

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorthesis

Henrik Göhrs

Entwicklung eines Kamera - Kalibriersystems

Henrik Göhrs

Entwicklung eines Kamera - Kalibriersystems

Bachelorthesis eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang Mechatronik
an der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer : Prof. Dr.-Ing. Jörg Dahlkemper
Zweiter Prüfer : Prof. Dr.-Ing. Andreas Meisel

Abgegeben am 27. Februar 2012

Henrik Göhrs

Thema der Bachelorthesis

Entwicklung eines Kamera - Kalibriersystems

Stichworte

Digitale Bildverarbeitung, Autofokus, Kamerakalibrierung, Siemensstern

Kurzzusammenfassung

Produktverpackungen müssen den zunehmenden Qualitätsanforderungen der Kunden gerecht werden. Um dies zu erfüllen werden in den Zigarettenverpackungsmaschinen der Firma Focke & Co. (GmbH & Co. KG) u. a. Bildverarbeitungssysteme eingesetzt. Die Kameras dieser Systeme müssen für ihre Aufgabe auf eine gewünschte Entfernung fokussiert werden. Das Überarbeiten und Automatisieren dieses vormals zeitaufwendigen und fehleranfälligen Vorgangs, stand im Mittelpunkt dieser Bachelorthesis. Dafür wurden verschiedene Autofokusverfahren implementiert, untersucht und bewertet. Das Fokussieren der Kameras mit einem Siemensstern Testmuster hat sich hierfür als optimale Lösung herausgestellt und wurde im Rahmen dieser Arbeit in einen automatisierten Prüfvorgang integriert. Zusätzlich zum Fokussierungsprozess wurden die Kameras auf ihre Bildunterschiede und die Austauschbarkeit hin untersucht.

Henrik Göhrs

Title of the paper

Development of a camera calibration system

Keywords

Digital image Processing, autofocus, camera calibration, star target

Abstract

Product packagings have to meet the increasing quality requirements of customers. To meet these requirements, the cigarette-packaging machines of Focke & Co. (GmbH & Co. KG) use integrated image processing systems. The cameras of these systems have to be focused for their task at a specific distance. The focus of this bachelor thesis was to revise and automate the formerly time-consuming and error-prone manual process. Therefore different focusing methods have been implemented and evaluated. Focusing the cameras with a Star Target test pattern turned out to be the optimal solution and has been implemented in an automated testing process. In addition to the automated focusing process, different cameras of the same type have been evaluated for expectable image variations and interchange ability.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Verzeichnis der Formelzeichen und Abkürzungen	6
Verzeichnis der Abbildungen	8
Verzeichnis der Tabellen und Diagramme	10
1 Einleitung.....	11
2 Ausgangssituation und Aufgabenstellung	12
Teil I	
Theoretische Grundlagen	
3 Theoretische Grundlagen digitaler Kameras	14
3.1 Aufbau von Kamerasensoren	14
3.2 Eigenschaften von Linsensystemen	16
3.2.1 Geometrische Optik	16
3.2.1.1 Dünne Linsen	16
3.2.1.2 Aperturblende.....	18
3.2.1.3 Zerstreuungskreis.....	18
3.2.1.4 Fokussierung einer Kamera.....	20
3.2.1.5 Schärfentiefe	21
3.2.2 Auflösungsvermögen von Kameras	22
4 Beschreibung der eingesetzten Hard- und Software	24
4.1 Beschreibung des Kamerakalibrierstandes.....	24
4.2 Aufbau des Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystems.....	26
4.2.1 Hardware des Keyence-Bildverarbeitungssystems	26
4.2.1.1 Keyence-CV-S035-Kameras	26
4.2.1.2 Keyence-CV-5001-Auswerteeinheit.....	27
4.2.1.3 Keyence-CV-5001-Kommunikationsbefehle	29
4.2.2 Software des Keyence-Bildverarbeitungssystems.....	30
4.3 TwinCAT PLC Control	31

4.3.1 TwinCAT-Programmierungsumgebung.....	31
4.3.2 TCP/IP Connection Server-Bibliothek	32
4.4 Linearachse.....	32
4.5 ImageJ	34

Teil II

Praktische Umsetzung

5 Analyse der Aufgabenstellung	35
5.1 Analyse des automatisierten Fokussiervorgangs.....	35
5.2 Analyse der Verschiebungsmessung.....	38
6 Anforderungen an das Fokussierverfahren	39
6.1 Allgemeine Anforderungen an das Fokussierverfahren	39
6.2 Anforderungen an das Verfahren in Bezug auf die Hard- und Software.....	39
7 Konzeption der Fokussmessung.....	40
7.1 Beschreibung der Fokussierverfahren	40
7.1.1 Testmusterbasierende Verfahren.....	40
7.1.1.1 Balkenmuster	40
7.1.1.2 Siemensstern-Testmuster.....	42
7.1.2 Fokussieralgorithmen.....	45
7.1.2.1 Differenzbasierende Fokussieralgorithmen.....	46
7.1.2.2 Höhen- und tiefenbasierende Fokussieralgorithmen.....	48
7.1.2.3 Kontrastbasierende Fokussieralgorithmen.....	48
7.1.2.4 Histogrammbasierende Fokussieralgorithmen.....	49
7.2 Realisierung der Verfahren und Algorithmen	50
7.2.1 Fokussmessung mit dem Siemensstern-Testmuster.....	50
7.2.2 Fokussmessung mit den Autofokusalgorithmen	52
7.3 Bewertung der Algorithmen und des Verfahrens	53
7.4 Auswahl.....	57
8 Anforderungen an die Verschiebungsmessung.....	58
9 Konzeption der Verschiebungsmessung	59

9.1 Testmuster	59
9.2 Bildverarbeitung	60
10 Entwicklung des Kalibrierprogramms	63
10.1 Beschreibung der Kommunikation mit dem Bildverarbeitungssystem	63
10.1.1 FB_Connect_Keyence-Funktionsbaustein	63
10.1.2 FB_Disconnect_Keyence-Funktionsbaustein	64
10.1.3 FB_Receive_Data-Funktionsbaustein	65
10.1.4 FB_Send_Receive-Funktionsbaustein	65
10.2 Beschreibung der Datenauswertung.....	66
10.2.1 FB_Data_Collect-Funktionsbaustein	66
10.2.2 Beschreibung der Fokusmessdatenauswertung.....	67
10.2.2.1 Funktionstyp der Fokusmessdaten	67
10.2.2.2 FB_Parabel_Fit-Funktionsbaustein.....	71
10.3 Beschreibung des Programmablaufs	74
Teil III	
Auswertung	
11 Auswertung.....	83
11.1 Auswertung der Fokusmessung	83
11.2 Auswertung der Verschiebungsmessung.....	84
11.3 Auswertung des Kalibriervorgangs	85
12 Zusammenfassung	88
Literaturverzeichnis.....	89
Anhang	90

Verzeichnis der Formelzeichen und Abkürzungen

A)	Formelzeichen
b	Bildweite in mm
B	Bildgröße in mm
d	Blendendurchmesser in mm
f	Brennweite in mm
g	Gegenstandsweite in mm
G	Gegenstandsgröße in mm
gh	Hinterer Schärfentiefebereich in mm
gv	Vorderer Schärfentiefebereich in mm
$h(i)$	Anzahl der Pixel im Bild mit der Intensität (i)
H	Höhe des Bildes in Pixel
$\overline{I(z)}$	Pixelintensität gemittelt über das gesamte Bild (z)
$I(x, y, z)$	Intensitätswert des Pixels an der Stelle (x, y) im Bild für das Bild (z) der Fokussmessreihe
k	Blendenzahl
W	Breite des Bildes in Pixel
B)	Abkürzungen
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
AWL	Anweisungsliste
CCD	Charge Coupled Deviced
CR	Carriage Return
FB	Funktionsbaustein
FUP	Funktionsplan
MTF	Modulation Transfer Function

LF	Line Feed
PSF	Point Spread Function
RS232	Recommended Standard 232
SD	SecureDigital Memory Card
SNR	Signal to Noise Ratio
ST	Structured Text
USB	Universal Serial Bus

Verzeichnis der Abbildungen

	Seite
Abbildung 2.1: Kamerakalibrierhalter.....	12
Abbildung 3.2: Bayern-Pattern.....	15
Abbildung 3.3: Auflösungsvermögen Schwarzweißkamera / Farbkamera.....	15
Abbildung 3.4: Konstruktion eines Bildes einer dünnen Linse.....	17
Abbildung 3.5: Aperturblende.....	18
Abbildung 3.6: Zerstreuungskreise in der Bildebene.....	19
Abbildung 3.7: Auswirkungen des Zerstreuungskreises.....	20
Abbildung 3.8: Zusammenhang zwischen Schärfentiefe und Aperturblende.....	21
Abbildung 3.9: Airy-Scheibchen.....	22
Abbildung 3.10: Modulation Transfer Function.....	23
Abbildung 4.11: Kamerakalibrierstand.....	24
Abbildung 4.12: Abmessungen CV-035S-Kamera und CA-LS6-Objektiv.....	26
Abbildung 4.13: CV-035S-Kamera und CA-LS6-Objektiv.....	27
Abbildung 4.14: Keyence-CV-5001-Auswerteeinheit.....	28
Abbildung 4.15: Keyence-CV-5001-Hauptmenü.....	30
Abbildung 4.16: Linearachse.....	32
Abbildung 4.17: Controlpanel-Linearachse.....	33
Abbildung 4.18: ImageJ Hauptmenü.....	34
Abbildung 5.19: Keyence-CV-S035-Kamera mit Distanzring.....	36
Abbildung 5.20: Kamera-Auflagemaß.....	36
Abbildung 7.21: Balkenmuster.....	41
Abbildung 7.22: Fokussmessung mit dem Balkenmuster.....	42
Abbildung 7.23: Siemensstern-Testmuster.....	43
Abbildung 7.24: Fokussierter Siemensstern.....	44
Abbildung 7.25: Defokussierter Siemensstern.....	45
Abbildung 7.26: Siemensstern ungefiltert und Siemensstern kantengefiltert.....	51

Abbildung 7.27: Siemensstern-Binärbild und Siemensstern-Kreisvermessung.....	51
Abbildung 7.28: Autofokusalgorithmen-Testmotive.....	52
Abbildung 7.29: Variation der Gegenstandsweite.....	53
Abbildung 9.30: Verschiebungsmessmuster.....	59
Abbildung 9.31: Kamerateststand: Verschiebungsmessmuster.....	60
Abbildung 9.32: Kantenvermessung: Verschiebungsmessmuster.....	61
Abbildung 9.33: Winkelmessung: Verschiebungsmessmuster.....	61
Abbildung 9.34: Skalierung der Messergebnisse.....	62
Abbildung 10.35: FB_Connect _Keyence-Funktionsbaustein.....	64
Abbildung 10.36: FB_Disconnect _Keyence-Funktionsbaustein.....	64
Abbildung 10.37: FB_Receive_Data-Funktionsbaustein.....	65
Abbildung 10.38: FB_Send _Receive-Funktionsbaustein.....	65
Abbildung 10.39: FB_Data _Collect-Funktionsbaustein.....	66
Abbildung 10.40 FB_Parabel_Fit-Funktionsbaustein.....	73
Abbildung 10.41: Visualisierung: Kamerateststand einrichten.....	74
Abbildung 10.42: Visualisierung: Kameraparameter eingeben.....	75
Abbildung 10.43: Visualisierung: Parameterausgabe.....	76
Abbildung 10.44: Linearachse mit Siemensstern-Testmuster.....	77
Abbildung 10.45: Visualisierung: Parameter Linearachse.....	77
Abbildung 10.46: Visualisierung: Fokussmessung starten.....	78
Abbildung 10.47: Visualisierung: Fokussmessung wiederholen.....	79
Abbildung 10.48: Visualisierung: Fokussmessung beenden.....	79
Abbildung 10.49: Visualisierung: Bildverschiebung messen.....	80
Abbildung 10.50: Visualisierung: Verschiebungsmesswerte.....	81
Abbildung 10.51: Visualisierung: Kalibriervorgang beenden.....	81
Abbildung 10.52: Visualisierung: Fehlermeldung.....	82

Verzeichnis der Tabellen und Diagramme

	Seite
A) Tabellen	
Tabelle 4.1: Technische Daten: CV-S035-Kamera und CA-LS6-Objektiv.....	27
Tabelle 7.2: Bewertungstabelle: Autofokusverfahren.....	56
Tabelle 11.3: Bildverdrehung.....	85
B) Diagramme	
Diagramm 7.1: Intensitätsverlauf: Balkenmuster.....	41
Diagramm 7.2: Messergebnisse: Autofokusalgorithmen (Siemensstern).....	54
Diagramm 7.3: Messergebnisse: Autofokusalgorithmen (Fliege).....	54
Diagramm 7.4: Messergebnisse: Autofokusalgorithmen (technische Zeichnung).....	55
Diagramm 7.5: Messergebnisse: ausgewählte Autofokusalgorithmen.....	56
Diagramm 10.6: Siemensstern-Messdaten: Gegenstandsweite.....	67
Diagramm 10.7: Siemensstern-Messdaten: Bildweite.....	68
Diagramm 10.8: Gaußkurve.....	69
Diagramm 10.9: Gaußkurve logarithmisch.....	70
Diagramm 10.10 Variation: Gegenstandsweite und Bildweite.....	71
Diagramm 10.11: Siemensstern-Messwerte und Ausgleichsparabel.....	72
Diagramm 11.12: Bildverschiebung in x Richtung.....	85
Diagramm 11.13: Bildverschiebung in y Richtung.....	85

1 Einleitung

Industrielle Bildverarbeitung hat in den letzten Jahren in immer mehr Bereichen der Automatisierungstechnik Einzug erhalten. Viele Sensorhersteller bieten mittlerweile Bildverarbeitungssysteme an. Das Spektrum reicht von einfachen intelligenten Kameras zur Anwesenheitskontrolle, so genannten Smartkameras, bis zu computerbasierenden Systemen, die eine Vielzahl von Qualitätskontrollen am Prüfobjekt durchführen. An diese Bildverarbeitungssysteme werden hohe Ansprüche gestellt. Die Systeme müssen einerseits eine möglichst kompakte Bauform aufweisen und hohe Verarbeitungsgeschwindigkeiten ermöglichen, andererseits müssen sie für den anspruchsvollen Einsatz im industriellen Umfeld geeignet sein. Die für die Aufnahme der Bilder eingesetzten Kameras müssen Bilder hoher Qualität liefern, die eine stabile und einfache Bildverarbeitung ermöglichen. Grundsätzliche Anforderungen an die Kameras industrieller Bildverarbeitungssysteme sind: Eine hohe Auflösung, ein guter Kontrast und, wie in vielen Bereichen der Technik, die Austauschbarkeit. Diese Kriterien sind für den wirtschaftlichen Einsatz bildverarbeitender Systeme von besonderer Bedeutung.

