsicherheit*, mit der eine Streuung um den richtigen Messwert beschrieben wird, sofern systematische Fehler zuvor (z.B. durch Kalibrierung) beseitigt wurden. Die Definitionen von *Präzision* und *Richtigkeit* ähneln der Definition der *Wiederhol-* und *Absolutgenauigkeit* eines Industrieroboters (vgl. Kap. 2.2.1). Auf eine Unterscheidung in statische und dynamische Messgenauigkeit (Positionier- und Bahngenauigkeit beim Roboter) wird jedoch verzichtet.

Aufgrund unterschiedlicher Einheiten von Winkel und Ort, wird die betrachtete Messsystem-Pose in ihre Winkel- und Positionskomponenten aufgeteilt.

Als Maß für die Präzision dient die Standardabweichung  $\sigma_{\alpha\beta\gamma}$  der Winkel- bzw.  $\sigma_{xyz}$  der Positionskomponenten eines Pose-Vektors  $\mathbf{p}_i(\alpha, \beta, \gamma, x, y, z)$ .

Die Richtigkeit wird als Differenz zwischen Erwartungswert einer Mess-Pose und dem richtigen (wahren) Wert bestimmt. Das Ergebnis wird wiederum in Winkel- und Positionsfehler aufgeteilt und mit  $\varepsilon_{\alpha\beta\gamma}$  bzw.  $\varepsilon_{xyz}$  bezeichnet.

Mit obigen Definitionen kann die Messgenauigkeit eines CPMS beispielsweise angegeben werden mit  $\sigma_{\alpha\beta\gamma}=13\mu\text{rad}$  /  $\sigma_{xyz}=11\mu\text{m}$  /  $\varepsilon_{\alpha\beta\gamma}=33\mu\text{rad}$  /  $\varepsilon_{xyz}=43\mu\text{m}$ . Diese Angabe sagt aus, dass ein getestetes oder simuliertes CPMS eine Präzision der Orientierung von  $13\mu\text{rad}$ , eine Präzision der Position von  $11\mu\text{m}$ , eine Richtigkeit der Orientierung von  $33\mu\text{rad}$  und eine Richtigkeit der Position von  $43\mu\text{m}$  erreicht.

Die Bestimmung der unter vorgegebenen Bedingungen theoretisch erreichbaren Präzision und Richtigkeit einer CPMS-Anordnung erfolgt im Rahmen einer Systemsimulation, wobei auch die Systemkalibrierung (vgl. Kap. 7.4, 7.6) in die Simulation einbezogen wird.

### 3.3 Architektur der Mess- und Simulationssoftware

In der Einleitung (Kap. 1.3) wurden bereits die grundlegenden Problemstellungen bei der Konzeptionierung eines CPMS erläutert und die Notwendigkeit und Nützlichkeit einer Simulationsumgebung für den Test, die Konfiguration und die Optimierung der zentralen CPMS-Komponenten argumentiert.

Aufgabe der Simulationsumgebung ist dabei die Bereitstellung realitätsnaher aber dennoch reproduzierbarer Testdaten. Gleichzeitig bietet die Simulationsumgebung zahlreiche Möglichkeiten der Parametrisierung, mit deren Hilfe die Leistung einer CPMS-Messanwendung abgeschätzt werden kann, bzw. umgekehrt durch das Auffinden optimaler Betriebsparameter optimiert werden kann.

Wichtige Parameter sind z.B. die Eigenschaften der einzelnen Kamera (Sensortyp, Objektivstellung, ...), aber auch die Konfiguration eines CPMS, die die Positionierung von Zielmarken oder die Kameraanordnung beschreibt. Dabei ist die CPMS-Konfiguration stark von der zu erfüllenden Messanwendung abhängig, die Randbedingungen wie Messvolumen oder Messgenauigkeit vorgibt.

Im Folgenden wird zunächst der prinzipielle Ablauf einer Pose-Messung und die daran beteiligten Softwaremodule *Bildmessung* und *Pose-Messung* beschrieben. Anschließend wird der Aufbau und die Funktionsweise der Simulationsumgebung erläutert, die aus den beiden Komponenten Bildaufnahmesimulator (BAS) und Bildmesssimulator (BMS) besteht, mit deren Hilfe das Verhalten einer CPMS-Konfiguration detailliert untersucht werden kann.

### 3.3.1 Aufbau der Messsoftware

Abbildung 16 zeigt den Programmablauf bei einer Pose-Messung durch das CPMS am Beispiel des 3-Kamera-Testsystems aus Abbildung 14.

Am Anfang des Messprozesses steht zunächst die Bildaufnahme, bei der durch simultanes Auslösen aller Kameras und Blitzeinheiten durch einen Mikrocontroller ein sog. Bild-Set aufgenommen wird. Dieses Bild-Set, bestehend aus z.B. drei synchronen Aufnahmen in denen jeweils mindestens eine Zielmarke abgebildet ist, wird mit einem Zeitstempel versehen und zum Bildverarbeitungs-PC übertragen (vgl. auch Kap. 3.1.4, Abbildung 13).

Im PC werden die Kamerabilder vom Softwaremodul *Bildmessung* entgegengenommen und verarbeitet. Dazu werden abgebildete Zielmarken zunächst durch einen Mustererkennungsalgorithmus grob lokalisiert und identifiziert (vgl. Kap. 3.1.2, 5.1). Anschließend erfolgt die eigentliche Bildmessung, bei der die von der Zielmarke angebotenen Referenzpunkte von einem Bildmessalgorithmus (vgl. Kap. 5.2) subpixelgenau angetastet werden. Die gemessenen Bildkoordinaten werden der zugehörigen Kamera und Zielmarke zugeordnet und ausgegeben.

Im Softwaremodul *Pose-Messung* werden die Bildkoordinaten in das Abbildungsmodell eingefügt, das die Beziehung zwischen Bildkoordinaten, Kameraposen und Messsystem-Pose beschreibt. Das entstehende nicht-lineare Gleichungssystem wird durch eine Ausgleichsrechnung gelöst. Das Ergebnis ist die gesuchte 6D-Pose des Messsystems (vgl. Kap. 7.2). Nach dem Speichern der berechneten Pose, zusammen mit dem exakten Zeitpunkt der (synchronen) Bildaufnahme, beginnt der Zyklus erneut mit der Aufnahme des nächsten Bild-Sets.

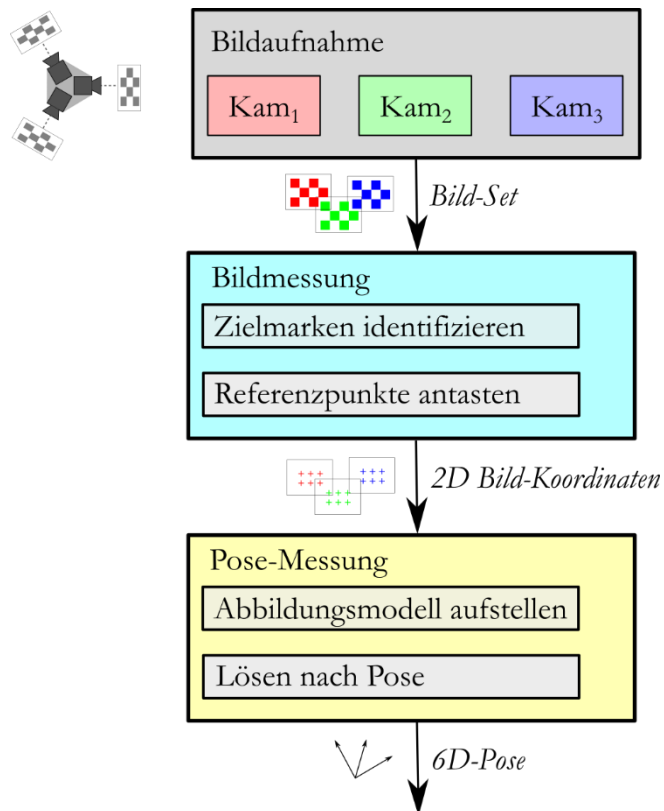


Abbildung 16: Blockdiagramm eines CPMS bestehend aus Modulen zur *Bildaufnahme*, *Bildmessung* (cyan) und *Pose-Messung* (gelb).

Während das Modul *Pose-Messung* zunächst nur in Matlab implementiert wurde, existiert vom Modul *Bildmessung* neben der Matlab-Implementierung zusätzlich eine C++-Implementierung, die als dynamische Programmibibliothek (DLL) in Matlab eingebunden werden kann. Vorteile sind eine höhere Verarbeitungsgeschwindigkeit des generierten Maschinencodes. Eine weitere Beschleunigung ergibt sich durch die parallele Verarbeitung der Teil-Bilder eines Bild-Sets auf einer Mehrkern-CPU, so dass die Bildmessung beim Versuchs-Prototypen (vgl. Kap. 3.1.5) im Bildtakt der Kameras erfolgen kann. Eine detaillierte UML<sup>92</sup>-Beschreibung ist im Anhang A.1 zu finden.

### 3.3.2 Aufbau der Simulationsumgebung

Für die Analyse und anwendungsspezifische Optimierung der Messsoftware werden die Module *Bildmessung* und *Pose-Messung* jeweils einzeln in Matlab implementierte Si-

<sup>92</sup> UML: Unified-Modeling-Language



mulationsmodule eingebettet. Diese erzeugen parametrisier- und reproduzierbare Eingangsdaten und ermöglichen den Vergleich der Ausgabe mit Idealwerten und damit eine Fehlerabschätzung.

Abbildung 17a zeigt die Anwendung des sog. *Bildaufnahme-Simulators* (BAS) zur Analyse des Softwaremoduls *Bildmessung*. Der BAS simuliert dazu eine realitätsnahe Bildaufnahme einer Zielmarke. Dieses Bild dient als Eingabe der *Bildmessung*. Die gemessenen Bildkoordinaten können anschließend mit der Simulationsvorgabe verglichen und auf Fehler analysiert werden (vgl. auch Kap. 3.3.3).

Abbildung 17b zeigt analog die Analyse des Softwaremoduls *Pose-Messung* mit dem sog. *Bildmess-Simulator* (BMS). Der BMS hat dabei die Aufgabe, eine komplette Bildmessung (beispielsweise von drei Zielmarken auf drei Kameras eines CPMS) kontrolliert und reproduzierbar zu simulieren.

Dazu wird dem BMS eine virtuelle 3D-Szene eingegeben, in der die exakte Konfiguration des CPMS (räumliche Anordnung der Zielmarken, Kameraanordnung und die zu testende Mess-Pose) vorgegeben wird. Daraus werden über das Abbildungsmodell ideale Bildkoordinaten der Zielmarken auf den Bildebenen berechnet, mit einem künstlichen Bildmessfehler belegt und als Eingabe für die Pose-Messung verwendet. Durch Vergleich der vorgegebenen Test-Pose mit der Mess-Pose kann der Pose-Fehler einer CPMS-Konfiguration für einen Bildmessfehler bestimmt werden (vgl. auch Kap. 3.3.4).

Ein alternativer Weg zur Abschätzung des Pose-Fehlers ist die Analyse der Ableitungsmatrix (Jakobimatrix, vgl. Kap. 7.2.4) des Abbildungsmodells durch eine sog. Singulärwertzerlegung (Kap. 7.4). Auf diesem Wege können insbesondere spezielle genauigkeitsbeschränkende Eigenschaften des Messkopf-Designs eines CPMS, sog. schwer detektierbare Bewegungen (vgl. Kap. 7.3), aufgedeckt und beseitigt werden, wodurch die Methode eine besondere Stellung einnimmt.

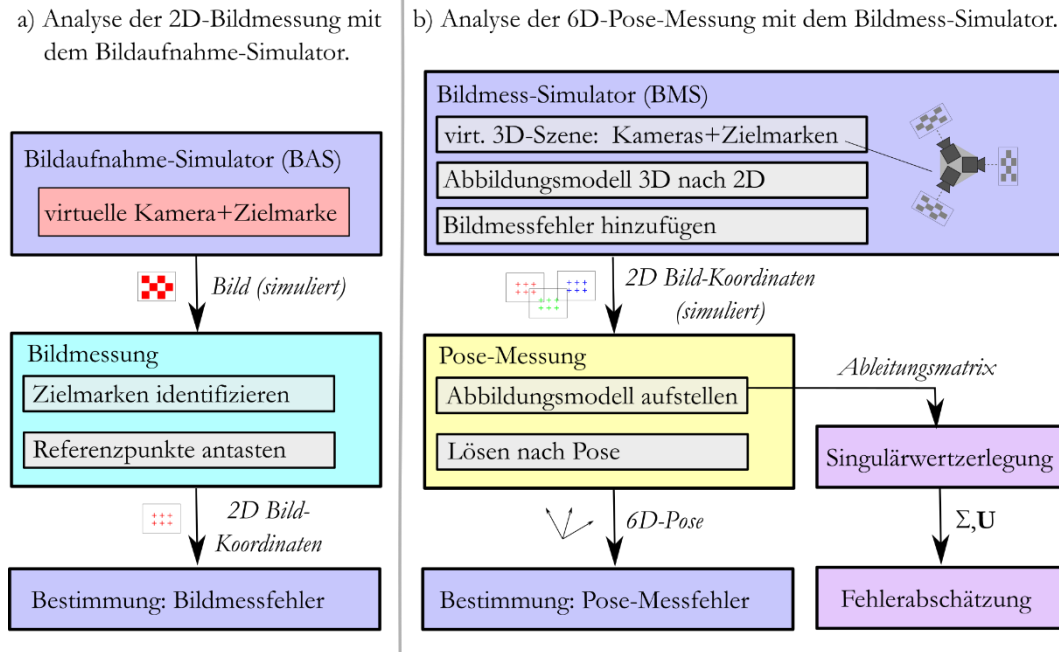


Abbildung 17: Anwendung der Simulationsumgebung zur a) Analyse der Bildmessung mit dem Bildaufnahme-Simulator (BAS) und b) Analyse der Pose-Messung mit dem Bildmess-Simulator (BMS).

### 3.3.3 Anwendung des Bildaufnahme-Simulators

Ziel des *Bildaufnahmesimulators* (BAS) ist die Untersuchung und Optimierung der Eigenschaften eines einzelnen Bildaufnahmesystems zum Einsatz in einem CPMS. Simuliert wird dazu u.A. die Beleuchtung einer Zielmarke, die Rückstreuung des Lichts an der Zielmarke, ihre optische Abbildung durch das Kameraobjektiv und letztlich die Bildwandlung durch den Bildsensor (vgl. Kap. 4.6.2).

Durch systematische Variation von Aufnahmeparametern wie z.B. Beleuchtungsart und -Wellenlänge, Abbildungsverhalten des Objektivs oder auch Rauschverhalten des Bildsensors, kann die Auswirkung dieser Parameter auf den Bildmessalgorithmus (und damit den Bildmessfehler) reproduzierbar untersucht werden. Auf dieser Basis kann in einem weiteren Schritt das Verhalten der Bildmessung verbessert werden (vgl. Kap. 5).

Abbildung 18 skizziert den Ablauf dieser ersten Simulationsstufe. Der BAS erhält als Eingabe ein Set idealer Bildkoordinaten  $\mathbf{u}_{\text{test},i}$  (grüne Kreuze). Daraus generiert er ein künstliches Grauwertbild  $\mathbf{g}(u,v)$  einer Zielmarke, wobei sich die vorgegebenen Aufnahmeparameter u.A. in Helligkeitsverteilung, Schärfe oder Bildrauschen der simulierten Aufnahme widerspiegeln (vgl. auch Kap. 4.6.2, Abbildung 32).

Auf die simulierte Zielmarkenabbildung wird die *Bildmessung* des CPMS angewendet, deren Ergebnis in  $\mathbf{u}_{\text{mess},i}$  (rote Kreuze) gespeichert wird.

Durch die Bestimmung der Abweichung  $\epsilon_{u,i}$  zwischen vorgegebenen und gemessenen Bildkoordinaten ( $\mathbf{u}_{test,i}$  und  $\mathbf{u}_{mess,i}$ ) wird ein Fehlermaß für die Bildmessung definiert. Es zeigt später die Auswirkungen von Änderungen der Simulationsparameter oder des Messalgorithmus (vgl. Kap. 4, 5).

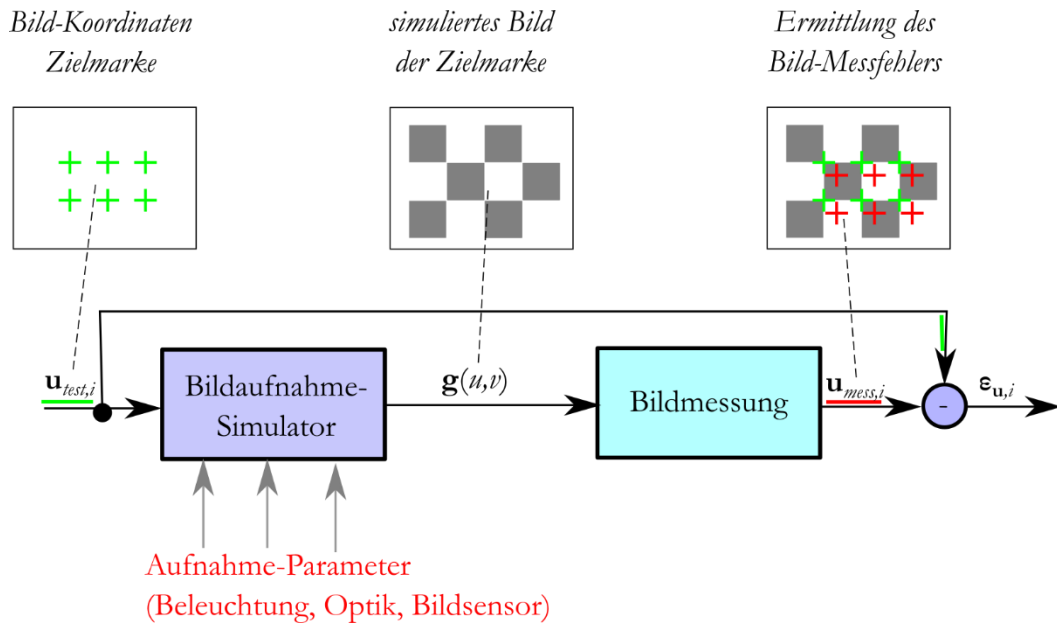


Abbildung 18: Simulation der Bildaufnahme einer Zielmarke mit anschließender Bildmessung und Bestimmung des Bildmessfehlers  $\epsilon_{u,i}$ .

Neben der reinen Simulation der Bildaufnahme kann der BAS für weiterführende Aufgaben, wie der schnellen und systematischen Abstimmung eines Bildaufnahmesystems auf die Anforderungen einer gegebenen Messanwendung, genutzt werden (vgl. Kap. 4.7).

### 3.3.4 Anwendung des Bildmess-Simulators

Der *Bildmess-Simulator* (BMS) simuliert eine vollständige Bildmessung eines CPMS, die als Eingabe für das Softwaremodul Pose-Messung dient (vgl. Abbildung 17b). Das Ziel der Simulation ist die Abschätzung des Pose-Messfehlers einer bestimmten CPMS-Anordnung, ohne diese experimentell aufbauen zu müssen.

Einflussfaktoren des Pose-Fehlers sind beispielsweise der Bildmessfehler der sich aus dem eingesetzten Kamerasystem und Bildmessverfahren ergibt und im Rahmen einer Kamerakalibrierung (vgl. Kap. 6) ermittelt werden kann. Aber auch die Sys-

tem-Parameter (wie Kamera- und Zielmarken-Posen), die im Rahmen einer Systemkalibrierung nicht beliebig genau bestimmbar sind (vgl. Kap. 7.6), erzeugen bei einem CPMS einen Pose-Messfehler.

Abbildung 19 skizziert den Ablauf der Simulation einer CPMS-Konfiguration. Dem BMS wird eine Konfigurationsbeschreibung in Form der sog. System-Parameter übergeben, die die räumlichen Posens aller Zielmarken und Kameras enthält.

Unter Vorgabe einer Messsystem-Test-Pose  $\mathbf{p}_{test}$  errechnet der BMS über das Abbildungsmodell die Bildkoordinaten der im Sichtfeld der Kameras  $\mathbf{c}_1$  bis  $\mathbf{c}_n$  befindlichen Zielmarken. Diese werden mit einem (künstlichen) Bildmessfehler  $\sigma_I$  beaufschlagt und als simulierte Bildkoordinaten  $\mathbf{u}_{sim}(\mathbf{c}_n, \mathbf{p}_{test})$  (rote Kreuze) an das Modul zur Pose-Messung übergeben.

Die Pose-Messung ermittelt aus der simulierten fehlerbeaufschlagten Bildmessung  $\mathbf{u}_{sim}(\mathbf{c}_n, \mathbf{p}_{test})$  eine ebenfalls fehlerbehaftete Pose-Messung  $\mathbf{p}_{mess}$ . Die Differenz  $\boldsymbol{\varepsilon}_p$  zwischen vorgegebener und gemessener Pose beschreibt gerade denjenigen Pose-Messfehler, der für diese CPMS-Konfiguration unter dem vorgegebenen Bildmessfehler und System-Parametern typisch ist.

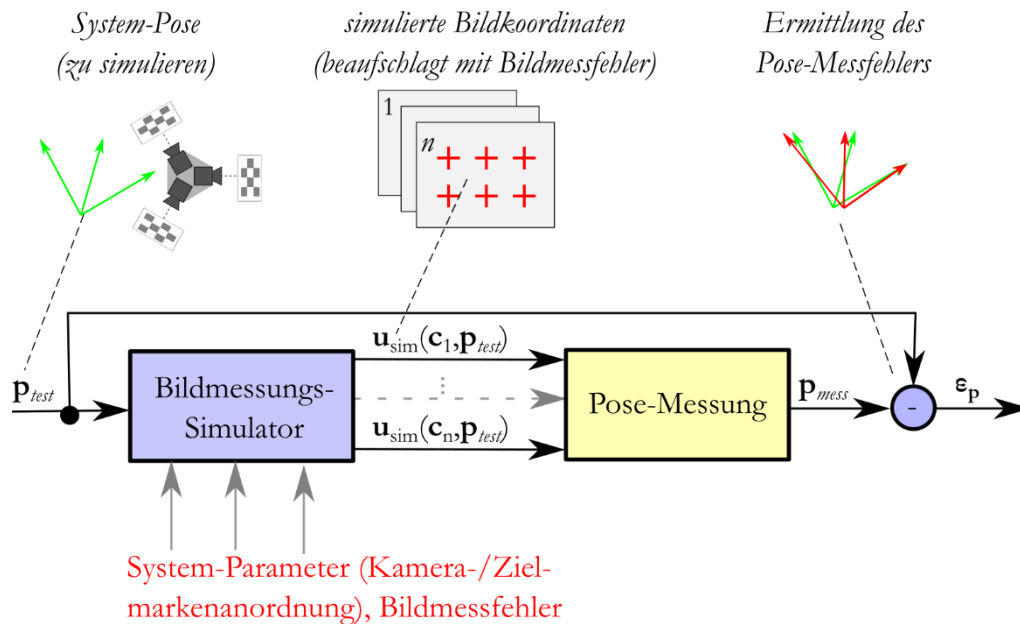


Abbildung 19: Simulation der Bildmessung für ein komplettes CPMS mit anschließender Pose-Messung und Bestimmung des Pose-Messfehlers  $\boldsymbol{\varepsilon}_{p,j}$ .

### 3.4 Weitere Eigenschaften eines CPMS

Zum Abschluss des Kapitels folgen noch einige konzeptionelle Betrachtungen zum Messvolumen eines CPMS und der Synchronisation der Messdaten von CPMS und einem getrackten Messkopfsystem.

### 3.4.1 Messvolumen

Das *Messvolumen* beschreibt analog zum Arbeitsraum des Roboters ein Volumen, innerhalb dessen das CPMS die Anforderungen der spezifischen Messanwendung erfüllt (z.B. eine geforderte Pose-Messgenauigkeit).

Eine maximale Flexibilität kann erreicht werden, wenn der gesamte Arbeitsraum des eingesetzten Trägerroboters abgedeckt wird. Für die meisten Messanwendungen wird ein wesentlich kleineres Messvolumen genügen. Soll beispielsweise die Lage nahe beieinander liegender Messmerkmale erfasst werden, so ergibt sich ein entsprechend kleineres Messvolumen und der Aufwand zur Platzierung der Zielmarken kann potentiell reduziert werden. Größe und Form des Messvolumens sind damit stark abhängig von der angestrebten Messanwendung.

Das Messvolumen eines CPMS kann definiert werden als die Menge aller Mess-Posen  $\mathbf{p}_i$  für die gilt:

1. Jede Kamera beobachtet mindestens eine Zielmarke.
2. Diese Zielmarke liegt in einem gültigen Abstandsbereich (Schärfebereich) der jeweiligen Kamera.
3. Ein vorgegebener Pose-Messfehler wird nicht überschritten.

Die Prüfung dieser Bedingungen ist in der Praxis bei einer 6D-Pose, aufgrund der zahlreichen Winkel- und Positions-Kombinationen, nicht trivial. Ob eine CPMS-Anordnung bzgl. des Messvolumens die Vorgaben einer Messanwendung erfüllt, lässt sich idealerweise in der Simulation prüfen.

### 3.4.2 Messfrequenz und Synchronisation

Für die dynamische Pose-Bestimmung und Datenaufnahme eines Messkopfsystems ist eine exakte Synchronisation zwischen den einzelnen CPMS-Kameras und dem Messkopfsystem erforderlich.

Die *Messfrequenz* eines CPMS ist dabei zunächst durch die maximale Bildfrequenz des eingesetzten Kameratyps beschränkt, die bei heutigen hochauflösenden Standard-Bildverarbeitungskameras etwa in Bereichen von 30-100Hz liegt. Dabei wird die Messfrequenz des eingesetzten Messkopfsystems in der Regel mit derjenigen des CPMS nicht übereinstimmen. Dadurch ist eine synchrone Auslösung beider Messsysteme (z.B. durch eine Trigger-Leitung) in der Praxis nicht möglich.

Diese Problematik kann durch die asynchrone Datenaufnahme beider Systeme unter Angabe eines exakten Zeitstempels für den jeweiligen Messwert aufgelöst werden. Das CPMS liefert dazu für zwei aufeinander folgende diskrete Zeitpunkte  $t_i$  und  $t_{i+1}$  jeweils eine gültige Pose  $\mathbf{p}(t_i)$  und  $\mathbf{p}(t_{i+1})$ . Zu einem Datum des Messkopfsystems, dass zu einem Zeitpunkt  $t_i < t_j < t_{i+1}$  aufgenommen wurde, kann die zugehörige Aufnahme-Pose durch Anwendung einer Interpolationsfunktion zur Berechnung einer

Zwischen-Pose zu  $\mathbf{p}(t_i)$  und  $\mathbf{p}(t_{i+1})$  geschätzt werden. Man macht sich hierbei die mechanische Trägheit des Systems zunutze, die äußeren Beschleunigungskräften entgegen wirkt und so die Abweichung von der linearen Bahn bedämpft. Eventuell störende Eigenschwingungsformen des Roboters treten i.d.R. aufgrund der Eigendämpfung erst bei veränderlichen Prozesskräften und stark veränderlichen Beschleunigungen (Ruck) auf und können hier vernachlässigt werden.<sup>93</sup>

Ein potentieller Interpolationsfehler sinkt dabei mit steigender Messfrequenz des CPMS. Abbildung 20 verdeutlicht das Prinzip am Beispiel einer einfachen Linear-Interpolation. Eine Gegenüberstellung geeigneter Pose-Interpolationsverfahren findet sich u.A. in Bremer (2012)<sup>94</sup>.

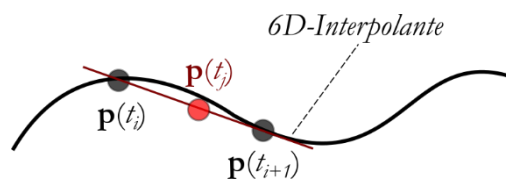


Abbildung 20: Prinzip der Berechnung einer Zwischen-Pose am Beispiel einer linearen Interpolation.

Eine hohe Messfrequenz eines CPMS kann eine hohe Rechenlast im Bildverarbeitungssystem verursachen. Umgekehrt kann das Bildverarbeitungssystem durch unzulängliche Rechenleistung die Messrate seinerseits begrenzen. In diesem Fall kann es sinnvoll sein, die Messrate in einer praktischen Anwendung soweit abzusenken, dass gerade noch kein störender Interpolationsfehler entsteht.

Kann für eine konkrete Applikation keine hinreichende Messfrequenz erzielt werden, so ist zu überlegen, ob diese Applikation unmittelbar eine Pose-Information benötigt, oder ob die Berechnung zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen kann, beispielsweise die Scanlinien eines Laser-Scanners in einer Prozesspause registriert werden können.

### 3.5 Kapitelzusammenfassung

Im Rahmen der Arbeit wird ein Konzept zur Planung und Implementierung mehrkamerabasierter Pose-Messsysteme nach dem Auge-In-Hand-Prinzip (vgl. auch Kap. 2.3.4) entwickelt. Dazu wird zunächst die prinzipielle Funktionsweise eines CPMS am Beispiel eines 3-Kamera-Pose-Sensors zum Tracking eines Laser-Lichtschnittscanners in einer Robotermessanwendung erläutert. Das Zusammenwirken von

<sup>93</sup> Vgl. Rösch (2015, 63,65)

<sup>94</sup> Bremer (2012, 18)

Roboter, Messkopfsystem und CPMS, sowie die Kommunikation zwischen diesen Komponenten werden beschrieben. Der technische Aufbau eines ersten Versuchssystems wird dargelegt (vgl. Kap. 3.1).

Angelehnt an ISO 8373 werden die Orientierungs- und Positions-Komponenten einer Pose definiert. Zur Orientierungsangabe wird die sog. Euler-XYZ-Konvention genutzt. Aus der Pose-Definition wird ein Maß für die Pose-Messgenauigkeit abgeleitet, das in die Komponenten *Richtigkeit* zur Beschreibung systematischer Fehler und *Präzision* zur Beschreibung stochastischer Fehler aufgeteilt wird (vgl. Kap. 3.2).

Der prinzipielle Aufbau und die Funktionsweise einer Zielmarke als Referenzobjekt für die präzise Bildmessung werden am Beispiel einer planaren Schachbrett-Marke erläutert (vgl. Kap. 3.1.2).

Die Mess-Software eines CPMS wird in die Module *Bildmessung* und *Pose-Messung* unterteilt. Die *Bildmessung* beschreibt das Antasten einer Zielmarke im Kamerabild und liefert als Ergebnis die Bildkoordinaten der Zielmarken-Referenzpunkte. Aus diesen Koordinaten errechnet die *Pose-Messung* über das Abbildungsmodell die aktuelle Messsystem-Pose.

Für die Planung und Leistungsabschätzung von CPMS wird eine Simulations-Umgebung entwickelt. Mit deren Hilfe können die Software-Module *Bildmessung* und *Pose-Messung* einzeln untersucht und später im Hinblick auf Kostenaufwand und Messgenauigkeit optimiert werden.

Zur Untersuchung der *Bildmessung* wird ein Bildaufnahme-Simulator (BAS) entwickelt, der eine parametrisier- und reproduzierbare Simulation einer Zielmarken-Aufnahme bereitstellt.

Der sog. Bildmess-Simulator (BMS) setzt eine Stufe höher an, indem er die Bildmessung selbst simuliert. Dazu werden aus einer virtuellen 3D-Szene durch das Abbildungsmodell künstliche Bildkoordinaten erzeugt, die als kontrollierte Eingabe zur Untersuchung der *Pose-Messung* dienen (vgl. Kap. 3.3).

Zum Schluss folgen einige Überlegungen zum Messvolumen eines CPMS und zur Interpolation von Mess-Posen bei asynchronen Abtastfrequenzen von Messkopfsystem und CPMS (vgl. Kap. 3.4).





---

## 4 SIMULATION DIGITALER BILDAUFNAHMESYSTEME

Das Grundelement eines mehrkamerabasierten Pose-Messsystems ist die einzelne Bildaufnahmeeinheit, bestehend aus Lichtquelle, Objektiv und digitalem Bildsensor, deren Eigenschaften in enger Interaktion mit dem eingesetzten Bildverarbeitungsalgorithmus stehen und so die Antastgenauigkeit (Bildmessfehler) der Zielmarke beeinflussen. Fehler in der Bildmessung pflanzen sich zwangsläufig in einen Fehler der Pose-Messung fort, so dass die bestmögliche Optimierung der Bildaufnahme und Bildmessung von zentraler Bedeutung zum Erreichen einer hohen Pose-Messgenauigkeit ist (vgl. auch Kap. 4.7, 5.3).

Ein digitales Bildaufnahmesystem besteht aus einer Kamera und einer Beleuchtungseinheit. Die Kamera selbst besteht aus einer Abbildungsoptik und dem Bildsensor, der die abgebildete Szene in einen digitalen Datenstrom wandelt. Eine Beleuchtungseinheit, beispielsweise als LED-Blitz ausgelegt, sorgt für eine ausreichende und kontrollierte Ausleuchtung des Bildfeldes zu einem exakt definierten Zeitpunkt. Neben der eigentlichen Lichtquelle enthält sie dazu weitere Komponenten wie eine Optik zur Strahlformung und eine Elektronik zur Leistungssteuerung und Synchronisation (vgl. Kap. 4.2, 4.5, 4.6.1).

Ein zentrales Problem besteht darin, dass viele Parameter eines Bildaufnahmesystems (z.B. Arbeitsabstand, Abbildungsmaßstab oder Schärfentiefebereich) in Abhängigkeit von den geforderten Eigenschaften einer CPMS-Konfiguration (z.B. Messvolumen und Pose-Genauigkeit) stark variieren können. Zur Abstimmung der Bildaufnahmeparameter an einem Versuchsaufbau müssten nicht nur unterschiedliche Lichtquellen oder Objektive vorgehalten werden. Aufgrund unwägbarer Toleranzen der Bauteile und stochastischen Einflüssen wie Bildrauschen, wären einzelne Versuche an realen Geräten langwierig und nicht reproduzierbar.

Ziel dieses Kapitels ist daher zunächst die Entwicklung eines *Bildaufnahmesimulators* (BAS), der die Eigenschaften einer Bildaufnahmeeinheit ausgehend von der Lichtquelle über die Remission an der Zielmarke bis zur Abbildung und Bildwandlung reproduzierbar emuliert (vgl. Kap. 4.6.1, 4.6.2).

Auf Grundlage des BAS wird zunächst ein Verfahren zur schnellen Optimierung der Bildaufnahmeparameter für eine vorgegebene CPMS-Anwendung entwickelt, mit dessen Hilfe beispielsweise Eigenschaften der Lichtquelle, Objektiv und Bildsensor optimal abgeglichen werden (vgl. Kap. 4.7).

Später bildet dieser Simulator dann die Grundlage zur Analyse und Optimierung des Bildmessalgorithmus zur Zielmarkenantastung (vgl. Kap. 5).

### 4.1 Anforderungen an das Bildaufnahmesystem

Leistungsfähige Algorithmen zur Bildmessung (vgl. Kap. 6.4) analysieren für eine hochgenaue Lokalisierung von Referenzmarkern die Helligkeitsverteilung über Ob-

jektanten, um so eine subpixelgenaue Bildmessung zu erreichen. Die Verfahren stellen jedoch besondere Anforderungen an ein Bildaufnahmesystem, die im Folgenden formuliert werden.

#### 4.1.1 Prinzipielle Anforderungen

Ein CPMS soll ein durch die Messanwendung gegebenes Messvolumen mit möglichst hoher Pose-Messgenauigkeit abdecken. Daraus lassen sich folgende grundsätzliche Anforderungen an das einzelne Bildaufnahmesystem ableiten:

1. *Hohe Bildmessgenauigkeit:* Die Pose-Messgenauigkeit eines CPMS korreliert mit der Bildmessgenauigkeit (vgl. Kap. 7.4) der eingesetzten Bildaufnahmesysteme. Die zentrale Anforderung ist daher (in Zusammenarbeit mit dem Bildmessalgorithmus, Kap. 5.2) das Erreichen einer möglichst hohen Bildmessgenauigkeit. Ein absolutes Maß für die Bildmessgenauigkeit stellt der normierte Bildmessfehler dar (vgl. Kap. 6.1.2, 6.4).
2. *Geeigneter Arbeitsabstandsbereich:* Der Arbeitsabstandsbereich beschreibt einen Bereich zwischen einem Nah- und Fernpunkt im Sichtfeld der Kamera, innerhalb dessen eine hinreichende Antastsicherheit und Bildmessgenauigkeit der Zielmarke erreicht wird. Dabei bewirkt ein geringer Nahpunktabstand (kürzeste Messentfernung), dass auch nahe einer Marke noch gemessen werden kann, während ein hoher Fernpunktabstand größere Entfernungen zwischen Kamera und Zielmarken und damit größere Messvolumina zulässt.

#### 4.1.2 Abgeleitete Anforderungen

Aus den beiden oben beschriebenen prinzipiellen Anforderungen können eine Reihe von Unteranforderungen abgeleitet werden, die für die Konstruktion von Bedeutung sind.

Die Bildmessgenauigkeit, mit der Referenzpunkte einer Zielmarke angetastet werden können, ist abhängig vom Auflösungsvermögen der Kamera (vgl. Kap. 4.2.2), von Helligkeitsfehlern des Bildes wie Bildrauschen, Linearität oder ungleichmäßiger Pixelverstärkung, sowie der Bewegungsunschärfe bei dynamischer Bildaufnahme (vgl. Kap. 5.3).

Daraus lassen sich für eine hohe Bildmessgenauigkeit des einzelnen Bildaufnahmesystems die folgenden Unteranforderungen ableiten. Erstrebenswert sind:

- a) Ein allgemein hohes Auflösungsvermögen der Kamera,
- b) ein geringes Rauschen und Homogenität des Bildsensors,
- c) eine ausreichend starke und homogene, sowie fremdlicht- und schattenfreie Beleuchtung des Bildfelds und

- d) eine geringe Bewegungsunschärfe bei bewegter Bildaufnahme.

Eine weitere Unteranforderung ergibt sich durch die (anwendungsspezifische) Vorgabe des Arbeitsabstandsbereichs. Eine Kamera mit fixer Focuseinstellung (einen Autofocus erlaubt die Kamerakalibrierung nicht, vgl. Kap. 6) kann nur einen eingeschränkten Schärfentiefebereich realisieren, innerhalb dessen eine ausreichende Bildschärfe vorliegt, um eine Zielmarke sicher anzutasten. Daraus ergibt sich:

- e) Der Schärfentiefebereich der Kamera muss mindestens den (von der Messanwendung) geforderten Arbeitsabstandsbereich abdecken.

### 4.1.3 Diskussion der Anforderungen

Viele der genannten Anforderungen widersprechen oder beeinflussen sich gegenseitig, so dass in der Praxis immer ein anwendungsbezogener Kompromiss zu finden ist.

Ein beispielhaftes Problem ist der Arbeitsabstandsbereich. Dieser gibt zunächst einen Schärfentiefebereich vor. Der Schärfentiefebereich kann durch Schließen der Objektivblende erweitert werden, was jedoch die einfallende Lichtmenge reduziert und (abhängig von der Beleuchtungswellenlänge) einen Auflösungsverlust durch Beugung an der Blende verursacht. Die Folgen sind erhöhtes Bildrauschen wegen Untersteuerung des Sensors und ein potentiell verringertes Auflösungsvermögen durch Beugungsunschärfe (vgl. Kap. 4.2.3, 4.2.4).

Diese Nachteile könnten durch Erhöhung der Lichtleistung und Absenkung der Lichtwellenlänge (geringere Beugung) kompensiert werden, was aber weitere Seiteneffekte nach sich ziehen kann. So ist eine Erhöhung der Lichtleistung, die wegen der wellenlängenabhängigen Empfindlichkeit des Bildsensors überproportional ansteigen müsste, zum Teil nicht oder nur sehr aufwendig zu realisieren.

Letztlich ist hier ein anwendungsspezifischer Kompromiss zwischen Schärfentiefe, Lichtleistung und Auflösungsvermögen zu finden, bei dem neben der genannten noch weitere Parameter wie z.B. die Objektivbrennweite oder die Strahlformung der Beleuchtung oder spezielle Eigenschaften des Bildsensors zu beachten sind.

Zur Lösung des Problems werden in dieser Arbeit die formellen Zusammenhänge der Bildaufnahmeparameter untersucht und ein Algorithmus für eine anwendungsspezifische Adaption erarbeitet (vgl. Kap. 4.6).

## 4.2 Optisches Abbildungssystem

Unter einem *optischen Abbildungssystem* versteht man eine Vorrichtung zur Erzeugung eines Bildpunktes von einem Gegenstandspunkt durch die Bündelung der vom Ge-

genstandspunkt ausgehenden Lichtstrahlen. Realisiert wird die Abbildung durch Kombination sammelnder Linsen und Blenden, die zusammengefasst als **Objektiv** bezeichnet werden.<sup>95</sup>

Das Objektiv bildet zusammen mit dem Bildsensor den Kern eines Bildaufnahmesystems. Um mit einer Kamera präzise Messungen durchzuführen, ist es notwendig, die Interaktion zwischen Beleuchtung, Bildsensor und Objektiv zu verstehen und diese Faktoren optimal aufeinander abzustimmen.

#### 4.2.1 Prinzipielle Funktionsweise eines Objektivs

Die optische Abbildung kann vereinfacht durch das Modell der *Geometrischen Optik* (Strahlenoptik) beschrieben werden. Dazu wird ein Objektiv als einzelne unendlich dünne (ebene) Linse angesehen, die einfallende Lichtstrahlen gemäß dem Snelliusschen Brechungsgesetz ablenkt. Die Welleneigenschaften des Lichts wie Beugung und Interferenz werden zunächst vernachlässigt.<sup>96</sup>

Abbildung 21 zeigt die prinzipielle Funktionsweise eines Objektivs (schematisch als Kombination aus Linse und Blende dargestellt) und einige Parameter wie Brennweite und Kamerakonstante, die die wichtigsten Eigenschaften beschreiben.

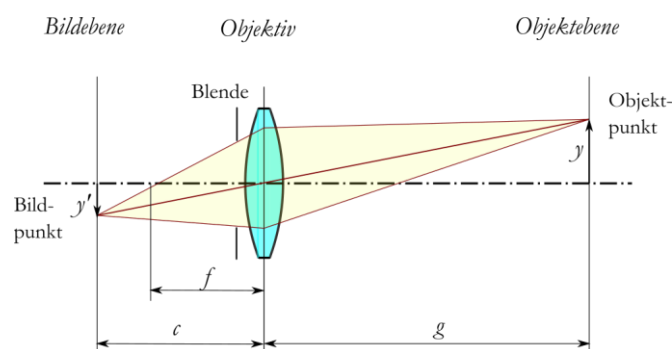


Abbildung 21: Prinzipielle Funktionsweise eines Objektivs bei Abbildung eines Objektpunktes in Gegenstandsweite  $g$ . Die Kamerakonstante  $c$  bezeichnet den Abstand zwischen Objektiv- und Bildebene. Die Objektivbrennweite  $f$  entspricht nur im Ausnahmefall des unendlich entfernten Objektes der Kamerakonstante  $c$ .

Die *optische Achse* ist diejenige Achse, die senkrecht das Zentrum der Objektivenebene durchstößt. In der *Bildebene* entsteht das Abbild der beobachteten Szene, genauer der in der *Objektebene* befindlichen Objektpunkte. Bildebene und Objektebene stehen zueinander parallel.

<sup>95</sup> vgl. Hecht (1994)

<sup>96</sup> vgl. Litfin (2005, 1)

Die *Brennweite*  $f$  bezeichnet den Abstand zwischen der Hauptebene einer optischen Linse und deren Fokus (Brennpunkt). Objektpunkte die nicht unendlich weit weg sind, sondern sich in *Gegenstandsweite*  $g$  befinden, werden in der sog. Bildebene, etwas hinter der Fokalebene abgebildet. Der Abstand zwischen Bildebene und Hauptebene der Linse wird als *Kamerakonstante*  $f_c$  (häufig auch als Bildweite) bezeichnet.

Der Zusammenhang zwischen Brennweite, Kamerakonstante und Gegenstandsweite wird in der geometrischen Optik durch die sog. *Linsegleichung*<sup>97</sup> beschrieben:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_c} + \frac{1}{g} \quad (4.1)$$

Ein realer Punkt in der Objektebene mit dem Abstand  $y$  zur optischen Achse wird auf der Bildebene unter einem Abstand  $y'$  abgebildet. Ein entsprechender Abbildungsmaßstab, der die Verkleinerung eines Objektes in Gegenstandsweite  $g$  bei Abbildung auf die Bildebene beschreibt, kann durch die Einführung eines lateralen *Maßstabsfaktors*  $m_l$  beschrieben werden. Dieser entspricht dem Verhältnis der Kamerakonstante  $f_c$  zur Gegenstandsweite  $g$ :

$$m_l = \frac{f_c}{g} = \left| \frac{y'}{y} \right| \quad (4.2)$$

Die Öffnungsweite einer Optik, durch die Licht in das System eindringen kann, nennt man *Apertur*. Über eine unmittelbar hinter der Linse eingefügte *Blende* kann die Größe der Eintrittspupille (und damit der Apertur) eingestellt werden. Das Verhältnis der Brennweite  $f$  zum Durchmesser  $D$  der Eintrittspupille wird als *Blendenzahl*  $k$  bezeichnet:

$$k = \frac{f}{D} \quad (4.3)$$

Kleinere Blendenöffnungen sind demnach durch eine größere Blendenzahl gekennzeichnet. Die eintretende Lichtmenge  $L$  ist reziprok zum Quadrat der Blendenzahl. Die Ursache ist die quadratische Flächenabnahme der Eintrittspupille bei Verminderung des Durchmessers:<sup>98</sup>

$$L \sim \frac{1}{k^2} \quad (4.4)$$

---

<sup>97</sup> Litfin (2005, 27)

<sup>98</sup> Litfin (2005, 34)

## 4.2.2 Optisches Auflösungsvermögen

Das *optische Auflösungsvermögen* wird beschrieben durch den Abstand, den zwei getrennte abzubildende Strukturen mindestens haben müssen, um im Bild noch als getrennt wahrgenommen zu werden.<sup>99</sup>

Ein hohes Auflösungsvermögen ist erstrebenswert, da so der normierte Bildmessfehler (vgl. Kap. 6.4) und damit der Pose-Messfehler eines CPMS gemindert wird (vgl. Kap. 7.6.12). Eingeschränkt wird das Auflösungsvermögen im Wesentlichen durch die Unschärfefaktoren Schärfentiefe und Beugungsunschärfe wobei letztere auch von der Wellenlänge der verwendeten Beleuchtung abhängt. Der Einfluss von Abbildungsfehlern (Aberrationen) ist bei Verwendung qualitativ hochwertiger Objektive und monochromatischer Lichtquellen dagegen gering, da die verursachten Unschärfen in der Regel unterhalb der physikalisch bedingten Beugungsunschärfe liegen (vgl. Kap. 4.2.6).

Es wird unterschieden in Absolut- und Winkelauflösungsvermögen. Das sog. *absolute Auflösungsvermögen*  $R_a$  hat die Einheit „Meter“ und bezieht sich auf minimale Strukturabstände in der Objektebene (also in Gegenstandsweite  $g$ ) zur Kamera. Es variiert also mit dem Objektabstand.

Zur Vermeidung der Abstandsabhängigkeit kann alternativ ein relatives *Winkelauflösungsvermögen*<sup>100</sup>  $R_r$  in Grad angegeben werden. Es beschreibt die minimale Winkeldifferenz zweier Strukturen zur optischen Kameraachse unter der noch eine Unterscheidung möglich ist. Die Umrechnung zwischen absoluter Auflösung und Winkelauflösung erfolgt trigonometrisch durch:

$$R_r = \arctan\left(\frac{R_a}{g}\right) \Leftrightarrow R_a = g \cdot \tan(R_r) \quad (4.5)$$

Das relative Auflösungsvermögen eines Objektivs muss bei digitalen Aufnahmesystemen sorgfältig auf die diskrete Pixelgröße des verwendeten Bildsensors abgestimmt werden. Übersteigt das optische Auflösungsvermögen dasjenige des Bildsensors, treten Alias-Artefakte durch Unterabtastung (auch als Moiré-Effekt bekannt) auf. Der Grund ist die Verletzung des Nyquist-Shannon-Abtasttheorems.<sup>101</sup> Beschränkt werden kann das Auflösungsvermögen eines Objektivs beispielsweise durch Wahl einer kleinen Blende unter Ausnutzung der dadurch verursachten Beugungsunschärfe (vgl. Kap. 4.2.4). Ein testmusterbasiertes Verfahren nach ISO 15775 zur Messung des Auflösungsvermögens wird in Anhang A.2 beschrieben.

<sup>99</sup> vgl. Löffler-Mang (2012, 65)

<sup>100</sup> vgl. Löffler-Mang (2012, 68)

<sup>101</sup> vgl. Schaeper (2014, 32), Kap. 4.3

### 4.2.3 Schärfentiefe

Die *Schärfentiefe* beschreibt den Abstandsbereich, innerhalb dessen bei der Abbildung eines Objektes auf der Bildebene ein vorgegebenes relatives Auflösungsvermögen nicht unterschritten wird.<sup>102</sup>

Eine Nachfokussierung des Objektivs nach Kalibrierung ist nicht zulässig. Dieser Vorgang würde die Kamerakonstante und damit den Abbildungsmaßstab verändern und so einen systematischen Skalierungsfehler nach sich ziehen (vgl. Kap. 5). Der Bereich ausreichender Schärfentiefe muss sich in der Praxis somit mindestens über den vollen Arbeitsabstandsbereich erstrecken (vgl. Kap. 4.1).

Einstellen lässt sich die Schärfentiefe, sofern ein fester Arbeitsabstandsbereich vorgegeben ist, nur durch Anpassung der Blendenöffnung. Diese muss zur Erhöhung des Schärfentiefebereichs verkleinert werden (größere Blendenzahl  $k$ ). Quadratisch zur Blendenzahl sinkt jedoch die verwertbare Lichtmenge bei gleichzeitiger Zunahme der Beugungsunschärfe. Zur Erzielung optimaler Ergebnisse müssen die Objektivparameter Brennweite und Blendenzahl sorgfältig aufeinander und auf den zu verwendenden Bildsensor abgestimmt werden (vgl. Kap. 4.7).

Abbildung 22 zeigt schematisch die Zusammenhänge und die Auswirkung unterschiedlicher Blendendurchmesser auf die Schärfentiefe. Der Objektpunkt P liegt exakt in der Objektebene (also in Gegenstandsweite). Die von ihm ausgehenden Strahlen werden vom Objektiv gerade so gebündelt, dass sie in einem Punkt auf der Bildebene zusammen fallen. Es entsteht eine scharfe Abbildung.

Die Punkte Q und R dagegen liegen außerhalb der Objektebene. Die von ihnen ausgehenden Strahlenbündel vereinen sich kurz vor bzw. hinter der Bildebene. Als Abbildung entsteht ein Kegelschnitt durch das Strahlenbündel der Projektion, der als *Zerstreuungskreis* bezeichnet wird.

---

<sup>102</sup> vgl. Haferkorn (2008, 562–573)

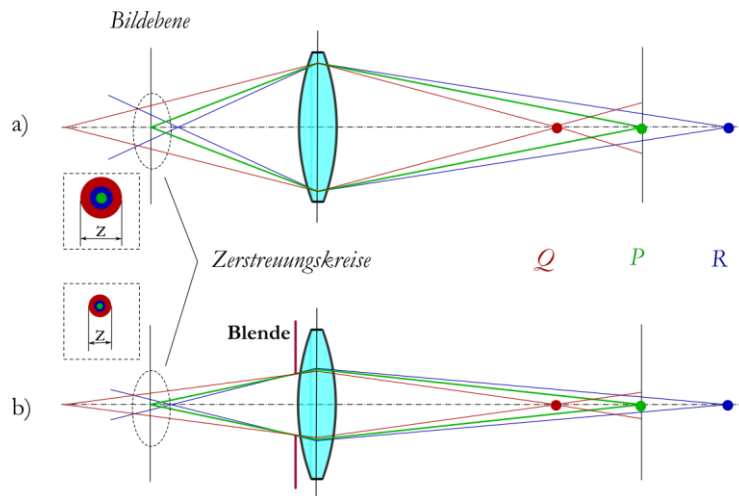


Abbildung 22: Schärfentiefe bei Abbildung unterschiedlich weit entfernter Objektpunkte ( $Q$ ,  $P$ ,  $R$ ) bei a) offener Blende und b) teilweise geschlossener Blende. Die von den Punkten  $Q$  und  $R$  vor bzw. hinter der Objektebene ausgehenden Lichtstrahlen vereinigen sich nicht in der Bildebene, die mit dem einfallenden Lichtbündel einen Kegelschnitt bildet. Es entstehen Zerstreungskreise mit Durchmesser  $\zeta$ .

Der Durchmesser  $\zeta$  des Zerstreungskreises ist abhängig von der Größe der Blendenöffnung. In Teil a) der Abbildung wird eine vollständig geöffnete Blende gezeigt, deren Öffnung nur durch die Größe der Objektivlinse beschränkt ist. Teil b) zeigt die Situation bei teilweise geschlossener Blende. Die Durchmesser  $\zeta$  der resultierenden Zerstreungskreise bei Abbildung der Punkte  $Q$  und  $R$  verringert sich aufgrund der nun weniger stark geöffneten Strahlenkegel.

Durch das Zulassen eines Zerstreungskreisdurchmessers  $\zeta > 0$  wird die Objektebene zu einem *Objektraum* erweitert. Begrenzt wird er durch den *Nahpunkt*  $d_n$  und den *Fernpunkt*  $d_f$ , welche diejenigen Entfernungen (vom Mittelpunkt der Hauptlinse) markieren, an denen der Zerstreungskreis eine vorgegebene Schranke überschreitet. Diese Schranke wird so gewählt, dass das zulässige Auflösungsvermögen nicht unterschritten wird. Der Raum zwischen Nahpunkt und Fernpunkt ist der Bereich ausreichender Schärfe oder auch *Schärfentiefebereich*. Dessen Ausdehnung  $\Delta_d$  entlang der optischen Achse ist die Differenz zwischen Fernpunkt und Nahpunkt:

$$\Delta_d = d_f - d_n \quad (4.6)$$

Der Schärfentiefebereich eines Objektivs kann nach Haferkorn<sup>103</sup> auf Basis der Objektivbrennweite  $f$ , der Blendenzahl  $k$ , der Gegenstandsweite  $g$  und des maximal zulässigen Zerstreungskreises  $\zeta$  berechnet werden. Dazu wird zunächst die *hyperfokale*

<sup>103</sup> Haferkorn (2008)



*Entfernung* bestimmt. Sie bezeichnet diejenige Gegenstandsweite, bei deren Fokussierung auch in unendlicher Entfernung liegende Punkte mit gerade noch akzeptabler Unschärfe abgebildet werden. Bestimmt wird sie nach folgender Formel:

$$d_h = \frac{f^2}{k \cdot z} + f = f \left( \frac{D}{z} + 1 \right) \text{ mit } D = \frac{f}{k} \text{ Eintrittspupille} \quad (4.7)$$

Nach Ermittlung der hyperfokalen Entfernung  $d_h$  können Nahpunkt  $d_n$  und Fernpunkt  $d_f$  berechnet werden:

$$\begin{aligned} d_n &= \frac{g \cdot (d_h - f)}{(d_h - f) + (g - f)} = \frac{g \cdot (d_h - f)}{d_h - 2f + g} \\ d_f &= \frac{g \cdot (d_h - f)}{(d_h - f) + (f - g)} = \frac{g \cdot (d_h - f)}{d_h - g} \end{aligned} \quad (4.8)$$

Anhand dieser Formeln ist es nun möglich, den Arbeitsbereich einer Kamera unter Vorgabe eines minimalen Auflösungsvermögens zu bestimmen.

Durch Manipulation der Objektivparameter Brennweite und Blendenzahl kann der Schärfentiefebereich variiert werden. Da die Brennweite den Abbildungsmaßstab und die Blendenzahl die eintretende Lichtmenge beeinflusst, müssen bei Einstellung zahlreiche Randbedingungen beachtet werden.

#### 4.2.4 Beugungsunschärfe

*Beugungsunschärfe* bezeichnet die Schärfeminderung einer optischen Abbildung durch Beugung (Refraktion) an der Objektivblende.<sup>104</sup> Sie stellt eine physikalisch bedingte Beschränkung des Auflösungsvermögens dar. Die Unschärfe steigt durch dieses wellenoptische Phänomen mit kleiner werdender Blendenöffnung (steigender Blendenzahl  $k$ ) an, so dass eine geringe Beugungsunschärfe im Widerspruch zu großer Schärfentiefe steht (vgl. Kap. 4.2.3). Es muss also ein Kompromiss zwischen ausreichender Schärfentiefe und Beugungsunschärfe gefunden werden, auch *kritische Blende* genannt. Es handelt sich hier um diejenige Blendeneinstellung, die das beste Auflösungsvermögen realisiert.

Beim Eintritt einer monochromatischen Wellenfront durch die Kreisblende eines Objektivs wird das Licht gebeugt. Dadurch entsteht auf der Bildebene statt der erwarteten punktförmigen Abbildung ein sog. Beugungsbild aus konzentrischen Kreisen mit mehreren Maxima und Minima.

Das physikalische Modell der Beugung ist das Huygens-Fresnelsche Prinzip. Zur Berechnung von Beugungsbildern wird das kirchhoffsche Beugungsintegral verwendet, das als Grenzfall die *Fraunhofer-Beugung* beinhaltet, die eine zulässige Näherung

<sup>104</sup> vgl. Löffler-Mang (2012, 50)

für den Fall einer zur Bildweite kleinen Blendenöffnung darstellt.<sup>105</sup> Die Lichtverteilung  $I$  hinter einer monochromatisch beleuchteten Kreisblende in Abhängigkeit vom Abstand  $r$  zur Mittelachse des Beugungsscheibchens, folgt der Funktion:

$$I(r) = I_0 \left( \frac{J_1(2\pi r)}{\pi r} \right)^2 \quad (4.9)$$

Dabei ist  $J_1$  die Bessel-Funktion erster Gattung, erster Art.<sup>106</sup>

Abbildung 23 a) zeigt die typische periodische Intensitätsverteilung mit den nach außen hin schwächer werdenden Nebenmaxima des Beugungsbildes. In Teil b) der Abbildung ist ein Plot der Bessel-Funktion  $J_1$  zu sehen, deren erste Nullstelle das zentrale Beugungsscheibchen begrenzt.

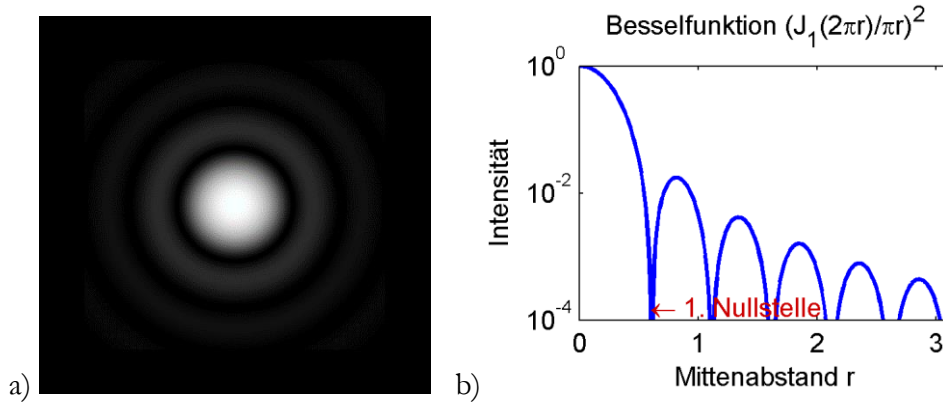


Abbildung 23: a) Beugungsbild hinter einer kreisförmigen Blende, b) die Intensität des gebeugten Lichts kann mit der Besselfunktion  $J_1$  beschrieben werden, deren erste Nullstelle das zentrale Beugungsscheibchen begrenzt.

Zur Ermittlung des Einflusses der Beugung auf die Auflösung wird nur die *zentrale Beugungsscheibe* (auch Airy-Scheibchen genannt) betrachtet, die Intensität der schwächeren Nebenmaxima liegt um mehr als eine Größenordnung niedriger, so dass ihr Einfluss vernachlässigbar ist.

Nach dem *Raileigh-Kriterium*<sup>107</sup> lassen sich zwei Punkte sicher trennen, wenn die Maxima ihrer Abbilder mindestens um den Radius  $r$  ihrer zentralen Beugungsscheibchen auseinander liegen. Für eine gegebene Blendenzahl  $k$  und einer maximalen Beleuchtungswellenlänge  $\lambda$  kann das beugungsbedingte Auflösungsvermögen  $R_{b,r}$  berechnet werden:

<sup>105</sup> vgl. Litfin (2005, 49)

<sup>106</sup> vgl. Litfin (2005, 54)

<sup>107</sup> vgl. Jähne (2012, 107), Litfin (2005, 54)

$$R_{B,r} \approx 1,22\lambda k = 1,22\lambda \frac{f}{D} \quad (4.10)$$

Eine Verkleinerung von  $R_{B,r}$  kann nur durch einen größeren Blendendurchmesser  $D$  unter Verlust von Schärfentiefe oder durch Verwendung einer Lichtquelle kürzerer Wellenlänge  $\lambda$  erreicht werden.

Zur Vermeidung von Aliaseffekten aufgrund von Unterabtastung bei Verwendung digitaler Bildsensoren ist es notwendig, die Auflösung beugungsbedingt (durch Blendenwahl) so zu begrenzen, dass die kleinste auflösbare Struktur mindestens zweimal pro Periode abgetastet wird. Bei einer Pixelgröße  $S_p$  und der Beleuchtungswellenlänge  $\lambda$  kann dies z.B. nach Jähne<sup>108</sup> sicher erreicht werden durch Wahl einer Blende  $k$  mit:

$$k > \frac{2S_p}{\lambda} \quad (4.11)$$

Bei Beachtung dieses Kriteriums ergibt sich für einen vorgegebenen Bildsensor mit der Pixelgröße  $S_p$  eine von  $\lambda$  abhängige Blendeneinstellung  $k$  und in Folge davon, durch Einsetzen von Gl. (4.11) in Gl. (4.10), eine sensorbedingte (bestmögliche) Auflösung von  $R_{B,r}=2,44S_p$ .

Wird das Kriterium aus Gl. (4.11) übererfüllt und  $k$  z.B. zur Erhöhung der Schärfentiefe weiter verkleinert, so kann beugungsbedingt das Auflösungsvermögen des Sensors nicht mehr voll ausgeschöpft werden. Dieses Problem kann umgangen werden, wenn stattdessen die Beleuchtungswellenlänge  $\lambda$  verringert wird.

#### 4.2.5 Zusammenhang: Objektstrahlungsdichte und Bildhelligkeit

Nur ein kleiner Teil der von einem Objekt abgegebenen Strahlung wird von einem optischen System aufgenommen und steht für die Generierung des Abbildes bereit.

Unter der Annahme, dass das abzubildende Objekt ein homogener Lambertscher Strahler mit der Strahlungsdichte  $L$  sei (für eine mattierte Zielmarke trifft dies annähernd zu), berechnet sich die zugehörige Bestrahlungsstärke  $E'$  der Bildebene nach folgender Gleichung<sup>109</sup>:

$$E' = t\pi \frac{\cos^4 \theta}{4k^2(1+m_l)^2} L \quad (4.12)$$

$\theta$  beschreibt den Winkel zwischen optischer Achse und Objektmitte,  $k$  ist die Blendenzahl und  $m_l$  ist der (laterale) Abbildungsmaßstab der nach Gl. (4.2) berechnet

<sup>108</sup> vgl. Jähne (2012, 159)

<sup>109</sup> vgl. Jähne (2012, 99), (Gl. 3.40)

werden kann. Die Transmissivität  $t$  beschreibt die Lichtdurchlässigkeit des optischen Systems, die von Eigenschaften (Vergütung etc.) der optischen Elemente abhängt und bei üblichen Objektiven etwa 70% beträgt.

Abbildung 24 zeigt die Abbildung einer von der Objektfläche  $A$  remittierten Leuchtdichte  $L$  unter einem mittleren Bildwinkel  $\theta$  auf der Bildfläche  $A'$ .

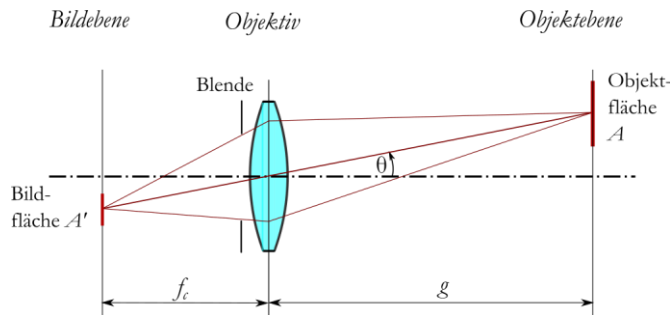


Abbildung 24: Abbildung einer von der Objektfläche  $A$  remittierten Leuchtdichte  $L$  unter einem mittleren Bildwinkel  $\theta$  auf der Bildfläche  $A'$ .

Der laterale Abbildungsmaßstab  $m_l$  ist bei typischen Abbildungssystemen sehr klein, beispielsweise 0,01 für einen Abstand von  $g=1200\text{mm}$  und eine Bildweite von  $12\text{mm}$ . Die Auswirkung des Abbildungsmaßstabs in Form des Terms  $(1+m_l)^2$  in Gl. (4.12) ist daher äußerst gering. Indirekt können jedoch für kleine Abbildungsmaßstäbe und den damit verbundenen kürzeren Brennweiten, Objektive mit kleineren Blendenzahlen aufgebaut werden.

Die Blendenzahl  $k$  wirkt sich erheblich auf die Bildhelligkeit aus, da sie quadratisch eingeht und typischerweise in einem Bereich von z.B.  $1,4 < k < 16$  eingestellt werden kann. Die Minderung der Bestrahlungsstärke  $E'$  zwischen größter und kleinster Blende beträgt hier  $(16-1,4)^2$ , entsprechend einem Faktor 213.

Der Kosinus des Winkels  $\theta$  geht in vierter Potenz ein, was einen deutlichen Helligkeitsabfall zum Rand hin verursachen kann. Bei einem Bildwinkel von  $36^\circ$ , entsprechend einer üblichen Kamera mit 12mm Objektiv und 8mm Bildsensor, entspricht der Helligkeitsabfall bereits etwa 19%. Hier kann insbesondere bei großflächig abgebildeten Zielmarken ein systematischer Fehler in der subpixelgenauen Bildmessung verursacht werden, der durch geeignete Maßnahmen kompensiert werden muss (vgl. Kap. 5.4).

Zusammengefasst ist die Blendenzahl  $k$  der ausschlaggebende Faktor, der die Beleuchtungsstärke  $E'$  und damit die Bildhelligkeit beeinflusst, während besonders bei großen Bildwinkeln (kleine Bildweite  $f_c$ ) eine Inhomogenität der Belichtung eintreten kann. Weiter können für kleine Abbildungsmaßstäbe, bei gleichem Durchmesser der Eintrittspupille, Objektive mit niedrigeren Blendenzahlen und damit höherer Lichtausbeute konstruiert werden.

#### 4.2.6 Abbildungsfehler

Als *Abbildungsfehler* (Aberrationen) werden Abweichungen von der optimalen Abbildung durch ein optisches System bezeichnet, die sich in Form von Bildverzeichnungen oder Unschärfe bemerkbar machen.

Durch Einsatz monochromatischer Beleuchtung bei Konstruktion eines CPMS, treten keine *chromatischen Abbildungsfehler* auf, deren Korrektur im Objektiv besonders problematisch wäre. Bei hochwertigen Objektiven wird der Abbildungsfehler in der Regel soweit konstruktiv minimiert, dass bei monochromatischen Anwendungen lediglich die Beugungsunschärfe das Auflösungsvermögen beschränkt.<sup>110</sup>

Zu den monochromatischen Schärfe Fehlern gehören die *Sphärische Aberration*, *Astigmatismus* und die *Bildfeldwölbung*, die alle konstruktiv gut eliminiert werden können und hier nur am Rande erwähnt werden. *Sphärische Aberration* bewirkt, dass achsparallel einfallende Lichtstrahlen nach ihrer Bündelung durch das Objektiv nicht die gleiche Schnittweite haben. *Astigmatismus* bewirkt eine unzulässige Brennweitenvariation für ein von einem Objektpunkt ausgehendes und schräg einfallendes Strahlenbündel. Bei einer vorhandenen *Bildfeldwölbung* wird das Bild nicht in einer Ebene, sondern einer gewölbten Fläche erzeugt. Daraus resultiert, dass das Bild nicht mehr über die gesamte Fläche scharf gestellt werden kann und entweder in der Mitte oder am Rand ein unscharfer Bereich verbleibt. Der Fehler wird durch spezielle Anordnung der Einzellinsen des Objektivs minimiert.<sup>111</sup>

Als *Verzeichnung* bezeichnet man geometrische Fehler eines Objektivs, die zu einer lokalen Veränderung des Abbildungsmaßstabs führen. Ein Bildpunkt wird hier von seiner korrekten Position mit wachsendem Abstand zur Bildmitte immer weiter nach außen (kissenförmige Verzeichnung) oder innen (tonnenförmige Verzeichnung) verschoben. Es können darüber hinaus Verzeichnungen höherer Ordnung auftreten, die sich anhand einer wellenförmigen Verzerrung gerader Linien bemerkbar machen.<sup>112</sup>

Abbildung 25 zeigt beispielhaft die Auswirkung von Kissen- und Tonnenförmiger Verzeichnung bei Aufnahme eines gleichmäßigen Gitters.

---

<sup>110</sup> vgl. Litfin (2005, 69)

<sup>111</sup> vgl. Litfin (2005, 73–76)

<sup>112</sup> vgl. Litfin (2005, 77–78)

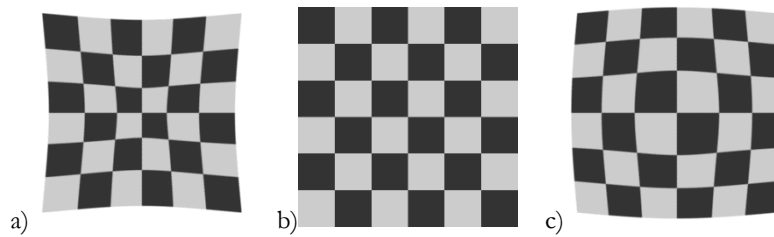


Abbildung 25: a) Kissen- und c) Tonnenförmige Verzeichnung eines gleichförmigen Gitters b) bei Objektiven mit radialer Verzeichnung.

Monochromatische Schärfefehler bewirken durch ihre symmetrieeigenschaften keine systematischen Bildmessfehler und fallen bei Qualitätsobjektiven unter die Beugungsunschärfe der Blende, weshalb sie meist vernachlässigt werden können. Dagegen stellen Verzeichnungsfehler ein Problem dar, weil sie eine Verschiebung der gemessenen Bildkoordinate (z.B. nach innen oder außen) bewirken (vgl. Kap. 5.3). Daher muss die Objektivverzeichnung modelliert und im Rahmen einer Kamerakalibrierung kompensiert werden (vgl. Kap. 6.2).

### 4.3 Eigenschaften von digitalen Bildsensoren

Ein *Bildsensor* konvertiert ein „Bild“ in einen digitalen (quantisierten) Datenstrom. Dieses Bild entsteht durch eine räumlich kontinuierlich variierende Bestrahlung der Bildebene über ein optisches Abbildungssystem.<sup>113</sup> Neben dem Objektiv stellt damit der Bildsensor den zweiten wichtigen Teil eines Bildaufnahmesystems dar, dessen Bildqualität und Auflösungsvermögen er maßgeblich mit beeinflusst.

#### 4.3.1 Funktionsprinzip

Bildsensoren in Videoaufnahmesystemen für den sichtbaren und nahen Infrarot- bzw. UV-Wellenlängenbereich werden heute auf der Basis von Siliziumhalbleitern realisiert. Sie bestehen aus einer Matrix lichtempfindlicher Elemente, den sog. Bildelementen (engl. Picture Element oder kurz Pixel). Ihre Funktion basiert auf dem inneren Fotoeffekt, bei dem einfallende Lichtquanten an einem P/N-Übergang eines dotierten Siliziumkristalls Elektronen auslösen. Diese werden über einen definierten Belichtungszeitraum im Bildelement akkumuliert, anschließend abgeleitet, verstärkt und mittels eines Analog-Digital-Wandlers quantifiziert und digitalisiert.<sup>114</sup>

<sup>113</sup> vgl. Jähne (2012, 185)

<sup>114</sup> vgl. Löffler-Mang (2012, 127), Litfin (2005, 200)

### 4.3.2 Fehler bei der Bildwandlung

Algorithmen zur Bildmessung gehen im Allgemeinen von einer idealen radiometrischen Bildwandlung aus und reagieren auf Abweichungen von diesem internen Modell mit erhöhten Bildmessfehlern (vgl. Kap. 5.3). Die Modellvorstellung ist in der Praxis nur näherungsweise zu erfüllen. Bei realen Sensoren treten Abweichungen, z.B. durch Bildrauschen oder Helligkeitsvariation auf.

Ein Bildsensor besteht aus einer Reihe von *Bildelementen* (Pixeln), die in einem Raster angeordnet sind (Pixelarray). Unterschieden werden stochastische (zeitlich variante) Fehler und systematische Fehler die teils durch Kalibrierung eliminiert werden können. Unterscheiden sich weiter die Eigenschaften der Bildelemente untereinander, spricht man von räumlichen Inhomogenitäten des Pixelarrays.

Der stochastische Fehler setzt sich im Wesentlichen aus zwei Komponenten zusammen. Bei abgedunkelten Bildelementen kann ein sog. *Dunkelstrom* beobachtet werden. Er stellt eine stark temperaturabhängige stochastische Größe dar. Für lange Belichtungszeiten wird durch die Akkumulierung in Bildelement der Mittelwert des Dunkelstroms gebildet, der damit in einen systematischen Fehler übergeht. Moderne Industriekameras eliminieren einen Großteil dieses systematischen Anteils durch Messung des Dunkelstroms in einer Reihe abgedeckter „Randpixel“.<sup>115</sup>

Ein weiterer Teil des Bildrauschens wird durch ein quantenphysikalisches Phänomen verursacht. Ein Photon wird nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit im Sensor in ein messbares Elektron gewandelt. Je mehr Photonen gewandelt werden, desto geringer ist das Rauschen aufgrund der Mittelwertbildung bei ihrer Zählung. Damit sinkt dieser Rauschterm mit steigender Kameraaussteuerung (vgl. Kap. 4.3.3). Das Bildrauschen geht bei der Bildmessung in einen stochastischen Bildmessfehler über und sollte daher soweit möglich vermieden werden. Verbleibendes Rauschen lässt sich durch Vermittlung über mehrere Messpunkte reduzieren (vgl. Kap. 5.3.3).

Die Bildelemente einer Kamera sind in der Praxis räumlich inhomogen und unterscheiden sich in bestimmten Eigenschaften wie *Dunkelwert* (engl. Dark Signal Nonuniformity oder DSNU), Empfindlichkeit (engl. Photo Response Nonuniformity oder PRNU) und *Dunkelstrom* (engl. Dark Current Nonuniformity oder DCNU). Diese Inhomogenitäten sind weitgehend systematisch und können nur durch eine relativ aufwendige photometrische Kalibrierung korrigiert werden.<sup>116</sup>

Eine systematische räumliche Inhomogenität führt zu einem systematischen Bildmessfehler (vgl. Kap. 5.3.5), der sich dazu wesentlich gravierender auswirkt als stochastisches Bildrauschen. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass die Mittelwertbildung über eine Reihe von Messpunkten bei Vorliegen einer Systematik ihre Wirkung verliert.

---

<sup>115</sup> vgl. Jähne (2012, 214)

<sup>116</sup> vgl. Jähne (2012, 215)

Ein ähnlicher Effekt ist zu beobachten, wenn ein Sensor eine nicht-lineare Übertragungsfunktion zwischen Bestrahlungsintensität und den zugeordneten digitalen Pixelwerten aufweist. Analog zur Inhomogenität entsteht hier ein systematischer Bildmessfehler bei Antastung unsymmetrischer Messmarken wie z.B. einer Objektkante (vgl. 5.3.4).

Wird ein Bildsensor außerhalb vorgegebener Parameter betrieben, z.B. durch eine zu hohe Aussteuerung, so treten weitere (in der Praxis leicht vermeidbare) Fehler, wie z.B. das sog. Blooming bei CCD-Bildsensoren auf. Hierbei tritt Ladung in benachbarte Bildelemente über. Aber auch bei annähernder Vollaussteuerung wird unter Umständen bereits ein nicht-linearer Kennlinienbereich erreicht. Fehler dieser Art sind vermeidbar, wenn der Sensor z.B. nur zu max. 90% angesteuert wird.<sup>117</sup>

Zusammengefasst: Eine optimale Bildmessung ist mit einem Bildsensor zu erreichen, der sich durch geringes Rauschen und Abwesenheit systematischer Fehler auszeichnet. Sind bei einem eingesetzten Sensortyp dennoch systematische Fehler vorhanden, müssen diese durch eine photometrische Kalibrierung eliminiert werden. Das Simulationsmodell des Bildsensors kann entsprechend auf stochastische Fehler beschränkt werden. Tendenziell eignen sich zum heutigen Zeitpunkt *CCD-Sensoren* aufgrund prinzipbedingt homogenerer Eigenschaften der Sensorzellen für eine Lokalisierung von Messmarken besser, als sog. *aktive Pixel-Sensoren*, die für jede Sensorzelle ein eigenes Verstärkerelement enthalten (vgl. Anhang A.3).

### 4.3.3 Lichtempfindlichkeit und Aussteuerung

Um die zur Aussteuerung eines Bildsensors erforderliche Bestrahlungsstärke und später die Strahlleistung der Beleuchtung zu ermitteln, sollen einige wichtige Zusammenhänge erarbeitet werden.