Um den oben erwähnten Anforderungen gerecht zu werden, wird im Rahmen dieser Bachelorthesis ein Kalibriersystem entwickelt, um Kameras von der Firma „Keyence“ bestmöglich für ihre Aufgabe voreinzustellen.

Die vorliegende Arbeit ist in einen theoretischen und einen praktischen Teil gegliedert, um eine bessere Übersichtlichkeit zu gewährleisten. Vorab wird in dieser Arbeit die Ausgangssituation beschrieben, die diesem Projekt zugrunde liegt. Der theoretische Teil beschreibt Grundlagen von digitalen Kameras und Objektiven in Bezug auf die für die Kalibrierung relevanten Eigenschaften. Im praktischen Teil wird die Lösung der Aufgabenstellung detailliert dargelegt. Abschließend erfolgt eine bewertende Gegenüberstellung des ursprünglichen Einstellungsverfahrens mit dem im Rahmen dieser Arbeit automatisierten Kalibriervorgangs der Kameras.

2 Ausgangssituation und Aufgabenstellung

In den Verpackungsmaschinen der Firma Focke & Co. (GmbH & Co. KG) werden Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssysteme für das Überprüfen verschiedener Produkteigenschaften eingesetzt.

Das Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystem ist ein modular aufgebautes industrielles Bildverarbeitungssystem. Das System besteht aus der Auswerteeinheit und bis zu vier separaten Kameras, die an diese angeschlossen werden können. Für das Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystem sind verschiedene Kameras, die sich in ihrer Bauform und den optischen Eigenschaften unterscheiden, verfügbar [2]. Die kompaktesten Kameras des Systems, die CV-S035-Kameras, sind durch ihre kleine Bauart besonders vielseitig in den Maschinen der Firma Focke & Co. (GmbH & Co. KG) einsetzbar. Der für Kameras zur Verfügung stehende Bauraum ist durch die kompakte Bauform der Verpackungsmaschinen begrenzt. Die CV-S035-Kameras werden als eigenständiges gekapseltes Bauteil in die Verpackungsmaschine integriert, sodass nachträgliche Einstellarbeiten nicht mehr erfolgen können.

Die Keyence-CV-S035-Kameras müssen, wie alle Kameras ohne Autofokusfunktion, manuell auf das zu prüfende Objekt fokussiert werden. Die Einstellung des korrekten Kamerafokusses (s. Kapitel 3.2.1.4) wurde in der Vergangenheit von einem fachkundigen Mitarbeiter durch die visuelle Überprüfung des aufgenommen Kamerabildes durchgeführt. Um diese Einstellungen durchführen zu können, wurde die Kamera in eine Vorrichtung eingebaut (s. Abbildung 2.1).

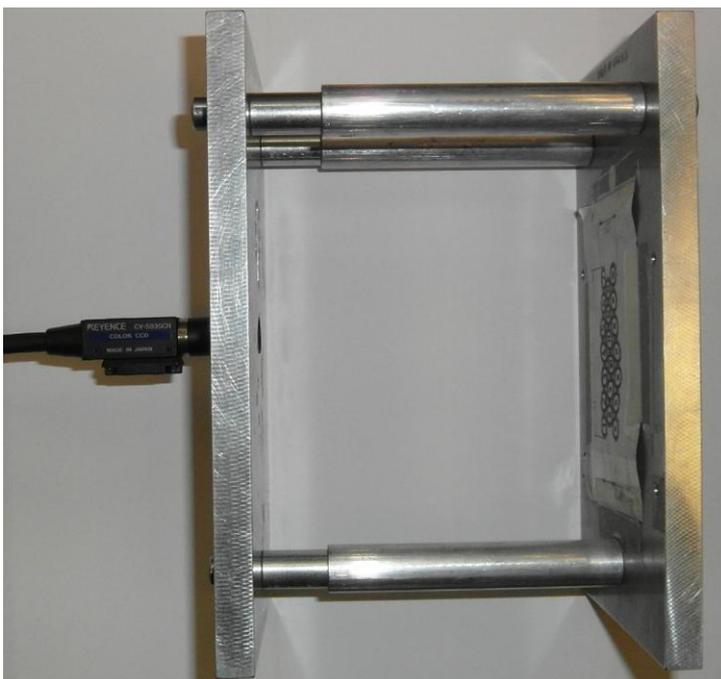


Abbildung 2.1 „Kamerakalibrierhalter“

Der Abstand zwischen Kamerasensor und Objektiv und damit der Fokus der Kamera wurde manuell solange variiert, bis die Kamerabilder nach menschlichem visuellem Ermessen die optimale Fokussierung aufweisen. Dieser Vorgang des visuellen Einstellens der Kameras hat sich in der Vergangenheit als zeitaufwendiges und fehleranfälliges Verfahren herausgestellt. Da der Vorgang auf den visuellen Beurteilungen eines Menschen beruhte, mussten mehrfach fertig installierte Kameras aufgrund von unscharfen Bildern aus Maschinen wieder ausgebaut und neu eingestellt werden.

Im Rahmen dieser Bachelorthesis wird dieses vorher zeitaufwendige und fehleranfällige Einstellverfahren zum Fokussieren der Kameras weitestgehend automatisiert. Die Zeit, die der Einstellungsvorgang in Anspruch nimmt, soll auf ein Minimum reduziert werden. Zudem sollen die Einstellungen der Kameras unabhängig von menschlichen, fehleranfälligen visuellen Beurteilungen erfolgen. Zusätzlich zur Einstellung des korrekten Kamerafokusses soll auch die Verschiebung des Kamerabildes verschiedener CV-S035-Kameras ermittelt werden. In der Vergangenheit hat sich gezeigt, dass die Kameras durch Fertigungstoleranzen, die sich in der Verschiebung der Kamerabilder verschiedener CV-S035-Kameras in ein und derselben Einbauposition äußern, nicht untereinander austauschbar sind. Durch die Verschiebung der Kamerabilder ist bei einem Kameratausch auch immer das Bildverarbeitungsprogramm anzupassen. Um in Zukunft Austauschbarkeit zwischen Kameras zu erreichen soll die Verschiebung der Kamerabilder gemessen und in einem späteren Projekt korrigiert werden.

Die grundlegenden Eigenschaften von Kameras und Objektiven, die für die Kalibrierung von Bedeutung sind, werden im folgenden Kapitel 3 „Theoretische Grundlagen digitaler Kameras“ beschrieben.

Teil I

Theoretische Grundlagen

3 Theoretische Grundlagen digitaler Kameras

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen von digitalen Kameras, die in der industriellen Bildverarbeitung Verwendung finden, erläutert. Im Wesentlichen bestehen sie aus einem Objektiv, das das eintreffende Licht auf den Kamerasensor bündelt. Um die Bilder digital verarbeiten zu können, werden sie anschließend von dem Kamerasensor in elektrische Signale umgewandelt.

3.1 Aufbau von Kamerasensoren

Für die Erzeugung von Bildern, die rechnergestützt verarbeitet werden können, müssen die durch das Objektiv auf die Bildebene projizierten Bilder digitalisiert werden. Um diese Aufgabe zu erfüllen, wurden verschiedene Halbleiterkamerasensoren entwickelt, die sich durch die eingesetzte Fertigungstechnologie unterscheiden [6].

Die weit verbreitete und auch in den CV-S035-Kameras eingesetzte CCD- (**C**harge **C**oupled **D**evice) Kamerasensortechnologie wird im Folgenden bezüglich ihrer für die Fokussierung relevanten Eigenschaften beschrieben [11].

Ein CCD - Kamerasensor ist ein Halbleiterbauelement, auf dem sich in gleichförmiger Anordnung viele einzelne photosensitive Elemente, die Pixel, befinden. Sie sind mit Ausnahme der Zeilenkamera in einem zweidimensionalen Array, auch als Matrixsensor bezeichnet, auf dem photoempfindlichen Teil des Kamerasensors angeordnet. Typischerweise haben die einzelnen Pixel eine rechteckige Form. Das durch das Objektiv auf das Sensorelement treffende Licht in Form eines Photonenstroms erzeugt in dem lichtempfindlichen Bereich des Sensors freie Elektronen. Die Elektronen werden über eine gewisse Zeit, die so genannte Belichtungszeit, gesammelt. Die Menge der gesammelten Elektronen und die daraus resultierende Ladung verhält sich proportional zur Lichtintensität. Die Ladungen der einzelnen Pixel werden anschließend ausgelesen und in ein digitales Bild umgewandelt [6]. Die entstehenden Bilder sind Intensitätsbilder, auch als Graustufenbilder bezeichnet. Sollen mit einem CCD-Kamerasensor Farbbilder aufgenommen werden, wie dies bei der CV-S035CH-Kamera der Fall ist, muss das Licht in seine Spektralanteile zerlegt und die einzelnen Farbkanäle getrennt ausgewertet werden. Für diese Aufspaltung des Lichtes werden im Fall der Keyence-CH-S035CH-Kameras Farbfilter vor den einzelnen Pixeln angeordnet. Diese Farbfilter sorgen dafür, dass ein Pixel nur die Intensität eines Farbkanals empfängt [1, 6]. Das in Abbildung 3.2

dargestellte Bayern-Pattern ist ein häufig verwendetes Muster, um die verschiedenen Farbfilter vor den einzelnen Sensorpixeln anzuordnen.

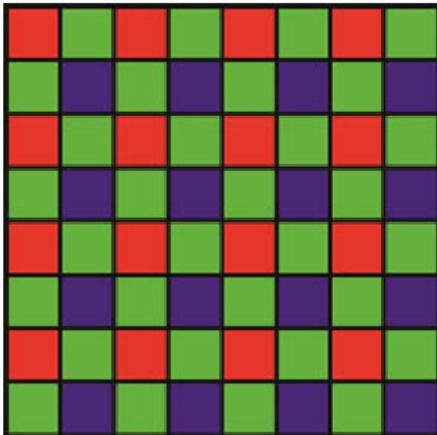


Abbildung 3.2 „Bayern-Pattern“ [6, S.238]

Durch die Kombination der Intensitäten der drei Einzelfarben (blau, grün, rot) wird der resultierende Farbton von allen vier Pixeln ermittelt. Ein Nachteil der Farbfilter vor den einzelnen Pixeln des Sensors ist das geringere Auflösungsvermögen gegenüber einer Schwarzweißkamera mit gleicher Pixelanzahl, da die Farbwerte aus benachbarten Pixeln interpoliert werden müssen [6]. In Abbildung 3.3 ist das geringere Auflösungsvermögen einer Farbkamera gegenüber einer Schwarzweißkamera ersichtlich. Die Kameras, mit denen die Bilder aufgenommen wurden, haben dieselbe Auflösung und sind mit demselben Objektiv ausgestattet. Im linken Schwarzweißbild sind die feinen wellenförmigen Linien des Ursprungsbildes erkennbar, im rechten Farbbild hingegen nicht.



Abbildung 3.3 „Auflösungsvermögen Schwarzweißkamera / Farbkamera“

3.2 Eigenschaften von Linsensystemen

Abgesehen von der Lochkamera benötigt jede Kamera ein Objektiv, das die eintreffenden Lichtstrahlen auf das Sensorelement bündelt. Ein Objektiv besteht im einfachsten Fall aus einer einzelnen Sammellinse. Im Normalfall ist es jedoch aus einer Kombination von mehreren Linsen aufgebaut. Die grundlegenden Eigenschaften von Linsen werden im folgenden Kapitel „geometrische Optik“ beschrieben [5].

3.2.1 Geometrische Optik

Zur Beschreibung der optischen Eigenschaften einer Linse beziehungsweise eines Objektivs, welche für die Fokussierung von Relevanz ist, findet das Modell der geometrischen Optik Verwendung. Aufgrund der Komplexität von Linsensystemen werden hierüber hinaus gehende Beschreibungen in Kapitel 3.2.2 zusammengefasst.

Die geometrische Optik beschreibt das Verhalten von Licht ohne dessen Wellencharakteristik zu berücksichtigen. „Innerhalb der Näherung der geometrischen Optik betrachtet man Licht als Strahlen, die sich geradlinig von einer Quelle ausbreiten“ [16, S. 42]. Diese vereinfachte Modellvorstellung kann mit hinreichender Genauigkeit Verwendung finden, wenn die optischen Elemente des betrachteten Objektivs eine wesentlich höhere räumliche Ausdehnung aufweisen als die Wellenlänge des Lichtes [9, 16].

3.2.1.1 Dünne Linsen

Kameraobjektive bestehen aus einer Kombination verschiedenartiger Linsen. Eine Linse, wie sie in Abbildung 3.4 dargestellt ist, arbeitet nach dem Prinzip der Brechung des Lichtes. Um die Eigenschaften einer Linse zu beschreiben, wird im Folgenden das Modell der dünnen Linse verwendet. In dem Modell der dünnen Linse wird die Dicke der realen Linse mit null angenommen [16]. Ein Lichtstrahl, der auf einen Übergang zwischen zwei optischen Medien trifft, wird an diesem Übergang von seinem ursprünglichen Weg abgelenkt, der Lichtstrahl wird gebrochen. Der Winkel, unter dem der gebrochene Lichtstrahl seinen Weg im zweiten Medium fortsetzt, ist abhängig von den optischen Eigenschaften der beteiligten Medien und von dem Winkel, mit dem der Strahl auf die Grenzfläche getroffen ist. Durch eine geeignete geometrische Anordnung zweier Grenzflächen kann Licht das wie in Abbildung 3.4 von Punkt A ausgesendet wird, durch eine Linse (hier grau dargestellte) auf einen Punkt hinter der Linse (Punkt A') gebündelt werden. Eine Linse, die das Licht bündelt, wird als Sammellinse bezeichnet. Ein wichtiges Charakteristikum von Linsen ist die Brennweite. Als Brennweite f wird der Abstand zwischen dem Punkt O und dem Brennpunkt F bezeichnet. Licht, das von einer sich in unendlicher Entfernung zur Linse befindlichen Punktlichtquelle ausgesendet wird,

konzentriert sich hinter der Sammellinse wieder zu einem Punkt, dem so genannten Brennpunkt. Um den Punkt A', in dem sich die Strahlen, die von Punkt A ausgesendet werden, zu ermitteln, werden drei ausgezeichnete Lichtstrahlen betrachtet:

- „Ein parallel zur optischen Achse einfallender Strahl verläuft hinter der Linse durch den Brennpunkt F.
- Ein Strahl, der durch den vor der Linse liegenden Brennpunkt F' einfällt, verläuft hinter der Linse parallel zur optischen Achse.
- Ein Strahl, der durch den Mittelpunkt der Linse verläuft, verändert seine Richtung nicht“ [6, S. 266].

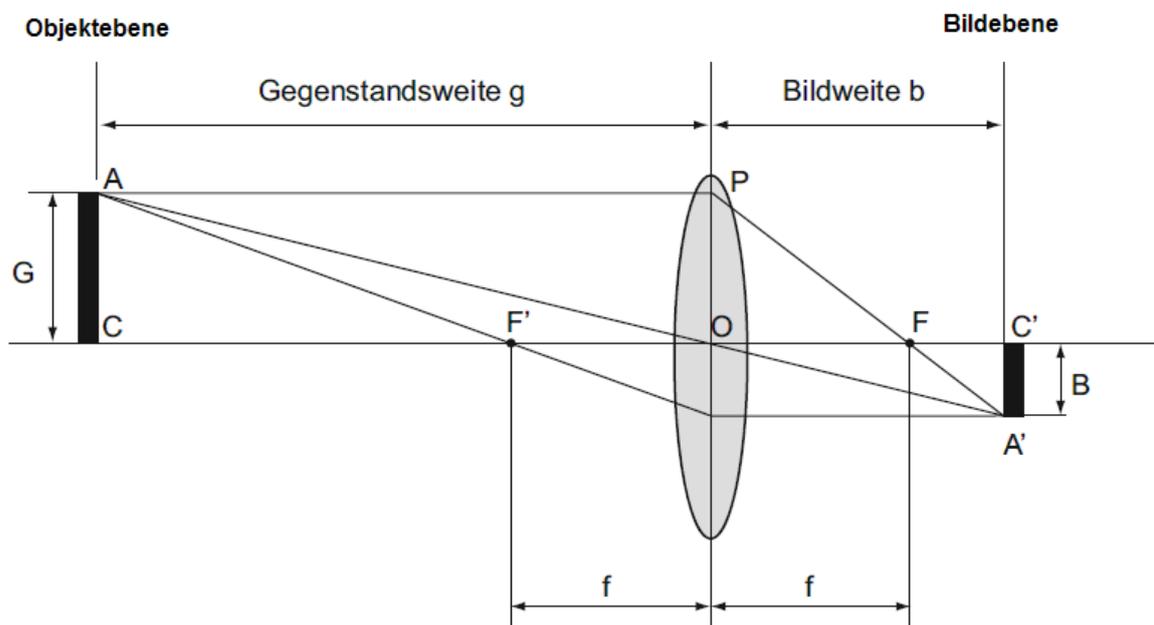


Abbildung 3.4 „Konstruktion eines Bildes einer dünnen Linse“ [vgl.6, S. 267]

Aus diesen drei Strahlen lassen sich über geometrische Beziehungen einige Gesetzmäßigkeiten ableiten [6]:

$$\frac{B}{G} = \frac{b}{g} \tag{3.1}$$

Gegenstände der Größe G, die sich in der Objektelebene befinden, werden entsprechend ihres Abstands g zur Linse mit der Größe B auf einer Bildebene abgebildet, die sich im Abstands b zur Linse befindet. Die Verhältnisse zwischen Gegenstandsweite g und Bildweite b lassen sich auch über die Brennweite der Linse mit folgender Formel, der so genannten Abbildungsgleichung, berechnen:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b} \tag{3.2}$$

Mit dieser Formel lässt sich bei gegebener Gegenstandsweite und Brennweite die Bildweite errechnen, in der der Punkt A' abgebildet wird. Die Abbildungsgleichung lässt sich mit hinreichender Genauigkeit auch für reale Linsensysteme einsetzen [16].

3.2.1.2 Aperturblende

Ein Objektiv oder eine Linse kann immer nur einen Teil der von einem Objekt ausgesendeten beziehungsweise reflektierten Lichtstrahlen einfangen und bündeln. Die Menge des eintreffenden Lichtes wird in jedem realen optischen System begrenzt. Dies geschieht entweder durch die Fassung der Linse oder durch eine eingebaute Blende. Die Aperturblende (s. Abbildung 3.5) begrenzt die Menge des eintreffenden Lichtes, ohne den Sichtbereich der Kamera einzuengen [9, 16].

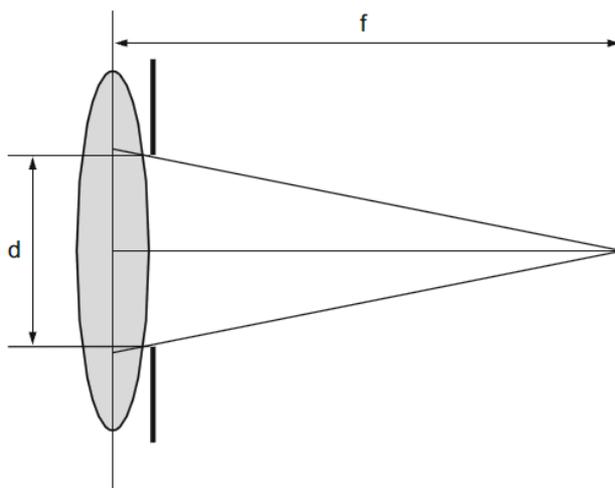


Abbildung 3.5 „Aperturblende“ [6, S. 265]

Die Aperturblende kann als Lamellenblende verstellbar ausgeführt sein. Durch eine verstellbare Lamellenblende kann die Lichtmenge und damit auch die Helligkeit des Bildes verändert werden. „Das Verhältnis zwischen Blendendurchmesser d und Brennweite f des Objektivs bezeichnet man als relative Öffnung, seinen Kehrwert als Blendenzahl k .“ [6, S. 256]

$$k = \frac{f}{d} \quad (3.3)$$

3.2.1.3 Zerstreuungskreis

Aus den betrachteten Abbildungseigenschaften von Linsen und Objektiven ergeben sich für den Einsatz von Kameras einige Einschränkungen. Im Bereich der geometrischen Optik wird die Abbildung, die eine Linse / Objektiv auf einem Kamerasensor erzeugt, durch drei ausgezeichnete Strahlen konstruiert. Mit den in Kapitel 3.2.1.1 vorgestellten

Strahlen kann für jeden Punkt in der Objektebene der resultierende Punkt in der Bildebene (auf dem Kamerasensor) konstruiert werden. Wenn sich die Bildebene nicht in dem durch die Abbildungsgleichung gegebenen Abstand zur Linse befindet, treffen sich die Lichtstrahlen der punktförmigen Lichtquelle in der Objektebene nicht als Punkt auf der Bildebene (s. Abbildung 3.6). Ein Punkt in der Objektebene wird nicht als feiner Punkt auf dem Kamerasensor abgebildet, sondern als ein Kreis mit endlichem Durchmesser (bei einer kreisförmigen Aperturblende) [9, 12]. Der resultierende Kreis wird auch als Zerstreuungskreis oder Unschärfekreis bezeichnet. Punkte in der Objektebene, die sich nicht im korrekten Abstand zur Linse befinden, werden somit nicht als Punkt auf dem Kamerasensor abgebildet, sondern als Zerstreuungskreis mit endlichem Durchmesser. Wird mit einer Kamera nicht nur ein Punkt sondern viele benachbarte Punkte aufgenommen, kommt es mit zunehmender Defokussierung der Kamera zur Überlagerung der Punkte.

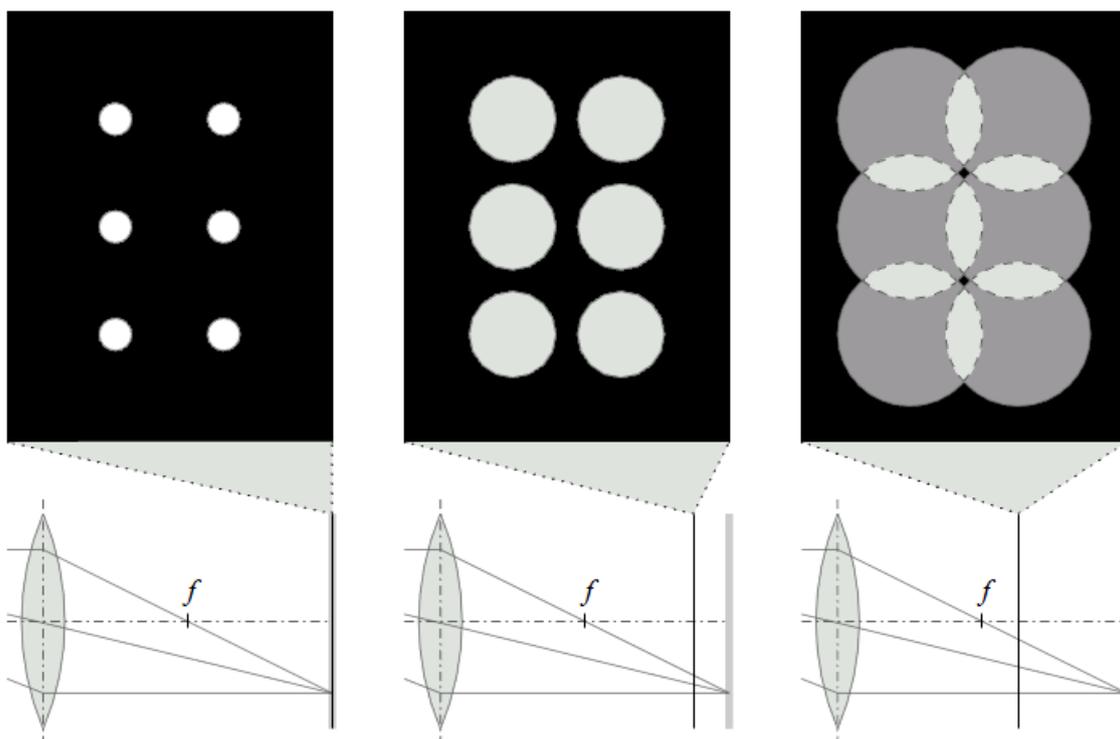


Abbildung 3.6 „Zerstreuungskreise in der Bildebene“ [3, S. 17]

Die Punkte vermischen sich und können ab einem gewissen Grad der Defokussierung nicht mehr separiert werden. Die Überlagerung der Zerstreuungskreise wirkt wie ein Glättungsfilter. In Abbildung 3.7 sind zwei Bilder des gleichen Objekts dargestellt. Im linken Bild befindet sich das Objekt im Fokus der Kamera. Im rechten Bild befindet sich das Objekt hinter dem eigentlichen Fokus der Kamera.