Die Empfindlichkeit eines Bildsensors beschreibt dessen Fähigkeit, eine Bestrahlung (in Form eines Photonenflusses) in einen Elektronenstrom zu wandeln, der im Potentialtopf des lichtempfindlichen Bildelements gesammelt und nach der Belichtungsperiode ausgewertet wird. Jedes Bildelement (Pixel) integriert dabei die Bestrahlungsstärke über den lichtempfindlichen Teil seiner Fläche und die Dauer der Belichtung.<sup>118</sup>

Die Anzahl der Photonen, die bei einer Bestrahlungsstärke  $E$  auf der Fläche  $A$  eines Bildelementes während einer Belichtungszeit  $t_{exp}$  auftreffen, kann berechnet werden durch:

$$N_p = \frac{AEt_{exp}}{hc / \lambda} \quad (4.13)$$

---

<sup>117</sup> vgl. Jähne (2012, 200)

<sup>118</sup> vgl. Jähne (2012, 186)



Durch Einsetzen des Planckschen Wirkungsquantums  $h$  und der Lichtgeschwindigkeit  $c$  ergibt sich für die Photonenzahl<sup>119</sup>:

$$N_p[\text{photonen}] = 5,035 \cdot 10^{24} \cdot A[m^2] \cdot t_{\text{exp}}[s] \cdot \lambda[m] \cdot E[\frac{W}{m^2}] \quad (4.14)$$

Die Fähigkeit, einen Photonenfluss in einen Elektronenfluss zu wandeln, wird durch die sog. *Quantenausbeute* beschrieben, die eine wellenlängenabhängige Größe darstellt. Wenn während einer Belichtung  $N_p$  Photonen ein Bildelement erreichen, so wird davon im Mittel ein Bruchteil  $\eta(\lambda)$  in  $N_e$  elektrische Elementarladungen umgewandelt<sup>120</sup>:

$$\eta(\lambda) = \frac{N_e}{N_p} \quad (4.15)$$

Da es sich bei dieser Beziehung um einen statistischen Zusammenhang handelt, ist die tatsächliche Anzahl  $N_e$  der gewandelten Ladungen mit einem Rauschen belegt, dessen Fluktuation nach den Gesetzen der Quantenmechanik der Poisson-Verteilung folgt. Varianz und Standardabweichung sind gegeben durch<sup>121</sup>:

$$\sigma_e^2 = N_e \rightarrow \sigma_e = \sqrt{N_e} \quad (4.16)$$

Daraus folgt ein Signal-/Rauschverhältnis

$$\text{SNR}_N = N / \sqrt{N} \quad (4.17)$$

eines (idealen) Bildsensors, das umso besser ausfällt, je mehr Photonen in einer Belichtungsperiode gewandelt werden.

Für einen realen Bildsensor sind der Anzahl der Ladungen, die in einem Pixel gespeichert werden können (engl. *full-well-capacity*), und damit dem erzielbaren Signal-Rausch-Abstand Grenzen gesetzt. Es kann aber festgehalten werden, dass sich für einen Bildsensor das bestmögliche SNR einstellt, wenn die Kapazität voll genutzt wird, der Sensor also voll angesteuert wird.

Die für die Aussteuerung erforderliche Bestrahlung  $H$  bei einer Wellenlänge  $\lambda$  kann auf Basis der „full well capacity“  $Q$  berechnet werden.

---

<sup>119</sup> vgl. Jähne (2012, 190)

<sup>120</sup> vgl. Jähne (2012, 189)

<sup>121</sup> vgl. Jähne (2012, 42)

Dazu wird zunächst eine zur Quantenausbeute äquivalente Größe  $R$  eingeführt, welche die Empfindlichkeit als Verhältnis des elektrischen Stromes  $I$  zur Strahlungsleistung  $\phi$  definiert.  $R = \frac{I}{\phi} \left[ \frac{A}{W} \right]$

Die Berechnung aus der Quantenausbeute erfolgt unter Verwendung der Elementarladung  $e$  durch<sup>122</sup>:

$$R(\lambda) = \frac{I}{\phi_e} = \eta(\lambda) \frac{e}{hc} \lambda \approx 0,8066 \cdot \eta(\lambda) \cdot \lambda \left[ \frac{A}{W} \right] \quad (4.18)$$

Zur Berechnung der im Pixel akkumulierten Ladung wird über die Belichtungszeit  $t_{exp}$  integriert. Anschließend kann die Gleichung zur Berechnung der erforderlichen Bestrahlungsstärke nach  $E$  umgestellt werden:

$$Q = \eta(\lambda) \frac{e}{hc} \lambda \cdot E \cdot A \cdot t_{exp} [C] \Leftrightarrow$$

$$E = \frac{Q \cdot hc}{\eta(\lambda) \cdot e \cdot \lambda \cdot A \cdot t_{exp}} \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (4.19)$$

Für den Bildsensor *Sony ICX274*<sup>123</sup> mit einer Kapazität von  $Q=5.500e$  ergibt sich im Empfindlichkeitsmaximum bei einer Wellenlänge von  $500nm$  eine Quantenausbeute von ca. 70%. Die Pixelgröße beträgt  $A=(4,4\mu m)^2$ . Bei einer Belichtungszeit von  $t_{exp}=100ms$  ergibt sich für eine volle Aussteuerung dieses Sensors nach Gl. (4.19) eine Bestrahlungsstärke von  $1,61mWm^{-2}$ . Im Blitzbetrieb verringert sich die Belichtungszeit auf  $t_{exp}=1ms$ . Um die gleiche Aussteuerung zu erhalten, kann die Bestrahlungsleistung reziprok auf  $161mWm^{-2}$  erhöht werden.

Der Zusammenhang zwischen Objekt-Leuchtdichte und Bestrahlungsstärke über das optische Abbildungssystem wurde bereits in Kap. 4.2.5 erläutert und durch Gl. (4.12) beschrieben. Die obige Beziehung kann so zur Berechnung der Strahlleistung der Lichtquelle erweitert werden (vgl. Kap. 4.5.4).

#### 4.3.4 Modellierung eines Bildsensors

Für die Weiterentwicklung der Bildmessung (vgl. Kap. 5) soll neben dem Abbildungssystem und der Beleuchtung des Bildaufnahmesystems das Verhalten des Bildsensors bei der Bildaufnahme simuliert werden.

<sup>122</sup> vgl. Jähne (2012, 191)

<sup>123</sup> vgl. Sony Inc. (2014)

Ein digitaler Bildsensor wandelt die einfallende Strahlungsenergie in elektrische Ladung, die verstärkt und in einem Analog-Digital-Wandler quantifiziert und so in einen digitalen Helligkeitswert  $g$  umgesetzt wird. Die in einem Bildelement eingefangene Photonenzahl  $N_p$  ist dabei dem Produkt aus Bestrahlungsstärke, Pixelfläche und Belichtungszeit proportional.

Zur Vereinfachung wird angenommen, dass alle Bildelemente gleiche Eigenschaften haben und eine Kamera nur im linearen Bereich ihrer Übertragungskennlinie betrieben wird, also nicht über- oder untersteuert wird. In diesem Fall können Rauschquellen, die an verschiedenen Stellen der Verarbeitungskette auftreten, auf die gleiche Art und Weise verstärkt werden wie das Signal selbst. Dadurch können sie in einem Rauschterm am Eingang der Verarbeitungskette zusammengefasst werden. Einzige Ausnahme ist das Quantisierungsrauschen des A/D-Wandlers, das aufgrund seiner nicht-linearen Eigenschaften weiter an der Stelle des Auftretens behandelt werden muss.<sup>124</sup>

Betrachtet man zunächst die Mittelwerte (unter Vernachlässigung des Rauschens), so kann eine Kamera als lineare Funktion modelliert werden. Der von ihr ausgegebene digitale Grauwert  $g$  ist die Summe aus dem Dunkelwert  $g_0$  und dem Produkt aus einer Systemverstärkung  $k$  und der Anzahl  $N_e$  der in einem Pixel akkumulierten Elektronen. Durch Definition einer von der Quantenausbeute abhängigen Systemverstärkung  $k_\eta$  wird die Beziehung auf den Photoneneinfall  $N_p$  erweitert:

$$g = g_0 + k \cdot N_e = g_0 + k_\eta \cdot N_p \quad (4.20)$$

Der Dunkelwert  $g_0$  wird durch den sog. *Dunkelstrom*<sup>125</sup> durch thermisch induzierte Elektronen verursacht und tritt unabhängig von der Belichtung auf.

Der Dunkelwert  $g_0$  und die Systemverstärkung  $k_\eta$  einer realen Kamera für eine monochromatische Beleuchtung mit Wellenlänge  $\lambda$  können durch definierte Bestrahlung des Sensors mit einer kalibrierten Lichtquelle ermittelt werden.

Im nächsten Schritt werden die unterschiedlichen Rauschquellen modelliert und als Varianz des Grauwertes  $\sigma_g^2$  formuliert. Eine physikalische Quelle ist das Rauschen der photoinduzierten Elektronen in der ersten Stufe der Bildwandlung. Es folgt, wie bereits im letzten Abschnitt beschrieben, einer Poisson-Verteilung mit einer Varianz  $\sigma_e^2 = N_e$ , die gerade der Anzahl der im Mittel gewandelten Elektronen entspricht (vgl. Gl. (4.16), Kap. 4.3.3).

Weitere Rauschquellen wie Auslese- und Verstärkerrauschen stellen spezifische Eigenschaften der Kamera dar. Sie können zusammengefasst und als zusätzliche Rauschquelle mit Varianz  $\sigma_d^2$  (unter Beachtung der Systemverstärkung  $k$ ) am den Eingang verschoben werden. Einzig das Quantisierungs-Pseudoräuschen des ADC muss

---

<sup>124</sup> vgl. Jähne (2012, 207)

<sup>125</sup> vgl. Jähne (2012, 197)

getrennt am Ort seiner Entstehung behandelt werden. Seine Varianz beträgt  $\sigma_q^2 = 1/12 \cdot \Delta g^2$  für eine äquidistante (lineare) Quantisierung mit der Schrittweite  $\Delta g$ .<sup>126</sup>

Nach den Gesetzen der Fehlerfortpflanzung, überträgt sich eine Varianz am Eingang mit dem Quadrat der Systemverstärkung  $k$  auf den Ausgang. Mit dem zusätzlichen Quantisierungsrauschen ergibt sich damit eine Varianz des Grauwertes  $g$  von<sup>127</sup>:

$$\sigma_g^2 = k^2(\sigma_d^2 + \sigma_e^2) + \sigma_q^2 = k^2(\sigma_d^2 + N_e) + \sigma_q^2 \quad (4.21)$$

Die Gleichungen (4.20) und (4.21) beschreiben zusammen das Übertragungs- und Rauschverhalten eines digitalen Bildaufnahmesystems und stellen für den normalen (linearen) Betriebsfall ein realitätsnahes Modell dar.

Die spezifischen Modellparameter (Systemverstärkung  $k$ , Dunkelwert und Dunkelrauschen), die Systemeigenschaften charakterisieren und nicht physikalisch gegeben sind, können für die Modellierung einer realen Kamera deren Datenblatt entnommen werden. Es existieren jedoch auch sog. Blackbox-Verfahren wie die *Photon-transfer-Methode*<sup>128</sup>, die eine messtechnische Charakterisierung einer unbekannteren Kamera ermöglichen.

#### 4.4 Auswahl und Untersuchung einer Versuchs-Kamera

Wie in Kap. 4.1 beschrieben, sind die Anforderungen an eine geeignete Kamera eine hohe Bildauflösung, bei ausreichender Bildrate und linearem und räumlich homogenem Verhalten der lichtempfindlichen Bildelemente.

Einen guten Kompromiss aus erzielbarer Auflösung und Bildrate stellt der Sony ICX274 CCD-Bildsensor dar. Er wird in Industriekameras zahlreicher Hersteller verwendet. Eingesetzt wird die Kamera des Typs DMK23G274 (vgl. Kap. 4.4.1), deren Eigenschaften hier die Grundlage für das Simulationsmodell bilden sollen.

Da neben dem Bildsensor die in dieser Kamera eingesetzten Verstärker und A/D-Wandler Einfluss auf das Rauschverhalten und die Linearität des Bildaufnahmesystems haben können, dürfen die Modellparameter nicht „blind“ aus dem Datenblatt des Sensors abgeleitet werden. Rauschverhalten und Linearität der Kamera werden daher experimentell geprüft, um später möglichst realitätsnahe Simulationsergebnisse zu erhalten (vgl. Kap. 4.4.2 u. 4.4.3).

---

<sup>126</sup> vgl. Jähne (2012, 160), Gl. (5.26)

<sup>127</sup> vgl. Jähne (2012, 209), Gl. (6.17)

<sup>128</sup> Janesick (1985)

#### 4.4.1 Eigenschaften der DMK23G274 Kamera

Die monochrome Industriekamera *DMK23G274*<sup>129</sup> des Herstellers *The Imaging Source* basiert auf dem *Sony ICX274 CCD-Bildsensor*<sup>130</sup>. Die Bilddigitalisierung erfolgt durch einen 12-bit Analog-Digital-Wandler. Die anfallenden Daten werden im internen Signalprozessor der Kamera vorverarbeitet und über die standardisierte GigE-Vision<sup>131</sup> Video Schnittstelle an das angeschlossene Bildverarbeitungssystem übertragen. Dabei erfolgt die Datenübertragung über Standard Gigabit-Ethernet Infrastrukturen mit einer Bandbreite von bis zu 1 Gigabit, was den parallelen Betrieb von bis zu drei Kameras an einer Rechnerschnittstelle über einen Ethernet-Switch ermöglicht. Softwareseitig erfolgt die Bildaufnahme und Kamerasteuerung im GenICAM (Generic Interface for Cameras)<sup>132</sup> Standard, einer generalisierten Softwareschnittstelle, die eine weitgehend von der Kamerahardware unabhängige Softwareentwicklung zulässt.

Der verwendete ICX274 Bildsensor ist ein Interlinetransfer-CCD mit elektronischem Verschluss. Seine mechanische Größe beträgt  $(8,5 \times 6,8)\text{mm}^2$  bei einer effektiven Bildgröße von  $1600 \times 1200$  Pixel. Breite und Höhe eines Pixels betragen  $4,4\mu\text{m}$ <sup>133</sup>. Das Maximum der spektralen Empfindlichkeit liegt CCD-typisch bei 500nm Wellenlänge und fällt bei 400nm respektive 700nm auf ca. 50% ab.

Die Kamera realisiert bei maximaler Auflösung eine Bildrate von bis zu 20Hz. Die Belichtungszeit kann durch den elektronischen Verschluss auf minimal  $10\mu\text{s}$  reduziert werden, um z.B. Bewegungsunschärfe zu minimieren. Zur Synchronisation mit der Beleuchtungseinheit und anderen Kameras sind Trigger Ein- und Ausgänge vorhanden.

Abbildung 26 zeigt die Kamera mit geöffnetem Gehäuse und den in „Sandwichbauweise“ angeordneten Signalverarbeitungselektronik. Der Bildsensor ist in einen Aluminiumblock eingepasst der gleichzeitig das Objektiv aufnimmt und später fest mit dem Kameraträger verschraubt wird. Der Block sorgt auch für eine gute Wärmestabilisierung, was sich in konstanteren Eigenschaften ausdrückt.

---

<sup>129</sup> The Imaging Source GmbH (2014)

<sup>130</sup> Sony Inc. (2014)

<sup>131</sup> *Automated Imaging Association*

<sup>132</sup> *European Machine Vision Association*

<sup>133</sup> Der ICX274 enthält im Randbereich zu Kalibrierzwecken abgedunkelte Pixel, wodurch die Pixelgröße nicht durch Teilen der Sensorgröße durch die Bildgröße erfolgen kann.

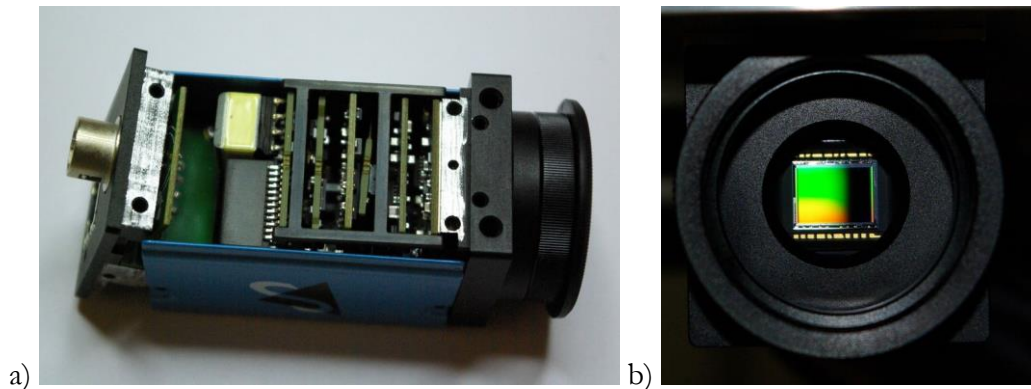


Abbildung 26: a) Geöffnete DMK23G274 Kamera mit b) dem Sony ICX274 Bildsensor.

#### 4.4.2 Überprüfung der Linearität

Die Linearität einer Kamera hängt sowohl vom verwendeten Bildsensor als auch von der vom Hersteller verbauten Verstärker und Wandlerelektronik ab. Eine genaue Abschätzung des diesbezüglichen Verhaltens auf Basis der Datenblätter ist schwierig, so dass diese Eigenschaft experimentell überprüft wird, um zu entscheiden, ob eine zusätzliche Linearisierung der Kamera im Rahmen einer Kalibrierung erforderlich ist.

Die Linearität der Kamera wurde durch Erstellung einer Belichtungsreihe einer Graukarte ermittelt. Als Helligkeitsreferenzwert dient ein über alle Pixel des Bildes gemittelter Grauwert. Durch die Mittelwertbildung werden Rauschen und Inhomogenitäten einzelner Pixel weitgehend unterdrückt. Bei konstanter Bestrahlungsstärke des Bildsensors wird die Belichtungszeit in Schritten bis zur Vollaussteuerung erhöht.

Ausgenutzt wird zur Linearitätsprüfung der Effekt, dass sich die in den Bildelementen akkumulierte Ladung  $Q$  für eine konstante Bestrahlungsstärke  $E$  proportional zur Belichtungszeit  $\Delta t$  verhält (vgl. Gl. (4.19), Kap. 4.3.3):

$$Q \sim E \cdot \Delta t \quad (4.22)$$

Daraus folgt, dass für die doppelte Belichtungszeit gerade die doppelte Ladungsmenge im Bildelement zu erwarten ist. Eine Abweichung deutet auf Nichtlinearitäten in der Helligkeitswahrnehmung der Kamera hin, die z.B. durch unkontrollierten Ladungsabfluss, Ladungsüberlauf oder Nichtlinearitäten in der Verarbeitungselektronik verursacht werden kann.

Abbildung 27 zeigt die von der Kamera ausgegebenen digitalen Grauwerte (in Prozent der Maximalaussteuerung) bei unterschiedlichen Belichtungszeiten zwischen 5 und 100ms (blaue Datenpunkte). Die grüne Linie beschreibt ein ideales lineares Ver-

halten, während die rote Linie die Abweichung der Messwerte signalisiert. Eine nennenswerte Abweichung (rot) der Messpunkte vom linearen Verhalten ist erst im Bereich der Sättigung (bei >80% Aussteuerung) zu erkennen.

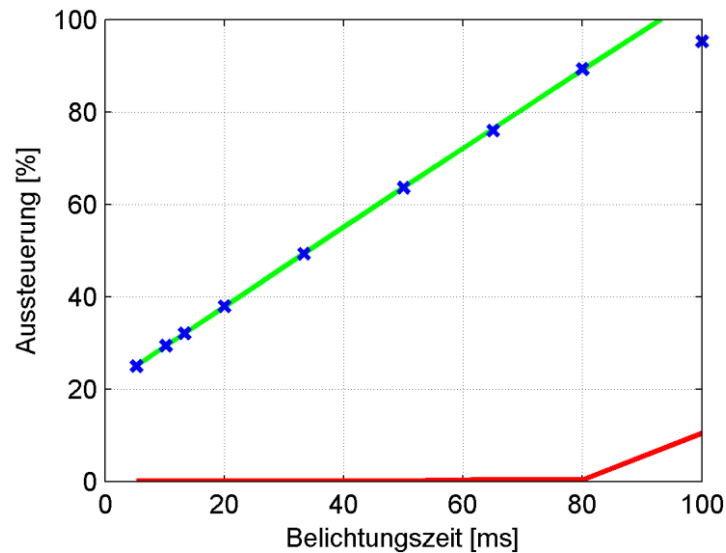


Abbildung 27: Belichtungsreihe zur Prüfung der Linearität einer DMK23G274 Kamera. Die rote Linie beschreibt die Abweichung der Testmessungen (blau) vom ideal linearen Verhalten.

Das Experiment zeigt, dass die Kamera für eine Aussteuerung bis etwa 80% eine sehr gute Linearität aufweist. Der Linearitätsfehler liegt mit  $<0,1\%$  nahezu eine Größenordnung unter dem Bildrauschen (vgl. Kap. 4.4.3). Erst ab ca. 80% Aussteuerung nimmt die Linearität ab bis hin zu deutlichem Sättigungsverhalten bei nahezu Vollaussteuerung. Dieses Verhalten ist in ähnlicher Form auch bei anderen CCD-Sensoren zu beobachten<sup>134</sup>. Auf eine zusätzliche Helligkeits-Linearisierung der Kamera kann demnach verzichtet werden, wenn Sättigungsverhalten vermieden wird, indem ein Betrieb nur bis ca. 80% der Maximalaussteuerung erfolgt.

#### 4.4.3 Überprüfung des Bildrauschens

Das Bildrauschen ist eine bedeutende Eigenschaft, die die Funktion der subpixel-genauen Bildmessung (vgl. Kap. 5.3.3) beeinflusst. Da aus den Datenblättern von Kamera und Sensor nicht eindeutig abzuleiten ist, welches Rauschmaß sich in Summe

<sup>134</sup> vgl. Jähne (2012, 207)

von Bildsensor und Verstärker, sowie A/D-Wandler der Kamera ergibt, wird das Rauschmaß unter Betriebsbedingungen experimentell ermittelt.

Dazu wurden in kurzem zeitlichen Abstand von 50ms zwei Bilder  $\mathbf{g}_1(i,j)$  und  $\mathbf{g}_2(i,j)$  einer Graukarte aufgenommen und ein Differenzbild  $\Delta\mathbf{g}(i,j)$  erstellt. Im Differenzbild verbleibt dabei lediglich die Summe des Rauschens der beiden Teilbilder  $\mathbf{g}_1$  und  $\mathbf{g}_2$ , da sich das Nutzsignal gerade heraus hebt.

$$\Delta\mathbf{g}(i, j) = \mathbf{g}_1(i, j) - \mathbf{g}_2(i, j) \quad (4.23)$$

Als Rauschmaß wird die Varianz des Differenzbildes bestimmt, die gerade der zweifachen Varianz eines Teilbildes entspricht. Ein Rauschmaß für das Kamerabild in Form der Standardabweichung  $\sigma$  kann durch folgende Gleichungen ermittelt werden:

$$2\sigma^2 = \frac{1}{(N_i N_j - 1)} \sum_j \sum_i \Delta\mathbf{g}(i, j)^2 \quad (4.24)$$

Im Allgemeinen nimmt das Bildrauschen mit sinkender Aussteuerung des Bildsensors zu (vgl. Kap. 4.3.3). Daher wurde für den Test eine relativ niedrige mittlere Sensoraussteuerung  $\bar{s}$  von 30% gewählt, die später in der Realanwendung nicht unterschritten werden soll. Die mittlere Aussteuerung  $\bar{s}$  dient zugleich als Bezugswert zur Abschätzung des Signal-Rausch-Abstandes (SNR) der Kamera, der damit nach folgender Formel berechnet werden kann:

$$SNR \approx \frac{\bar{s}}{\sigma} \quad \text{mit } \sigma = \sqrt{\sigma^2} \quad (4.25)$$

Als zentrale physikalische Quelle des Bildrauschens kann das Poisson-Rauschen nach Gl. (4.16) angenommen werden, das bei der Wandlung der Photonen in Elektronen entsteht. Für den Bildsensor Sony ICX274 kann damit ein physikalisch bedingtes „Minimalrauschen“ berechnet werden, dessen Wert nicht unterschritten werden kann. Vielmehr kommen weitere Rauschquellen wie Dunkelstrom-, Verstärker- und Quantisierungsrauschen dazu.

Insbesondere das Dunkelstromrauschen (vgl. Kap. 4.3.2) ist temperaturabhängig. Daher wurde der Test jeweils bei 25°C und bei 50°C Sensortemperatur durchgeführt. Das Ergebnis zeigt Tabelle 5. In der vorletzten und letzten Spalte wird jeweils das SNR als dB-Wert bzw. als prozentualer Anteil des Rauschens am Nutzsignal aufgetragen. In der ersten Zeile wird als Referenzmaß das Poisson-Rauschen für eine 30%-Aussteuerung berechnet. In den weiteren Zeilen folgen die bei 25 bzw. 50°C gemessenen SNRs.



Tabelle 5: Bildrauschen einer DMK23G274 CCD-Kamera bei unterschiedlichen Temperaturen.

Anmerkung	Aussteuerung $\bar{s}$	Analogverstärkung	SNR	Rauschanteil
Minimum nach Gl. (4.16)	30%	-	17,27dB	1,88%
$T_{sens} = 25^\circ\text{C}$	30 %	0 dB	17,11dB	1,95%
$T_{sens} = 50^\circ\text{C}$	30 %	0 dB	17,07dB	1,97%

Die Messungen zeigen sehr eindrucksvoll, dass über das Poisson-Rauschen hinausgehende Rauschquellen einen nahezu vernachlässigbaren Beitrag zum Gesamtrauschen leisten. So beträgt der Unterschied im SNR zwischen dem idealen und realen Bildsensor bei  $50^\circ\text{C}$  Chiptemperatur weniger als 0,1% bzw. 0,2dB.

Im Rahmen der Bildaufnahmesimulation kann also das Bildrauschen für Belichtungszeiten im Bereich einiger 10ms und Aussteuerungen  $>30\%$  in sehr guter Näherung durch das Poisson-Rauschen (nach Gl.(4.16)) modelliert werden. Erst bei sehr viel längeren Belichtungszeiten würde sich beispielsweise das Dunkelstromrauschen so akkumulieren, dass dessen Einbeziehung in das Sensormodell sinnvoll erschiene.

Am Rande sei noch festgestellt, dass ein 8bit A/D-Wandler mit seinen 256 möglichen Grauwertstufen die Bildintensität hinreichend auflöst. Dies lässt sich damit begründen, dass selbst bei einer Vollaussteuerung noch ein Rauschanteil von mindestens 1% verbliebe, so dass real nur etwa 100 Intensitätsstufen unterscheidbar sind.

Der 12bit-ADC der Kamera (vgl. Kap. 4.3.3) entfaltet daher seine Fähigkeiten erst dann, wenn ein sehr großer Dynamikbereich im Sinne eines großen Verhältnisses ( $>256$ ) zwischen minimaler und maximaler Aussteuerung abzudecken wäre. Dies ist hier wegen der Begrenzung des Aussteuerbereichs auf 30-80% nicht der Fall. Daher kann auf den 12bit-Modus zugunsten einer geringeren Datenbandbreite verzichtet werden.

## 4.5 Beleuchtung und Fremdlichtunterdrückung

Die Beleuchtung ist ein wichtiger Faktor für die einwandfreie Bildaufnahme und insbesondere für die präzise Bildmessung (vgl. Kap. 5). Wichtige Teilaspekte sind Beleuchtungsstärke, Monochromität und Homogenität (Gleichförmigkeit).

Die *Beleuchtungsstärke* beschreibt die Strahlungsleistung pro Fläche und bestimmt damit als einer von mehreren Faktoren die vom aufzunehmenden Objekt remittierte Lichtleistung. Die Beleuchtungsstärke muss so hoch gewählt werden, dass bei

gegebener Objektremission, Blendeneinstellung und Belichtungsdauer eine einwandfreie Aussteuerung der Kamera erreicht wird (vgl. Kap. 4.3.3). Gleichzeitig ist es zur Vermeidung von Bewegungsunschärfe erforderlich, die für eine Belichtung nötige Lichtenergie in einem möglichst kurzen Zeitraum frei zu setzen (vgl. Kap. 5.5).

Die *Monochromität* der Beleuchtung ist einerseits zur Vermeidung chromatischer Aberrationen von Bedeutung (vgl. Kap. 4.2.6). Andererseits hängt von der Wellenlänge der verwendeten Lichtquelle über die Beugungsunschärfe das Auflösungsvermögen des optischen Systems ab (vgl. Kap. 4.2.2, 4.2.4). Der verfügbare Wellenlängenbereich wird im Wesentlichen durch die spektrale Empfindlichkeit des Bildsensors eingeschränkt (vgl. Kap. 4.4.1).

Die *Homogenität* der Beleuchtung beschreibt die Gleichförmigkeit der Objektausleuchtung. Eine inhomogene Ausleuchtung führt zur Bildung von Helligkeitsgradienten über der Zielmarke, die zu systematischen Verschiebungsfehlern in der subpixelgenauen Bildmessung führen (vgl. Kap. 5.3.4). Während eine rechnerische Korrektur von großflächigen Helligkeitsverläufen möglich ist, sind „höherfrequente“ Helligkeitsschwankungen, z.B. Abschattung durch Objekte im Lichtweg, schwieriger zu korrigieren und sollten vermieden werden (vgl. Kap. 5.4).

Aus den genannten Anforderungen ist ersichtlich, dass eine allgemein vorhandene Raumbelichtung durch die fehlende Kontrollierbarkeit nicht ausreichend ist und sogar eine erhebliche Störquelle darstellt. Aus diesem Grunde ist es einerseits erforderlich, eine geeignete Spezialbeleuchtung zu erzeugen, welche die genannten Bedingungen erfüllt. Andererseits aber auch die störenden Einflüsse von Fremdlicht zu unterdrücken.

#### 4.5.1 Konzeption einer Beleuchtung für die präzise Bildmessung

Eine ideale homogene Ausleuchtung einer planen Zielmarke lässt sich nur durch eine kollineare Lichtquelle mit parallelem Strahlengang erreichen, wie in Abbildung 28 a) gezeigt. In der Praxis ist dies schwer realisierbar, da der Durchmesser der Richtlinse mindestens der Motivgröße entsprechen muss.

Die Alternative ist eine teilkolimierte Beleuchtung mit kegelförmigen Strahlengang (Abbildung 28 b)), die jedoch eine von der Beleuchtungsachse nach außen abfallende Ausleuchtung zur Folge hat, die vor der eigentlichen Bildmessung rechnerisch kompensiert werden muss (vgl. Kap. 5.4).

Die Ursache des Helligkeitsabfalls ist der nach außen hin flacher werdende Einstrahlwinkel der Lichtquelle. Die von einer Kamera wahrgenommene Leuchtdichte

$I$  bei Bestrahlung einer diffus rückstreuenden Fläche unter einem Winkel  $\phi$  zur Flächennormale beschreibt dabei das *Lambertsche Gesetz*<sup>135</sup>:

$$I(\phi) = I_0 \cdot \cos(\theta) \quad (4.26)$$

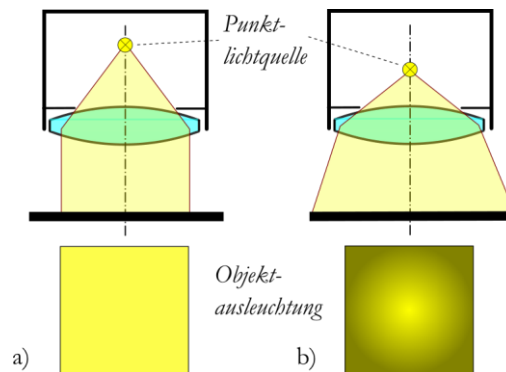


Abbildung 28: Beleuchtung einer planen Fläche mit a) einer kollimierten Lichtquelle und b) einer kegelförmigen Lichtquelle.

#### 4.5.2 Geeignete Lichtquellen

Eine geeignete Punktlichtquelle sollte zwecks Fremdlichtunterdrückung und Vermeidung chromatischer Abbildungsfehler monochromatisch sein und über eine hohe und homogene Leuchtdichte verfügen.

Für den Blitzbetrieb muss die Lichtquelle weiter elektronisch steuerbar sein und hohe Pulsleistungen bei Pulsraten bis zu einigen 10Hz (Bildfrequenz der Kamera) tolerieren. Diese Voraussetzungen werden am kostengünstigsten von LEDs erfüllt. Typische Vertreter von Hochleistungs-LEDs, z.B. *Cree XLamp XT-E*<sup>136</sup> (Abbildung 29), haben spektrale Bandbreiten von 40-60nm und Strahlungsleistungen um 700mW. Sie können im Blitzbetrieb mit bis zu 5-facher Nennleistung gepulst werden und sind in diversen Spektralfarben in Wellenlängen von ca. 400-800nm verfügbar.

Die LED-Chips verfügen häufig über eine integrierte Optik, mit der sich ein Strahlöffnungswinkel um die 100° erzielen lässt, was für viele Anwendungen ausreicht. Für eine stärkere Bündelung muss eine Zusatzoptik in Form einer weiteren Sammellinse ergänzt werden.

<sup>135</sup> vgl. Jähne (2012, 278)

<sup>136</sup> Cree (2016)

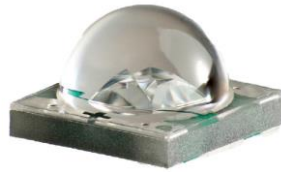


Abbildung 29: Beispiel eines LED-Chip mit integrierter Optik und 3,45mm Kantenlänge (*Cree XLamp XT-E*).

Um höhere Strahlungsleistungen zu erzielen, werden mehrere LED-Chips als Matrix hinter der Strahlformungsoptik auf einem gemeinsamen Kühlkörper angeordnet und synchron angesteuert. Durch eine Anordnung von 3x3 der genannten-LEDs auf einer Fläche von ca.  $(10 \times 10) \text{mm}^2$ , lässt sich so eine Strahlungsleistung bei Pulsbetrieb von  $>30 \text{W}$  erreichen. Alternativ können mehrere LEDs mit Einzeloptiken ringförmig um das Kameraobjektiv angeordnet werden (vgl. auch Kap. 4.6.1).

### 4.5.3 Unterdrückung von Fremdlicht

In einem industriellen Umfeld sind zahlreiche Fremdlichtquellen aktiv (Hallenbeleuchtung, Tageslicht, etc.), die sich mit der Messbeleuchtung überlagern und so eine unkontrollierte Lichtsituation provozieren würden, unter der eine präzise Bildmessung nicht mehr möglich wäre.

Eine wirksame Fremdlichtunterdrückung kann auf mehrere Arten erfolgen. Hierzu wird angenommen, dass die Bestrahlung durch Fremdlichtquellen kontinuierlich und spektral ausgewogen sei. Die Helligkeitsdifferenz zwischen Beleuchtung und Störlicht kann dann durch Konzentration auf ein enges spektrales (Farbfilter) oder zeitliches (Blitzlichtquelle) Fenster erhöht werden.

Die spektrale Bandbreite einer monochromatischen LED-Lichtquelle beträgt ca. 40-50nm (vgl. Kap. 4.4.1). Als schmalbandiges Farbfilter wird z.B. ein sog. *Interferenzfilter*<sup>137</sup> im Strahlengang der Kameraoptik montiert, das in Lage und Bandbreite auf die LED abgestimmt ist. Damit wird die spektrale Empfindlichkeit einer Kamera die im Normalfall etwa 500nm überstreicht (vgl. Abbildung 34) auf etwa 10% eingeschränkt und auf die Lichtquelle konzentriert. Es resultiert eine Fremdlichtunterdrückung von bis zu 90%.

Eine übliche Bildverarbeitungskamera, die mit einer Bildfrequenz von z.B. 20Hz betrieben wird, belichtet jedes Bild mit einer Dauer von  $1/20 \text{s} = 50 \text{ms}$ . Verfügt eine solche Kamera über einen elektronischen Verschluss- und Synchronisationsmechanismus (vgl. Kap. 4.4.1), so kann das Belichtungszeitfenster in Dauer und Lage exakt mit der Beleuchtung synchronisiert werden.

---

<sup>137</sup> vgl. Litfin (2005, 204)

Durch die Konzentration der Beleuchtungsenergie auf ein schmales Zeitfenster von z.B. 1ms statt vorher 50ms durch Pulsbetrieb der Lichtquelle, kann eine Fremdlichtunterdrückung von bis zu 98% erreicht werden. Gleichzeitig wird eine potentielle Bewegungsunschärfe wirkungsvoll reduziert (vgl. Kap. 5.5).

Leider sind der Puls-Überlastbarkeit von LEDs Grenzen gesetzt (vgl. z.B. Cree XLamp, Kap. 4.5.2), so, dass die Lichtquelle zum Erreichen kurzer Belichtungsintervalle im Millisekunden-Bereich in der Praxis überdimensioniert werden muss.

#### 4.5.4 Mathematische Betrachtung der Beleuchtung

Für die spätere Simulation der Lichtquelle ist es zunächst erforderlich, den radiometrischen Energiefluss von der Strahlungsquelle über die Strahlformungsoptik bis zur Remission der Strahlung durch die Zielmarke zu verstehen. Die radiometrische Abbildung der Zielmarke durch die Kameraoptik wurde bereits in Kap. 4.2.5 beschrieben.

Eine Punktlichtquelle mit Bündelungsoptik und einer Strahlungsleistung  $P_L$  [W] gibt ihr Licht in einen bestimmten Raumwinkel  $\Omega$  ab. Je stärker die Bündelung der Strahlungsleistung, desto „intensiver“ wird die Strahlung, woraus sich eine weitere Größe, die *Strahlungsintensität*<sup>138</sup>  $I$  mit der Einheit „Leistung pro Raumwinkel“ ableitet.

$$I[\text{Wsr}^{-1}] = \frac{P_L[\text{W}]}{\Omega[\text{sr}]} \quad (4.27)$$

Die von einer Strahlungsquelle mit der Strahlungsintensität  $I$  erzeugte *Bestrahlungsstärke*<sup>139</sup>  $E$  in einem Abstand  $r$  berechnet sich durch:

$$E[\text{W}/\text{m}^2] = \frac{I[\text{W}/\text{sr}]}{r^2[\text{m}^2]} \quad (4.28)$$

Die Bestrahlungsstärke einer Punktlichtquelle sinkt also mit dem Quadrat des Abstandes  $r$  zur Lichtquelle. Dies ist wichtig anzumerken, da später daraus eine stark abstandsabhängige Aussteuerung der Kamera folgen muss.

Eine Zielmarke kann in guter Näherung als diffus rückstreuende Fläche (Lambertfläche) betrachtet werden. Eine mit einer Bestrahlungsstärke  $E$  bestrahlte Lambertfläche mit einem Rückstreuvermögen (Albedo)  $a$  zwischen 0 und 100% wird selbst zu einem Lambertstrahler. Dieser streut einen Teil der Bestrahlungsleistung diffus in einem Raumwinkel von  $\Omega=2\pi$ , (halbkugelförmig) zurück. Erfolgt die Bestrahlung nicht senkrecht zur Flächennormalen, so wirkt zusätzlich das Lambertsche Gesetz, was eine Minderung der Bestrahlungsstärke um einen Faktor  $\cos \theta$  zur Folge hat.

<sup>138</sup> Vgl. Löffler-Mang (2012, 74)

<sup>139</sup> Vgl. Jähne (2012, 46)

Die resultierende *Strahldichte*<sup>140</sup> (photometrisch auch Leuchtdichte)  $L$  der Fläche kann damit beschrieben werden als:

$$L[\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}] = a \cdot \cos \theta \cdot \frac{E[\text{Wm}^{-2}]}{2\pi[\text{sr}]} \quad (4.29)$$

Somit kann bei bekannter Strahlungsintensität der Lichtquelle, dem Abstand und der Albedo einer Zielmarke, die auf ihr erzeugt und von einem Beobachter oder einer Kamera wahrgenommene Leuchtdichte berechnet werden.

## 4.6 Bildaufnahmesimulation und Systemabstimmung

Durch die physikalisch korrekte Simulation eines Bildaufnahmesystems mit dem in der Arbeit entwickelten *Bildaufnahmesimulator* (BAS) wird es möglich, die Systemparameter schnell und gezielt zu variieren. Dabei kann das Systemverhalten zu jeder Zeit störungsfrei, also ohne unbestimmte äußere Einwirkungen beachten zu müssen, beobachtet werden.

Die Simulation von Beleuchtung, Zielmarke, Objektiv und Bildsensor wird hier zunächst dazu eingesetzt, eine schnelle Applikationsanpassung und Optimierung des Kamerasystems am Computer zu ermöglichen, ohne das System selbst in unterschiedlichen Variationen real aufbauen und validieren zu müssen (vgl. Kap. 4.7).

In einem späteren Schritt wird diese Simulation dazu dienen, hochgenaue Bildmessverfahren auf ihre Eignung zu prüfen und zu verbessern. Diese auf Interpolation und Statistik basierenden Verfahren reagieren empfindlich auf Ausleuchtungsfehler oder Bildrauschen. Da diese Einflüsse am realen System schwer kontrollierbar sind, nimmt die Simulation hier eine besonders wichtige Rolle ein (vgl. Kap. 5.3, 5.4). Letztlich bildet die Einzelkammersimulation den Grundbaustein für die Entwicklung und Evaluation von Mehrkamera-Messsystemen (vgl. Kap. 7.4).

### 4.6.1 Grundaufbau einer Bildaufnahmeeinheit

Abbildung 30 zeigt schematisch den Aufbau einer Bildaufnahmeeinheit bestehend aus Kamera und koaxial zur optischen Achse angeordneten Lichtquellen. Der Abstand  $r$  zwischen Lichtquelle und Objekt entspricht hier der Gegenstandsweite  $g$ .  $\Delta p$  bezeichnet den Versatz zwischen Kamera- und Lichtachse und  $\theta$  den Winkel zwischen Lichteinfall und Normalenvektor des Objekts.  $\Omega_L$  ist der Raumwinkel, den die Lichtquelle erfasst, um auf der Objektoberfläche eine abstandsabhängige Bestrahlungsstärke  $E$  zu bewirken.

<sup>140</sup> Vgl. Jähne (2012, 47)

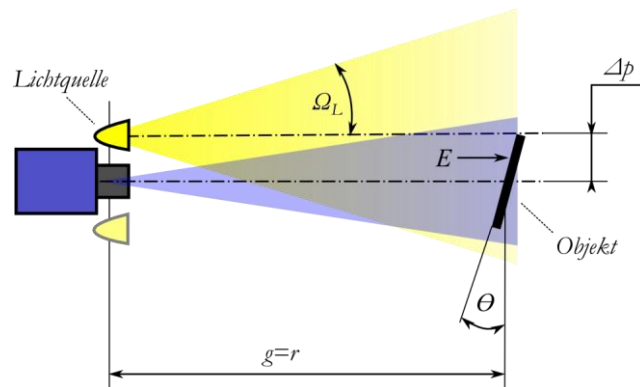


Abbildung 30: Prinzipieller Aufbau einer Bildaufnahmeeinheit aus Kamera und koaxial angeordneten Lichtquellen.

Ein Beleuchtungsmodul besteht aus einer LED (Punktlichtquelle), deren Strahlungsleistung mittels einer Optik (Kondensator) in einen beschränkten Raumwinkel  $\Omega_L$  abgestrahlt wird. Zur Vermeidung unkontrollierter Abschattungen wird angestrebt, Beleuchtungsachse und optische Achse der Kamera aufeinander fallen zu lassen. Da dies technisch nur näherungsweise realisiert werden kann, ergibt sich ein geringer Parallaxenversatz  $\Delta p$ . Dessen Auswirkung ist zu vernachlässigen, wenn der Öffnungswinkel der Beleuchtung etwas größer gewählt wird als der Bildwinkel der Kamera und eine minimale Gegenstandsweite  $g$  nicht unterschritten wird. In diesem Fall befindet sich die gesamte Objektebene innerhalb des Ausleuchtkegels (vgl. Abbildung 30). Auch können weitere Lichtquellen in gleichem Abstand  $\Delta p$  konzentrisch um das Kameraobjektiv angeordnet werden, um die Bestrahlungsstärke in der Objektebene zu erhöhen.

Der Parameter  $r$  beschreibt den Abstand zwischen Objekt und Lichtquelle und ist in dieser Anordnung gleich der Gegenstandsweite  $g$ . Im Abstand  $r$  erzeugt die Lichtquelle eine Bestrahlungsstärke  $E$ , die auf das Objekt (Zielmarke) einwirkt. Das Objekt streut einen (zu  $\cos(\theta)$  proportionalen) Teil der Strahlung in den Raum zurück (vgl. Kap. 4.5). Davon wird wiederum eine Teilmenge auf dem Bildsensor abgebildet.

#### 4.6.2 Simulation einer Bildaufnahmeeinheit

Abbildung 30 zeigt die vier Stufen der Simulation der beschriebenen Bildaufnahmeeinheit. Simuliert werden die Eigenschaften der „Lichtquelle“, der „Zielmarke“ (Objekt), des Objektivs und des Bildwandler.

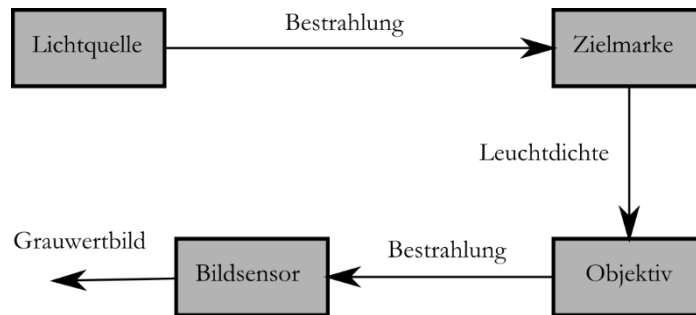


Abbildung 31: Übersicht über den Ablauf der Bildaufnahmesimulation in den vier Simulationstufen Lichtquelle, Zielmarke, Objektiv und Bildsensor.

Die Implementierung der Simulationskomponente erfolgte als Matlab Programmmodul und stützt sich auf die in den vorigen Abschnitten beschriebenen physikalischen Zusammenhänge.

In den ersten beiden Simulationstufen *Lichtquelle* und *Zielmarke* wird das Verhalten einer Punktlichtquelle mit Strahlungsintensität  $I$  bei Bestrahlung einer Zielmarke simuliert. Die formalen Zusammenhänge wurden in Kap. 4.5 bereits erläutert. Zur Ermittlung einer abstands- und winkelabhängigen Bestrahlungsstärke  $\mathbf{E}(x,y)$  auf die Oberfläche der Zielmarke dient Gl. (4.28). Eine mattiert ausgeführte Zielmarke kann in guter Näherung als diffus rückstreuende Lambertfläche angesehen werden, die durch die Bestrahlung selbst zur Lichtquelle wird. Deren bestrahlungsabhängige Leuchtdichte  $\mathbf{L}(x,y)$  wird durch Gl. (4.29) ermittelt.

In der nächsten Simulationstufe *Objektiv* wird das physikalische Verhalten des Abbildungssystems simuliert. Hierbei werden geometrische Abbildungsfehler außer Acht gelassen, da diese im realen System durch die geometrische Kamerakalibrierung ausgeglichen werden können (vgl. Kap. 6.3). Bei bekannter Leuchtdichte  $L$  eines Objektes in Gegenstandsweite  $g$  und bekannten Objektivparametern Kamerakonstante  $f_s$ , Brennweite  $f$  und Blendenzahl  $k$  kann mittels Gl. (4.12) die auf den Bildsensor wirkende Bestrahlungsstärke  $E'$  ermittelt werden (vgl. Kap. 4.2.5). Zusätzlich werden die durch die optische Abbildung eingeschränkte Schärfentiefe (vgl. Kap. 4.2.3) und die wellenlängenabhängige Beugungsunschärfe (vgl. Kap. 4.2.4) simuliert. Das Ergebnis ist die orts aufgelöste Bestrahlungsstärke  $\mathbf{E}'(x',y')$  über die Fläche des Bildsensors als Eingabe für die letzte Stufe.

Die vierte und letzte Simulationstufe *Bildsensor* simuliert die eigentliche Bildwandlung, sowie die analogen Verstärkerstufen und die Digitalisierung durch den A/D-Wandler. Verwendet wird das in Kap. 4.3.4 beschriebene Sensormodell. Dieses stellt auf Basis von Gl. (4.20) einen linearen Zusammenhang zwischen der Bestrahlungsstärke  $E'$  und dem ausgegebenen digitalen Grauwertbild  $\mathbf{g}(i,j)$  her. Ein zusätzlicher additiver Rauschterm (vgl. Gl. (4.21)) simuliert das für den jeweiligen Sensor typische Bildrauschen. Die für die Simulation erforderlichen Modellparameter Quantenausbeute  $QE(\lambda)$ , Dunkelrauschen, Systemverstärkung  $K_{sys}$ , Belichtungszeit  $t_{exp}$  und die



ADC-Auflösung werden dem Datenblatt der verwendeten Kamera entnommen oder können alternativ messtechnisch an der realen Kamera ermittelt werden.

Tabelle 6 zeigt eine Übersicht der einzelnen Simulationsstufen, ihrer Ein- und Ausgaben und der erforderlichen Modellparameter.

Tabelle 6: Übersicht über die Funktion der einzelnen Stufen der Bildaufnahmesimulation

Simulationsstufe	Simulierter Effekt	Modellparameter	Ausgabe
Lichtquelle	Stärke und Verteilung der Bestrahlung	Strahlungsintensität der Lichtquelle $I$ Abstand Zielmarke $r$	Bestrahlungsstärke $\mathbf{E}(x,y)$ [ $\text{wm}^{-2}$ ] der Zielmarke (ortsaufgelöst)
Zielmarke	Diffuse Rückstreuung der Bestrahlung	Winkel des Lichteinfalls $\theta$ Rückstreuvermögen (Albedo) $a$	Leuchtdichte $\mathbf{L}(x,y)$ [ $\text{wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ ] der Zielmarke (ortsaufgelöst)
Objektiv (Optische Abbildung)	Bestrahlung des Bildsensors, Beugungsunschärfe, Schärfentiefe, Bewegungsunschärfe	Kamerakonstante $f_s$ , Brennweite $f$ Blendenzahl $k$ Gegenstandsweite $g$ Wellenlänge $\lambda$	Bestrahlungsstärke $\mathbf{E}'(x,y)$ [ $\text{wm}^{-2}$ ] des Bildsensors (ortsaufgelöst)
Bildsensor	Aussteuerung, Bildrauschen und Quantisierung	Quantenausbeute $QE(\lambda)$ , Wellenlänge $\lambda$ Dunkelrauschen Systemverstärkung $K_{sys}$ Belichtungszeit $t_{exp}$ ADC-Auflösung [Bit]	Quantisiertes Grauwertbild $\mathbf{g}(i,j)$

Abbildung 32 zeigt ein beispielhaftes Ergebnis der Bildaufnahmesimulation. Vor dem (virtuellen) Aufnahmesystem wird eine Testmarke in Form eines 16-strahligen Siemensstern (vgl. Kap. A.2) platziert, deren diffuses Rückstreuvermögen (Albedo) mit 20% (schwarz) und 80% (weiß) angenommen wird. Durch die Bestrahlung

resultiert aus Sicht der Kamera auf der Marke eine Leuchtdichte  $L$ , die durch das Objektiv auf dem Bildsensor der Kamera abgebildet wird. Die Bestrahlung  $E'$  des Bildsensors wird in elektrische Ladung gewandelt, verstärkt und im A/D-Wandler der Kamera zu einem Grauwertbild quantisiert.

Um im Beispiel die Effekte der Optik und des Bildrauschens erkennbar zu machen, wurde die Testmarke außerhalb des Schärfentiefebereichs positioniert und das Bildrauschen überzeichnet dargestellt. Die resultierenden Effekte sind im Bestrahlungsbild des Sensors durch Unschärfe und Rauschen im Grauwertbild zu erkennen. Der nicht mehr aufgelöste Bereich im Zentrum des Siemensstern deutet den Auflösungsverlust an (vgl. Kap. 4.2.2, A.2).

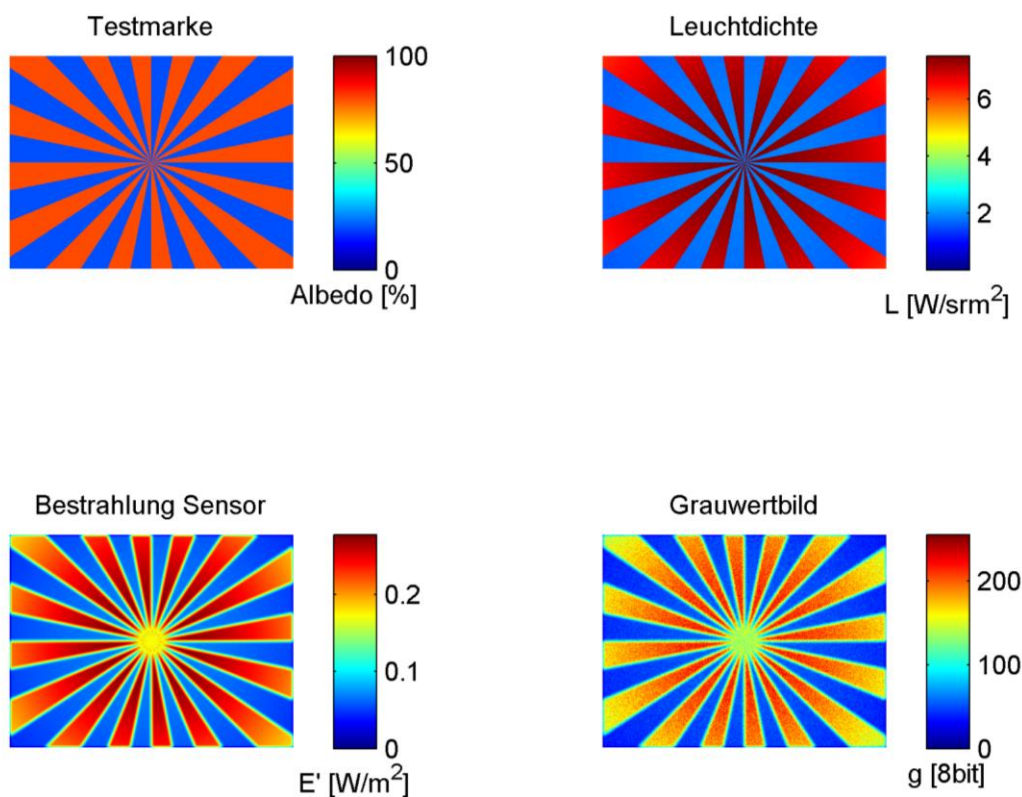


Abbildung 32: Simulierte Aufnahme einer mittels Punktlichtquelle beleuchteten Testmarke mit dem BAS. Zu sehen sind das Albedo der Testmarke (links oben), die resultierende Leuchtdichte (rechts oben), Bestrahlungsbild des Sensors (links unten) und das gewandelte Grauwertbild (rechts unten).

Für das Beispiel wurde ein Abstand von  $r=0,5\text{m}$  zwischen Bildaufnahmesystem und Marke, eine Blende von  $k=1,4$  und eine Objektivbrennweite von  $f=12\text{mm}$  angenommen. Für die photoelektrische Bildwandlung wurden die Daten der DMK274 Kamera verwendet (vgl. Kap. 4.4.1).

## 4.7 Analyse und Abstimmung von Bildaufnahmesystemen

Für den Aufbau eines CPMS sind gewisse Anforderungen und Randbedingungen gegeben, die immer auch applikationsspezifisch sind. Je nach konkretem Anwendungsszenario ist eine bestimmte Messauflösung gefordert, während zugleich ein gewisser Arbeitsraum abgedeckt werden muss. Bei Vergrößerung des Arbeitsraums vergrößern sich die Abstände zwischen Kameras und Zielmarken, was wiederum weitgehende Änderungen am System aus Kamera und Beleuchtung erfordert, um die Funktion zu erhalten und Messunsicherheiten zu minimieren.

Im Folgenden soll deshalb die Interaktion der einzelnen Parameter eines Bildaufnahmesystems auf Basis der Simulation näher untersucht werden. Anschließend werden Empfehlungen erarbeitet, mit deren Hilfe eine Systemabstimmung unter optimaler Ausnutzung bestehender Freiheitsgrade erfolgen kann.

### 4.7.1 Anforderungen und Freiheitsgrade

Zunächst werden einige Vorgaben festgelegt, auf deren Basis mittels eines Algorithmus sinnvolle Systemparameter für Optik und Beleuchtung bestimmt werden können. Dazu wird ein mittlerer Arbeitsabstand  $g$  gewählt und eine absolute Auflösung  $R_a$  in  $g$  gefordert.  $R_a$  entspricht dabei der Größe eines Ausschnittes der Objektebene, die gerade auf einen Kamerapixel abgebildet wird.

In einem zweiten Schritt werden diese Vorgaben variiert, um ihren Einfluss auf das Systemverhalten zu ermitteln und die günstigste Konfiguration zu bestimmen. Dazu werden die Parameter Beleuchtungswellenlänge, Arbeitsabstand und Pixelgröße des Bildsensors über einen weiten Bereich variiert und die Auswirkungen auf die erforderliche Leistung der Lichtquelle und des Schärfentiefebereichs, sowie weiterer relevanter Eigenschaften aufgezeigt.

Wünschenswert wäre eine Kamera-/Beleuchtungseinheit, die über folgende Eigenschaften verfügt:

- 1) Eine vorgegebene absolute Auflösung  $R_a$  im Arbeitsabstand  $g$  wird erreicht.
- 2) Die (notwendige) Leistung der Lichtquelle fällt möglichst gering aus.
- 3) Der Schärfentiefebereich und damit die erlaubte Variation des Arbeitsabstandes fällt möglichst groß aus.
- 4) Das absolute Auflösungsvermögen und die Bestrahlungsstärke der Zielmarke sollte nicht zu sehr mit dem Abstand variieren, um den Abfall der Messauflösung gering zu halten und insbesondere den Bildsensor beim minimalen bzw. maximalen Arbeitsabstand nicht zu über- bzw. zu untersteuern.
- 5) Kosten, Größe und Gewicht der Bildaufnahmeeinheit sollten niedrig bleiben.

Zum Erreichen dieser Ziele können die im Abschnitt zur Simulation (vgl. Kap 4.6.2) bereits eingesetzten Gleichungen angewendet werden. Auf deren Basis wird die für eine ausreichende Aussteuerung des Bildsensors erforderliche Strahlleistung  $P_L$  und Strahlwinkel  $\Omega_L$  (vgl. Abbildung 30) ermittelt. Parallel werden die Objektivparameter Brennweite  $f$  und Blendenzahl  $k$  bestimmt. Anhand dieser Parameter kann ein Objektiv ausgewählt und die Beleuchtung konstruiert werden.

Zur Durchführung der Berechnungen müssen einige weitere Systemparameter eingeführt werden. Eine Übersicht über die Parameter einer Einheit aus Kamera und Beleuchtung zeigt Tabelle 7. Es wird hier eine Unterscheidung in extern vorgegebene Parameter und „freie“ für eine Optimierung verfügbare Parameter getroffen. Zu den extern vorgegebenen Parametern gehören, neben Arbeitsabstand und Auflösungsvermögen, z.B. die materialabhängige Albedo (Rückstreuvermögen) einer Zielmarke. Aber auch die Kennwerte des vorgegebenen Bildsensors wie Pixelgröße, wellenabhängige Quanteneffizienz und Ladungskapazität (Full well capacity) eines Pixels.

Tabelle 7: Übersicht der relevanten Systemparameter. Die für den Systemaufbau zu ermittelnden Zielparameter sind unterstrichen dargestellt.

Beschreibung	Extern vorgegebene Parameter	Zu ermittelnde/optimierende Parameter
Anwendungsspezifische Vorgaben	$g$ : Arbeitsabstand $R_{a,g}$ : abs. Auflösung $t_{exp}$ : Belichtungszeit $\lambda$ : Belichtungs-Wellenlänge	$\Delta R_{a,g}$ : Abstandsabhängige Auflösungsreduktion $R$ : Winkelauflösung
Beleuchtung (und Zielmarke)	$a_T$ : Rückstreuvermögen (Albedo) der Zielmarke	<u><math>P_L</math>: Strahlleistung</u> <u><math>\Omega_L</math>: Strahlwinkel</u> $I_L$ : Strahlintensität $E_{T,g}$ : Bestrahlung (Zielmarke) $\Delta E_{L,g}$ : Bestrahlungsabfall $L_{T,g}$ : Leuchtdichte (Zielmarke)
Optik		<u><math>f</math>: Brennweite</u> <u><math>k</math>: Blendenzahl</u> $\Omega_V$ : Bildwinkel $d$ : Schärfentiefe
Sensor	$S_p$ : Pixelgröße $QE(\lambda)$ : Quanteneffizienz $C_{fu}$ : Full-Well Capacity	$E_S$ : Bestrahlungsstärke (Vollaussteuerung)

Einige der zu ermittelnden Systemparameter leiten sich direkt aus den Vorgaben ab. Dazu gehört z.B. die Brennweite  $f$ , die sich bei vorgegebenen Arbeitsabstand (bzw. Gegenstandsweite)  $g$  und absoluter Auflösung  $R_a(g)$  aufgrund des erforderlichen Abbildungsmaßstabs ergibt. Andere Parameter wie die Wellenlänge  $\lambda$  der Beleuchtung

können über einen weiten Bereich variiert werden, um ein günstigeres Verhalten (z.B. eine höhere Schärfentiefe) zu erzielen.

Dazu sind Kenntnisse über das Zusammenspiel der einzelnen Werte erforderlich. Tabelle 8 zeigt eine Aufstellung der wichtigsten (das Verhalten dominierenden) Abhängigkeiten der Bildaufnahme-Parameter. Reziproke Abhängigkeiten werden hier durch einen negativen Exponenten gekennzeichnet (z.B. die Abhängigkeit Winkelauflösung  $R$  vom Abstand mit  $R \sim g^{-1}$ ). In der dritten Spalte folgt jeweils ein Verweis auf den exakten formalen Zusammenhang, aus dem die Abhängigkeit abgeleitet wurde.

Tabelle 8: Dominante Abhängigkeiten der Systemparameter einer Kamera-/Beleuchtungseinheit.

Parameter	Dominante Abhängigkeiten	Formeln	Anmerkungen
$R$	$g^1, Ra$	$R=R_a/g$	Winkelauflösung (Kap. 4.2.2)
$f$ [m]	$R^1, S_p$	$f=S_p/R$	Brennweite für gegebene Winkelauflösung und Pixelgröße (Kap. 4.2.1)
$k$	$\lambda^{-1}, S_p$	Gl. (4.11)	Blende so klein wählen, dass opt. Auflösung $\leq$ Pixelgröße (Vermeidung von Unterabtastung, vgl. Kap. 4.2.4)
$\Delta d$ [m]	$g, f^2, k$	Gl. (4.8)	Schärfentiefe abhängig von Abstand, Brennweite und Blende
$\Delta Ra$	$S_p, f^1$	$\delta/\delta g Ra = S_p/f$	relativer Auflösungsabfall mit steigendem Abstand (Kap. 4.2.1)
$\Delta E_T$ [Wsr <sup>-1</sup> m <sup>-3</sup> ]	$g^3, I$	$\delta/\delta g E_T = -2I/g^3$	relativer Helligkeitsabfall
$E_S$ [Wm <sup>-2</sup> ]	$QE(\lambda)^1, C_{fm}, t_{exp}^{-1}$	Gl. (4.20)	Bestrahlung für (volle) Sensoraussteuerung abhängig von Wellenlänge und Belichtungszeit
$L_T$ [Wsr <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> ]	$k^2, E_S$	Gl. (4.12)	Leuchtdichte Zielmarke abhängig von Blendenzahl und erforderlicher Sensorbestrahlungsstärke
$E_T$ [Wm <sup>-2</sup> ]	$L_T, a$	Gl. (4.29)	Bestrahlung der Zielmarke abhängig von erforderlicher Leuchtdichte und Rückstreuvermögen (Albedo)
$I_L$ [Wsr <sup>-1</sup> ]	$E_T, g^2$	$E_T=I/g^2$ Gl. (4.28)	Erforderliche Intensität der Lichtquelle abhängig von Abstand und erforderlicher Bestrahlungsstärke
$P_L$ [W]	$I_L, \Omega_L^{-1}$	$P_L=I_L/\Omega_L$ Gl. (4.27)	Strahlungsleistung zur Erreichung ausreichender Strahlungsintensität in den vorgegebenen Raumwinkel

#### 4.7.2 Algorithmus zur Berechnung von Optik und Beleuchtung

Anhand der externen Vorgaben, beispielsweise dem gewünschten Arbeitsabstand und Auflösungsvermögen in der Objektebene (siehe Tabelle 7), kann ein Algorithmus zur Ermittlung der gesuchten Optikparameter Brennweite  $f$  und Blendenzahl  $k$ , sowie der

Beleuchtungsparameter Strahlungsstärke  $P_L$  und Strahlwinkel  $\Omega_L$  abgeleitet werden. Als Eingabe benötigt dieser Algorithmus den mittleren Arbeitsabstand  $g$ , das gewünschte Auflösungsvermögen  $R_a$  und die Pixelgröße des Bildsensors  $S_P$ :

- 1)  $f$ : ermittle anhand  $R_a$ ,  $g$  und  $S_P$  die erforderliche Brennweite  $f$ .
- 2)  $k$ : bestimme  $k$  auf Basis von  $l$  und  $S_P$  so, dass die beugungsbeschränkte Auflösung  $S_P$  nicht unterschreitet (zur Vermeidung von Unterabtastung).
- 3)  $E_S$ : bestimme die bei einer Belichtungszeit  $t_{exp}$  für eine 50%-Aussteuerung erforderliche Bestrahlungsstärke  $E_S$  des Bildsensors anhand der gegebenen Sensorparameter.
- 4)  $L_T$ : berechne die erforderliche Strahlungsdichte  $L_T$  einer Zielmarke, damit auf dem Bildsensor die geforderte Bestrahlungsstärke  $E_S$  zustande kommt. Verwende dazu das zuvor ermittelte  $f$  und  $k$ .
- 5)  $E_T$ : berechne die erforderliche Bestrahlungsstärke der Zielmarke, damit eine Strahldichte  $L_T$  zustande kommt.
- 6)  $\Omega_L$ : berechne den Beleuchtungswinkel  $\Omega_L$  so, dass der Bildwinkel der Kamera sicher abgedeckt wird (vollständige Bildausleuchtung). Wähle dazu  $\Omega_L = 2\Omega_V$ .
- 7)  $P_L, I_L$ : berechne auf Basis des Abstands  $g$  die Strahlungsintensität  $I$  und weiter anhand des abzudeckenden Beleuchtungswinkels  $\Omega_L$  die dazu erforderliche Strahlungsleistung  $P_L$ .

Nach einem Durchgang des Algorithmus ist ein vollständiger Parametersatz zur Auswahl eines Objektivs ( $f, k$ ) und einer Lichtquelle ( $P_L, \Omega_L$ ) bestimmt.

### 4.7.3 Beispielhaftes Bildaufnahmesystem

Das Zusammenspiel der Parameter eines Bildaufnahmesystems lässt sich am besten an einem Beispiel demonstrieren. Dazu werden zunächst einige anwendungsspezifische Randbedingungen gesetzt, indem der gewünschte Bildsensortyp, der mittlere Arbeitsabstand und die gewünschte absolute Auflösung im Arbeitsabstand vorgegeben werden. Diese Vorgaben ergeben sich bei der späteren Planung eines CPMS indirekt in Zusammenhang mit dem abzudeckenden Messvolumen und der gewünschten Pose-Messauflösung (vgl. Kap. 7).

Für das Beispiel wird die Kamera *DMK23G274* (vgl. Kap. 4.4.1) mit dem *Sony ICX274* CCD-Bildsensor eingesetzt. Als mittlerer Arbeitsabstand wird  $g=1\text{m}$  gewählt. Die absolute Auflösung in diesem Abstand soll  $R_a=0,3\text{mm}$  betragen. Durch den Einsatz eines subpixel-genauen Bildmessverfahrens wird diese Auflösung später um etwa den Faktor 50 gesteigert (vgl. Kap. 5), so dass eine transversale Verschiebung zwischen Kamera und Zielmarke von ca.  $6\mu\text{m}$  aufgelöst werden kann. Damit wären z.B. bei

einem 3-Kamera-CPMS, abhängig von dessen System-Konfiguration, schon beachtliche Pose-Auflösungen erzielbar (vgl. Kap. 7.6). Die Belichtungszeit wird mit  $t_{exp}=1\text{ms}$  gewählt, was einen guten Kompromiss aus erforderlicher Lichtleistung und Fremdlichtunterdrückung darstellt (vgl. Kap. 4.5).

#### 4.7.4 Analyse und Abstimmung der Bildaufnahme-Parameter

Als nächstes sollen nun die Vorgaben zum Arbeitsabstand, Beleuchtungswellenlänge und letztlich der Pixelgröße des Bildsensors variiert werden, um deren Einfluss auf die Systemeigenschaften zu ermitteln und zu optimieren.

Dazu wird der obige Algorithmus unter Beibehaltung der Vorgegebenen absoluten Auflösung  $R_a$  im Abstand  $g$  unter Variation der Wellenlänge  $\lambda$ , des Arbeitsabstand  $g$  und zuletzt der Pixelgröße  $S_p$  wiederholt ausgeführt und jeweils die Beleuchtungs- und Optikparameter berechnet.

Darüber hinaus wird jeweils die Schärfentiefe  $\Delta d$  berechnet. Sie stellt ein Maß dar, in welchem Bereich der Arbeitsabstand  $g$  im späteren Betrieb variieren darf ohne die Funktion zu beeinträchtigen. Auch wird bestimmt, wie stark bei einer Konfiguration das absolute Auflösungsvermögen  $\Delta R_a$  und die Bestrahlungsstärke  $\Delta E_T$  mit steigendem Abstand abfällt.

Zunächst wird die Auswirkung der Beleuchtungswellenlänge  $\lambda$  auf die erforderliche Lichtleistung  $P_L$  und die Schärfentiefe  $\Delta d$  betrachtet. Ziel ist hier, einen guten Kompromiss aus Lichtleistung und Schärfentiefe zu erhalten.

Dazu wird  $\lambda$  in einem Intervall von 400-1000nm variiert und jeweils die erreichbare Schärfentiefe  $\Delta d$  und die für eine 50% Aussteuerung des Bildsensors notwendige Strahlleistung  $P_L$  ermittelt. Die Blendenzahl  $k=k(\lambda)$  wird jeweils so gewählt, dass sich eine für den Sensor optimale Bildauflösung ergibt (vgl. Punkt 2 im obigen Algorithmus).

Abbildung 33 zeigt das Ergebnis. Es ist zu erkennen, dass die Schärfentiefe mit steigender Wellenlänge deutlich abnimmt. Grund ist die abnehmende Blendenzahl  $k$  die bei steigendem  $\lambda$  immer kleiner werden muss, da sonst ein beugungsbedingter Auflösungsverlust (vgl. Kap. 4.2.4) einträte. Die für die Aussteuerung des Bildsensors erforderliche Strahlungsleistung  $P_L$  zeigt eine komplexe Abhängigkeit von der Wellenlänge  $\lambda$ . Dies rührt aus der stark wellenlängenabhängigen Quanteneffizienz  $QE(\lambda)$  des Bildsensors (vgl. Abbildung 34) in Kombination mit der Blendeneinstellung  $k$  des Objektivs, die ihrerseits die erforderliche Bestrahlungsstärke  $E_s$  des Sensors beeinflusst.

In der Praxis muss ein Kompromiss zwischen Schärfentiefe  $\Delta d$  und erforderlicher Strahlungsleistung  $P_L$  gefunden werden, da die Realisierung großer Strahlungsleistungen mit LEDs aufwendig ist (vgl. Kap 4.5). Im vorliegenden Fall würde sich eine Auslegung der Beleuchtungseinheit auf Wellenlänge  $\lambda \sim 500\text{nm}$  mit einer daraus resultierenden Schärfentiefe aus  $\Delta d \sim 1,3\text{m}$  und  $P_L \sim 20\text{W}$  als guter Kompromiss anbieten.

Häufig wird ein Betrieb im nicht-sichtbaren infraroten Spektralbereich bei  $\lambda \sim 800\text{-}900\text{nm}$  gewünscht, da so die Blendung von Menschen vermieden werden kann



und die Fremdlichtausblendung (durch günstige IR-Filter) vereinfacht wird. Die Grafik zeigt, dass ein Betrieb in diesem Bereich von der erforderlichen Strahlleistung zwar möglich wäre, aber Einbußen in der erzielbaren Schärfentiefe zur Folge hätte die bei  $\lambda \sim 800\text{nm}$  auf  $\Delta d \sim 0,5\text{m}$  sinkt.

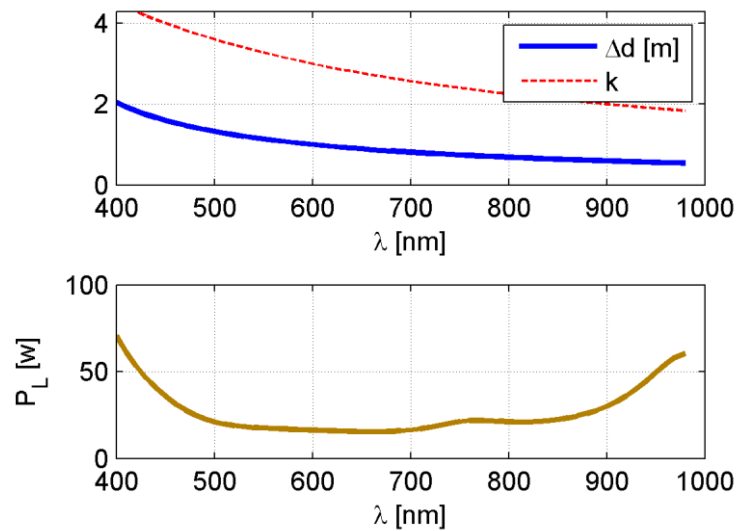


Abbildung 33: Abhängigkeit der Schärfentiefe  $\Delta d$  (oben) und der erforderlichen Beleuchtungsleistung (unten)  $P_L$  von der Lichtwellenlänge  $\lambda$ . Ein guter Kompromiss aus Schärfentiefe und Strahlleistung ergibt sich im Beispiel bei  $\lambda \sim 500\text{nm}$  mit  $\Delta d \sim 1,3\text{m}$  und  $P_L \sim 20\text{W}$ .

Abbildung 34: zeigt zum Vergleich noch einmal die Wellenlängenabhängige Quanteneffizienz  $QE(\lambda)$  des eingesetzten Bildsensors ICX274.

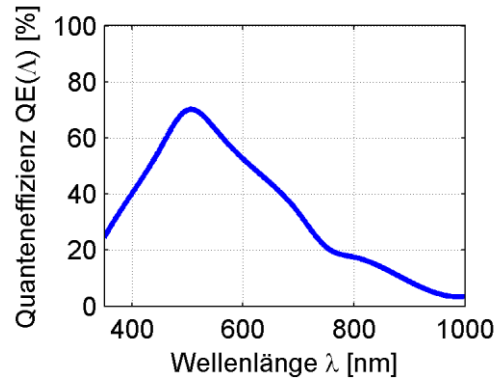


Abbildung 34: Wellenlängenabhängige Quanteneffizienz eines Sony ICX274 Bildsensors. Das Effizienzmaximum liegt bei etwa  $\lambda=500\text{nm}$ .<sup>141</sup>

Als nächstes soll die Auswirkung des Arbeitsabstandes  $g$  auf die erzielbare Schärfentiefe  $\Delta d$  und erforderliche Lichtleistung  $P_L$  betrachtet werden. Dazu wird für die Beispielkonfiguration eine Beleuchtungswellenlänge von  $\lambda=500\text{nm}$  festgesetzt und der Arbeitsabstand im Bereich  $g=0,5\dots 2,5\text{m}$  variiert. Abbildung 35 zeigt das Ergebnis.

Durch den Algorithmus wird die Brennweite  $f$  des Objektivs jeweils so gewählt, dass die vorgegebene absolute Auflösung  $R_a$  im Arbeitsabstand  $g$  erhalten bleibt. Demzufolge steigt die Brennweite mit dem Arbeitsabstand. Da dabei die Blendenzahl  $k$  gleich bleibt, erhöht sich proportional dazu der Durchmesser der Eintrittspupille. Es wird also ein größeres Objektiv benötigt, das darüber hinaus Kosten und Gewicht verursacht.

Dagegen steigt die erforderliche Strahlungsleistung  $P_L$  mit steigendem Abstand nur wenig an. Dies kann mit dem kleiner werdenden Bild- und dem daran gebundenen Beleuchtungswinkel  $\Omega_L$  begründet werden, wodurch sich auch bei steigendem Abstand die Strahlungsleistung  $P_L$  auf eine ähnlich große Fläche verteilt. Jedoch steigt auch bei der Beleuchtung mit dem Abstand der Aufwand, der betrieben werden muss, um die Strahlleistung in den sich verkleinernden Raumwinkel zu bündeln.

Weiter fällt auf, dass sich ein kleiner Abstand günstig auf die Schärfentiefe auswirkt. Um dies zu erklären, wurde neben der Schärfentiefe  $\Delta d$  zusätzlich der Fernpunkt  $d_f$  und Nahpunkt  $d_n$  eingezeichnet (blaue gestrichelte Linie). Bei sehr geringem Abstand  $g$  fällt der Fernpunkt  $d_f$  aufgrund der niedrigen Objektivbrennweite mit der hyperfokalen Entfernung  $d_h$  (vgl. Kap. 4.2.3) zusammen. Dies bedeutet, dass auch alle Strukturen hinter dieser Entfernung noch mit ausreichender Schärfe abgebildet werden, woraus sich letztlich eine unendliche Schärfentiefe ergibt.

Dieser scheinbare Vorteil ist tatsächlich ein Nachteil, da die hohe Schärfentiefe bei kleinen Arbeitsabständen und kurzen Brennweiten aus dem damit verbundenen

<sup>141</sup> Sony Inc. (2014)

großen Bildwinkel herrührt. Ein großer Bildwinkel ist gleichbedeutend mit einem starken abstandsabhängigen Abfall der absoluten Auflösung  $R_a$ , was in der Grafik durch deren Ableitung  $\Delta R_a$  dargestellt ist. Ein ähnlicher Effekt tritt beim abstandsabhängigen Abfall der Bestrahlungsstärke der Zielmarke  $\Delta E_T$  auf. Auch hier bedeutet ein großer Abstrahlwinkel der Beleuchtung, der bei kurzem Arbeitsabstand  $g$  erforderlich wäre, dass die Fläche, auf die sich  $P_L$  verteilt mit steigendem Abstand  $g$  schnell anwächst. Die Stärke der Auflösungsabnahme  $\Delta R_a$  ist reziprok zum Abstand  $g$ , die Stärke der Abnahme der Bestrahlung sogar reziprok zu  $g^3$  (vgl. Tabelle 8).