Abbildung 3.7 „Auswirkung des Zerstreuungskreises“

Im linken Bild sind viele feine Strukturen erkennbar. Das Auflösungsvermögen, die Fähigkeit der Kamera feine Strukturen darzustellen, ist hoch. Im rechten Bild hingegen sind die feinen Strukturen nicht mehr eindeutig ersichtlicher. Das Auflösungsvermögen ist schlechter als im linken Bild. Neben dem Verlust des Auflösungsvermögens ist der Kontrast im rechten Bild schlechter. Als Kontrast wird das Verhältnis zwischen hellen und dunklen Bildpunkten bezeichnet [8].

3.2.1.4 Fokussierung einer Kamera

Eine Kamera erzeugt nur dann gute Bilder mit einem hohen Auflösungsvermögen und einem gutem Kontrast, wenn sich der Kamerasensor im richtigen Abstand zum Objektiv befindet. Für die Einstellung der korrekten Bildweite finden verschiedene Verfahren Anwendung. Bei den meisten Kameras im industriellen Umfeld wird die Bildweite und damit die Gegenstandsweite, auf die die Kamera fokussiert ist, einmalig fest eingestellt. Der Abstand zwischen Kamera und Prüfobjekt ändert sich in den meisten Anwendungen nicht. Die Einstellung der richtigen Bildweite geschieht zum Beispiel durch ein Gewinde, in welches das Objektiv eingeschraubt wird. Durch die Einschraubtiefe wird die Bildweite variiert. Eine andere Möglichkeit der Verstellung ist eine automatisierte Optik, bei der die Bildweite durch einen Motor verstellt werden kann. Um die Bildweite für eine gegebene Gegenstandsweite richtig einstellen zu können, müssen mit geeigneten Methoden Messwerte aufgenommen werden. Wie bereits beschrieben, ist der Durchmesser des Zerstreuungskreises ein Maß für den Grad der Defokussierung. Erreicht der Zerstreuungskreis seinen minimalen Durchmesser, ist das System für diese Gegenstandsweite fokussiert. Eine weitere Möglichkeit für die Fokussierung einer Kamera ist das direkte Messen der Gegenstandsweite mit einem geeigneten externen Messverfahren und die Berechnung der benötigten Bildweite. Dieses Verfahren setzt jedoch eine präzise gefertigte Optik und spezielle Hardware zur Messung der

Gegenstandsweite voraus. Diese Technik findet vornehmlich in der Fotografie in digitalen Spiegelreflexkameras Anwendung. Kann die Gegenstandsweite oder die Bildweite nicht direkt gemessen werden, wie dies im Rahmen dieses Projektes der Fall ist, müssen andere Verfahren zum Einsatz kommen. Diese im Kapitel 7.1 vorgestellten Verfahren ermitteln die benötigten Messwerte direkt aus den aufgenommenen Kamerabildern.

3.2.1.5 Schärfentiefe

Durch die in Kapitel 3.2.1.1 beschriebene Abbildungsgleichung (s. Formel 3.2) wird ein exakter Zusammenhang zwischen Brennweite, Gegenstandsweite und Bildweite hergestellt [6]. Befindet sich der abzubildende Gegenstand vor oder hinter der berechneten Gegenstandsweite (das Objekt ist defokussiert), wird dieses durch die Eigenschaften des Zerstreuungskreises nicht optimal auf der Bildebene abgebildet. Es wird immer noch ein Bild erzeugt. Das entstehende Bild wird allerdings ein geringes Auflösungsvermögen besitzen und der Kontrast wird sich verschlechtern. Digitale Kameras besitzen durch den endlichen Abstand zwischen den Pixeln ein maximales Auflösungsvermögen, mit dem Bilder aufgenommen werden können. Das Konzept der Schärfentiefe beruht nun auf der Tatsache, dass Zerstreuungskreise, die im Durchmesser kleiner sind als ein Pixel des Kamerasensors, zu keiner übermäßigen Verschlechterung der Bildqualität führen [11]. Diese Annahme besitzt nur unter dem vereinfachten Modell der geometrischen Optik seine Gültigkeit. Es bietet jedoch in der Praxis einen Anhaltswert für die zu akzeptierende Toleranz der Fokussierung. Der Bereich der Schärfentiefe ist von der Gegenstandsweite, von der Brennweite des Objektivs, von der Größe der Pixel des Kamerasensors aber auch von der gewählten Blendenstufe abhängig. In Abbildung 3.8 ist der Zusammenhang zwischen der Schärfentiefe und der Blende der Kamera dargestellt.

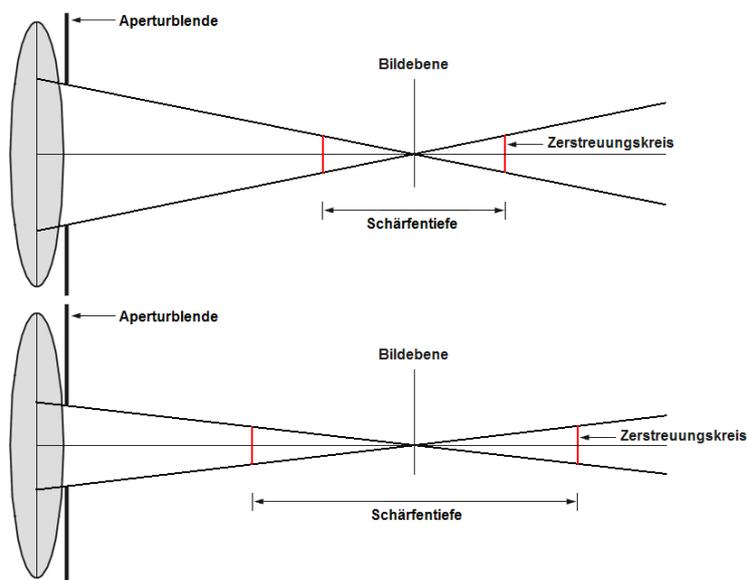


Abbildung 3.8 „Zusammenhang zwischen Schärfentiefe und Aperturblende“ [vgl.6, S. 265]

Ein weit abgeblendetes Objektiv besitzt einen größeren Bereich, in dem Objekte mit hinreichender Qualität abgebildet werden. Mit den beiden folgenden Formeln (3.4) und (3.5) lassen sich die größte gh und die kleinste gv Gegenstandsweite ermitteln, in der eine Kamera, die auf eine Gegenstandsweite g fokussiert ist, Bilder mit hinreichender Qualität erzeugt. Der Durchmesser des Zerstreuungskreises z , der nicht überschritten werden darf, wird bei CCD-Kamerasensoren üblicherweise mit der halben Größe eines Pixels angenommen [6].

$$gh = \frac{f^2 \times g}{f^2 - k \times z \times (g - f)} \quad (3.4)$$

$$gv = \frac{f^2 \times g}{f^2 + k \times z \times (g - f)} \quad (3.5)$$

3.2.2 Auflösungsvermögen von Kameras

In dem vorangegangenen Kapitel wurden Linsen unter Annahme der geometrischen Optik als idealisierte Systeme betrachtet, die einen Punkt in der Objektebene auf einen Punkt in der Bildebene auf dem Kamerasensor wiedergeben, wenn sich das Objekt im Fokus befindet. Reale optische Systeme weisen durch verschiedene Effekte eine andere Charakteristik auf. Sie bilden Punkte nicht als Punkte auf der Bildebene ab, sondern in Form eines verschwommenen Lichtflecks, der über einen begrenzten Bereich verteilt ist. Dieses Verhalten der Linse wird als Punktverwaschungsfunktion oder im englischen als point spread funktion (PSF) bezeichnet [9, 15]. Ausgelöst wird dieses Verhalten durch Abbildungsfehler, die durch nicht ideale Linsensysteme sowie durch die Beugung des Lichtes entstehen. Für ein optisches System, dessen Leistungsfähigkeit nur durch die Beugung des Lichtes begrenzt ist, ergibt sich für einen scharf abgegrenzten Punkt in der Objektebene die in Abbildung 3.9 dargestellte Intensitätsverteilung auf dem Kamerasensor, das so genannte Airy-Scheibchen [9].

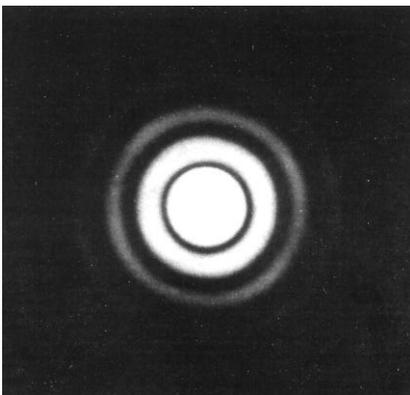


Abbildung 3.9 „Airy-Scheibchen“ [9, S. 757]

Wird das Modell um einen weiteren Punkt in der Objektebene erweitert, der sich in direkter Nachbarschaft zum ersten Punkt befindet, können diese beiden Punkte nur als getrennte Punkte von dem Kamerasensor aufgenommen werden, „wenn der Mittelpunkt des Airy-Scheibchens der einen Quelle in den ersten dunklen Steifen des anderen Airy-Musters fällt“ [9, S. 759]. Dieses Kriterium wird als Rayleighs-Kriterium bezeichnet. Ein Kameraobjektiv ist somit in seinem Auflösungsvermögen begrenzt. Es kann nicht beliebig viele Punkte in der Objektebene getrennt auf der Bildebene (dem Kamerasensor) abbilden. Der Kamerasensor ist wiederum durch die Größe der Sensorpixel nur zur Aufnahme einer begrenzten Anzahl von getrennten Bildpunkten geeignet. Aus dem Auflösungsvermögen der Kamera und dem Auflösungsvermögen des Objektivs ergibt sich das Gesamtauflösungsvermögen des bildgebenden Systems. Die Einheit des Auflösungsvermögens Lp/mm wird auch als optische Ortsfrequenz bezeichnet. Sie gibt an, wie viele Linienpaare pro mm (zum Beispiel von einer Kamera) getrennt aufgelöst werden können. Ein Linienpaar besteht zumeist aus einer schwarzen und einer weißen Linie [3].

Für die Klassifizierung eines optischen Systems ist nicht nur die Ortsfrequenz, die ein optisches System abbilden kann, von Relevanz, sondern auch der Kontrast, mit dem die Linienpaare bei verschiedenen Ortsfrequenzen wiedergegeben werden, die so genannte **Modulations Transfer Function (MTF)**. Für jede Ortsfrequenz ist der Kontrast (der Unterschied zwischen weißen und schwarzen Linien) abgebildet. Der Kontrast wird dabei auf den Kontrast bei tiefen Ortsfrequenzen normiert. In Abbildung 3.10 ist eine Modulations Transfer Function für ein Kamerasystem dargestellt. Der Kamerasensor hat eine feste Ortsfrequenz, bis zu welcher er Linienpaare mit optimalem Kontrast darstellen kann (gekennzeichnet durch den vertikalen Strich). Das Objektiv hingegen verliert mit zunehmender Ortsfrequenz an Kontrast [6, 9, 16].