Während große Varianzen des absoluten Auflösungsvermögens entsprechende Schwankungen der Messauflösung zur Folge haben, führen die noch deutlich ausgeprägteren Schwankungen der Bestrahlungsstärke möglicherweise zur Überschreitung des Dynamikumfangs der Kamera (Über-/Untersteuerung bei kleinen/großen Abständen). Dementsprechend muss auch hier wieder ein sinnvoller Kompromiss zwischen gewünschtem Arbeitsabstand, Auflösung und noch tolerierbarer Auflösungs- und Helligkeitsvarianz gefunden werden.

Für die spätere Realisierung eines Versuchs-CPMS wurde ein mittlerer Arbeitsabstand von  $g=1m$  für günstig befunden, da sich hier ein guter Kompromiss zwischen Schärfentiefe  $\Delta d$  und  $\Delta R_a$  und  $\Delta E_T$  einstellt. Für die gewünschte absolute Auflösung  $R_a$  in diesem Abstand ergibt sich eine Brennweite von  $f=12mm$  die einem der marktgängigen festbrennweiten Objektiv entspricht. Der Schärfentiefebereich liegt bei  $\Delta d=1,3m$ , die Strahlleistung der Lichtquelle  $P_L \sim 22W$  kann mit LEDs im Blitzbetrieb noch realisiert werden (vgl. Kap. 4.5).

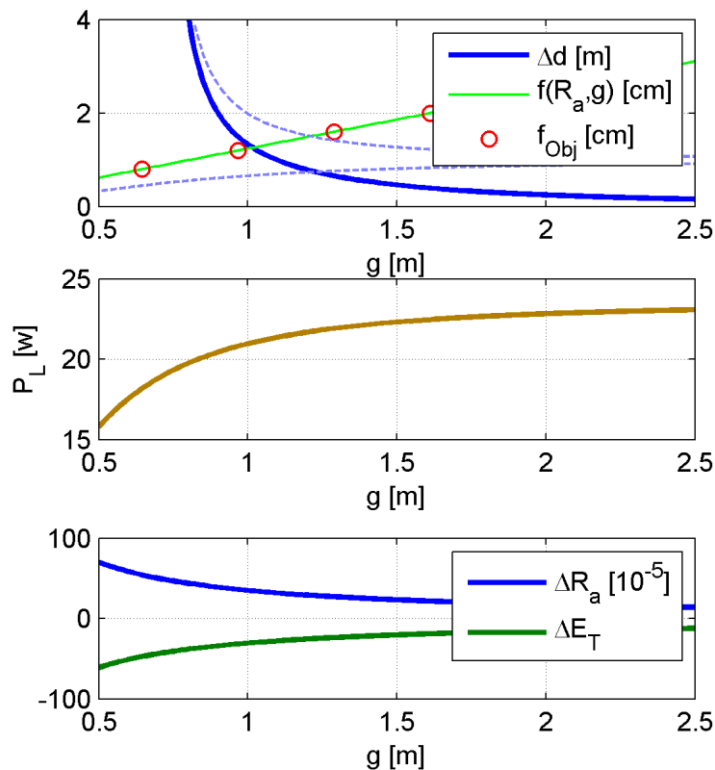


Abbildung 35: Einfluss des Arbeitsabstandes  $g$  auf die erreichbare Schärfentiefe  $\Delta d$  (oben), die notwendige Strahlleistung  $P_L$  und die Stärke der relativen Auflösungs- $\Delta R_a$  bzw. Helligkeitsabnahme  $\Delta E_T$  (unten). Im oberen Grafen sind zusätzlich Nah- und Fernpunkt (blau, gestrichelt) und die erforderliche Objektivbrennweite  $f$  (grüne Linie) nebst den marktverfügbaren Objektiven (rote Kreise) eingezeichnet.

#### 4.7.5 Einfluss der Pixelgröße

Aus Gründen der Vollständigkeit wird zuletzt noch der Einfluss der Pixelgröße des Bildsensors auf das Systemverhalten erörtert. Dazu wird die Pixelgröße  $S_P$  in einem Bereich von  $S_P = 1 \dots 10 \mu m$  variiert und die Auswirkungen auf Brennweite  $f$ , Blendenzahl  $k$ , Schärfentiefe  $\Delta d$  und die notwendige Strahlungsleistung  $P_L$  bestimmt.

Das Ergebnis zeigt Abbildung 36. Um einen gleich bleibenden Abbildungsmaßstab und absolute Auflösung  $R_a$  im Arbeitsabstand zu erreichen, muss die Brennweite  $f$  relativ zur Pixelgröße ansteigen. Gleichzeitig steigt jedoch die Blendenzahl  $k$  an, da größere Pixel auch größere beugungsbedingte Zerstreungskreise zulassen. So bleibt der Durchmesser der Objektiv-Eintrittspupille über den gesamten Variationsbereich nahezu konstant, woraus für ein entsprechendes Objektiv nur geringe Kosten und Gewichtssteigerung resultieren.

Auch die Schärfentiefe bleibt nahezu konstant, da der Effekt der Minderung durch die steigende Brennweite durch eine ebenfalls steigende Blendenzahl innerhalb des betrachteten Bereichs kompensiert wird. Die zur Auslösung einer Ladungsmenge  $q$  im Bildelement erforderliche Strahlungsleistung  $P_L$  bleibt ab einer Pixelgröße  $S_P$  von etwa  $3\mu\text{m}$  ebenfalls nahezu konstant.

Die Pixelgröße des eingesetzten Bildsensors beeinflusst also im Wesentlichen nur Brennweite  $f$  und Blendenzahl  $k$  des Objektivs, jedoch bleibt dabei die Eintrittspupille konstant. Die aufzubringende Strahlleistung  $P_L$  hängt nur geringfügig von der Pixelgröße ab.

Der Nachteil eines kleineren Bildsensors beschränkt sich damit auf das geringere Fassungsvermögen (Full well capacity,  $C_{FW}$ ) der Pixel für die von Quanten ausgelösten Elektronen, wodurch sich bei hinreichender Aussteuerung ein schlechterer Signal-Rausch-Abstand ergibt (vgl. Kap. 4.3.3). Dem gegenüber stehen die geringere Baugröße und Kosten.

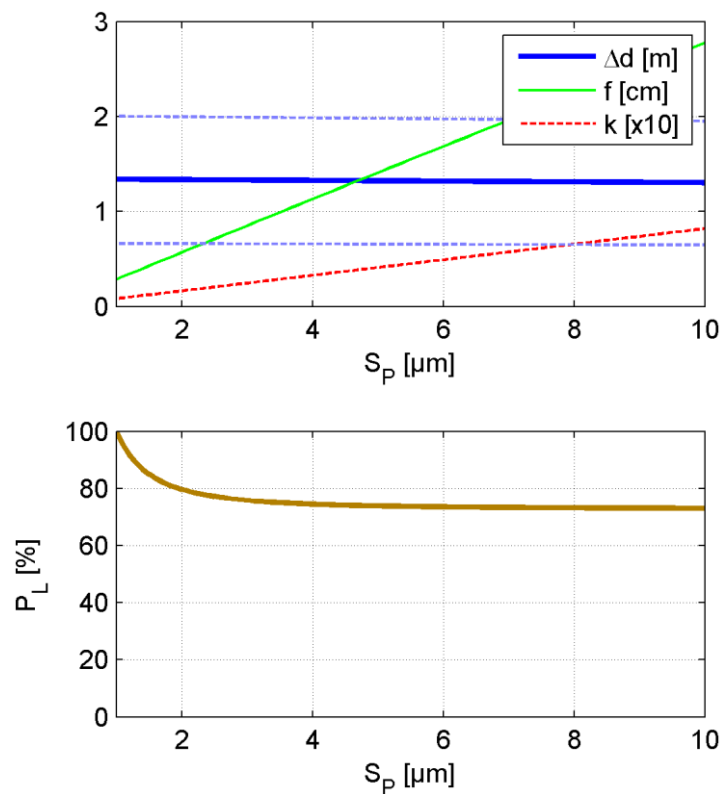


Abbildung 36: Abhängigkeit von Schärfentiefe  $\Delta d$ , Brennweite  $f$  und Blendenzahl  $k$  (oben) und der erforderlichen Strahlleistung  $P_L$  (unten) von der Pixelgröße  $S_P$ . Die Schärfentiefe wird durch die Pixelgröße kaum beeinflusst, die Strahlleistung  $P_L$  steigt nur bei  $S_P < 4\mu\text{m}$  nennenswert an. Die Brennweite  $f$  steigt mit  $S_P$ , aber auch die Blendenzahl  $k$ , mit dem Resultat, dass die Eintrittspupille  $D$  nahezu konstant bleibt.

#### 4.7.6 Wahl von Bildsensor, Optik und Beleuchtung

Auf Basis der erarbeiteten Verfahrensweise und der entstandenen Simulations-Software ist es nun möglich, sehr schnell die Realisierbarkeit einer Kamera-/Beleuchtungseinheit für bestimmte Vorgaben bezüglich zu verwendender Kamera, Arbeitsabstand, Auflösungsvermögen und weiteren Randbedingungen wie Schärfentiefe u. Ä. zu prüfen. Dabei hängt die einzusetzende Beleuchtungswellenlänge  $\lambda$  von der spektralen Empfindlichkeit des Bildsensors und der geforderten Schärfentiefe ab, die zu kleinen Wellenlängen hin ansteigt.

Die Wahl eines idealen mittleren Arbeitsabstandes  $g$  wird zu kleinen Abständen hin durch sehr große Bildwinkel eingeschränkt, die bei geringen Abstandsvariationen zu großen Auflösungs- und Helligkeitsschwankungen führen. Zu großen Abständen hin wird die Optik von Kamera und Beleuchtung durch steigende Brennweiten und den Aufwand zu Lichtbündelung größer und teurer und die erzielbare Schärfentiefe nimmt ab. Durch sehr kleine Bildwinkel fallen zudem kleinste Fehler und Schwankungen der Kameraausrichtung, verursacht z.B. durch Vibrationen, ins Gewicht. Ein sinnvoller Kompromiss ist hier den Arbeitsabstand unter Erfüllung der anwendungsspezifischen Vorgaben eher niedrig zu wählen, um Kosten und Größe einzusparen.

In CCD-Kameras eingesetzte Bildsensoren unterscheiden sich, je nach Chipgröße und Auflösung, in der Größe der Pixel. Hier konnte gezeigt werden, dass die Pixelgröße nur beschränkten Einfluss auf die Kamera-/Beleuchtungseinheit ausübt. Sensoren mit großen Pixeln erzielen bei ausreichender Aussteuerung bessere Signal-Rausch-Verhältnisse. Sensoren mit kleinen Pixeln sind dagegen kompakter bzw. erzielen höhere Pixeldichten und Auflösungen.

#### 4.7.7 Konfigurationsvorschlag einer Kamera-/Beleuchtungseinheit

An dieser Stelle sollen die Erkenntnisse aus Kapitel 4.7 zu einem optimierten Konfigurationsvorschlag für die in Kap. 4.4 beschriebene DMK23 Kamera zusammengefasst werden. Im Verlauf dieser Arbeit dient der Konfigurationsvorschlag als Grundlage zur Untersuchung von Bildmessverfahren und die Konstruktion von mehrkameranbasierten Pose-Messsystemen (vgl. Kap. 5 und 7).

Vorgegeben wird eine absolute Auflösung im Arbeitsabstand  $g=1\text{m}$  von  $R_d=0,3\text{mm}$ . Für die Pixelgröße  $S_p$  des Sony ICX274 Bildsensors ergibt sich aus dieser Vorgabe eine Objektivbrennweite von  $f=12\text{mm}$ , die bei der Sensordiagonalen von  $8,8\text{mm}$  in einem Bildwinkel von ca.  $40^\circ$  resultiert. Der Öffnungswinkel der Beleuchtung wurde um den Faktor zwei größer gewählt, da so auch bei einer Parallaxe zwischen Kamera und Lichtquelle eine saubere Ausleuchtung garantiert wird (vgl. Kap. 4.6.1).

Der beste Kompromiss zwischen erforderlicher Strahlleistung der Beleuchtung und der erzielbaren Schärfentiefe ergibt sich bei einer Beleuchtungswellenlänge von  $\lambda=500\text{nm}$  (vgl. Abbildung 33). Dabei wird die Blendenzahl  $k$  mit  $k=3.5$  so gewählt,

das bei einer Beleuchtung mit 500nm gerade so viel Beugungsunschärfe entsteht, dass im Bild Moiré Effekte durch eine Unterabtastung vermieden werden.

Die gewählten Parameter ergeben einen Schärfentiefebereich von etwa 0,7-2,0m (abzulesen aus Abbildung 35). Die optimierten Objektiv- und Beleuchtungsparameter zeigt Tabelle 9.

Tabelle 9: Optimierte Objektiv- und Beleuchtungs-Parameter einer Bildaufnahme-einheit auf Basis einer DMK273 Kamera.

Parameter	Wert	Anmerkung
$R_a$	0,3mm	Absolute Auflösung in $g$
$g$	1m	Optimaler Arbeitsabstand
$f$	12mm	Objektivbrennweite
$\alpha$	40,3°	Bildwinkel
$\kappa$	3,5	Blendenzahl
$\lambda$	500nm	Wellenlänge Beleuchtung
$P_L$	22W	Strahlleistung Beleuchtung für 50% Aussteuerung
$t_{exp}$	1ms	Belichtungszeit
$P_L t_{exp}$	0,022J	Blitzenergie

## 4.8 Kapitelzusammenfassung

Ein für ein CPMS geeignetes Bildaufnahmesystem stellt eine hohe Auflösung bei ausreichender Messfrequenz bereit, während die Beleuchtungseinheit das Bildfeld möglichst homogen ausleuchtet und den Bildsensor ausreichend aussteuert.

Diese Anforderungen können durch Auswahl eines geeigneten Bildsensors mit anschließendem Abgleich der Beleuchtungs- und Objektivparameter auf die anwendungsspezifische Messauflösung und den Arbeitsabstandsbereich erfüllt werden (vgl. Kap. 4.1).

Die Güte einer Bildmessung hängt unmittelbar mit der Güte des optischen Abbildungssystems zusammen. Für optimale Ergebnisse muss die optische Auflösung kleiner oder gleich der Bildsensorauflösung gewählt werden, da sonst Artefakte durch

Unterabtastung entstehen. Ein optimaler Abgleich der Auflösung von Optik und Sensor lässt sich bei monochromatischen Systemen durch Einstellung der Beugungunschärfe über die Objektivblende erreichen.

Während viele Abbildungsfehler hochwertiger Objektive (z.B. symmetrische Schärfefehler) unproblematisch sind, bewirkt die geometrische Verzeichnung unmittelbar einen systematischen Bildmessfehler. Da diese Form von Abbildungsfehlern konstruktiv nicht vollständig vermeidbar ist, wird ein Verzeichnungsmodell zur rechnerischen Korrektur benötigt. Ein zum Rand hin auftretender Abfall der Bildhelligkeit, der physikalisch bedingt ist und besonders bei kurzen Brennweiten auffällt, wird durch die rechnerische Beleuchtungskorrektur eliminiert (vgl. Kap. 4.2).

Stochastische und systematische Fehler der Bildwandlung mittels eines Bildsensors wie Bildrauschen, räumlich inhomogene Pixel oder Linearitätsfehler führen unmittelbar zu Fehlern der Bildmessung. Sie können durch Auswahl einer geeigneten Sensortechnologie und Betrieb des Sensors in einem linearen und rauscharmen Aussteuerbereich minimiert werden. Passive CCD-Sensoren mit synchroner elektronischer Belichtungssteuerung liefern zum aktuellen Zeitpunkt räumlich homogenere und rauschärmere Bilder als verfügbare Aktive-Pixel-Sensoren und sind daher zum Aufbau eines CPMS besser geeignet (vgl. Kap. 4.3).

Zur Evaluierung von Sensor- und Optikmodell wurden Rauschverhalten und Linearität einer realen CCD-Kamera untersucht. Das Verhalten war in Einklang mit dem linearen Sensor-Modell. Erst ab einer Aussteuerung über 80% wurde ein nennenswerter Linearitätsfehler erkennbar, so dass dieser Bereich im Betrieb gemieden werden sollte (vgl. Kap. 4.4.2).

Eine ungleichmäßige Ausleuchtung bewirkt einen Fehler der Bildmessung. Eine homogene Bildfeldausleuchtung ist mit vertretbarem Aufwand jedoch nicht zu erreichen, ein konzentrischer Abfall der Bestrahlungsstärke hin zum Bildfeldrand muss toleriert und später rechnerisch korrigiert werden. Eine Schattenbildung durch Fremdobjekte im Strahlengang zwischen Lichtquelle und Zielmarke kann durch Minimierung der Parallaxe zwischen Kamera- und Lichtachse verhindert werden. Dazu wird die Lichtquelle in unmittelbarer Nähe des Kameraobjektivs montiert. Als Lichtquelle eignen sich LEDs wegen ihrer guten Steuerbarkeit und Impulsbelastbarkeit, sowie ihrer Monochromität und Kompaktheit bei gleichzeitig hoher Strahlleistung. Eine Fremdlichtunterdrückung von bis zu 99% kann durch Konzentration der Belichtung auf ein schmales spektrales und zeitliches Fenster mittels Farbfiltern und LED-Blitz erreicht werden (vgl. Kap. 4.5).

Durch Modellbildung auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wurde eine vollständige realitätsnahe Simulation der Bildaufnahme ausgehend von der Lichtquelle über die Zielmarke, ihrer Abbildung auf dem Bildsensor bis hin zur Bildwandlung implementiert.

Mithilfe der Simulation können unter Vorgabe von gewünschtem Bildsensor, Arbeitsabstand und Auflösung die Parameter von Beleuchtung und Objektiv berechnet werden. Diese werden dazu auf optimale Leistung des Bildaufnahmesystems für die spätere Bildmessung optimiert, wobei zugleich Randfaktoren wie Konstruktionsaufwand und Kosten Beachtung finden.



Zuletzt wird ein Konstruktionsvorschlag für ein Beispielsystem gegeben. An diesem soll zunächst die Kamerakalibrierung (vgl. Kap. 5) evaluiert werden. Später dient er als Grundlage zur Evaluation von Mehrkameranensystemen (vgl. Kap. 4.6., 7).



---

## 5 PHOTOGRAMMETRISCHE ZIELMARKEN UND BILDMESSUNG

Wichtige Grundlage einer sehr genauen kamerabasierten Positionsmessung ist eine hochpräzise Bildmessung: Mittels der Bildmessung wird das Abbild einer Referenzstruktur angetastet und ihre Bildkoordinate bestimmt.

Besonders gute Ergebnisse lassen sich mit künstlichen Referenzstrukturen erreichen, die auf hohe Robustheit (z.B. gegen unterschiedliche Lichtsituationen) und Antastgenauigkeit ausgelegt sind und in Kombination mit einem passenden Bildmessalgorithmus verwendet werden. Wird eine Gruppe von Referenzstrukturen auf einen gemeinsamen Träger aufgebracht, so kann durch statistische Mittelwertbildung der Fehler weiter vermindert werden. Es entsteht eine photogrammetrische Zielmarke.

Eine gleichermaßen präzise und ausgereifte Technik zur Bildmessung wird in der Open-Computer-Vision (CV) Softwarebibliothek angewendet (vgl. Kap. 5.2). Das Verfahren reagiert jedoch empfindlich auf inhomogene Ausleuchtung des Bildfeldes und Bewegungsunschärfe, wodurch systematische Bildmessfehler auftreten. Diese Systematik wirkt besonders nachteilig, da so statistische Verfahren zur Senkung des mittleren Messfehlers ihre Wirkung verlieren (vgl. Kap. 5.3.5).

Um die Nachteile inhomogener Ausleuchtung zu beseitigen, werden Algorithmen zur Beleuchtungshomogenisierung entwickelt. Diese werden auf Grundlage der Kamerasimulation (vgl. Kap. 4.6) evaluiert und auf erfolgreiche Unterdrückung systematischer Bildmessfehler geprüft (vgl. Kap. 5.4). Weiter wird eine Methode zur Kompensation des durch Bewegungsunschärfe bewirkten Messfehlers entwickelt (vgl. Kap. 5.5).

### 5.1 Typen von Zielmarken

Der Begriff *photogrammetrische Zielmarke* (engl. *photogrammetric target*) bezeichnet künstliche Objekte, die zur Signalisierung von Referenzkoordinatensystemen in eine Szene eingebracht werden. Eine solche Marke liefert hierzu im Bild sichtbare Referenzpositionen, deren Lagen mit einer sog. *Bildmessung* mit hoher Präzision (i.d.R. subpixelgenau) bestimmt werden können (vgl. auch Kap. 2.3.5 u. 3.1.2).

Zielmarken unterscheiden sich in einer Reihe von Eigenschaften. Üblicherweise werden sie als *planes* (ebenes) Objekt ausgelegt, auf dem mindestens eine, in der Regel jedoch ein Raster von Referenzstrukturen aufgebracht ist. Seltener anzutreffen sind dreidimensionale Formen, z.B. als bedruckter Winkel. Die Referenzmarkierungen bilden einen starken optischen Kontrast zum Markenhintergrund und werden meist als Farbaufdruck aufgebracht. Möglich ist auch eine Auslegung als retroreflektierende Flächen oder als aktive Referenzpunkte (z.B. in Form eines LED-Rasters). Nachteil sind hier deutlich höhere Fertigungskosten. Retromarken sind darüber hinaus für

hochgenaue Messungen nicht geeignet, da die (scheinbare) Lage des Bezugspunkts mit der Beleuchtungsrichtung variiert.<sup>142</sup>

Die geometrische Form der Referenzpunkte hängt von dem für die Lokalisierung eingesetzten Bildmessverfahren ab. Es sind zahlreiche Varianten denkbar. Als Bezugsobjekte werden u.A. Punkte, Kreise oder Kreuzungen von Linien verwendet.

Die (subpixelgenaue) Lage eines Punktes kann durch einfache Bestimmung des geometrischen Schwerpunktes im Grauwertbild ermittelt werden. Durch die relativ niedrige Punktfläche ist bei diesem Verfahren jedoch geringe Robustheit gegen Bildrauschen zu erwarten.<sup>143</sup>

Kreismuster erscheinen durch die fotografische Abbildung perspektivisch verzerrt. Die Lagebestimmung im Bild erfolgt durch einen subpixelgenauen Ellipsenfit, was einer Näherung der perspektivischen Abbildung durch eine affine Abbildung gleich kommt. Dadurch kann es zu einem geringen Versatz zwischen Ellipsenzentrum und tatsächlichem Zentrum des projizierten Kreises kommen, abhängig von Aufnahmeabstand- und Objektivparametern.<sup>144</sup>

Dieses Problem vermeiden Zielmarken, deren Bezugspunkte durch den Schnittpunkt zweier Linien definiert werden. Zu dieser Variante gehört insbesondere die in dieser Arbeit eingesetzte Schachbrettform, wobei die Linien und Kreuzungspunkte hier erst im Kantenbild sichtbar werden.<sup>145</sup>

Abbildung 37 zeigt typische Varianten punktförmiger, kreisförmiger und linienhafter Zielmarkenstrukturen.

---

<sup>142</sup> Vgl. Luhmann (2010, 218)

<sup>143</sup> Vgl. Hanning (2011, 110)

<sup>144</sup> Vgl. Kannala (2006)

<sup>145</sup> Vgl. Luhmann (2010, 223)

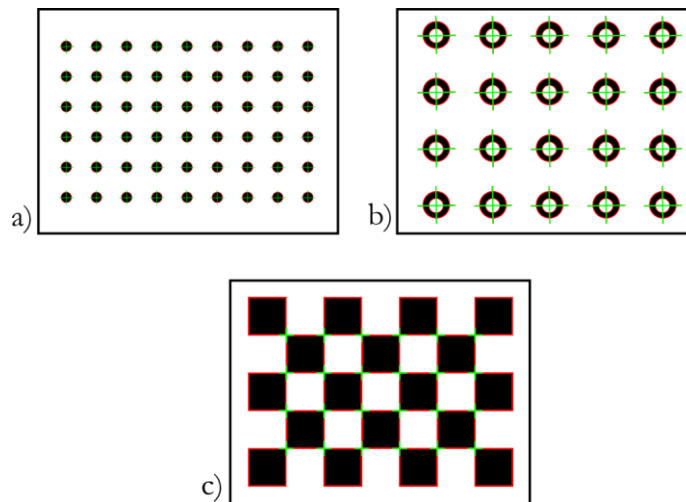


Abbildung 37: Typische Varianten punktförmiger a), kreisförmiger b) und linienhafter Zielmarken c). Die grünen Kreuze kennzeichnen die Bezugspunkte. Rote Linien markieren die Objektkanten.

Bei gleichzeitigem Einsatz mehrerer Zielmarken kann eine eindeutige Identifikation hilfreich sein, was in einfacher Weise durch Aufbringung eines maschinenlesbaren Codes erfolgen kann. Dazu wird auf der Markenfläche eine Zusatzstruktur, z.B. in Form eines 2D-Barcodes, eingebracht. Bei Einsatz von Codes mit Fehlererkennung oder Vorwärtsfehlerkorrektur, ist eine Fehldecodierung nahezu ausgeschlossen.<sup>146</sup>

## 5.2 Bildmessverfahren in Open-CV

Die Open-Computer-Vision<sup>147</sup> Bibliothek implementiert mit der Funktion `cornerSubpix()` ein Bildmessverfahren für schachbrettförmige Zielmarken, das einerseits auf aktuellem technischen Stand ist und andererseits durch Verwendung prozessoroptimierter Unterbibliotheken hocheffizient umgesetzt wurde. Das Verfahren stellt letztlich einen subpixelgenauen Detektor für sich überkreuzende Kanten dar.

Zur Messung werden zunächst die äußeren Ecken des Musters durch einen Suchalgorithmus grob (auf einige Pixel genau) lokalisiert. Aus den vier Eckpunkten können alle weiteren Kreuzungspunkte durch eine Perspektiventransformation geschätzt werden. Diese Schätzung dient als Startwert für die subpixelgenaue Bildmessung, die auf den Gradienten (dem Kantenbild) durchgeführt wird.

Zur Berechnung des horizontalen bzw. vertikalen Gradienten aus einem Grauwertbild  $g(i,j)$  nutzt man in der Bildverarbeitung einen Kantenfilter, z.B. in Form des

<sup>146</sup> Vgl. Kreutzer (2007a, 27), Kreutzer (2009)

<sup>147</sup> vgl. Willow Garage (2015)

sog. *Sobel-Operators*<sup>148</sup>. Die Berechnung der horizontalen bzw. vertikalen Kanten erfolgt durch die Faltung des Bildes mit dem zugehörigen Sobel-Filterkern  $\mathbf{S}_x$  bzw.  $\mathbf{S}_y$ . Das Ergebnis sind die beiden Gradientenbilder  $g_x$  und  $g_y$ , welche die partiellen Ableitungen von  $g$  in X- und Y-Richtung enthalten und zusammengefasst als Vektorfeld  $\nabla \mathbf{g}$  betrachtet werden können:

$$\nabla \mathbf{g} = \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g * \mathbf{S}_x \\ g * \mathbf{S}_y \end{bmatrix}^T \quad \text{mit } \mathbf{S}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad \text{und } \mathbf{S}_y = (\mathbf{S}_x)^T \quad (5.1)$$

Aufgrund von Bildrauschen und Unschärfe erfolgt eine subpixelgenaue Bildmessung über eine größere Gruppe von Bildpunkten innerhalb eines bestimmten Suchfensters. Gesucht wird der Punkt  $q(x,y)$  als (idealer) Kreuzungspunkt zweier Kanten, wie sie z.B. an den Stoßpunkten zweier Schwarzfelder eines Schachbrettmusters vorliegen. Abbildung 38 a) zeigt eine vergrößerte Darstellung eines entsprechenden Bildausschnitts. Die blauen Pfeile deuten die Richtung des Bildgradienten an und zeigen in Richtung ansteigender Helligkeit: Es ist zu erkennen, dass die Gradienten außerhalb des zentralen Unschärfebereichs senkrecht auf den Kanten stehen. Bildrauschen beeinflusst lokal die Gradientenrichtung, jedoch trifft die Aussage im statistischen Mittel immer noch zu, so dass Rauscheffekte durch Betrachtung eines ausreichend großen Fensters eliminiert werden können.

Abbildung 38 b) demonstriert die Entwicklung eines entsprechenden mathematischen Ansatzes. Der Punkt  $\mathbf{p}_k = (x_k, y_k)$  adressiert den Ort des  $k$ -ten Punktes, innerhalb des  $m \times n$  großen Suchfensters. Wählt man für  $\mathbf{p}_k$  einen Punkt auf einer Kante und bildet von diesem Punkt einen Vektor zum gesuchten Punkt  $\mathbf{q}$ , so steht der Vektor  $\overrightarrow{\mathbf{p}_k \mathbf{q}}$  orthogonal zum Gradienten am Punkt  $\mathbf{p}_k$ . Numerisch lässt sich diese Beziehung durch das Skalarprodukt  $\nabla \mathbf{g}_k \cdot (\mathbf{q} - \mathbf{p}_k) = 0$  beschreiben.

---

<sup>148</sup> vgl. Jähne (2012, 388)

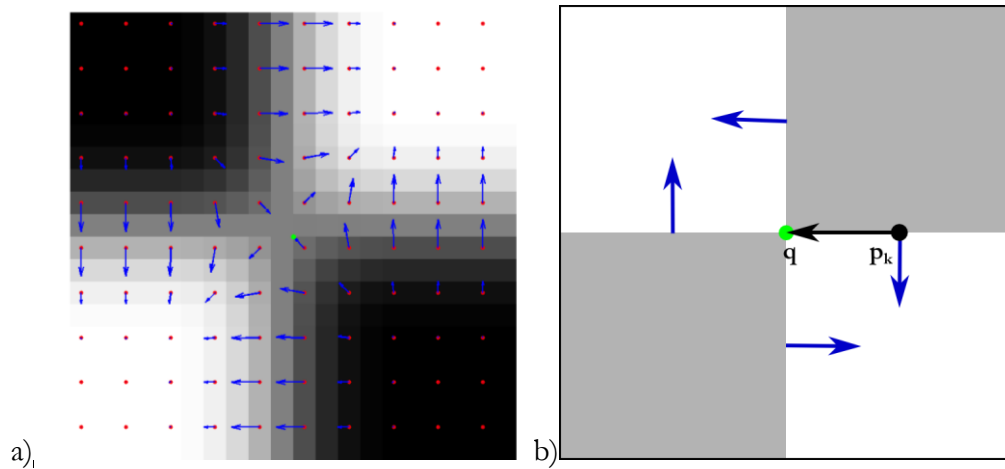


Abbildung 38: a) Vergrößertes Suchfenster der Subpixelinterpolation mit angedeutetem Gradienten (blaue Pfeile) und b) schematische Darstellung des Ansatzes. Alle

Vektoren  $\mathbf{p}_k \mathbf{q}$  stehen orthogonal zum Gradienten an der Stelle  $p_k$ .

Um den optimalen Punkt  $q(x,y)$  mittels einer Ausgleichsrechnung zu bestimmen, wird auf Basis des Skalarprodukts eine Fehlerfunktion aufgestellt.

$$\begin{aligned} \varepsilon_k &= \nabla \mathbf{g}_k \cdot (\mathbf{q} - \mathbf{p}_k) \\ \sum_k \varepsilon_k &= \sum_k \nabla \mathbf{g}_k \cdot (\mathbf{q} - \mathbf{p}_k) \rightarrow \min! \end{aligned} \quad (5.2)$$

Dabei ist die Lage von Punkt  $q$  gerade dann optimal, wenn die Summe der Einzelfehler für alle Punkte  $\mathbf{p}_k$  eines Suchfensters minimal wird. Diese Annahme ist korrekt, weil die Größe des Skalarprodukts neben der Orthogonalität von den Beträgen der beteiligten Vektoren abhängt. Liegt ein Punkt außerhalb des Bereichs einer Kante (in einem „flachen“ Gebiet), so ist der Betrag des Gradientenvektors an dieser Stelle sehr klein und so auch das Skalarprodukt. Punkte auf Kanten werden damit stärker gewichtet, während Punkte außerhalb von Kanten nur geringen Beitrag zur Fehlerfunktion leisten.

Zur Lösung der Optimierungsaufgabe wird die Fehlerfunktion als überbestimmtes lineares Gleichungssystem formuliert und der Punkt  $\mathbf{q}$  mittels eines geeigneten Lösungsverfahrens bestimmt. Dazu kann aus den  $K$  Gradientenvektoren die Koeffizientenmatrix  $\mathbf{G}$  aufgebaut werden:

$$\text{LGS: } \mathbf{G}\mathbf{q} - \mathbf{b} = \mathbf{0}$$

$$\text{mit } \mathbf{G} = \begin{bmatrix} \nabla \mathbf{g}_1^T \\ \vdots \\ \nabla \mathbf{g}_K^T \end{bmatrix} \text{ und } \mathbf{b} = \begin{bmatrix} \nabla \mathbf{g}_1 \cdot \mathbf{p}_1 \\ \vdots \\ \nabla \mathbf{g}_K \cdot \mathbf{p}_K \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Da die zu Grunde gelegte Beziehung nicht völlig linear ist, wird im nächsten Schritt das Suchfenster um den neu berechneten Punkt  $\mathbf{q}$  zentriert und die Berechnung erneut durchgeführt. Es wird so lange iteriert, bis sich die Position von  $q$  nicht mehr ändert, bzw. die Änderung unterhalb einer vorgegebenen Fehlerschranke bleibt.

Der so entstandene Algorithmus zur subpixelgenauen Bildmessung ist durch die Mittelung über zahlreiche Bildpunkte weniger anfällig für Bildrauschen und in der Lage, mit leichten Bildunschärfen umzugehen. Wichtige Einstellparameter sind die Größe des Suchfensters und eines zentralen Ausschlussbereichs. Ein größeres Suchfenster erhöht die Anzahl der für eine Bestimmung von  $q$  betrachteten Bildpunkte und verbessert so die Rauschunterdrückung (vgl. Kap. 5.3.3). Ein zu großes Suchfenster kann jedoch auch negative Auswirkungen haben, da der Algorithmus empfindlich auf Helligkeitsschwankungen reagiert. Diese wirken wie ein überlagerter Gradient, der jedoch in keiner Beziehung zu den beobachteten Kanten steht und somit das Ergebnis verfälscht (vgl. Kap. 5.3.5).

Der Bildbereich in unmittelbarer Nähe eines Kreuzungspunktes ist durch Unschärfe so verfälscht, dass an dieser Stelle keine korrekten Gradienten- bzw. Kantenrichtungen abgeleitet werden können. Daher kann es sinnvoll sein, diesen zentralen Bereich aus der Berechnung auszuschließen (Ausschlussfenster). Eine sinnvolle Größe des Ausschlussfensters kann z.B. durch Schätzung der Bildschärfe (vgl. Kap. 5.4.2) bestimmt werden.

Der oben besprochene Algorithmus wurde in Form einer Matlab-Funktion nachimplementiert und dient als Referenzalgorithmus für die folgenden Untersuchungen zur Bildmessung auf Basis des Kamerasimulators.

### 5.3 Analyse von Fehlereinflüssen der Bildmessung

Subpixel-genaue Bildmessverfahren wie der Open-CV Algorithmus können als modellbasierte Interpolationsverfahren verstanden werden, die die Lage eines Referenzpunktes im Bild durch Analyse des Helligkeitsverlaufs in dessen Umgebung bestimmen. Dazu wird die Annahme getroffen, dass sich der Helligkeitsverlauf über einer Zielmarke proportional zu deren Rückstreuvermögen (*Albedo*<sup>149</sup>) verhält.

Diese Voraussetzung kann in der Praxis nicht zu 100% geschaffen werden. Der Hauptgrund liegt darin, dass eine völlig gleichmäßige (homogene) Ausleuchtung der

<sup>149</sup> Albedo bezeichnet das Rückstrahlungsvermögen von nicht selbstleuchtenden, diffus reflektierenden Oberflächen.



Szene mit vertretbarem Aufwand der Beleuchtungseinheit nicht erreichbar ist (vgl. Kap. 4.5.1). Weitere Fehler in der Helligkeitswiedergabe eines Bildes entstehen durch die Abbildungsoptik der Kamera, aufgrund von Effekten wie der Randabschattung (Vignettierung) oder dem Randlichtabfall (vgl. Kap. 4.2.5). Zuletzt bringt der Bildsensor durch Bildrauschen, Linearitätsfehler oder inhomogene Pixel Helligkeitsfehler ein (vgl. Kap. 4.3.2).

In Summe entsteht durch die genannten Fehler eine Abweichung vom Modell, wodurch die Interpolationsfunktion des Bildmessverfahrens die Realität nur mehr unzureichend wiedergibt und ein Bildmessfehler entsteht, der für hochpräzise Messungen oft nicht tolerierbar ist. Um den Bildmessalgorithmus verbessern zu können, wird mit Hilfe des Bildaufnahmesimulators (BAS, vgl. Kap. 3.3.3 u. 4.6.2) zunächst untersucht, in welcher Weise die einzelnen Faktoren wie Beleuchtungsinhomogenität oder Bildrauschen den Bildmessfehler beeinflussen.

### 5.3.1 Formulierung des Bildmessfehlers

Der Bildmessfehler  $g$  wird als Abweichung  $\Delta \mathbf{x} = (\Delta x; \Delta y)^T$  von der korrekten Bildposition  $\mathbf{x} = (x; y)^T$  definiert. Der Fehler selbst kann als Summe einer statistischen Rauschkomponente  $\mathbf{r}$  und einer systematischen Fehlerkomponente  $\mathbf{s}$  beschrieben werden:

$$\Delta \mathbf{x} = \mathbf{r} + \mathbf{s}. \quad (5.4)$$

### 5.3.2 Ansätze zur Analyse und Reduzierung des Bildmessfehlers

Die Standardabweichung  $\sigma$  des Rauschterms  $\mathbf{r}$  kann durch Mittelung über eine Anzahl  $N$  Einzelmessungen um den Faktor  $\sqrt{N}$  gemindert werden (unter Annahme einer Gaußverteilung). Typisch wird ein Schachbrett mit etwa 100 inneren Kreuzungspunkten eingesetzt, so dass der Schwerpunkt  $\mathbf{c}$  der Zielmarke mit einem 10-fach niedrigeren Rauschen erfasst wird als eine Einzelmessung.

Problematischer ist die systematische Fehlerkomponente  $\mathbf{s}$ . Da jede Einzelmessung mit diesem Fehler belegt ist, oder zumindest eine Korrelation vorliegt, kann der Gesamtfehler nicht mehr durch eine Ausgleichung über mehrere Teilmessungen gemindert werden. Aus diesem Grunde müssen systematische Bildmessfehler möglichst kompensiert werden, z.B. durch eine Ausleuchtungshomogenisierung (vgl. Kap. 5.4).

Die Bestimmung der systematischen Komponente am realen Kamerabild ist schwierig, da Position und Ausrichtung von Beleuchtung, Kamera und Zielmarke zueinander nicht mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden können. Auch die kontrollierte Änderung der Ausleuchtung ist schwierig.

Aus diesen Gründen wird mit Hilfe des Bildaufnahmesimulators (vgl. Kap. 4.6) unter kontrollierten Bedingungen die Bildaufnahme simuliert und das Zusammenspiel

des Systems aus Beleuchtung, Zielmarke und Kamera analysiert. Insbesondere ist so die exakte Lage der Zielmarkenreferenzpunkte auf der Bildebene bekannt, was einen direkten Vergleich mit dem Ergebnis des Bildmessverfahrens ermöglicht. Simuliert wird mit der in Kap. 4.7.7 vorgeschlagenen Konfiguration aus Kamera und Beleuchtungseinheit.

### 5.3.3 Auswirkung des Bildrauschens

Zunächst wird die Auswirkung des Bildrauschens auf die Messunsicherheit des in Kap. 5.2 beschriebenen Bildmessverfahrens untersucht. Dazu wird die Aufnahme einer Zielmarke mit unterschiedlicher Kameraaussteuerung simuliert und jeweils eine Bildmessung durchgeführt. Abbildung 39 zeigt exemplarisch einen Vergleich mit 100%<sup>150</sup> Aussteuerung (links) und 10% Aussteuerung (rechts).

Die grünen Kreuze auf der Zielmarke zeigen die korrekten Lagen der Referenzpunkte. Die roten Pfeile zeigen Betrag und Richtung des Messfehlers  $\Delta\mathbf{x}$  für jede Einzelmessung, wobei die Länge eines Pfeils dem 200-fachen Fehler entspricht. Die beiden unteren Diagramme zeigen die Streuung des Fehlers für die einzelnen Messpunkte. Das blaue Kreuz signalisiert den Schwerpunkt  $\mathbf{c}$  der Punktwolke, der dem Mittel aller Einzelpunkte entspricht. Ein deutlich außermittiger Schwerpunkt ist ein Indikator für das Vorhandensein systematischer Fehlereinflüsse. Im vorliegenden Beispiel wird der Schwerpunkt unabhängig vom Messrauschen nahe des Nullpunkts ermittelt. Der erhöhte Messfehler durch die zu niedrige Kameraaussteuerung ist demnach rein statistischer Natur.

---

<sup>150</sup> Im linearen Simulationsmodell darf im Gegensatz zur realen Kamera auf >80% ausgesteuert werden.

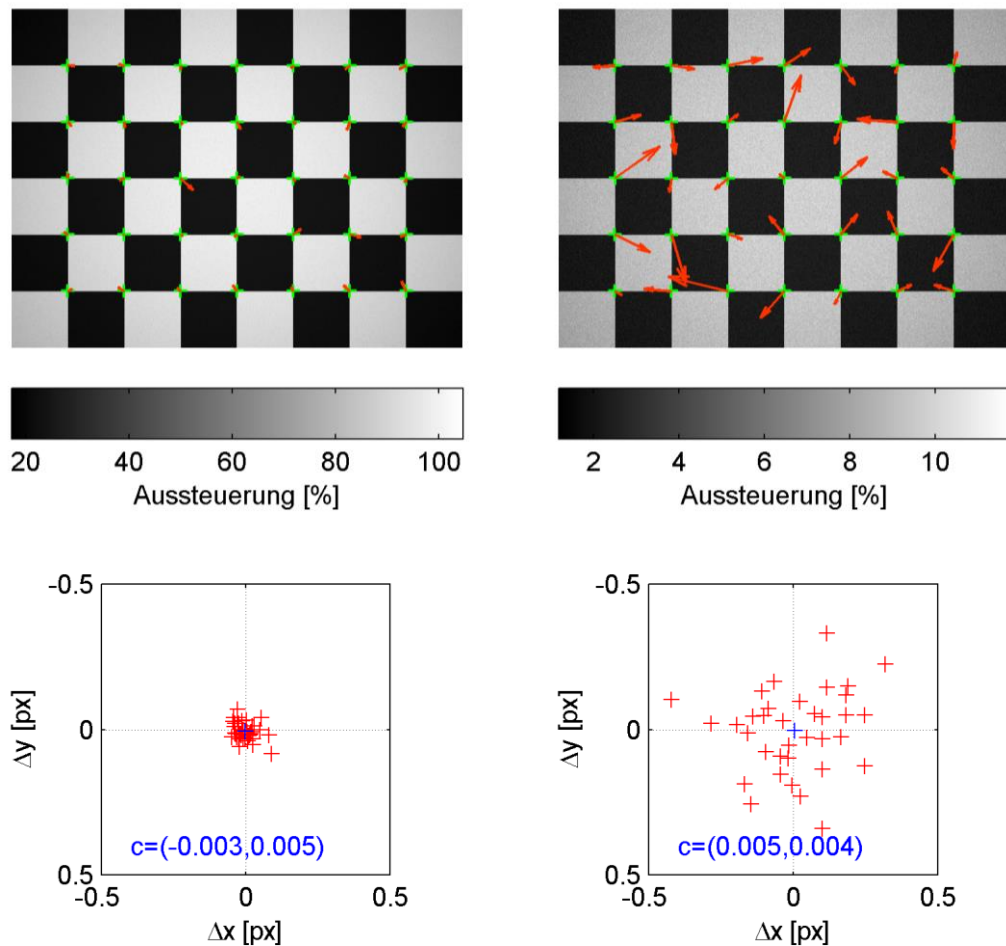


Abbildung 39: Auswirkung der Kameraaussteuerung auf die Messunsicherheit bei der Bildmessung. Die roten Pfeile (oben) zeigen qualitativ die Abweichung der gemessenen von der korrekten Bildposition für eine Aussteuerung von 100% (links) bzw. 10% (rechts). Die unteren beiden Abbildungen zeigen den Fehler  $\Delta x$  und  $\Delta y$  der Messpunkte mit Schwerpunkt  $\mathbf{c}$ .

Abbildung 40 zeigt die Standardabweichung der Bildmessung für Kameraaussteuerungen zwischen 0 - 100%. Es ist zu erkennen, dass das Positionsrauschen mit steigender Aussteuerung zunächst stark abfällt und sich dann asymptotisch der Nulllinie nähert. Hier liegt die Vermutung nahe, dass das Rauschen der Bildmessung mit dem Poisson-Rauschen (vgl. Kap. 4.3.3) des Bildsensors korreliert, das reziprok zur

Wurzel der Aussteuerung abnimmt. Im Bereich einer vernünftigen Kameraaussteuerung liegt der Bildmessfehler hier bei  $\sigma < 0,1$  Pixel. Diese Beobachtung deckt sich sehr gut mit Daten einer realen Kamera dieses Typs (vgl. Kap. 6.3.6).

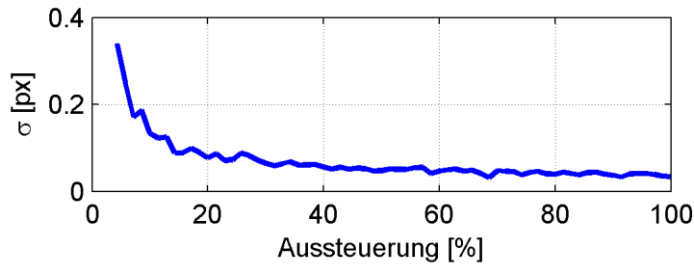


Abbildung 40: Standardabweichung  $\sigma$  einer Bildmessung (oben) über 48 Punkte einer Zielmarke, in Abhängigkeit zur Aussteuerung des Bildsensors.

### 5.3.4 Auswirkung inhomogener Ausleuchtung im allgemeinen Fall

Die von der Kamera wahrgenommene Leuchtdichte einer beleuchteten (planen) Zielmarke hängt u.A. von deren Rückstreuvermögen (Albedo) und der ortsbezogenen Bestrahlungsstärke ab (vgl. Kap. 4.5). Die Konstruktion einer homogenen Beleuchtung ist aufwendig und soll daher vermieden werden. Verwendet wird stattdessen eine Punktlichtquelle mit Bündeloptik, die gut realisierbar ist, jedoch ungleichmäßig (inhomogen) ausleuchtet.

Um die Auswirkung von Bestrahlungsgradienten (also Anstiege oder Abfälle) der Helligkeit auf die Subpixelinterpolation zu erklären, soll repräsentativ ein einfacher Algorithmus zur Lokalisation von Kantenlagen betrachtet werden. Diese didaktische Vereinfachung ist zulässig, da die Auswirkungen auf den OpenCV-Algorithmus analog sind, wie später noch gezeigt wird.

Abbildung 41 zeigt die subpixelgenaue Antastung einer vertikalen Kante. Dazu werden aus dem Beispielbild (links) eine Reihe von Pixeln entlang einer senkrechten Linie zur betrachteten Kante extrahiert und in ein Diagramm (rechts) eingezeichnet. Um die Kantenmitte zu lokalisieren, wird das Extremum der 1. Ableitung (blaue gestrichelte Linie) bestimmt, dessen Ort durch die Nullstelle der 2. Ableitung definiert ist (rote gestrichelte Linie). Zur schnellen subpixelgenauen Bestimmung des Extremums, wird eine Interpolationsfunktion (hier ein Polynom 3. Grades) in die Pixelgruppe eingepasst und die Nullstelle der 2. Ableitung (grüner Kreis) bestimmt.

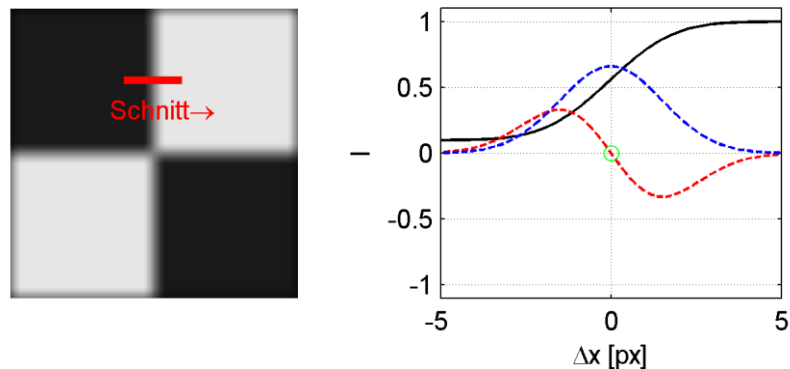


Abbildung 41: Subpixel genaue Antastung einer vertikalen Kante. Dazu werden Pixel orthogonal zur Kante (links) in ein Diagramm eingezeichnet (rechts). Die Kantenmitte entspricht dem Extremum der 1. Ableitung (blaue Linie) bzw. der Nullstelle (grüner Kreis) der 2. Ableitung (rote Linie).  $\Delta x$  ist die Position relativ zur Kantenmitte,  $I$  stellt die auf 1 normierte Helligkeit dar.

Als nächstes betrachten wir die Auswirkung einer räumlich inhomogenen Beleuchtungsstärke auf die Kantenfunktion. Nach Gl. (4.29) ist die Leuchtdichte (radiometrisch auch Strahlungsdichte) einer diffus rückstreuenden Fläche proportional dem Produkt aus Bestrahlungsstärke  $E$  und der Albedo  $a$ :  $L \sim a \cdot E$ . Der Bildsensor der Kamera setzt diese Leuchtdichte  $L$  wiederum in einen proportionalen Helligkeitswert  $I$  um. Damit kann das aufgenommene Bild als Produkt zweier Teilbilder, nämlich einem Projektionsbild (Beleuchtung) und einem Remissionsbild (Albedo z.B. einer Zielmarke) interpretiert werden.

Abbildung 42 zeigt den von der Kamera aufgenommenen Kantenverlauf mit gleichmäßiger Ausleuchtung (links) und in x-Richtung ansteigender Beleuchtungsstärke  $E$  (rechts). Dabei ist  $I$  proportional dem Produkt aus Bestrahlung  $E$  und Albedo  $a$ . Die gelb gestrichelte Linie symbolisiert die Bestrahlungsstärke.

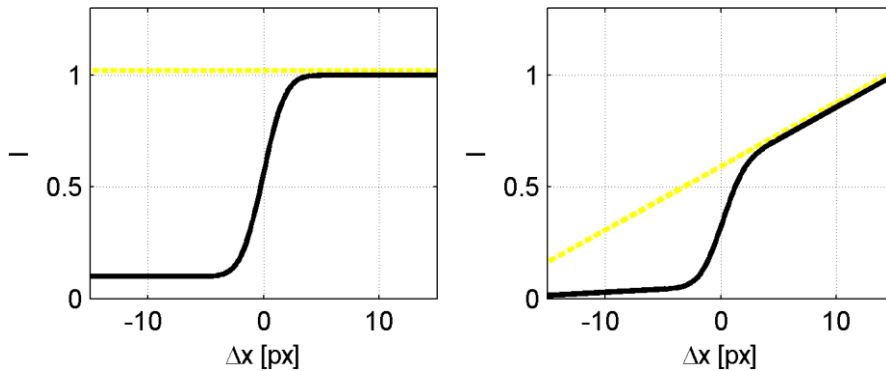


Abbildung 42: Vergleich der Intensität  $I$  über einem homogen beleuchteten Dunkel-/Hellübergang (links) und einem Übergang mit ansteigender Beleuchtungsstärke (rechts).

Führt man nun auf dem Gradienten des inhomogen ausgeleuchteten Bildes erneut eine Kantenantastung durch wie in Abbildung 43 gezeigt, so wird die Kante mit einem Fehler  $\Delta x$  bestimmt.

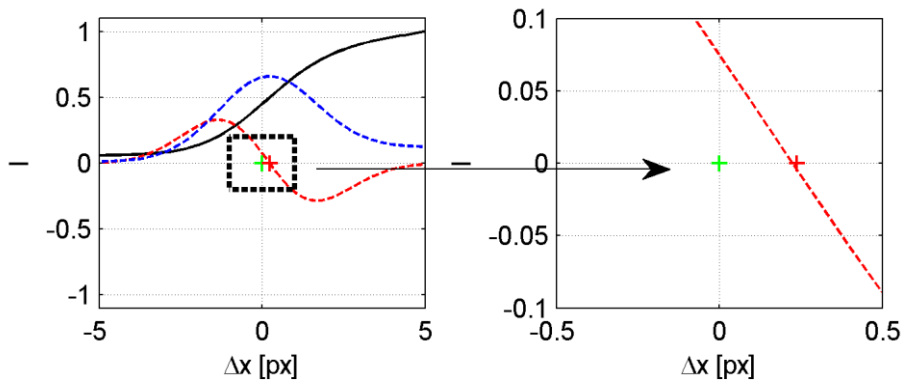


Abbildung 43: Bildmessfehler bei linear ansteigender Bestrahlung (links) und Ausschnittsvergrößerung (rechts). Die Kantenlage wird falsch bestimmt, bei  $\Delta x = 0,2$  statt  $\Delta x = 0$ .

Die Beobachtung zeigt also, dass eine inhomogene Ausleuchtung die Kantenlagen innerhalb des Bildes verschiebt. Dieser Effekt rührt daher, dass letztlich das Aufgenommene Bild nicht das reine Albedo der Zielmarke repräsentiert, sondern das Produkt aus Beleuchtungsbild und Albedobild darstellt. Eine subpixelgenaue Bildmessung des Albedobildes ist damit nur möglich, wenn entweder die Beleuchtung absolut gleichmäßig (homogen) ist, oder das Beleuchtungsbild bekannt ist, wodurch eine rechnerische Korrektur möglich wird.

Anhand von Gl.(4.29) kann dies verdeutlicht werden. Für einen konstanten Bestrahlungswinkel  $\theta$  lässt sich Gl. (4.29) als Produkt einer Konstanten  $k$ , der ortsabhängigen Albedo  $a(x)$  und Beleuchtungsstärke  $E(x)$  schreiben, mit der die ortsabhängige Leuchtdichte  $L(x)$  und deren Gradient  $L'(x)$  ermittelt werden kann:

$$L(x) = k \cdot a(x) \cdot E(x)$$

$$\frac{\delta}{\delta x} L(x) = L'(x) = k(a'(x)E(x) + a(x)E'(x)) \quad (5.5)$$

Für den Spezialfall einer konstanten Bestrahlungsstärke  $E=konst$  (entsprechend einer homogenen Ausleuchtung der Zielmarke) vereinfacht sich der Gradient  $L'(x)$  zu:

$$L'(x) = k(a'(x)E + 0) = k \cdot E \cdot a'(x) \quad (5.6)$$

Der Gradient der Leuchtdichte  $L'(x)$  skaliert also lediglich mit der Bestrahlungsstärke, während das die Kantenlage definierende Maximum  $L'(x)$  (vgl. blaue Linie in Abbildung 43) bestehen bleibt. Im Gegensatz dazu tritt im allgemeinen Fall einer inhomogenen Ausleuchtung, eine über die reine Skalierung hinausgehende Änderung des Gradientenbildes ein, was zur Fehlbeobachtung der Kantenlagen führt.

### 5.3.5 Auswirkung inhomogener Ausleuchtung

Die im letzten Abschnitt gewonnenen Erkenntnisse lassen sich unmittelbar auf die subpixelgenaue Bildmessung der Kreuzungspunkte einer Zielmarke mittels des OpenCV-Algorithmus übertragen. Dazu sollen zwei einfache Beispiele mit dem Bildaufnahmesimulator erstellt und analysiert werden. Im ersten Beispiel wird ein linearer Anstieg der Bestrahlungsstärke in horizontaler Richtung betrachtet. Das zweite Beispiel zeigt die Auswirkung einer radial mit dem Abstand zum Zentrum abfallenden Bestrahlungsstärke. Beide Fälle sind in der Praxis typisch bei Verwendung einer Punktlichtquelle, da hier die Bestrahlungsstärke reziprok zum Quadrat des Abstands abfällt (vgl. Gl. (4.28) u. Abbildung 28b). Punkte auf der Objektebene können dabei unterschiedliche Abstände zur Lichtquelle aufweisen, wodurch eine Graduierung in der Bestrahlungsstärke resultiert.

Abbildung 44 zeigt die simulierte Aufnahme einer Zielmarke am Rande des tolerierten Schärfentiefebereichs. Das linke Teilbild zeigt den linearen Anstieg der Bestrahlungsstärke von 40 auf 100% in horizontaler Richtung. Die Lage der Zielmarke und der gesuchten Referenzpunkte wurde durch den schwarzen Rahmen und Kreuze angedeutet. Im rechten Teilbild ist die simulierte Aufnahme zu sehen, in der die korrekten Lagen der Referenzpunkte durch grüne Kreuze markiert sind. Die roten Pfeile zeigen den Bildmessfehler  $\Delta \mathbf{x} = (\Delta_x, \Delta_y)^T$  in stark überzeichneter Form. Wie zu erwarten

war, führt die linear gradierte Bestrahlungsstärke zu einem systematischen Messfehler. Die gemessene Bildposition erscheint dabei in Richtung ansteigender Bestrahlungsstärke (positiver Gradient  $E' > 0$ ) verschoben. Weiter sinkt der Fehler mit ansteigender Bestrahlungsstärke aufgrund des ansteigenden Bildkontrasts.

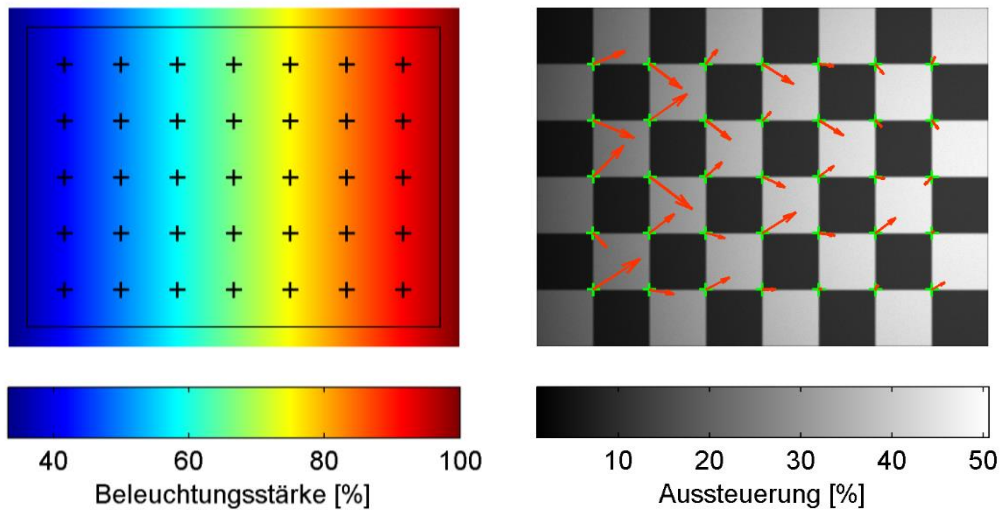


Abbildung 44: Verlauf einer in x-Richtung linear ansteigenden Bestrahlung einer Zielmarke (links) und deren Auswirkung auf die Bildmessung (rechts). Die roten Pfeile zeigen den Bildmessfehler  $\Delta \mathbf{x}$  (100x verstärkt) an.

Wie bereits beschrieben soll später für eine Kameraeinheit des CPMS eine Punktlichtquelle nahe der optischen Sichtachse der Kamera eingesetzt werden (vgl. Kap. 4.7.7). Dabei bewirkt vor allem der zum Rand der Objektebene hin ansteigende Abstand zum Zentrum der Lichtquelle eine abfallende Bestrahlungsstärke (vgl. Gl. (4.28)). Diese wiederum resultiert in einem systematischen Bildmessfehler.

Abbildung 45 zeigt die Simulation einer typischen Bildaufnahme bei exzentrisch positionierter Zielmarke. Der Aufnahmeabstand beträgt hier 0,7m, woraus eine Variation der Bestrahlungsstärke von 15% über die Objektebene resultiert, wie aus dem linken Teilbild ersichtlich wird. Im rechten Teilbild ist zu sehen, dass die gemessenen Bildpositionen in Richtung des helleren Bildzentrums systematisch verschoben sind.



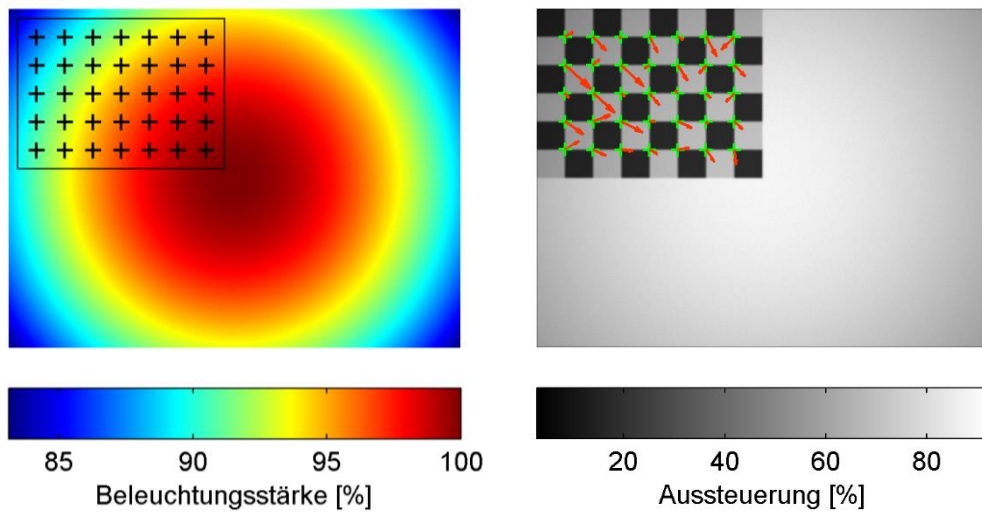


Abbildung 45: Bestrahlung durch eine Punktlichtquelle in 0,7m Abstand bei exzentrisch positionierter Zielmarke (links). Die gemessenen Bildpositionen (rechts) erscheinen zur helleren Bildmitte hin systematisch verschoben.

Abschließend soll noch die Verteilung des Fehlers für die einzelnen Bildmessungen betrachtet werden. Abbildung 46 zeigt die Ergebnisse für die beiden Beispiele „linear graduierten Bestrahlungsstärke“ (links) und „radial graduierte Bestrahlungsstärke“ (rechts). Die roten Kreuze zeigen den Fehler  $\Delta_x$  und  $\Delta_y$  der Einzelmessungen, während der Schwerpunkt  $\mathbf{c}$  aller Messungen wieder als Maß für einen mittleren systematischen Fehler heran gezogen wird. Im Gegensatz zum Bildrauschen (vgl. Abbildung 39) signalisiert die Schwerpunktlage bei inhomogener Ausleuchtung einen deutlichen systematischen Fehler. Bei der horizontal linear graduierten Beleuchtung (links) ist zu sehen, dass sich die Schwerpunktlage überwiegend in horizontaler Richtung verschiebt, da sich Fehler  $\Delta_y$  in vertikaler Richtung weitgehend kompensieren. Bei der radial graduierten Ausleuchtung (rechts) verbleibt in ähnlicher Weise eine systematische Fehlerkomponente, die in Richtung ansteigender Helligkeit wirkt.

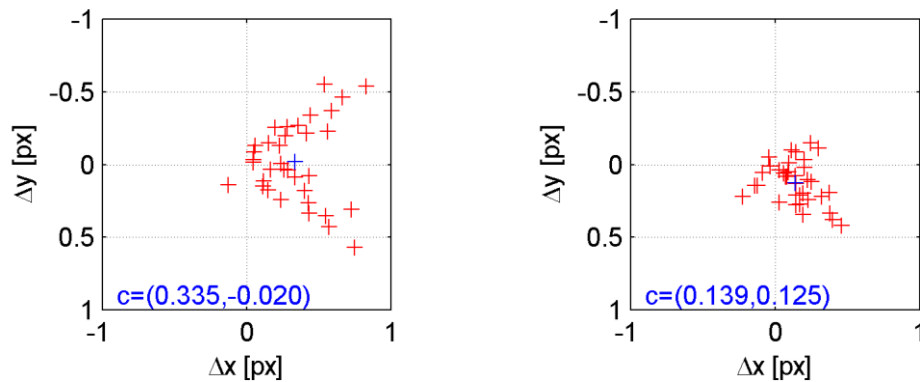


Abbildung 46: Bildmessfehler  $\Delta_{xy}$  in Pixel für den linear in x-Richtung ansteigenden (links) und den kegelförmigen (rechts) Bestrahlungsverlauf.

In beiden Beispielen werden realitätsnahe Aufnahmesituationen simuliert. Die radiale Graduierung der Bestrahlungsstärke wird durch die Punktlichtquelle bewirkt, während eine lineare Graduierung beispielsweise entsteht, wenn eine Zielmarke nicht senkrecht zur Kamera-/Lichtachse steht. Im praktischen Betrieb ergibt sich eine Mischform.

Bei beiden Beispielen kann gezeigt werden, dass die Systematik des Bildmessfehlers so groß ist, dass eine statistische Verbesserung unwirksam wird.

Eine Kompensation der inhomogenen Ausleuchtung ist also zwingend erforderlich. Geeignete Verfahren werden in den folgenden Abschnitten erarbeitet.

## 5.4 Verfahren zur Beleuchtungs-Homogenisierung

Im letzten Abschnitt wurde gezeigt, dass das von einer Kamera wahrgenommene Bild das Produkt aus einem durch die Beleuchtung verursachten „Bestrahlungsbildes“ und dem durch das Albedo der Zielmarke gegebenen „Remissionsvermögens“ (Albedobildes) ist. Für die Bildmessung relevant ist jedoch nur das Albedobild. Durch die Überlagerung mit einem inhomogenen Bestrahlungsbild entstehen systematische Messunsicherheiten.

### 5.4.1 Prinzipieller Korrekturansatz

Zur Homogenisierung einer ungleichmäßigen Ausleuchtung in einer gegebenen Bildaufnahme muss das durch die Beleuchtung verursachte Bestrahlungsbild  $\mathbf{E}(x,y)$  be-

kannt sein. Erst dadurch wird es möglich, aus dem Kamerabild das Albedobild zu berechnen, dass das ortsaufgelöste Rückstreuvermögen der Zielmarke repräsentiert und damit die korrekte Eingabe für den Bildmessalgorithmus darstellt.

Wird die Kamera als lineares System angesehen, so kann mit einer Systemverstärkung  $k$  folgender Zusammenhang zwischen Grauwertbild  $\mathbf{g}(x,y)$ , dem Albedobild  $\mathbf{a}(x,y)$  und dem Bestrahlungsbild  $\mathbf{E}(x,y)$  angenommen werden (siehe auch Gl. (5.5)):

$$\begin{aligned}\mathbf{g}(x, y) &= k \cdot \mathbf{a}(x, y) \cdot \mathbf{E}(x, y) \Leftrightarrow \\ \mathbf{a}(x, y) \cdot k &= \frac{\mathbf{g}(x, y)}{\mathbf{E}(x, y)}\end{aligned}\quad (5.7)$$

Zur Berechnung des Albedobildes wird diese Gleichung nach  $\mathbf{a}(x, y) \cdot k$  umgestellt. Die Skalierung des Albedobildes durch die Systemverstärkung  $k$  hat auf die Kantenlagen keinen Einfluss (vgl. Kap. 5.3.4), so dass das Produkt  $\mathbf{a}(x, y) \cdot k$  unmittelbar in den Bildmessalgorithmus eingegeben werden kann.

Das zur Korrektur des Kamerabildes benötigte Bestrahlungsbild  $\mathbf{E}(x,y)$  ließe sich bei Beobachtung einer homogen mit einem konstanten Albedo  $\mathbf{A}$  rückstreuenden Fläche (z.B. einer weißen Platte) direkt beobachten. Umstellung von Gl. (5.7) zeigt dies in einfacher Weise:

$$\mathbf{E}(x, y) = \frac{\mathbf{g}(x, y)}{k \cdot \mathbf{A}}\quad (5.8)$$

Bei einer schachbrettartigen Zielmarke weisen jeweils die Weißfelder bzw. die Schwarzfelder eine konstante Albedo auf. Auch die Feldpositionen können näherungsweise bestimmt werden (z.B. durch eine vorlaufende unkorrigierte Bildmessung).

Allerdings sind die unscharfen Übergangsbereiche zwischen den Feldern im Bild nicht definiert. Auch eignen sich die Schwarzfelder durch ihre niedrige Albedo nur bedingt zur Bestimmung der Bestrahlungsstärke. Es entsteht also das Problem, dass nur für Teile des Bildes (z.B. den inneren Bereich der Weißfelder) ein sinnvolles Bestrahlungsbild  $\mathbf{E}(x,y)$  ermittelt werden kann.

Es muss also ein *Bestrahlungsmodell* entwickelt werden, mit dessen Hilfe die Bestrahlungsstärke über die Schwarzfelder und Unschärfebereiche hinweg möglichst exakt extrapoliert werden kann.

Erarbeitet wurden zwei Ansätze. Zum einen ein globaler Ansatz, mit dessen Hilfe die Bestrahlungsstärke über die gesamte Zielmarke hinweg geschätzt werden kann. Zum anderen ein lokaler Ansatz, der darauf abzielt, nur die Bestrahlungsstärke innerhalb des für den Subpixelinterpolationsalgorithmus verwendeten Suchfensters zu schätzen.

Beide Ansätze haben Vor- und Nachteile. So eignet sich ein globales Modell eher für gleichförmige Änderungen der Bestrahlungsstärke, während ein lokales Modell lokale Schwankungen (z.B. durch Schattenbildung aufgrund von Störobjekten im Lichtweg) besser erfasst.

#### 5.4.2 Maskierung unscharfer Bildbereiche

Für die Parameterermittlung eines Bestrahlungsmodells, müssen zunächst die Bildinformationen, die das Modell stützen von den Störinformationen getrennt werden. Dazu werden die Schwarzfelder der Zielmarke, sowie die angrenzenden Unschärfebereiche durch eine Maske abgedeckt, so dass nur mehr ungestörte Bereiche der Weißfelder verbleiben. Um diese Maske zu erstellen, muss die Ausdehnung der Unschärfebereiche ermittelt werden.

Die Schärfe, mit der ein Punkt aus dem Objektraum auf einen Punkt im Bildraum durch ein optisches System abgebildet werden kann ist begrenzt. Wesentliche Gründe sind Effekte wie Beugungsunschärfe und Schärfentiefe, aber auch Abbildungsfehler (vgl. Kap. 4.2). Damit wird ein Objektpunkt im Bildraum auf eine Fläche abgebildet, die als *Zerstreuungskreis* bezeichnet wird. Die Funktion zur Beschreibung dieser Abbildung wird als *Punktantwort*<sup>151</sup> (engl. point spread function oder kurz PSF) bezeichnet und ist eine wesentliche Eigenschaft eines Abbildungssystems. Für die Maskierung unscharfer Bildbereiche genügt jedoch die Betrachtung des Zerstreuungskreisdurchmessers.

Im Folgenden wird gezeigt, wie der für ein bestimmtes Bild gültige Zerstreuungskreisdurchmesser  $Z_{est}$  aus der Aufnahme einer Zielmarke abgeschätzt werden kann. Das Ergebnis dient zur Anpassung der Maske und der optimalen Konfiguration des Bildmessalgorithmus.

Zwischen den Feldern einer Zielmarke finden sich Kontrastsprünge von Schwarz nach Weiß und umgekehrt. Aus der (unscharfen) Abbildung eines solchen Kontrastsprungs im Kamerabild kann in guter Näherung der Zerstreuungskreisdurchmesser abgelesen werden, der gerade der Breite des unscharfen Bereiches entspricht. Zur Bestimmung bietet sich das Gradientenbild an, in dem die Kanten abhängig von ihrer Unschärfe als zunehmend breite Linien dargestellt werden.

Abbildung 47 zeigt links das Grauwertbild einer Zielmarke  $g(x,y)$  und rechts den Betrag des zugehörigen Gradienten  $|\nabla \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y})|$ .

---

<sup>151</sup> Vgl. Jähne (2012, 101)

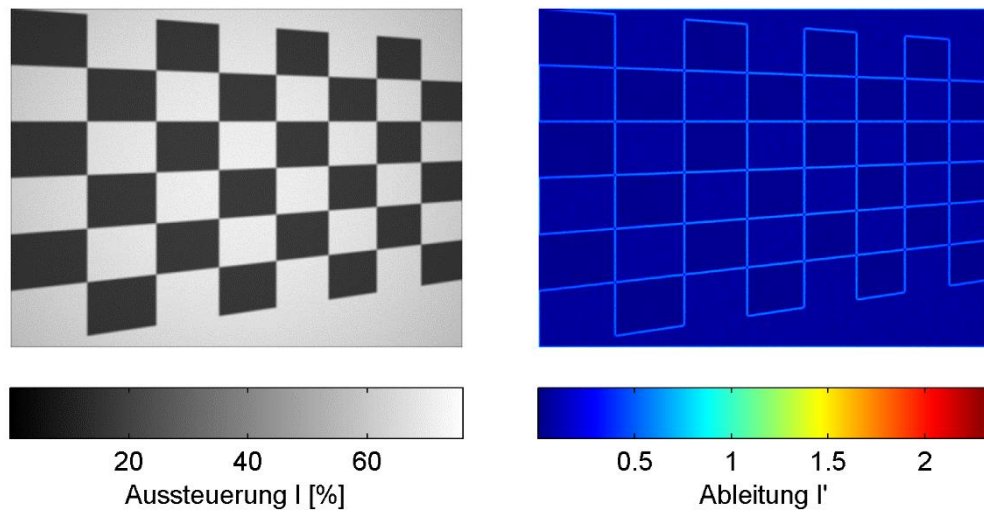


Abbildung 47: Kamerabild (links) und das mittels Sobel-Operator generierte Gradientenbild (rechts).

Da vor und hinter einer Kante eine konstante Helligkeit vorliegt, entspricht die Linienbreite im Gradientenbild in etwa dem Durchmesser des Zerstreuungskreises. Umgekehrt kann also durch die Ermittlung der Linienbreite der Zerstreuungskreisdurchmesser  $Z_{est}$  geschätzt werden.

Zu Ermittlung der Linienbreite wird das Gradientenbild durch Anwendung einer Schwellwertfunktion zunächst in ein Binärbild überführt. Auf dieses Binärbild wird eine *Distanztransformation*<sup>152</sup> angewendet, die für jeden Pixel die Entfernung zum Linienrand ermittelt. Durch Maskierung mit dem skelettierten<sup>153</sup> Binärbild werden aus dem Ergebnis nur Pixel in Linienmitte ausgewählt, deren Helligkeitswert gerade der halben Linienbreite und damit dem Radius des Zerstreuungskreises  $Z_{est}/2$  entspricht. Abbildung 48 zeigt das Ergebnis der Binarisierung (links) und der angepassten Distanztransformation (rechts). Die Pixelwerte im rechten Bild liegen etwa bei 5 und zeigen die halbe Linienbreite bzw. den Zerstreuungskreisradius in Pixeln an.

<sup>152</sup> Vgl. Jähne (2012, 565)

<sup>153</sup> Vgl. Jähne (2012, 555)

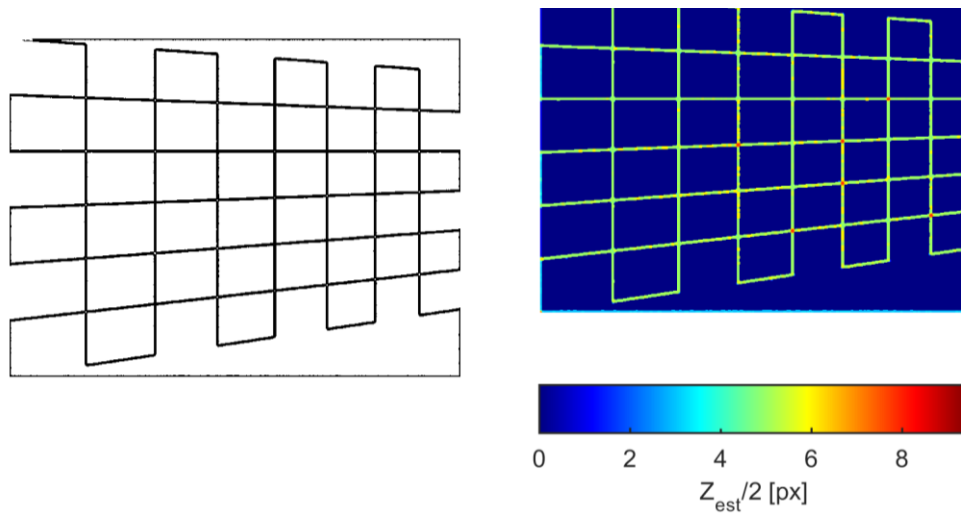


Abbildung 48: Binarisierung der Ableitung  $I'$  (links) und Abschätzung der Zerstreungskreisradien  $Z_{est}/2$  auf Basis der Linienbreiten (rechts).

In der praktischen Ausführung ist aufgrund von Bildrauschen und anderen Variationen in Bildhelligkeit und Bildschärfe mit deutlicher Varianz der Zerstreungskreise zu rechnen. Um einen mittleren Radius abzuschätzen, wird wie in Abbildung 46 (links) gezeigt, ein Histogramm über das distanztransformierte Bild aufgestellt. Anhand dieses Histogramms wird der am häufigsten vertretene Wert (hier 5) ausgewählt. Damit ist die Entwicklung des Verfahrens abgeschlossen. Zuletzt soll es noch unter Zuhilfenahme des Bildaufnahmesimulators (BAS) evaluiert werden.

Der BAS stellt zu einem simulierten Kamerabild die exakte PSF bereit, aus der der Zerstreungskreisdurchmesser abgeleitet werden kann. Umgekehrt kann aus dem Zerstreungskreisdurchmesser zu Visualisierungszwecken in grober Näherung die PSF geschätzt werden, indem der Zerstreungskreisradius als Standardabweichung  $\sigma = Z_{est}/2$  einer Gaußfunktion gesetzt wird:

$$\text{PSF} \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5.9)$$

Abbildung 46 (rechts) zeigt den Vergleich der PSF (grün gestrichelte Linie) mit der Gauß-Näherung (blau) auf Basis des mit obigem Verfahren geschätzten Zerstreungskreisdurchmessers.

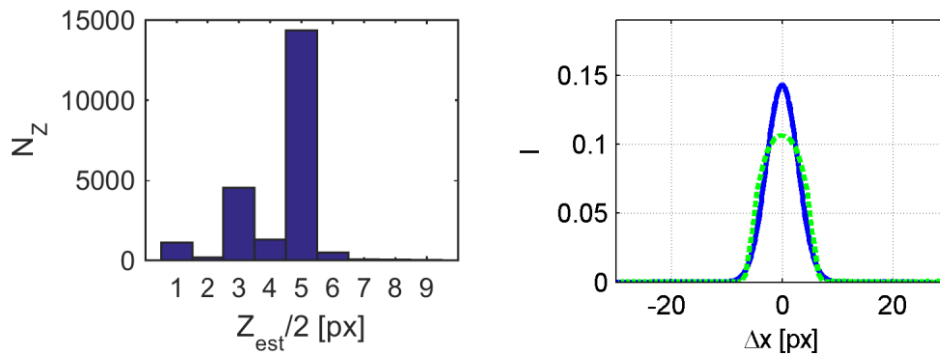


Abbildung 49: *Links*: Histogrammauswertung des distanztransformierten Ergebnisses. *Rechts*: Vergleich der geschätzten (blau) mit der tatsächlichen Punktspizfunktion (grün).

Es ist zu sehen, dass die geschätzte PSF etwas zu spitz und schmal ausfällt und damit die Bildunschärfe etwas unterschätzt wird. Dem kann in der Praxis durch einen Sicherheitsfaktor  $S$  mit beispielsweise  $S=2$  für die Breite der Ausschlussmaske begegnet werden. Die Maskenbreite  $B_{mask}$  errechnet sich damit zu:

$$B_{mask} = S \cdot Z_{est} \quad (5.10)$$

Damit wurde eine einfache Methode entwickelt, um für eine unter unbekanntem Bedingungen entstandene Aufnahme einer Zielmarke den Zerstreungskreisdurchmesser zu schätzen und eine Maskenbreite für die Maskierung unscharfer (und damit undefinierter Bildbereiche) zu ermitteln.

Die Maskenbreite kann weiter zur automatischen Parametrisierung des OpenCV Subpixelinterpolationsalgorithmus eingesetzt werden, indem die Größe des zentralen Ausschlussfensters (vgl. Kap. 5.2) auf  $B_{mask}$  eingestellt wird, um so den undefinierten Unschärfebereich im zentralen Kreuzungsbereich auszublenden und das Interpolationsergebnis zu verbessern.

### 5.4.3 Globales Bestrahlungskorrekturmodell

Für die globale Korrektur soll mittels einer einzigen Modellfunktion die Bestrahlungsstärke über der Fläche einer Zielmarke geschätzt werden. Zur Auswahl einer passenden Modellfunktion soll zunächst geklärt werden, welchen Gesetzmäßigkeiten die Bestrahlungsverteilung folgt.

Bei Einsatz einer Punktlichtquelle ist die Bestrahlungsstärke in der Objektebene reziprok zum Quadrat des Abstands eines betrachteten Objektpunktes. Der Punkt der Objektebene mit dem geringsten Abstand zur Punktlichtquelle unterliegt demnach einer maximalen Bestrahlung, die im Umfeld allmählich abfällt (vgl. Kap.

4.5). Definiert man einen minimalen Fußpunkt Abstand  $r_0$  zwischen Lichtquelle und Objektebene, so kann die Bestrahlungsstärke eines beliebigen Punktes auf der Objektebene mit bekanntem Abstand  $p$  zum Fußpunkt berechnet werden. Dazu wird der Abstand  $r(p)$  dieses Punktes durch den Satz des Pythagoras ermittelt und in die Gleichung der Bestrahlungsstärke (Gl.(4.28)) eingesetzt.

$$\begin{aligned} r(p) &= \sqrt{r_0^2 + p^2} \\ E &= \frac{I}{r(p)^2} = \frac{I}{r_0^2 + p^2} \end{aligned} \quad (5.11)$$

Einfache Modellfunktionen mit linear berechenbaren Parametern sind Polynome. Hier stellt sich die Frage, ob die soeben gefundene Formel durch ein Polynom ausreichend genau dargestellt werden kann und welcher Polynomgrad benötigt würde.

Abbildung 50 zeigt dazu den Bestrahlungsverlauf über eine 200mm breite Zielmarke in einem Abstand von  $r_0=500\text{mm}$  einer Punktlichtquelle. Ein in den Kurvenverlauf eingepasstes Polynom 2. Grades (blaue Linie) nähert die Funktion nahezu fehlerfrei und stellt ein geeignetes Modell dar. Ungenau wird die Näherung erst für unrealistisch kleine Abstände  $r_0$ .

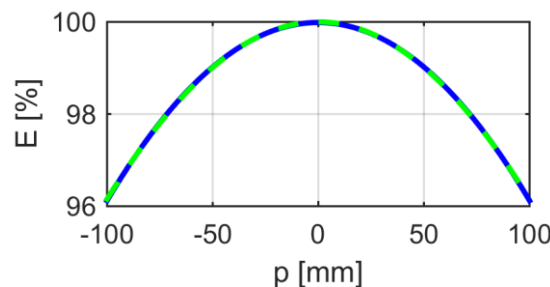


Abbildung 50: Querschnitt durch die Bestrahlungsstärke einer Zielmarke mit 200mm Breite in  $r_0=500\text{mm}$  Abstand einer Punktlichtquelle (grün) und Näherung durch ein Polynom 2. Grades (blau).

Um die Bestrahlungsstärke  $\mathbf{E}_{\text{mod}}(x,y)$  über die gesamte Fläche einer Zielmarke zu schätzen, wird ein zweidimensionales Modell benötigt. Hierzu eignet sich eine Polynomfläche 2. Grades mit insgesamt sechs Modellparametern  $a_1$ - $a_6$ :

$$\mathbf{E}_{\text{mod}}(x, y, \mathbf{a}) = a_1 x^2 + a_2 x + a_3 xy + a_4 y + a_5 y^2 + a_6 \quad (5.12)$$

Die Polynomfläche wird im Rahmen einer linearen Ausgleichsrechnung unter Bestimmung des Parametervektors  $\mathbf{a}$  in eine Menge von „Stützstellen“ eingepasst. Als Stützstellen dienen Bildpunkte innerhalb der Weißfelder der Zielmarke deren Albedo über das Bild hinweg als konstant angenommen werden kann. Abbildung 51 zeigt links



die (simulierte) Aufnahme einer exzentrisch im Bild positionierten Zielmarke. Durch eine grobe Lokalisierung der Zielmarke mittels Mustererkennungsmethoden sind die Lagen der Kreuzungspunkte auf wenige Pixel genau bekannt. Auf dieser Basis wird eine Maske errechnet, die Bereiche außerhalb der Weißfelder abdeckt. Damit sich die Ungenauigkeiten bei der Groblokalisierung nicht auswirken und unscharfe Bereiche an den Übergangskanten zwischen Schwarz- und Weißfeldern eliminiert werden, wird diese Maske zusätzlich um den in Kap. 5.4.2 ermittelten Betrag  $B_{mask}$  erweitert.

Das Ergebnis ist im rechten Teil der Abbildung zu sehen. Es bleiben nur die Bereiche der Weißfelder unmaskiert, deren Helligkeit nur von ihrem (konstanten) Albedo und der Bestrahlungsstärke abhängt.

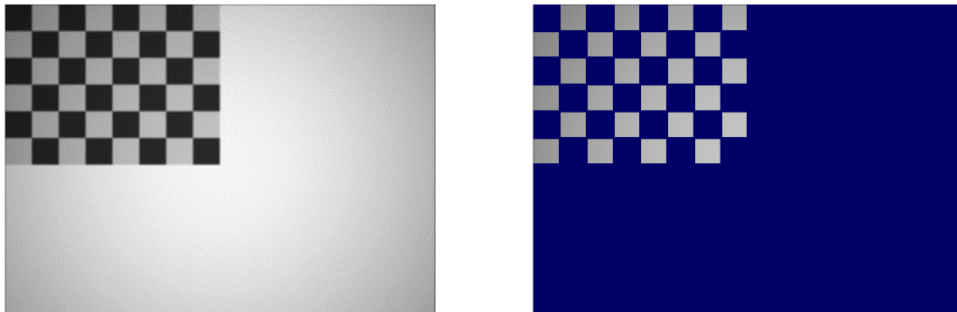


Abbildung 51: Simulierte Aufnahme einer exzentrisch angeordneten Zielmarke (links) und Maskierung der Bildbereiche mit bekanntem Albedo zur Aufstellung des Bestrahlungsmodells.

Abbildung 52 zeigt im linken Teil die Bestrahlungsstärke  $E$  über die Objektebene, die Lage der Zielmarke ist schematisch angedeutet. In der rechten Teilabbildung ist die Schätzung der Bestrahlungsstärke  $E$  durch eine Polynomfläche  $E_{mod}$  zu sehen. Dabei ist die Abweichung des Modells innerhalb des kritischen Bereichs, also innerhalb der Fläche der Zielmarke relativ gering. Deutlichere Extrapolationsfehler ergeben sich erst mit steigender Entfernung zu den (aus den Weißfeldern gewonnenen) Datenpunkten.

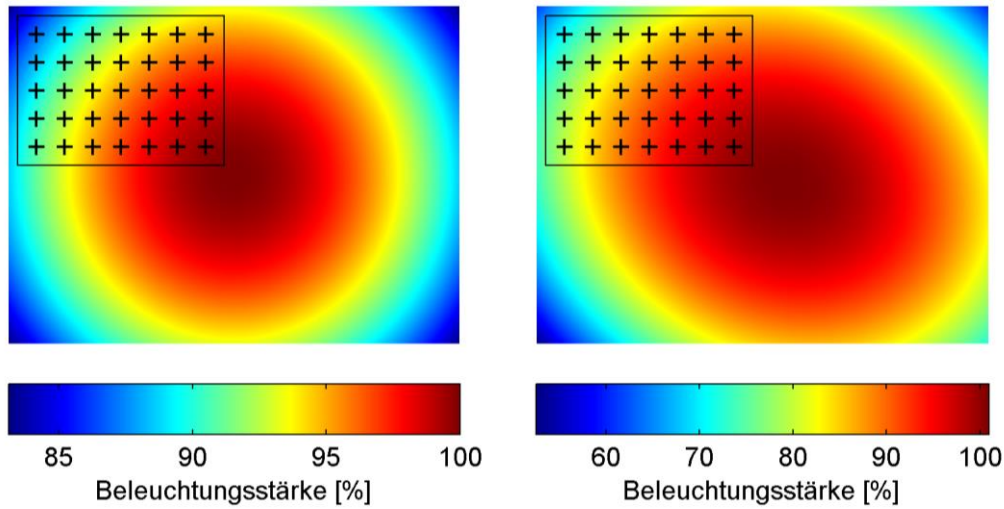


Abbildung 52: Bestrahlungsstärke  $E$  innerhalb der Objektebene (links) und deren Annäherung durch ein Bestrahlungsmodell  $E_{mod}$  auf Basis einer Polynomfläche 2. Grades (rechts). Die Bestrahlungsstärke wurde jeweils auf 100% normiert.

Zur Homogenisierung der Bestrahlungsstärke und Ermittlung eines korrekten Albedobildes, wird das Kamerabild unter Anwendung von Gl. (5.7) durch die geschätzte Bestrahlungsstärke  $\mathbf{E}_{mod}(x,y,\mathbf{a})$  dividiert. Das Ergebnis dient als neue Eingabe der subpixelgenauen Bildmessung.

Abbildung 53 zeigt den direkten Vergleich einer Bildmessung ohne (links) und mit (rechts) Homogenisierung der Bestrahlungsstärke. Die Korrektur reduziert den systematischen Fehler für den Schwerpunkt  $c$  für das vorliegende Beispiel um nahezu eine Größenordnung auf weniger als 0,02 Pixel.

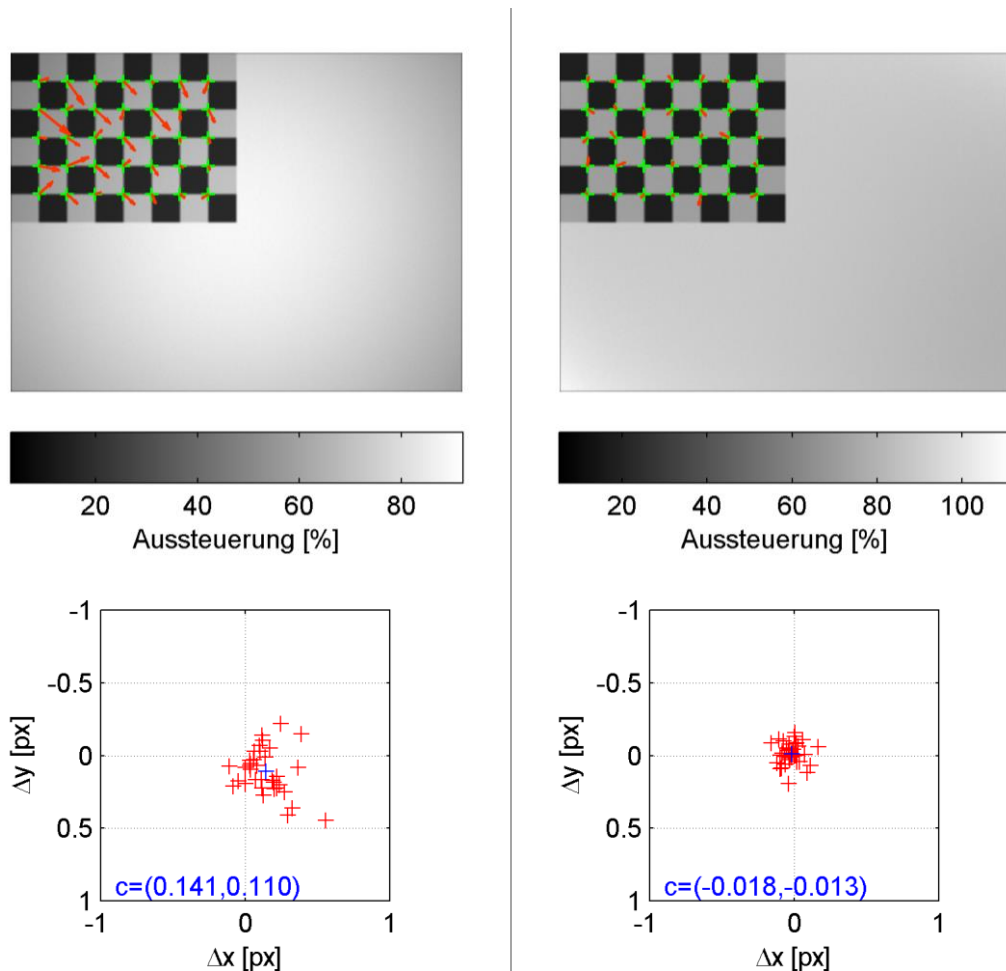


Abbildung 53: Vergleich des Bildmessfehlers ohne (links) und mit Homogenisierung der Bestrahlungsstärke durch ein globales Beleuchtungsmodell (rechts).

Zur Einpassung des Polynoms ist ein lineares Gleichungssystem zu lösen, zu dem jeder zu einem Weisfeld gehörige Pixel eine Gleichung beiträgt. Um den Berechnungsaufwand zur Modelleinpassung zu mindern, bietet es sich an, die Anzahl der Gleichungen zu reduzieren. Eine geeignete Methode hierzu ist das Ersetzen einer Menge  $n$  benachbarter Pixel durch ihren Mittelwert.

In der praktischen Anwendung werden aus Kostengründen häufig Punktlichtquellen (z.B. LEDs) mit ungenauer Abbildungsoptik eingesetzt. Daraus resultieren dann von der parabolischen Form abweichende Bestrahlungsstärken in der Objektebene. Ein typisches Beispiel für ein Bestrahlungsbild ist eine „ringförmige“ Verteilung mit einer zum Zentrum und Peripherie hin abfallenden Bestrahlungsstärke.

Um diese komplexeren Bestrahlungsverteilungen schätzen zu können, wurde ein adaptierbares Bestrahlungsmodell als Matlab-Modul implementiert. Neben dem

oben beschriebenen Modell einer Polynomfläche 2. Grades (Parabelfläche) können Polynom-Modelle beliebiger höherer Ordnung genutzt werden.

#### 5.4.4 Lokale Beleuchtungskorrektur

Zur Schätzung einer sehr komplexen Bestrahlungsverteilung mit hohen Ortsfrequenzanteilen, eignen sich globale Bestrahlungsmodelle weniger gut. Stärkere lokal begrenzte Änderungen der Bestrahlungsstärke treten z.B. bei Kamera-/Beleuchtungssystemen auf, bei denen die Lichtquelle einen größeren Abstand von der optischen Achse aufweist. Hier werden Abschattungen durch Gegenstände im Strahlengang zwischen Lichtquelle zum Objekt sichtbar (Schattenbildung). Auch bei unzureichender Fremdlichtausblendung (vgl. Kap. 4.5.3) können durch Einstrahlung unerwünschter Fremdlichtquellen Störungen der Bestrahlungsstärke in der Objektebene auftreten.

Das in dieser Arbeit vorgestellte CPMS wurde so entworfen, dass durch hohe Fremdlichtunterdrückung und eine Platzierung der Lichtquelle nahe der optischen Achse, die genannten Effekte weitgehend vermieden werden. Um entsprechende Situationen bei anderen Konstruktionsprinzipien handhaben zu können, wurde dennoch ein weiterer Ansatz eines lokalen Korrekturverfahrens entwickelt.

Während beim globalen Bestrahlungsmodell jeweils die Bestrahlung der gesamten Objektebene als einzelne (globale) Funktion behandelt wurde, wird beim folgenden lokalen Modell für eine Korrektur jeweils nur ein kleiner Bildausschnitt in unmittelbarer Umgebung eines Zielmarken-Messpunktes betrachtet. Die weitere Vorgehensweise ähnelt derjenigen des globalen Ansatzes. Innerhalb des Fensters werden geeignete Datenpunkte als Stützstellen zur Einpassung einer Modellfunktion ausgewählt. Anschließend wird die inhomogene Bestrahlungsverteilung lokal korrigiert.

Als Modell eignet sich hier, aufgrund der geringeren Anzahl an Datenpunkten und der geringen Ausschnittsgröße, eine Polynomfläche 1. Grades (Ebene). Versuche mit Polynomen 2. und 3. Grades ließen keine weitere Reduktion der Messunsicherheit erkennen. Für  $E_{mod}$  ergibt sich damit die vereinfachte Funktion:

$$\mathbf{E}_{mod}(x, y, \mathbf{a}) = a_1x + a_2y + a_3 \quad (5.13)$$

Der erste Schritt, die Auswahl geeigneter Datenpunkte zur Stützung des Modells, verläuft wie beim globalen Ansatz. Dazu wird wieder eine entsprechende Maske erstellt (Abbildung 54 rechts), wobei Bildinformationen aus dem geschwärtzten Maskenbereich verworfen werden.

Abbildung 54 zeigt links als Beispiel für die weiteren Ausführungen eine in Falschfarben dargestellte Aufnahme einer Zielmarke, die unter zufälligen lokalen Schwankungen der Bestrahlungsstärke erstellt wurde, wie durch die Flecken im Bild gut zu erkennen ist.

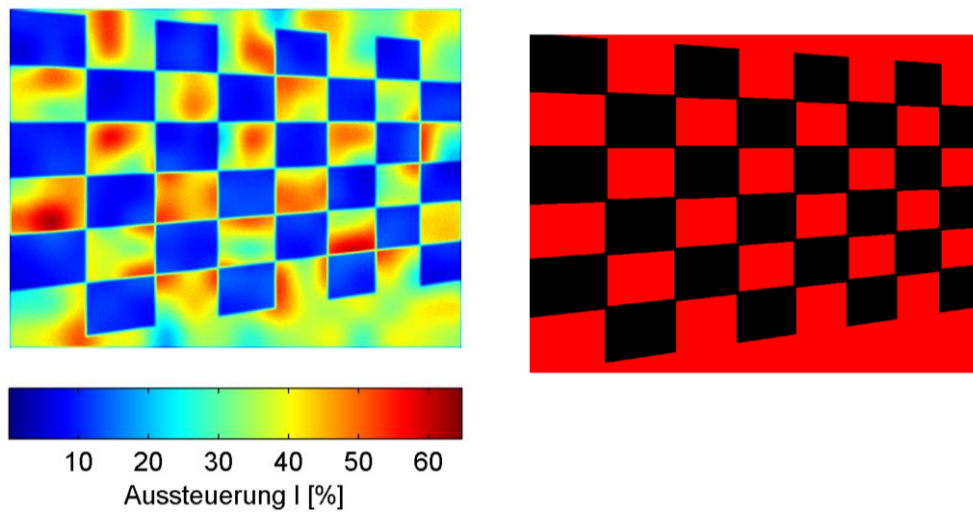


Abbildung 54: Inhomogen ausgeleuchtete Zielmarke (links) und Maske zur Ausblendung von Schwarzfeldern und unscharfen Übergängen.

Im nächsten Schritt weicht der lokale Ansatz vom globalen Pendant ab. Zunächst werden die für die Subpixelinterpolation notwendigen Fenstergrößen für das Suchfenster und das innere Ausschlussfenster berechnet (vgl. Kap. 5.2). Die Größe des Suchfensters wird zugleich als Fenstergröße für die Bestrahlungshomogenisierung übernommen. Eine Korrektur außerhalb des Suchfensters hätte keinen Einfluss mehr auf die Bildmessung, führte jedoch dazu, dass die Modellfunktion über eine unnötig große Fläche vermittelt und die Korrektur höherer Ortsfrequenzen verschlechtert würde.

Abbildung 55 zeigt links die auf den lokalen Modellfunktionen basierende Abschätzung der Bestrahlungsstärke und rechts das lokal homogenisierte Bild der Zielmarke. Zusätzlich sind im rechten Teilbild die Konturen der Such- und Ausschlussfenster angedeutet. Der innere Rahmen eines Fensters kennzeichnet den inneren Ausschlussbereich, in dem aufgrund von Unschärfe keine Subpixelinformation gegeben ist.

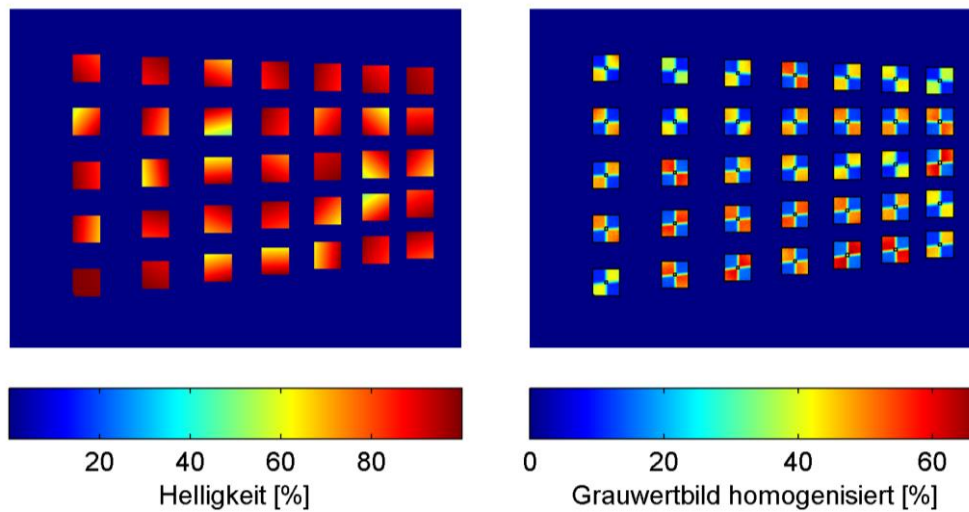


Abbildung 55: Schätzung der Beleuchtungsstärke innerhalb der Arbeitsfenster der Subpixelinterpolation (links) und die zugehörigen homogenisierten Bereiche des Eingangsbildes (rechts).

In der praktischen Anwendung sind zufällige lokale Helligkeitsschwankungen meist weniger problematisch, da sich die dadurch verursachten Positionsverschiebungen über die Menge der Messpunkte einer Zielmarke ausmitteln. Aus diesem Grund wurde zur Demonstration des lokalen Korrekturalgorithmus ein Extrembeispiel konstruiert, dass ohne Korrektur zu einem großen systematischen Fehler führt.

Abbildung 56 zeigt links eine periodische Schwankung der Bestrahlungsstärke in horizontaler Richtung über die Fläche einer Zielmarke. Die Periodenlänge entspricht in etwa dem Abstand zweier horizontaler Referenzpunkte. Dadurch liegen alle Messpunkte in Bereichen ansteigender Bestrahlungsstärke, wodurch sich die Fehler der Einzelmessungen aufsummieren. Im rechten Teilbild wird die lokale Schätzung der Bestrahlungsstärke  $E_{mod}$  aufgezeigt.

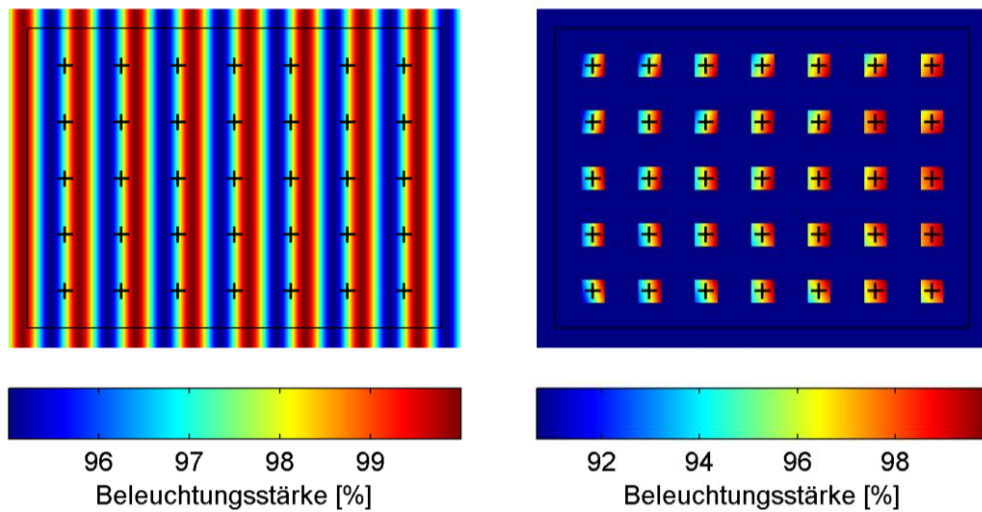


Abbildung 56: Falschfarbendarstellung einer periodischen Schwankung der Bestrahlungsstärke  $E$  über einer Zielmarke (links) und die lokale Schätzung dieser Schwankung durch die Modellfunktion  $E_{mod}$ .

Abbildung 57 zeigt den Vergleich einer Bildmessung ohne (links) und mit Homogenisierung der Bestrahlungsstärke durch das lokale Modell. Im linken Teilbild ist zu erkennen, dass ohne Korrekturmaßnahmen trotz der niedrigen relativen Schwankung der Bestrahlung von etwa 5% eine enorme Verschlechterung des systematischen Bildmessfehlers eintritt. Grund dafür ist die relativ hohe Ortsfrequenz, wodurch hier der Gradient bereits große Werte erreicht.

Im rechten Teilbild ist zu sehen, dass durch die lokale Korrektur der Fehler in der Lage des Schwerpunktes  $c$  um mehr als eine Größenordnung verbessert wird.

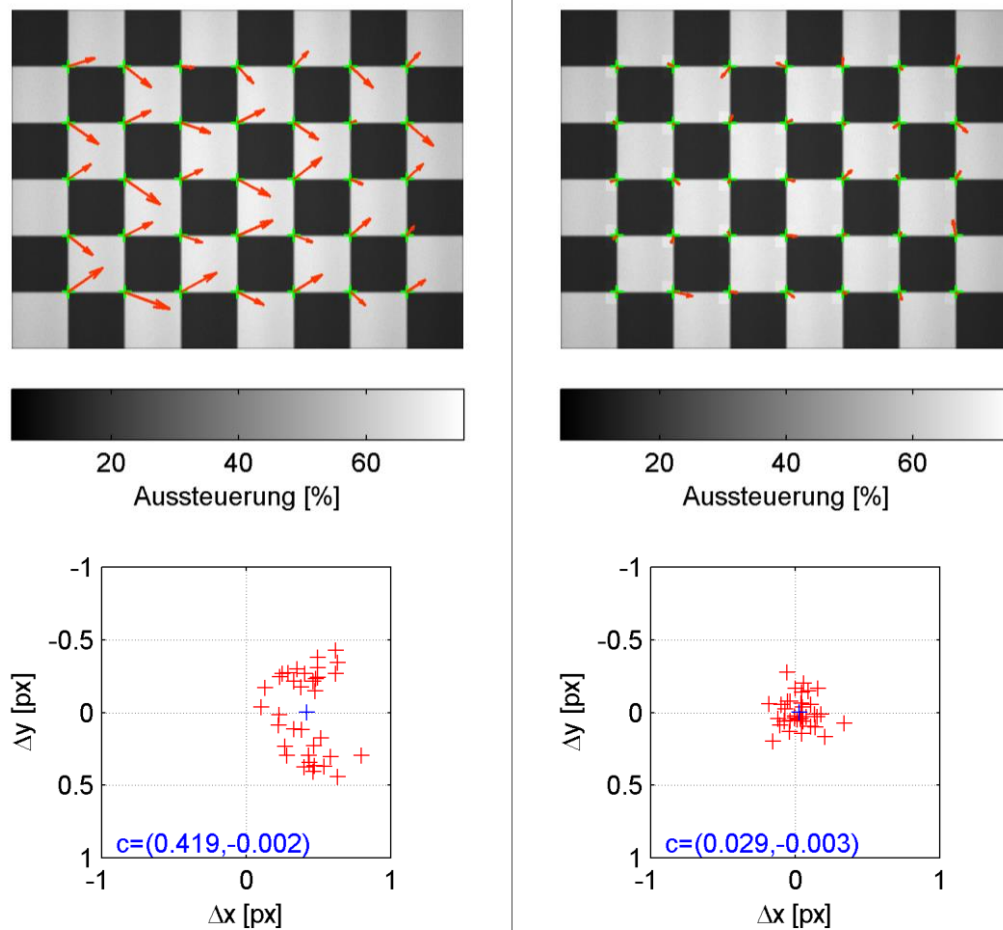


Abbildung 57: Vergleich des Bildmessfehlers ohne (links) und mit Homogenisierung der Bestrahlungsstärke durch ein lokales Beleuchtungsmodell.

## 5.5 Kompensation von Bewegungsunschärfe

*Bewegungsunschärfe* entsteht durch eine Relativbewegung zwischen Kamera und abgebildetem Objekt während des Belichtungszeitraums. Sie steigt proportional zur Dauer  $\Delta t$  der Belichtung und der Winkelgeschwindigkeit zwischen Kamera und Objekt an.

In Folge der Bewegung wird ein Objektpunkt zeitlich versetzt auf mehrere Bildpunkte projiziert. Die dadurch entstehende Unschärfe unterscheidet sich von anderen Schärfefehlern (vgl. Kap. 4.2.3, 4.2.4) durch ihre Abhängigkeit von der Bewegungsrichtung.



### 5.5.1 Auswirkung auf die Bildmessung

Bildmessalgorithmen (vgl. Kap. 5.2) sind im Allgemeinen tolerant gegen „symmetrische“ Schärfefehler, jedoch nicht gegen Bewegungsunschärfe. Dies wird im Beispiel ersichtlich.

Ein Schachbrettmuster wird in horizontaler Richtung quer zur Kamera bewegt. Im Bild entsteht Bewegungsunschärfe, die sich durch in Bewegungsrichtung verwischte Kanten bemerkbar macht. Abbildung 58 a) zeigt die Auswirkung einer linearen horizontalen Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit  $v$ . Die Belichtung startet zum Zeitpunkt  $t_1$  und endet zu  $t_2$  nach einer Belichtungsdauer von  $\Delta t = t_2 - t_1$ . In dieser Zeit verschiebt sich die Abbildung des Motivs auf dem Bildsensor (im Beispiel um 200 Pixel).

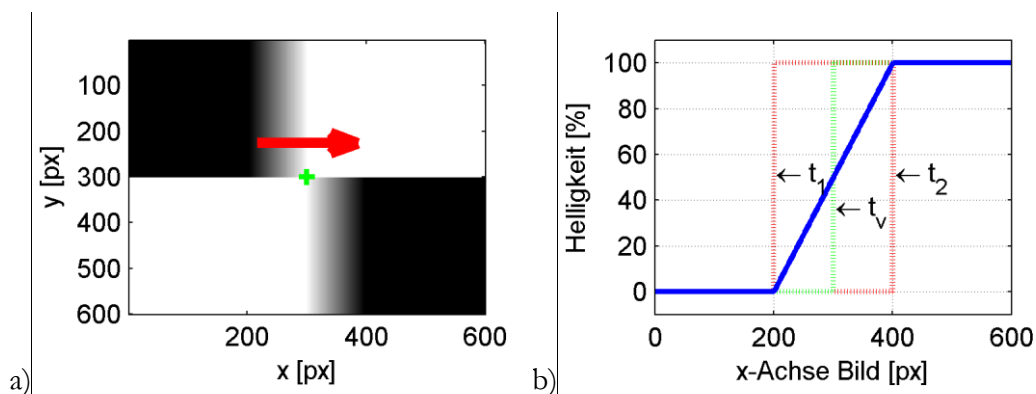


Abbildung 58: Bewegungsunschärfe bei einer horizontalen Querbewegung zwischen Kamera und Motiv. a) Kanten quer zur Bewegung werden verwischt. b) zeigt die in den Pixel akkumulierte Helligkeit (blau), wenn während Belichtungs-Start  $t_1$  und -Ende  $t_2$  eine gleichförmige Bewegung stattfand. Eine Bildmessung schätzt eine mittlere Kantenlage (grün).

Abbildung 58 b) zeigt einen horizontalen Querschnitt durch die Kantenlage zu den Zeitpunkten  $t_1$  und  $t_2$  (rote Linie). Die blaue Linie zeigt die in den Pixeln akkumulierte Lichtmenge. Daraus interpoliert das Bildmessverfahren eine mittlere Kantenlage (grünes + in a bzw. grüne Linie in b, vgl. auch Kap. 5.3.4).

### 5.5.2 Korrektur gleichförmiger Bewegungen

Für den Spezialfall einer gleichförmigen Bewegung zwischen Objektabbildung und Bildsensor besteht zwischen zurückgelegter Strecke und Zeit ein linearer Zusammenhang, so dass die gemessene Position genau in der Mitte des Belichtungsintervalls gültig wird. Somit kann ein „virtueller“ Abtastzeitpunkt als  $t_v = (t_1 + t_2) / 2$  berechnet werden.

Die Lage des Belichtungsintervalls ist durch die Synchronisation von Kamera, Beleuchtung und Steuerrechner gegeben (vgl. Kap. 3.1.4).

Diese Methode ist einfach und elegant, da keine weiteren zusätzlichen Informationen, z.B. über die Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit benötigt werden. Auch kann gezeigt werden, dass für sehr kurze Belichtungsintervalle (Blitzbeleuchtung) die Methode für ungleichförmige Bewegungen eine gute Näherung darstellt (vgl. Kap. 5.5.4).

### 5.5.3 Korrektur ungleichförmiger Bewegungen

Die Korrektur eines durch eine beschleunigte Bewegung verursachten Bildmessfehlers ist komplexer und setzt die Kenntnis des Geschwindigkeitsvektors  $\mathbf{v}_0$  und Beschleunigungsvektors  $\mathbf{a}_0$  voraus. Diese beschreiben die Relativbewegung zwischen der Abbildung (der Objektpunkte) und dem Bildsensor und besitzen daher z.B. die Einheiten Pixel/s für die Geschwindigkeit bzw. Pixel/s<sup>2</sup> für die Beschleunigung. Die Bestimmung im laufenden Betrieb kann z.B. durch Beobachtung einer Objektpunktabbildung über die drei letzten Kamerabilder unter Einsetzen der Koordinaten in die Bewegungsgleichung geschehen.

Zur Korrektur eines bewegungsabhängigen Bildmessfehlers wird zunächst die Belichtung eines Pixels  $g(\mathbf{x})$  an einer Position  $\mathbf{x}=(x,y)$  durch seine ortsbezogene Bestrahlung  $E_s(\mathbf{x})$  beschrieben. Als Basis dient das Bildsensor-Modell aus Gl.(4.20), unter der Annahme, dass der Dunkeloffset  $g_0$  durch kameraseitige Subtraktion eliminiert wurde.

Die Zahl  $N_p$  akkumulierter Photonen ist proportional dem Produkt aus Bestrahlungsstärke  $E_s$  des Sensors und Belichtungszeit  $\Delta t$ . Die Beziehung zum Grauwert  $g(\mathbf{x})$  eines Kamerapixels an einer Bildkoordinate wird über die Systemverstärkung  $k$  hergestellt:

$$g(\mathbf{x}) = k \cdot E_s(\mathbf{x}) \cdot \Delta t \quad (5.14)$$

Eine Relativbewegung zwischen Kamerabild  $g(\mathbf{x})$  und Bestrahlungsbild  $E_s(\mathbf{x})$  kann durch Einbringung einer (zeitabhängigen) Verschiebungsfunktion  $\mathbf{s}(t)$  formuliert werden. Dadurch wird das Produkt  $E_s \Delta t$  zu einem Integral über die Zeitspanne  $\Delta t$ . Als Verschiebungsfunktion  $\mathbf{s}(t)$  dient hier wahlweise die Bewegungsgleichung einer gleichförmigen oder beschleunigten Bewegung.

$$g(\mathbf{x}) = k \cdot \int_{t_1}^{t_2} E_s(\mathbf{x} + \mathbf{s}(t)) dt$$

$$\mathbf{s}(t) = \mathbf{v}_0 t \rightarrow \text{gleichförmig} \quad (5.15)$$

$$\mathbf{s}(t) = \mathbf{v}_0 t + \mathbf{a}_0 t \rightarrow \text{beschleunigt}$$

Damit ist die Entstehung eines unter Bewegung  $(\mathbf{v}_0, \mathbf{a}_0)$  aufgenommenen Kamerabildes  $g(\mathbf{x})$  im Belichtungszeitraum  $\Delta t$  mathematisch beschrieben. Als nächstes ist zu klären, wie ein von der Bewegung  $\mathbf{s}(t)$  abhängiger Korrekturwert der Bildmessung ermittelt werden kann.

Für die qualitative Betrachtung beschränken wir uns auf eine eindimensionale Korrektur der Kantenlage aus Abbildung 58, diesmal jedoch für eine beschleunigte Bewegung. Der Querschnitt über einer Kante (Hell-/Dunkelübergang) entspricht im (leicht unscharfen) Kamerabild einer „verschliffenen“ Stufen-Funktion. Der Mittelpunkt einer Kante kann (stellvertretend für komplexere Antastalgorithmen bei kleinen Verschiebungen) näherungsweise als Extremum der ersten Ableitung  $g'(x)$  des Kantenumfeldes bestimmt werden (vgl. dazu Kap. 5.3.4). In Folge dessen entspricht gerade die Nullstelle der zweiten Ableitung  $g''(x_0)$  der Position der Kantenmitte.

$$g''(x_0) = k \cdot \int_{t_1}^{t_2} E_s''(x_0 + s(t)) dt = 0 \quad (5.16)$$

Zur Berechnung der korrekten Kantenlage  $x_0$ , muss zunächst eine differenzierbare Beschreibungsfunktion des Bestrahlungsbildes  $E_s(x)$  in Kantennähe gefunden werden. Dazu eignet sich ein Polynom 3. Grades:

$$\begin{aligned} E_s(x) &= ax^3 + bx^2 + cx + d \\ E_s''(x) &= 6ax + 2b \end{aligned} \quad (5.17)$$

Benötigt werden nur die Polynom-Koeffizienten  $a$  und  $b$ , die durch einen Polynomfit bestimmt werden können. Das Resultat ist eine sehr einfache mathematische Beschreibung des Kantenquerschnittes. Durch Einsetzen in Gl. (5.16) unter Einbezug der Bewegungsgleichung  $s(t)$  für eine beschleunigte Bewegung lässt sich die (bewegungsabhängige) Kantenlage durch Berechnung der Nullstelle  $x_0$  unter Einbezug der Bewegungsgeschwindigkeit  $v_0$  und der Beschleunigung  $a_0$  nun bestimmen:

$$x_0(v_0, a_0) = -\frac{3a \cdot v_0 \cdot t + 2a \cdot a_0 \cdot t^2 + 2b}{6a} \quad (5.18)$$

Ein Bildmessalgorithmus ohne Bewegungskorrektur bestimmt die Kantenlage gerade so, als wäre  $v_0=0$  und  $a_0=0$ . Damit lässt sich ein Korrekturwert  $\Delta x_0$  bestimmen zu:

$$\Delta x_0 = x_0(v_0, a_0) - x_0(0, 0) \quad (5.19)$$

Bei einer zweidimensionalen Bildmessung wird üblicherweise statt einer einfachen Kante eine Kreuzung zweier Kanten (wie sie z.B. durch ein Schachbrettmuster

entsteht) angetastet. Zur Erweiterung obiger Methode für die zweidimensionale Korrektur der Bildmessung kann die in Gl. (5.17) beschriebene Kantenfunktion durch eine Flächenfunktion (z.B. eine Polynomfläche 3. Grades) ersetzt werden. Die weitere Vorgehensweise ist analog.

#### 5.5.4 Auswirkung von Geschwindigkeit und Beschleunigung

Abbildung 59 zeigt den Fehler  $\Delta x_0$  einer Kantendetektion bei einer gleichförmigen Bewegung mit  $v_0=10\text{pxs}^{-1}$  (links) bzw. einer beschleunigten Bewegung mit  $a_0=100\text{pxs}^{-2}$  (rechts) bei einer (relativ langen) Belichtungsdauer  $\Delta t=100\text{ms}$ . Der grüne senkrechte Strich markiert die von einer Bildmessung (fehlerhaft) gelieferte Kantenlage.

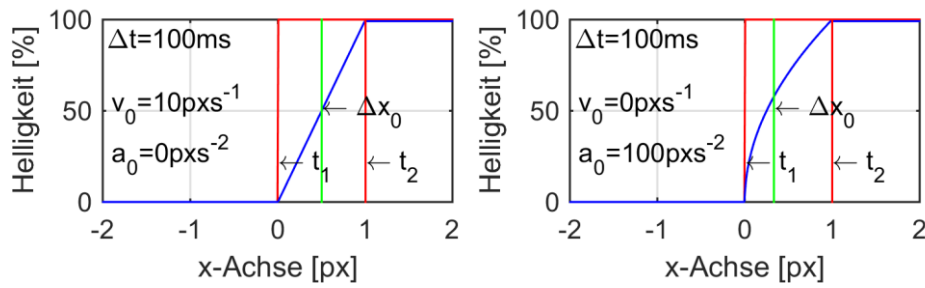


Abbildung 59: Fehlmessung  $\Delta x_0$  einer Kantenlage bei gleichförmiger Bewegung (links) und beschleunigter Bewegung (rechts).

Ogleich für  $a_0$  ein hoher Wert gewählt wurde, ist der daraus resultierende Bildmessfehler kleiner als der von  $v_0$  verursachte. Dies resultiert daraus, dass der Einfluss der Beschleunigung mit sinkender Belichtungszeit  $\Delta t$  quadratisch abnimmt, während der Einfluss der Geschwindigkeit  $v_0$  nur linear sinkt. Dies lässt sich durch das Verhältnis  $p$  zwischen Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsterm aus Gl. (5.16) ausdrücken:

$$p = \frac{2a \cdot a_0 \Delta t^2}{3a \cdot v_0 \Delta t} = \frac{2a_0 \Delta t}{3v_0} \sim \Delta t \quad (5.20)$$

Für eine Belichtungszeit von z.B.  $\Delta t=1\text{ms}$ , wie sie bei Einsatz eines LED-Blitzes üblich wäre (vgl. Kap. 4.5), würde für obiges Beispiel der Anteil des Fehlers, der durch die Beschleunigung bewirkt würde, weniger als 1% des Gesamtfehlers ausmachen. Daraus folgt, dass für Anwendungen mit sehr kurzen Belichtungszeiten auf eine Beschleunigungskorrektur verzichtet werden kann und die sehr viel einfachere

Korrektur des Abtastzeitpunktes (vgl. Kap. 5.5.2) zu hinreichend genauen Ergebnissen führt.

Für längere Belichtungszeiten im Bereich einiger 10-100ms ist die Korrektur beschleunigungsabhängiger Bildmessfehler jedoch erforderlich und kann z.B. mit der in Kap. 5.5.3 beschriebenen Methode erfolgen. Gleichförmige Bewegungen zwischen Kamera und Objekt müssen (entweder durch Neuberechnung des Abtastzeitpunktes oder durch eine Lagekorrektur) für eine „hochgenaue“ Bildmessung praktisch immer korrigiert werden, da bereits geringe Relativgeschwindigkeiten nennenswerte Fehler generieren.

## 5.6 Kapitelzusammenfassung

Eine genaue kamerabasierte Pose-Messung setzt zunächst eine genaue Bildmessung voraus. Eine optimale Kombination von Zielmarkentyp, Bildmess-Algorithmus und der Anwendung statistischer Methoden erreicht eine Auflösung der Bildmessung, die die Pixelauflösung des Bildsensors um etwa zwei Größenordnungen übertrifft (vgl. Abb. 50).

Das für das CPMS eingesetzte schnelle Bildmessverfahren der OpenCV-Bibliothek, basiert auf der subpixelgenauen Antastung der Kreuzung zweier gerader Kanten. Die Lage des Kreuzungspunktes wird auf Basis des Gradienten durch ein Ausgleichsverfahren innerhalb eines lokalen Suchfensters ermittelt (vgl. Kap. 5.2). Durch den Ausgleich über zahlreiche Pixel eines Suchfensters wird die Auswirkung von Bildrauschen auf die Bildmessung wirksam unterdrückt. Bei der für das CPMS verwendeten Kamera sind ab einer Aussteuerung von 20-30% Standardabweichungen der Bildmessung um  $<0,1\text{px}$  erreichbar. Diese Werte können durch höhere Aussteuerung nur unwesentlich verbessert werden (vgl. Kap. 5.3.3).

Während durch Bildrauschen verursachte Fehler in der Bildmessung durch Ausgleich über zahlreiche Messpunkte einer Zielmarke gemindert werden können, führt eine durch ungleichmäßige (inhomogene) Bildausleuchtung verursachte (virtuelle) Verschiebung von Kantenlagen zu systematisch falschen Bildmessungen (vgl. Kap. 5.3.4). Abhilfe schafft eine rechnerische Homogenisierung der Bestrahlungsstärke auf Basis eines Bestrahlungsmodells (vgl. Kap. 5.4). Es wurde ein globaler Ansatz zur Korrektur des gesamten Kamerabildes (vgl. Kap. 5.4.3), als auch ein lokaler Ansatz implementiert, bei dem lediglich eine Korrektur in der Umgebung der Messpunkte erfolgt (vgl. Kap. 5.4.4). Der globale Ansatz eignet sich gut zur robusten Korrektur gleichförmiger (nieder frequenter) Änderungen der Bestrahlungsstärke über der Objektebene, wie sie beim Einsatz einer Punktlichtquelle mit hochwertiger Projektionsoptik und Platzierung nahe der optischen Kameraachse auftreten. Der lokale Ansatz dagegen bietet Vorteile für Applikationen, bei denen (z.B. durch unzureichende Fremdlichtunterdrückung) stärkere lokale Graduierungen in der Bestrahlungsstärke auftreten, die aufgrund der stärkeren Glättung beim globalen Modell nicht erfasst werden.

Der OpenCV Bildmessalgorithmus, sowie die Ansätze zur Homogenisierung der Bestrahlungsstärke wurden als Matlab-Module implementiert. Anschließend wurden die Module mittels des Kamerasimulators für einige typische Aufnahmesituationen evaluiert. Dabei wurde gezeigt, dass durch inhomogene Beleuchtung bewirkte systematische Bildmessfehler durch die entwickelten Korrekturverfahren weitgehend eliminiert werden. Die dadurch erreichte Verbesserung der Messunsicherheit kann bis zu einer Größenordnung betragen.

Bei einer bewegten Bildaufnahme entsteht Bewegungsunschärfe, die zu einem systematischen Fehler der Bildmessung führt und immer korrigiert werden muss. Für eine Belichtungsdauer im Millisekunden-Bereich genügt dazu eine rechnerische Korrektur des Abtastzeitpunktes, die nur gleichförmige Bewegung betrachtet. Für längere Belichtungszeiten muss zusätzlich die Auswirkung der Beschleunigung korrigiert werden. Für beide Anwendungsfälle wurden entsprechende Verfahren entwickelt (vgl. Kap. 5.5).

---

## 6 GEOMETRISCHES KAMERAMODELL UND KALIBRIERUNG

Um mit einer realen Kamera Messungen durchführen zu können, müssen deren geometrischen Abbildungseigenschaften so exakt wie möglich bekannt sein. Dazu wird das Verhalten einer realen Kamera in Form eines Kameramodells nachgebildet. Die Bestimmung der Modellparameter erfolgt im Rahmen einer Kamerakalibrierung. Dazu werden zunächst ein geeignetes Kameramodell und die benötigten Modellparameter formuliert (vgl. Kap. 6.1 u. 6.2). Anschließend wird dieses Modell im Rahmen einer Kamerakalibrierung auf den Versuchs-Prototypen (vgl. Kap. 3.1.5 Abbildung 14) angewendet, der nach dem Konfigurationsvorschlag aus Kap. 4.7.7 aufgebaut wurde.

Aus dem Ergebnis der Kalibrierung wird der normierte Bildmessfehler gewonnen, der ein Maß für den absoluten Bildmessfehler eines diskreten Bildaufnahmesystems darstellt (vgl. Kap. 6.4). Der normierte Bildmessfehler ist eine wesentliche Basisgröße für die spätere Simulation von mehrkamerabasierten 6D-Pose-Messsystemen (vgl. Kap. 7.6) und deren Beurteilung.

### 6.1 Kameramodell

Die Grundlage nahezu aller Kameramodelle ist die *Zentralprojektion*<sup>154</sup>, deren Eigenschaften durch das sog. *Lochkameramodell*<sup>155</sup> (engl. pinhole camera) formuliert werden. Dieses Konzept beschreibt eine perfekte Kamera, bei der keine Abbildungsfehler durch optische Bauteile auftreten.

Die Modellierung der Abbildungsfehler (vgl. Kap. 4.2.6) geschieht in einem zweiten Schritt durch das Einbringen eines zusätzlichen Verzeichnungsmodells, das eine Beschreibung durch radialsymmetrische und tangentielle Korrekturfunktionen liefert.

#### 6.1.1 Zentralprojektion und Lochkameramodell

Die Zentralprojektion beschreibt zunächst das Verhalten eines idealen (fehlerfreien) Abbildungssystems. Da sie die Grundlage nahezu aller Kameramodelle bildet, soll sie kurz besprochen werden.

---

<sup>154</sup> vgl. Hanning (2011, 26)

<sup>155</sup> vgl. Hanning (2011, 13)

Eine (theoretische) Implementierung der Zentralprojektion stellt eine sog. *Lochkamera*<sup>156</sup> dar. Diese nutzt als bildgebendes Element statt eines Objektivs eine unendlich kleine Lochblende, die Ausgehend von einem Objektpunkt  $\mathbf{P}=(X,Y,Z)^T$  nur einen einzigen Lichtstrahl auf einem Punkt  $\mathbf{x}'=(x',y')^T$  der Bildebene abbildet.

Abbildung 60 zeigt den schematischen Aufbau. Die Koordinaten des Objektpunktes werden vor der Abbildung in das sog. Kamerakoordinatensystem transformiert, dessen Z-Achse mit der optischen Achse der Kamera übereinstimmt. Somit entspricht die Gegenstandsweite gerade der Z-Koordinate des Objektpunktes. Der Abstand zwischen Bildebene und Lochblende wird als Kamerakonstante  $f_c$  bezeichnet.

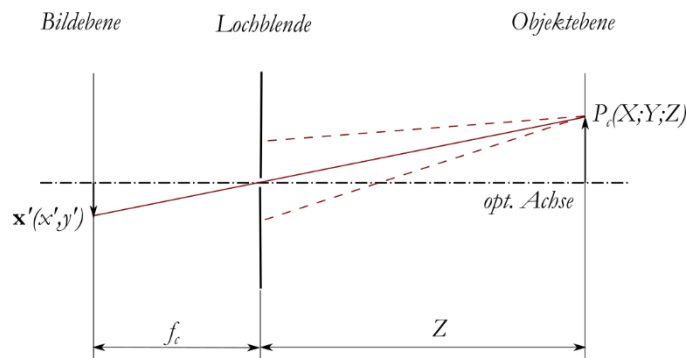


Abbildung 60: Lochkamera als Modell der idealen Abbildung.

Die Beziehung zwischen der 3D-Koordinate und ihrer 2D-Projektion lässt sich ausdrücken durch:

$$x' = \frac{f_c}{Z} X \quad y' = \frac{f_c}{Z} Y \quad (6.1)$$

Dabei werden alle Objektpunkte, die auf einem durch die Lochblende verlaufenden Strahl liegen auf die gleiche Bildkoordinate abgebildet, wodurch es zu einem Verlust der Tiefeninformation kommt. Die mit der Bildweite  $f_c$  skalierten Bildkoordinaten werden *normierte oder verallgemeinerte Bildkoordinaten*<sup>157</sup> genannt:

$$x_n = \frac{x'}{f_c} = \frac{X}{Z} \quad y_n = \frac{y'}{f_c} = \frac{Y}{Z} \quad (6.2)$$

Durch diese Normierung auf die Bildweite  $f=1$  entsteht die vereinfachte Abbildungsgleichung der normierten Zentralprojektion:

<sup>156</sup> vgl. Hanning (2011, 13)

<sup>157</sup> vgl. Jähne (2012, 84)



$$\mathbf{P}_c = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \mapsto \mathbf{x}_n = \begin{bmatrix} X/Z \\ Y/Z \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

Normierte Bildkoordinaten sind dimensionslos. Sie entsprechen dem Tangens des Winkels zwischen der optischen Achse und dem beobachteten Objektpunkt und beschreiben damit die Richtung der Objektpunktlage im Bezug zum Kamerakoordinatensystem.

Das Verhalten des Lochkameramodells entspricht, bis auf die fehlende Schärfentiefe, dem Verhalten einer Kamera mit unendlich dünnen Linsen bzw. einer idealen Abbildungsoptik<sup>158</sup>.

### 6.1.2 Erweitertes Lochkameramodell

Eine reale Kamera unterscheidet sich etwas vom einfachen Lochkameramodell. Im idealen Modell durchstößt die optische Achse die Bildebene an der Bildkoordinate (0,0) und definiert dort die Bildmitte. Bei der realen Kamera ist das Bild quer zur optischen Achse verschoben, so dass die Mitte eines 640x480 Pixel großen Bildes ungefähr an der Koordinate (320,240) liegt. Die genaue Lage hängt davon ab, wie Sensor und Objektiv zueinander montiert sind und kann durch Fertigungstoleranzen der Kamera variieren.

Das Bild hinter einer Lochblende steht (physikalisch gesehen) auf dem Kopf und ist seitenverkehrt. Bei realen Kameras wird dieser Effekt bereits in der Kameraelektronik rückgängig gemacht. Das Kameramodell muss diesem Eingriff angepasst werden. Besonders elegant lässt sich das Verhalten der realen Kamera beschreiben, wenn man sich die Bildebene als vor der Lochblende liegend vorstellt.

Abbildung 61 zeigt das erweiterte Lochkameramodell und die Abbildung eines Objektpunktes  $\mathbf{P}_c=(X,Y,Z)$  auf der Bildebene. Der sog. Bildhauptpunkt  $\mathbf{c}=(c_x,c_y)$  beschreibt die Verschiebung der Bildebene quer zur optischen Achse. *Bildhauptpunkt*<sup>159</sup> und Kamerakonstante bilden zusammen die inneren bzw. *intrinsischen Kameraparameter*<sup>160</sup>. Diese werden später noch um eine Beschreibung der Linsenverzeichnung erweitert (vgl. Kap. 6.2).

<sup>158</sup> vgl. Süsse (2014, 297)

<sup>159</sup> vgl. Süsse (2014, 297)

<sup>160</sup> vgl. Süsse (2014, 356)

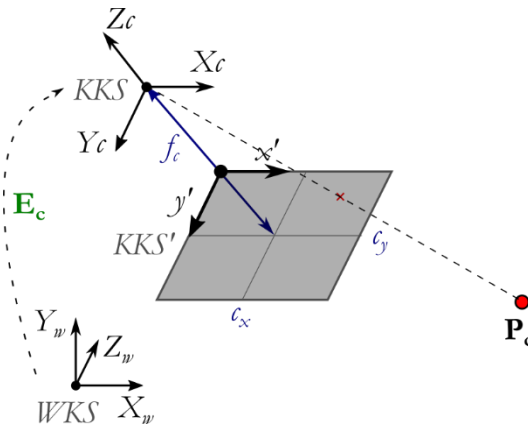


Abbildung 61: Projektion eines Weltpunktes  $\mathbf{P}_w$  auf die Bildebene einer Kamera mittels Lochkameramodell.

Das *Kamerakoordinatensystem* (KKS) definiert die räumliche Lage und Orientierung des Projektionszentrums. Um die Abbildung eines in Weltkoordinaten gegebenen 3D-Punkts zu berechnen, muss dieser zunächst in das KKS transformiert werden. Durch die Verwendung homogener Koordinaten lässt sich die Transformation als einfache Matrixmultiplikation mit der kombinierten Rotations- und Translationsmatrix  $\mathbf{E}$  beschreiben (siehe Kap. 7.1.1):

$$\tilde{\mathbf{P}}_c = \mathbf{E} \cdot \tilde{\mathbf{P}}_w \quad (6.4)$$

Die drei Rotations- und Translationsparameter der Transformation werden als äußere bzw. *extrinsische Kameraparameter*<sup>161</sup> bezeichnet.

Zur Berechnung der Bildkoordinate eines in Kamerakoordinaten gegebenen 3D-Punktes  $\mathbf{P}_c$  wird zunächst seine normierte Bildkoordinate  $x_n$  berechnet (Gl.(6.3)). Diese wird anschließend mit der Kamerakonstante  $f_c$  skaliert und durch Addition des Bildhauptpunktes an die reale Bildkoordinate  $x'$  verschoben:

$$\mathbf{x}' = \begin{pmatrix} f_c x_n + c_x \\ f_c y_n + c_y \end{pmatrix} \text{ mit } x_n = \frac{X}{Z} \text{ und } y_n = \frac{Y}{Z} \quad (6.5)$$

<sup>161</sup> vgl. Luhmann (2010)

## 6.2 Modellierung der optischen Verzeichnung

Das Lochkammermodell beschreibt eine optische Abbildung mit unendlich dünnen Linsen. Für ein reales Objektiv trifft diese Annahme nicht zu und es treten insbesondere geometrische Verzeichnungen auf. Diese sind bei monochromen Systemen der einzige Abbildungsfehler, der den Schwerpunkt einer Abbildung (Lage des Zentralstrahls) verschiebt und damit im Bildmessalgorithmus nicht kompensierbar ist<sup>162</sup>. Eine Modellierung und Kalibrierung der Verzeichnung ist daher für die präzise Bildmessung unabdingbar (vgl. auch Kap. 4.2.6).

Verwendet wird ein Verzeichnungsmodell nach *Heikkilä und Silvén*<sup>163</sup>, auf das sich die Ausführungen der folgenden Abschnitte beziehen.

### 6.2.1 Mathematische Formulierung der Verzeichnung

Heikkilä und Silvén unterscheiden zwei Verzeichnungsformen und zwar die radialsymmetrische Verzeichnung und die tangentialsymmetrische Verzeichnung. Die radiale Linsenverzeichnung bewirkt abhängig vom Abstand  $r$  zur Bildmitte eine Verschiebung der Bildposition nach Außen oder Innen. Die tangentielle Verzeichnung beschreibt eine von  $r$  abhängige Verschiebung quer zum Radius.

Zur Modellierung der Verzeichnung genügt eine 2D-Korrekturfunktion auf Bildebene<sup>164</sup>. Wegen der Symmetrie zur Bildmitte erfolgt die Modellierung auf normalisierten Bildkoordinaten (vgl. Kap. 6.1.1).

Die verzeichneten normalisierten Koordinaten  $\mathbf{x}_d$  werden allgemein durch Addition einer von der Bildposition abhängigen Funktion  $\mathbf{F}(\mathbf{x}_n)$  berechnet:

$$\mathbf{x}_d = \begin{pmatrix} x_d \\ y_d \end{pmatrix} = \mathbf{x}_n + \mathbf{F}(\mathbf{x}_n) \quad (6.6)$$

Die Funktion  $\mathbf{F}(\mathbf{x}_n)$  setzt sich zusammen aus jeweils einem Modell der radialen Verzeichnung  $R(r)$  und tangentialen Verzeichnung  $\mathbf{T}(\mathbf{x}_n)$ :

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = \mathbf{x} + R(r)\mathbf{x} + \mathbf{T}(\mathbf{x}) \quad \text{mit } r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (6.7)$$

Die radialen und tangentialen Verzeichnungskomponenten werden auf Basis der Verzeichnungsparameter  $\mathbf{k}_c = (k_1, \dots, k_5)$  durch die folgenden linearen Modelle beschrieben.

<sup>162</sup> vgl. Hanning (2011, 14)

<sup>163</sup> vgl. Heikkilä (1997)

<sup>164</sup> vgl. Hanning (2011, 17)

$$R(r) = k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 \quad \text{mit } r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$\mathbf{T}(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} 2k_3 xy + k_4 (r^2 + 2x^2) \\ k_3 (r^2 + 2y^2) + 2k_4 xy \end{pmatrix} \quad (6.8)$$

Per Definition beschreiben  $k_1$ ,  $k_2$  und  $k_3$  die radiale Verzeichnung. Abhängig von Kameratyp genügen ein bis zwei Radialkoeffizienten, während mehr als zwei u.U. zu numerischer Instabilität der Kalibrierung führen können.<sup>165</sup> Tangentiale Verzeichnung entsteht vor allem, wenn ein Objektiv aus mehreren Linsen aufgebaut wurde, deren Anordnung nicht absolut kollinear ist<sup>166</sup>. Die Verwendung der Tangentialkoeffizienten  $k_3$  und  $k_4$  ist damit ebenfalls kameraabhängig.

Welche Koeffizienten zur optimalen Kalibrierung notwendig sind, muss experimentell ermittelt werden (vgl. Kap. 6.3.5).

### 6.2.2 Intrinsische Kameraparameter

Mit der Modellierung der Objektivverzeichnung ist das Kameramodell vollständig. Tabelle 10 zeigt eine Übersicht aller relevanten Parameter. Die Notation erfolgt im Stil der später zur Kalibration eingesetzten *Camera Calibration Toolbox für Matlab*<sup>167</sup> (vgl. auch. Kap. 6.2.2).

---

<sup>165</sup> Hanning (2011, 19)

<sup>166</sup> Heikkilä (1997)

<sup>167</sup> Bougut (2015)

Tabelle 10: Übersicht der intrinsischen Kameraparameter.

Parameter	Notation	Beschreibung
<i>Bildhauptpunkt</i>	$\mathbf{c}$	Wird durch den Strahl gebildet, der senkrecht auf der Objektiv-ebene stehend durch den Brennpunkt verläuft. Der Schnittpunkt des Strahls mit der Bildebene (Kamerachip) definiert den Bildhauptpunkt. Dessen Position wird in Pixelkoordinaten angegeben und im Folgenden mit $\mathbf{c}=(c_x, c_y)^T$ bezeichnet. Die Einheit ist Pixel.
<i>Kamerakonstante</i>	$f_c$	Bezeichnet den Abstand zwischen der Bildebene und dem Projektionszentrum der Zentralprojektion entlang der optischen Achse. Die Kamerakonstante wird im Folgenden mit $\mathbf{f}_c=(f_x, f_y)^T$ bezeichnet. Die Verwendung zweier Komponenten $f_x$ und $f_y$ ermöglicht bei Bedarf die Beschreibung nicht quadratischer Bildelemente. Die Einheit ist Pixel.
<i>Scherung</i>	$\alpha_c$	Definiert den Winkel zwischen der x- und y-Pixelachse und wird mit $\alpha_c$ bezeichnet. <sup>168</sup>
<i>Verzeichnungsparameter</i>	$\mathbf{k}_c$	Die Koeffizienten für die Bildverzeichnung des Kameralinsensystems werden im Folgenden mit dem Vektor $\mathbf{k}_c=(k_{c,1} \dots k_{c,5})$ bezeichnet, wobei $k_1, k_2$ und $k_3$ die Radialkoeffizienten, $k_3$ und $k_4$ die Tangentialkoeffizienten sind.

### 6.2.3 Verwendung des Kameramodells

Das Kameramodell beschreibt die Abbildung eines gegebenen 3D-Punktes im Bildkoordinatensystem der Kamera. Ein in das Kamerakoordinatensystem transformierter Objektpunkt  $\mathbf{P}_c=(X,Y,Z)^T$  wird dazu zunächst mittels der Zentralprojektion (Gl. (6.2)) auf eine normierte Bildkoordinate  $\mathbf{x}_n$  abgebildet:

$$\mathbf{x}_n = \begin{pmatrix} \frac{X}{Z} \\ \frac{Y}{Z} \end{pmatrix} \tag{6.9}$$

<sup>168</sup> Die Scherung wird in der Kalibrierung häufig ausgeschlossen, da bei Bildsensoren, die in modernen Prozessen gefertigt wurden die Scherung  $\alpha_c$  gerade  $90^\circ$  beträgt.

Im nächsten Schritt wird durch Anwendung von Gl. (6.6) die Verzeichnung des Abbildungssystems eingebracht und aus der normierten Koordinate  $\mathbf{X}_n$  die verzeichnete (normierte) Bildkoordinate  $x_d$  berechnet. Zuletzt erfolgt die Umrechnung der verzeichneten Bildposition  $\mathbf{x}_d$  in eine Pixel-Koordinate  $\mathbf{x}_p$  im Bildkoordinatensystem der realen Kamera durch Anwendung von Gl.(6.5):

$$\mathbf{x}_p = \begin{pmatrix} x_p \\ y_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x \cdot x_d + c_x \\ f_y \cdot y_d + c_y \end{pmatrix} \quad (6.10)$$

Die Beschreibung der räumlichen Lage und Orientierung einer Kamera (extrinsische Parameter) und die Transformation eines Weltpunktes  $\mathbf{P}_w$  in das Kamerakoordinatensystem werden in Kapitel 7.1 zur Formulierung von Mehrkamera-Modellen ausführlich besprochen und sollen zunächst nicht weiter betrachtet werden.

### 6.3 Kamerakalibrierung

Die Kamerakalibrierung dient der Ermittlung der intrinsischen Parameter einer realen Kamera. Dazu werden Kalibrieraufnahmen einer bekannten 3D-Struktur angefertigt und durch Bildmessung die Bildkoordinaten ihrer Referenzpunkte bestimmt. Die Tupel aus 3D- und 2D-Koordinaten stellen die Datenbasis für das Kalibrierverfahren dar.

Ein wesentliches Ziel der Kalibrierung ist auch die Abschätzung des maximalen Bildmessfehlers einer gegebenen Konfiguration aus Beleuchtung, Kamera und Bildmessverfahren. Dieser dient später zur Simulation der Messunsicherheit von mehrkamerabasierten Pose-Messsystemen (vgl. Kap. 7.6).

Als Werkzeug zur Durchführung der Kamerakalibrierung wurde die *Calibration Toolbox for Matlab* von Jean-Yves Bougut<sup>169</sup> eingesetzt. Es handelt sich hierbei um ein Plug-In für die *Matlab*<sup>170</sup> Umgebung, das im Wesentlichen eine komfortable Implementierung einer Kalibriermethode nach Zhang<sup>171</sup> darstellt, wobei für die Modellierung der Verzeichnung das beschriebene Modell nach Heikkilä und Silvén<sup>172</sup> angewendet wird (vgl. Kap. 6.2).

---

<sup>169</sup> Bougut (2015)

<sup>170</sup> The Mathworks Inc. (2015)

<sup>171</sup> Vgl. Zhengyou (2000)

<sup>172</sup> Vgl. Heikkilä (1997)

### 6.3.1 Beschreibung des Kalibrierverfahrens

Ziel des Kalibrierverfahrens ist die Ermittlung des Zusammenhangs zwischen 3D-Referenzkoordinaten und ihren 2D-Abbildungen durch Bestimmung der intrinsischen Parameter des Kameramodells.

Als Datenbasis dienen Kalibrieraufnahmen eines bekannten 3D-Objektes, das für jede Einzelaufnahme eine Gruppe von Pärchen aus 3D-Objektpunkten und ihrer Abbildung liefert. Im Allgemeinen müssen die Referenzpunkte räumlich verteilt sein, was zu komplexen Kalibrierobjekten, beispielsweise einem Winkel, führt.

Zhang<sup>173</sup> entwickelte in seiner Arbeit „A flexible new technique for camera calibration“ jedoch eine Methode, die rein planare Kalibrierobjekte zulässt. Auf dieser Grundlage wird es möglich, eine Zielmarke, wie sie in Kapitel 5 zur hochgenauen Bildmessung beschrieben wurde, unter Einsatz desselben Bildmessverfahrens zur Verortung der Referenzpunkte für die Kalibrierung einzusetzen.

Nach Zhang müssen mindestens zwei Kalibrieraufnahmen des Musters aus unterschiedlichen Orientierungen aufgenommen werden. Bessere Ergebnisse können jedoch auf einer größeren Datenbasis von 15-20 Kalibrierbildern unter Mittelung vieler Bildmessungen erzielt werden. Auch können im überbestimmten Modell Datenausreißer erkannt und eliminiert werden (vgl. Kap. 6.3.4).

Die intrinsischen Kameraparameter (Bildhauptpunkt, Kamerakonstante und Verzeichnungparameter) werden durch einen Modellausgleich in Form eines nicht linearen Optimierungsverfahrens bestimmt. Diese Aufgabe übernimmt die *Camera Calibration Toolbox*<sup>174</sup>.

Für ein Kameramodell  $\mathbf{f}(\mathbf{a}, \mathbf{P}_i)$ , welches für einen Satz von Kameraparametern  $\mathbf{a}$  die Abbildung eines 3D-Punktes  $\mathbf{P}_i$  auf der Bildebene berechnet, kann die Modellabweichung  $\boldsymbol{\varepsilon}_i$  als Differenz zur gemessenen Bildkoordinate  $\mathbf{u}_i$  formuliert werden:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_i = \mathbf{f}(\mathbf{a}, \mathbf{P}_i) - \mathbf{u}_i \quad (6.11)$$

Die Abweichung  $\boldsymbol{\varepsilon}_i$  wird als *Reprojektionsfehler* bezeichnet. Die Kamerakalibrierung ermittelt einen Satz von Kameraparametern, für den die quadratische Summe über alle  $\boldsymbol{\varepsilon}_i$  minimal wird. Dies ist eine Lösung im Sinne der kleinsten Quadrate.

$$\sum_i |\boldsymbol{\varepsilon}_i|^2 \rightarrow \min \quad (6.12)$$

Als Kennzahl für die Kalibriergüte im Sinne eines mittleren Reprojektionsfehlers dient das quadratische Mittel (RMS) über alle Einzelfehler  $\boldsymbol{\varepsilon}_i$ :

---

<sup>173</sup> Vgl. Zhengyou (2000)

<sup>174</sup> Vgl. Bougut (2015)

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i^n |\varepsilon_i|^2} \quad (6.13)$$

$\varepsilon_i$  hat einen Erwartungswert von 0, daher entspricht das quadratische Mittel gerade der Standardabweichung. Nach einer erfolgreichen Kalibrierung ergibt sich für  $\bar{\varepsilon}$  ein für das Bildaufnahme- und Bildmessverfahren typischer Wert in der Einheit Pixel, der eine Kennzahl für die Kalibriergröße darstellt. Eine Überschreitung dieses Wertes ist ein Hinweis auf einen Kalibrierfehler.

### 6.3.2 Vorbereitung der Kalibrierung

Für die Kalibrierung wird zunächst eine Kalibrierplatte in Form eines Schachbrettmusters mit bekannter Feldgröße benötigt. Dieses Muster entspricht der Form einer Zielmarke (vgl. Kap. 5), wird jedoch so groß ausgelegt, dass es in der Regel bildfüllend fotografiert werden kann.

Größe und Referenzpunktzahl des Kalibrierusters hängen vom Aufnahmeabstand und dem verwendeten Objektiv ab.

Im Konfigurationsvorschlag aus Kapitel 4.7.7 wurde eine Kamera mit einer Auflösung von  $(1600 \times 1200) \text{px}^2$  mit einem 12mm Objektiv und ein mittlerer Arbeitsabstand von 1m vorgeschlagen. Diese Konfiguration wird für die Kalibrierung übernommen.

Das Kalibriermuster wird als Schachbrett mit  $12 \times 9$  Kreuzungspunkten, einer Feldgröße von 20mm und damit einer Gesamtgröße von  $(260 \times 180) \text{mm}^2$  ausgelegt. Das Muster wurde auf ein planes thermisch stabiles Glassubstrat aufgebracht. Anschließend wurden die genauen Lagen der Referenzpunkte auf einem Messprojektor eingemessen und in einer Beschreibungsdatei vermerkt.

Für die Kalibrierung wird die gleiche Aufnahmesituation wie im späteren Messbetrieb hergestellt. Nach Einstellung der Objektivblende wird die Kamera unter Verwendung eines Simenssterns (vgl. Kap. 4.2.2) auf höchste Auflösung im Arbeitsabstand scharf gestellt. Anschließend werden Blenden- und Entfernungseinstellung fest fixiert.

### 6.3.3 Durchführung der Kamerakalibrierung

Zur Anfertigung der Kalibrieraufnahmen wird das Muster auf einem hochwertigen Stativ in unterschiedlichen Orientierungen im Arbeitsabstandsbereich der Kamera positioniert. Auf diese Weise werden ca. 20 Aufnahmen angefertigt.

Anschließend erfolgt die Datengewinnung aus den Kalibrieraufnahmen durch Extraktion der Referenzpunkte (Schachbrettkreuzungen) durch das in Kapitel 5.2 beschriebene Bildmessverfahren. Das Ergebnis ist in Abbildung 62 zu sehen.



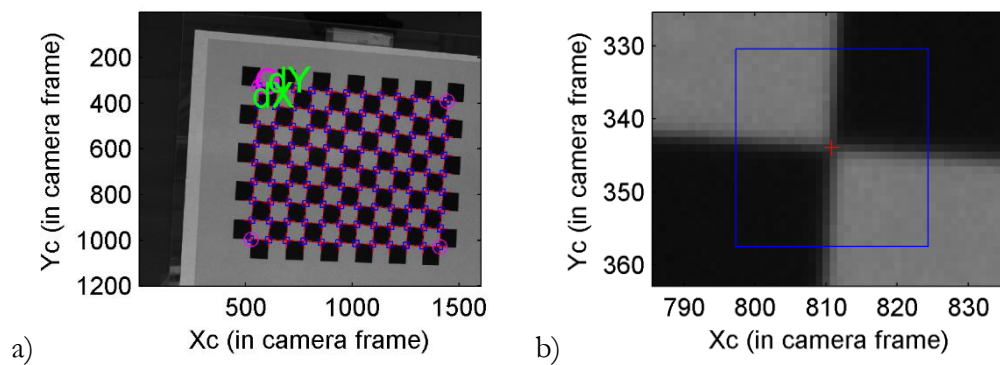


Abbildung 62: a) Lokalisierung der Referenzpunkte auf dem Kalibriermuster und b) subpixelgenaue Bestimmung des Kreuzungspunktes nach Kap. 5.2.

Zur Definition der relativen Lage der Kamera zum Kalibriermuster wird in dessen linker oberen Ecke ein 3D-Koordinatensystem verankert. Die  $X$ - und  $Y$ -Achse liegen in der Ebene des Musters, während die  $Z$ -Achse senkrecht auf der Ebene steht. Damit haben alle Referenzpunkte die  $Z$ -Koordinate 0.

Nach Auswertung aller Kalibrierbilder liegt für jedes Bild eine Tabelle der durch das Muster gegebenen 3D-Referenzpunkte und ihrer Bildkoordinaten vor. Der Kalibrierprozess kann gestartet werden. Abbildung 63 zeigt zunächst die im Prozess rekonstruierten Aufnahmeposen der Kamera, die auch als extrinsische Kameraparameter bekannt sind. Dabei symbolisiert das blaue Gitter die Position des Kalibrierusters.

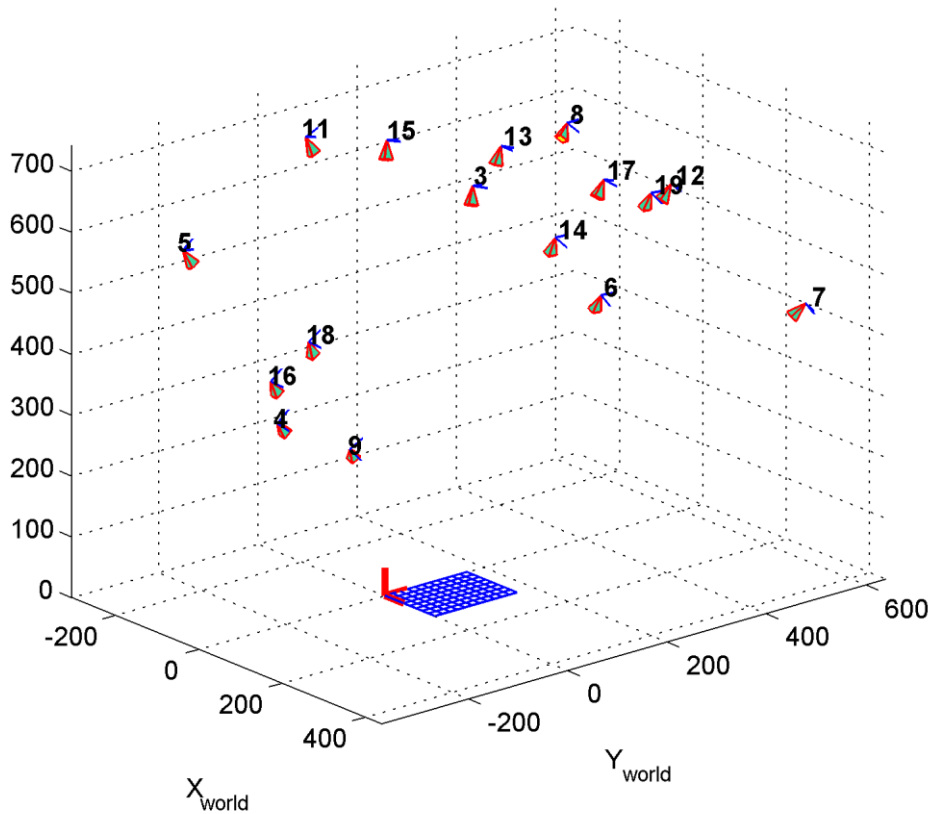


Abbildung 63: Räumliche Visualisierung der Kameraposen bei Aufnahme der Kalibrierbilder.