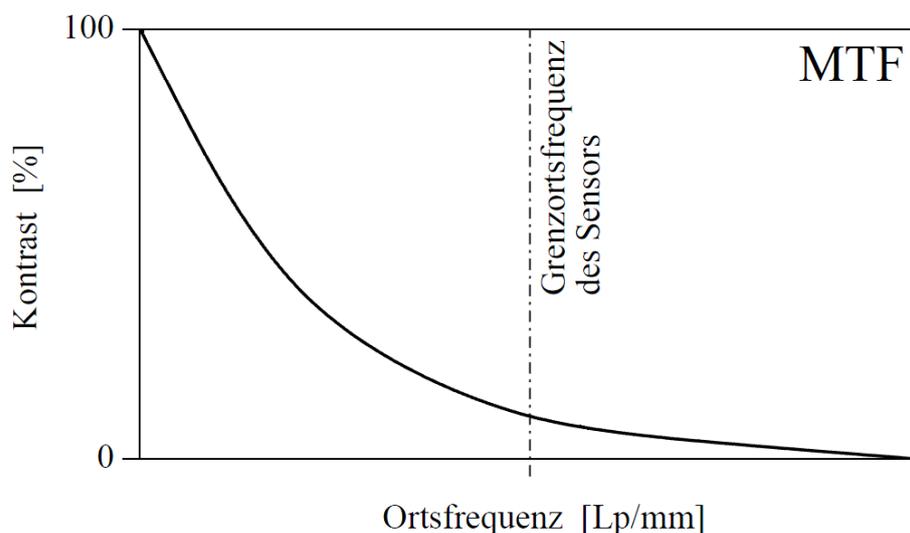


Abbildung 3.10 „Modulations Transfer Function“ [vgl.3, S.11]

4 Beschreibung der eingesetzten Hard- und Software

In diesem Kapitel werden die zur Realisierung des Projektes verwendeten Hard- und Softwarekomponenten vorgestellt. Bevor die einzelnen verwendeten Hard- und Softwarekomponenten beschrieben werden, wird der Kamerakalibrierstand, der im Vorfeld dieses Projektes für die Kalibrierung der CV-S035-Kameras entwickelt und konstruiert wurde, vorgestellt. Im Kamerakalibrierstand sind die im Folgenden vorgestellten Einzelkomponenten zu einer für die Kamerakalibrierung erforderlichen Einheit kombiniert.

4.1 Beschreibung des Kamerakalibrierstandes

Für die Kalibrierung der CV-S035-Kameras wurde im Vorfeld ein Kamerakalibrierstand entwickelt. Im Rahmen dieses Projektes wird dieser Kamerakalibrierstand um das zur Kalibrierung der Kameras benötigte Auswerteprogramm und geeignete Testmuster erweitert. Abbildung 4.11 zeigt den gesamten Aufbau des Kamerakalibrierstandes.



Abbildung 4.11 „Kamerakalibrierstand“

Die drei für die Kalibrierung der Kameras wichtigen Komponenten, das Keyence CV-5001-Bildverarbeitungssystem, der TwinCAT-Steuerungsrechner und die Linearachse, werden im Folgenden separat beschrieben:

- Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystem

Das Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystem, welches in Kapitel 4.2 vorgestellt wird, ist über die Ethernet-Schnittstelle mit dem TwinCAT-Steuerungsrechner verbunden. Die zu kalibrierenden CV-S035-Kameras des Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystems sind an der in Abbildung 4.11 dargestellten Linearachse installiert. Auf der linken Seite des Kamerateststandes befindet sich der Monitor des Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystems. Auf diesem Monitor können die Bildverarbeitungsprogramme erstellt und überwacht werden. Die Auswerteeinheit befindet sich auf der Rückseite des Kamerakalibrierstandes. Für die Beleuchtung der Testmuster ist eine Keyence-CA-DC100-Beleuchtungseinheit an der Linearachse montiert. Für die Steuerung der Bildaufnahme ist das Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystem mit der Linearachse verbunden. Über diese Verbindung kann die Linearachse ein so genanntes Trigger-Signal an das Bildverarbeitungssystem übermitteln. Mit diesem Trigger-Signal kann die Bildaufnahme des Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystems gesteuert werden.

- TwinCAT-Steuerungsrechner

Der Kamerakalibrierstand verfügt zur Steuerung des Prüfablaufs über einen Industrie-PC. Auf diesem ist als Programmierumgebung TwinCAT PLC Control von der Firma Beckhoff installiert. Der Steuerungsrechner hat während des Prüfprozesses die Aufgabe, die Messwerte des Bildverarbeitungssystems auszuwerten und zu visualisieren. Der Steuerungsrechner ist ebenfalls auf der Rückseite des Kamerateststandes installiert.

- Linearachse

Für die Kalibrierung der CV-S035-Kameras wurde in einem früheren Projekt die in Abbildung 4.11 dargestellte Linearachse entwickelt. Die CV-S035-Kameras werden in eine feste Halterung an der Linearachse installiert. Die Testmuster, die zur Einstellung der Kameras entwickelt wurden, können an der Linearachse installiert werden.

4.2 Aufbau des Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystems

Das Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystem ist für die Aufnahme und die Auswertung der Bilder zuständig. Die Beschreibung des CV-5001-Bildverarbeitungssystems teilt sich in die Beschreibung der eingesetzten Kameras, die Beschreibung der Auswerteeinheit sowie die Beschreibung der Bildverarbeitungssoftware auf.

4.2.1 Hardware des Keyence-Bildverarbeitungssystems

Das Keyence-Bildverarbeitungssystem ist modular aufgebaut. Es besteht aus der Auswerteeinheit, die die Bildverarbeitung übernimmt, und aus den Kameras, die für die Bildaufnahme separat montiert werden können. Die Hardwarekomponenten werden in den folgenden Unterkapiteln einzeln beschrieben.

4.2.1.1 Keyence-CV-S035-Kameras

Für das Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystem stehen verschiedene Kameras zur Verfügung, die sich bezüglich ihrer Bauform und den optischen Eigenschaften unterscheiden. Alle Kameras, die für das Keyence-CV-5001 verwendet werden können, können als Schwarzweißkameras oder als Farbkamera geliefert werden. In diesem Projekt werden die kleinsten Kameras, die für dieses System verfügbar sind, die CV-S035-Kameras, kalibriert. Das erstellte Kalibrierprogramm bietet die Möglichkeit beide Versionen der Kamera, die Schwarzweißkamera CV-S035MH sowie die Farbkamera CV-S035CH zu kalibrieren. Die Abmessungen der Kameras sind in Abbildung 4.12 dargestellt.

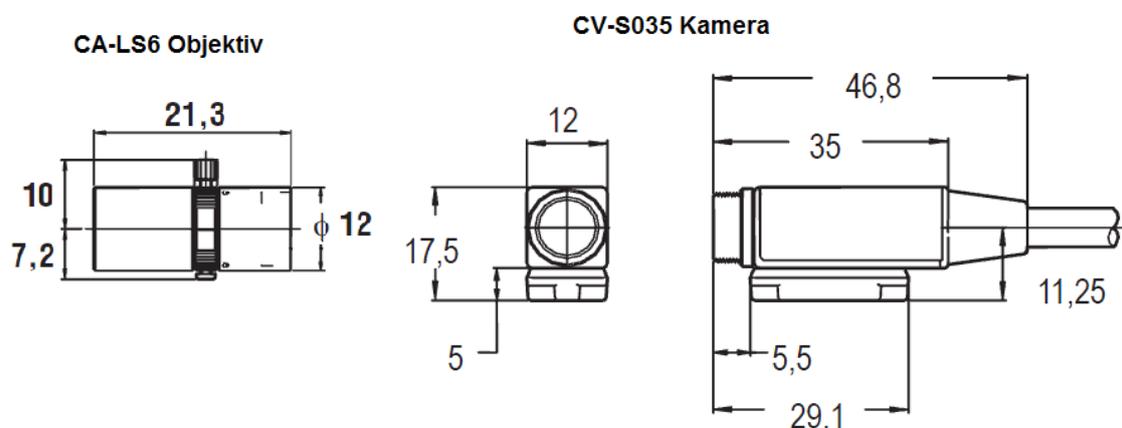


Abbildung 4.12 „Abmessungen CV-S035-Kamera und CA-LS6-Objektiv“ [vgl.2, S.693]

Durch die Auswahl eines entsprechenden Kameraobjektivs lassen sich die Kameras an die Applikation anpassen. Für die CV-S035 Kameras stehen vier Objektive mit

unterschiedlicher Brennweite zur Verfügung. Das Spektrum reicht hierbei von Objektiven mit einer Brennweite von 4 mm bis zu Objektiven mit einer Brennweite von 30 mm. In den Maschinen der Firma Focke & Co. (GmbH & Co. KG) werden die Kameras mit dem CA-LS6-Objektiv mit 6 mm Brennweite eingesetzt (s. Abbildung 4.13).



Abbildung 4.13 „CV-S035CH-Kamera und CA-LS6-Objektiv“

Das CA-LS6-Objektiv wird über ein M10,5 *0,5 mm mit der Kamera verbunden [8]. Durch das Herein- und Herausdrehen des Objektivs kann die Kamera fokussiert werden. In Tabelle 4.1 sind die optischen Eigenschaften dieser Kamera-Objektivkombination ersichtlich.

Tabelle 4.1 „Technische Daten: CV-S035-Kamera und CH-LS6-Objektiv“

CV-S035 Kamera	Technische Daten
Kamerasensor	1/3 Zoll CCD Kamerasensor
Pixelgröße	7,4 µm x 7,4 µm
Effektive Auflösung	(512 x 480) 240.000 Pixel
CH-LS6 Objektiv	
Brennweite	$f = 6 \text{ mm}$

Das CA-LS6-Objektiv verfügt über eine einstellbare Lammellenblende, mit der die Helligkeit des Bildes und der Schärfentiefebereich beeinflusst werden können. Für dieses Objektiv ergibt sich bei vollständig geöffnetem Objektiv eine Blendenzahl von $k = 2$. Für das Abblenden des Objektivs sind keine Markierungen vorhanden, um die Blendenzahl abzulesen.

4.2.1.2 Keyence-CV-5001-Auswerteeinheit

Die Keyence-CV-5001-Auswerteeinheit (s. Abbildung 4.14) verarbeitet je nach Konfiguration Bilder von bis zu vier separaten Kameras.



Abbildung 4.14 „Keyence-CV-5001-Auswerteeinheit“

Die Bildverarbeitungsprogramme können ohne einen externen Computer direkt auf dem Bildverarbeitungssystem erstellt und im Betrieb überwacht werden. Das Keyence CV-5001 ist zur Speicherung von den Bildverarbeitungsprogrammen mit zwei SD (SecureDigital)-Speicherkarten ausgestattet. Eine Speicherkarte ist fest in das System integriert und sollte nicht entfernt werden. Auf dieser Speicherkarte werden die Bildverarbeitungsprogramme abgelegt. Auf der zweiten Speicherkarte, die während des laufenden Betriebes entfernt werden kann, lassen sich ebenfalls Bildverarbeitungsprogramme abspeichern. Zusätzlich können auch Bilder aus dem laufenden Prozess auf der Speicherkarte archiviert werden. Für die Erstellung und Überwachung der Bildverarbeitung lässt sich ein externer Monitor anschließen. Die Bedienung des CV-5001-Bildverarbeitungssystems erfolgt über eine externe Fernbedienung. Für die Ausgabe von Messwerten und für die Anpassung von Parametern stehen folgende Kommunikationsschnittstellen zur Verfügung:

- Digitale Ein- und Ausgänge: Über diese Ein- und Ausgänge können die Bildaufnahme ausgelöst, externe Beleuchtungseinheiten gesteuert und digitale Variablen ein- und ausgegeben werden.
- RS232-Schnittstelle: Über diese Schnittstelle kann auf verschiedene Funktionen des Bildverarbeitungssystem zugegriffen werden.

- USB/Ethernet-Schnittstelle: zusätzlich zu den Funktionen, die über die RS232 - Schnittstelle zur Verfügung stehen, können über diese Schnittstellen auch aufgenommene Bilder übertragen werden.

Die Kommunikation über die RS232- und die Ethernet- Schnittstelle erfolgt mit einem speziellen Befehlssatz. Ein Überblick über die im Rahmen dieses Projektes verwendeten Befehle wird im folgenden Kapitel gegeben.

4.2.1.3 Keyence-CV-5001-Kommunikationsbefehle

Über die Ethernet Schnittstelle des Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystem können Messdaten und Befehle ausgetauscht werden. Über die Befehle können verschiedene Funktionen des Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystems gesteuert werden. Wird ein solcher Befehl an das Keyence CV-5001 Bildverarbeitungssystem übermittelt, antwortet dies mit einer Bestätigung. Jeder Kommunikationsbefehl sowie die Bestätigung des Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystems besteht aus dem eigentlichen Befehl und einem Argument. Die Übertragung der Befehle und Argumente über die Ethernet-Schnittstelle erfolgt als ASCII-(**A**merican **S**tandard **C**ode for **I**nformation **I**nterchange) Zeichenkette. Befehl und Argument werden bei der Übertragung durch ein Komma separiert, um sie beim Empfänger trennen zu können. Abgeschlossen wird jede Datenübertragung durch das CR-(**C**arriage **R**eturn) ASCII-Zeichen gefolgt vom LF-(**L**ine **F**eed) ASCII-Zeichen. Die im Rahmen dieses Projektes genutzten Befehle werden im Folgenden beschrieben [2]:

- Trigger-Befehl „T1“
Wird dieser Befehl gesendet, so wird von dem Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystem ein neues Bild aufgenommen und verarbeitet. Das System antwortet auf diesen Befehl entweder mit einem Fehler, wenn der Befehl nicht ausgeführt werden konnte, oder mit dem Befehl gefolgt von Messergebnissen. Die Messergebnisse, die nach einem Trigger-Befehl übermittelt werden, können individuell eingestellt werden.
- Programm No. Befehl „PW“
Mit diesem Befehl kann das Bildverarbeitungsprogramm, das auf dem Keyence CV-5001 Bildverarbeitungssystems läuft, geändert werden. Auf dem Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystem können bis zu 999 verschiedene Bildverarbeitungsprogramme gespeichert werden.