Tabelle 11 zeigt das Ergebnis des Kalibrierprozesses durch die Calibration Toolbox<sup>175</sup>. Die intrinsischen Kameraparameter Kamerakonstante, Bildhauptpunkt und Verzeichnung entsprechen der Definition aus Kap. 6.2.2. Die Abschätzung von Konfidenzintervallen wird durch die Überbestimmung des Kalibrierungsgleichungssystems ermöglicht. Der Reprojektionsfehler  $\bar{\epsilon}$  übersteigt den groben Erfahrungswert für hochwertige Industriekerasysteme (ca. 0,1px), was ein Hinweis auf nicht optimale Kalibrierenaufnahmen darstellt. Nachbesserungen durch Beseitigung systematischer Bildmessfehler und Anpassung des Verzeichnungsmodells sind erforderlich (vgl. Kap. 6.3.4 u. 6.3.5).

<sup>175</sup> Vgl. Camera Calibration Toolbox for Matlab Bougut (2015)

Tabelle 11: Ergebnis der Kamerakalibrierung unter Verwendung von ca. 20 Kalibriereraufnahmen.

Parameter	Symbol	Kalibrierergebnis	Konfidenzintervall
Kamerakonstante	$\mathbf{f}_c=(f_x, f_y)$ [px]	[2835.02, 2836.30]	$\pm[2.55, 2.57]$
Bildhauptpunkt	$\mathbf{c}=(c_x, c_y)$ [px]	[804.29, 580.06]	$\pm[5.36, 4.55]$
Verzeichnung	$\mathbf{k}_c$	[-0.044, -0.266, 0.004, -0.001, 0.001]	$\pm[0.001, 0.045, 0.001, 0.001, 0.001]$
Reprojektionsfehler (RMS)	$\bar{\boldsymbol{\varepsilon}} = (\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_x, \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_y)$ [px]	[0.32, 0.35]	-

### 6.3.4 Aufdeckung und Beseitigung von Kalibrierfehlern

Bei der Bildmessung, also der genauen Verortung der Referenzpunkte auf den Kalibrierbildern, können Fehler entstehen, die sich nach der Kalibrierung in einer Fehlbestimmung der intrinsischen Kameraparameter ausdrücken.

Während stochastische Fehler (z.B. durch Bildrauschen) durch die Anfertigung vieler Kalibriereraufnahmen ausgemittelt werden können, tragen systematische Fehler potentiell zu falschen Kalibrierergebnissen bei und sollten daher vermieden oder erkannt und beseitigt werden.

Solche Fehler entstehen z.B. durch verwackelte Aufnahmen, Lichtreflexe oder Ausleuchtungsfehler (z.B. Schattenbildung). Sie treten im Gegensatz zum Messbetrieb im Kalibrierbetrieb mit höherer Wahrscheinlichkeit auf, da bei Kalibriereraufnahmen zugunsten einer besseren Modellbildung auch Aufnahmen im perspektivischen Grenzbereich erstellt werden, wobei erhöhte Unschärfe und Reflexionen möglich sind.

Systematische Fehler der Bildmessung können durch die Betrachtung des Reprojektionsfehlers  $\boldsymbol{\varepsilon}$  (vgl. Kap. 6.3.1) in den einzelnen Kalibriereraufnahmen aufgedeckt werden. Ein Beispiel ist in Abbildung 64 zu sehen. Die in Teil a) eingezeichneten Fehlervektoren zeigen sowohl einzelne Datenausreißer als auch ganze Gruppen von Punkten die einen systematischen Versatz aufweisen. In Teil b) ist die zugehörige Fehlerverteilung im Pixelmaßstab zu sehen.

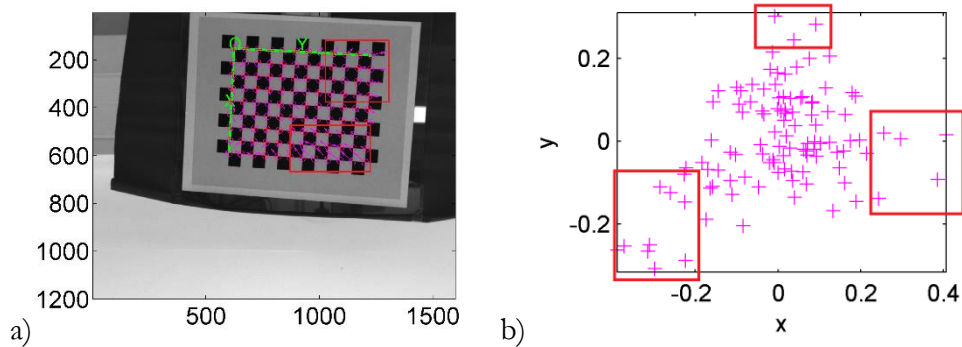


Abbildung 64: Fehler bei der Bildmessung. a) Fehlervektoren zeigen systematische Fehlmessung von Teilgruppen. b) zeigt den Reprojektionsfehler in Pixeln.

Sofern die überwiegende Anzahl an Bildmessungen korrekt sind und damit das Modell stützen, können einzelne Datenausreißer über ihren erhöhten Reprojektionsfehler erkannt und eliminiert werden.

Dazu werden zunächst Kalibrieraufnahmen aufgespürt, die Bildmessungen mit erhöhtem Reprojektionsfehler enthalten. Als nächstes wird versucht, diese Fehler durch Adaption des Bildmess-Algorithmus für diese Bilder zu beseitigen (vgl. Kap. 5.2). Gelingt dies nicht, so wird die betroffene Kalibrieraufnahme aus dem Prozess ausgeschlossen.

Am Ende verbleiben nur Kalibrieraufnahmen mit annähernd gaußverteilterm Reprojektionsfehler, wodurch dessen quadratisches Mittel sich in guter Näherung als Standardabweichung angeben lässt (vgl. auch Kap. 6.4):

$$\sigma_{rep} \approx |\bar{\varepsilon}| \quad (6.14)$$

Abbildung 65 zeigt das Korrekturergebnis beispielhaft an einer Gruppe aus drei Kalibrieraufnahmen. Die in den Bildern a)-c) eingezeichneten Fehlervektoren zeigen Richtung und relative Größe des Reprojektionsfehlers. Teil d) der Abbildung zeigt die Verteilung des Fehlers für alle drei Aufnahmen in Pixeln. Das Modell ist damit weitgehend frei von systematischen Fehlern.

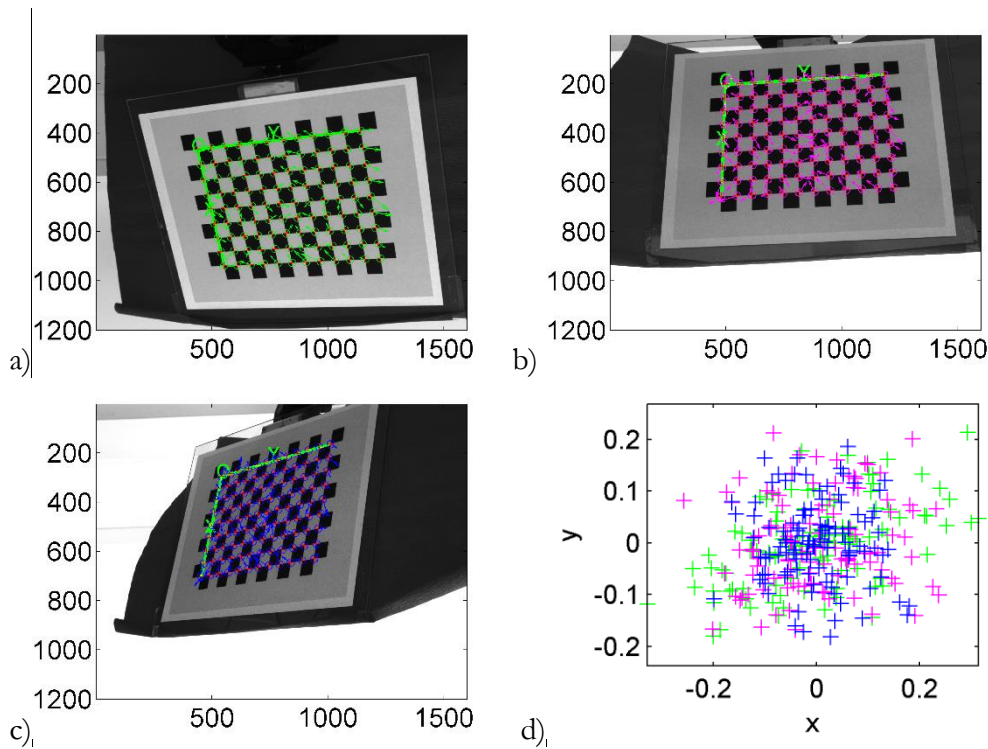


Abbildung 65: Beispielhafter Reprojektionsfehler bei einer Gruppe aus drei Kalibrierenaufnahmen a), b) und c) nach Optimierung der Bildmessung. Der Fehler d) der Bildmessungen in Pixeln ist für alle Aufnahmen nahezu gaußverteilt. Die in den Bildern eingezeichneten Fehlervektoren zeigen keine Systematik oder Ausreißer.

### 6.3.5 Anpassung des Verzeichnungsmodells

Da die auftretenden Verzerrungen von der Objektivkonstruktion abhängen, ist eine Adaption des Verzeichnungsmodells notwendig. Dazu wird zunächst eine Kalibrierung mit vollem Koeffizientensatz, also radialer Verzerrungskorrektur bis zur dritten Ordnung und tangentialer Korrektur durchgeführt (vgl. Kap. 6.2.1).

Anschließend werden die relevanten Verzerrungskoeffizienten bestimmt und die nicht relevanten aus dem Kameramodell entfernt.

Die Visualisierung der modellierten radialen bzw. tangentialen Verzerrung einer CPMS-Kamera mittels der *Calibration Toolbox* zeigen Abbildung 66 und Abbildung 67. Im unteren Bereich sind jeweils in tabellarischer Form die in der Kalibrierung bestimmten intrinsischen Kameraparameter mit ihren jeweiligen Konfidenzintervallen zu sehen. Der Wert *Pixelerror* beschreibt den mittleren Reprojektionsfehler. *Focal Length* und *Principal Point* beschreiben Kamerakonstante und Bildhauptpunkt in der Einheit Pixel. *Radial Coefficients* bezeichnet die radialen Verzerrungskoeffizienten erster, zweiter und dritter Ordnung (äquivalent zu  $k_1, k_2, k_3$ ) und *Tangential Coefficients* die tangentialen Koeffizienten  $T_x$  und  $T_y$ . (äquivalent zu  $k_3, k_4$ ). Die eingezeichneten Äquipotentiallinien zeigen die örtliche Korrektur in Pixeln.

Betrachtet man die Ergebnisse der Kalibrierung, so fällt auf, dass die Tangentialkoeffizienten sehr klein sind und außerdem in der Größenordnung ihres Konfidenzintervalls liegen. Eine sinnvolle Bestimmung dieser Modellparameter ist auf Basis der vorgegebenen Kalibrierdaten demnach nicht möglich. Weiter zeigt sich eine relativ große Messunsicherheit beim Bildhauptpunkt im Bereich von etwa 4 Pixel und der Radialkoeffizienten 2. und 3. Ordnung.

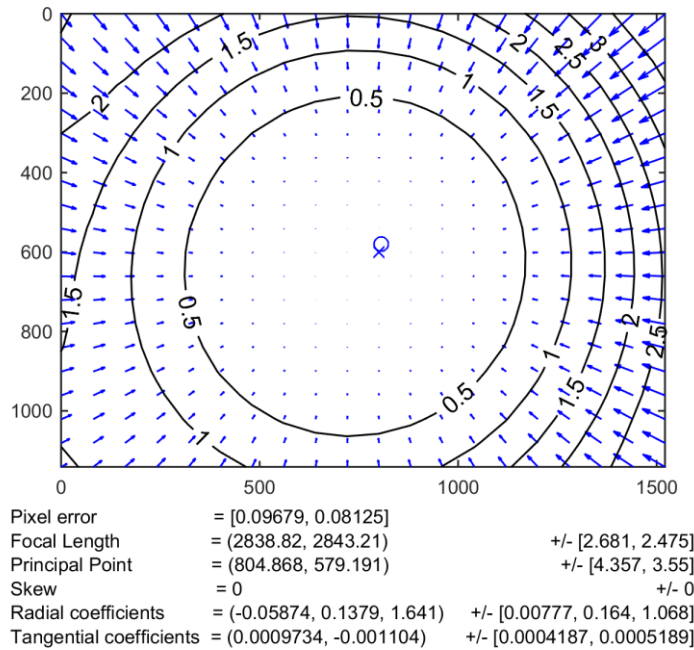


Abbildung 66: Visualisierung der radialen Verzeichnungskomponente nach Bestimmung aller radialen- und tangentialen Koeffizienten.

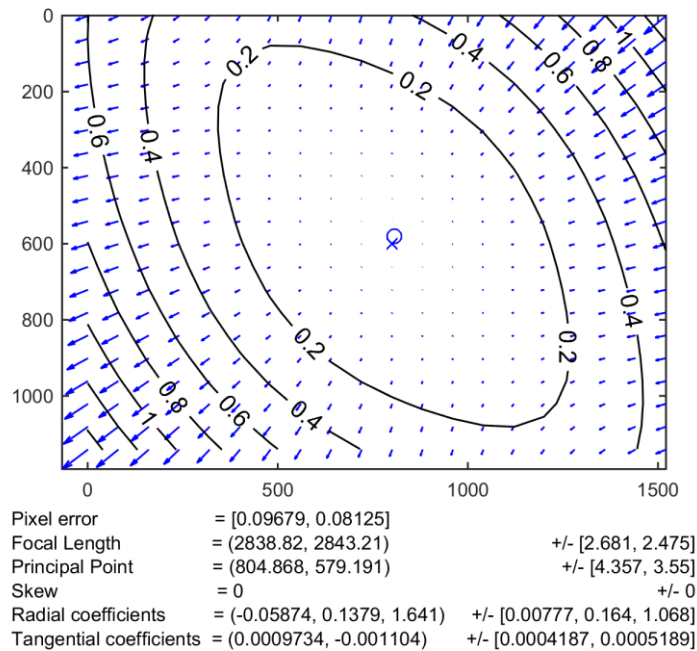


Abbildung 67: Visualisierung der tangentialen Verzerrungskomponente nach Bestimmung aller radialen- und tangentialen Koeffizienten

Die nicht bestimmbaren Tangentialkoeffizienten werden aus dem Modell entfernt und die Kalibrierung wiederholt. Nun ist lediglich noch der Radialkoeffizient 3. Ordnung nicht signifikant und wird in einem weiteren Zwischenschritt eliminiert. Das Ergebnis zeigt Abbildung 68. Zu bemerken ist die deutliche Verkleinerung des Konfidenzintervalls des Bildhauptpunkts und vor allem der Konfidenzintervalle der Radialkoeffizienten 1. und 2. Ordnung. Letztere liegen nun etwa eine Größenordnung unter den Beträgen der Koeffizienten. Kameramodell und reale Kamera sind damit gut aufeinander abgeglichen.

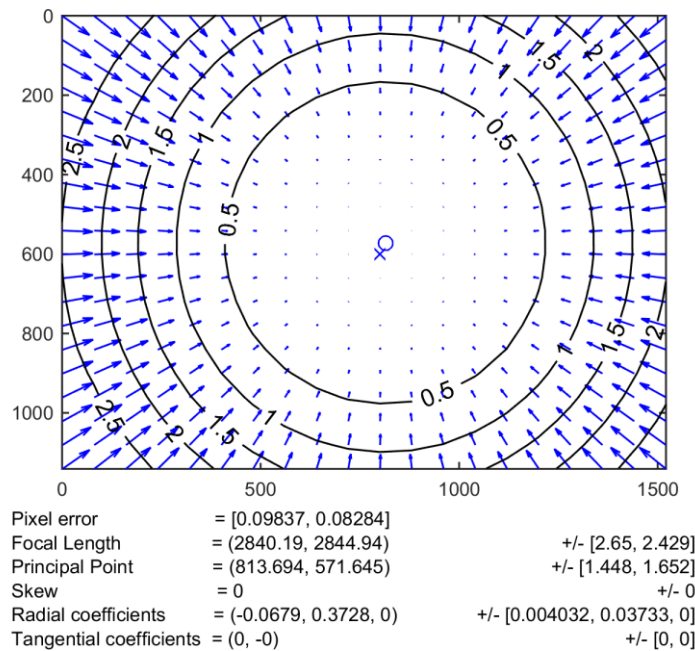


Abbildung 68: Visualisierung der radialen Verzeichnung unter Verwendung eines reduzierten Modells, bestehend aus Radialkomponenten 1. und 2. Ordnung.

### 6.3.6 Ergebnisse der optimierten Kamerakalibrierung

Tabelle 12 zeigt das Ergebnis der fehlerbereinigten Kamerakalibrierung mit angepasstem Verzeichnungsmodell. Gegenüber der nicht optimierten Kalibrierung (verg. Tabelle 11) ist eine deutliche Verbesserung des mittleren Reprojektionsfehlers und hohe Relevanz der verbleibenden Verzeichnungsparameter gegeben.

Tabelle 12: Ergebnis der fehlerbereinigten und optimierten Kamerakalibrierung.

Parameter	Symbol	Kalibrierergebnis	Konfidenzintervall
Kamerakonstante	$\mathbf{f}_c=(f_x, f_y)$ [px]	[2840.16, 2844.94]	$\pm[2.85, 2.43]$
Bildhauptpunkt	$\mathbf{c}_c=(c_x, c_y)$ [px]	[813.69, 571.65]	$\pm[1.45, 1.65]$
Verzeichnung	$\mathbf{k}_c=(k_1, k_2)$	[-0.068, 0.37]	$\pm[0.004, 0.037]$
Reprojektionsfehler (RMS)	$\bar{\epsilon} = (\bar{\epsilon}_x, \bar{\epsilon}_y)$	<[0.1, 0.1]	-



## 6.4 Abschätzung des normierten Bildmessfehlers

Zu einem späteren Zeitpunkt soll im Rahmen von Simulationen die Messunsicherheit mehrkamerabasierter Pose-Messsysteme analysiert, deren Design verbessert und ein Verfahren zur Systemkalibrierung entwickelt werden (vgl. Kap. 7.5, 7.6). Dazu stellt die mit einem diskreten Bildaufnahmesystem erreichbare normierte Bildmessgenauigkeit eine wichtige Eingabegröße für die realitätsnahe Simulation dar.

Eine Kombination aus Kamera und Bildmessverfahren kann als Winkelmesssystem angesehen werden, das den Winkel zwischen einem beobachteten 3D-Objektpunkt und der optischen Kameraachse misst. Um die Leistung eines diskreten Systems unabhängig von der verwendeten Kamerahardware (Bildsensor und Objektiv) zu beschreiben, wird der *normierte Bildmessfehler* definiert. Analog zur normierten Bildkoordinate, die den Beobachtungswinkel eines Objektpunktes wieder gibt (vgl. Kap. 6.1.1), bezeichnet der normierte Bildmessfehler die (stochastische) Messunsicherheit dieser Beobachtung in Form der Standardabweichung  $\sigma_l$ .

Zur Abschätzung des normierten Bildmessfehlers  $\sigma_l$  eines diskreten Bildaufnahmesystems wird der mittlere Reprojektionsfehler zugrunde gelegt. Dieser kann für eine Kalibrierung ohne systematische Fehler als Standardabweichung  $\sigma_{rep}$  ausgedrückt werden (vgl. Gl. (6.14)). Unter der Annahme, dass das Kameramodell eine korrekte Beschreibung der realen Kamera liefert (also kein Kalibrierfehler vorliegt), entspricht der Reprojektionsfehler  $\sigma_{rep}$  gerade dem Bildmessfehler in Pixelkoordinaten der Kamera.

Die Umrechnung des Reprojektionsfehlers  $\sigma_{rep}$  in den normierten Bildmessfehler  $\sigma_l$  erfolgt entsprechend Gl. (6.2) durch Division der Kammerkonstante  $f_c$ :

$$\sigma_l = \frac{\sigma_{rep}}{f_c} \quad (6.15)$$

In der Praxis kommt es vor, dass  $\sigma_l$  für eine alternative Objektivbrennweite  $f_{opt}$  berechnet werden soll, ohne dazu eine aufwendige Neukalibrierung zu initiieren. In diesem Falle kann  $f_c$  bei bekannter Pixelgröße  $S_p$  näherungsweise aus  $f_{opt}$  geschätzt werden:

$$f_c \approx \frac{f_{obj}}{S_p} \quad (6.16)$$

Der normierte Bildmessfehler  $\sigma_l$  beschreibt damit den stochastischen Fehler eines diskreten Bildmesssystems auf der Grundlage seines Kalibrierergebnisses. Durch die Normierung ergibt sich eine von weiteren Parametern des Bildaufnahmesystems unabhängige Vergleichsgröße.

Für die kalibrierte Bildaufnahme-Konfiguration (vgl. Kap. 4.7.7) ergibt sich auf Basis von Tabelle 12 ein  $\sigma_l$  von aufgerundet  $3,6 \cdot 10^{-5}$  oder, als Winkelfehler ausgedrückt, von  $0,002^\circ$ .

## 6.5 Kapitelzusammenfassung

Ziele des Kapitels waren die Aufstellung und Optimierung eines Kameramodells und die anschließende Kalibrierung der Modellparameter, sowie die Ermittlung des normierten Bildmessfehlers für ein diskretes Bildaufnahmesystem.

Als Beispiel für die Kalibrierung diente die in Kap. 4.7.7 beschriebene Bildaufnahmekonfiguration unter Verwendung eines 12mm Objektivs.

Durch die Beseitigung systematischer Bildmessfehler (Kap. 6.3.4) und Adaption des Verzeichnungsmodells (Kap. 6.3.5) konnte der Reprojektionsfehler von etwa 0,3 Pixel auf  $<0,1$  Pixel reduziert werden und die numerische Stabilität durch den Ausschluss nicht relevanter Modellparameter verbessert werden.

Es wurde eine Methode zur Abschätzung des absoluten normierten Bildmessfehlers eines diskreten Bildaufnahmesystems auf Grundlage der Kamerakalibrierung vorgestellt (Kap. 6.4). Für das getestete Bildaufnahmesystem wurde ein normierter Bildmessfehler von  $0,002^\circ$  bestimmt. Dieses Ergebnis dient als Grundlage zur Simulation und Fehlerabschätzung komplexerer Mehrkamerakonfigurationen zur 6D-Pose-Messung (vgl. Kap. 7.5, 7.6).

---

## 7 MEHRKAMERABASIERTE 6D-POSE-MESSSYSTEME

In den vorherigen Kapiteln wurden die Grundsteine zur Entwicklung eines kamerabasierten 6D-Pose-Messsystems (CPMS) gelegt. Dazu wurde zunächst ein tieferes Verständnis digitaler Bildaufnahmesysteme entwickelt und gezeigt, wie ein System aus Kamera und Beleuchtung für hochgenaue Bildmessungen zu entwerfen ist (vgl. Kap. 4). Weiter wurden Softwarealgorithmen für die beleuchtungsunabhängige hochgenaue Bildmessung photogrammetrischer Zielmarken entwickelt (Kap. 5) und gezeigt, wie eine einzelne Beleuchtungs-/Kameraeinheit kalibriert und somit von systematischen Fehlern befreit werden kann (Kap. 5).

Auf dieser Basis soll in diesem Kapitel ein Mehrkamera-Messkopf entwickelt werden, der mehrere Einzelkamarasysteme zu einem präzisen 6D-Pose-Sensor kombiniert. Dabei ist die besondere Herausforderung, eine Kamerakonfiguration (in Anzahl und Anordnung der Einzelkamaras) zu finden, bei der ein gegebener Fehler der Bildmessung möglichst nur einen geringen Fehler der Pose-Messung verursacht.

Um aus den Einzelbildern mehrerer Kameras die räumliche Pose zu errechnen, wird zunächst ein photogrammetrisches Abbildungsmodell aufgestellt, das den Zusammenhang zwischen den Messdaten (in Form von Bildkoordinaten) und der zu messenden System-Pose beschreibt (vgl. Kap. 7.1).

Zur Berechnung der System-Pose, sind die Modellparameter so einzupassen, dass das Modell die beobachtete Bildinformation korrekt (im Sinne der kleinsten Fehlerquadrate) beschreibt. Dazu ist ein komplexes nicht-lineares Gleichungssystem aufzustellen und effizient zu lösen (vgl. Kap. 7.2).

Die erzielbare Genauigkeit einer Pose-Messung hängt nicht nur vom gegebenen Bildmessfehler ab. Der Pose-Fehler wird darüber hinaus ganz wesentlich von der Anzahl und Anordnung der Kameras und damit vom Design des Mehrkamerakopfes beeinflusst. Bei willkürlicher Anordnung entstehen „schwer detektierbare Bewegungen“ (vergleichbar mit Singularitäten in der Robotik), die für bestimmte Freiheitsgrade die Wirkung des Bildmessfehlers auf den Pose-Fehler massiv verstärken (vgl. 7.3).

Zur Identifikation schwer detektierbarer Bewegungen auf Basis der Modellgleichungen wurde ein Verfahren zur Ermittlung der Fehlerfortpflanzung zwischen Bild- und Pose-Fehler entwickelt (vgl. Kap. 7.4). Auf Basis dieses Verfahrens werden unterschiedliche Designs des Mehrkamera-Kopfes evaluiert und eine bzgl. des erzielbaren Pose-Fehlers optimale Konfiguration erarbeitet (vgl. Kap. 7.5).

Das Abbildungsmodell eines CPMS enthält, neben der gesuchten System-Pose als eigentlichen Messwert, zahlreiche weitere Systemparameter. Zu diesen gehören z.B. die räumlichen Lagen der beobachteten Zielmarken oder auch die Abstände und Orientierung der einzelnen Kameras auf dem Mehrkamera-Kopf. Diese Systemparameter sind zwar konstant, sie müssen vor der Inbetriebnahme eines CPMS jedoch im Rahmen einer Systemkalibration ermittelt werden. Für die Systemkalibration werden geeignete Verfahren für typische praktische Kalibriersituationen erarbeitet. Weiter wird

an Simulationen einer beispielhaften CPMS-Konfiguration gezeigt, welche Messgenauigkeit ein diskretes System erreichen kann und wie ein solches System mittels des Bildmesssimulators analysiert und optimiert werden kann (vgl. Kap 7.6).

## 7.1 Abbildungsmodell eines Mehrkameranagements

Um die räumliche Pose des CPMS zu ermitteln, wird zunächst ein Modell erstellt, welches mathematisch die Abbildung der durch die Zielmarken gegebenen 3D-Referenzpunkte auf die Bildebenen der Kameras beschreibt. Neben einigen Konstanten, wie den Positionen der Zielmarken und der Anordnung der einzelnen Kameras auf dem Träger, enthält das Modell die gesuchte räumliche Pose (und damit die Pose der Roboterhand) als unbekanntes Parameter. Die Bestimmung dieser Pose erfolgt durch eine Modelleinpassung im Rahmen einer nichtlinearen Ausgleichsrechnung<sup>176</sup>. Dabei werden die Modellparameter so eingestellt, dass die Abweichung zwischen Modell und realer Beobachtung minimal wird.

### 7.1.1 Transformationen auf Basis homogener Koordinaten

*Homogene Koordinaten*<sup>177</sup> sind ein eleganter Formalismus zur einheitlichen Beschreibung von Transformationen wie z.B. der Rotation und Translation im dreidimensionalen Raum. Zur Umwandlung einer euklidischen Koordinate  $\mathbf{x}$  in eine homogene Koordinate  $\tilde{\mathbf{x}}$  wird diese mittels einer Konstante  $c$  um eine Dimension erweitert. Wird  $c=1$  gewählt, wird die Konversion trivial:

$$\begin{aligned}\mathbf{x} = (x, y, z)^T &\Leftrightarrow \tilde{\mathbf{x}} = (cx, cy, cz, c)^T \\ \mathbf{x} = (x, y, z)^T &\Leftrightarrow \tilde{\mathbf{x}} = (x, y, z, 1)^T \quad \text{für } c = 1\end{aligned}\tag{7.1}$$

Eine Koordinatentransformation wird in Form einer (homogenen) 4x4-Transformationsmatrix formuliert. Eine komplexe Transformation wird dabei durch eine Matrixmultiplikation verschiedener Elementartransformationen aufgebaut, die Operationen wie Translation und Rotation, aber auch Skalierung oder Projektion erlauben.

Beispiele für die elementare Translation um einen Vektor  $\mathbf{t}$  und eine Rotation um einen Winkel  $\alpha$  um die X-Achse sind in Gl. (7.2) und Gl. (7.3)<sup>178</sup> zu sehen.

<sup>176</sup> Vgl. William (2007, 486)

<sup>177</sup> Vgl. Süsse (2014, 263) und Jähne (2012, 84)

<sup>178</sup> Zur Rotationsmatrix vgl. auch Süsse (2014, 269)

$$\mathbf{Q}(\mathbf{t}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7.2)$$

$$\mathbf{R}_x(\alpha) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7.3)$$

Eine Pose nach obiger Definition kann auf Grundlage der Elementartransformationen als homogene Transformation formuliert werden. Das Resultat ist eine Transformation  ${}^i\mathbf{T}_{i+1}$ , die eine Koordinate  $\tilde{\mathbf{x}}_{i+1}$  aus dem Bezugssystem  $\mathbf{K}_{i+1}$  in das Bezugssystem  $\mathbf{K}_i$  überführt:

$$\begin{aligned} {}^i\mathbf{T}_{i+1} &= \mathbf{Q}(x, y, z) \cdot \mathbf{R}_z(\gamma) \cdot \mathbf{R}_y(\beta) \cdot \mathbf{R}_x(\alpha) \\ \tilde{\mathbf{x}}_i &= {}^i\mathbf{T}_{i+1} \cdot \tilde{\mathbf{x}}_{i+1} \end{aligned} \quad (7.4)$$

Die Umkehr der Transformationsrichtung erfolgt durch Inversion der Transformationsmatrix:

$${}^{i+1}\mathbf{T}_i = ({}^i\mathbf{T}_{i+1})^{-1} \rightarrow \tilde{\mathbf{x}}_{i+1} = ({}^i\mathbf{T}_{i+1})^{-1} \cdot \tilde{\mathbf{x}}_i \quad (7.5)$$

Über die Matrixmultiplikation können mehrere Transformationen kombiniert werden:

$${}^i\mathbf{T}_{i+n} = {}^i\mathbf{T}_{i+1} \cdots {}^{i+n-1}\mathbf{T}_{i+n} \quad (7.6)$$

Wird eine Pose gemäß der Definition aus Gl. (7.4) in eine homogene Transformationsmatrix konvertiert, so kann diese Matrix als Kombination einer 3x3 Rotationsmatrix  $\mathbf{R}$  und eines Translationsvektors  $\mathbf{t}$  interpretiert werden (Gl. (7.7)).

$$\mathbf{T} = [\mathbf{R}, \mathbf{t}] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7.7)$$

### 7.1.2 Kompaktdarstellung der Rotationsmatrix

Die Darstellung einer Rotation als Euler-Winkel hat den großen Vorteil der leichten und intuitiven Interpretierbarkeit, weshalb sie in Kap. 3.2.1 zur Beschreibung einer 6D-Pose eingeführt wurden.

Es können jedoch Mehrdeutigkeiten auftreten, so dass im Allgemeinen zu einer gegebenen Rotationsmatrix kein eindeutiger Satz an Euler-Winkeln angegeben werden kann und im Extremfall treten gar Entartungen wie der sog. *Gimbal-Lock* auf, der den Verlust eines Freiheitsgrades zur Folge hat.<sup>179</sup>

Um mathematischen Problemen mit Euler-Winkeln vorzubeugen, wurde daher modellintern die sog. *Kanonisch exponentielle Rotations-Darstellung*<sup>180</sup> gewählt. Eine Drehung wird hier durch einen Rotations-Vektor dargestellt, welcher die Drehachse bildet. Der Betrag (Länge) dieses Vektors codiert den Drehwinkel.

Um diese eindeutige und kompakte Darstellung für die Formulierung von Transformationen im Abbildungsmodell einzusetzen, muss ein Rotations-Vektor  $\mathbf{u}$  in eine Rotationsmatrix  $\mathbf{R}$  überführt werden. Dies geschieht mittels der sog. *Rodrigues-Formel*<sup>181</sup>:

$$\mathbf{R} = \mathbf{I} + \frac{\mathbf{u}}{|\mathbf{u}|} \sin(|\mathbf{u}|) + \frac{\mathbf{u}^2}{|\mathbf{u}|^2} (1 - \cos(|\mathbf{u}|)) \quad (7.8)$$

### 7.1.3 Formulierung des Modells

Abbildung 56 zeigt das Schema eines CPMS bestehend aus einem Kameraträger mit drei fest montierten Kameras und den in Raum installierten optischen Zielmarken (engl. Targets). Die gestrichelten Pfeile zeigen die drei im Modell auftretenden räumlichen Koordinatentransformationen zwischen dem lokalen Koordinatensystem einer Zielmarke (Target-KS oder TKS), dem Weltkoordinatensystem (Welt-KS oder WKS), dem Koordinatensystem des Messsystems (System-KS oder SKS) und den Koordinatensystemen der einzelnen Kameras (Kamera-KS oder KKS).

Das Modell beschreibt die Abbildung eines Referenzpunktes  $\mathbf{x}_b$ , auf die Bildebene der beobachtenden Kamera. Die Position dieses Punktes ist zunächst im lokalen Koordinatensystem einer Zielmarke gegeben. Über eine Kette von Transformation wird  $\mathbf{x}_b$  in das Kamerakoordinatensystem transformiert. Seine Abbildung auf der Bildebene erfolgt anschließend durch eine einfache Zentralprojektion nach dem Lochkameramodell (vgl. Kap. 6.1.1). Das Ergebnis sind normierte Bildkoordinaten (vgl. Kap.

<sup>179</sup> Vgl. Süsse (2014, 286)

<sup>180</sup> Vgl. Süsse (2014, 283)

<sup>181</sup> Vgl. Süsse (2014, 285)

6.1.2), die mittels der intrinsischen Kameraparameter (vgl. Kap. 6.3) auf Koordinaten einer realen Kamera umgerechnet werden können.

Der beschriebene Vorgang wird für alle in einem Kamerabild sichtbaren Zielmarken (und Referenzpunkte) wiederholt, wobei jede Punktbeobachtung zwei Gleichungen für die  $u$ - und  $v$ -Bildkoordinate liefert. So entsteht ein überbestimmtes Gleichungssystem, dessen Lösung die Pose  $\mathbf{g}$  des CPMS ergibt (vgl. Kap. 7.2).

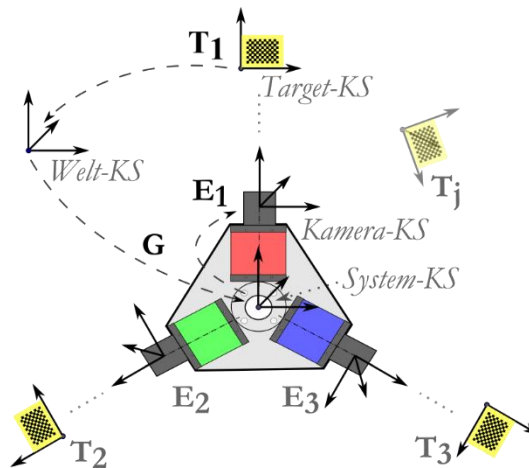


Abbildung 69: Modellierung des photogrammetrischen Abbildungsmodells eines Mehrkammerasystems auf Basis von homogenen Koordinatentransformationen und der normierten Zentralprojektion.

Tabelle 13 zeigt die verwendeten homogenen Koordinatentransformationen  $\mathbf{T}_j$ ,  $\mathbf{G}$ ,  $\mathbf{E}_i$  und ihre Bedeutung. Der zu einer Transformation äquivalente Pose-Vektor  $\mathbf{t}_j$  der Zielmarke,  $\mathbf{g}$  des Messsystems und  $\mathbf{e}_i$  der Kameras auf ihrem Träger werden als Kleinbuchstaben notiert.

Tabelle 13: Transformationen in einem CPMS-Abbildungsmodell, die zugehörigen Pose-Vektoren und ihre Bedeutung.

Transformationsmatrix	Transformations-Richtung	Pose	Bedeutung
-	-	$\mathbf{x}_b$	Position eines Referenzpunktes $b$ im lokalen KS einer Zielmarke
$\mathbf{T}_j$	TKS $\rightarrow$ WKS	$\mathbf{t}_j$	Pose der Zielmarke $j$ im WKS ( $\mathbf{T}_j$ transformiert $\mathbf{x}_b$ in WKS).
$\mathbf{G}$	WKS $\rightarrow$ SKS	$\mathbf{g}$	$\mathbf{G}$ transformiert eine Weltkoordinate in das SKS. Die äquivalente Pose $\mathbf{g}$ entspricht damit der zu messenden System-Pose.
$\mathbf{E}_i$	SKS $\rightarrow$ KKS	$\mathbf{e}_i$	Pose einer Kamera $i$ innerhalb des SKS (relativ zu $\mathbf{g}$ ).

Jede Zielmarke beinhaltet eine Anzahl  $H$  konstruktiv gegebener Referenzpunkte  $\mathbf{x}_b$ , die als homogener Vektor  $\mathbf{x}_b = (x, y, z, 1)^T$  notiert werden. Um die Abbildung eines bestimmten 3D-Referenzpunktes einer Zielmarke  $\mathbf{T}_j$  auf einer Kamera  $\mathbf{E}_i$  bei einer gegebenen Messsystempose  $\mathbf{G}$  zu berechnen, wird der betrachtete Punkt mittels der Transformationskette in Gl. (7.9) in das Kamerakoordinatensystem transformiert (siehe Tabelle 14).

Als Ergebnis liefert Gl. (7.9) einen Punkt  $\mathbf{x}'_{i,j,h}$  im lokalen Kamerakoordinatensystem  $\mathbf{e}_i$ . Seine Abbildung auf eine Bildkoordinate  $\mathbf{u} = (u, v)^T$  der zugehörigen Kamera erfolgt durch die Zentralprojektion (Gl. (7.10)).

Zusammengefasst wird das Modell als Funktion (7.11) geschrieben. Diese berechnet die Bildkoordinate  $\mathbf{u}_{i,j,b}$  eines Zielpunktes  $b$  der Zielmarke  $j$  auf der Bildebene von Kamera  $i$ .



Tabelle 14: Formulierung der Abbildung eines 3D-Referenzpunktes einer Zielmarke und Aufstellung einer Modellfunktion  $f$ .

Beschreibung	Formulierung
Transformation eines Referenzpunktes von einem Target-KS in ein Kamera-KS:	$\mathbf{x}'_{i,j,h} = \mathbf{E}_i \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{T}_j \cdot \mathbf{x}_h \quad (7.9)$
Abbildung eines 3D-Punktes durch die <i>normierte Zentralprojektion</i> :	$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} x'/z' \\ y'/z' \end{bmatrix} \quad (7.10)$
Formulierung als Abbildungsfunktion (Modellfunktion) mit aus den Transformationsmatrizen abgeleiteten Pose-Vektoren $\mathbf{e}_i$ , $\mathbf{g}$ , und $\mathbf{t}_j$ :	$\mathbf{u}_{i,j,h} = \mathbf{f}(\mathbf{e}_i, \mathbf{g}, \mathbf{t}_j, \mathbf{x}_h) \quad (7.11)$

## 7.2 Bestimmung der Systempose

Die Systempose  $\mathbf{g}$  kann durch Aufstellen eines nicht-linearen Gleichungssystems auf Basis von Beobachtungen und unter Anwendung eines geeigneten Ausgleichsverfahrens (vgl. Kap. 7.2.2) bestimmt werden.

Eine *Beobachtung*  $l$  bezeichnet dabei die Messung einer Bildkoordinate eines Referenzpunktes  $\mathbf{x}_h$  einer Zielmarke  $\mathbf{t}_j$  auf einer Kamera  $\mathbf{e}_i$ . Dabei trägt jede Beobachtung ein Gleichungspaar (jeweils eine Gleichung für die horizontale und vertikale Bildkoordinate) zur Gesamtheit des Gleichungssystems bei (vgl. Kap. 7.2.1).

Sofern die Kameraposen  $\mathbf{e}_i$  und die Zielmarkenposen  $\mathbf{t}_j$  im Rahmen einer Systemkalibrierung (vgl. Kap. 7.6) ermittelt wurden, verbleibt die Systempose  $\mathbf{g}$  als einzige Unbekannte. Das entstehende Gleichungssystem ist demnach überbestimmt. Für ein System aus drei Kameras, wobei jede Kamera eine Zielmarke mit 100 Referenzpunkten beobachtet, stehen  $L=600$  ( $3 \times 100 \times 2$ ) Beobachtungsgleichungen zur Verfügung.

Eine Herausforderung stellt das effiziente Lösen solch großer nicht-linearer Systeme dar. Diese können nur durch iteratives Lösen eines linearen Ersatzproblems unter Vorgabe von Startwerten bestimmt werden. Zur Linearisierung sind die Ableitungen der Beobachtungsgleichungen nach den zu ermittelnden Parametern bereit zu stellen. Dieser Vorgang wurde auf Basis eines Software-Frameworks für symbolische Algebra automatisiert (vgl. Kap. 7.2.3).

Noch komplexer aufgebaut sind die linearisierten Modell-Gleichungssysteme zur Systemkalibrierung, da diese auch die Kamera- und Zielmarkenposen als unbekannte Parameter enthalten. Ihre Aufstellung für beliebige Modelle wurde durch die Implementierung eines Softwaremoduls für Matlab vereinfacht (vgl. Kap. 7.2.5).

### 7.2.1 Formulierung des Modellgleichungssystems

Die Modellfunktion (Gl.(7.11)) enthält als Parameter die gesuchten Messsystempose  $\mathbf{g}$ . Alle weiteren Parameter, also die Kameraanordnung  $\mathbf{e}_j$  und die Zielmarkenposen  $\mathbf{t}_i$ , können nach einer Systemkalibrierung (vgl. Kap. 7.6) als bekannt und statisch angenommen werden. Damit kann die Modellgleichung (7.11) zur Ermittlung einer Bildkoordinate  $\mathbf{u}_{i,j,b}$  eines beobachteten Referenzpunktes  $\mathbf{x}_b$  umgeschrieben werden zu:

$$\mathbf{u}_{i,j,b} = \mathbf{f}(\mathbf{e}_i, \mathbf{g}, \mathbf{t}_j, \mathbf{x}_b) = \mathbf{f}_{i,j,b}(\mathbf{g}) \quad (7.12)$$

Durch Aufstellen einer Tabelle (vgl. Tabelle 15), in der verzeichnet wird welche Kamera  $i$  und welches Target  $j$  bzw. welcher Referenzpunkt  $b$  auf diesem Target zu einer diskreten Beobachtung  $\mathbf{u}_l$  gehören, vereinfacht sich die Gleichung weiter zu:

$$\mathbf{u}_{i,k,h} = \mathbf{f}_{i,k,h}(\mathbf{g}) \rightarrow \mathbf{u}_l = \mathbf{f}_l(\mathbf{g}) \quad (7.13)$$

Tabelle 15: Tabellarische Notation der Beobachtungen (Projektionen) der diversen Zielmarken mit ihren Referenzpunkten auf den Kamerabildern.

Beobachtung $l$	Target $i$	Referenzpunkt $b$	Kamera $j$
1	1	1	1
2	2	1	2
:	:	:	:
$L$	$I$	$H$	$J$

Schließlich werden die  $L$  Beobachtungen in einem Funktionenvektor  $\hat{\mathbf{f}}$  zusammengefasst. Dazu wird vereinbart, dass sich die Gleichungen für horizontale und vertikale Bildkoordinaten  $u$  und  $v$  jeweils abwechseln:

$$\hat{\mathbf{f}}(\mathbf{g}) = \begin{pmatrix} f_{1,u}(\mathbf{g}) \\ f_{1,v}(\mathbf{g}) \\ \vdots \\ f_{L,u}(\mathbf{g}) \\ f_{L,v}(\mathbf{g}) \end{pmatrix} \quad (7.14)$$

Die über die Kameras gemessenen  $L$  Bildkoordinaten werden in gleicher Weise in einem Messwertvektor  $\hat{\mathbf{u}} = (u_1, v_1, \dots, u_L, v_L)^T$  notiert.

Zur Ermittlung der Systempose  $\mathbf{g}$  wird zunächst eine *Residuenfunktion*<sup>182</sup> (Abweichungsfunktion) formuliert, welche die Abweichung zwischen Modell und Messung in Form eines Residuenvektors  $\mathbf{r}$  für eine (geschätzte) Systempose  $\mathbf{g}_k$  beschreibt:

$$\mathbf{r}(\mathbf{g}_k) = \hat{\mathbf{f}}(\mathbf{g}_k) - \hat{\mathbf{u}} \quad (7.15)$$

Ziel ist diejenige Systempose  $\mathbf{g}$  zu finden, für die die Abweichung zwischen den vom Modell vorhergesagten Bildkoordinaten und den tatsächlich gemessenen möglichst gering ist. Als Maß für diese Abweichung (nach dem Prinzip der kleinsten Quadrate) dient das Quadrat der euklidischen Norm der Residuenfunktion.

Es entsteht so ein nicht-lineares Minimierungsproblem, welches durch ein geeignetes Verfahren wie dem Levenberg-Marquardt-Algorithmus (vgl. Kap. 7.2.2) gelöst werden kann:

$$\|\mathbf{r}(\mathbf{g})\|_2^2 = \|\hat{\mathbf{f}}(\mathbf{g}) - \hat{\mathbf{u}}\|_2^2 \rightarrow \min! \quad (7.16)$$

Zur Veranschaulichung wird an dieser Stelle die zu minimierende Fehlerfunktion noch einmal in die beiden Modell-Teilgleichungen für die horizontale und vertikale Bildkoordinate  $u$  und  $v$  aufgeteilt und als Summe der quadrierten Differenzen zwischen Modell und Messwerten notiert:

$$\sum_{l=1}^L (f_{l,u}(\mathbf{g}) - u_l)^2 + (f_{l,v}(\mathbf{g}) - v_l)^2 \rightarrow \min! \quad (7.17)$$

Nach einer Optimierung nach der Methode der kleinsten Quadrate, folgen die Komponenten des Residuenvektors  $\mathbf{r}$  verfahrensbedingt einer Normalverteilung. Ein verbleibender Restfehler kann dementsprechend durch seine Standardabweichung  $\sigma$  beschrieben werden.<sup>183</sup>

### 7.2.2 Modelleinpassung mittels Levenberg-Marquardt-Algorithmus

Der *Levenberg-Marquardt-Algorithmus*<sup>184</sup> ist ein numerischer Algorithmus zur Lösung nicht-linearer Optimierungsprobleme im Sinne der kleinsten Quadrate. Dabei variiert der Algorithmus über einen Regularisierungsparameter  $\lambda$  zwischen dem schnellen aber

<sup>182</sup> Vgl. Z.B. William (2007, 773)

<sup>183</sup> Vgl. William (2007, 799)

<sup>184</sup> Vgl. Moré (1978), vgl. William (2007, 801)

instabilen *Gauß-Newton-Verfahren* und dem langsameren aber robusteren *Gradientenverfahren*.<sup>185</sup>

Er eignet sich besonders für Problemstellungen der Photogrammetrie, aufgrund effizienter Implementierungsmethoden und seinem robusten Konvergenzverhalten bei grob geschätzten Startwerten.

Die Lösung der Minimierungsaufgabe erfolgt iterativ, wobei das nicht-lineare Problem im jeweiligen Iterationsschritt durch eine lineare Näherung an einem Entwicklungspunkt  $\mathbf{g}_k$  ersetzt wird:

$$\begin{aligned} \min \|\hat{\mathbf{f}}(\mathbf{g}) - \hat{\mathbf{u}}\|_2^2 &= \min \|\mathbf{r}(\mathbf{g})\|_2^2 \\ &\approx \min \|\mathbf{r}(\mathbf{g}_k) + \mathbf{J}(\mathbf{g}_k)(\mathbf{g} - \mathbf{g}_k)\|_2^2 \end{aligned} \quad (7.18)$$

Die  $L \times 6$  Matrix  $\mathbf{J}$  ist die sog Jakobimatrix. Sie beschreibt hier alle ersten partiellen Ableitungen der Funktion  $\mathbf{f}(\mathbf{g})$  nach ihren Parametern  $\mathbf{g}=(g_1, \dots, g_6)$ :

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial g_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial g_6} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_L}{\partial g_1} & \dots & \frac{\partial f_L}{\partial g_6} \end{pmatrix} \quad (7.19)$$

Durch Umstellen der linearen Näherung aus Gl. (7.18) wird erkennbar, dass  $\mathbf{J}$  eine lineare Abbildung einer Pose-Änderung  $\Delta \mathbf{g}=(\mathbf{g}-\mathbf{g}_k)$  auf die Änderung der Bildkoordinaten  $\Delta \hat{\mathbf{u}} = \hat{\mathbf{u}} - \hat{\mathbf{f}}(\mathbf{g}_k)$  beschreibt und so den Zusammenhang zwischen diesen Größen herstellt:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{u}} - \hat{\mathbf{f}}(\mathbf{g}_k) &= \mathbf{J}(\mathbf{g}_k) \cdot (\mathbf{g} - \mathbf{g}_k) \\ \Delta \hat{\mathbf{u}} &= \mathbf{J}(\mathbf{g}_k) \cdot \Delta \mathbf{g} \end{aligned} \quad (7.20)$$

Zur Lösung des linearen Ersatzproblems und Berechnung einer verbesserten Näherung  $\mathbf{g}_{k+1}$  für  $\mathbf{g}_k$  wird eine lineare Ausgleichsrechnung durchgeführt. Dazu wird die linearisierte Gleichung aus (7.18) zunächst „Null“ gesetzt. Der Residuenvektor  $\mathbf{r}$  entsteht durch Evaluation der Residuenfunktion  $\mathbf{r}=\mathbf{r}(\mathbf{g}_k)$  am Punkt  $\mathbf{g}_k$ :

$$0 = \mathbf{r} + \mathbf{J}(\mathbf{g}_k)(\mathbf{g}_{k+1} - \mathbf{g}_k) \quad (7.21)$$

<sup>185</sup> Vgl. Moré (1978), Gl. (15.5.9) & (15.5.10), sowie William (2007, 800)

Die Jakobimatrix ist i.A. nicht quadratisch und damit nicht invertierbar. Das Ersetzen durch die Pseudoinverse  $\mathbf{J}^+$  liefert jedoch eine Lösung im Sinne der kleinsten Quadrate. Durch Multiplikation mit  $\mathbf{J}^+$  kann Gl. (7.21) nach  $\mathbf{g}_{k+1}$  umgestellt werden:

$$\begin{aligned} 0 &= \mathbf{J}(\mathbf{g}_k)^+ \mathbf{r} + \mathbf{g}_{k+1} - \mathbf{g}_k \Rightarrow \\ \mathbf{g}_{k+1} &= \mathbf{g}_k - \mathbf{J}(\mathbf{g}_k)^+ \mathbf{r} \end{aligned} \quad (7.22)$$

In der Praxis wird Gl. (7.22) so aufgeteilt, dass die Berechnung der Pseudoinversen durch Lösung eines Gleichungssystems für einen Lösungsvektor  $\mathbf{s}$  ersetzt werden kann, wodurch die Berechnung effizienter wird:

$$\begin{aligned} \mathbf{g}_{k+1} &= \mathbf{g}_k - \mathbf{s} \\ \mathbf{s} &= \mathbf{J}(\mathbf{g}_k)^+ \mathbf{r} \rightarrow \mathbf{J}(\mathbf{g}_k) \cdot \mathbf{s} = \mathbf{r} \end{aligned} \quad (7.23)$$

Die Jakobimatrix  $\mathbf{J}(\mathbf{g}_k)$  entspricht der Koeffizientenmatrix des linearen Gleichungssystems, das mit einem geeigneten Verfahren gelöst werden muss. Geeignet ist beispielsweise die *Cholesky-Dekomposition*<sup>186</sup>.

Gleichung (7.23) stellt letztlich das Gauß-Newton-Verfahren dar, welches durch Skalierung der Diagonalelemente der Matrix  $\mathbf{J}$  mit einem Regularisierungsfaktor  $(1+\lambda)$  zum Levenberg-Marquard-Verfahren erweitert wird. Dazu wird  $\mathbf{J}$  durch eine geänderte Matrix  $\mathbf{J}'$  ersetzt:

$$\mathbf{J}'_{i,j} = \begin{cases} (1+\lambda)\mathbf{J}_{i,j} & i = j \\ \mathbf{J}_{i,j} & i \neq j \end{cases} \quad (7.24)$$

Für  $\lambda=0$  gilt  $\mathbf{J}' = \mathbf{J}$ , entsprechend einem reinen Gauß-Newton-Verfahren. Für  $\lambda>0$  entsteht ein fließender Übergang hin zum robusteren Gradientenverfahren, dessen Schrittweite mit steigendem  $\lambda$  weiter abfällt. Der Faktor  $\lambda$  wird (nach Levenberg) nach jeder Iteration angepasst und erhöht, falls Divergenz vorliegt bzw. erniedrigt, falls Konvergenz vorliegt und sich das Residuum verringert hat.

Das Iterationsverfahren wird beendet, falls:

1. Der Fehler  $\|\mathbf{r}\|_2^2$  eine voreingestellte Schwelle unterschreitet,
2.  $\|\mathbf{r}\|_2^2$  sich über eine Anzahl Iterationen nicht mehr verkleinert,
3. Eine maximale Anzahl Iterationen überschritten wird.<sup>187</sup>

---

<sup>186</sup> Vgl. William (2007, 100)

<sup>187</sup> Vgl. Moré (1978)

Der Levenberg-Marquard Algorithmus wurde im Rahmen dieser Arbeit für die Pose-Messung als auch für die Systemkalibrierung (vgl. Kap. 7.6) eingesetzt und zeigte für die gegebenen Problemstellungen ein robustes Konvergenzverhalten.

### 7.2.3 Aufstellung der Modell-Grundgleichung

Das photogrammetrische Modell des CPMS (vgl. Kap. 7.1.3) ist relativ komplex, weshalb die Ermittlung seiner partiellen Ableitungen nach den gesuchten Parametern nicht trivial ist. Dazu kommt, dass bei der Systemkalibrierung (vgl. Kap. 7.6) nicht nur nach den sechs Komponenten der Systempose  $\mathbf{g}$  abgeleitet werden muss, sondern auch nach den Kameraposen  $\mathbf{e}_k$  und Zielmarkenposen  $\mathbf{t}_i$ . Darüber hinaus besteht der Wunsch, neue oder abgeänderte Modelle schnell und automatisiert in Softwarefunktionen umzusetzen.

Die Erstellung der Modellfunktion inklusive ihrer partiellen Ableitungen wird daher mit Unterstützung eines Softwarepakets für symbolische Algebra bewerkstelligt. Eingesetzt wurde die *Symbolic Math Toolbox* des *Matlab*<sup>188</sup> Pakets: Sie erlaubt einerseits die automatische Ableitung nach vorgegebenen Modellparametern, andererseits kann aus den erstellten Funktionen umgehend Matlab- oder C-Quellcode generiert werden.

Die Modellfunktion (Gl.(7.11)) berechnet die Abbildung eines 3D-Referenzpunktes  $\mathbf{x}_b$  einer Zielmarke  $\mathbf{t}_i$  auf der Bildebene einer Kamera  $\mathbf{e}_j$ . Intern besteht diese vektorielle Funktion aus den beiden Teilfunktionen  $f_u$  und  $f_v$ , die jeweils horizontale und vertikale Bildkoordinate berechnen. Da für ein Gleichungspaar jeweils nur eine Kamera und ein Referenzpunkt einer Zielmarke betrachtet wird, definieren wir zur Darstellung der Grundgleichung  $\mathbf{e}=\mathbf{e}_j$  und  $\mathbf{t}=\mathbf{t}_i$ , sowie  $\mathbf{x}=\mathbf{x}_b$ :

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \mathbf{f} = \begin{pmatrix} f_u(\mathbf{e}, \mathbf{g}, \mathbf{t}, \mathbf{x}) \\ f_v(\mathbf{e}, \mathbf{g}, \mathbf{t}, \mathbf{x}) \end{pmatrix} \quad (7.25)$$

Aus diesem Grundschemata des Modells werden mittels der *Symbolic Toolbox* die partiellen Ableitungen nach allen (auszugleichenden) Modellparametern generiert und in einer Funktionenmatrix  $\mathbf{D}$  notiert. Dabei enthält jeweils eine Spalte die partielle Ableitung nach einer der sechs Komponenten eines Pose-Vektors. Es entsteht eine 2x18 Matrix:

---

<sup>188</sup> The Mathworks Inc. (2015)

$$\mathbf{D}(\mathbf{f}_l) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_u}{\partial e_1} & \dots & \frac{\partial f_u}{\partial e_6} & \frac{\partial f_u}{\partial g_1} & \dots & \frac{\partial f_u}{\partial g_6} & \frac{\partial f_u}{\partial t_1} & \dots & \frac{\partial f_u}{\partial t_6} \\ \frac{\partial f_v}{\partial e_1} & \dots & \frac{\partial f_v}{\partial e_6} & \frac{\partial f_v}{\partial g_1} & \dots & \frac{\partial f_v}{\partial g_6} & \frac{\partial f_v}{\partial t_1} & \dots & \frac{\partial f_v}{\partial t_6} \end{pmatrix} \quad (7.26)$$

Die Ableitungsmatrix  $\mathbf{D}(\mathbf{f})$  kann auch als Konkatination dreier  $2 \times 6$  Teilmatrizen  $\mathbf{D}_e$ ,  $\mathbf{D}_g$ ,  $\mathbf{D}_t$  für die Ableitungen nach der Kamerapose, der Systempose und der Zielmarkenpose, aufgefasst werden:

$$\mathbf{D}(\mathbf{f}) = (\mathbf{D}_e(\mathbf{f}), \mathbf{D}_g(\mathbf{f}), \mathbf{D}_t(\mathbf{f})) \quad (7.27)$$

Aus der symbolischen Darstellung der Modellfunktion  $\mathbf{f}$  und ihrer Ableitungsmatrix  $\mathbf{D}(\mathbf{f})$  wird der Quellcode einer Funktion  $fModel(\dots)$  generiert, die alle Berechnungen für eine gegebene Kamera-, System- und Zielmarkenpose durchführt:

$$[\mathbf{u}_{i,j,h}, \mathbf{D}_{i,j,h}] = fModel(\mathbf{e}_i, \mathbf{g}, \mathbf{t}_i, \mathbf{x}_h) \quad (7.28)$$

Diese grundlegende Modellfunktion kann nun für alle  $L$  Beobachtungen zur Aufstellung des Residuenvektors  $\mathbf{r}$  und der Jakobimatrix  $\mathbf{J}$  evaluiert werden.

#### 7.2.4 Aufstellung der Jakobimatrix für eine Pose-Messung

Durch Berechnung eines Iterationsschrittes des Optimierungsverfahrens wird eine Verbesserung des System-Pose-Vektors  $\mathbf{g}$  erwirkt (vgl. Kap. 7.2.2). Dazu wird nach Gl. (7.23) ein Gleichungssystem aufgestellt und gelöst. Benötigt werden der Residuenvektor  $\mathbf{r}$  und die (vollständige) Jakobimatrix  $\mathbf{J}$  für alle Beobachtungen  $L$ .

Die Aufstellung der Residuenfunktion und des Residuenvektors  $\mathbf{r}$  wurde bereits besprochen (vgl. Kap. 7.2.1, Gl. (7.15)). Es folgt nun die Verfahrensweise zur Aufstellung der Jakobimatrix.

Bei der Berechnung der Systempose  $\mathbf{g}$  besitzt das System der Modellgleichungen nur sechs unbekannte Parameter  $g_1 \dots g_6$ , die im Rahmen des Optimierungsverfahrens bestimmt werden sollen. Die Ableitungen nach diesen Parametern einer Beobachtungsgleichung  $\mathbf{f}_l$  sind in der Teilmatrix  $\mathbf{D}_g(\mathbf{f}_l)$  zu finden.

Die Jakobimatrix  $\mathbf{J}$  entsteht durch Eintragung von  $\mathbf{D}_g(\mathbf{f}_l)$  für alle Beobachtungen  $\mathbf{f}_1 \dots \mathbf{f}_L$ . Da jedes  $\mathbf{D}$  zwei Zeilen einbringt, ist  $\mathbf{J}$  hier eine  $2L \times 6$  Matrix:

$$\mathbf{J}(\mathbf{g}_k) = \begin{pmatrix} \mathbf{D}_{g_k}(\mathbf{f}_1) \\ \vdots \\ \mathbf{D}_{g_k}(\mathbf{f}_L) \end{pmatrix} \quad (7.29)$$

Die Aufstellung der Jakobimatrix wird für jeden Iterationsschritt  $k$  auf Basis des zuletzt verbesserten Pose-Vektors  $\mathbf{g}_k$  neu berechnet.

### 7.2.5 Aufstellung der Jakobimatrix für eine Systemkalibrierung

Die Aufstellung des Parametervektors und der Jakobimatrix für den allgemeinen Fall, wie er beispielsweise für die Systemkalibrierung benötigt wird, ist etwas komplexer. Während im Falle einer einfachen Bestimmung der Systempose  $\mathbf{g}$  ein Gleichungssystem mit den sechs unbekannt Parametern  $g_1 \dots g_6$  gelöst werden muss, kann die Parameterzahl im allgemeinen Fall deutlich ansteigen. Soll z.B. ein System bestehend aus drei Kameras und drei Zielmarken kalibriert werden, so enthält das resultierende Gleichungssystem bereits sechs unbekannte Posen und damit  $6 \cdot 6 = 36$  unbekannte Parameter. Die erforderliche Jakobimatrix besäße die Größe  $2L \times 36$ .

Für das schnelle und flexible Aufstellen von Parametervektoren und Jakobimatrizen in komplexen Modellen wurde eine entsprechende Matlab-Klasse (*PGParams*) implementiert. Das Modul ermöglicht das flexible Ein- bzw. Ausblenden von Modellvariablen in das Optimierungsverfahren und automatisiert die Erstellung der komplexen Jakobimatrizen.

Zur Erweiterung des iterativen Lösungsverfahrens für den allgemeinen Fall wird zunächst in Gl. (7.23) statt der Systempose  $\mathbf{g}$  ein allgemeiner Parametervektor  $\mathbf{p}$  eingesetzt:

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_{k+1} &= \mathbf{p}_k - \mathbf{s} \\ \mathbf{J}(\mathbf{p}_k) \cdot \mathbf{s} &= \mathbf{r} \end{aligned} \quad (7.30)$$

Der Vektor  $\mathbf{p}$  vereinigt alle zu optimierende Parametergruppen nach folgendem Schema.  $M$  ist die Gesamtzahl der Parameter für ein System aus  $J$  Kameras und  $I$  Zielmarken:

$$\begin{aligned} \mathbf{p} &= (\mathbf{e}_1, \dots, \mathbf{e}_J, \mathbf{g}, \mathbf{t}_1, \dots, \mathbf{t}_I) \\ M &= 6 \cdot (I + J + 1) \end{aligned} \quad (7.31)$$

Die Spalte  $m$  der Jakobimatrix  $\mathbf{J}$  enthält die Ableitungen aller Funktionen  $\mathbf{f}_1 \dots \mathbf{f}_I$  nach dem zugehörigen Parameter  $\mathbf{p}_m$ . Es entsteht eine  $2L \times M$  Matrix für eine Gesamtzahl von  $M$  Parametern. Abbildung 70 zeigt einen beispielhaften Aufbau des Parametervektors  $\mathbf{p}$  und der Ableitungsmatrix  $\mathbf{J}(\mathbf{p})$  zur Kalibrierung eines Systems mit drei Kameras und drei Zielmarken. Obgleich in einem realen System vor allem die Zahl der Zielmarken deutlich höher ist, verdeutlicht das Beispiel das zu Grunde liegende Prinzip.



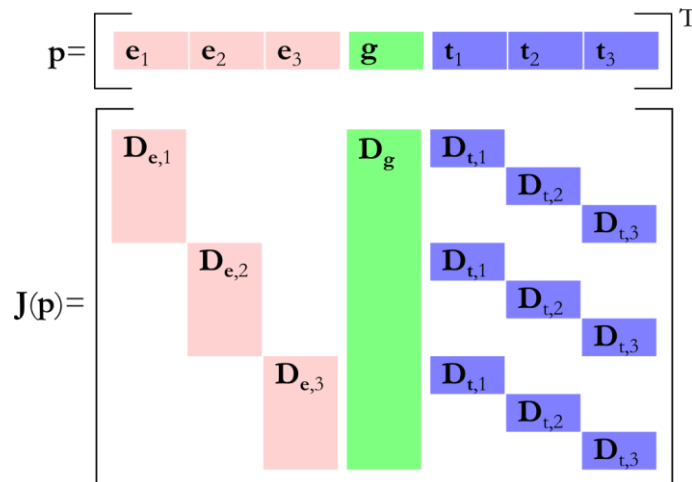


Abbildung 70: Beispielhafter Aufbau der Jakobimatrix für ein CPMS mit 3 Kameras  $e_1 \dots e_3$  und 3 Zielmarken  $t_1 \dots t_3$ .

### 7.3 Schwer detektierbare Bewegungen

Das CPMS soll die Lage bzw. die Orientierung in allen sechs räumlichen Freiheitsgraden optisch erfassen.

Je nach Anzahl und Positionierung (Konfiguration) der eingesetzten Kameras auf dem Kameraträger, können bei der Pose-Messung *schwer detektierbare Bewegungen*<sup>189</sup> auftreten. Damit sind bestimmte „kritische“ (meist kombinierte) Bewegungen gemeint, bei denen Änderungen der Messsystem-Pose nur geringe Änderungen der Kamerabilder (und somit nur ein schwaches Messsignal) bewirken.

Die Identifikation schwer detektierbarer Bewegungen und das Auffinden einer optimalen Kamerakonfiguration, erlaubt eine wesentliche Verringerung der Messunsicherheit eines CPMS und stellt einen wichtigen Teil dieser Arbeit dar.

Das zu Grunde liegende Problem lässt sich am Beispiel eines einfachen kamerabasierten Pose-Sensors verdeutlichen. Abbildung 71 zeigt dazu schematisch die Abbildung einer dreieckigen Zielmarke (3-Punkt Zielmarke) auf der Bildebene einer Kamera mittels der Zentralprojektion. Dieser Ansatz wird auch als *räumlicher Rückwärtschnitt*<sup>190</sup> bezeichnet und stellt die Minimalkonfiguration dar, für die eine eindeutige Pose berechnet werden kann. Die Ecken des Dreiecks sollen als Referenzpunkte dienen. Deren Projektion auf der Bildebene an der Stelle  $(u, v)$  im Bildkoordinatensystem, kann durch ein Bildmessverfahren mit einer bestimmten Messunsicherheit detektiert werden. Sie kann durch die Standardabweichung  $\sigma$  der Bildmessung ausgedrückt werden, wobei gleiches  $\sigma$  für  $u$  und  $v$  ( $\sigma = \sigma_u = \sigma_v$ ) angenommen wird.

<sup>189</sup>Vgl. Kreutzer (2014)

<sup>190</sup> Vgl. Süsse (2014, 377)

Im Beispiel ist zu erkennen, dass a) eine Querbewegung  $\Delta y$ , zwischen Kamera und Zielmarke, eine relativ große Bildänderung zur Folge hat. Dagegen führt b) eine Längsbewegung  $\Delta z$  zu einer weitaus geringeren Bildänderung.

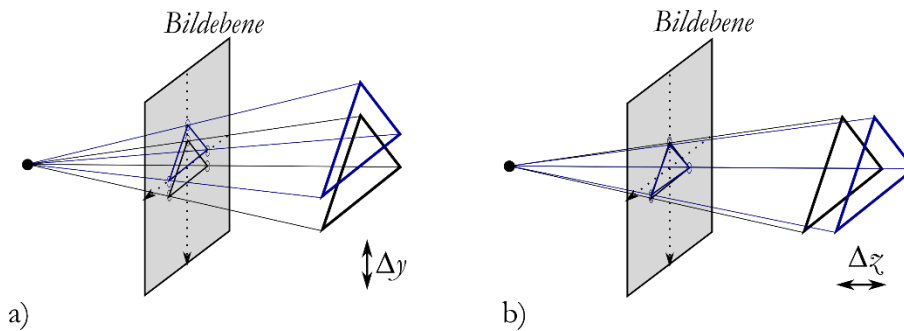


Abbildung 71: Änderung der Bildkoordinaten bei einer Translation zwischen Kamera und Objekt um a) einen Betrag  $\Delta y$  transversal bzw. b)  $\Delta z$  lateral zur optischen Achse.

Im Fall b) liegt eine schwer detektierbare Bewegung vor. Das resultierende Messsignal in Form der Bildkoordinatenänderung ist schwächer als im Fall a) und wird durch die Messunsicherheit  $\sigma$  stärker verfälscht. Umgekehrt übersetzt sich bei der Pose-Bestimmung der Bildmessfehler im Fall b) in einen deutlich größeren Pose-Fehler als im Fall a).

In einem realen CPMS mit mehreren Kameras, sind die Zusammenhänge weit komplexer. Bei suboptimaler Kamerakonfiguration werden bestimmte Kombinationen aus Translation und Rotation mit erhöhter Messunsicherheit erfasst. Da dadurch die Messgenauigkeit des Systems unter Umständen erheblich beschränkt wird, lohnt sich an dieser Stelle eine sorgfältige Betrachtung und Optimierung.

## 7.4 Analyse der Fehlerfortpflanzung zwischen Bild- und Pose-Fehler

Anzahl und Anordnung der Einzelkameras haben, neben dem Bildmessfehler des verwendeten Kamerasystems, erheblichen Einfluss auf den Messfehler bei der Pose-Bestimmung, da bei ungünstiger Konfiguration auch bei Mehrkamera-Sensoren schwer detektierbare Bewegungen auftreten (vgl. Kap. 7.3).

Um eine möglichst optimale Kamerakonfiguration zu finden, muss zunächst ermittelt werden, wie sich der Bildmessfehler in einen Fehler der berechneten System-Pose überträgt. Der Bildmessfehler selbst stellt für ein kalibriertes System aus Kamera und Objektiv eine (annähernd) gaußverteilte Größe dar und kann durch seine Standardabweichung  $\sigma$  beschrieben werden (vgl. Kap. 6.4).

Zur Analyse der Fehlerfortpflanzung wurde ein Verfahren auf Grundlage der sog. Singulärwertzerlegung entwickelt. So kann die Auswirkung auf die sechs Komponenten einer Pose-Messung bestimmt werden (vgl. Kap. 7.4.1, 7.4.2). Dazu werden sechs orthogonale Teilfehlervektoren  $\Delta \mathbf{g}_1 \dots \Delta \mathbf{g}_6$  ermittelt, die in ihrer Summe den zu erwartenden Pose-Fehler  $\Delta \mathbf{g}_{\text{exp}}$  beschreiben. Es kann gezeigt werden, dass der größte Teilfehlervektor  $\Delta \mathbf{g}_{\text{dom}}$  die mit einer Mehrkamerakonfiguration erzielbare Messgenauigkeit beschränkt (vgl. Kap. 7.4.3, 7.4.4).

Dieser Ansatz dient als Grundlage für die Evaluation unterschiedlicher Kamerakonfigurationen und deren Optimierung (vgl. Kap 7.5).

### 7.4.1 Analyse des linearisierten Modells

Für das iterative Optimierungsverfahren werden zur Linearisierung in einem Entwicklungspunkt die partiellen Ableitungen der Modellfunktion  $\mathbf{f}(\mathbf{g})$  nach den gesuchten Modellparametervektor  $\mathbf{g}$  (Systempose) in Form der Jakobimatrix  $\mathbf{J}$  bereitgestellt.  $\mathbf{J}$  stellt dabei in linearer Näherung die Beziehung einer Änderung des Pose-Vektor  $\Delta \mathbf{g}$  und der Bildkoordinaten  $\Delta \hat{\mathbf{u}}$  dar (siehe Herleitung Kap. 7.2.3, Gl. (7.20)):

$$\Delta \hat{\mathbf{u}} = \mathbf{J}(\mathbf{g}) \cdot \Delta \mathbf{g} \quad (7.32)$$

Durch Untersuchungen der Jakobimatrix mittels der *Singulärwertzerlegung*<sup>191</sup> (SWZ) lassen sich nach erfolgter Optimierung und Feststellung der Systempose  $\mathbf{g}$  wichtige Systemeigenschaften ermitteln. Insbesondere kann anhand der Singulärwerte und Singulärvektoren festgestellt werden, wie sich Bildmessfehler in einen Fehler der Pose-Bestimmung übersetzen.

Der Bildmessfehler wird dazu in Form seiner Standardabweichung  $\sigma_I$  angegeben. Die dazu nötige isotrope Normalverteilung ist gegeben, da das Ausgleichsverfahren zur Pose-Bestimmung auf gerade diesen Zustand optimiert (vgl. Kap. 7.2.2). Jedoch ist vor einer Messung eine sorgfältige Systemkalibrierung vorzunehmen (vgl. Kap. 7.6).

Die SWZ führt zur Zerlegung von  $\mathbf{J}$  in ein Produkt dreier Teilmatrizen  $\mathbf{U}$ ,  $\mathbf{\Sigma}$  und  $\mathbf{V}^T$ , wobei  $\mathbf{U}$  eine  $L \times 6$  unitäre Matrix,  $\mathbf{V}^T$  eine  $6 \times 6$  unitäre Matrix und  $\mathbf{\Sigma}$  eine  $6 \times 6$  Diagonalmatrix ist, deren (nicht negativen) Einträge  $\Sigma_{i,i}$  in absteigender Größe sortiert sind und als Singulärwerte bezeichnet werden:

$$\mathbf{J} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{\Sigma} \cdot \mathbf{V}^T \quad (7.33)$$

<sup>191</sup> Vgl. Singular Value Decomposition in William (2007, 65)

Geometrisch kann die SWZ als Zerlegung in eine (Spiegel-)Rotation  $\mathbf{V}^T$ , eine Skalierung  $\Sigma$  und eine weitere Rotation  $\mathbf{U}$  interpretiert werden. Die Spaltenvektoren  $\mathbf{v}_i$  der Matrix  $\mathbf{V}$  bezeichnet man als Rechts-Singulärvektoren, die Spalten  $\mathbf{u}_i$  der Matrix  $\mathbf{U}$  als Linkssingulärvektoren.

#### 7.4.2 Interpretation der Singulärwerte und -Vektoren

Nach erfolgter SWZ von  $\mathbf{J}$  erhält man die zugehörigen sechs Singulärwerte  $\Sigma_i$  und die Rechts-Singulärvektoren als Spaltenvektoren  $\mathbf{v}_i$  der Matrix  $\mathbf{V}$ . Der Kehrwert der Singulärwerte  $1/\Sigma_i$  kann als „Hebelfaktor“ interpretiert werden, der in guter Näherung eine Aussage darüber ermöglicht, wie sich die Standardabweichung  $\sigma$  der Bildkoordinaten  $\mathbf{u}$  in einen Fehler der gemessenen Systempose  $\Delta\mathbf{g}_i$  für die sechs Freiheitsgrade  $i=1, \dots, 6$  übersetzt. Die Singulärvektoren können wiederum als Richtungsvektoren im Sinne eines 6D-Posevektors  $\mathbf{p}_i = \mathbf{v}_i = (\alpha, \beta, \gamma, x, y, z)^T$  mit  $|\mathbf{p}_i| = 1$  interpretiert werden. Dabei zeigt der Vektor  $\mathbf{v}_i$  die Richtung an, in der ein zugehöriger Hebel  $1/\Sigma_i$  wirkt:

$$\Delta\mathbf{g}_i = \sigma \cdot \frac{1}{\Sigma_i} \cdot \mathbf{v}_i \quad \text{mit} \quad |\Delta\mathbf{g}_i| = \sigma \cdot \frac{1}{\Sigma_i} \quad (7.34)$$

Große Werte von  $1/\Sigma_i$  bedeuten somit, dass kleine Fehler in den Bildkoordinaten bereits eine große Änderung der Messsystem-Pose bewirken. Die Messunsicherheit (ausgedrückt durch die Standardabweichung) des Bildaufnahmesystems stellt die kleinste detektierbare Änderung der Bildkoordinaten dar. Um eine gute Auflösung der Messsystempose  $\mathbf{g}$  zu erzielen, ist demnach ein möglichst kleiner Übersetzungshebel  $1/\Sigma_i$  in allen sechs Freiheitsgraden anzustreben. Dies kann durch eine geeignete Kameraanordnung erreicht werden (vgl. Kap. 7.5).

Abbildung 72 veranschaulicht die SWZ nochmals in einem Beispiel. Das „Lagerauschen“ der  $L$  Bildkoordinaten kann als  $L$ -dimensionale Kugel (genauer isotrope Verteilung) mit dem Radius  $\sigma$  angesehen werden, die durch  $\mathbf{J}$  auf einen 6D-Ellipsoiden im Pose-Raum abgebildet wird. Die Länge der Halbachsen dieses Ellipsoids im Pose-Raum ist  $\sigma/\Sigma_i$ . Jedes  $\Sigma_i$  gehört zu einem bestimmten Freiheitsgrad  $\mathbf{v}_i$  (anschaulich: Richtungsvektor der Halbachse) auf den sich  $\sigma/\Sigma_i$  auswirkt.

Letztlich sei noch angemerkt, dass hier die Vektoren  $\mathbf{u}_i$  nicht die Bildkoordinaten darstellen, sondern die sog. Linkssingulärvektoren. Die Richtung dieser Normalenvektoren spielt jedoch aufgrund der Kugelform keine Rolle.

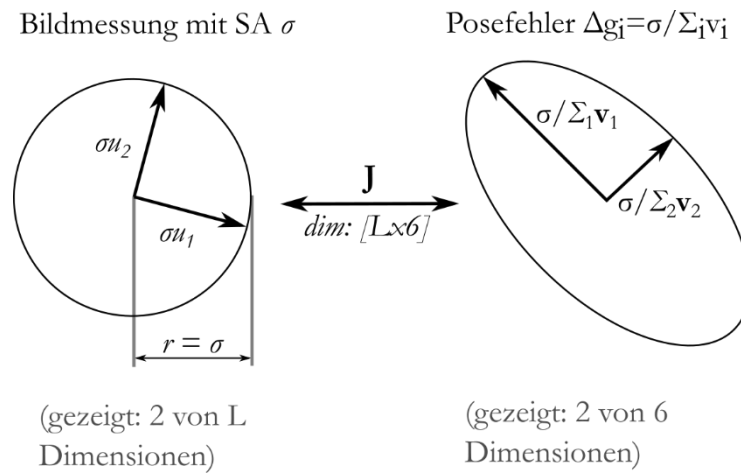


Abbildung 72: Analyse der linearen Abbildung  $J$  zwischen Pose und Bildmessung mittels der Singulärwertzerlegung.

### 7.4.3 Mittlerer und dominanter Pose-Fehler

Auf Basis der Singulärwertzerlegung wird der (bei einem Bildmessfehler  $\sigma$ ) zu erwartende mittlere Pose-Fehler in sechs orthogonale und ihrem Betrag nach geordnete Teilvektoren  $\Delta \mathbf{g}_i$  (vgl. Gl. (7.34)) zerlegt, die umgekehrt in ihrer Summe wieder den Gesamtfehler  $\Delta \mathbf{g}_{exp}$  ergeben (Gl.(7.35)).

Durch die betragsmäßige Sortierung kann in einfacher Weise die dominante Fehlerkomponente  $\Delta \mathbf{g}_{dom}$  als Produkt des Bildfehlers  $\sigma$  mit dem Kehrwert des kleinsten Singulärwertes  $\Sigma_{min}$  identifiziert werden (Gl.(7.36)). Der Vektor  $\Delta \mathbf{g}_{dom}$  zeigt dabei in Richtung der am schwersten detektierbaren Bewegung (vgl. Kap. 7.5.1), die maßgeblich die Messunsicherheit des Gesamtsystems bestimmt (vgl. Kap. 7.4.4).

Abbildung 73 veranschaulicht den dominanten Pose-Fehler  $\Delta \mathbf{g}_{dom}$  im Freiheitsgrad  $\mathbf{v}_{min}$  und den zu erwartenden mittleren Pose-Fehler  $\Delta \mathbf{g}_{exp}$  (roter Pfeil) an einem Beispiel. Wird eine Pose auf nur zwei Dimensionen vereinfacht, so reduziert sich der durch die Singulärvektoren aufgespannte Ellipsoid zu einer Ellipse. Der Freiheitsgrad, in dem sich ein Bildfehler am stärksten in einen Pose-Fehler umsetzt, wird durch die längste Halbachse repräsentiert. Die vektorielle Summe aller Halbachsen (roter Pfeil) ergibt den zu erwartenden mittleren Fehler, der somit betragsmäßig mindestens so groß wie der dominante Fehler sein muss.

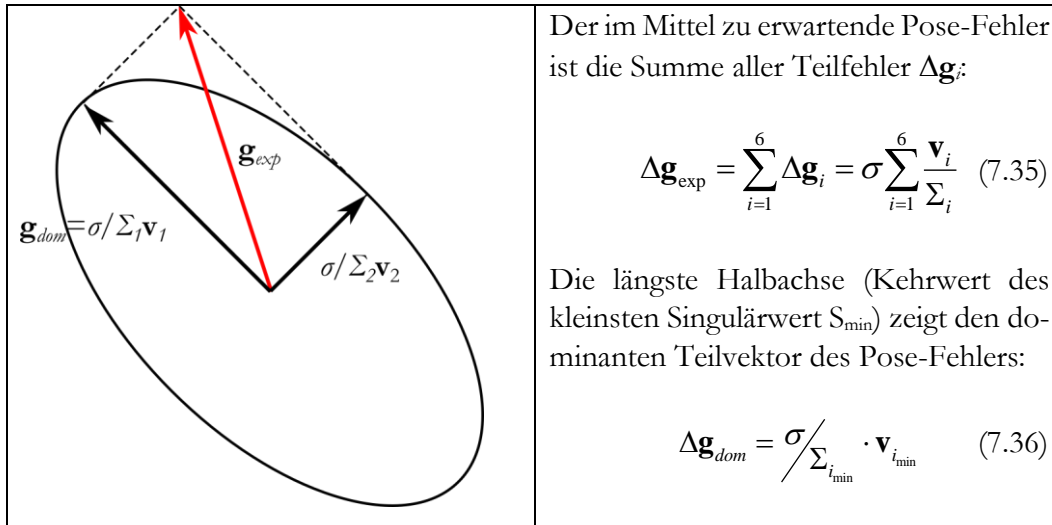


Abbildung 73: Dominanter Pose-Fehler  $\Delta \mathbf{g}_{\text{dom}}$  und mittlerer zu erwartender Gesamt-Pose-Fehler  $\Delta \mathbf{g}_{\text{exp}}$ .

#### 7.4.4 Auswirkung des dominanten Pose-Fehlers

Der dominante Pose-Fehler  $\Delta \mathbf{g}_{\text{dom}}$  identifiziert die am schwersten zu detektierende Bewegung, welche die erzielbare Systemgenauigkeit einschränkt.

Die Einschränkung ist dadurch bedingt, dass der zur erwartende mittlere Fehler mindestens so groß ist, wie der dominante (größte) Teilfehler. Verstärkt wird dieser Effekt nochmals durch die quadratische Gewichtung der Teilfehler bei Summierung.

Der Betrag des mittleren Pose-Fehler  $|\Delta \mathbf{g}_{\text{exp}}|$  lässt sich (alternativ zu Gl.(7.35)) durch die Summe der Beträge der (orthogonalen) Teilvektoren ausdrücken als:

$$|\Delta \mathbf{g}_{\text{exp}}| = \sigma \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^6 \left| \frac{1}{\Sigma_i} \cdot \mathbf{v}_i \right|^2} \quad (7.37)$$

Durch Betrachtung des Terms unter der Wurzel wird ersichtlich, dass eine „gewichtete“ Summe entsteht. Durch die Quadratur der Teilbeträge werden Vektoren größerer Länge stärker gewichtet, als Vektoren kleiner Länge.

Aufgrund dessen, dass der dominante Fehler  $\Delta \mathbf{g}_{\text{dom}}$  hier jeweils den größten Summanden stellt, nämlich  $|\Delta \mathbf{g}_{\text{dom}}|^2$ , ist zu erwarten, dass in der Praxis der Gesamtfehler nur wenig größer ist, als der dominante Teilfehler. Umgekehrt kann der Gesamtfehler nur durch Minderung des dominanten Teilfehlers, also durch Beseitigung der schwer detektierbaren Bewegung, nennenswert verbessert werden.

## 7.5 Ermittlung einer optimalen Mehrkamerakonfiguration

In den Unterkapiteln 7.1-7.3 wurde ausführlich die Aufstellung von Mehrkameramodellen, das Verfahren zur Pose-Bestimmung und die Fehlerfortpflanzung von einem bestehenden Bildmessfehler zu einem Pose-Fehler besprochen.

Die Fehlerfortpflanzung hängt dabei maßgeblich von der *Kamerakonfiguration*, also von Anzahl und Anordnung der Einzelkameras ab. Hier spielen insbesondere schwer detektierbare Bewegungen (Kap. 7.5.1) eine Rolle, die mit dem dominanten Pose-Fehler (Kap. 7.4.4) in Verbindung stehen und die Messgenauigkeit beschränken.

In diesem Abschnitt werden die Eigenschaften von kamerabasierten Pose-Sensoren mit ein, zwei und drei Kameras an Beispielen erarbeitet. Dazu werden diese Systeme mit Hilfe des entstandenen Simulationsframeworks modelliert und auf ihr Fehlverhalten hin untersucht. Die numerischen Ergebnisse werden interpretiert und veranschaulicht (vgl. Kap. 7.5.4, 7.5.5).

### 7.5.1 Optimale Kamerakonfiguration

Es wurde gezeigt, dass der jeweils dominante Teilfehler  $\Delta \mathbf{g}_{dom}$  einer betrachteten Kamerakonfiguration die erreichbare Pose-Messgenauigkeit beschränkt (vgl. Kap. 7.4.4). Eine in der Theorie günstige Kamerakonfiguration zeichnet sich demnach dadurch aus, dass für sie möglichst keine schwer detektierbaren Bewegungen existieren. Oder in anderen Worten, keine dominanten Teilfehler bei der Singulärwertzerlegung auftreten, also alle Singulärwerte in etwa in der gleichen Größenordnung sind. Diese Eigenschaft kann als Optimierungskriterium für eine Kamerakonfiguration verwendet werden.

Im Folgenden werden einige Modelle basierend auf ein bis drei Kameras aufgestellt und deren Eigenschaften durch Analyse ihrer Jakobimatrix untersucht und besprochen. Für die Analyse mittels SWZ werden Zielmarken mit 3x3 äquidistant angeordneten Referenzpunkten angenommen. Die Ergebnisse werden zur besseren Veranschaulichung an 1-Punkt-Zielmarken besprochen, wobei bei ein bis zwei Kameras schwer detektierbare Bewegungen zu nicht erkennbaren Bewegungen (Singularitäten) werden.

### 7.5.2 Grundkonfiguration der betrachteten Beispiele

Um eine Vergleichbarkeit der evaluierten Kamerakonfigurationen zu ermöglichen, werden einige Festlegungen getroffen:

1. Alle Einzelkameras sind vom gleichen Typ und entsprechen dem in Kap. 4.7.7 vorgeschlagenen Aufbau. Der Bildmessfehler nach Kalibrierung wird wie an der Realkamera ermittelt mit  $\sigma=0,1\text{px}$  angenommen (vgl. Kap. 6.4).

2. Jede der an einem Modell beteiligten Kameras  $\mathbf{E}_i$  besitzt einen festen Abstand  $r=1\text{m}$  zu einer beobachteten Zielmarke  $\mathbf{T}_i$ . Die optische Achse steht senkrecht zur Zielmarke.
3. Jede Zielmarke  $\mathbf{T}_i$  besteht aus  $3 \times 3$  Referenzpunkten auf einer Fläche von  $(0,1 \times 0,1)\text{m}^2$

Abbildung 80 zeigt die relative Anordnung einer Kamera und Zielmarke. Gleiche Relation gilt für jedes weitere dem Modell zugefügte Paar aus Kamera und Marke.

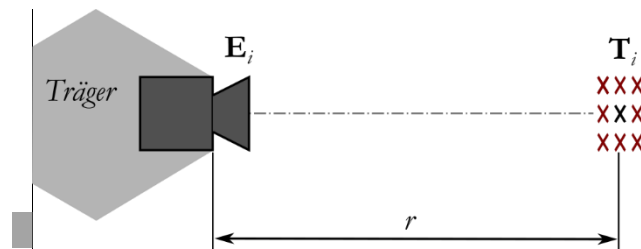


Abbildung 74: Grundkonfiguration für eine Kamera  $\mathbf{E}_i$  die ein Target  $\mathbf{T}_i$  im Abstand  $r$  beobachtet.

Zur Veranschaulichung einiger Simulationsergebnisse werden die Zielmarken an geeigneter Stelle auf einen einzigen Referenzpunkt reduziert. Es gilt dann der mittlere Referenzpunkt (in der Abbildung schwarz gekennzeichnet).

### 7.5.3 Berechnung des theoretischen Pose-Messfehlers

Die Gleichungen (7.35) und (7.36) zeigen die Berechnung des zu erwartenden Gesamtfehlervektors  $\Delta \mathbf{g}_{\text{exp}}$  und des dominanten Teilfehlervektors  $\Delta \mathbf{g}_{\text{dom}}$ . Für einen Vergleich der Kamerakonfigurationen genügen die betragsmäßigen Fehler  $|\Delta \mathbf{g}_{\text{exp}}|$  bzw.  $|\Delta \mathbf{g}_{\text{dom}}|$ . Wegen der Orthogonalität der Singulärvektoren ( $|v_i|=1$ ) können die Gleichungen damit vereinfacht werden zu:

$$\Delta \mathbf{g}_{\text{dom}} = \sigma \frac{\mathbf{v}_i}{\Sigma_{\min}} \rightarrow |\Delta \mathbf{g}_{\text{dom}}| = \sigma \frac{1}{\Sigma_{\min}} \quad (7.38)$$

$$\Delta \mathbf{g}_{\text{exp}} = \sigma \sum_{i=1}^6 \frac{\mathbf{v}_i}{\Sigma_i} \rightarrow |\Delta \mathbf{g}_{\text{exp}}| = \sigma \sqrt{\sum_{i=1}^6 \left( \frac{1}{\Sigma_i} \right)^2} = \sigma \left| \frac{1}{\Sigma} \right| \quad (7.39)$$

Die Betragsgleichungen zeigen, dass  $|\Delta \mathbf{g}_{\text{exp}}|$  proportional dem Kehrwert des kleinsten Singulärwertes bzw.  $|\Delta \mathbf{g}_{\text{dom}}|$  proportional dem Betrag des inversen Singulärwertvektors ist.

Für einen bekannten Bildmessfehler kann also der zu erwartende Pose-Messfehler berechnet werden. Für die Berechnungsbeispiele in den folgenden Abschnitten



wird dazu der aus der Kamerakalibrierung (Kap. 6.4) für eine reale Testkamera (vgl. (Kap. 3.1.5, 4.4.1) ermittelte Bildmessfehler von  $\sigma_l = 3,6 \cdot 10^{-5}$  eingesetzt. Berechnet werden damit jeweils die Beträge  $|\Delta \mathbf{g}_{dom}|$  und  $|\Delta \mathbf{g}_{exp}|$  nach Gl. (7.38) und (7.39) mit deren Hilfe die Leistung unterschiedlicher Kamerakonfigurationen bewertet werden soll.

### 7.5.4 Verhalten von 1- und 2-Kamera-Systemen

Wird das in Kapitel 7.1 beschriebene Modell mit nur einer Kamera bestückt, so ermittelt die Fehleranalyse auf Basis der Singulärwertzerlegung der Jakobimatrix (vgl. Kap. 7.4) vier schwer detektierbare Bewegungen für die eine Pose-Änderung nur geringe Bildänderung zur Folge hat. Tabelle 16a zeigt in der zweiten Spalte die errechneten Singulär-Kehrwerte  $1/\Sigma_i$ , die als „Hebelfaktoren“ zwischen dem Bildfehler  $s$  und dem Pose-Fehler (in m bzw. rad) interpretiert werden können (vgl. Gl. (7.38)). Die größeren Hebel  $1/\Sigma_3$  bis  $1/\Sigma_6$  identifizieren die schwer detektierbaren Bewegungen. Der größte Hebel  $1/\Sigma_6$  identifiziert den dominanten Pose-Fehler, der für das Beispiel auf Basis von Gl. (7.38) zu  $|\Delta \mathbf{g}_{dom}| \sim 9\text{mm}$  abgeschätzt wird (Spalte 3). Der zu erwartende Gesamtfehler dieser Anordnung liegt bei  $|\Delta \mathbf{g}_{exp}| \sim 13\text{mm}$ .

Zur Beantwortung der Frage, welche Bewegungen dieses Problem verursachen, werden die den Hebelfaktoren zugehörigen Singulärvektoren betrachtet. In Spalte 2 sind jeweils die den zwei größten Hebeln  $1/\Sigma_5$  und  $1/\Sigma_6$  zugehörigen Vektoren  $\mathbf{v}_5$  und  $\mathbf{v}_6$  aufgeführt. Diese sind als 6D-Posevektoren der Länge 1 zu verstehen und folgen dem bekannten Schema  $\mathbf{v}_i = (\alpha, \beta, \gamma \mid x, y, z)^T$ . Der zum größten Wert  $1/\Sigma_6$  (dom. Fehler) gehörige Vektor  $\mathbf{v}_6$  besagt für das 1-Kamera-Beispiel, dass gleichzeitige Drehung um  $\gamma$  die Z-Achse und eine Translation in Richtung der X-Achse die geringste Bildänderung bewirken, bzw. sich umgekehrt ein Bildmessfehler in große Messunsicherheit in dieser Bewegungsrichtung auswirkt.

Tabelle 16: Hebelfaktoren zwischen Bildmessfehler  $s$  und Pose-Fehler für a) 1-Kamera und b) 2-Kamera-System.

Konfiguration	Singulär-Werte / -Vektoren	Pose-Messfehler
a) Einzelkamera	$1/\Sigma_{1..6} = (0.22, 0.22, 5.77, 5.77, 242.96, 242.96)$ $V_5 = (0.00, 0.67, 0.00 \mid 0.00, 0.00, -0.74)$ $V_6 = (-0.00, 0.00, 0.71 \mid -0.71, 0.00, 0.00)$	$ \Delta \mathbf{g}_{dom}  = 8932 \mu\text{m}$ $ \Delta \mathbf{g}_{exp}  = 12636 \mu\text{m}$
b) kartesisch 2x90°	$1/\Sigma_{1..6} = (0.18, 0.18, 0.30, 0.33, 6.86, 7.31)$ $V_5 = (0.84, -0.00, -0.00 \mid 0.00, 0.00, 0.54)$ $V_6 = (0.00, 0.44, -0.71 \mid -0.00, -0.56, 0.00)$	$ \Delta \mathbf{g}_{dom}  = 201 \mu\text{m}$ $ \Delta \mathbf{g}_{exp}  = 266 \mu\text{m}$

Zur Darstellung komplexer schwer detektierbarer Bewegungen wurde ein Visualisierungsverfahren implementiert. Abbildung 75 zeigt das Resultat der Visualisierung der beiden am schwersten detektierbaren Bewegungen des 1-Kamera-Systems. Die Kamera wird als graue Pyramide dargestellt, deren stumpfe Seite die Objektivöffnung repräsentiert. Die grau gestrichelte Linie deutet die optische Achse an, während das blaue Kreuz den Koordinatenursprung des Systems definiert. Die Zielmarke ist durch ihre Referenzpunkte angedeutet.

Die rot gestrichelten Linien visualisieren die Singulärvektoren  $\mathbf{v}_5$  und  $\mathbf{v}_6$ . Wird das Kamerasystem (unter Beibehalten der Orthogonalität zur opt. Achse) auf dieser Linie verschoben, so ist nur geringe Bildänderung zu erwarten. Angezeigt wird hier also eine Rotation der Kamera um die Zielmarke als Rotationszentrum unter Beibehaltung der Ausrichtung der optischen Achse auf die Zielmarke. Diese Bewegung wirkt sich nahezu nur in einer perspektivischen Verzerrung des Zielmarkenbildes aus, bewirkt jedoch keine Größenänderung oder Verschiebung und ist dementsprechend schwer zu detektieren.

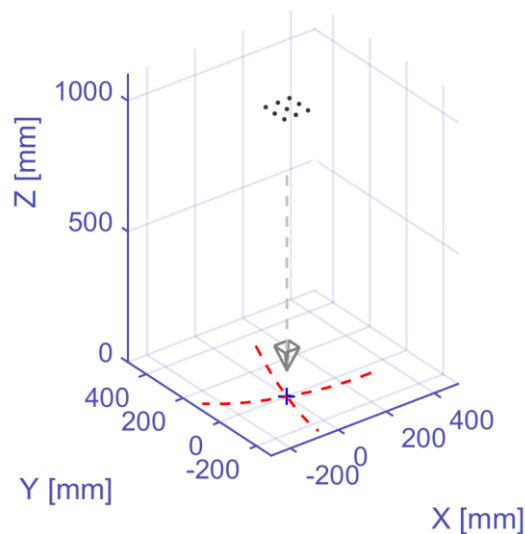


Abbildung 75: Analyse und Visualisierung des Pose-Messfehlers einer 1-Kamera-Konfiguration. Das blaue Kreuz kennzeichnet den Ursprung des System-KS. Eine Bewegung auf der rot gestrichelten Bahn, führt nur zu geringer Bildänderung und ist damit schwer messbar.

Ersetzt man die Mehrpunktzielmarke beim 1-Kamera-System durch eine 1-Punkt-Zielmarke, wird die Modellgleichung singular und es entstehen nicht erkennbare Bewegungen die in Abbildung 76 skizziert werden.

Zum besseren Verständnis gehen wir davon aus, dass die Kamera so ausgerichtet ist, dass der beobachtete Punkt auf der optischen Achse liegt, obgleich sich die

Singularitäten für beliebige Lagen nachweisen lassen. Es gibt vier Bewegungen bei denen sich der Bildpunkt auf dem Kamerasensor nicht verschiebt, also kein Messsignal entsteht.

- (1) Gleiten entlang der z-Achse (optische Achse) des Kamera-KS.
- (2) Rotieren um die z-Achse.
- (3), (4) Rotationen um den Zielpunkt  $P_1$  als Rotationszentrum.

Auch alle Kombinationen aus diesen vier Bewegungen bleiben unerkennbar.

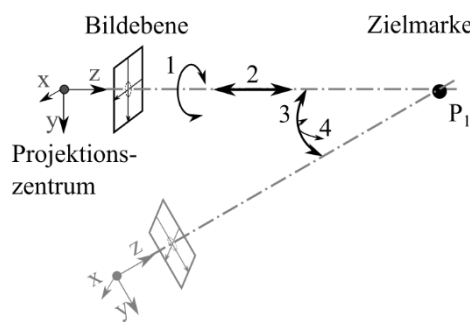


Abbildung 76: Nicht erkennbare Bewegungen bei der Beobachtung einer 1-Punkt-Zielmarke mit 1 Kamera. Keine Bildänderung bewirken (1) Rotation um opt. Achse, (2) Verschiebung entlang opt. Achse, (3)+(4) Rotationen um Zielpunkt.

Eine Verbesserung lässt sich durch Hinzunehmen einer zweiten Kamera und Zielmarke erwirken. Hier zeigt die Analyse nur noch zwei statt vier schwer detektierbare Bewegungen. Sie sind durch die (gegenüber  $1/\Sigma_{1..4}$ ) etwa 10-fach größeren Hebel  $1/\Sigma_5$  und  $1/\Sigma_6$  gekennzeichnet (vgl. Tabelle 16b). Der erzielbare Pose-Fehler  $|\Delta \mathbf{g}_{exp}| = 266\mu\text{m}$  ist bei der 2-Kamera-Konfiguration etwa 70-fach geringer als mit nur 1 Kamera.

Abbildung 77 zeigt die Visualisierung der schwer detektierbaren Bewegungen der 2-Kamera-Konfiguration. Die Singulärvektoren  $\mathbf{v}_5$  und  $\mathbf{v}_6$  zeigen hier an, dass eine Bewegung des Kamerasystems auf bestimmten räumlichen Bogenlinien weder auf Kamera 1 noch Kamera 2 eine wesentliche Bildänderung bewirkt.

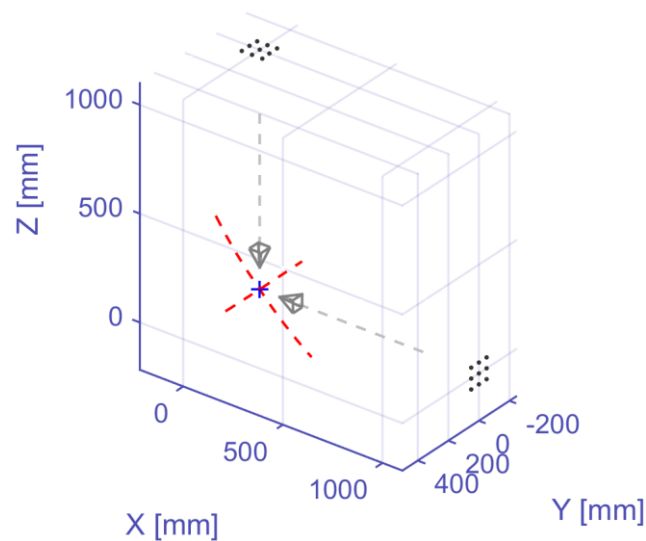


Abbildung 77: Analyse und Visualisierung des Pose-Messfehlers einer 2-Kamera-Konfiguration.

Abbildung 78 skizziert dieses Ergebnis für ein besseres Verständnis wieder am Beispiel einfacher Zielpunkte. Ausgehend von der 1-Kamera-Konfiguration wird die schwer detektierbare Bewegung (1) blockiert, (2) wird zu einer Bogenbewegung (5) und (3)+(4) reduzieren zu einer Rotation um die Verbindungsachse der beiden Zielpunkte (6). Durch eine zweite Kamera kann das Problem also nicht vollständig gelöst werden.

Die beiden verbleibenden schwer detektierbaren Bewegungen können wie folgt beschrieben werden:

- (5) Gleiten auf räumlicher Bogenlinie unter Beibehaltung der Kameraausrichtung auf jeweils einen Zielpunkt (Bei 90-Grad Montage der Kameras ist diese krumme Raumlinie nach dem Satz des Thales ein Halbkreis).
- (6) Rotieren um die Verbindungsachse der beiden Zielpunkte. Hier werden (3) und (4) auf nur mehr einen nicht erkennbaren Freiheitsgrad reduziert.

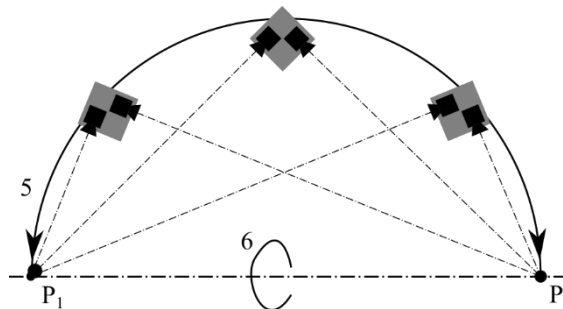


Abbildung 78: Schwer detektierbare Bewegungen bei der 2-Kamera-Konfiguration: (1) wird blockiert, (2) wird zu einer Bogenbewegung (5), (3) und (4) reduzieren zu einer Rotation um die Verbindungsachse der beiden Zielpunkte (6).

1-2-Kamera-Systeme sind damit für die Konstruktion eines CPMS unzureichend. Zwar kann mit solchen Anordnungen eine 6D-Posemessung durchgeführt werden, das Ergebnis wird jedoch ungenau. Mit Mehrpunktzielmarken treten zwar keine Singularitäten auf, die zunächst nicht erkennbaren Bewegungen werden jedoch zu gleichartigen schwer detektierbaren Bewegungen. Gründe liegen in der relativen Häufung der Referenzpunkte auf kleiner Fläche, was Winkel- und Entfernungserkennung erschwert und ein ähnliches Verhalten wie bei Betrachtung eines reinen Zielpunktes bewirkt (vgl. Abbildung 71). Mehrpunktzielmarken mindern jedoch das Messrauschen durch eine verbesserte Statistik (vgl. Kap. 7.5.6).

### 7.5.5 3-Kamera-Systeme und ihre Optimierung

Eine dritte Kamera eliminiert die beiden schwer detektierbaren Bewegungen eines 2-Kamera-Systems. Mittels der Fehleranalyse lässt sich aber wiederum zeigen, dass die erzielbaren Ergebnisse abhängig von der Kameraanordnung sind.

Ein nahe liegender Ansatz ist der Aufbau eines CPMS aus drei rechtwinklig entlang der kartesischen Koordinatenachsen angeordneten Kameras wie in Abbildung 80a gezeigt. Die Ausrichtung in alle drei Raumrichtungen lässt die gleichmäßige Erfassung aller denkbaren Bewegungen vermuten. Es kann jedoch gezeigt werden, dass gerade diese Annahme falsch ist.

Die Modellierung eines solchen Systems und die Analyse zeigen, dass hier auch bei 1-Punkt-Zielmarken keine Singularitäten mehr vorliegen. Für Mehrpunktzielmarken zeigt sich ebenfalls eine sprunghafte Verbesserung. Jedoch fällt auf, dass weiterhin zwei dominante Teilfehler vorliegen, die in etwa um einen Faktor von 3 größer sind, als die restlichen vier.

Tabelle 17a zeigt das Ergebnis. Der zu erwartende Pose-Fehler  $|\Delta \mathbf{g}_{exp}| = 35 \mu\text{m}$  verbessert sich sprunghaft gegenüber einer ähnlich aufgebauten 2-Kamera-Konfiguration, bewirkt durch die Reduktion des dominanten Pose-Fehlers. Zur Überprüfung dieses Ergebnisses wird zusätzlich zur Fehleranalyse eine simulierte Testmessung

durchgeführt. Dazu werden Messdaten für eine bestimmte Systempose simuliert und mit einer Messunsicherheit (Bildfehler  $\sigma$ ) in der erwarteten Größe belegt. Der bei diesem Test ermittelte Fehler  $|\Delta \mathbf{g}_{test}| = 38 \mu\text{m}$  bestätigt, abgesehen von einer erwarteten Stichprobenabweichung, das Fehleranalyseverfahren.

Tabelle 17: Hebelfaktoren zwischen Bildmessfehler s und Pose-Fehler für a) 3-Kameras orthogonal und b) 3-Kameras in planarer Anordnung.

Konfiguration	Singulär-Werte / -Vektoren	Pose-Messfehler
a) 3-Kameras 90°, orthogonal (in Richtung Koordinatenachsen)	$1/\Sigma_{1..6} = (0.16, 0.16, 0.21, 0.23, 0.61, 0.61)$ $V_5 = (0.27, 0.47, 0.00 \mid 0.58, -0.53, -0.30)$ $V_6 = (0.27, -0.47, 0.00 \mid 0.58, 0.53, -0.30)$	$ \Delta \mathbf{g}_{dom}  = 23 \mu\text{m}$ $ \Delta \mathbf{g}_{exp}  = 35 \mu\text{m}$ $ \Delta \mathbf{g}_{test}  = 38 \mu\text{m}$
b) 3-Kameras 120°, planar	$1/\Sigma_{1..6} = (0.17, 0.19, 0.25, 0.25, 0.27, 0.27)$	$ \Delta \mathbf{g}_{dom}  = 10 \mu\text{m}$ $ \Delta \mathbf{g}_{exp}  = 21 \mu\text{m}$ $ \Delta \mathbf{g}_{test}  = 19 \mu\text{m}$

Abbildung 79 zeigt die Visualisierung der beiden um etwa einen Faktor 3 schlechter detektierbaren Bewegungen der orthogonalen 3-Kamera-Konfiguration.

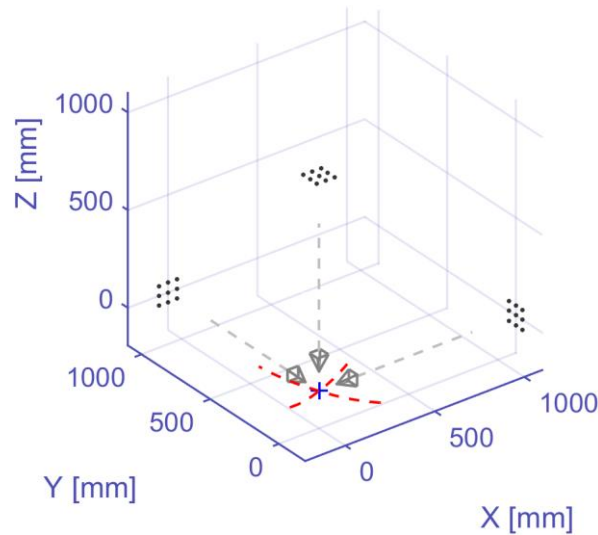


Abbildung 79: Analyse und Visualisierung des Pose-Messfehlers einer 3-Kamera-Konfiguration mit orthogonaler Kameraausrichtung.

Durch Betrachten der Singulärvektoren kann die Ursache ermittelt werden. Der größte Hebel  $1/\Sigma_6$  beschreibt eine Bewegung recht ähnlich der Bogenbewegung (5) für den 2-Kamerafall. Es kommt lediglich eine kleine Drehung um die dort konstanten Drehachsen hinzu. So wird die Bildpositionsänderung für das zusätzliche dritte Ziel verkleinert, auf Kosten der beiden anderen Zielmarken. Auf diese Weise bewirkt die Modelleinpassung, dass die Bildpositionsänderung für alle drei Zielmarken gleich groß ist.

Eine verbesserte Anordnung muss bei gleicher Bewegung größere Bildänderungen liefern. Den Hinweis dafür liefert die Beobachtung, dass für die Bogenbewegung der Drehwinkel der Kamera das Bild der dritten Zielmarke nicht ändert, denn es liegt auf der optischen Achse. Die Änderung wird maximal, falls dieses Ziel rechtwinklig zur Drehachse, d.h. in der Bogenebene liegt. In diesem Falle addieren sich die Bildänderungen durch Translation und Drehung. Aus Symmetriegründen, da man auch die Bogenbewegung zwischen Kamera 1 und 3 bzw. 2 und 3 betrachten muss, ist der optimale Winkel zwischen den ebenen Kameras  $120^\circ$ .

Abbildung 80 zeigt die kartesische 3-Kameraanordnung a) und die optimierte planare 3-Kameraanordnung b).

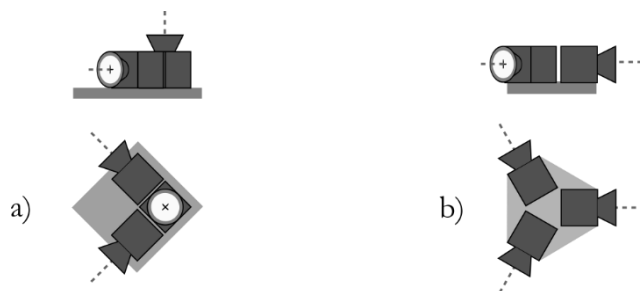


Abbildung 80: a) Anordnung von 3 Kameras entlang der kartesischen Koordinatenachsen, b) planare Kameraanordnung im Winkel von  $120^\circ$

Tabelle 17b zeigt das Ergebnis der Auswertung der planaren Kamerakonfiguration. Nach der in Kap. 7.5.1 formulierten Optimierungsvorschrift sollte der dominante Teilfehler (definiert durch den größten Hebel  $1/\Sigma_6$ ) möglichst klein sein, da er sonst die erzielbare Messgenauigkeit beschränkt.

Bei der planaren 3-Kamera-Konfiguration b) wurde dieses Ziel weitgehend erreicht. Diese Konfiguration liegt damit nahe am Optimum und kann kaum weiter verbessert werden. Der dominante Teilfehler  $|\Delta \mathbf{g}_{dom}| = 10 \mu\text{m}$  unterbietet die kartesische Anordnung um einen Faktor von 2,3. Auch der zu erwartende Pose-Fehler wurde mit  $|\Delta \mathbf{g}_{exp}| = 21 \mu\text{m}$  nahezu halbiert. Damit wird bei gleicher Kamerahardware (bzw. gleichem Bildmessfehler  $\sigma$ ) und Kosten die Systemleistung wesentlich verbessert.

Abbildung 81 zeigt abschließend die Visualisierung der planaren 3-Kamera-Konfiguration.

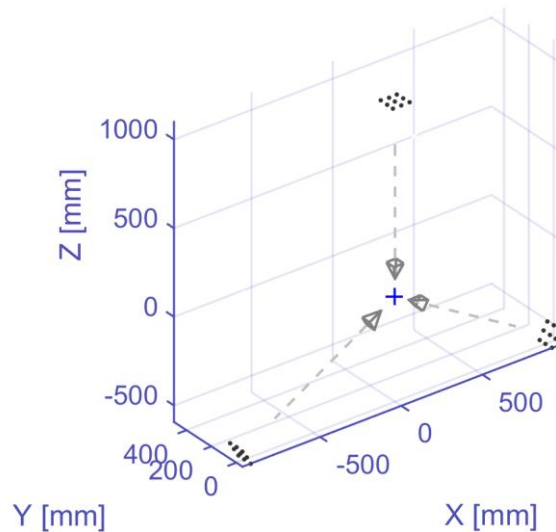


Abbildung 81: Visualisierung einer 3-Kamera-Konfiguration mit planarer 120° Kameraausrichtung.

### 7.5.6 Auswirkung von Zielmarken-Größe und -Referenzpunktzahl

Die Größe der Zielmarken, die Anzahl der Referenzpunkte und auch der Abstand zwischen Kamera und Zielmarke können den Pose-Fehler einer Kamerakonfiguration beeinflussen.

Bei einer 1-2-Kamera-Konfiguration ist zu erwarten, dass sich bei einer Vergrößerung der Zielmarke der Pose-Fehler verringert. Diese Systeme leiten zwangsläufig Informationen über Winkel und Abstände aus der perspektivischen Verzerrung der Abbildung ab, wobei größere Zielpunktabstände größere Bildkoordinatenänderungen bewirken. Eine Verdoppelung der Zielmarkengröße führt bei der Fehleranalyse bei der 1-Kamera-Konfiguration etwa zu einem 4-fach kleineren, bei der 2-Kamera-Konfiguration zu einem 2-fach kleineren Pose-Fehler. Dagegen hat die Zielmarkengröße bei den 3-Kamera-Konfigurationen praktisch keinen Einfluss, diese Systeme sind auf eine Perspektiveninformation nicht angewiesen. Ihre Unabhängigkeit von der Zielmarkengröße ist ein erheblicher Vorteil, da mit kleineren Zielmarken Platz, Material und Aufwand erspart wird.

Ein weiterer Parameter ist die Anzahl der Referenzpunkte auf einer Zielmarke. 3-Kamera-Konfigurationen sind bereits bei 1-Punkt-Zielmarken frei von Singularitäten. Es ist jedoch zu erwarten, dass die größere Referenzpunktzahl von Mehrpunktzielmarken die Statistik der Bildmessung verbessert. Eine Fehleranalyse mit der 4-fachen Referenzpunktzahl (bei gleicher Markengröße) zeigt hier eine Halbierung sowohl des dominanten als auch des erwarteten Pose-Fehlers. Bei steigender Referenzpunktzahl  $N$  entwickelt sich der Pose-Fehler also reziprok zu  $\sqrt{N}$ . So kann also der Pose-



Fehler durch deutliche Erhöhung der Zielmarkenreferenzpunkte gemindert werden. Bei der planaren 3-Kamera-Konfiguration kann der zu erwartende Pose-Fehler  $|\Delta \mathbf{g}_{exp}|$  durch Ersetzen der 3x3 durch 12x12 Zielmarken auf ein Viertel von  $21\mu\text{m}$  auf ca.  $5\mu\text{m}$  reduziert werden.

### 7.5.7 Auswirkung des Abstands zwischen Kamera und Zielmarke

Zuletzt stellt sich die Frage, wie sich eine Abstandsänderung zwischen Kamera und Zielmarke auf den Pose-Fehler auswirkt. Eine Fehleranalyse der planaren 3-Kamera-Konfiguration mit dem 2-fachen Zielmarkenabstand  $r$  resultiert in einem 2-fach höheren Positionsfehler bei unverändertem Orientierungsfehler.

Die Entfernungsunabhängigkeit des Orientierungsfehlers lässt sich an der Gleichung der normierten Zentralprojektion (vgl. Kap. 6.1.2) zeigen. Ein Bildmessfehler  $\Delta u$  der horizontalen Bildkoordinate führt zu einer horizontalen Verschiebung  $\Delta X$  der Kamera quer zu ihrer optischen Achse. Umstellen der Gleichung zeigt, dass  $\Delta x$  gerade proportional zur Entfernung  $Z$  ist:

$$\Delta u = \frac{\Delta X}{Z} \Rightarrow \Delta X = \Delta u \cdot Z \quad (7.40)$$

Bei gleichem Bildfehler  $\Delta u$  steigt also der Fehler der Positionsbestimmung wie erwartet mit dem Abstand zwischen Kamera und Zielmarke.

Doch wie sieht es mit dem Orientierungs-Fehler aus? Hierzu wird (analog zu Kap. 2.1.4) eine Winkeländerung  $\Delta\beta$  durch eine äquivalente Positionsänderung dargestellt:

$$\Delta\beta \approx \tan \Delta\beta = \frac{\Delta X}{Z} \Rightarrow \Delta X \approx \Delta\beta \cdot Z \quad (7.41)$$

Eine Kamera nimmt also eine Rotation um einen Winkel  $\Delta\beta$  näherungsweise so wahr, als wäre sie um  $\Delta\beta Z$  horizontal verschoben worden. Setzt man die äquivalente Winkeldarstellung aus Gl. (7.41) in Gl. (7.40) ein, so kürzt sich die Abhängigkeit zum Abstand  $Z$  heraus:

$$\Delta u = \frac{\Delta X}{Z} = \frac{\Delta\beta \cdot Z}{Z} \Rightarrow \Delta\beta = \Delta u \quad (7.42)$$

Ein Orientierungsfehler  $\Delta\beta$  einer Kamera entspricht demnach in Näherung für kleine Winkel gerade dem Bildfehler  $\Delta u$  und ist (im Gegensatz zum Positionsfehler) unabhängig vom Abstand zwischen Kamera und Ziel.

### 7.5.8 Varianz des Pose-Fehlers innerhalb des Messvolumens

Die Analyse des Pose-Fehlers basiert auf der Jakobimatrix  $\mathbf{J}(\mathbf{g})$ . Diese ist jedoch nur für eine bestimmte Systempose  $\mathbf{g}$  gültig, so dass auch die Fehleranalyse nur für diese Pose gelten kann (vgl. Kap. 7.2.2). Um die Varianz des Pose-Fehlers innerhalb eines definierten Messvolumens zu prüfen, wurde eine Stichprobe von 1000 unterschiedlichen Messposen im Volumen analysiert. Dazu wurden Winkel- und Translationsparameter der Posen im Rahmen des gültigen Wertebereichs variiert.

Abbildung 82 zeigt die Varianz des zu erwartenden Pose-Fehlers  $|\Delta\mathbf{g}_{exp}|$  für die planare 3-Kamera-Konfiguration innerhalb eines Messvolumens von  $(800 \times 800 \times 800) \text{mm}^3$ . Für die Beispielfigur entspricht dies in etwa dem praktisch nutzbaren Volumen, das u.A. durch eine begrenzte Schärfentiefe der Kameras eingeschränkt wird. Das Histogramm zeigt, dass bei der planaren 3-Kamera-Konfiguration der Fehler nur wenig variiert. Der Mittelwert von  $|\Delta\mathbf{g}_{exp}|$  liegt bei  $21,7\mu\text{m}$  mit einer Standardabweichung von  $\sigma=1,4\mu\text{m}$ . Diese Konfiguration zeigt also ein stabiles Verhalten im gesamten Messvolumen. Die kartesische 3-Kamera-Konfiguration erweist sich mit einem mittleren Pose-Fehler von  $39\mu\text{m}$  bei deutlich höherer Standardabweichung  $\sigma=12,7\mu\text{m}$  hier als weniger stabil.

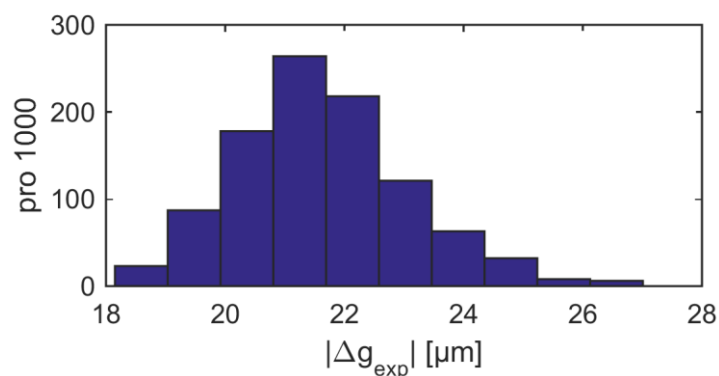


Abbildung 82: Histogramm der Fehleranalyse des Pose-Fehlers  $|\Delta\mathbf{g}_{exp}|$  bei der planaren 3-Kamera-Konfiguration. Stichprobe aus  $N=1000$  Posen  $\mathbf{g}$  in einem Messvolumen von  $(800 \times 800 \times 800) \text{mm}^3$ . Mittel= $21,7\mu\text{m}$ ,  $s=1,4\mu\text{m}$ .

In einem weiteren Schritt wurde das Messvolumen in ein dreidimensionales Raster unterteilt und die Fehleranalyse für jeden Rasterpunkt  $\mathbf{r}(x, y, z)^T$  mit einer Pose  $\mathbf{g}=(0, 0, 0, x, y, z)^T$  wiederholt. Die Winkelkomponenten der Pose blieben konstant. Abbildung 83 visualisiert das Ergebnis als Schnittbild durch das Messvolumen der planaren 3-Kamera-Konfiguration. Es ist zu erkennen, dass  $|\Delta\mathbf{g}_{exp}|$  in der Volumenummitte mit etwa  $21\mu\text{m}$  am niedrigsten ausfällt und zu den Rändern hin stetig ansteigt bis auf maximal etwa  $29\mu\text{m}$ .

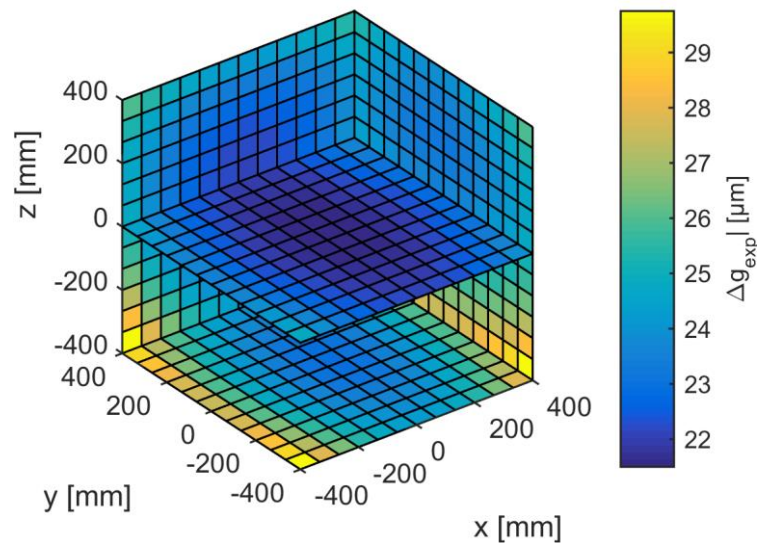


Abbildung 83: 3D-Visualisierung des Pose-Fehlers  $|\Delta \mathbf{g}_{\text{exp}}|$  innerhalb des Messvolumens der planaren 3-Kamera-Konfiguration.

Die planare 3-Kamera-Konfiguration zeigt nur eine geringe Varianz des Pose-Fehlers innerhalb des praktisch nutzbaren Messvolumens. Weiter zeigt sich ein stetiger Verlauf von der Mitte zu den Rändern des Volumens. Diese Konfiguration zeigt damit ein stabiles berechenbares Verhalten.

## 7.6 Kalibrierverfahren und erzielbare Messabweichungen

Die *Systemparameter* (zur Darstellung einer Systemkonfiguration) des CPMS bezeichnen konstante Systemeigenschaften einer Messanwendung, die im Rahmen einer einmaligen Systemkalibration bestimmt werden müssen, um ein vollständiges Abbildungsmodell zu erhalten. Konkret handelt es sich um die Posen  $\mathbf{e}_i$  der Kameras auf dem Kameraträger, die Posen  $\mathbf{t}_j$  im Weltkoordinatensystem und die für die Anfertigung von Kalibrieraufnahmen eingenommenen System-Posen  $\mathbf{g}_k$  (vgl. Kap 7.1).

Häufig soll zusätzlich die Transformation zwischen dem CPMS und dem Trägerroboter (oder auch einem weiteren Sensor) bestimmt werden. Es wird daher gezeigt, wie diese auch als Hand-Auge-Transformation bezeichnete Beziehung, z.B. durch Verschiebung des CPMS-Koordinatensystems in die Roboter-Hand integriert werden kann.

Entwickelt werden zwei unterschiedliche Ansätze zur Systemkalibration, die „Kalibrierung an Referenzmarken“ und die „Kalibrierung an einem Referenzmesssystem“ (Kap. 7.6.5). Zur Durchführung des erstgenannten Verfahrens werden einige Referenzzielmarken vorgegeben, deren Posen im Weltkoordinatensystem bekannt sind

(beispielsweise durch Einmessen mittels einer konventionellen Methode). Das zweite Verfahren kalibriert an einem Referenzmesssystem (beispielsweise einer Koordinatenmessmaschine), welches die zur Anfertigung der Kalibrieraufnahmen eingenommenen System-Posen  $\mathbf{g}_k$  bestimmt. Beide Verfahren unterscheiden sich wesentlich in Aufwand und erzielbarer Messgenauigkeit (vgl. Kap. 7.6.8, 7.6.10). Welches Verfahren sich für eine Messanwendung eignet, hängt von deren spezifischen Anforderungen ab (vgl. Kap. 7.6.12).

Insbesondere die „Kalibrierung an Referenzmarken“ kann durch eine Vorkalibrierung des Kameraträgers an einem speziell eingerichteten Kalibrierplatz verbessert werden. Dazu wird der Kameraträger auf einer Positioniereinheit innerhalb einer Gruppe von Kalibriermarken definiert verfahren. Durch Simulation der Vorkalibrierung und Analyse des Gleichungssystems können geeignete Kalibrierbewegungen ermittelt und ein optimaler Aufbau des Kalibrierplatzes festgelegt werden (vgl. Kap. 7.6.11).

Um die Kalibrierverfahren verständlich darzustellen wird ein Beispiel CPMS auf Basis eines konkreten Kameratyps und Messvolumens in der Simulations-Umgebung modelliert (Kap. 7.6.2). Anschließend werden die Kalibrierverfahren im Rahmen einer Simulation auf dieses CPMS angewendet. Durch simulierte Testmessungen (auf Basis des bekannten Bildmessfehlers des eingesetzten Kameratyps) wird die erzielbare Messgenauigkeit ermittelt (vgl. Kap. 7.6.8, 7.6.10). Zuvor werden die Begriffe Richtigkeit (auch Absolutgenauigkeit) und Präzision (auch Wiederholgenauigkeit) als Vergleichsmaße für die Beurteilung eines CPMS eingeführt (vgl. Kap. 7.6.1).

### 7.6.1 Kriterien zur Bewertung der Kalibrierung

Ziel der Systemkalibration ist, die konstanten Systemparameter so zu bestimmen, dass eine möglichst hohe Präzision und Richtigkeit des betrachteten CPMS (vgl. Definition in Kap. 3.2.2) für den bekannten Bildfehler  $\sigma_I$  (vgl. Kap. 6.4) resultiert.

Dabei beschreibt die Präzision (auch Wiederholgenauigkeit) die Stabilität des Messsystems bei wiederholter Durchführung desselben Messszenarios. Im Gegensatz dazu beschreibt die Richtigkeit (engl. Accuracy) die Abweichung des Erwartungswertes einer Messung vom wahren Wert und repräsentiert damit den systematischen Messfehler.<sup>192</sup>

Es werden zunächst ein Messszenario und die Systemparameter festgelegt, die in einer anschließenden Kalibration bestimmt werden. Auf Basis der kalibrierten Systemparameter werden simulierte Testmessungen durchgeführt, anhand derer die erzielbare Richtigkeit und Präzision ermittelt werden kann.

Aufgrund unterschiedlicher Einheiten von Winkel und Ort, wird die betrachtete Messsystem-Pose in ihre Winkel- und Positionskomponenten aufgeteilt. Als Maß

---

<sup>192</sup> Vgl. DIN, 55350-13

für die Präzision dient die Standardabweichung  $\sigma_{\alpha\beta\gamma}$  und  $\sigma_{xyz}$  der Winkel- und Positionskomponente über eine Reihe von Wiederholungsmessungen. Zur Ermittlung der Richtigkeit wird der Erwartungswert der Wiederholungsmessungen bestimmt und dessen Differenz zur tatsächlichen Pose berechnet. Das Ergebnis wird wiederum in Winkel- und Positionsfehler aufgeteilt und mit  $\varepsilon_{\alpha\beta\gamma}$  bzw.  $\varepsilon_{xyz}$  bezeichnet.

Präzision und Richtigkeit können für unterschiedliche Mess-Posen innerhalb eines vorgegebenen Messvolumens unterschiedliche Werte annehmen. Daher werden diese Kennzahlen an einer Reihe über das Messvolumen verteilter Posen bestimmt und die (absoluten) Mittelwerte  $\bar{\sigma}_\phi, \bar{\sigma}_{xyz}, \bar{\varepsilon}_\phi, \bar{\varepsilon}_{xyz}$  berechnet. So ergeben sich geeignete Qualitäts-Kennzahlen zur Einschätzung eines Kalibrierverfahrens für ein bestimmtes Messszenario.

### 7.6.2 Beispiel-CPMS zur Demonstration der Kalibrierung

Die verschiedenen Ansätze zur Systemkalibration sollen zum besseren Verständnis an einer Beispiel-Messanwendung erläutert werden. In Kap. 4.7.7 wurde bereits eine geeignete Kamera-/Beleuchtungskombination vorgeschlagen, auf die hier zurückgegriffen wird. Einzig das 12mm Objektiv wird durch ein 8mm Objektiv ersetzt. Für den eingesetzten Bildsensor ergibt sich damit ein Bildwinkel von ca. 90° (Normalobjektiv) und ein Schärfentiefebereich von 0,5m-∞ (vgl. Abbildung 35). Der Bildmessfehler wurde im Rahmen der Einzelkamerakalibrierung (vgl. Kap. 6.4) ermittelt und dient als Grundlage für eine realitätsnahe Simulation.

Die Einzelkameras werden wie in Kap. 7.5 vorgeschlagen in einer planaren 120°-3-Kamera-Konfiguration auf dem Kameraträger auf einem Kreis mit  $r=0,1\text{m}$  angeordnet. Eine Zielmarke besteht aus 3x3 Referenzpunkten und hat die Gesamtgröße (50x50)mm.

Das Messvolumen des Systems wird auf einen Zylinderförmigen Raum mit Radius 0,4m und Höhe 0,4m festgelegt. Zur Realisierung des zylindrischen Mess- und Kalibriervolumens werden die Zielmarken ringförmig auf einer Zylinderfläche mit Radius  $r=1\text{m}$  um den Messraum angeordnet. Dabei kann die (durch die Schärfentiefe bedingte) minimale Gegenstandsweite  $g_{\min}$  (hier 0,5m) einer Kamera nicht unterschritten werden.

Für die Kalibrierung an Referenzmarken (vgl. Kap. 7.6.8) muss die Abbildung von mindestens zwei Zielmarken pro Kamerabild gewährleistet werden. Aus Gleichung(7.43), die im nächsten Abschnitt erläutert wird, müssen im vorliegenden Beispiel mindestens 25 Marken auf einem Ring platziert werden, wobei der vertikale Abstand der Ringe 0,2m nicht überschreiten darf. Zur Realisierung des Messvolumens ergibt sich die in Abbildung 84 gezeigte Messanordnung. Das Messvolumen wird als grauer Zylinder dargestellt. Die Zielmarken sind in drei Ringen konzentrisch um das Messvolumen angeordnet. Der Kamerakopf im Zentrum wird durch ein Koordinatensystem mit X- (rot), y- (grün) und Z-Achse (blau) repräsentiert. Die optischen Achsen

der drei Kameras werden durch Linien in den Farben Cyan, Gelb und Magenta symbolisiert.

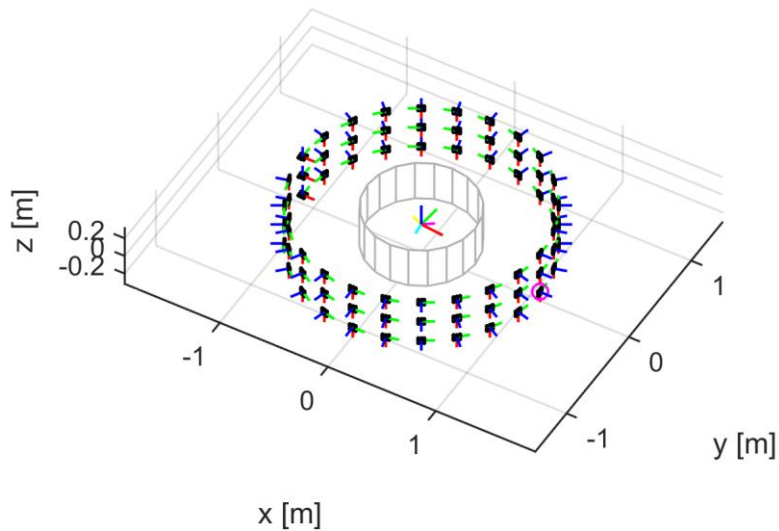


Abbildung 84: Beispielhaftes CPMS mit zylindrischem Messvolumen und planarer 120°-3-Kamera-Konfiguration. Das Messvolumen wird durch den grauen Zylinder angedeutet. Die opt. Achsen der drei Kameras sind durch cyan-, gelb- und magenta-farbene Linien gekennzeichnet.

### 7.6.3 Berechnung der erforderlichen Zielmarken-Dichte

Für eine zuverlässige Messung sollte jede der drei Kameras (für eine beliebige Pose in Messvolumen) mindestens eine Zielmarke beobachten. Dieses Kriterium ist gerade dann erfüllt, wenn der Abstand  $\mathbf{A}_i$  zweier Zielmarken um die Breite  $\mathbf{S}_i$  einer Zielmarke kleiner ist, als die Breite der Objektebene (bzw. des Bildfeldes)  $\mathbf{o}$  im Abstand der minimalen Gegenstandsweite  $g_{min}$ , (vgl. Abbildung 85). Würde  $\mathbf{A}_i$  größer gewählt, z.B.  $\mathbf{A}_i = \mathbf{o}$ , so würden im linken Teilbild nur jeweils die Hälfte der Zielmarke 1 und 2 abgebildet. Für die Erfassung muss eine Marke jedoch vollständig im Bildfeld sein.

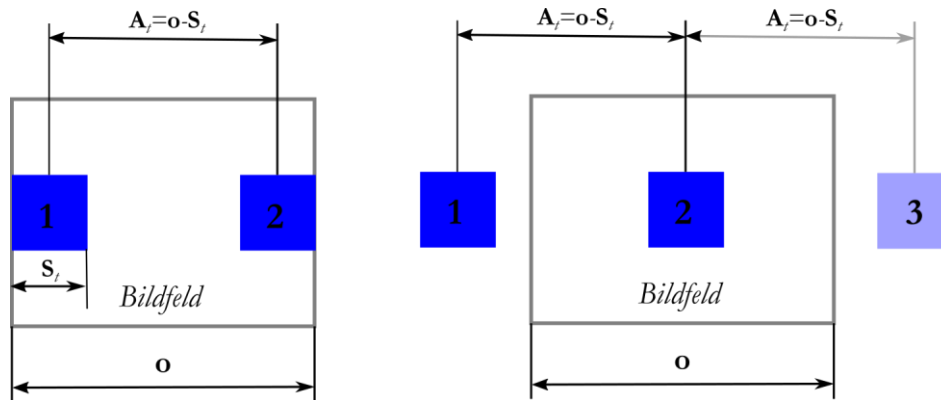


Abbildung 85: Minimalabstand von Zielmarken: Wenn der Abstand  $A_i$  zweier Zielmarken kleiner ist, als die Breite der Objektebene  $o$  abzüglich der Zielmarkenbreite  $S_i$ , so wird mindestens eine Zielmarke vollständig abgebildet.

Bei bekannter Pixelgröße  $S_P$ , Kamerakonstante  $f_c$  und der Bildgröße in Pixeln  $\mathbf{S}_I = (S_{I,x}, S_{I,y})^T$  kann die Ausdehnung  $\mathbf{o} = (o_x, o_y)^T$  der Objektebene im Abstand  $g_{min}$  berechnet werden. Für eine Minimalzahl  $n_{i,o}$  Zielmarken im Bild, kann weiter der maximale Zielmarkenabstand  $\mathbf{A}_i = (A_{i,x}, A_{i,y})^T$  berechnet werden:

$$\mathbf{o} = S_P \cdot \frac{g_{min}}{f_c} \cdot \mathbf{S}_I \rightarrow \mathbf{A}_i \leq \frac{\mathbf{o} - \mathbf{S}_I}{n_{i,o}} \quad (7.43)$$

Durch das Seitenverhältnis des Kamerabildes ergibt sich für den Maximalabstand  $\mathbf{A}_i$  ein Vektor mit Werten für die horizontale bzw. vertikale Anordnung. Soll das Kamerasystem später gedreht werden, so kehren sich horizontale und vertikale Richtung im Extremfall um. Zur Einhaltung des Abstandskriteriums ist in diesem Fall die kleinere Komponente von  $\mathbf{A}_i$  zu wählen.

Für die Kalibrierung an Referenzmarken (vgl. Kap. 7.6.8) muss aufgrund der notwendigen Verknüpfung zwischen Referenzzielmarken und Zwischenmarken die Abbildung von mindestens zwei Zielmarken pro Bild garantiert werden. Dazu wird  $n_{i,o} = 2$  gesetzt und ein entsprechend geringerer maximaler Zielmarken-Abstand  $\mathbf{A}_i$  berechnet.

### 7.6.4 Vorgehen bei Kalibrierung und Prüfung

Der Prozess der Systemkalibration und die anschließende Prüfung des CPMS auf Richtigkeit und Präzision werden in zwei getrennten Schritten durchgeführt.:

Zur Anfertigung der Kalibrieraufnahmen wird eine Reihe von Kalibrierposen innerhalb des Messvolumens angefahren. Die Posen sind in Anzahl und Lage so zu

wählen, dass jede Zielmarke mit jeder Einzelkamera des CPMS mindestens einmal erfasst wird. Redundanz steigert die Kalibriergröße durch Vermittlung vieler Daten, erhöht aber gleichzeitig den Berechnungsaufwand. Abbildung 86 zeigt eine bewährte Variante (vgl. Kap. 7.6.11), bei der der Messkopf zur Aufnahme der Kalibrierbilder auf einer (planaren) Kreisbahn gegen den Uhrzeigersinn durch das Messvolumen geführt wird. Dabei wird der Kopf gleichzeitig im Uhrzeigersinn um seine Hochachse gedreht. So wird erreicht, dass jede Kamera jede Marke erfasst. Sofern im vertikalen Bildfeld einer Kamera nicht alle Reihen eines Rings gleichzeitig abgebildet werden, wird der gesamte Ablauf in unterschiedlichen Höhen wiederholt, bis alle Zielmarken erreicht wurden.

Nach Abschluss der Datenaufnahme wird der Kalibrierprozess nach einem der unten beschriebenen Verfahren gestartet.

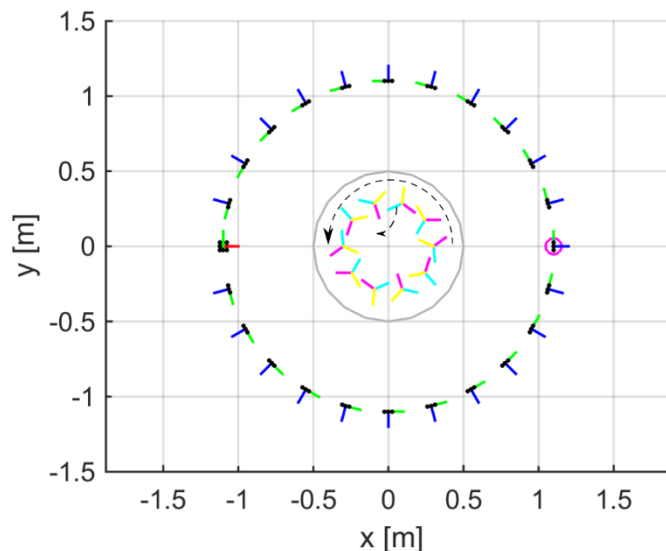


Abbildung 86: Prinzipielle Darstellung der Kalibrier-Posen. Der Messkopf beschreibt eine Kreisbahn im Gegenuhrzeigersinn (großer Pfeil) und wird zugleich im Uhrzeigersinn (kleiner Pfeil) um seine Hochachse gedreht.

Nach abgeschlossener Simulation der Systemkalibration liegen alle ermittelten Systemparameter vor und können auf ihre Richtigkeit in Bezug auf die korrekten Werte hin geprüft werden. Vorab sei jedoch angemerkt, dass kein direkter Zusammenhang besteht, zwischen der Richtigkeit der Kalibrierparameter und der Richtigkeit einer damit getätigten Pose-Messung (vgl. Kap. 7.6.6).

Daher wird die Prüfung von Richtigkeit und Präzision des CPMS in einem getrennten Prozess ermittelt. Eine vollständige Abdeckung eines 6D-Volumens mit Test-Posen ist nicht zu erreichen. Ein 6D-Raster mit nur zehn Rasterpunkten würde bereits  $10^6$  Testmessungen erfordern und die verfügbare Rechenkapazität sprengen.



Um dennoch eine gute Abschätzung der Messabweichung zu erhalten, wird eine Anzahl zufälliger Test-Posen aus dem gegebenen Messvolumen gewählt. Anders als bei der Kalibrierung werden hier alle sechs Komponenten der Pose variiert. Abbildung 87 zeigt exemplarisch die Vorgehensweise.

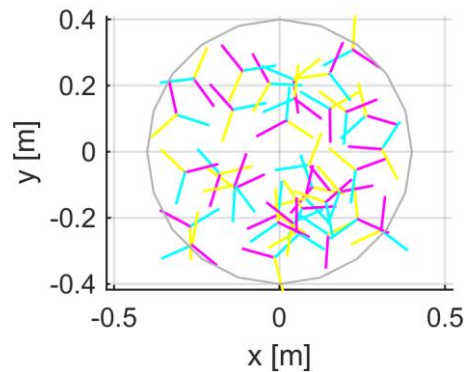


Abbildung 87: Mess-Posen: Der Messkopf fährt innerhalb des Messvolumens zufällige Posen an. Variiert werden alle 6 Pose-Parameter, der Kippwinkel um die Hochachse ist so eingeschränkt, dass im Bildfeld jeder Kamera eine Zielmarke ist.

### 7.6.5 Kalibrierung an Referenzzielmarken oder an Referenzmesssystem

Zur Systemkalibration sind zwei unterschiedliche Verfahren denkbar. Ein Ansatz ist die *Kalibrierung an Referenzzielmarken*. Als Referenzzielmarken werden Marken bezeichnet, deren Posen exakt bekannt sind und die als Grundlage zur Definition eines Referenz- bzw. Weltkoordinatensystem dienen können. Da bei diesem Ansatz die Messsystem-Pose  $\mathbf{g}$  zum Zeitpunkt einer Kalibrierungsaufnahme nicht bekannt ist, muss zur Kalibrierung eine simultane Optimierung der Kamera-Posen  $\mathbf{e}$ , der System-Posen  $\mathbf{g}$  und der Target-Posen  $\mathbf{t}$  vorgenommen werden. Ein solches Gleichungssystem ist jedoch zunächst unterbestimmt und verfügt über zwei unerwünschte Freiheitsgrade.

Wenn für eine Kalibrierung weder eine System-Pose  $\mathbf{g}$ , noch eine Target-Pose  $\mathbf{t}$  vorgegeben werden, wird es anschaulich möglich, das gesamte Messszenario in der Welt zu verschieben, ohne dass sich dies in einer Änderung der Kalibrierungsaufnahmen widerspiegelt. Um diesen Freiheitsgrad zu blockieren, ist ein einfaches Verfahren mindestens eine Zielmarke als Referenzmarke zu definieren und als Konstante in den Optimierungsprozess eingehen zu lassen. Da die Orientierung einer einzelnen Zielmarke aufgrund ihrer geringen Größe schlecht definiert ist, empfiehlt es sich das Weltkoordinatensystem durch mindestens drei im Messvolumen verteilter Referenzmarken aufzuspannen. Anstelle von Referenzmarken können (mit gleichem Effekt) auch System-Posen konstant gesetzt werden, beispielsweise wenn das Anfahren von Referenz-Posen möglich ist.

Der zweite unerwünschte Freiheitsgrad entsteht durch die freien Kamera-Posen  $\mathbf{e}$ . Sie beschreiben die Lage der drei CPMS Kameras relativ zum Systemkoordinatensystem (SKS, vgl. Abbildung 69) und damit relativ zur System-Pose  $\mathbf{g}$ . Werden  $\mathbf{e}$  und  $\mathbf{g}$  simultan bestimmt, kann eine Änderung von  $\mathbf{g}$  jederzeit durch eine gegensätzliche Änderung der drei Kamera-Posen kompensiert werden. Es existieren also beliebig viele Lösungen für  $\mathbf{e}$  und  $\mathbf{g}$  für die gleichen Kalibrierenaufnahmen. Dieser Freiheitsgrad kann beseitigt werden, wenn zumindest die Lage einer Kamera im Bezug zur System-Pose  $\mathbf{g}$  festgesetzt wird.

Eine einfache Lösung ist, das Koordinatensystem der ersten Kamera mit dem SKS zusammen zu führen. Dadurch entfällt jedoch die Möglichkeit, das SKS an eine beliebige Stelle zu legen, wie z.B. in den Tool Center Point (TCP) des Roboters. Diese als Hand-Auge-Transformation bekannte Beziehung kann zwar explizit ermittelt werden (z.B. mit dem Dual-Quaternionen-Ansatz nach Daniilidis<sup>193</sup>), eleganter ist jedoch die Inklusion in die Systemkalibration. Dazu können statt der Fixierung von Kameraparametern einige bekannte System-Posen  $\mathbf{g}$ , z.B. als TCP-Posen, vorgegeben werden. Auf diese Weise wird die Unterbestimmung in der Art aufgelöst, dass das SKS mit dem TCP zusammenfällt.

Abbildung 88 a) skizziert das Prinzip der Kalibrierung an Referenzmarken. Im Beispiel bilden die sechs kreisförmig angeordneten Zielmarken (mathematisch als auch mechanisch gesehen) einen starren Verbund, dessen Pose im WKS jedoch erst definiert ist, wenn mindestens die Pose einer (Referenz-)Zielmarke feststeht. Ebenso verhält es sich mit den drei CPMS-Kameras  $\mathbf{e}_1$ - $\mathbf{e}_3$ . Ihre Orientierung zueinander ist mathematisch definiert, nicht jedoch ihre Relation zur Mess-Pose  $\mathbf{g}$ . Diese Relation wird dann eindeutig, wenn im Gleichungssystem  $\mathbf{g}$  mindestens für eine Kalibrierenaufnahme festgesetzt wird.

Der zweite Ansatz ist die *Kalibrierung an einem Referenzmesssystem*. Hier wird die Kalibrierung auf der Basis eines zweiten Messsystems durchgeführt, das zu jeder Kalibrierenaufnahme des CPMS die eingenommene Mess-Pose erfasst.

Durch den Verzicht auf Referenzzielmarken entsteht trotz der Vorgabe der Kalibrier-Posen  $\mathbf{g}$  ein Freiheitsgrad im Gleichungssystem. Dieser kann durch Festlegung der Kamera-Pose  $\mathbf{e}_1$  relativ zur Pose  $\mathbf{g}$  jedoch leicht eliminiert werden.

Abbildung 88 b) zeigt dieses Prinzip am Beispiel der Kalibrierung am Roboter-messsystem. Durch die Kalibrierung liegt das SKS des CPMS im TCP des Roboters und bei einer späteren Messung wird die Mess-Pose  $\mathbf{g}$  in Roboterkoordinaten vorliegen. Da am Roboter kalibriert wird besteht kein (direkter) Bezug zu einem WKS. Die Richtigkeit des CPMS kann damit die des Roboters nicht übersteigen. Die Präzision des CPMS bleibt jedoch bestehen. Auch ist die Richtigkeit des CPMS nicht von Veränderungen der Robotergeometrie betroffen, sofern diese erst nach der Kalibrierung eintreten. Das CPMS misst damit z.B. unabhängig von Prozesskräften oder thermischer Verwindung des Roboters. Weiter ist bei dieser Kalibriervariante die Installation des Systems durch den Verzicht auf explizit einzumessende Referenzmarken weniger

---

<sup>193</sup> Vgl. Daniilidis (1996)

aufwendig. Auch kann die Anordnungsichte der Marken reduziert werden, da keine Verknüpfungsbilder zu Referenzmarken benötigt werden (vgl. Kap. 7.6.8).

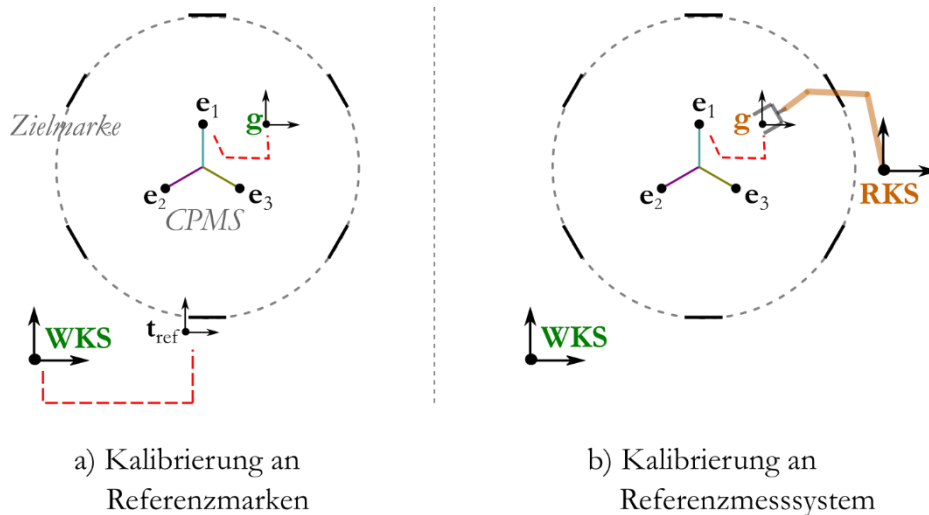


Abbildung 88: Prinzip a) der Kalibrierung an Referenztargets und b) der Kalibrierung an einem Referenzmesssystem.

Es kann festgehalten werden, dass beide Verfahren je nach Anwendung Vorteile bringen. Die Kalibrierung an Referenz-Marken fordert eine wesentlich höhere Zielmarken-Dichte und die Einmessung einiger Referenz-Marken. Bei präziser Einmessung erzielt ein solches System hohe Richtigkeit und Präzision. Ortsänderungen der Stütz-Zielmarken (z.B. durch thermischen Verzug) können im Betrieb nachkalibriert werden, sofern die Referenzmarken durch geeignete Montage stabil bleiben (vgl. Kap. 7.6.8).

Die Kalibrierung an einem Referenzmesssystem fordert eine geringere Anordnungsichte der Zielmarken und spart damit Installationsaufwand. Die Einmessung von Referenz-Marken entfällt gänzlich. Zur Definition eines Koordinatensystems für die spätere Messung, müssen jedoch in der Kalibrierphase zu jeder Kalibrieraufnahme, beispielsweise durch ein zweites Messsystem, Referenz-Posen gegeben werden (vgl. Kap. 7.6.10).

### 7.6.6 Aufstellung des Gleichungssystems

Die Vorgehensweise bei der Aufstellung eines nicht-linearen Optimierungsproblems zur Ermittlung der Systemparameter ist der einer Pose-Messung (vgl. Kap. 7.2) ähnlich. Der Unterschied liegt darin, dass neben der zu messenden Systempose  $g$  weitere Parameter, wie z.B. Kamera- und Zielmarken-Posen zur Optimierung freigegeben werden.

Angelehnt an Gl. (7.16) lässt sich das entsprechende Optimierungsproblem mittels des Abbildungsmodells  $\hat{\mathbf{f}}$  und des Beobachtungsvektors  $\hat{\mathbf{u}}$  für einen (zu optimierenden) Parametervektor  $\mathbf{p}$  und einen Konstantenvektor  $\mathbf{c}$  allgemein formulieren als:

$$\|\hat{\mathbf{f}}(\mathbf{p}, \mathbf{c}) - \hat{\mathbf{u}}\|_2^2 \rightarrow \min! \quad (7.44)$$

Welche Parameter optimiert werden und welche konstant bleiben, hängt vom eingesetzten Kalibrierverfahren und der Anzahl gegebener Referenzmarken bzw. Referenz-Posen ab. Tabelle 18 zeigt die Minimalkonfiguration für a) eine Kalibrierung an Referenzmarken und b) eine Kalibrierung an einem Referenzmesssystem. c) zeigt die Vorkalibrierung der Kamera-Posen an einem Kalibrierplatz mit bereits eingemessenen Zielmarken und Montage des CPMS an einem Referenzmesssystem. Sind weitere Informationen über das System bekannt, können diese als Konstanten im Gleichungssystem ergänzt werden.

Zur Lösung des Optimierungsproblems mittels des Levenberg-Marquardt-Algorithmus (vgl. Kap. 7.2.2) werden in Form einer Jakobimatrix Ableitungen nach allen unbekanntem Parametern  $\mathbf{p}$  der Modellfunktion  $\hat{\mathbf{f}}$  bereitgestellt (vgl. Kap. 7.2.5).

Tabelle 18: Festsetzung ausgewählter Systemparameter bei a) Kalibrierung an Referenzmarken, b) Kalibrierung an Referenzmesssystem und c) Vorkalibrierung der Kamera-Posen.

Freie Parameter	$\mathbf{p}=[\dots]$	$\mathbf{c}=[\dots]$	Fixierte Parameter
a) $\mathbf{e}, \mathbf{g}, \mathbf{t}$	$[\mathbf{e}_{2..b}, \mathbf{g}_{1..K}, \mathbf{t}_{2..J}]$	$[\mathbf{e}_1, \mathbf{t}_1 = \mathbf{t}_{\text{ref}}]$	Kamera 1 und ein oder mehrere Referenzmarken.
b) $\mathbf{e}, \mathbf{t}$	$[\mathbf{e}_{2..b}, \mathbf{t}_{1..J}]$	$[\mathbf{e}_1, \mathbf{g}_{1..K}]$	Kamera 1 und alle System-Posen.
c) $\mathbf{e}$	$[\mathbf{e}_{1..J}]$	$[\mathbf{g}_{1..K}, \mathbf{t}_{1..J}]$	Alle System- und Zielmarken-Posen.