- Kameraeinstellungen ändern „CW“

Zum Ändern der Kameraeinstellungen über die Ethernet-Verbindung wird der „CW“-Befehl verwendet. Mit diesem Befehl können verschiedene Kameraeinstellungen geändert werden, unter anderem die Belichtungszeit der Kamera und die Sensorempfindlichkeit.

4.2.2 Software des Keyence-Bildverarbeitungssystems

Die Verarbeitung der Kamerabilder erfolgt auf der separaten Auswerteeinheit mit einer speziell hierfür entwickelten Software. Für die Vorverarbeitung von Kamerabildern können verschiedene Filter wie Kanten- und Glättungsfiler eingesetzt werden. Für die Erstellung eines Bildverarbeitungsprogramms stellt das Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystem weiterhin verschiedene Werkzeuge der Bildverarbeitung bereit. In Abbildung 4.15 ist das Hauptmenü des Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystems ersichtlich.

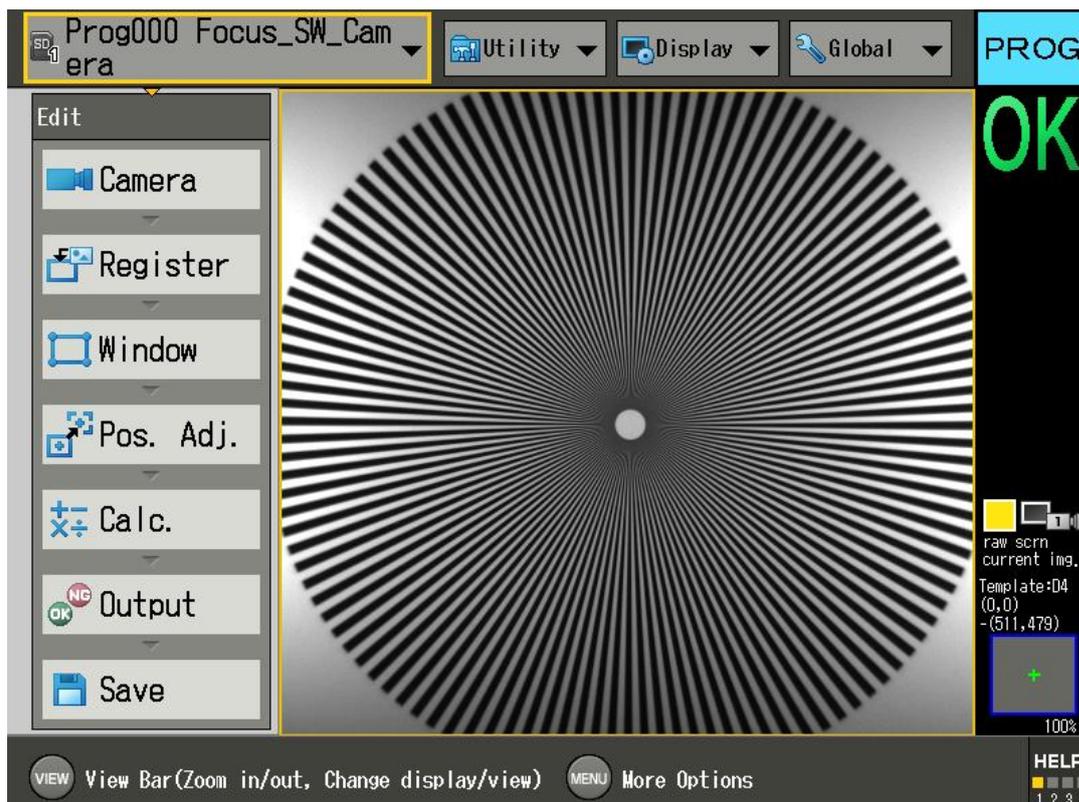


Abbildung 4.15 „Keyence-CV-5001-Hauptmenü“

Neben den üblichen Werkzeugen zur Kantenerkennung stehen auch komplexere Werkzeuge zur Qualitätsprüfung unter dem Menüpunkt „Window“ zur Verfügung. Weiterhin besteht die Möglichkeit der Positionsnachführung für die Messfenster unter Menüpunkt „Pos. Adj.“. Die Position eines Messfensters kann so durch die Messwerte

eines anderen Bildverarbeitungswerkzeuges nachgeführt werden. Referenzbilder für die Bildverarbeitung können im Menüpunkt „Register“ ausgewählt werden. Für Berechnungen stehen weiterhin verschiedene mathematische Funktionen im Menü „Calc“ bereit. Die Konfiguration der angeschlossenen Kameras erfolgt unter dem Menüpunkt „Camera“. Die Einstellung der Messdaten, die das Keyence CV-5001 Bildverarbeitungssystem über die Ethernet Schnittstelle versendet, wenn ein Trigger-Befehl eintrifft, erfolgt im Menü „Output“ [2]. Die weitere Beschreibung der verwendeten Bildverarbeitungswerkzeuge folgt in Kapitel 7.2.1.

4.3 TwinCAT PLC Control

Die TwinCAT PLC Control Programmierumgebung ist der Kern des Beckhoff-Steuerungssystems. Mit der TwinCAT PLC Control Software kann jeder kompatible Industrie-PC als echtzeitfähige **Speicher-Programmierbare-Steuerung (SPS)** eingesetzt werden. In der TwinCAT PLC Control Programmierumgebung können Programme in den in der IEC 61131-3 genormten Programmiersprachen der Steuerungstechnik (AWL (Anweisungsliste) / FUP (Funktionsplan) / ST (Structured text)) programmiert und getestet werden. Die erstellten Steuerungsprogramme können direkt auf einem Industrie-PC ausgeführt werden oder auf einer SPS der Firma Beckhoff Automation GmbH übertragen und ausgeführt werden. Das TwinCAT-Softwaresystem unterstützt die meisten in der Automatisierungstechnik vorkommenden Feldbussysteme sowie die meisten Schnittstellen, die ein Industrie-PC zur Verfügung stellt. Die Beschreibung teilt sich auf in eine Beschreibung der TwinCAT PLC Control Programmierumgebung sowie die Beschreibung der TwinCAT TCP/IP Connection Server Bibliothek, die für die Kommunikation mit dem Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystem eingesetzt wird.

4.3.1 TwinCAT-Programmierumgebung

In diesem Kapitel wird ein kurzer Überblick über die TwinCAT PLC Control Programmierumgebung gegeben. Steuerungsprogramme können mit TwinCAT PLC Control in den verschiedensten Programmiersprachen umgesetzt werden. Neben der eigentlichen Programmierumgebung, in der die Programme erstellt, übersetzt und getestet werden können, stehen weitere Programmmodule zur Verfügung. Unter anderem können in der TwinCAT PLC Control Umgebung auch Visualisierungen erstellt werden. Durch diese Visualisierungen kann eine graphische Bedienoberfläche erstellt werden, durch welche die erstellten Programme durch den Anwender bedient werden können. Neben diesen Entwicklungswerkzeugen stehen auch Diagnosewerkzeuge zur Verfügung, mit denen erstellte Programme überprüft werden können. Die Beschreibung des mit

TwinCAT PLC Control für die Steuerung des Prüfablaufs entwickelten Programms erfolgt in Kapitel 10.1.

4.3.2 TCP/IP Connection Server-Bibliothek

Für die Kommunikation zwischen dem Keyence-CV-5001-Kamerasystem und dem TwinCAT-Steuerungsrechner wird die Ethernet-Schnittstelle verwendet. Um die Ethernet-Schnittstelle des Steuerungsrechners verwenden zu können, muss die TwinCAT PLC Control Programmierumgebung um eine Bibliothek erweitert werden, die TCP/IP Connection Server Bibliothek. Mit Hilfe dieser ist es möglich, mit anderen Teilnehmern über die Ethernet-Schnittstelle des Industrie-PCs Daten auszutauschen. Die TCP/IP Connection Server Bibliothek stellt verschiedene Funktionsbausteine (FB's) für die Kommunikation über die Ethernet-Schnittstelle zur Verfügung. Eine Beschreibung des für die Kommunikation mit dem Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystem erstellten Programms, welches auf den Funktionsbausteinen der TCP/IP Connection Server Bibliothek aufbaut, folgt in Kapitel 10.1.

4.4 Linearachse

Durch die in Abbildung 4.16 dargestellte Linearachse kann der Abstand zwischen Kamera und Testmuster um 20 mm variiert werden. Der Abstand zwischen Kameravorderkante und Testmuster kann dabei im Bereich von 85 mm bis 105 mm verändert werden.



Abbildung 4.16 „Linearachse“

Für diese Aufgabe ist die Linearachse mit einem Schrittmotor ausgerüstet, mit dem die Gegenstandsweite in Schritten von 0,1 mm bis 20 mm verändert werden kann. Im Folgenden werden kurz die Möglichkeiten beschrieben, die der Kamerteststand bietet. Mit der Linearachse können beliebige Position auf dem 20 mm Fahrweg im Handbetrieb angefahren werden. Weiterhin kann im Automatikbetrieb der gesamte Fahrweg in einstellbaren Schrittweiten abgefahren werden. Neben der Schrittweite lässt sich auch die Pausenzeit und die Anzahl der zu verfahrenen Schritte einstellen. Der Ablauf im Automatikbetrieb ist der Folgende: Bevor der Automatikbetrieb startet, fährt die Linearachse in die hintere Endlage (größter Abstand zwischen Kamera und Objektiv). Anschließend verfährt die Linearachse um die gegebene Schrittweite in Richtung des Testmusters vor der Kamera. Ist die Position erreicht, wird ein Trigger-Signal an das Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystem ausgegeben. Im Anschluss wird die einstellbare Pausenzeit gewartet und anschließend wieder um einen Schritt weiter verfahren. Ist die vorgegebene Anzahl an Schritten abgefahren, endet der Automatikbetrieb. Die Bedienung der Linearachse erfolgt auf dem in Abbildung 4.17 dargestellten Touchscreen-Controlpanel.

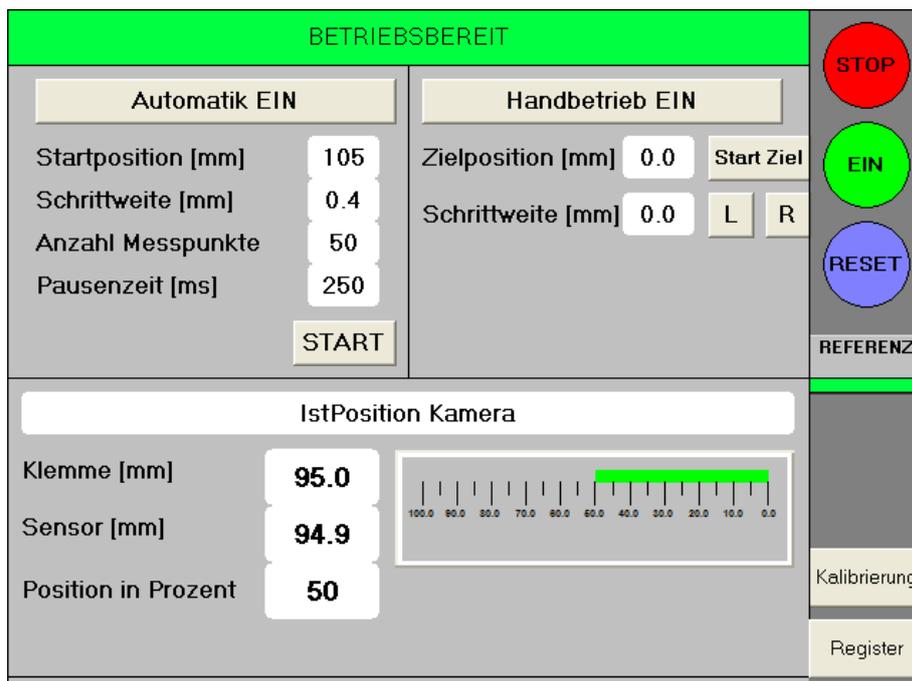


Abbildung 4.17 „Controlpanel-Linearachse“

Im Rahmen dieses Projektes wurden keine Änderungen im Programm der Linearachse durchgeführt. Die Linearachse operiert als separate Einheit und ist nicht mit dem Steuerungsrechner verbunden.

4.5 ImageJ

Neben den bereits vorgestellten Hard- und Softwarekomponenten wurde für die Überprüfung verschiedener Autofokusalgorithmen die kostenlos zur Verfügung stehende Bildverarbeitungssoftware ImageJ verwendet. ImageJ ist eine auf Java basierende Programmierumgebung. Die ImageJ-Programmierungsumgebung stellt viele verschiedene Werkzeuge zur Verfügung, mit denen digitale Bilder bearbeitet werden können. Eine Vielzahl der in der Literatur [7, 17] beschriebenen Verfahren und Algorithmen der Bildverarbeitung ist bereits standardmäßig implementiert. Neben diesen können auch eigene Werkzeuge als Macro implementiert werden. Für eigene Entwicklungen kann auf eine Vielzahl vorgefertigter Funktionen zurückgegriffen werden. In Abbildung 4.18 ist das Hauptmenü der ImageJ-Programmierungsumgebung dargestellt.

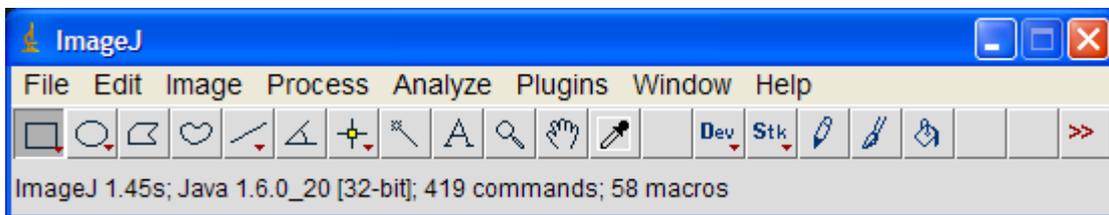


Abbildung 4.18 „ImageJ-Hauptmenü“

Teil II

Praktische Umsetzung

5 Analyse der Aufgabenstellung

Aus der in Kapitel 2 vorgestellten Aufgabenstellung ergeben sich zwei separate Aufgaben, die zu erfüllen sind. Die Beschreibung und Ausarbeitung der Lösung teilt sich in die folgenden beiden Aufgabenteile auf:

- Entwicklung eines automatisierten Fokussiervorgangs für die CV-S035-Kameras.
- Entwicklung eines Testmusters zur Messung der Verschiebung der Bilder verschiedener CV-S035-Kameras.

Für die einzelnen Aufgabenpunkte werden in separaten Kapiteln die Anforderungen definiert und die Umsetzung wird beschrieben. Die Umsetzung und die Beschreibung des Kamerakalibrierprogramms, welches die beiden Einzelaufgaben zu einem Prüfvorgang vereint, erfolgt in Kapitel 10.

5.1 Analyse des automatisierten Fokussiervorgangs

Der zu entwickelnde Kalibriervorgang für die Keyence-CV-S035-Kameras soll die Fokussierung der Kameras auf eine vorgegebene Gegenstandsweite beinhalten. Für die Fokussierung einer Kamera auf eine gegebene Gegenstandsweite muss, wie in Kapitel 3.2.1.4 beschrieben, die Bildweite (der Abstand zwischen Kamera und Objektiv) so eingestellt werden, dass der Zerstreuungskreis seinen minimalen Durchmesser erreicht. Bei den Keyence-CV-S035-Kameras wird dieser Abstand durch Herein- oder Herausschrauben des Objektivs erreicht. Der Vorgang des händischen Ein- und Ausschraubens hat sich in der Vergangenheit als fehleranfälliges und nicht reproduzierbares Verfahren herausgestellt. Um den Fokussiervorgang automatisieren zu können, wurden Distanzringe (s. Abbildung 5.19) konstruiert und gefertigt. Die angefertigten Distanzringe werden zwischen Kamera und Objektiv verbaut.

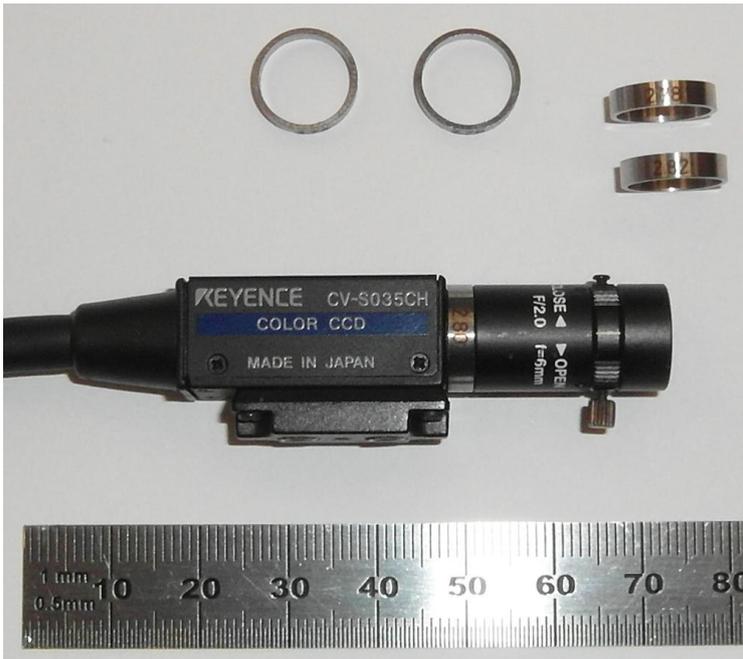


Abbildung 5.19 „Keyence-CV-S035-Kamera mit Distanzring“

Mithilfe der Distanzringe ist es möglich, die Bildweite der Kamera in festen Abstufungen reproduzierbar zu variieren. Jeder Distanzring trägt eine Beschriftung mit seiner Dicke in mm. Der Distanzring ergibt zusammen mit dem Auflagemaß der Kamera und des Objektivs die Bildweite. In Abbildung 5.20 ist der Zusammenhang grafisch dargestellt.

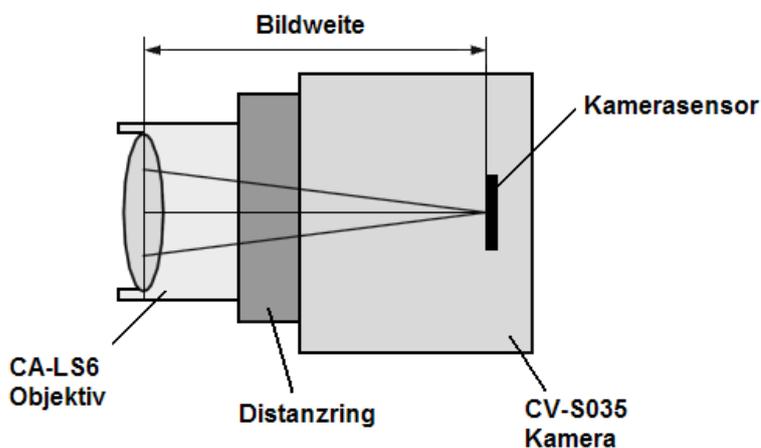


Abbildung 5.20 „Kamera-Auflagemaß“ [vgl.1, S.280]

Die Dicke des Distanzrings muss für jede Kombination individuell vermessen werden, da das Auflagemaß durch die Fertigungstoleranzen der CV-S035-Kameras und der CA-LS6-Objektive für jede Kombination unterschiedlich ist. Um jede Kamera-Objektiv-Kombination auf die gewünschte Gegenstandsweite einstellen zu können, sind die Distanzringe in Dickenabstufungen von 0,02 mm gefertigt. Eine Veränderung der Bildweite um den Dickenunterschied zwischen zwei Distanzringen von 0,02 mm führt bei der betrachteten mittleren Gegenstandsweite der Kameras von 95 mm, mit der Abbildungsgleichung

(Formel 3.2), zu einer Verschiebung der Gegenstandsweite von ca. 4,3 mm. Mit den Distanzringen kann die betrachtete Kamera-Objektiv-Kombination in einem 4,3 mm-Raster auf die gewünschte Gegenstandsweite eingestellt werden. Die Schärfentiefe gibt den Bereich der Gegenstandsweite an, in dem sich die Qualität der erzeugten Bilder nicht signifikant verschlechtert. Mit den Formeln der Schärfentiefe (Formel 3.4 und 3.5) können die hintere gh - und vordere gv -Grenze der Gegenstandsweite berechnet werden. Für die betrachtete Kamera-Objektiv-Kombination ergibt sich bei voll geöffneter Blende und bei der mittleren Gegenstandsweite von 95 mm ein Schärfentiefebereich (s) von:

$$gh = \frac{f^2 \times g}{f^2 - k \times z \times (g - f)} = \frac{6^2 \times 95}{6^2 - 2 \times 0,0037 \times (95 - 6)} = 96,8mm$$

$$gv = \frac{f^2 \times g}{f^2 + k \times z \times (g - f)} = \frac{6^2 \times 95}{6^2 + 2 \times 0,0037 \times (95 - 6)} = 93,3mm$$

$$s = gh - gv = 96,8 - 93,3 = \underline{\underline{3,5mm}}$$

Mithilfe der Distanzringe kann die Kamera unter Berücksichtigung der Schärfentiefe mit hinreichender Genauigkeit auf fast jede Gegenstandsweite eingestellt werden. Wird die Kamera weiter abgeblendet, ergibt sich ein nahtloser Übergang zwischen den Distanzringen. Um eine Kamera zu fokussieren, sind immer mehrere Messungen (also mehrere Bilder - mindestens jedoch zwei Bilder mit unterschiedlichen Bildweiten) erforderlich, um eine Richtung zu erhalten, in der sich das Auflösungsvermögen verbessert. Eine Anforderung an den Kalibriervorgang ist es, die Fokussierung möglichst schnell durchführen zu können. Die Bildweite der Kameras lässt sich nur durch das Wechseln der Distanzringe variieren. Für eine Einstellung des Fokusses auf diese Weise müssten nacheinander die Distanzringe ein- und ausgebaut werden bis sich die Bildweite und damit die Dicke des Distanzrings ergibt, für den sich die Kamera im Fokus befindet. Um diesen Vorgang, der viel Zeit in Anspruch nimmt, zu umgehen, wird im Rahmen dieses Projekts nicht die Bildweite sondern die Gegenstandsweite variiert. Mithilfe der in Kapitel 4.4 vorgestellten Linearachse kann die Gegenstandsweite um 20 mm variiert und in jeder Position Bilder aufgenommen und ausgewertet werden. Der Fokussiervorgang für die Kameras soll folgendermaßen ablaufen: Zu Beginn der Messung wird ein Distanzring mit fester Dicke zwischen Kamera und Objektiv installiert. Anschließend wird die Gegenstandsweite der Kamera verändert und es werden für verschiedene Abstände Bilder aufgezeichnet. Mit den aufgenommenen Bildern muss durch geeignete Verfahren die Gegenstandsweite ermittelt werden, für die sich die Kamera optimal im Fokus befindet. Wenn die Fokusposition gefunden ist, muss für die vom Anwender gewünschte

Gegenstandsweite die entsprechende Dicke des Distanzrings errechnet werden. Um aus den aufgenommenen Bildern eine Information über den Grad der Fokussierung zu erhalten, müssen diese mit einem geeigneten Verfahren untersucht werden. Die für diese Aufgabe getesteten Verfahren werden in Kapitel 7.1 beschrieben.

5.2 Analyse der Verschiebungsmessung

Der Kalibriervorgang soll neben der Einstellung des korrekten Kamerafokus für die gewünschte Gegenstandsweite auch die Verschiebung des Kamerabildes vermessen. Die Messwerte sollen in folgenden Projekten genutzt werden, um die Kameras durch geeignete mechanische Anpassungen so einzustellen, dass die Kameras untereinander direkt austauschbar sind. Im Auslieferungszustand erzeugen verschiedene Kameras in ein und derselben Halterung durch die Fertigungs- und Montagetoleranzen deutlich unterschiedliche Bilder, die einen einfachen Austausch der Kameras nicht ermöglichen. Sollte eine Kamera aufgrund eines Defektes ausgetauscht werden müssen, so ist eine zeit- und arbeitsintensive Neueinstellung des Bildverarbeitungsprogramms erforderlich. Um einen einfachen Austausch von defekten Kameras zu ermöglichen, ohne dass das Bildverarbeitungsprogramm verändert werden muss, wurden in der Aufgabenstellung folgende Grenzwerte definiert, die eingehalten werden müssen. Um die Austauschbarkeit der Kameras untereinander zu erreichen, wird eine Bildverschiebung von maximal 5 Pixeln in der X- und Y-Richtung sowie eine Verdrehung von maximal $\pm 0,6^\circ$ gefordert. In diesem Projekt wird das Testmuster entworfen und die benötigte Bildverarbeitung für die Messwertaufnahme realisiert. Weiterhin erfolgt in Kapitel 11.2 eine statistische Auswertung der Fehlerquellen, die für Verschiebungen des Kamerabildes verantwortlich sind.

6 Anforderungen an das Fokussierverfahren

Für das Fokussieren von Kameras wurden in der Literatur [4, 12, 13, 18] unterschiedlichste Verfahren für verschiedene Aufgaben entwickelt. Bevor diese Verfahren auf ihre Eignung hin untersucht werden können, müssen Anforderungen formuliert werden, die zu erfüllen sind. Die Anforderungen teilen sich in allgemeine Anforderungen, die ein Fokussierverfahren zu erfüllen hat, um effizient eingesetzt werden zu können und Anforderungen, die in Bezug auf die verwendete Hard- und Software zu erfüllen sind, auf.