### 7.6.7 Bereitstellung von Startwerten

Da die Systemkalibration eine nicht-lineare Optimierung darstellt, müssen für die gesuchten Parameter, beispielsweise die Posen der Zielmarken im Raum, Startwerte bereitgestellt werden. Im Rahmen der vorgestellten Simulationen werden die korrekten Systemparameter in einer Größenordnung um 2% verfälscht und als Startwerte eingesetzt. Das Verfahren akzeptiert deutlich ungenauere Startwerte, die jedoch den Berechnungsaufwand bei gleichem Simulationsergebnis erhöhen.

In einer realen Implementierung eines CPMS sind Startwerte der Kamera-Posen  $\mathbf{e}$  aus den Konstruktionsdaten zu entnehmen. Ein Startwert für die Systempose  $\mathbf{g}$  kann z.B. unter Zuhilfenahme des Trägerroboter-Messsystems ermittelt werden.

Etwas schwieriger gestaltet sich die Schätzung von Startwerten für die Zielmarken-Posen  $\mathbf{t}$ , sofern diese beliebig im Raum platziert wurden. Die Zielmarken können z.B. mit konventionellen Messmitteln grob eingemessen werden. Sind Startwerte für  $\mathbf{e}$  und  $\mathbf{g}$  bekannt und ist das CPMS auf einem Trägerroboter montiert, so besteht eine sehr elegante Möglichkeit die Zielmarken zu vermessen. Dazu wird eine Marke mittels einer der CPMS-Kameras aufgenommen. Anschließend kann ihre Pose im Robotersystem durch Berechnung des *photogrammetrischen Rückwärtsschnittes*<sup>194</sup> bestimmt werden. Diese Methode ist zwar ungenau, genügt aber für die Startwertermittlung.

### 7.6.8 Erzielbare Richtigkeit & Präzision bei der Kalibrierung an Referenzmarken

Im Folgenden wird, auf Grundlage des in Kap. 7.6.2 beschriebenen Beispiel-CPMS, zunächst eine Kalibrierung an Referenzmarken und eine anschließende Test-Messung simuliert und auf die erzielbare Richtigkeit und Präzision untersucht.

Die Simulation wird unter Variation einiger Randbedingungen, wie z.B. der Zahl der Referenzmarken oder der Anordnung der Zielmarken, mehrfach wiederholt, um das Verhalten des CPMS zu analysieren.

Zur Evaluation der Kalibrierung an Referenzmarken werden 26 Kalibrier-Posen nach dem in Abbildung 86 gezeigten Schema angefahren und Kalibrieraufnahmen mit dem bekannten Bildmessfehler der Kamera simuliert. Zunächst werden fünf der insgesamt 76 Zielmarken als Referenzmarken festgelegt. Ihre Posen sind bekannt und definieren das Weltkoordinatensystem.

Im Laufe der Kalibrierung werden auch alle anderen Zielmarken mit dem WKS registriert. Damit ein gut konditioniertes Gleichungssystem entsteht, muss wie in Abbildung 89 gezeigt jede Zielmarke über ein oder mehrere Verknüpfungsbilder mit einer der Referenzmarken in Verbindung stehen. Aufnahmen wie in (d) gezeigt, sind zu vermeiden, da die Pose von Zielmarke (5) hier weder direkt noch indirekt über Zwischenbilder mit einer Referenzmarke in Verbindung steht (vgl. Kap. 7.6.7).

---

<sup>194</sup> Vgl. Süsse (2014, 377)

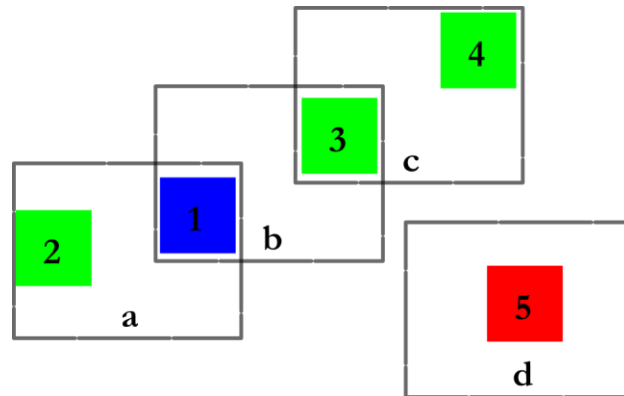


Abbildung 89: Registrierung von Zielmarken ausgehend von einer Referenzmarke 1 durch überlappende Aufnahme der Bilder a-c. Marke 5 wird aufgrund fehlender Überlappung von Bild d nicht registriert.

Eine bewährte Methode ist es, die Anzahl und Lage der Kalibrier-Posen so zu wählen, dass jede Zielmarke eines Rings mindestens einmal zentral zusammen mit ihren unmittelbaren Nachbarn abgebildet wird. Da jeder der drei Ringe aus 26 Zielmarken besteht und eine Kamera in ihrem vertikalen Bildfeld alle drei Ringe erfassen kann, folgen daraus 26 Kalibrier-Posen.

Zur Einschätzung der erreichbaren Messunsicherheit ist die Lage des SKS frei wählbar und wird mit Kamera 1 zusammengelegt (vgl. Kap. 7.6.5). Anschließend wird der Kalibrierprozess simuliert.

Abbildung 90 zeigt die Richtigkeit der kalibrierten Systemparameter im Vergleich zu ihren korrekten Werten. Die hellblauen Balken zeigen die Winkel-, die dunkelblauen die Positionsfehler. Das obere Diagramm zeigt den Fehler der Kamera-Posen, das mittlere den Fehler der Kalibrier-Posen und das untere den Fehler der Zielmarken-Posen nach der in Kap. 7.6.1 festgelegten Definition. Die Werte  $\bar{\epsilon}_\phi$  und  $\bar{\epsilon}_{xyz}$  repräsentieren den mittleren absoluten Fehler über alle Posen des jeweiligen Typs. Der Kalibrierfehler von Kamera 1 beträgt erwartungsgemäß „Null“, da ihre Lage zum SKS fixiert wurde.

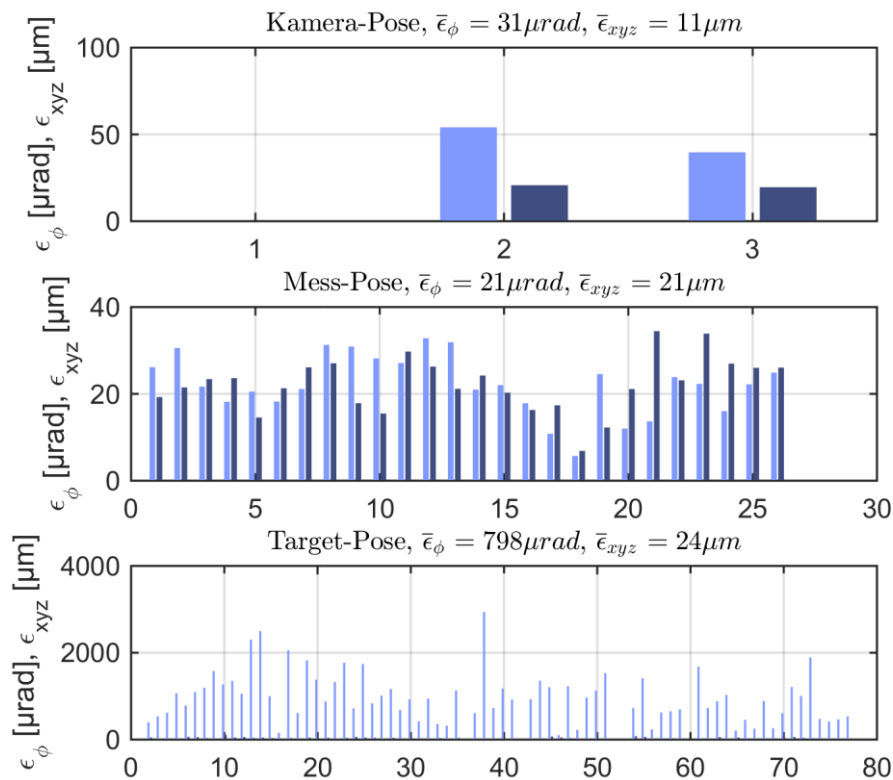


Abbildung 90: Kalibrierergebnis: Simultane Kalibrierung von Kamera-, System- und Target-Posen. Hellblaue Balken zeigen Winkelfehler, dunkelblaue Positionsfehler. Kalibriert wurden 3 Kameras (1. Zeile), 26 System-Posen (2. Zeile) und  $3 \times 26 = 78$  Zielmarken (3. Zeile). Es fällt auf, dass die Orientierung der Zielmarken nur ungenau bestimmt werden kann.

Der Kalibrierfehler der Kamera-Posen 2 und 3 als auch der Fehler der 26 Kalibrier-Mess-Posen liegen etwa auf gleicher Höhe und erscheinen plausibel. Einzig die Orientierung der Zielmarken unterliegt einem erheblichen Fehler. Dies ist dadurch zu erklären, dass bei dem gegebenen Kalibrierszenario der Höhenwinkel aus dem eine Zielmarke betrachtet wird nur wenig variiert werden kann. Eine Verkippung um die Horizontalachse der Zielmarke ist auf der abbildenden Kamera nur durch minimale Änderung der Perspektive zu erkennen und es entsteht ein schwer detektierbarer Freiheitsgrad (vgl. Kap. 7.3). Bei Mess-Szenarien, die eine Aufnahme der Zielmarken aus deutlich unterschiedlichen Höhenwinkeln erlauben, beispielsweise mit einem kugelförmigen Messvolumen, ist dieser Effekt nicht zu erkennen.

Für eine Messung, die innerhalb des Kalibriervolumens stattfindet, wirkt gerade der umgekehrte Effekt wie bei der Kalibrierung. Der Orientierungsfehler der Zielmarken hat nahezu keinen Einfluss auf die im Abbildungsmodell berechneten Bildko-

ordinaten. Damit ist auch der Einfluss auf die Messung gering: Würde das Kalibrier-volumen kleiner als das spätere Messvolumen, so würde sich der Effekt nicht mehr aufheben und eine reduzierte Richtigkeit des CPMS bewirken.

Um sicher zu stellen, dass auch System-Posen außerhalb der Menge der Kalibrier-Posen korrekt gemessen werden, wird die Richtigkeit und Präzision des CPMS an einer Reihe (hier 52) zufällig gewählter und im gesamten Messvolumen verteilter Test-Posen überprüft (vgl. Kap. 7.6.3).

Das Ergebnis dieser Auswertung zeigt Abbildung 91. Die mit dem gewählten Kameratyp in der Beispielmessanwendung erreichbare absolute Richtigkeit variiert abhängig von der Mess-Pose zwischen etwa 10-40 $\mu\text{m}$  und liegt im Mittel bei etwa 20 $\mu\text{m}$ . Die Präzision liegt im Mittel bei einer Standardabweichung von 8 $\mu\text{m}$  und deckt sich mit der Fehlerschätzung durch die Singulärwertanalyse der Jakobimatrix (vgl. Kap. 7.5.3). Der Orientierungsfehler der Zielmarken wirkt sich wie erwartet nicht auf die Messung aus.

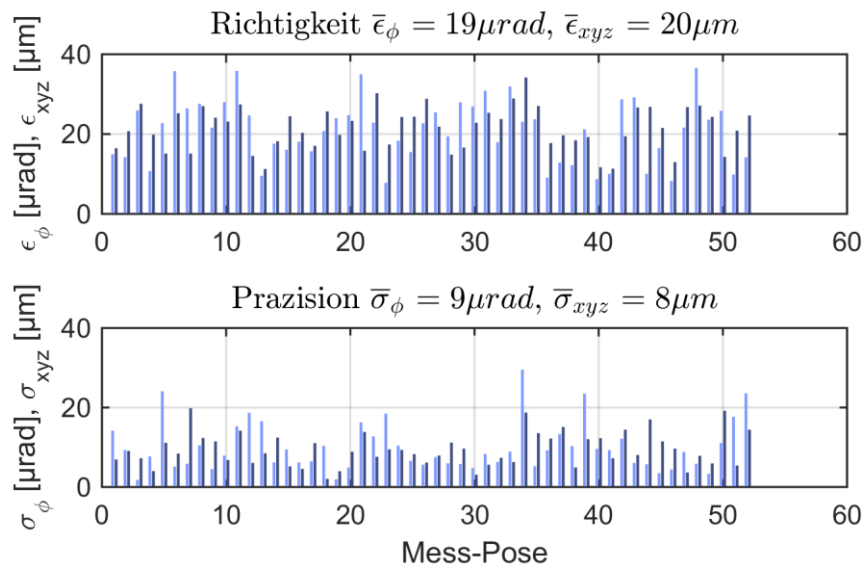


Abbildung 91: Richtigkeit und Präzision des CPMS über 52 Test-Messungen aus zufällig gewählten 6D-Posen.

Für die Analyse einer CPMS-Konfiguration können noch weitere Aspekte von Interesse sein. Beispielsweise wird bei der Planung eines CPMS zwangsläufig die Frage aufkommen, wie viele Referenzmarken eingesetzt werden müssen, um eine gewünschte Richtigkeit zu erzielen. Für solche und ähnliche Fragestellungen wurde im Simulations-Framework eine Stapelverarbeitung implementiert, mit der Simulationsreihen unter Variierung von Konfigurations-Parametern erstellt und ausgewertet werden können.

Abbildung 92 zeigt die erreichbare Richtigkeit (blaue Balken) und Präzision (grüne Balken) für eine Anzahl von zwei, drei, fünf und neun Referenz-Marken. Wie



zu erwarten, ist gut zu erkennen, dass zwei Referenzmarken nicht ausreichen, um ein stabiles Koordinatensystem zu definieren. Eine Rotation um die Verbindungsachse der beiden Marken kann im Kalibrierprozess nur schwer erkannt werden, so dass dieser Freiheitsgrad sinnvollerweise durch eine dritte Marke „blockiert“ wird. Für das Beispiel-CPMS kann mit drei-fünf Referenzmarken schon eine gute Richtigkeit erreicht werden. Ab neun Referenzmarken kommt die Richtigkeit bereits in den Bereich der Präzision und eine weitere Steigerung bringt aufgrund des Messrauschens kaum mehr Vorteile. Auf die Präzision hat die Anzahl der Referenzmarken keinen Einfluss.

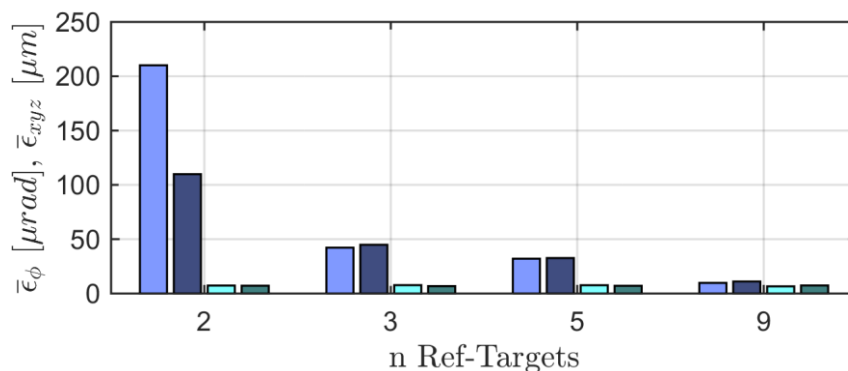


Abbildung 92: Entwicklung von Richtigkeit (blau) & Präzision (grün) in Abhängigkeit von der Anzahl der eingesetzten Referenz-Marken.

In vielen Messanwendungen besteht der Wunsch, das Koordinatensystem zu verschieben, beispielsweise in den TCP des Trägerroboters (Hand-Auge-Transformation). Dazu genügt es für ein oder mehrere Kalibrieraufnahmen die Roboter-Posen als System-Pose  $\mathbf{g}$  in den Kalibrierprozess einzugeben. Das SKS des CPMS fällt dann mit dem Roboterkoordinatensystem zusammen. Nach gleicher Methode kann auch das System eines weiteren Sensors wie z.B. eines Laserscanners eingeführt werden.

Die Anordnungsweise der Zielmarken beeinflusst Richtigkeit und Präzision kaum, solange die geforderte Markendichte nicht unterschritten wird. Wird statt der ringförmigen eine kastenförmige Anordnung gewählt, folgt für das Beispiel eine minimal reduzierte Richtigkeit (vgl. Tabelle 19).

### 7.6.9 Erzielbare Richtigkeit & Präzision bei Einsatz einer Referenzplatte

Das Einmessen einzelner Referenzmarken mittels alternativer Methoden (beispielsweise durch antasten mit einer Koordinatenmessmaschine) ist aufwendig. Eine Alternative zur Einzel-Einmessung ist die Anfertigung einer Referenzplatte aus einem ebenen thermostabilen Material (z.B. Glaskeramik) auf die eine Matrix aus Zielmarken mit

bekannter Position und Ausrichtung aufgebracht werden kann. Ausreichende Kantenlänge vorausgesetzt, definiert eine solche Platte ein dauerhaft stabiles Weltkoordinatensystem. Jedoch ist zunächst unklar, wie sich diese Herangehensweise auf die Richtigkeit eines CPMS auswirkt, da hier alle verfügbaren Referenzmarken auf einem kleinen Raum konzentriert werden, wodurch die Erkennung der Orientierung des Weltkoordinatensystems erschwert wird.

Um dies zu überprüfen, wird eine erneute Simulation durchgeführt, bei der anstelle der fünf räumlich verteilten Referenzmarken eine Referenzplatte bestehend aus 3x3 Marken auf einer Fläche von  $(0,4 \times 0,4) \text{m}^2$  eingesetzt wird. Das Ergebnis ist eine um etwa einen Faktor 3 reduzierte Richtigkeit des CPMS von  $\bar{\epsilon}_\phi = 55 \mu\text{rad}$  und  $\bar{\epsilon}_{xyz} = 34 \mu\text{m}$ . Eine Verdopplung der Plattenbreite führt mit  $\bar{\epsilon}_\phi = 49 \mu\text{rad}$  und  $\bar{\epsilon}_{xyz} = 23 \mu\text{m}$  zu einer Verbesserung, was aber (relativ zum Messvolumen) mit erheblichen Ausmaßen der Referenzplatte von  $(0,8 \times 0,4) \text{m}^2$  erkauft wird. In Anbetracht der einfachen Anwendung und hohen Dauerstabilität ist die Referenzplatte dennoch eine interessante Lösung.

#### 7.6.10 Erzielbare Richtigkeit & Präzision bei der Kalibrierung an einem Referenzmesssystem

Steht zur Kalibrierung eines CPMS ein Referenzmesssystem zur Verfügung, mit dem die für eine Kalibrieraufnahme eingenommene Pose bestimmt wird, so kann auf Referenzmarken und Verknüpfungsbilder (vgl. Abbildung 89) verzichtet werden. Dadurch vereinfacht sich der Kalibrieraufbau, weil keine Referenzmarken eingemessen werden müssen und die Anordnungsdichte der restlichen Zielmarken deutlich reduziert werden kann.

Um die Beispielkonfiguration aus Kap. 7.6.2 auf das vereinfachte Verfahren der Kalibrierung an einem Referenzmesssystem umzustellen, wird zunächst die Zielmarkendichte nach Gl. (7.43) neu berechnet. Da keine Verknüpfungsbilder mehr erforderlich sind, wird nur mehr die Abbildung mindestens einer Zielmarke pro Kamerabild gefordert. Damit reduziert sich die Anzahl der Zielmarken für das gleiche Messvolumen von 76 auf nur mehr 28. Damit einher geht eine Reduktion der Zahl der Kalibrierposen von 26 auf 14. Die neue Konfiguration zeigt Abbildung 93. Es verbleiben zwei Ebenen à 19 Zielmarken.

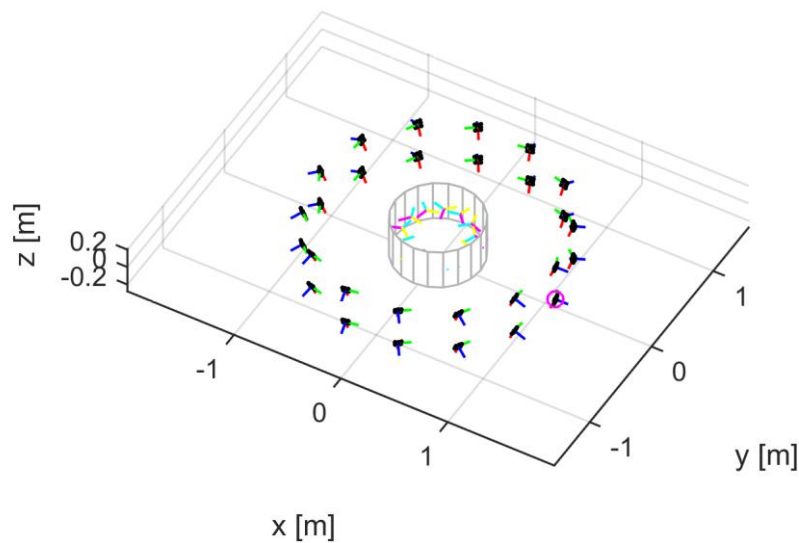


Abbildung 93: Reduzierte CPMS-Konfiguration mit 28 Zielmarken (statt 78) zur Kalibrierung am Roboter-Messsystem oder einem Referenz-Messsystem.

Die durch ein Referenzmesssystem bekannten Kalibrier-Posen  $\mathbf{g}_{1...14}$  werden als Konstanten in das Kalibrierverfahren eingegeben. Anschließend wird der Kalibrierprozess simuliert.

Abbildung 94 zeigt die bei einer Serie aus 52 Testmessungen erzielte Richtigkeit und Präzision der Anordnung. Zunächst fällt auf, dass die erzielbare Richtigkeit dieser reduzierten Konfiguration mit einem mittleren Fehler von etwa  $11\mu\text{m}$  diejenige bei der Kalibrierung an Referenzmarken ( $20\mu\text{m}$  vgl. Kap. 7.6.8) übertrifft.

Dies resultiert daraus, dass bei einer Kalibrierung an Referenzmarken (durch die Verknüpfungsbilder zwischen Referenz- und Zwischenmarken) Transformationsketten ausgebildet werden, in denen sich Fehler aufsummieren können. Der Ansatz der Kalibrierung an bekannten Kalibrier-Posen vermeidet dieses Problem. Jedoch wird auch hier die erzielbare Richtigkeit durch das eingesetzte Referenzmesssystem begrenzt.

Die Präzision fällt hier mit etwa  $13\mu\text{m}$  im Vergleich zur Referenzmarken-Methode ( $8\mu\text{m}$ ) niedriger aus. Die Gründe sind statistischer Natur. Durch die geringere Zielmarkendichte stehen in jedem einzelnen Kamerabild weniger Referenzpunkte zur Verfügung. Entsprechend fällt das Positionsrauschen der einzelnen Punktabbildung im photogrammetrischen Abbildungsmodell stärker ins Gewicht und führt zu erhöhtem Messrauschen (vgl. auch Kap. 7.6.12).

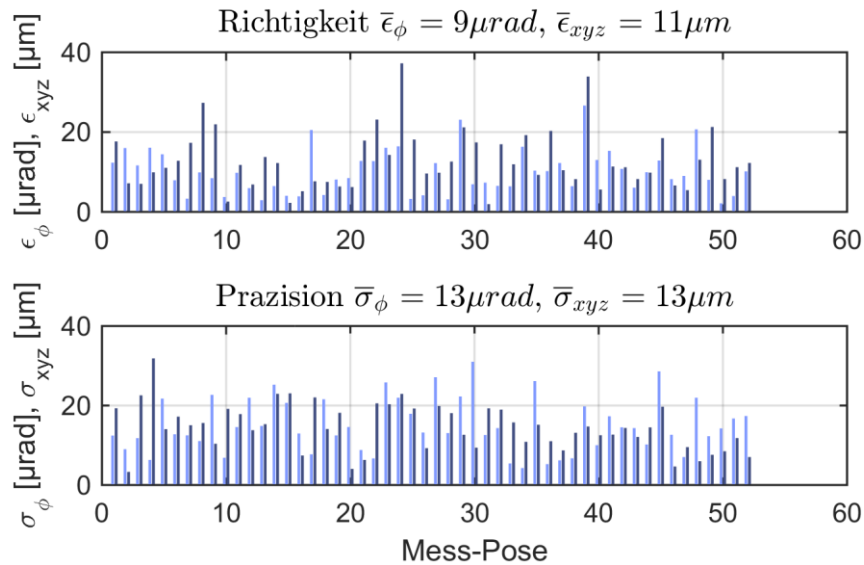


Abbildung 94: Richtigkeit und Präzision des reduzierten CPMS. Die angegebene Richtigkeit gilt in Bezug auf das angewendete Referenz-Messsystem.

### 7.6.11 Vorkalibrierung der Kameraposen

Während die Bestimmung der Target-Posen  $\mathbf{t}$  nur am Aufstellplatz des CPMS erfolgen kann, ist es möglich eine Vorkalibrierung der Kamera-Posen  $\mathbf{e}$  an einen Kalibrierplatz auszulagern: An diesem können durch fest installierte eingemessene Zielmarken und Bereitstellung einer präzisen Positioniereinheit optimale Bedingungen geschaffen werden. Durch die hochwertigere Vorkalibrierung der Kamera-Posen  $\mathbf{e}$  steigt die Güte der Hauptkalibrierung. Zugleich sinkt deren Komplexität durch eine niedrigere Zahl zu optimierender Parameter.

Da am Kalibrierplatz die Target-Posen  $\mathbf{t}$  bekannt sind und die System-Pose  $\mathbf{g}$  durch die Positioniereinheit vorgegeben wird, gehen nur die Kamera-Posen  $\mathbf{e}_1$ - $\mathbf{e}_l$  in das Gleichungssystem ein. Die Lage des SKS fällt durch die vorgegebene System-Pose  $\mathbf{g}$  mit dem Koordinatensystem des Referenz-Messsystems zusammen. Damit das SKS die so definierte Lage behält ist eine Passmontage des Kamerakopfes an der Kalibrier- vorrichtung als auch später am Roboter vorzusehen.

Die Güte der Vorkalibrierung hängt von der Wahl der Kalibrier-Posen ab, welche die Konditionierung des Gleichungssystems beeinflussen. Mit dem in Kap. 7.4 vorgestellten Verfahren zur Fehleranalyse kann für eine gegebene Kalibrieranordnung die Fortpflanzung des bekannten Bildfehlers  $\sigma_l$  in einen Fehler einer Kamera-Pose  $\mathbf{e}$  geschätzt werden. Den Zusammenhang zwischen Bildkoordinaten und Posen beschreibt auch hier die Jakobimatrix. So wird eine Bewertung und Optimierung der Anordnung durch Simulation der Kalibrierung ermöglicht.

Der Positioniereinheit kommt die Aufgabe zu, den Messkopf zwecks Anfertigung von Kalibrieraufnahmen im Kalibriervolumen zu positionieren und zugleich mit hoher Genauigkeit die eingenommene Pose zu erfassen. Aufwand und Kosten eines solchen Systems hängen u.A. von der Anzahl der Freiheitsgrade und von der Art der Achsen ab. Eine präzise Linearachse mit Spindeltrieb und Maßstäben verursacht hier höhere Kosten als eine Rotationsachse mit angeflanschem Präzisionsdrehgeber.

Im Rahmen von Simulationen wurde hierzu zunächst ermittelt, in welchen Freiheitsgraden der Messkopf verfahren werden muss, um ein gut konditioniertes Gleichungssystem zu erhalten. Ähnlich wie bei der Design-Optimierung des Mehrkamerakopfes wurde hierzu die dem Gleichungssystem zugrunde liegende Jakobimatrix in ihre Singulärwerte und  $-$ Vektoren zerlegt.

Als Ergebnis werden zwei unterschiedliche Verfahrensmuster mit jeweils zwei Freiheitsgraden vorgeschlagen, wobei das erste auf Basis eines X/Y-Lineartisches und das andere mit Rotationsachsen umgesetzt werden kann.

Abbildung 95 zeigt die Positionierung mittels eines 2-Achsen-Lineartisches, der ein Verfahren in der X/Y-Ebene zulässt. Zur Anfertigung der Kalibrieraufnahmen wird eine Reihe von Posen auf einem planem Raster angefahren. Eine Kamera muss in jeder Kalibrier-Pose eine Zielmarke observieren können. Um dies zu erreichen, werden mehrere Marken auf einer Linie senkrecht zur optischen Achse angeordnet. Die Größe des Rasters wird durch die minimale Gegenstandsweite  $g_{min}$  bedingt, welche aufgrund der begrenzten Schärfentiefe nicht unterschritten werden darf. Eine Verkleinerung darüber hinaus verschlechtert das Kalibrier-Ergebnis.

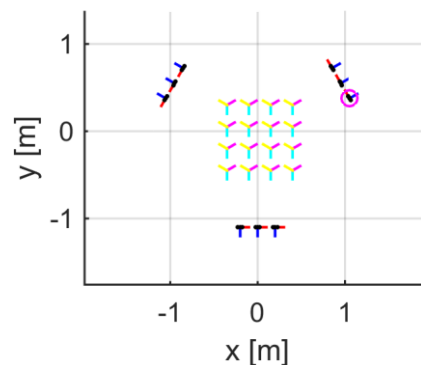


Abbildung 95: Vorkalibrierung der Kamera-Posen  $\mathbf{e}$  mittels eines X/Y-Lineartisches als Positioniereinheit und Referenzsystem.

Abbildung 96 zeigt den alternativen Lösungsansatz, bei dem die Kalibrier-Posen mittels zweier Rotationsachsen  $\alpha$  und  $\beta$  erzeugt werden. Die Armlänge  $r$  der ersten Achse wird gerade so gewählt, dass die minimale Gegenstandsweite  $g_{min}$  nicht unter-

schritten wird. Durch die mit  $\beta = -2\alpha$  gegenläufig rotierende zweite Achse wird bewirkt, dass der mögliche Entfernungsbereich zwischen Kameras und Targets voll ausgeschöpft wird.

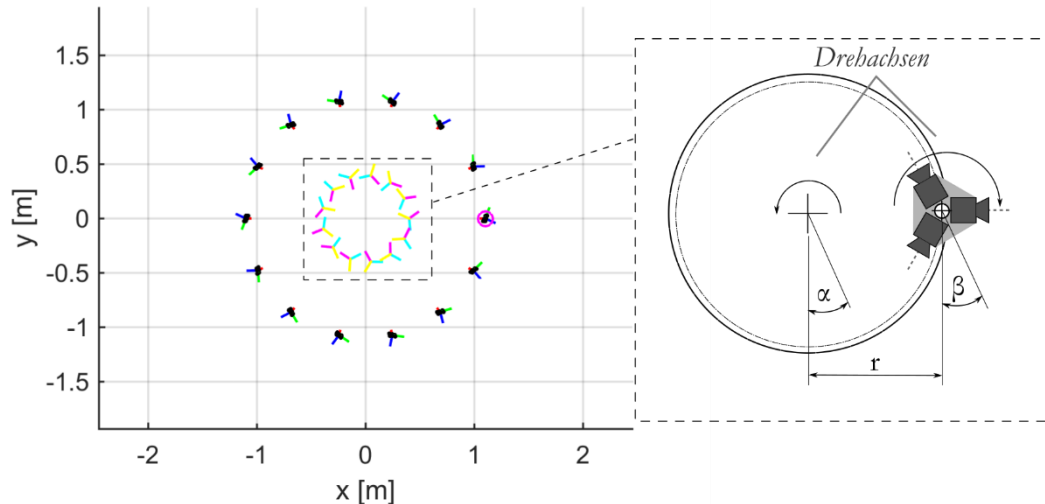


Abbildung 96: Vorkalibrierung der Kamera-Posen  $\mathbf{e}$  mittels zweier Rotationsachsen  $\alpha$  und  $\beta$ .

Beide Ansätze liefern ähnliche Kalibriergüte. Beim zweiten Ansatz kann die kreisförmige Zielmarken-Anordnung zwecks einfacherer Konstruktion auch als 8- oder 4-Eck ausgeführt werden.

Eine Vorkalibrierung mit jeweils 16 Kalibrier-Posen für das in Kap. 7.6.2 beschriebene Beispiel-CPMS liefert für die Kamera-Posen  $\mathbf{e}$  eine Richtigkeit von etwa  $12\mu\text{m}$ . Dies entspricht gegenüber der Simultankalibrierung (vgl. Kap. 7.6.8) einer Verbesserung um etwa den Faktor 3.

Der Kalibrierfehler kann durch eine bessere Statistik weiter gesenkt werden. Maßgeblich ist hier die Anzahl der erfassten Referenz-Punkt-Abbildungen. Deren Anzahl kann durch Erhöhung der Zahl der Kalibrier-Posen, der Zielmarkendichte oder der Referenzpunktzahl der Marken gesteigert werden. Eine Erhöhung der Kalibrier-Posen-Anzahl bietet sich an, da hierfür kein zusätzlicher Hardware-Aufwand betrieben werden muss. Aufgrund des statistischen Zusammenhangs bewirkt die vierfache Anzahl gerade eine Halbierung des Kalibrierfehlers. Fehler der Positioniereinheit und der Zielmarken-Positionen werden in der Simulation nicht betrachtet.

Zuletzt stellt sich die Frage, wie sich die Vorkalibrierung der Kamera-Posen auf die erzielbare Richtigkeit und Präzision eines so kalibrierten CPMS auswirkt. Dazu werden die Kalibrierung an Referenzmarken und die Kalibrierung am Referenzmesssystem (vgl., Kap. 7.6.8, Kap. 7.6.10) erneut simuliert. Diesmal werden die Kamera-

Posen  $\mathbf{e}$  jedoch als bekannt angenommen und aus dem Optimierungsverfahren ausgeschlossen. Dies entspräche einer „perfekten“ fehlerfreien Vorkalibrierung.

Die Simulation zeigt eine deutliche Verbesserung der Richtigkeit bei der Kalibrierung an Referenzmarken von  $\bar{\varepsilon}_\phi = 19\mu\text{rad}$  /  $\bar{\varepsilon}_{xyz} = 20\mu\text{m}$  auf  $6\mu\text{rad}/7\mu\text{m}$ . Dies entspricht etwa einem Faktor 3. Bei der Kalibrierung am Referenzmesssystem zeigt sich dagegen nur eine unwesentliche Verbesserung. Auf die Präzision eines CPMS hat die Vorkalibrierung keinen Einfluss.

Eine Vorkalibrierung der Kamera-Posen an einem dafür eingerichteten Kalibrierplatz ist dann sinnvoll, wenn die Vollkalibrierung des CPMS am späteren Einsatzort an Referenzmarken stattfindet und gleichzeitig hohe Richtigkeit angestrebt wird. Es kann derjenige Konstruktionsansatz gewählt werden, der bei gegebener Größe und Anforderung an die Richtigkeit des CPMS einfacher realisiert werden kann.

### 7.6.12 Weitere Einflussfaktoren

Neben dem bereits besprochenen gibt es noch einige weitere Faktoren, die die erzielbare Richtigkeit und Präzision eines CPMS beeinflussen. Diese werden hier kurz aufgeführt und bewertet.

Wird bei sonst gleicher Konfiguration eines CPMS die Anzahl der Zielpunkte  $N_T$  einer Zielmarke erhöht, so ist im Ergebnis eine Steigerung der Richtigkeit und Präzision zu erkennen. Die Verbesserung ist proportional zur Wurzel der Zielpunktzahl  $N_T$ . Der gleiche Zusammenhang ist bei Steigerung der Zielmarkenzahl (und damit Zielmarkendichte) und der Steigerung der Zahl der Kalibrieraufnahmen zu beobachten. Alle drei Faktoren steigern letztlich die Anzahl der Zielpunkt-Beobachtungen im zu lösenden Gleichungssystem und vergrößern damit die zugrunde liegende Datenmenge. Dies führt zu einem verbesserten Kalibrierergebnis (genauere Bestimmung der Systemparameter), als auch zu verbesserten Messergebnissen aufgrund der statistischen Vermittlung vieler Daten.

Die Berechnungsdauer steigt in der Simulation proportional zur Anzahl der Zielpunktabbildungen. Der überwiegende Aufwand von ca. 88% fällt auf die Lösung des Gleichungssystems mittels Levenberg-Marquard-Algorithmus (vgl. 7.2.2). Dass die Komplexität der Berechnung mit  $O(n)$  steigt und nicht mit  $O(n^3)$  wie für den Algorithmus üblich, ist auf die äußerst dünn besetzte Koeffizientenmatrix des Gleichungssystems zurück zu führen.

Wird die Objektivbrennweite  $f$  der Kameras erhöht, so steigt proportional die Abbildungsvergrößerung und damit die optische Auflösung einer Kamera. Intuitiv wäre anzunehmen, dass sich entsprechend Richtigkeit und Präzision eines CPMS erhöhen. Dieser Effekt ist in der Simulation jedoch nicht zu beobachten. Vielmehr bleibt das Ergebnis nahezu konstant. Die Erklärung liefert wieder die Statistik. Eine Kamera mit niedriger Brennweite hat ein größeres Bildfeld und sieht damit mehr Zielmarken als eine Kamera mit größerer Brennweite. Bei einer flächenhaften Markenordnung steigt dabei die Anzahl der beobachteten Zielpunkte quadratisch an. Damit heben sich

die Reduktion der Auflösung und die verbesserte Vermittlung durch die Steigerung der Datenmenge gerade auf.

Aus den obigen Erkenntnissen ist abzuleiten, dass ein System mit weitwinkligen Kameras kurzer Brennweite und wenigen Zielmarken (mit dafür vielen Zielpunkten) ähnlich leistungsstark sein kann, wie ein aufwendigeres System mit vielen Zielmarken. Ein weiterer Vorteil wäre, dass bei der größeren Zahl der gleichzeitig beobachteten Zielmarken die Wahrscheinlichkeit der Verdeckung durch störende Objekte im Arbeitsraum sinkt. Dem gegenüber stehen erhebliche Nachteile, wie die mit sinkender Brennweite quadratisch ansteigende Datenmenge die den Berechnungsaufwand steigert. Auch können mit statistischen Methoden nur statistische Fehler eliminiert werden, während evtl. bei realen Systemen vorhandene systematische Fehler bestehen bleiben.

Wird beim Beispiel-CPMS aus Kap. 7.6.2 bei gleichem Messvolumen der Ringradius der Zielmarken-Anordnung vergrößert, so bleiben Richtigkeit und Präzision in der Simulation weitgehend erhalten. Erneut kann die Erklärung aus obigen Erkenntnissen abgeleitet werden. Eine Verdopplung des Zielmarkenabstandes führt zur Halbierung der Abbildungsgröße und hat damit den gleichen Effekt wie die Halbierung der Brennweite. Damit wächst unter größerem Abstand die Zahl der Zielpunktbeobachtungen quadratisch an und die Genauigkeit bleibt erhalten. Allerdings ist dies mit erheblich gesteigertem Rechenaufwand zu bezahlen.

Zuletzt wurden die Abmessungen der Zielmarken variiert. Dies hat in der Simulation erwartungsgemäß keinen Effekt auf Richtigkeit und Präzision. Bei einem 1-Kamera-Posesensor wäre dies anders, da hier z.B. die Orientierung des Sensors zur Marke aus deren perspektivischer Verzerrung abgeleitet werden müsste, die bei größerer Marke (und Abbildung) besser zum Tragen käme. Beim vorgeschlagenen 3-Kamera-Sensor wird diese Orientierung durch „Verankerung“ an weiteren Marken mit der zweiten und dritten Kamera erzielt, so dass nur mehr die Anzahl der Zielpunkte, jedoch nicht mehr die Markengröße die Systemleistung beeinflussen (vgl. Kap. 7.5.6).

### 7.6.13 Gegenüberstellung der Kalibrierverfahren und ihrer Varianten

Die Kalibrierung an Referenzmarken generiert hohe Richtigkeit unter der Voraussetzung, dass eine geringe Anzahl genau vermessener Referenz-Zielmarken existiert (vgl. Kap. 7.6.8). In einer realen Messanwendung wird die Richtigkeit eines CPMS von der korrekten Einmessung der Referenzmarken und der damit verbundenen Definition des Weltkoordinatensystems beschränkt. Entsprechend sollte diesem Problem bei einem realen Aufbau besondere Sorgfalt gewidmet werden. Dazu gehört auch die mechanisch und thermisch stabile Installation der Referenzmarken. Durch den Einsatz einer Referenzplatte werden die Referenzmarken auf einem stabilen Substrat zusammengefasst, wobei die Richtigkeit des CPMS wegen der schlechteren räumlichen Verteilung sinkt (vgl. Tabelle 19).



Für Messanwendungen, bei denen es auf hohe Präzision, jedoch weniger auf Richtigkeit ankommt, können Referenzmarken entsprechend gröber vermessen und ihre Anzahl reduziert werden.

Da im laufenden Betrieb der Messanwendung weitere Kalibrieraufnahmen angefertigt werden können, lässt sich die Kalibrierung ständig nachführen. Die Richtigkeit kann also dauerhaft erhalten werden. Voraussetzung sind lediglich stabile Referenzmarken. Ein Driften der restlichen Zielmarken, beispielsweise durch thermische Ausdehnung, kann dagegen kompensiert werden.

Die Nachteile der Kalibrierung an Referenzmarken sind die relativ hohe Anordnungsichte der Zielmarken, die durch Verknüpfungsbilder bedingt wird (vgl. Abbildung 89). Auch die Einmessung der Referenzmarken mit zusätzlichen Messmitteln ist aufwendig.

Die Kalibrierung an einem Referenzmesssystem funktioniert mit deutlich geringerer Zielmarken-Dichte und benötigt keine eingemessenen Referenzmarken (vgl. Kap. 7.6.10). Stattdessen ist zur Kalibrierung ein Referenzmesssystem erforderlich dessen Genauigkeit hier die erzielbare Richtigkeit des CPMS beschränkt.

Die Methode zur Kalibrierung an einem Referenzmesssystem wird besonders einfach, wenn als Referenz das Messsystem des Trägerroboters eingesetzt wird. Das SKS des CPMS fällt dann automatisch mit dem TCP des Roboters zusammen. Der Nachteil ist hier, dass die Richtigkeit des CPMS diejenige des Roboters nicht übertreffen kann. Dennoch ist diese Variante für viele Anwendungen interessant, weil Präzision und Langzeitstabilität eines CPMS höher ausgelegt werden kann als bei einem Roboter, der durch seine serielle Kinematik benachteiligt ist. Ein einmal kalibriertes CPMS agiert dazu unabhängig vom Roboter messsystem und damit unabhängig von Änderungen der Robotergeometrie die durch thermische und dynamische Effekte beeinflusst wird. Auch ist eine Nachführung des Robotermodells denkbar.

Der Einfluss der Kalibrierung auf die Präzision eines CPMS ist bei beiden Kalibrierverfahren vernachlässigbar. Die erzielbare Präzision wird beschränkt durch den Bildmessfehler der Kameras, durch die Anzahl beobachteter Zielpunkte (vgl. Kap. 7.6.12) und nicht zuletzt durch die Kamerakonfiguration des CPMS (vgl. Kap. 6.4, 7.5). Eine Vorkalibration der Kamera-Posen an einem speziellen Kalibrierplatz steigert die Richtigkeit bei Kalibrierung an Referenzmarken (vgl. Kap. 7.6.11).

Tabelle 19 zeigt eine zusammenfassende Gegenüberstellung der Verfahrensweisen zur Kalibrierung und ihrer Varianten auf Grundlage des in Kap. 7.6.2 definierten Beispiel-CPMS.

Tabelle 19: Gegenüberstellung der erzielbaren Richtigkeit und Präzision bei Kalibrierung an Referenzmarken bzw. an einem Referenzmesssystem am Beispiel-CPMS (Kap. 7.6.2).

Verfahren	Variante	$\bar{\varepsilon}_d, \bar{\varepsilon}_{\text{vnr}}$ μrad/μm	$\bar{\sigma}_d, \bar{\sigma}_{\text{vnr}}$ μrad/μm	Anmerkung
Kalibrierung an Referenztargets	5 verteilte Referenzmarken	19 / 20	9 / 8	+ Nachkalibration im Betrieb möglich + hohe Richtigkeit im Bezug zu WKS - positionieren / einmessen von Referenzmarken nicht trivial
	Referenzplatte a) (0,4x0,4)m <sup>2</sup> b) (0,8x0,4)m <sup>2</sup>	a) 55 / 34 b) 49 / 23	9 / 8	+ vereinfachte Einmessung der Referenztargets und höhere Langzeitstabilität - reduzierte Richtigkeit
	Rechteckige statt kreisförmige Zielmarkenanordnung	22 / 21	9 / 8	Die Anordnungsweise der Zielmarke beeinflusst Richtigkeit & Präzision kaum, solange die geforderte Markendichte nicht unterschritten wird.
	Vorkalibrierung (→ e 100% korrekt)	6 / 7	9 / 8	+ deutliche Steigerung der Richtigkeit - Einrichtung eines Kalibrierplatzes
Kalibrierung an Referenzmesssystem (→ g 100% korrekt)	Referenzmesssystem (→ g 100% korrekt)	9 / 11 (abhängig Referenz)	13 / 13 (da weniger Zielpunkte)	+ Einfache Anwendung (da keine Referenzmarken) ~ Präzision sinkt, statistischer Effekt aber durch mehr Zielpunkt-Abbildungen kompensierbar - reduzierte Richtigkeit bei schlechtem Referenzmesssystem (z.B. Roboter-messsystem)
	4-fache Anzahl der Zielpunkt-Abbildungen	5 / 6	7 / 7	Die 4-fache Zahl an Zielpunkt-Abbildungen (z.B. 6x6 statt 3x3 Zielmarken) halbiert Richtigkeit und Präzision.

## 7.7 Kapitelzusammenfassung

Es wurde ein photogrammetrisches Abbildungsmodell erarbeitet, das die Beziehung zwischen der Messsystem-Pose  $\mathbf{g}$  (sowie den konstanten Systemparametern) und den von einem Mehrkameranasytem beobachteten Bildkoordinaten herstellt (vgl. Kap. 7.1). Zur Bestimmung freier Variablen dieses Modells (z.B. der System-Pose  $\mathbf{g}$ ), wurde ein

Softwaremodul implementiert, das auf Basis der Modellgrundgleichungen und der beobachteten Zielmarkenabbildungen ein komplexes nicht-lineares Gleichungssystem generiert. Zusätzlich wird die Matrix der partiellen Ableitungen (Jakobimatrix) erstellt. Das System wird unter Anwendung des Levenberg-Marquardt Algorithmus robust gelöst und die gesuchten Modellparameter bestimmt (vgl. Kap. 7.2).

Der Messfehler der Pose-Messung hängt, neben dem Bildmessfehler der eingesetzten Kamera, wesentlich von Anzahl und Anordnung der Kameras ab. Die Ursache sind schwer detektierbare Bewegungsrichtungen, bei denen ein Bildmessfehler in einen überproportional großen Pose-Fehler überführt wird (vgl. Kap. 7.3). Durch die Entwicklung eines Verfahrens zur Analyse der Jakobimatrix mittels der Singulärwertzerlegung wurden schwer detektierbare Bewegungen identifiziert und die Fehlerfortpflanzung zwischen Bild- und Pose-Fehler berechnet (vgl. Kap. 7.4). Für den Fall, dass mehrere solcher Bewegungen existieren, konnte gezeigt werden, dass diejenige, die den größten Pose-Fehler verursacht die Messgenauigkeit eines CPMS beschränkt (vgl. Kap. 7.4.4).

Auf der Grundlage dieser Erkenntnisse wurden eine Reihe möglicher Kamerakonfigurationen evaluiert und auf die erzielbare Messgenauigkeit hin optimiert. Es konnte gezeigt werden, dass bei 1- und 2-Kamera-Konfigurationen nicht alle schwer detektierbaren Bewegungen eliminiert werden können (vgl. Kap. 7.5.4) und für das Erzielen präziser Pose-Messungen mindestens drei Kameras eingesetzt werden müssen. Bei 3-Kamera-Systemen spielt weiter die Anordnung der Kameras eine große Rolle. Eine optimierte Kamerakonfiguration aus drei Kameras in einer ebenen sternförmigen Anordnung erreicht gegenüber einer „naiven“ 3-Kamera-Konfiguration (mit Ausrichtung der Kameras entlang der kartesischen Koordinatenachsen) im Mittel eine um den Faktor 2 genauere Pose-Messung (vgl. Kap. 7.5.5). Durch diese Designoptimierung kann ein CPMS ohne zusätzlichen Hardware und Kostenaufwand erheblich verbessert werden.

Bei der Installation eines „realen“ CPMS entsteht das Problem, dass bestimmte Systemparameter, wie die räumlichen Lagen der Zielmarken oder die Anordnung der Kameras auf ihrem Träger, nicht exakt bekannt sind. Für die exakte Bestimmung wird eine Systemkalibration erforderlich (vgl. Kap. 7.6).

Dazu wurden zwei praxisnahe Kalibrierverfahren entwickelt, die abhängig von den Anforderungen einer Messanwendung und den Begebenheiten am Aufstellplatz, flexibel eingesetzt werden können. Die Methode der „Kalibrierung an Referenz-Zielmarken“ ermöglicht die Definition eines Weltkoordinatensystems durch die Angabe von mindestens drei Referenz-Zielmarken mit bekannten Raum-Posen (vgl. Kap. 7.6.8). Die zweite Methode ist die „Kalibrierung an einem Referenzmesssystem“, die auf eingemessene Zielmarken gänzlich verzichtet, dafür jedoch ein zweites Messsystem zur Kalibrierung benötigt (vgl. Kap. 7.6.10).

Zur Gegenüberstellung der beiden Methoden wurde zunächst ein Vergleichsmaß (Präzision und Richtigkeit) für die Messgenauigkeit eines CPMS definiert. Anschließend wurde die Anwendung der Kalibriermethoden auf eine Beispielkonfigura-

tion eines CPMS simuliert und die damit erzielbare Messgenauigkeit ermittelt. Der Simulation wurden die bekannten Eigenschaften einer realen Kamera zugrunde gelegt (vgl. Kap. 7.6.2).

Im zylindrischen Messvolumen der Beispielanwendung mit einem Durchmesser von 0,8m und einer Höhe von 0,4m wurde in der Simulation für beide Verfahren eine Präzision von 8-13 $\mu$ m erreicht. Ausschlaggebend für die Präzision waren der Bildmessfehler der Kameras, die Kameraanordnung auf dem Träger und (aus statistischen Gründen) die Anzahl der beobachteten Zielpunkte. Hierbei verbesserte sich die Präzision proportional zur Wurzel der Zielpunktzahl (vgl. Kap. 7.6.12).

Die Kalibration an Referenzzielmarken erzielt hohe Richtigkeit bis in den Bereich der Präzision, sofern eine ausreichende Anzahl Referenzmarken gleichmäßig im Messvolumen verteilt wird. Durch Einsatz einer gemeinsamen Trägerplatte für die Referenzzielmarken (Referenzplatte) wird die Installation von Referenzmarken deutlich vereinfacht. Durch die schlechtere Verteilung im Messvolumen sank aber die Richtigkeit (vgl. Tabelle 19). Durch den Verbleib der Referenzmarken im System wird eine Nachkalibration im Betrieb möglich, wodurch die Systemkalibration dauerhaft aufrechterhalten werden kann. Ein Nachteil dieser Methode ist eine bis zu 4-fach höhere Anzahl an Zielmarken (vgl. Kap. 7.6.8).

Bei der Kalibration an einem Referenzmesssystem kann die Zahl der Zielmarken deutlich reduziert werden. Auf Referenzmarken kann vollständig verzichtet werden, wodurch der damit verbundene Aufwand der Einmessung entfällt. Dafür ist jedoch zur Durchführung der Systemkalibration ein Referenzmesssystem bereit zu stellen. Da nach erfolgter Kalibrierung das Referenzmesssystem (im Gegensatz zu den Referenzzielmarken) entfernt wird, ist keine Nachkalibration im Betrieb möglich. Da eine „driftfreie“ Montage aller Zielmarken in der Praxis problematisch sein dürfte, eignet sich diese Methode eher für Messanwendungen mit hohen Präzisions- aber eher geringen Richtigkeitsanforderungen (vgl. Kap. 7.6.10, 7.6.13).

Bei beiden Kalibrierverfahren kann in einfacher Weise das Messsystem-Koordinatensystem an eine beliebige Stelle (z.B. in die Roboterhand oder in einen zweiten Sensor) gelegt werden, so dass eine zusätzliche sog. Hand-Auge-Transformation entfällt, vgl. Kap. 7.6.5).

Im Rahmen einer Vorkalibration, kann eine verbesserte Kalibrierung der Kameraanordnung auf einem speziellen Kalibrierplatz erreicht werden (vgl. Kap. 7.6.11). Hierzu wurden zwei Verfahren entwickelt, für deren Anwendung eine einfache (2-achsige) Positioniereinheit ausreicht. Für die Kalibrierung an Referenzmarken konnte für die Beispielanwendung die erzielbare Richtigkeit durch die Vorkalibration wesentlich gesteigert werden (vgl. Kap. 7.6.11).

---

## 8 SCHLUSSBETRACHTUNGEN

In diesem letzten Kapitel werden die Resultate dieser Arbeit strukturiert zusammengefasst. Weiter werden einige wichtige Teilaspekte nochmals aufgegriffen und diskutiert. Abschließend wird in einem Ausblick skizziert, welche weiteren Forschungsaktivitäten folgen sollten.

### 8.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Zentrale Aspekte dieser Arbeit waren die Simulation und Optimierung digitaler Bildaufnahmesysteme, die Untersuchung photogrammetrischer Zielmarken und die Verbesserung der Bildmessalgorithmik, die Modellierung und Kalibrierung von Messkameras und zuletzt die Modellierung, Optimierung und Kalibrierung eines mehrkameranbasierten Pose-Messsystems.

#### 8.1.1 Simulation und Optimierung digitaler Bildaufnahmesysteme

Das komplexe Zusammenspiel von Beleuchtung und optischer Abbildung, sowie der Bildwandlung bis hin zu Antastung von Messmerkmalen im Digitalbild (Bildmessung), hängt von zahlreichen Variablen ab. Viele dieser Variablen, wie z.B. die exakte Abbildungsgeometrie oder auch äußere Einflüsse wie Temperatur oder mechanische Vibrationen sind in einem realen Bildaufnahmesystem nur unzureichend bekannt, so dass Messungen nicht exakt reproduzierbar sind.

Um die Bildaufnahme einer Zielmarke und die zugehörige algorithmische Bildmessung zu untersuchen und später zu optimieren, wurde daher ein realitätsnahes Modell eines Bildaufnahmesystems (Bildaufnahmesimulator) über die Beleuchtung, optische Abbildung einer Zielmarke bis zur Bildwandlung und Digitalisierung durch den Bildsensor implementiert.

Auf Basis der Bildaufnahmesimulation wurde eine Methode entwickelt, mit deren Hilfe die komplexe Interaktion der Bildaufnahme-Parameter analysiert werden kann. Für einen gegebenen Bildsensor, Arbeitsabstand und absolutes Auflösungsvermögen kann so z.B. die optimale Brennweite und Blende des Kameraobjektives, sowie die ideale Wellenlänge, Leistung und Strahlwinkel der Lichtquelle ermittelt werden.

Damit wurde das Ziel erreicht, einen möglichst großen Schärfentiefebereich (Arbeitsabstandsbereich) bei akzeptabler Lichtleistung zu generieren.

Es wurde gezeigt, wie die erforderliche Lichtleistung und Strahlformung auf Basis marktüblicher LED-Lichtquellen erzeugt werden kann und wie sich eine wirksame Fremdlichtunterdrückung durch spektrale (mittels Interferenzfilter) und temporale (mittels Blitzbeleuchtung) Einengung der Strahlleistung erzielen lässt.

### 8.1.2 Photogrammetrische Zielmarken und präzise Bildmessung

Die präzise Antastung der Zielmarke im Bild ist eine der Grundvoraussetzungen für die Entwicklung eines leistungsfähigen kamerabasierten Pose-Messsystems. Bildrauschen, inhomogene Ausleuchtung und Bewegungsunschärfe sind Faktoren, welche die Antastgenauigkeit eines Bildmessalgorithmus beeinflussen können und deshalb auf Basis der Bildaufnahmesimulation untersucht wurden.

Als Zielmarkentyp wurde eine passive planare Schachbrettform in Kombination mit einem kantenbasierten Bildmessalgorithmus gewählt, da diese Form kostengünstig realisiert werden kann und im Vergleich zu anderen Formen höhere Robustheit gegen Bildrauschen oder Perspektivenvariation zeigt.

Durch Simulation und Analyse der Bildaufnahme wurde gezeigt, dass Bildrauschen lediglich stochastische Bildmessfehler erzeugt, während eine inhomogene Ausleuchtung (durch Lichtquelle oder Schattenwurf) und Bewegungsunschärfe (durch Bildaufnahme während des Verfahrenvorgangs) erhebliche systematische Bildmessfehler erzeugt.

Diese systematischen Bildmessfehler wirken sich besonders kritisch aus, da sie im Gegensatz zu stochastischen Fehlern nicht durch eine Mittelwertbildung über eine größere Zahl von Referenzmarkern einer Zielmarke kompensiert werden können.

Zur Beleuchtungshomogenisierung wurden zwei Verfahren entwickelt, die die ortsabhängige Bestrahlungsstärke einer Zielmarke im Bild modellieren und homogenisieren.

Das erste (globale) Verfahren nutzt ein Polynommodell 2. Ordnung zur Schätzung der Bestrahlungsstärke und bewirkt eine stark interpolierende Helligkeitskorrektur. Diese eignet sich besonders zur Kompensation von Helligkeitsgraduierungen niedriger Ortsfrequenz, wie sie durch den Einsatz einer Punktlichtquelle (z.B. LED) hervorgerufen werden.

Das zweite (alternative) Verfahren bewirkt eine lokale Beleuchtungshomogenisierung innerhalb des Messfensters in unmittelbarer Umgebung eines einzelnen Referenzmerkmals. Es eignet sich damit auch zur Korrektur von Helligkeitsgraduierungen höherer Ortsfrequenz, wie sie z.B. durch Schattenwurf im Strahlweg befindlicher Objekte oder Fremdlichteinfluss erzeugt werden.

Beide Verfahren wurden mit Hilfe des Kamerasimulators untersucht und bewirkten eine Reduktion des systematischen Bildmessfehlers um bis zu einer Größenordnung.

Zuletzt wurde der Einfluss von Bewegungsunschärfe auf die Bildmessung untersucht. Eine gleichförmige Bewegung bewirkt eine Verschiebung des Abtastzeitpunktes der Messung in die Mitte des Belichtungsintervalls, die durch entsprechende Korrektur des Zeitstempels einer Messung kompensiert werden kann. Die Korrektur von beschleunigten Bewegungen ist dagegen deutlich komplexer. Es wurde festgestellt, dass beschleunigungsbedingte Bildmessfehler bei längeren Belichtungszeiten kompensiert werden müssen und es wurde ein entsprechendes Kompensationsverfahren entwickelt.

### 8.1.3 Geometrisches Kameramodell und Kalibrierung:

Um mit einer realen Kamera Messungen zu vollziehen, muss deren Abbildungsverhalten durch ein Kameramodell möglichst exakt beschrieben werden. Die Parameter dieses Modells, wie z.B. Brennweite und Objektivverzeichnung werden in einem Kalibrierprozess bestimmt. Dazu werden etwa 20 Kalibrieraufnahmen einer bekannten Zielmarke angefertigt, aus denen im Rahmen einer nicht-linearen Optimierung die Kameraparameter abgeleitet werden.

Durch die Überbestimmung des Kalibriergleichungssystems konnte der, nach einer Kalibrierung verbleibende, Bildmessfehler abgeschätzt und durch Anpassung des Kameramodells auf die Aufnahmehardware und Optimierung des Kalibrierprozesses um etwa 70% reduziert werden.

Mit dem untersuchten Bildaufnahmesystem, bestehend aus einem Sony ICX274 Bildsensor und einem 12mm Objektiv, wurde unter Anwendung des verbesserten Bildmessverfahrens ein (normierter) Bildmessfehler von  $0,002^\circ$  erzielt. Dieser Wert dient als Grundlage für eine realistische Simulation und Leistungsbewertung von mehrkamerabasierten Pose-Messsystemen.

### 8.1.4 Modellierung, Optimierung und Kalibrierung eines CPMS

Die mit einem (mehr-)kamerabasierten Pose-Messsystem erreichbare Messgenauigkeit hängt, neben dem Bildmessfehler der eingesetzten Aufnahmesysteme, von zahlreichen weiteren Faktoren ab. Eine wesentliche Rolle spielt hier die Anzahl und Anordnung der Kameras auf dem Messkopf, als auch Anzahl, Anordnung und mechanische Stabilität der im Raum platzierten Zielmarken. Weiter müssen zum Betrieb eines CPMS die Anordnung der Kameras in Bezug auf ein Messkopfkoordinatensystem bzw. die Anordnung der Zielmarken in Bezug auf ein Referenzkoordinatensystem bekannt sein, was eine sog. Systemkalibrierung erfordert.

Zur Untersuchung und Optimierung des komplexen Zusammenspiels wurde eine Simulationsumgebung erstellt, auf der beliebige mehrkamerabasierte Pose-Messsysteme konfiguriert und simuliert werden können. Das einzelne Bildaufnahmesystem wird dabei durch seinen normierten Bildmessfehler (Fehler der Zielmarken-antastung) charakterisiert.

Darauf wird zunächst das mathematische Abbildungsmodell erstellt und ein Verfahren zur Berechnung der Messsystem-Pose auf Basis der beobachteten Zielmarken entwickelt. Die Lösung erfolgt iterativ auf einer Linearisierung des Modellgleichungssystems. Dazu werden die partiellen Ableitungen der gesuchten Modellparameter ermittelt und eine Jakobimatrix aufgestellt.

Durch eine numerische Analyse der Jakobimatrix auf Basis einer Singulärwertzerlegung, konnte der für eine Kamerakonfiguration theoretisch erreichbare Pose-Messfehler abgeschätzt werden. Sogenannte schwer detektierbare Bewegungen, die bei

ungünstigen Kameraanordnungen eine überhöhte Übersetzung des Bildmessfehlers in einen Pose-Fehler bewirken, konnten aufgedeckt und beseitigt werden.

Dies führte zu einem Messkopfdesign aus drei planar im  $120^\circ$  Winkel angeordneten Kameras. Das Design erreicht gegenüber einer (naiven) Anordnung derselben Kameras entlang der kartesischen Koordinatenachsen eine durchschnittlich um den Faktor 2 verbesserte Pose-Messgenauigkeit. Weiter wurde nachgewiesen, dass 1-2-Kamera-Systeme als 6D-Pose-Sensoren ungeeignet sind, da nur geringe Pose-Messgenauigkeiten aufgrund nicht eliminierbarer schwer detektierbarer Bewegungen erreichbar sind.

Zur Systemkalibrierung wurden zwei praxisnahe Kalibrierverfahren entwickelt, die eine Bestimmung der Zielmarkenlagen und Kameraanordnung am Aufstellplatz eines CPMS erlauben. Die Methode der „Kalibrierung an Referenz-Zielmarken“ ermöglicht die Definition eines Weltkoordinatensystems durch die Angabe von mindestens drei Referenz-Zielmarken mit bekannten Raum-Posen. Die zweite Methode ist die „Kalibrierung an einem Referenzmesssystem“, die auf eingemessene Zielmarken gänzlich verzichtet, dafür jedoch ein zweites Messsystem zur Kalibrierung benötigt.

Im Rahmen der Simulation wurde die Anwendbarkeit der Kalibriermethoden an einer beispielhaften Messanwendung evaluiert und die theoretisch erzielbare Präzision (Wiederholgenauigkeit) und Richtigkeit (Absolutgenauigkeit) ermittelt. Im zylindrischen Messvolumen der Beispielanwendung mit einem Durchmesser von 0,8m und einer Höhe von 0,4m wurde in der Simulation für beide Verfahren eine Präzision von etwa 8-13 $\mu$ m erreicht. Unter anderem konnte eine Abhängigkeit der Präzision von der Anzahl der beobachteten Zielpunkte nachgewiesen werden. So steigt die Präzision proportional zur Wurzel der Zielpunktbeobachtungen.

Die Kalibration an Referenzzielmarken erzielt hohe Richtigkeit bis in den Bereich der Präzision, sofern eine geringe Anzahl (z.B. 3-5) genau eingemessener Referenzmarken gleichmäßig im Messvolumen verteilt wird. Durch Einsatz einer gemeinsamen thermostabilen Trägerplatte für die Referenzzielmarken (Referenzplatte) kann die Installation von Referenzmarken vereinfacht werden. Durch die ungünstigere Verteilung im Messvolumen verschlechtert sich jedoch die erzielbare Richtigkeit (um einen Faktor 2 im Beispiel bei einer 0,16m<sup>2</sup> großen Platte). Durch den Verbleib der Referenzmarken im System kann die Richtigkeit durch zyklische Nachkalibrierung dauerhaft aufrechterhalten werden.

Bei der Kalibration an einem Referenzmesssystem kann die Anordnungsichte der Zielmarken deutlich reduziert werden, da Verknüpfungsmarken zu Referenzmarken entfallen. Dafür ist zur Systemkalibrierung ein externes Vergleichs-Messsystem erforderlich. Da das Vergleichsmesssystem nach der Kalibrierung entfernt wird, kann die Richtigkeit nur über eine dauerhaft stabile Position aller im Raum platzierten Marken erhalten werden. Da eine „driftfreie“ Montage aller Zielmarken in der Praxis problematisch sein dürfte, eignet sich diese Methode eher für Messanwendungen mit hohen Präzisions- aber eher geringen Richtigkeitsanforderungen

Im Rahmen einer Vorkalibrierung kann eine verbesserte Kalibrierung der Kameraanordnung auf einem speziellen Kalibrierplatz erreicht werden. Hierzu wurden



zwei Verfahren entwickelt, für deren Anwendung eine einfache (2-achsige) Positionierereinheit ausreicht. Für die Kalibrierung an Referenzmarken konnte für die Beispielanwendung die erzielbare Richtigkeit durch die Vorkalibration wesentlich gesteigert werden.

## 8.2 Diskussion der Ergebnisse

Im Folgenden sollen die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit im Kontext des gegenwärtigen technologischen Wissensstandes diskutiert werden. Dazu werden zunächst die Vor- und Nachteile des verfolgten Auge-In-Hand-Prinzips aufgegriffen und erklärt, wie bestehende Probleme dieses Ansatzes gelöst werden konnten. Anschließend wird Nutzen und Leistungsumfang der entstandenen Toolbox zur Simulation von mehrkamerabasierten Pose-Sensoren und ihre Grenzen besprochen. Zuletzt wird die Bedeutung der Ergebnisse für die robotergestützte Koordinatenmesstechnik erläutert und diskutiert.

### 8.2.1 Auge-In-Hand Ansatz zur Pose-Messung

Aufgrund geringerer Kosten ist der in dieser Arbeit vorgestellte 3-Kamera Auge-In-Hand (AIH) Ansatz den häufig verfolgten Auge-Zu-Hand (AZH) Ansätzen ökonomisch überlegen und deshalb insbesondere für günstige Pose-Sensoren geeignet. Der Grund liegt in den relativ geringen Kosten für Standard-Industriekameras und passiver Zielmarken. Dagegen sind für AZH-Systeme Prinzip bedingt (vgl. Kap. 2.3.4) hochauflösende Spezialkameras erforderlich die meist nur mit aktiven Targets arbeiten (vgl. Kap. 2.3.5). Weiter erzeugen AZH-Pose-Sensoren hohe Orientierungsfehler (vgl. Kap. 2.3.5), die sich negativ auf die Registrierungsgenauigkeit von Messmerkmalen auswirkt (vgl. Kap. 2.1.4).

Nachteil des hier vorgestellten CPMS-Ansatzes ist eine gegenüber einer aktiven Targetierung potentiell höhere Empfindlichkeit gegenüber Beleuchtungsinhomogenität und Fremdlichteinflüssen. Diese Probleme konnten konstruktiv (vgl. Kap. 4.5) durch Bildverarbeitungsmethoden gut gelöst werden (vgl. Kap. 5.4).

Die theoretische maximale Messrate ist durch die Bildfrequenz des verwendeten (Matrix-)Kameratyps auf etwa 30-100Hz beschränkt, während auf Zeilenkameras basierende Messsysteme (vgl. Kap. 2.3.5) Messraten im kHz-Bereich erzielen können.

Praktisch kann die oben genannte Messrate aufgrund der, für die Pose-Messung nötigen aufwendigen Modellausgleichsrechnung, auf aktuellen Prozessoren (noch) nicht erreicht werden. Bei hohen Messraten steht demnach ein Messwert zeitverzögert zur Verfügung. Eine unmittelbare Reaktion, beispielsweise zur aktiven Positionsregelung eines Roboters, kann so nicht erfolgen. Dagegen stellt die verzögerte Bereitstellung eines Messwerts für die Registrierung von Sensordaten, z.B. bei einem 3D-Lichtschnitt-Scanner, keinen wesentlichen Nachteil dar.

Es ergibt sich ein relativ komplexes Messmodell bei, dem die erzielbare Genauigkeit unter anderem von den Eigenschaften des einzelnen Bildaufnahmesystems, von deren Anordnung als Mehrkameraverbund und der Anordnung und Zahl der Zielmarken abhängt (vgl. Kap. 7.2).

Alternative AIH-Systeme (z.B. Pose-Eye, vgl. Kap. 2.3.5) arbeiten in der Regel mit weniger als drei Kameras. Hier kann nachgewiesen werden, dass solche Systeme aufgrund nicht vollständig eliminierbarer schwer detektierbarer Bewegungen, die zu einer überhöhten Übersetzung des Bildmessfehlers in einen Pose-Fehler führen, Prinzip bedingt nicht für Präzise Messungen geeignet sind (vgl. Kap. 7.5.4).

### 8.2.2 Simulations-Umgebung

Aufgrund der Komplexität und der vielen Einflussfaktoren ist die Untersuchung und Optimierung eines mehrkamerabasierten Pose-Sensors, z.B. auf eine geforderte Messleistung bei geringsten Kosten, an einem realen Systemaufbau nur schwer möglich.

Durch die entwickelte Simulationsumgebung wird die zielgerichtete Planung und Leistungsabschätzung eines CPMS für eine vorgegebene Messapplikation stark vereinfacht (vgl. Kap. 4.6, 7.6). Auch wurde mit Hilfe der Simulation eine wesentliche Verbesserung der Kameraanordnung erzielt (vgl. Kap. 7.5), die bei gleichem Hardware-Aufwand ein genaueres Messergebnis liefert. Die komplexeste Herausforderung dieser Arbeit war die Entwicklung der Verfahren zur Systemkalibrierung, die ohne die Simulationsumgebung nicht denkbar gewesen wäre.

Trotz der genannten Vorteile ist zu bedenken, dass eine Simulation ein vereinfachtes Modell der Realität darstellt und diese somit nur näherungsweise abbilden kann. Der Grad der Übereinstimmung hängt vom Grad der Vereinfachung ab und davon welche Begebenheiten im Modell nicht betrachtet wurden.

Vernachlässigt wurden u.A. Änderungen der Systemparameter über die Zeit, wie sie z.B. durch thermische Veränderungen in der Zielmarken- oder Kameraanordnung auftreten könnten. Entsprechende Änderungen der Messgenauigkeit können durch die Simulation nicht dargestellt werden. Diese repräsentiert lediglich eine Momentaufnahme wie sie nach einer Systemkalibrierung eintritt.

Zur Simulation der Systemkalibrierung selbst wurden absolut genaue Referenzmarken bzw. ein absolut genaues Referenzmesssystem (vgl. Kap. 7.6.5) angenommen, das es so in der Praxis nicht gibt. Entsprechend werden in einem realen Systemaufbau Fehler in den Referenzen zu erhöhten Kalibrierfehlern bzw. Messfehlern führen. Hier sollte der Grundsatz beachtet werden, dass eine Kalibrierreferenz möglichst um eine Größenordnung genauer gewählt werden sollte, als das Objekt der Kalibrierung.

Neben der geometrischen Konfiguration eines CPMS stellt der mit dem eingesetzten Bildaufnahmesystem erzielbare mittlere Antastfehler (Bildmessfehler) die wichtigste Eingabegröße der Simulation dar. Dieser wird zwar auf Basis der Untersuchung eines realen Bildaufnahmesystems ermittelt (vgl. Kap. 6), es ist jedoch zu erwarten, dass in der Praxis, abhängig von der diskreten Aufnahmesituation, Abweichungen vom angenommenen Mittelwert auftreten, die dann zu einer Abweichung der realen

Messergebnisses führen können. Auch eine Veränderung der intrinsischen Kameraparameter über die Zeit, die zu einem veränderten Bildmessfehler führen, sind denkbar und sollten durch ausreichende Gerätequalität beschränkt werden.

### 8.2.3 Eignung für die robotergestützte Koordinatenmesstechnik

Spezielle Industrieroboter für Präzisionsanwendungen erreichen unter Anwendung einer zyklischen Rekalibrierung an einem Maßkörper (zur Driftkompensation) Bahngenaugkeiten bis zu 160-300 $\mu\text{m}$  (vgl. Kap. 2.2.3). Vorausgesetzt wird das Vorhandensein eines Systems zur Antastung des Maßkörpers an der Roboterhand. Standard-Industrieroboter erreichen dagegen nur absolute Bahngenaugkeiten um 500-1300 $\mu\text{m}$ . Die Halte-Positionsgenauigkeit eines Roboters fällt zwar meist günstiger aus, als seine Bahngenaugkeit, jedoch erfordert das Halten und Ausschwingen erhebliche Prozesszeit. Auch können damit die üblichen scannenden Sensoren nicht betrieben werden.

Marktübliche integrierbare Messkopfsysteme zur Antastung von Messmerkmalen und Betrieb auf einem Verfahrenssystem erreichen Antastunsicherheiten im Bereich von etwa 5-300 $\mu\text{m}$ , wobei häufig eingesetzte Sensoren wie Laser-Lichtschnittscanner typischerweise etwa 10-50 $\mu\text{m}$  erreichen (vgl. Kap. 2.1.2). Die Positionsunsicherheit eines Trägerroboters überlagert also deutlich die Antastgenauigkeit des geführten Messsystems, dessen Einsatzfeld so beschränkt wird.

Die mit einem CPMS erreichbare Pose-Messgenauigkeit hängt maßgeblich von seiner Konfiguration ab und kann in Grenzen an die Applikationsanforderungen angepasst werden. Zur Diskussion soll hier das Beispiel-CPMS aus Kap. 7.6.2 in der Version mit Referenzplatte betrachtet werden. Es erreicht (in der Simulation) eine Präzision von etwa 8 $\mu\text{m}$ . Die erreichbare Richtigkeit liegt bei etwa 30 $\mu\text{m}$  (23-34 $\mu\text{m}$ ) (vgl. Kap. 7.6.10, 7.6.13/Tabelle 19). Die sog. Referenzplatte ist hier ein planarer (0,4x0,4) $\text{m}^2$  großer Maßkörper in Form einer thermo- und formstabilen Platte, mit einigen Referenz-Zielmarken. Sie dient zur Festlegung eines Referenz-Koordinatensystems und erlaubt eine sehr einfache Autokalibrierung am Aufstellort, die im Betrieb wiederholt werden kann, um die Richtigkeit dauerhaft zu erhalten.

Wird diese CPMS-Variante zusammen mit einem Messkopfsystem auf einen Roboter montiert, so könnte sie dessen Pose mit einer absoluten Bahngenaugkeit von etwa 30 $\mu\text{m}$  bestimmen. Dieser Wert übersteigt die Bahngenaugkeit kalibrierter Roboter deutlich, so dass das Einsatzgebiet dieses robotergestützten Koordinatenmesssystems wesentlich erweitert wird. Des Weiteren sinken die Anforderungen an den Trägerroboter erheblich, so dass statt hochgenauer Typen einfache Industrie- oder auch Leichtbauroboter eingesetzt werden können.

Die theoretisch erzielbare (absolute) Orientierungsgenauigkeit dieser CPMS-Variante erreicht etwa 50 $\mu\text{rad}$  (vgl. Tabelle 19). Klassische Pose-Sensoren (vgl. Kap. 2.3.5, Tabelle 4) haben hier, bedingt durch die eingesetzten Messmethoden, mit Orientierungsfehlern bis zu 1000 $\mu\text{rad}$  dagegen erhebliche Schwächen. Die (absolute) Positionsgenauigkeit des CPMS liegt teils über derjenigen von hochwertigen AZH-Systeme mit aktiven Targets.

Dem gegenüber steht der erforderliche Installationsaufwand des CPMS, das eine möglichst positionsstabile Montage einer größeren Anzahl von Zielmarken im Messvolumen verlangt. Im Gegensatz zu anderen AIH-Systemen (vgl. Kap. 2.3.5) können die Marken jedoch sehr klein ausfallen (z.B.  $(50 \times 50) \text{mm}^2$ ), ohne dass dadurch ein nennenswerter Genauigkeitsverlust einträte. Dies beruht auf der Begebenheit, dass ein 3-Kamera-CPMS (im Gegensatz zu 1-2-Kamera-Systemen) nahezu keine Information aus der perspektivischen Abbildung des Targets ableitet, welche sich erst unter Einsatz großer Targets und Weitwinkelobjektiven ausprägt (vgl. Kap. 7.6.12).

Potentiell problematisch sind Verdeckungen der Sichtachse zwischen einer Kamera und Zielmarke, beispielsweise durch Objekte innerhalb des Messvolumens. Dabei führt die Verdeckung von 1-2 Kameras zu einem Genauigkeitsverlust, während eine gleichzeitige Verdeckung aller Kameras gar zu einem Systemausfall führt. Die Problematik kann durch geeignete Positionierung der Zielmarken oder durch Installation einer 4. oder 5. redundanten Kamera gemindert werden (vgl. Kap. 7.6.12).

Die erzielbare Richtigkeit und Präzision eines CPMS kann beispielsweise durch eine Erhöhung der Zielpunktzahl (durch Erhöhung der Markendichte bzw. der Zielpunkte pro Marke) gesteigert werden. Diese Steigerung ist proportional zur Wurzel der Zielpunktzahl. Dieser (stochastisch bedingten) Genauigkeitssteigerung steht jedoch ein quadratischer Anstieg des Berechnungsaufwandes entgegen. Eine Alternative ohne Steigerung des Rechenaufwands ist die Senkung des Bildmessfehlers durch Erhöhung der Abbildungsvergrößerung über die Objektivbrennweite.

### 8.3 Ausblick

Zum Abschluss folgen zunächst einige Vorschläge zu weiterführenden Arbeiten und anschließend einige Ideen für erweiterte Anwendung Szenarien eines CPMS, die über die reine Pose-Messung hinausgehen.

#### 8.3.1 Realisierung und Test eines Demonstrationssystems

In dieser Arbeit wurden wesentliche theoretische Grundsteine zur Konstruktion und Kalibrierung leistungsfähiger mehrkamerabasierter Pose-Messsysteme gelegt. Der logische nächste Schritt ist die vorgestellten Konzepte in reale Anwendungen zu überführen und zu evaluieren.

Dabei sollte insbesondere ein Vergleich zwischen Simulation und realem Aufbau erfolgen, um eventuelle Schwächen der Simulationsumgebung aufzudecken und auszubessern. Auch sind beim realen Messsystem Herausforderungen zu erwarten, die in weiteren Arbeiten gemeistert werden müssen.

Beispielsweise ist ein mechanisch stabiler Aufbau der Zielmarkenanordnung nicht trivial und verlangt die Konstruktion einer geeigneten Vorrichtung. Während

thermischer Drift durch CPMS-Varianten mit In-Prozess-Rekalibrierung noch kompensiert werden kann, stellen kurzfristige Positionsänderungen der Zielmarken, wie sie z.B. durch Schwingungen oder Verformungen des Traggestells auftreten können, eine potentielle Quelle für Messfehler dar.

### 8.3.2 Beschleunigung der Pose-Messung

In der aktuellen Matlab-Implementierung ist eine Pose-Messung mit geringer Latenzzeit bzw. hohen Messraten im Bildtakt der Kameras wegen des hohen Berechnungsaufwands nicht möglich.

Untersuchungen zeigten, dass der überwiegende Anteil der Rechenzeit von etwa 88% auf die Lösung des Gleichungssystems (mittels Levenberg-Marquardt-Algorithmus) entfällt (vgl. Kap. 7.2.2, 7.6.12). Damit gibt es zwei Optionen zur Geschwindigkeitsoptimierung, die auch gemeinsam einsetzbar sind, nämlich a) die Reduzierung der Größe des Gleichungssystems und b) das Erhöhen der Rechenleistung.

Zur Pose-Messung werden nichtlineare Gleichungssysteme gelöst, für die eine Beobachtung eines Zielmarkenreferenzpunktes jeweils zwei Teilgleichungen für die X- und Y-Koordinate liefert. Gute Präzision verlangt viele Kreuzungspunkte pro Zielmarke zur statistischen Fehlerreduktion. Typischerweise werden um 100 Referenzpunkte mit 200 Gleichungen verwendet.

In einem verzeichnungskorrigierten Kamerabild könnten die Bildpositionen einer Zielmarke alternativ durch eine zweidimensionale perspektivische Abbildung eines Zielmarkenprototypen beschrieben werden, in der projektiven Geometrie also durch eine 3x3 Transformationsmatrix mit acht unabhängigen Elementen. Diese Vorgehensweise würde es erlauben, beispielsweise 100 fehlerbehaftete Bildkoordinaten auf lediglich vier Bildkoordinaten entsprechend höherer Genauigkeit zu komprimieren, wodurch die Größe des zu lösenden Gleichungssystems massiv reduziert würde.

Eine weitere wesentliche Steigerung der Messrate ist erzielbar, indem die notwendigen Einzelberechnungen parallelisiert und auf einen Vektorprozessor bearbeitet werden. Typische Vertreter sind Grafikprozessoren (GPU), die mehrere tausend parallele Rechenwerke enthalten können.

Der Kern des Levenberg-Marquardt-Algorithmus (vgl. Kap. 7.2.2) ist die Cholesky-Faktorisierung<sup>195</sup>, die zum Hauptteil aus Multiply-Akkumulate Operationen aufgebaut ist, für die sich die vereinfachten Rechenwerke einer GPU sehr gut eignen dürften.

Gelingt eine erhebliche Beschleunigung des Levenberg-Marquardt-Algorithmus, sinkt dessen Anteil am Rechenaufwand. Um die Messrate weiter zu steigern, müssen dann auch die restlichen Berechnungen, wie die Berechnung der Jakobimatrix und Bildmessalgorithmik parallelisiert werden. Da die Zellen der Jakobimatrix (vgl. Kap.

---

<sup>195</sup> Vgl. William (2007, 100)

7.2.4) unabhängig berechenbar sind, können diese Zellen getrennt und parallel berechnet werden. Ähnlich kann die Bildmessung (vgl. Kap. 5.2) z.B. für die einzelnen Zielpunkte getrennt erfolgen.

Wie eine Reduktion der Gleichungssystemgröße und eine Verteilung der Rechenlast auf mehrere tausend GPU-Rechenkerne effektiv realisiert werden kann und welche Messraten damit erzielbar sind, ist in zukünftigen Arbeiten zu klären.

### 8.3.3 Erweiterte Anwendungen des CPMS-Prinzips

Neben der Verwendung als externer Pose-Sensor sind weitere Anwendungen eines CPMS denkbar. Beispielsweise wäre es möglich, Objekte im Messraum für eine präzise Lokalisierung mit Zielmarken zu referenzieren. Damit könnte z.B. Position und Lage eines mittels Förderband zugeführten Werkstücks erfasst werden.

Denkbar wäre auch eine In-Prozess Nachführung des Robotermodells durch eine Roboterkalibrierung auf Basis der CPMS-Pose-Messung. Auf diese Weise könnten (ähnlich der zyklischen Rekalibrierung, vgl. Kap. 2.2.2) Drift-Phänomene (z.B. durch Temperaturänderung) beim Roboter kompensiert werden, was mit einer Steigerung der Absolutgenauigkeit einherginge.

## FORMELZEICHEN

Tabelle 20: Übersicht verwendeter Formelzeichen.

Formelzeichen	Bedeutung
$A$	Fläche
$a_T$	Albedo (opt. Rückstreuvermögen) einer Zielmarke
$C_{fw}$	Ladungskapazität einer CCD-Zelle (full well capacity)
$\mathbf{c}=(c_x, c_y)^T$	Bildhauptpunkt
$D$	Blendendurchmesser (bzw. Eintrittspupille)
$\Delta d$	Ausdehnung des Schärfentiefebereichs
$d_m, d_f$	Nah- und Fernpunkt (des Schärfentiefebereichs)
$E, E_S$ [Wm <sup>2</sup> ]	Bestrahlungsstärke allgemein bzw. des Bildsensors
$\mathbf{E}, \mathbf{e}$	Äußere Orientierung einer Kamera als Transformation $\mathbf{E}$ oder Pose $\mathbf{e}$
$e$	Elementarladung
$f$	Objektivbrennweite
$f_c$	Kamerakonstante
$\mathbf{G}, \mathbf{g}$	System-Pose in Transformations oder Matrixdarstellung
$g$	Gegenstandsweite (Abstand: Kamera zu Objekt)
$g(i, j)$	Grauwertbild
$\nabla g(i, j)$	Gradientenbild
$hc$	Planksches Wirkungsquantum
$I$ [Wsr <sup>-1</sup> ]	Strahlungsintensität
$k$	Blendenzahl
$\mathbf{k}_c=(k_1, \dots, k_s)$	Verzeichnungskoeffizienten
$L$ [Wm <sup>-2</sup> sr <sup>-1</sup> ]	Leuchtdichte
$\lambda$	Wellenlänge der Bestrahlung
$m_l$	Lateraler Abbildungsmaßstab
$N_p$	Photonenzahl
$\eta$	Quantenausbeute
$\Omega$ [sr]	Raumwinkel
$\Omega_r$	Bildwinkel
$Q$	Ladungsmenge
$R_a, R_r$	Absolutes bzw. relatives Auflösungsvermögen
$R_{B,r}$	Beugungsbegrenztes relatives Auflösungsvermögen
$\Delta t, t_{exp}$	Belichtungszeit
$\mathbf{T}, \mathbf{t}$	Zielmarken-Pose in Transformations oder Matrixdarstellung
$S_p$	Pixelgröße (Kantenlänge)
$\Sigma_i$	Singulärwerte
$\sigma_e$	Rauschen der Quantenwandlung
$\sigma_l$	Normierter Bildmessfehler

---

$\sigma_{rep}$	Reprojektionsfehler
$\Delta t, t_{exp}$	Belichtungszeit
$\mathbf{u}=(u,v)$	Bildkoordinate
$\hat{\mathbf{u}}=(u_1, v_1, \dots, u_n, v_n)^T$	Vektor der Bildkoordinaten $1 \dots n$
$v_0, a_0$	Anfangsgeschwindigkeit bzw. -beschleunigung
$\mathbf{x}_n=(x_n, y_n)^T$	Normierte Bildkoordinate
$\mathbf{x}_d=(x_d, y_d)^T$	Verzeichnete Bildkoordinate
$\mathbf{V}, \mathbf{v}_i$	Rechtssingulärmatrix bzw. i-ter Rechtssingulärvektor
$\tilde{\lambda}$	Zerstreuungskreisdurchmesser



---

## ABKÜRZUNGEN

Tabelle 21: Übersicht verwendeter Abkürzungen.

Abkürzung	Bedeutung
ADM	Absolute Distance Measuring
AIH	Auge-In-Hand-Prinzip
AP, AT	Accuracy of Pose / Triactory
AZH	Auge-Zu-Hand-Prinzip
BAS	Bildaufnahme-Simulator
BMS	Bildmess-Simulator
CPMS	Kamerabasiertes Pose-Messsystem
CPU	Central Processing Unit
GenICAM	Generic Interface for Cameras (Standard)
GPU	Graphics Processing Unit
IR	Industrieroboter
KMG	Koordinatenmessgerät
LTS	Laser Triangulations Scanner
Pose	Kombinierte Beschreibung von Position und Orientierung
<i>RP, RT</i>	Repeatability of Pose / Triactory
RKS	Roboter-Koordinatensystem
SKS	System-Koordinatensystem
SWZ	Singulärwert-Zerlegung
TKS	Target-Koordinatensystem
UML	Unified Modeling Language
WKS	Welt-Koordinatensystem



---

## ANHANG

### A.1 Softwarearchitektur eines CPMS

#### A.1.1 Ablauf einer Pose-Messung

Abbildung 97 zeigt ein Aktivitätsdiagramm des Programmablaufs bei einer Pose-Messung durch das CPMS am Beispiel des 3-Kamera-Testsystems aus Abbildung 14.

Der Begriff Bildmessung beschreibt im Diagramm den Prozess der Identifikation einer Zielmarke und die Messung der Bildkoordinaten der von der Marke angebotenen Referenzpunkte (vgl. Kap. 5). Auf Basis dieser Bildkoordinaten wird anschließend die gesuchte 6D-Pose errechnet.

Jedes der drei Kamerabilder wird parallel durch einen eigenen Thread verarbeitet, wodurch sich bei Mehrkern-Prozessoren eine verbesserte Auslastung und ein beschleunigter Ablauf ergibt.

Nach dem Speichern der berechneten Pose, zusammen mit dem exakten Zeitpunkt der (synchronen) Bildaufnahme, beginnt der Zyklus erneut mit der Aufnahme des nächsten Bild-Sets.

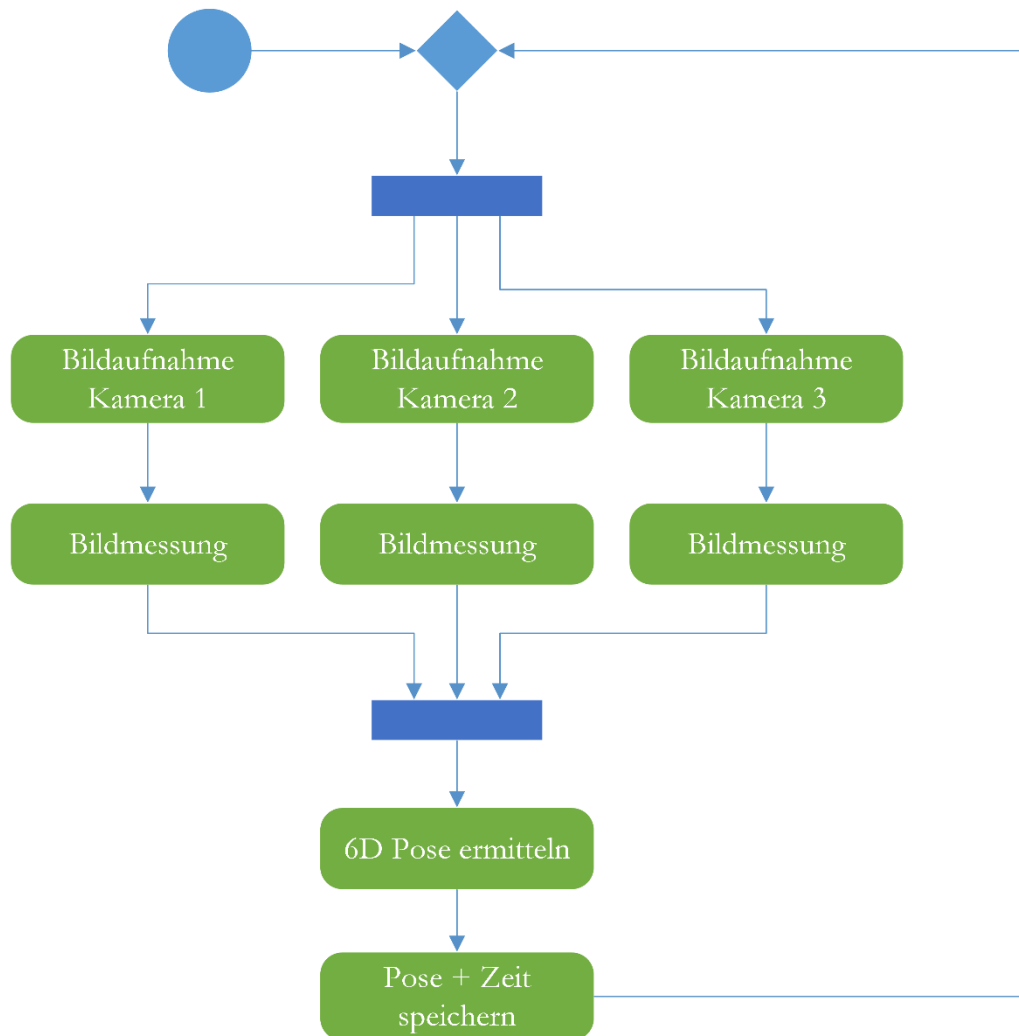


Abbildung 97: Softwaretechnischer Ablauf einer Pose-Messung des CPMS am Beispiel eines 3-Kamera-Systems. Zur effizienten Bildverarbeitung wird jeder Kamera ein Thread (Prozessorkern) zugeordnet.

### A.1.2 Detaillierte Struktur der Messsoftware

Abbildung 98 zeigt die (prinzipielle) statische Softwarestruktur eines CPMS als Klassendiagramm. Die Funktionalität lässt sich in dieser vereinfachten Darstellung auf vier Programmmodule (Klassen) aufteilen, die in den einzelnen Prozessschritten die benötigten Informationen bereitstellen und Ergebnisse speichern.

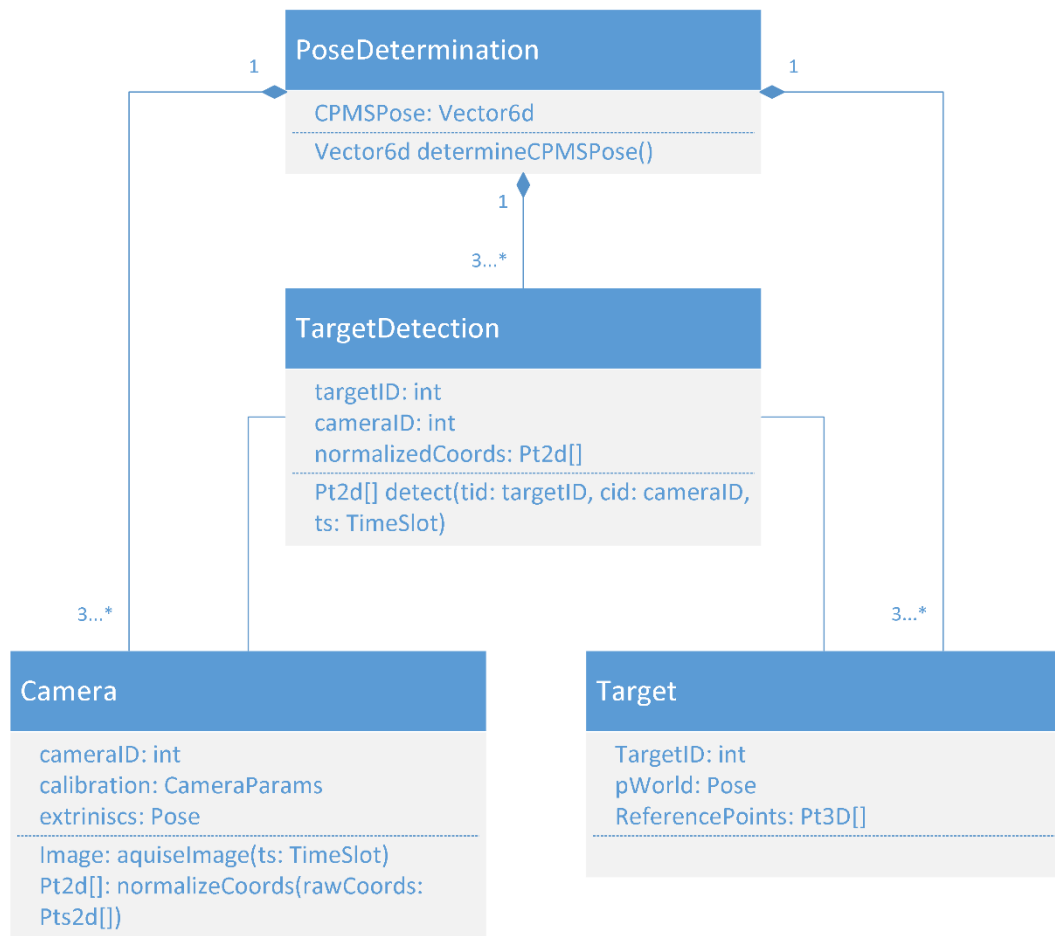


Abbildung 98: Klassendiagramm zur Darstellung der statischen Softwarearchitektur des CPMS.

Die Funktion der Module wird im Folgenden kurz erläutert:

- 1) *PoseDetermination*: Diese Klasse erlaubt durch Aufruf der Funktion *determineCPMSPose()* das Anstoßen der Pose-Messung. Zur Durchführung der Messung beinhaltet sie neben dem Modellausgleichsverfahren jeweils ein oder mehrere Objekte der Klassen *TargetDetection*, *Camera* und *Target* zur Steuerung und Auswertung der Bildaufnahme.
- 2) *TargetDetection*: Objekte dieser Klasse sind für die Durchführung einer Bildmessung („Targetdetection“) und für die Speicherung des Ergebnisses zuständig. Dieses Ergebnis beinhaltet im Detail die Abbildung einer bestimmten Zielmarke (*targetID*) auf dem Bild einer bestimmten Kamera (*cameraID*).
- 3) *Camera*: Ein Objekt dieser Klasse beinhaltet alle Informationen über eine zugehörige physikalische Kamera. Insbesondere die durch eine Kalibrierung ermittelten Kameraparameter (*CameraParams*), welche das genaue Abbildungsverhalten inkl. Objektivverzeichnung beschreiben (vgl. Kap. 5). Bekannte

Abbildungseigenschaften einer Kamera erlauben eine geräteunabhängige (normierte) Darstellung von Bildkoordinaten. Die Klasse stellt dazu die Methode *normalizeCoords()* bereit. Ein weiterer Parametersatz *extrinsics* beschreibt die Lage der Kamera relativ zum Koordinatensystem des getrackten Sensors. Die Methode *acquireImage()* ermöglicht den Bildeinzug. Bei mehreren synchronisierten Bildaufnahmesystemen besitzen simultan aufgenommene Bilder die gleiche *TimeSlot-ID* und können so einem Bild-Set zugeordnet werden.

- 4) *Target*: Ein Objekt dieser Klasse beinhaltet alle Informationen zu einer bestimmten Zielmarke (Target). Darunter die Pose dieses Targets im Referenzkoordinatensystem *pWorld* und die Positionen der Referenzpunkte, die in Bezug zum Ursprung des lokalen Zielmarken-Koordinatensystems angegeben sind.

Abbildung 99 zeigt beispielhaft den Ablauf einer Pose-Bestimmung als Sequenzdiagramm. Das Objekt *cpms1* der Klasse *PoseDetermination* steuert den Ablauf und speichert letztlich das Ergebnis. Dazu erzeugt es nacheinander Objekte der Klasse *TargetDetection*, die hier als *proj<sub>1</sub>...proj<sub>n</sub>* bezeichnet werden. Durch Aufruf der Methode *detect()* eines Projektions-Objektes wird jeweils die Aufnahme einer Zielmarke durch eine Kamera angestoßen; ausgewertet und als normierte Bildkoordinaten (*normPts*) gespeichert. Dieser Vorgang wird für alle installierten Kameras durchgeführt, bis letztlich die nötigen Daten vorhanden sind, um den Modellausgleich zu starten und die Pose zu bestimmen (Aufruf von *determinePose()*).

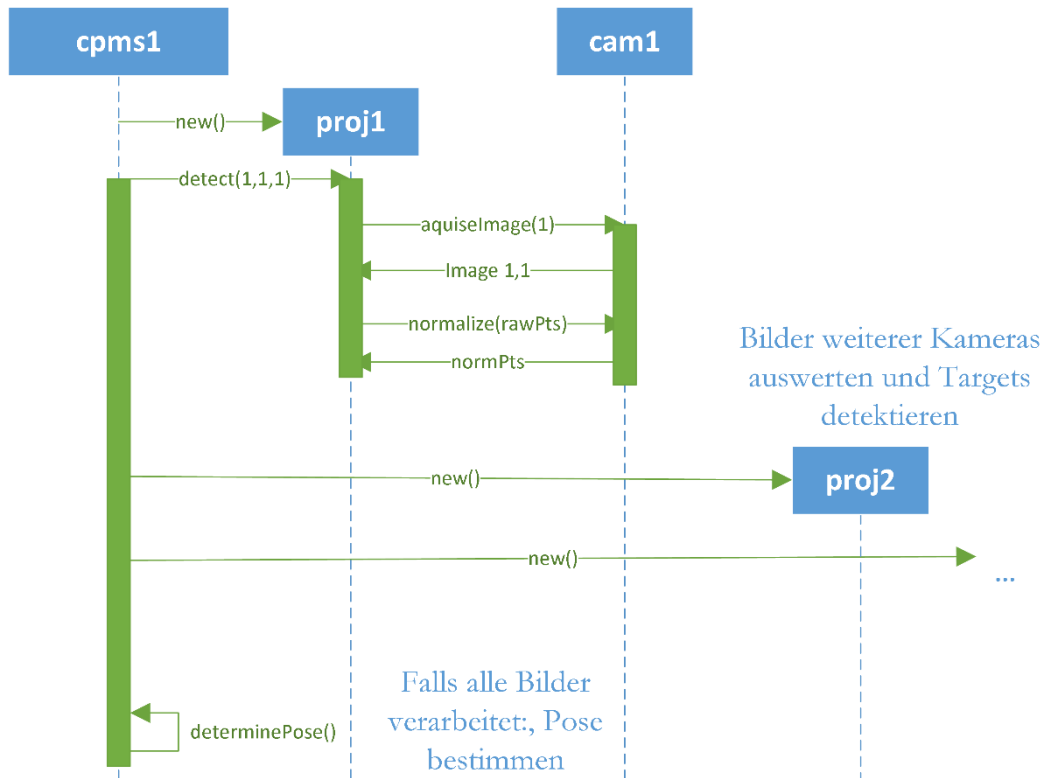


Abbildung 99: Sequenzdiagramm zur Darstellung des Ablaufs einer 6D-*Pose*-Messung.

## A.2 Messung des Auflösungsvermögens nach ISO 15775

Das zu erwartende Auflösungsvermögen eines Abbildungssystems kann zwar rechnerisch abgeschätzt werden (vgl. Kap. 4.2.3, 4.2.4), sollte aber im Rahmen einer Messung überprüft werden. Ein etabliertes Verfahren nach ISO 15775 zur Messung des Auflösungsvermögens ist die Abbildung eines Testmusters, dem sog. *Siemensstern*. Bei diesem Testmuster handelt es sich um einen Kreis mit sich abwechselnden schwarzen und weißen Sektoren, wodurch der Strukturabstand zum Zentrum des Sterns immer kleiner wird. Ein optisches Aufnahmesystem kann das Muster nicht perfekt wieder geben, so dass im Zentrum ein unscharfer Bereich entsteht, der sog. *Grauring*.

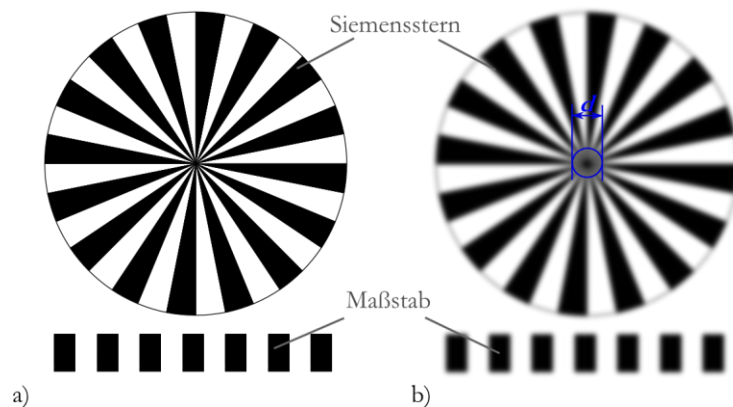


Abbildung 100: Siemensstern nach ISO 15775 zur Bestimmung des Auflösungsvermögens: a) Original Testmuster, b) nach Abbildung durch ein Bildaufnahmesystem.

Über den Durchmesser  $d$  des Grauringes und die Anzahl der Sektoren  $n$  kann das absolute Auflösungsvermögen  $R_a$  bestimmt werden durch<sup>196</sup>:

$$R_a = \frac{\pi \cdot d}{n}. \quad (8.1)$$

Der Durchmesser  $d$  wird so angelegt, dass auf seinem Umfang kein Hell-/Dunkelkontrast mehr gegeben ist.  $R_a$  und  $d$  haben die gleiche Einheit, beispielsweise „Pixel“ bei einem digitalen Aufnahmesystem. Die Umrechnung in das metrische System erfolgt beispielsweise durch Abbildung eines zusätzlichen Maßstabes im Testmuster.

### A.3 Passive- und Aktive-Pixel Sensoren

Aktuell sind zwei unterschiedliche Bildsensor-Technologien verbreitet. Je nachdem, ob die Auswertung der in einer lichtempfindlichen Zelle akkumulierten Ladungsmenge durch eine externe Schaltung oder direkt im Bildelement geschieht, wird die Technologie als *Passive Pixel Sensoren* oder *Active Pixel Sensoren* bezeichnet. Beide Prinzipien unterscheiden sich in relevanten Eigenschaften, weshalb ihre Eignung für die Bildmessung kurz besprochen werden soll.

Neben günstigem Fehlerverhalten im Sinne der Anforderungen aus Kap. 4.1, wird vor allem gefordert, dass die Belichtungszeit exakt und für alle Pixel synchron gesteuert werden kann. Dies ergibt sich aus der Notwendigkeit der Synchronisierung zwischen Blitz-Beleuchtungseinheit und Bildaufnahme (vgl. Kap. 4.5).

Passive Pixel Sensoren sind i.d.R. als sog. Charge Coupled Devices (CCD) aufgebaut, bei denen die photoempfindlichen Zellen als eine Art Schieberegister ausgelegt

<sup>196</sup> vgl. ISO/IEC, 15775



werden. Nach einer Belichtung wird die in einer Zelle gesammelte Ladung mittels einer Elektrodenanordnung spaltenweise zum Rand des Sensors verschoben und dort über ein weiteres senkrecht angeordnetes Schieberegister (pixelweise) einem AD-Wandler zugeführt.

Eine sehr exakte Steuerung der Belichtungszeit ist mit diesem Konzept noch nicht möglich, da der Ladungstransport Zeit in Anspruch nimmt, währenddessen eine weitere (unkontrollierte) Belichtung stattfindet. Dieser Nachteil wird durch die sog. Interlinetransfer-Architektur weitgehend beseitigt. Dazu wird jedem Pixel eine weitere lichtdicht abgedeckte Speicherzelle zugeordnet, in welche sein Inhalt nach der Belichtung verschoben wird. Aus den Speicherzellen kann das Bild ohne „Zeitdruck“ ausgelesen werden, während der eigentliche Pixel bereits wieder belichtet wird. Sog. Mikrolinsen-Arrays die das einfallende Licht auf die Pixel konzentrieren sorgen dafür, dass durch die abgedeckten Speicherzellen keine lichtempfindliche Sensorfläche verloren geht.

Um eine Belichtungszeit zu erzielen die kürzer ist, als die Ausleseperiode wird ein weiterer Trick angewandt. Dazu wird durch Anlegen einer zusätzlichen positiven Spannung an die Zellen die entstehende Ladung ständig abgeführt. Zum Start der Belichtung wird diese Spannung abgeschaltet und die Akkumulation beginnt, bis sie durch einen Auslesevorgang beendet wird.

Durch die Einfachheit des CCD-Prinzips Auslesevorgang beendet wird und vor allem durch die Tatsache, dass alle Pixel im Ausleseprozess den gleichen Verstärker und A/D-Wandler durchlaufen, haben Sensoren dieser Art eine besonders hohe räumliche Homogenität.<sup>197</sup>

Active Pixel Sensoren unterscheiden sich von ihrem passiven Pendant im Wesentlichen dadurch, dass die Verstärker- und Ausleseelektronik direkt in die Pixel integriert wird. Da auch weitere Komponenten wie A/D-Wandler und Schnittstellen auf dem gleichen Chip vereint werden, entstehen kompaktere Designs mit weitaus geringeren Kosten.

Die aktiven Pixel können parallel und damit sehr schnell ausgelesen werden und es können insgesamt höhere Auflösungen und Bildfrequenzen als bei CCD-Sensoren erreicht werden. Durch die Möglichkeit der Auslese von Teilbildern, kann die Bildfrequenz bei gleicher Datenstrombreite sogar noch weiter erhöht werden.

Der Nachteil der Verringerung der lichtempfindlichen Fläche durch die komplexe Verarbeitungselektronik eines Pixels wird bei modernen Sensortypen durch Mikrolinsenarrays zum Teil kompensiert.

Dennoch stellt diese Verarbeitungselektronik für die hochgenaue Bildmessung den größten Nachteil dieses Sensortyps dar. Da jedem Pixel ein eigener Verstärker zugeordnet ist und die Verstärkungsfaktoren und Offsets weniger konstant sein können als bei Anwendung nur einer Auswerteelektronik, ist das resultierende Bild mit höherem Rauschen belegt und räumlich inhomogener als bei CCD-Sensoren.

Weitere Nachteile ergeben sich durch die Belichtungssteuerung. Übliche Aktive-Pixel-Sensoren verfügen über einen sog. „Rolling-Shutter“. Dazu werden die Pixel

---

<sup>197</sup> vgl. Jähne (2012, 200)

nacheinander Spalten und Zeilenweise ausgelesen. Dies geschieht also nicht zeitsynchron, wie es für die Aufnahme bewegter Messbilder erforderlich wäre. Eine synchrone Belichtungssteuerung kann zwar realisiert werden. Dazu muss jedoch jeder aktive Pixel um ein Speicherelement und die zugehörige Steuerlogik erweitert werden, wodurch weitere Chipfläche verbraucht wird und sich die Eigenschaften des Sensors verschlechtern. Auch sind Industriekameras dieser Art auf dem Markt zum aktuellen Zeitpunkt noch kaum verfügbar.<sup>198</sup>

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass die CCD-Technologie derzeit lichtempfindlichere, rauschärmere und uniformere Sensoren hervorbringt als die Aktive-Pixel-Technik. Diese für Messkameras positiven Eigenschaften überwiegen die Nachteile der geringeren Integrationsdichte und des höheren Preises. Für diese Arbeit wurde daher ein passiver Sensor in CCD-Technik (der *Sony ICX274*<sup>199</sup>) gewählt. Jedoch sind in der Aktive-Pixel-Sensor Technologie rasante Fortschritte zu beobachten, so dass deren Nachteile zukünftig möglicherweise nicht mehr ins Gewicht fallen.

---

<sup>198</sup> vgl. Jähne (2012, 201)

<sup>199</sup> vgl. Sony Inc. (2014)

---

## VERZEICHNISSE

### Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht ausgewählter Messprinzipien und Verfahren für Sensoren der Koordinatenmesstechnik.....	15
Tabelle 2: Pose- und Bahnunsicherheiten konventioneller, kalibrierter und zyklisch rekali- brierter Industrieroboter. ....	22
Tabelle 3: Übersicht der Messprinzipien zur Messung von Position bzw. Pose. ....	27
Tabelle 4: Übersicht photogrammetrische 6D-Pose-Sensoren. ....	32
Tabelle 5: Bildrauschen einer DMK23G274 CCD-Kamera bei unterschiedlichen Temperaturen. ....	77
Tabelle 6: Übersicht über die Funktion der einzelnen Stufen der Bildaufnahmesimulation .....	85
Tabelle 7: Übersicht der relevanten Systemparameter. Die für den Systemaufbau zu ermittelnden Zielpa- rameter sind unterstrichen dargestellt. ....	88
Tabelle 8: Dominante Abhängigkeiten der Systemparameter einer Kamera- /Beleuchtungseinheit. ....	90
Tabelle 9: Optimierte Objektiv- und Beleuchtungs-Parameter einer Bildaufnahmeeinheit auf Basis einer DMK273 Kamera.....	99
Tabelle 10: Übersicht der intrinsischen Kameraparameter. ....	145
Tabelle 11: Ergebnis der Kamerakalibrierung unter Verwendung von ca. 20 Kalibrier- aufnahmen.....	151
Tabelle 12: Ergebnis der fehlerbereinigten und optimierten Kamerakalibrierung. ..	156
Tabelle 13: Transformationen in einem CPMS-Abbildungsmodell, die zugehörigen Pose- Vektoren und ihre Bedeutung.....	164
Tabelle 14: Formulierung der Abbildung eines 3D-Referenzpunktes einer Zielmarke und Aufstellung einer Modellfunktion $f$ . ....	165
Tabelle 15: Tabellarische Notation der Beobachtungen (Projektionen) der diversen Zielmarken mit ihren Referenzpunkten auf den Kamerabildern. ....	166
Tabelle 16: Hebelfaktoren zwischen Bildmessfehler $s$ und Pose-Fehler für a) 1- Kamera und b) 2-Kamera-System.....	181
Tabelle 17: Hebelfaktoren zwischen Bildmessfehler $s$ und Pose-Fehler für a) 3- Kameras orthogonal und b) 3-Kameras in planarer Anordnung.. ....	186
Tabelle 18: Festsetzung ausgewählter Systemparameter bei a) Kalibrierung an Referenzmarken, b) Kalibrierung an Referenzmesssystem und c) Vorkalibrierung der Kamera-Posen. ....	200

Tabelle 19: Gegenüberstellung der erzielbaren Richtigkeit und Präzision bei Kalibrierung an Referenzmarken bzw. an einem Referenzmesssystem am Beispiel-CPMS (Kap. 7.6.2) .....	214
Tabelle 20: Übersicht verwendeter Formelzeichen.....	227
Tabelle 21: Übersicht verwendeter Abkürzungen.....	229

---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gegenüberstellung der Messunsicherheit marktüblicher Sensoren mit der Positionsunsicherheit von Industrierobotern und KMGs.....	2
Abbildung 2: Beispielhaftes Einsatzszenario des CPMS zur verbesserten Messung der Pose eines robotergeführten Laser-Triangulations-Sensors.....	4
Abbildung 3: Robotergestütztes Inline-Messsystem zur Vermessung von Spaltmaßen an Karosserien mit dualem Laser-Lichtschnitt-Sensor und intelligenter Bildverarbeitung zur automatischen Spaltverfolgung (Bild: Institut für Technik und Informatik, TH-Mittelhessen). .....	13
Abbildung 4: Prinzip der Laser-Triangulation zur 1D- und 2D-Abstandsmessung. ..	17
Abbildung 5: Auswirkung des Orientierungsfehlers zwischen Sensor- und Weltkoordinatensystems auf die Positionswahrnehmung eines Messmerkmals. ....	19
Abbildung 6: Pose-Genauigkeit (AP), Pose-Wiederholgenauigkeit (RP), Bahngenauigkeit (AT) und Bahnwiederholgenauigkeit (RT) von Industrierobotern nach ISO-9283.....	20
Abbildung 7: Photogrammetrischer Vorwärtsschnitt a) zur Messung von 3D-Punkten bei zwei oder mehr bekannten Kamera-Posen und Rückwärtsschnitt b) zur Berechnung der Kamera-Pose relativ zu einem Objekt (Target) mit min. drei bekannten 3D-Punkten.....	28
Abbildung 8: Gegenüberstellung von a) Auge-Zu-Hand und b) Auge-In-Hand-Prinzip (Draufsicht von oben).....	29
Abbildung 9: Varianten von Targets für die 6D-Pose-Messung: a) aktives LED-Target zur Objekt-Targetierung bei AZH-Prinzip (NDI), b) raumfestes aktives LED-Flächentarget für einen AIH-Sensor (Pose-Eye), c) passives Target.....	31
Abbildung 10: Grundschemata der (mehr-)kamerabasierten Pose-Messung nach dem Auge-In-Hand-Prinzip.....	36
Abbildung 11: a) Schematischer Aufbau einer Zielmarke und b) ihre Abbildung im Kamerabild. ....	37
Abbildung 12: Beispielhaftes Einsatzszenario des CPMS zur verbesserten Messung der Pose eines Robotergeführten Lichtschnittscanners und Registrierung der einzelnen Scan-Linien in einem gemeinsamen Koordinatensystem. ....	38
Abbildung 13: Zusammenwirken der einzelnen Komponenten des CPMS. Die Steuerung zeitkritischer Abläufe übernimmt ein Mikrocontroller. Durch die Zuordnung eines Zeitstempels wird die Pose-Messung eindeutig. ....	39
Abbildung 14: a) 3-Kamera Test-System und b) Testaufbau auf einem XYZ Lineartisch für Versuche zur Bildmessung und Kalibrierung.....	40

Abbildung 15: Pose eines Punktes $\mathbf{p}_i$ im Basiskoordinatensystem $\mathbf{K}_i$ . Durch eine Pose wird zugleich ein neues System $\mathbf{K}_{i+1}$ aufgespannt. ....	41
Abbildung 16: Blockdiagramm eines CPMS bestehend aus Modulen zur <i>Bildaufnahme</i> , <i>Bildmessung</i> (cyan) und <i>Pose-Messung</i> (gelb). ....	44
Abbildung 17: Anwendung der Simulationsumgebung zur a) Analyse der Bildmessung mit dem Bildaufnahme-Simulator (BAS) und b) Analyse der Pose-Messung mit dem Bildmess-Simulator (BMS). ....	46
Abbildung 18: Simulation der Bildaufnahme einer Zielmarke mit anschließender Bildmessung und Bestimmung des Bildmessfehlers $\varepsilon_{u,j}$ . ....	47
Abbildung 19: Simulation der Bildmessung für ein komplettes CPMS mit anschließender Pose-Messung und Bestimmung des Pose-Messfehlers $\varepsilon_{p,j}$ . ...	48
Abbildung 20: Prinzip der Berechnung einer Zwischen-Pose am Beispiel einer linearen Interpolation. ....	50
Abbildung 21: Prinzipielle Funktionsweise eines Objektivs bei Abbildung eines Objektpunktes in Gegenstandsweite $g$ . Die Kamerakonstante $c$ bezeichnet den Abstand zwischen Objektiv- und Bildebene. Die Objektivbrennweite $f$ entspricht nur im Ausnahmefall des unendlich entfernten Objektes der Kamerakonstante $c$ . ....	56
Abbildung 22: Schärfentiefe bei Abbildung unterschiedlich weit entfernter Objektpunkte ( $Q, P, R$ ) bei a) offener Blende und b) teilweise geschlossener Blende. Die von den Punkten $Q$ und $R$ vor bzw. hinter der Objektebene ausgehenden Lichtstrahlen vereinen sich nicht in der Bildebene, die mit dem einfallenden Lichtbündel einen Kegelschnitt bildet. Es entstehen Zerstreuungskreise mit Durchmesser $\xi$ . ....	60
Abbildung 23: a) Beugungsbild hinter einer kreisförmigen Blende, b) die Intensität des gebeugten Lichts kann mit der Besselfunktion $J_1$ beschrieben werden, deren erste Nullstelle das zentrale Beugungsscheibchen begrenzt. ....	62
Abbildung 24: Abbildung einer von der Objektfläche $A$ remittierten Leuchtdichte $L$ unter einem mittleren Bildwinkel $\theta$ auf der Bildfläche $A'$ . ....	64
Abbildung 25: a) Kissen- und c) Tonnenförmige Verzeichnung eines gleichförmigen Gitters b) bei Objektiven mit radialer Verzeichnung. ....	66
Abbildung 26: a) Geöffnete DMK23G274 Kamera mit b) dem Sony ICX274 Bildsensor. ....	74
Abbildung 27: Belichtungsreihe zur Prüfung der Linearität einer DMK23G274 Kamera. Die rote Linie beschreibt die Abweichung der Testmessungen (blau) vom ideal linearen Verhalten. ....	75
Abbildung 28: Beleuchtung einer planen Fläche mit a) einer kollinierten Lichtquelle und b) einer kegelförmigen Lichtquelle. ....	79
Abbildung 29: Beispiel eines LED-Chip mit integrierter Optik und 3,45mm Kantenlänge ( <i>Cree XLamp XT-E</i> ). ....	80

Abbildung 30: Prinzipieller Aufbau einer Bildaufnahmeeinheit aus Kamera und koaxial angeordneten Lichtquellen.....83

Abbildung 31: Übersicht über den Ablauf der Bildaufnahmesimulation in den vier Simulationsstufen Lichtquelle, Zielmarke, Objektiv und Bildsensor.....84

Abbildung 32: Simulierte Aufnahme einer mittels Punktlichtquelle beleuchteten Testmarke mit dem BAS. Zu sehen sind das Albedo der Testmarke (links oben), die resultierende Leuchtdichte (rechts oben), Bestrahlungsbild des Sensors (links unten) und das gewandelte Grauwertbild (rechts unten). .....86

Abbildung 33: Abhängigkeit der Schärfentiefe  $\Delta d$  (oben) und der erforderlichen Beleuchtungsleistung (unten)  $P_L$  von der Lichtwellenlänge  $\lambda$ . Ein guter Kompromiss aus Schärfentiefe und Strahlleistung ergibt sich im Beispiel bei  $\lambda \sim 500nm$  mit  $\Delta d \sim 1,3m$  und  $P_L \sim 20W$ .....93

Abbildung 34: Wellenlängenabhängige Quanteneffizienz eines Sony ICX274 Bildsensors. Das Effizienzmaximum liegt bei etwa  $\lambda=500nm$ .....94

Abbildung 35: Einfluss des Arbeitsabstandes  $g$  auf die erreichbare Schärfentiefe  $\Delta d$  (oben), die notwendige Strahlleistung  $P_L$  und die Stärke der relativen Auflösungs-  $\Delta R_r$  bzw. Helligkeitsabnahme  $\Delta E_T$  (unten). Im oberen Grafen sind zusätzlich Nah- und Fernpunkt (blau, gestrichelt) und die erforderliche Objektivbrennweite  $f$  (grüne Linie) nebst den marktverfügbaren Objektiven (rote Kreise) eingezeichnet.....96

Abbildung 36: Abhängigkeit von Schärfentiefe  $\Delta d$ , Brennweite  $f$  und Blendenzahl  $k$  (oben) und der erforderlichen Strahlleistung  $P_L$  (unten) von der Pixelgröße  $S_p$ . Die Schärfentiefe wird durch die Pixelgröße kaum beeinflusst, die Strahlleistung  $P_L$  steigt nur bei  $S_p < 4\mu m$  nennenswert an. Die Brennweite  $f$  steigt mit  $S_p$ , aber auch die Blendenzahl  $k$ , mit dem Resultat, dass die Eintrittspupille  $D$  nahezu konstant bleibt. ....97

Abbildung 37: Typische Varianten punktförmiger a), kreisförmiger b) und linienhafter Zielmarken c). Die grünen Kreuze kennzeichnen die Bezugspunkte. Rote Linien markieren die Objektkanten. .... 105

Abbildung 38: a) Vergrößertes Suchfenster der Subpixelinterpolation mit angedeutetem Gradienten (blaue Pfeile) und b) schematische Darstellung des Ansatzes. Alle Vektoren  $\vec{p}_k \vec{q}$  stehen orthogonal zum Gradienten an der Stelle  $p_k$ ..... 107

Abbildung 39: Auswirkung der Kameraaussteuerung auf die Messunsicherheit bei der Bildmessung. Die roten Pfeile (oben) zeigen qualitativ die Abweichung der gemessenen von der korrekten Bildposition für eine Aussteuerung von 100% (links) bzw. 10% (rechts). Die unteren beiden Abbildungen zeigen den Fehler  $\Delta x$  und  $\Delta y$  der Messpunkte mit Schwerpunkt  $c$ ..... 111

Abbildung 40: Standardabweichung  $\sigma$  einer Bildmessung (oben) über 48 Punkte einer Zielmarke, in Abhängigkeit zur Aussteuerung des Bildsensors. .... 112

- Abbildung 41: Subpixel genaue Antastung einer vertikalen Kante. Dazu werden Pixel orthogonal zur Kante (links) in ein Diagramm eingezeichnet (rechts). Die Kantenmitte entspricht dem Extremum der 1. Ableitung (blaue Linie) bzw. der Nullstelle (grüner Kreis) der 2. Ableitung (rote Linie).  $\Delta x$  ist die Position relativ zur Kantenmitte,  $I$  stellt die auf 1 normierte Helligkeit dar. ....113
- Abbildung 42: Vergleich der Intensität  $I$  über einem homogen beleuchteten Dunkel-/Hellübergang (links) und einem Übergang mit ansteigender Beleuchtungsstärke (rechts). ....114
- Abbildung 43: Bildmessfehler bei linear ansteigender Bestrahlung (links) und Ausschnittsvergrößerung (rechts). Die Kantenlage wird fehl bestimmt, bei  $\Delta x=0,2$  statt  $\Delta x=0$ . ....114
- Abbildung 44: Verlauf einer in x-Richtung linear ansteigenden Bestrahlung einer Zielmarke (links) und deren Auswirkung auf die Bildmessung (rechts). Die roten Pfeile zeigen den Bildmessfehler  $\Delta x$  (100x verstärkt) an. ....116
- Abbildung 45: Bestrahlung durch eine Punktlichtquelle in 0,7m Abstand bei exzentrisch positionierter Zielmarke (links). Die gemessenen Bildpositionen (rechts) erscheinen zur helleren Bildmitte hin systematisch verschoben. ....117
- Abbildung 46: Bildmessfehler  $\Delta_{x,y}$  in Pixel für den linear in x-Richtung ansteigenden (links) und den kegelförmigen (rechts) Bestrahlungsverlauf. ....118
- Abbildung 47: Kamerabild (links) und das mittels Sobel-Operator generierte Gradientenbild (rechts). ....121
- Abbildung 48: Binarisierung der Ableitung  $I'$  (links) und Abschätzung der Zerstreuungskreisradien  $Z_{est/2}$  auf Basis der Linienbreiten (rechts). ....122
- Abbildung 49: *Links*: Histogrammauswertung des distanztransformierten Ergebnisbildes. *Rechts*: Vergleich der geschätzten (blau) mit der tatsächlichen Punktspreizfunktion (grün). ....123
- Abbildung 50: Querschnitt durch die Bestrahlungsstärke einer Zielmarke mit 200mm Breite in  $r_0=500$ mm Abstand einer Punktlichtquelle (grün) und Näherung durch ein Polynom 2. Grades (blau). ....124
- Abbildung 51: Simulierte Aufnahme einer exzentrisch angeordneten Zielmarke (links) und Maskierung der Bildbereiche mit bekanntem Albedo zur Aufstellung des Bestrahlungsmodells. ....125
- Abbildung 52: Bestrahlungsstärke  $E$  innerhalb der Objektebene (links) und deren Annäherung durch ein Bestrahlungsmodell  $E_{mod}$  auf Basis einer Polynomfläche 2. Grades (rechts). Die Bestrahlungsstärke wurde jeweils auf 100% normiert. ....126
- Abbildung 53: Vergleich des Bildmessfehlers ohne (links) und mit Homogenisierung der Bestrahlungsstärke durch ein globales Beleuchtungsmodell (rechts). ....127
- Abbildung 54: Inhomogen ausgeleuchtete Zielmarke (links) und Maske zur Ausblendung von Schwarzfeldern und unscharfen Übergängen. ....129



Abbildung 55: Schätzung der Beleuchtungsstärke innerhalb der Arbeitsfenster der Subpixelinterpolation (links) und die zugehörigen homogenisierten Bereiche des Eingangsbildes (rechts)..... 130

Abbildung 56: Falschfarbendarstellung einer periodischen Schwankung der Bestrahlungsstärke  $E$  über einer Zielmarke (links) und die lokale Schätzung dieser Schwankung durch die Modellfunktion  $E_{mod}$ ..... 131

Abbildung 57: Vergleich des Bildmessfehlers ohne (links) und mit Homogenisierung der Bestrahlungsstärke durch ein lokales Beleuchtungsmodell. .... 132

Abbildung 58: Bewegungsunschärfe bei einer horizontalen Querbewegung zwischen Kamera und Motiv. a) Kanten quer zur Bewegung werden verwischt. b) zeigt die in den Pixel akkumulierte Helligkeit (blau), wenn während Belichtungs-Start  $t_1$  und -Ende  $t_2$  eine gleichförmige Bewegung stattfand. Eine Bildmessung schätzt eine mittlere Kantenlage (grün). .... 133

Abbildung 59: Fehlmessung  $\Delta x_0$  einer Kantenlage bei gleichförmiger Bewegung (links) und beschleunigter Bewegung (rechts)..... 136

Abbildung 60: Lochkamera als Modell der idealen Abbildung. .... 140

Abbildung 61: Projektion eines Weltpunktes  $\mathbf{P}_w$  auf die Bildebene einer Kamera mittels Lochkameramodell. .... 142

Abbildung 62: a) Lokalisierung der Referenzpunkte auf dem Kalibriermuster und b) subpixelgenaue Bestimmung des Kreuzungspunktes nach Kap. 5.2. .... 149

Abbildung 63: Räumliche Visualisierung der Kameraposen bei Aufnahme der Kalibrierbilder. .... 150

Abbildung 64: Fehler bei der Bildmessung. a) Fehlervektoren zeigen systematische Fehlmessung von Teilgruppen. b) zeigt den Reprojektionsfehler in Pixeln. 152

Abbildung 65: Beispielhafter Reprojektionsfehler bei einer Gruppe aus drei Kalibrieraufnahmen a), b) und c) nach Optimierung der Bildmessung. Der Fehler d) der Bildmessungen in Pixeln ist für alle Aufnahmen nahezu gaußverteilt. Die in den Bildern eingezeichneten Fehlervektoren zeigen keine Systematik oder Ausreißer..... 153

Abbildung 66: Visualisierung der radialen Verzeichnungskomponente nach Bestimmung aller radialen- und tangentialen Koeffizienten. .... 154

Abbildung 67: Visualisierung der tangentialen Verzeichnungskomponente nach Bestimmung aller radialen- und tangentialen Koeffizienten ..... 155

Abbildung 68: Visualisierung der radialen Verzeichnung unter Verwendung eines reduzierten Modells, bestehend aus Radialkomponenten 1. und 2. Ordnung..... 156

Abbildung 69: Modellierung des photogrammetrischen Abbildungsmodells eines Mehrkameranystems auf Basis von homogenen Koordinatentransformationen und der normierten Zentralprojektion. .... 163

Abbildung 70: Beispielhafter Aufbau der Jakobimatrix für ein CPMS mit 3 Kameras  $\mathbf{e}_1 \dots \mathbf{e}_3$  und 3 Zielmarken  $\mathbf{t}_1 \dots \mathbf{t}_3$ . .... 173

Abbildung 71: Änderung der Bildkoordinaten bei einer Translation zwischen Kamera und Objekt um a) einen Betrag $\Delta y$ transversal bzw. b) $\Delta x$ lateral zur optischen Achse.....	174
Abbildung 72: Analyse der linearen Abbildung $J$ zwischen Pose und Bildmessung mittels der Singulärwertzerlegung.....	177
Abbildung 73: Dominanter Pose-Fehler $\Delta \mathbf{g}_{dom}$ und mittlerer zu erwartender Gesamt-Pose-Fehler $\Delta \mathbf{g}_{exp}$ .....	178
Abbildung 74: Grundkonfiguration für eine Kamera $\mathbf{E}_i$ die ein Target $T_j$ im Abstand $r$ beobachtet.....	180
Abbildung 75: Analyse und Visualisierung des Pose-Messfehlers einer 1-Kamera-Konfiguration. Das blaue Kreuz kennzeichnet den Ursprung des System-KS. Eine Bewegung auf der rot gestrichelten Bahn, führt nur zu geringer Bildänderung und ist damit schwer messbar.....	182
Abbildung 76: Nicht erkennbare Bewegungen bei der Beobachtung einer 1-Punkt-Zielmarke mit 1 Kamera. Keine Bildänderung bewirken (1) Rotation um opt. Achse, (2) Verschiebung entlang opt. Achse, (3)+(4) Rotationen um Zielpunkt.....	183
Abbildung 77: Analyse und Visualisierung des Pose-Messfehlers einer 2-Kamera-Konfiguration.....	184
Abbildung 78: Schwer detektierbare Bewegungen bei der 2-Kamera-Konfiguration: (1) wird blockiert, (2) wird zu einer Bogenbewegung (5), (3) und (4) reduzieren zu einer Rotation um die Verbindungsachse der beiden Zielpunkte (6).....	185
Abbildung 79: Analyse und Visualisierung des Pose-Messfehlers einer 3-Kamera-Konfiguration mit orthogonaler Kameraausrichtung.....	186
Abbildung 80: a) Anordnung von 3 Kameras entlang der kartesischen Koordinatenachsen, b) planare Kameraanordnung im Winkel von $120^\circ$ .....	187
Abbildung 81: Visualisierung einer 3-Kamera-Konfiguration mit planarer $120^\circ$ Kameraausrichtung.....	188
Abbildung 82: Histogramm der Fehleranalyse des Pose-Fehlers $ \Delta \mathbf{g}_{exp} $ bei der planaren 3-Kamera-Konfiguration. Stichprobe aus $N=1000$ Posen $\mathbf{g}$ in einem Messvolumen von $(800 \times 800 \times 800) \text{mm}^3$ . Mittel= $21,7 \mu\text{m}$ , $s=1,4 \mu\text{m}$ .....	190
Abbildung 83: 3D-Visualisierung des Pose-Fehlers $ \Delta \mathbf{g}_{exp} $ innerhalb des Messvolumens der planaren 3-Kamera-Konfiguration.....	191
Abbildung 84: Beispielhaftes CPMS mit zylindrischem Messvolumen und planarer $120^\circ$ -3-Kamera-Konfiguration. Das Messvolumen wird durch den grauen Zylinder angedeutet. Die opt. Achsen der drei Kameras sind durch cyan-, gelb- und magentafarbene Linien gekennzeichnet.....	194
Abbildung 85: Minimalabstand von Zielmarken: Wenn der Abstand $\mathbf{A}_i$ zweier Zielmarken kleiner ist, als die Breite der Objektebene $\mathbf{o}$ abzüglich der	

Zielmarkenbreite $S_z$ , so wird mindestens eine Zielmarke vollständig abgebildet.....	195
Abbildung 86: Prinzipielle Darstellung der Kalibrier-Posen. Der Messkopf beschreibt eine Kreisbahn im Gegenuhrzeigersinn (großer Pfeil) und wird zugleich im Uhrzeigersinn (kleiner Pfeil) um seine Hochachse gedreht.....	196
Abbildung 87: Mess-Posen: Der Messkopf fährt innerhalb des Messvolumens zufällige Posen an. Variiert werden alle 6 Pose-Parameter, der Kippwinkel um die Hochachse ist so eingeschränkt, dass im Bildfeld jeder Kamera eine Zielmarke ist.....	197
Abbildung 88: Prinzip a) der Kalibrierung an Referenztargets und b) der Kalibrierung an einem Referenzmesssystem.....	199
Abbildung 89: Registration von Zielmarken ausgehend von einer Referenzmarke 1 durch überlappende Aufnahme der Bilder a-c. Marke 5 wird aufgrund fehlender Überlappung von Bild d nicht registriert.....	202
Abbildung 90: Kalibrierergebnis: Simultane Kalibrierung von Kamera-, System- und Target-Posen. Hellblaue Balken zeigen Winkelfehler, dunkelblaue Positionsfehler. Kalibriert wurden 3 Kameras (1. Zeile), 26 System-Posen (2. Zeile) und $3 \times 26 = 78$ Zielmarken (3. Zeile). Es fällt auf, dass die Orientierung der Zielmarken nur ungenau bestimmt werden kann.....	203
Abbildung 91: Richtigkeit und Präzision des CPMS über 52 Test-Messungen aus zufällig gewählten 6D-Posen.....	204
Abbildung 92: Entwicklung von Richtigkeit (blau) & Präzision (grün) in Abhängigkeit von der Anzahl der eingesetzten Referenz-Marken.....	205
Abbildung 93: Reduzierte CPMS-Konfiguration mit 28 Zielmarken (statt 78) zur Kalibrierung am Roboter-Messsystem oder einem Referenz-Messsystem..	207
Abbildung 94: Richtigkeit und Präzision des reduzierten CPMS. Die angegebene Richtigkeit gilt in Bezug auf das angewendete Referenz-Messsystem.....	208
Abbildung 95: Vorkalibrierung der Kamera-Posen $e$ mittels eines X/Y-Lineartisches als Positioniereinheit und Referenzsystem.....	209
Abbildung 96: Vorkalibrierung der Kamera-Posen $e$ mittels zweier Rotationsachsen $\alpha$ und $\beta$ .....	210
Abbildung 97: Softwaretechnischer Ablauf einer Pose-Messung des CPMS am Beispiel eines 3-Kamera-Systems. Zur effizienten Bildverarbeitung wird jeder Kamera ein Thread (Prozessorkern) zugeordnet.....	232
Abbildung 98: Klassendiagramm zur Darstellung der statischen Softwarearchitektur des CPMS.....	233
Abbildung 99: Sequenzdiagramm zur Darstellung des Ablaufs einer 6D-Pose-Messung.....	235
Abbildung 100: Siemensstern nach ISO 15775 zur Bestimmung des Auflösungsvermögens: a) Original Testmuster, b) nach Abbildung durch ein Bildaufnahmesystem.....	236



---

## Literaturverzeichnis

- ABB* (2015): Datenblatt: IRB-2600ID, [https://library.e.abb.com/public/27ba926f04b3b3bdc1257de4002d28dd/Datenblatt%20IRB2600ID\\_lowres.pdf](https://library.e.abb.com/public/27ba926f04b3b3bdc1257de4002d28dd/Datenblatt%20IRB2600ID_lowres.pdf) (Zugriff: 15.11.2015)
- Abrens, O.* (2001): Mikrosystemtechnische Sensoren in relativ bewegten Systemen für die industrielle Anwendung, Dissertation, Universität Bremen
- Alban, T.* (2001): Dynamische Roboterkalibrierung zur Erhöhung der Bahnengenauigkeit, Dissertation, Saarbrücken, Universität des Saarlandes
- Alban, T./Janocha, H.* (11/2000): Dynamisches Vermessen von Robotern mit Inertialmesssystemen, in: tm–Technisches Messen: Plattform für Methoden, Systeme und Anwendungen der Messtechnik 11/2000, Heft 67, S. 457
- Armstrong, B. u. a.* (2002): RGR-3D: simple, cheap detection of 6-DOF pose for teleoperation, and robot programming and calibration, International Conference on Robotics and Automation, ICRA'02, Vol. 3, S. 2938-2943, IEEE
- Automated Imaging Association: GigE-Vision Camera Interface Standard, Ausgabe: 2006, <http://www.visiononline.org/vision-standards-details.cfm?type=5> (30.10.2014)
- Bauernhansl, T.* (2014): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien und Migration, Wiesbaden: Springer Vieweg
- Beyer, L.* (2004): Genauigkeitssteigerung von Industrierobotern: Insbesondere mit Parallelkinematik, Dissertation, Hamburg, Helmut-Schmidt-Universität
- Bongardt, T.* (2004): Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern, Dissertation, Technische Universität München
- Bougut, J.* (2015): Camera Calibration Toolbox for Matlab, [http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/) (Zugriff: 9.11.15)
- Bremer, G.* (2012): Bestimmung der räumlichen und zeitlichen Hand-Augen-Kalibrierung an einem autonomen Fahrzeug, Diplomarbeit, Freie Universität Berlin
- Bridges, B.* (2015): How Laser Trackers Work: Accuracy, speed, and minimum advance preparation, make laser trackers among the most versatile of CMMs, <http://www.qualitydigest.com/> (Zugriff: 25.11.2015)
- Cree* (2016): Datenblatt, Cree XLamp CT-E, <http://www.cree.com/~media/Files/Cree/LED-Components-and-Modules/XLamp/Data-and-Binning/XLampXTE.pdf> (Zugriff: 20.4.2016)
- Daniilidis, K./Bayro Corrochano, E.* (1996): The dual quaternion approach to hand-eye calibration, Proceedings of the 13th International Conference on Pattern Recognition, Vol. 1, S. 318-322, IEEE

- DIN 55350-13: Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik; Begriffe zur Genauigkeit von Ermittlungsverfahren und Ermittlungsergebnissen, Ausgabe: 1987
- Du, G./Zhang, P.* (2013): Online robot calibration based on vision measurement, in: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 06 (2013), Heft 26, S. 484–492
- European Machine Vision Association: GenICam Standard, Ausgabe: 2006, <http://www.emva.org/cms/index.php?idcat=27> (30.10.2014)
- Fox, J./Janocha, H.* (2005): Robotergestütztes Verfahren zur dynamischen Kalibrierung von Inertialmesssystemen, [http://www.lpa.uni-saarland.de/pdf/2005/fox\\_ahmt05.pdf](http://www.lpa.uni-saarland.de/pdf/2005/fox_ahmt05.pdf) (Zugriff: 21.4.2016)
- Gräser, R.-G.* (1999): Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern, Dissertation, Technische Universität München
- Gumbrell, E. T.* (2011): The Laser- $\mu$ GPS: a new concept in optical measurement technology, 11th Workshop of Marie Curie Fellows on Research Training in Progress, Berlin
- Haferkorn, H.* (2008): *Optik: Physikalisch-technische Grundlagen und Anwendungen*: John Wiley & Sons
- Hanning, T.* (2011): *High Precision Camera Calibration*, Wiesbaden: Vieweg+Teubner
- Hecht, E.* (1994): *Optik*, 2. Aufl., Bonn: Addison-Wesley
- Heikkilä, J./Silven, O.* (1997): A four-step camera calibration procedure with implicit image correction, IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE
- Hesse, S.* (2014): *Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation*, 6. Aufl.: Springer Vieweg
- Illemann, J.* (2015): *Aufbau, Funktionsweise Lasertracker und Produktübersicht*, [http://tu-dresden.de/die\\_tu\\_dresden/fakultaeten/fakultaet\\_forst\\_geo\\_und\\_hydrowissenschaften/fachrichtung\\_geowissenschaften/gi/ig/termine/papers/illemann.pdf](http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_forst_geo_und_hydrowissenschaften/fachrichtung_geowissenschaften/gi/ig/termine/papers/illemann.pdf) (Zugriff: 20.11.2015)
- ISO 8373: *Manipulating industrial robots - Vocabulary*, Ausgabe: 1996
- ISO 5725: *Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen*, Ausgabe: 2003
- ISO, E. N. 9283: *Manipulating industrial robots-Performance criteria and related test methods*, Ausgabe: 1999
- ISO/IEC 15775: *Information technology - Office machines - Method of specifying image reproduction of colour copying machines by analog test charts - Realisation and application*, Ausgabe: 1999
- Jähne, B.* (2012): *Digitale Bildverarbeitung*, Berlin/Heidelberg: Imprint: Springer
- Janesick, J. R.* (1985): CCD characterization using the photon transfer technique: Solid State Imaging Arrays, in: *Proc. SPIE*. 1985, Bd. 570, S. 7–19

- Kannala, J./Salo, M./Heikkilä, J.* (2006): Algorithms for computing a planar homography from conics in correspondence, in: BMVC 2006, S. 77–86
- Keferstein, C. P./Marxer, M.* (2015): Fertigungsmesstechnik: Praxisorientierte Grundlagen, moderne Messverfahren, 8. Aufl., Wiesbaden: Springer Fachmedien
- Kreutzler, M.* (2007a): Entwicklung eines auf optischen Signalmarken basierenden photogrammetrischen 3D-Rekonstruktionssystems, Masterarbeit, Gießen, Technische Hochschule Mittelhessen
- Kreutzler, M./Rinn, K./Wüst, K.* (2009): Signalmarken und Verfahren zur photogrammetrischen Vermessung von geometrisch unregelmäßigen Objekten, Patent: DE102007039077 A1, Deutschland
- Kreutzler, M. u. a.* (2014): Inline-Positionsbestimmung bei Industrierobotern, in: europäisches Fachmagazin *Inspect* 2014, Heft 5, S. 58–59
- Kreutzler, M. u. a.* (2007b): Stark im Doppel: Roboteraugen vermessen berührungslos Karosserie-Spalten, in: *Qualität und Zuverlässigkeit* 4 (2007b), S. 47–49, <http://www.qm-infocenter.de/directlink.asp?QZ102414> (Zugriff: 20.4.2016)
- KUKA* (2015): Datenblätter: KUKA KR 30 HA und KR30HA\_3: Präzisionsroboter von KUKA, [http://www.kuka-robotics.com/germany/de/products/industrial\\_robots/special/high\\_accuracy\\_robots/kr30\\_ha/start.htm](http://www.kuka-robotics.com/germany/de/products/industrial_robots/special/high_accuracy_robots/kr30_ha/start.htm) (Zugriff: 5.5.2016)
- Lange, F.* (2003): Adaptiv vorausplanende Steuerung für schnelle sensorbasierte Roboterbewegungen, Karlsruhe: KIT-Bibliothek
- Leica* (2015a): PCMM Systemspezifikationen: Leica Absolute Tracker und Leica T-Produkte, [http://www.aicon3d.de/fileadmin/user\\_upload/produkte/de/leica/leica\\_tprobe/pdf/Leica\\_Absolute\\_Tracker\\_PCMM\\_System\\_Specifications\\_DE.pdf](http://www.aicon3d.de/fileadmin/user_upload/produkte/de/leica/leica_tprobe/pdf/Leica_Absolute_Tracker_PCMM_System_Specifications_DE.pdf) (Zugriff: 20.11.2015)
- (2015b): Systemspezifikation für mobile KMG, [http://www.leica-geosystems.de/downloads123/m1/metrology/general/brochures-datasheet/Leica%20Absolute%20Tracker%20and%20PCMM%20specs\\_de.pdf](http://www.leica-geosystems.de/downloads123/m1/metrology/general/brochures-datasheet/Leica%20Absolute%20Tracker%20and%20PCMM%20specs_de.pdf) (Zugriff: 20.11.2015)
- Litfin, G.* (2005): Technische Optik in der Praxis: Herausgegeben von Gerd Litfin, Berlin/Heidelberg: Springer
- Löffler-Mang, M.* (2012): Optische Sensorik: Lasertechnik, Experimente, Light Barriers von Martin Löffler-Mang, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag
- Luhmann, T.* (2010): Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen Methoden und Anwendungen, 3. Aufl., Berlin: Wichmann
- Micro Epsilon* (2016): Datenblatt ScanControl: Laser-Profil-Sensoren zur Roboter-nachführung, <http://www.micro-epsilon.de/download/products/cat--scanCONTROL--de.pdf> (Zugriff: 20.4.2016)
- Moré, J.* (1978): The Levenberg-Marquardt algorithm: Implementation and theory, in: Watson (ed.): *Numerical Analysis*, Dundee 1977, Lecture Notes Math 1978, Heft 630, S. 105–116

- Müller, C. G./Werner G. (2008): Anordnung und Verfahren zu einer Bestimmung einer Position und/oder Orientierung zweier Objekte relativ zueinander, Patent: DE200810003282, Deutschland
- NDI (2015): Datenblatt: Optotrak Certus, <http://www.ndigital.com/> (Zugriff: 20.4.2016)
- Nguyễn, T. Trung (2014): Entwicklung eines optischen Multi-Lasertracker-Systems zur berührungslosen Positionsbestimmung in kinematischen Systemen, Dissertation, Technische Universität Ilmenau
- Nikon (2015): Datenblatt: K-Series Optical CMM solutions, [http://www.nikonmetrology.com/de\\_EU/content/download/11040/220148/version/4/file/Optical\\_CMM\\_EN.pdf](http://www.nikonmetrology.com/de_EU/content/download/11040/220148/version/4/file/Optical_CMM_EN.pdf) (Zugriff: 20.4.2016)
- Räsch, O. (2015): Steigerung der Arbeitsgenauigkeit bei der Fräsbearbeitung metallischer Werkstoffe mit Industrierobotern, Dissertation, München, Technische Universität München
- Ryberg, A. (2006a): A new Camera Model and Algorithms for higher Accuracy and better Convergence in Vision-based Pose Calculations, International Conference on Mechatronics and Automation, IEEE
- (2006b): A new Camera Model for Higher Accuracy Pose Calculations, International Symposium on Industrial Electronics Vol. 4, IEEE
- (2006c): Accuracy Investigation of a Vision Based System for Pose Measurements, CARCV'06: 9th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, IEEE
- Scansonic (2016): Datenblatt TH6D: Sensor zur optischen Nahtführung, [http://www.scansonic.de/files/downloads/scansonic\\_th6d\\_datasheet\\_v2.0\\_de.pdf](http://www.scansonic.de/files/downloads/scansonic_th6d_datasheet_v2.0_de.pdf) (Zugriff: 15.3.2016)
- Schaeper, M. (2014): Mehrdimensionale Ortsfiltertechnik, Wiesbaden: Imprint: Springer Vieweg
- Shan, L. (2012): Methode zur automatischen Registrierung und Fusion von Multi-sensordaten zur Charakterisierung von mehrskaligen Werkstücken, Dissertation, Erlangen, Universität Erlangen-Nürnberg
- Sony Inc. (2014): Datenblatt: Sony IX274 CCD-Bildsensor, <http://www.unibrain.com/wp-content/uploads/2013/04/ICX274AL.pdf> (Zugriff: 20.4.2016)
- Süsse, H./Rodner, E. (2014): Bildverarbeitung und Objekterkennung: Computer Vision in Industrie und Medizin, Wiesbaden: Springer Vieweg
- The Imaging Source GmbH (2014): Kameradatenblatt DMK23G274, [http://s1.dl.theimagingsource.com/api/2.0/packages/publications/factsheets-single/fsdmk23g274/b8a6fc062b/fsdmk23g274.de\\_DE.pdf](http://s1.dl.theimagingsource.com/api/2.0/packages/publications/factsheets-single/fsdmk23g274/b8a6fc062b/fsdmk23g274.de_DE.pdf) (Zugriff: 20.6.2016)
- The Mathworks Inc. (2015): Matlab, <http://de.mathworks.com/products/matlab/> (Zugriff: 20.4.2016)



- van Albada, G. Dick/Lagerberg, J. M./Visser, A.* (1994): A low-cost pose-measuring system for robot calibration: Universiteit van Amsterdam. Department of Computer Systems
- Weckenmann, A.* (2012): Koordinatenmesstechnik: Flexible Strategien für funktions- und fertigungsgerechtes Prüfen, 2. Aufl., München: Hanser Verlag
- Wiest, U.* (2001): Kinematische Kalibrierung von Industrierobotern, Dissertation, Karlsruhe, Universität Karlsruhe
- Wikipedia:* Koordinatenmessgerät, <https://de.wikipedia.org/wiki/Koordinatenmessgerät> (Zugriff: 24.2.2016)
- William, H.* (2007): Numerical recipes: The art of scientific computing, 3. Aufl., Cambridge [u.a.]: Cambridge Univ. Press
- Willow Garage* (2015): Open Computer Vision Library, <http://opencv.org> (Zugriff: 20.4.2015)
- Zhengyou, Z.* (2000): A flexible new technique for camera calibration, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE



## Index

- Abbildungsfehler 65
- Abbildungsmodell 5, 36
- absolutes Auflösungsvermögen 58
- Aktive Pixel-Sensoren 68
- Albedo 108
- Apertur 57
- Astigmatismus 65
- Auge-In-Hand (AIH) 29
- Auge-Zu-Hand (AZH) 29
- Bahngenauigkeit 20
- Bahnwiederholgenauigkeit 20
- Beleuchtungsstärke 77
- Bestrahlungsmodell 119
- Bestrahlungsstärke 81
- Beugungsunschärfe 61
- Bewegungsunschärfe 132
- Bildaufnahme-Simulator 8
- Bildaufnahmesimulator (BAS) 82
- Bildebene 56
- Bildelement, Pixel 67
- Bildfeldwölbung 65
- Bildhauptpunkt 141, 145
- Bildmessfehler 6
- Bildmess-Simulator 8
- Bildmessung 103
- Bildsensor 66
- Blende 57
- Blendenzahl 57
- Brennweite 57
- Bündelblockausgleichung 28
- Camera Calibration Toolbox 147
- Camera Calibration Toolbox für Matlab 144
- CCD-Sensoren 68
- Cholesky-Dekomposition 169
- Chromatische Messverfahren 18
- chromatischen Abbildungsfehler 65
- CPMS 2
- Cree XLamp XT-E 79
- Distanztransformation 121
- DMK23G274 73
- Dunkelstrom 67, 71
- Dunkelstrom \*DCNU( 67
- Dunkelwert 71
- Dunkelwert \*DSNU( 67
- Empfindlichkeit \*PRNU( 67
- Euler-Winkel 41
- extrinsische Kameraparameter 142
- Fernpunkt 60
- Focal Length 153
- Fraunhofer-Beugung 61
- Gegenstandsweite 57
- Gimbal-Lock 162
- Gradientenverfahren 168
- Heikkilä und Silvén 143
- Homogene Koordinaten 160
- Homogenität 78
- hyperfokale Entfernung 61
- Inertial-Messprinzip 25
- intrinsischen Kameraparameter 141
- Kalibrierung an einem Referenzmesssystem 198
- Kalibrierung an Referenzzielmarken 197
- Kamerakonfiguration 179
- Kamerakonstante 57, 145
- Kamerakoordinatensystem 142
- Kamerakoordinatensystem (KKS) 29
- Kamera-Parameter 5
- Kanonisch exponentielle Rotations-Darstellung 162
- Konoskopische Holografie 17
- Koordinatensystem (TKS) 29
- kritische Blende 61
- Lambertsche Gesetz 79
- Laser-Lichtschnitt-Sensor 16
- Laser-Tracker 26
- Lasertriangulationssensoren 16
- Levenberg-Marquardt-Algorithmus 167
- Linsengleichung 57
- Lochkameramodell 139, 140
- Maßstabsfaktor 57
- Messkopf-Design 5
- Messunsicherheit 42
- Monochromität 78
- Nahpunkt 60
- Newton-Verfahren 168
- normierte Bildmessfehler definiert 157
- normierte oder verallgemeinerte Bildkoordinaten 140
- Objektebene 56
- Objektraum 60
- optische Achse 56
- optische Auflösungsvermögen 58
- optischen Abbildungssystem 55
- Photogrammetrie 27

- photogrammetrische Zielmarke 103
- photogrammetrischer Rückwärtsschnitt 173, 201
- Photontransfer-Methode 72
- Pixelerror 153
- Pose 40
- Pose-Eye 33
- Pose-Genauigkeit 20
- Pose-Wiederholgenauigkeit 20
- Präzision 41
- Principal Point 153
- Punktantwort 120
- Raileigh-Kriterium 62
- Reprojektionsfehler 147
- Reseau-Scanning-Kamera (RSC) 31
- Residuen Funktion 167
- Richtigkeit 41
- Rodrigues-Formel 162
- Rückwärtsschnitt 28
- Schärfentiefe 59
- Schärfentiefe Bereich 60
- Scherung 145
- schwer detektierbare Bewegungen 173
- Selbstkalibrierung 32
- Singulärwertzerlegung 175
- Sobel-Operators 106
- Sony ICX274 CCD-Bildsensor 73
- Sphärische Aberration 65
- Sphärische Aberration, Astigmatismus 65
- Strahldichte 82
- Strahlungsintensität 81
- Symbolic Math Toolbox 170
- Systemparameter 191
- System-Parameter 5
- Tangential Coefficients 153
- Theodolit 25
- Triangulation 25
- Trilateration 25
- Ultraschall-Laufzeitmessung 25
- Verzeichnung 65
- Verzeichnungsparameter 145
- Visuelle Sensoren 16
- Vorwärtsschnitts 28
- Weißlicht-Interferometrie 25
- Winkelauflösungsvermögen 58
- Zeiss VAST System 15
- zentrale Beugungsscheibe 62
- Zentralprojektion 139
- Zerstreuungskreis 59, 120
- Zhang 147
- zyklische Rekalibrierung 21

---

## LEBENS LAUF

### Persönliche Daten

Name:	Michael Kreutzer
Geburtsdatum:	7. April, 1977
Geburtsort:	Illingen an der Saar
Familienstand:	ledig
Nationalität:	deutsch

### Werdegang:

1998- 2000	Gymnasium: Carl-Strehl-Schule Marburg, Erlangung der allgemeinen Hochschulreife
10/2000- 01/2005	Diplom-Studium der Informatik an der Technischen Hochschule Mittelhessen
02/2002- 12/2003	Studentische Hilfskraft im DFG-Projekt „Sicherheit in der Informations- und Kommunikationstechnik“, Arbeitsgruppe Kryptologie, Prof. Dr. A. Beutelspacher, Justus-Liebig-Universität Gießen
01/2005	Erlangung des Grades Diplom-Informatiker (FH)
seit 03/2005	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Technik & Informatik der Technischen Hochschule Mittelhessen
05/2005- 06/2011	Mitwirkung in diversen Forschungsprojekten in den Bereichen Automatisierungstechnik und Sensorik
09/2005- 04/2007	Masterstudium der Informatik an der Technischen Hochschule Mittelhessen
04/2007	Erlangung des Grades Master of Science (Computer-Science)
seit 03/2012	Lehrtätigkeit im Studiengang Ingenieur-Informatik der Technischen Hochschule Mittelhessen