6.1 Allgemeine Anforderungen an das Fokussierverfahren

In diesem Kapitel werden die allgemeinen Anforderungen an das Fokussierverfahren aufgestellt. Durch folgende Anforderungen können die Verfahren in ihrer Leistungsfähigkeit beurteilt werden [4]:

- **Unmodalität:** Die Messwerte, die das Verfahren liefert, dürfen nur ein Minimum / Maximum über dem Messbereich aufweisen. Der Punkt, in dem das System optimal fokussiert ist, muss eindeutig bestimmbar sein.
- **Kleines Signal-Rausch-Verhältnis (Signal to Noise Ratio (SNR)):** Die Messergebnisse müssen eine eindeutige Bestimmung der Fokusposition mit wenigen Messwerten ermöglichen.
- **Messbereich:** Das Verfahren muss in der Position, in der sich das Kamerasystem im Fokus befindet, ein scharf abgegrenztes Maximum liefern.

6.2 Anforderungen an das Verfahren in Bezug auf die Hard- und Software

Durch die eingesetzte Hard- und Software ergeben sich weitere Anforderungen, die das Verfahren zu erfüllen hat, um für die Aufgabe geeignet zu sein:

- Das Verfahren muss sich auf die bestehende Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungsplattform umsetzen lassen.
- Die Bilder, mit denen der Fokus bestimmt werden soll, ändern durch die Variation der Gegenstandsweite ihren Bildausschnitt. Durch diese Änderung des Bildausschnittes darf es zu keiner Verfälschung der Messergebnisse kommen.

Die beschriebenen Anforderungen müssen von allen Verfahren erfüllt werden. Die Beurteilung der einzelnen Verfahren erfolgt in Kapitel 7.3.

7 Konzeption der Fokusmessung

In diesem Kapitel erfolgt die Beschreibung der getesteten Verfahren zur Bestimmung der optimalen Fokusposition. Die getesteten Verfahren werden vorgestellt und die Umsetzung dieser wird auf der bestehenden Hard- und Software beschrieben. Im Anschluss folgt die Bewertung der Verfahren mit abschließender Auswahl des für die Aufgabe am besten geeigneten Verfahrens.

7.1 Beschreibung der Fokussierverfahren

Für die Fokussierung von Kameras finden verschiedene Verfahren Verwendung. Die im Rahmen dieser Bachelorthesis getesteten Verfahren lassen sich grundsätzlich in zwei verschiedene Kategorien einordnen. Die erste Kategorie umfasst Verfahren, die zur Bestimmung des Auflösungsvermögens und damit indirekt auch zur Messung des Fokusses eingesetzt werden können. Die hier vorgestellten Verfahren basieren auf Testmustern, die durch ihre geometrische Anordnung eine Bestimmung des Auflösungsvermögens ermöglichen. Die zweite Kategorie umfasst Autofokusalgorithmen, die relativ unabhängig vom aufgenommenen Motiv eine Bestimmung der Fokusposition ermöglichen. Die umgesetzten Verfahren und Algorithmen werden im Folgenden beschrieben.

7.1.1 Testmusterbasierende Verfahren

In diesem Kapitel werden zwei der am meisten verwendeten Testmuster zur Ermittlung des optischen Auflösungsvermögens beschrieben. Diese Testmuster eignen sich durch die in Kapitel 3.2.1.3 beschriebenen Eigenschaften des Zerstreungskreises auch zur Fokussierung eines optischen Systems.

7.1.1.1 Balkenmuster

Das Balkenmuster ist ein Testmuster zur Bestimmung des Auflösungsvermögens eines optischen Systems. Es besteht aus einer Anordnung schwarzer und weißer Linien. Eine schwarze und eine weiße Linie gleicher Breite bilden ein Linienpaar. Abbildung 7.21 zeigt zwei Balkenmuster. Im oberen Teil ist ein optimales Balkenmuster dargestellt. Die Übergänge zwischen den schwarzen und weißen Linien sind scharf abgegrenzt. Das zweite Balkenmuster in der unteren Hälfte der Abbildung zeigt dasselbe Balkenmuster, aufgenommen mit einer CV-S035CH-Farbkamera, die sich im Fokus befindet. Aus den scharf abgegrenzten Kantenübergängen des Ursprungssignals sind durch die glättenden Eigenschaften der PSF gleitende Kantenübergänge mit grauen Zwischenwerten geworden.

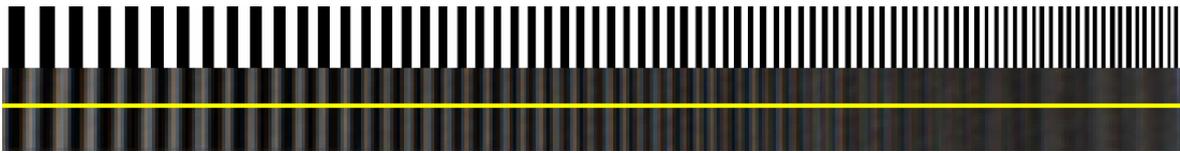


Abbildung 7.21 „Balkenmuster“

Mit zunehmender Feinheit der Linienpaare nimmt der Kontrast im Bild deutlich ab. Einzelne Linien können nicht mehr getrennt dargestellt werden. Das Diagramm 7.1 zeigt die Intensitätswerte der Pixel entlang der gelben Linie in Abbildung 7.21. Die Intensitätsverteilung in Diagramm 7.1 ist auf den Kontrast bei tiefen Frequenzen auf der linken Seite normiert. Aus dem rechteckförmigen Intensitätsverlauf des Eingangsbildes wird ein zu feiner werdenden Strukturen abnehmender Intensitätsverlauf des Ausgangsbildes. Die feinsten Bildstrukturen können nicht mehr korrekt getrennt dargestellt werden.

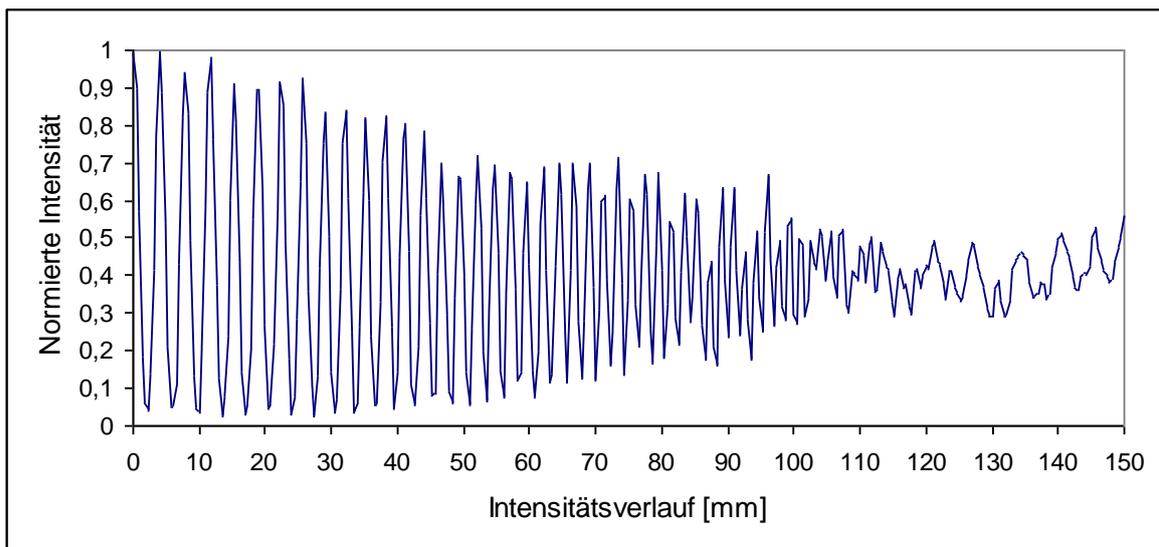


Diagramm 7.1 „Intensitätsverlauf: Balkenmuster“

Das Auflösungsvermögen eines optischen Systems wird von vielen Faktoren bestimmt, unter anderem auch von der Fokussierung. Sind Kamera und Objektiv optimal auf den Abstand, in dem sich das Testmuster befindet, eingestellt, ergibt sich das höchste Auflösungsvermögen, feinste Strukturen können dargestellt werden. Wenn sich das System nicht im optimalen Fokus befindet, wird durch die glättenden Eigenschaften des Zerstreuungskreises das Auflösungsvermögen weiter begrenzt. In Abbildung 7.22 sind zwei Balkenmuster dargestellt, die mit gleicher Kamera und gleicher Optik aufgenommen wurden. Der Unterschied zwischen den Bildern ist, dass das obere Bild mit der Kamera im optimalen Fokus aufgenommen wurde. Im unteren Bild ist die Kamera auf ein Objekt

fokussiert, welches sich 15 mm vor dem eigentlichen Testmuster befindet. Die defokussierte Kamera erzeugt Bilder mit schlechterem Auflösungsvermögen.



Abbildung 7.22 „Fokussierung mit dem Balkenmuster“

Um Kameras mit einem Balkenmuster fokussieren zu können, muss das Auflösungsvermögen der Kamera für verschiedene Bild- oder Gegenstandsweiten gemessen werden. Der optimale Abstand zwischen Kamerasensor und Objektiv für die gewünschte Gegenstandsweite ist gefunden, wenn das Auflösungsvermögen sein Maximum erreicht. Für die automatisierte Vermessung des Auflösungsvermögens ist dieses Testmuster durch die begrenzte Anzahl an Ortsfrequenzen, die dargestellt werden können, weniger geeignet. Das Siemensstern-Testmuster, das im folgenden Kapitel vorgestellt wird, eignet sich aufgrund der geometrischen Anordnung der Linienpaare besser für diese Aufgabe.

7.1.1.2 Siemensstern-Testmuster

Das Siemensstern-Testmuster, im Englischen auch als Star Target bezeichnet, ist ein weiteres Testmuster, das zum Testen von optischen Geräten, wie z. B. Kameras, hinsichtlich ihres Auflösungsvermögens entwickelt wurde. Der Siemensstern besteht aus einer beliebigen Anzahl von Segmenten, die kreisförmig angeordnet sind. Diese Segmente laufen zum Zentrum eines Kreises spitz zu. Zwei benachbarte Segmente werden als Sektor bezeichnet. In Abbildung 7.23 ist ein Siemensstern mit 120 Sektoren zu erkennen.

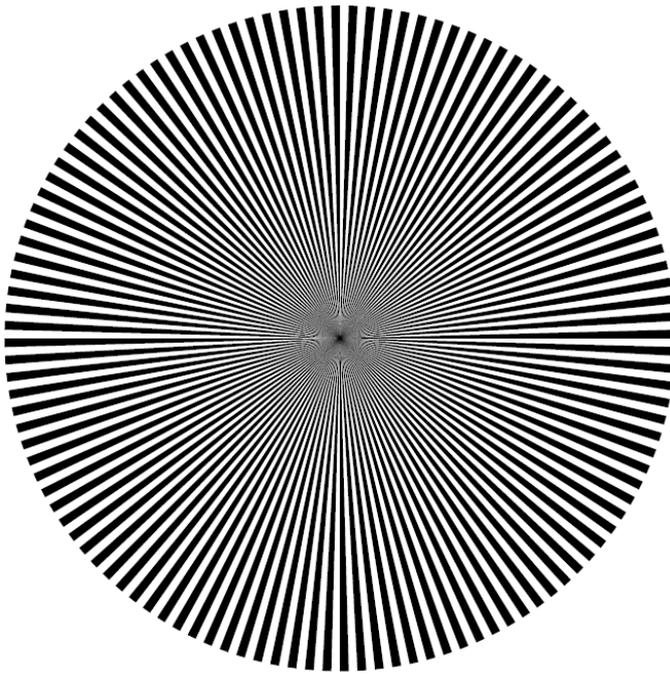


Abbildung 7.23 „Siemensstern-Testmuster“

Durch seinen geometrischen Aufbau können mit dem Siemensstern eine Vielzahl von Ortsfrequenzen abgebildet werden. Ein ideales Siemensstern-Testmuster bildet in seinem Zentrum beliebig hohe Ortsfrequenzen ab. Bereiche gleicher Ortsfrequenz sind kreisförmig um das Zentrum des Siemenssterns angeordnet. Die hohen Ortsfrequenzen liegen dichter am Zentrum, die Niedrigen weiter außen. Wird der Siemensstern durch ein reales optisches System beobachtet oder aufgenommen, kann dieses, wie auch bei dem in Kapitel 7.1.1.1 vorgestellten Balkenmuster, die Strukturen des Siemenssterns nicht optimal wiedergeben. Für jedes reale optische System, welches sich im Fokus befindet, ergibt sich, unter Annahme gleicher Auflösungsvermögen der Kamera in alle Raumrichtungen, ein kreisförmiger Bereich im Zentrum des Siemenssterns. Dieses kann durch die Überlagerungen der PSF nicht dargestellt werden. Dieser Bereich erscheint, wie auch bei dem zuvor vorgestellten Balkenmuster, in einem Grauton, der durch die Überlagerung der schwarzen und weißen Segmente entsteht. Abbildung 7.24 zeigt das mit einer CV-S035MH aufgenommene Bild eines Siemenssterns-Testmusters.

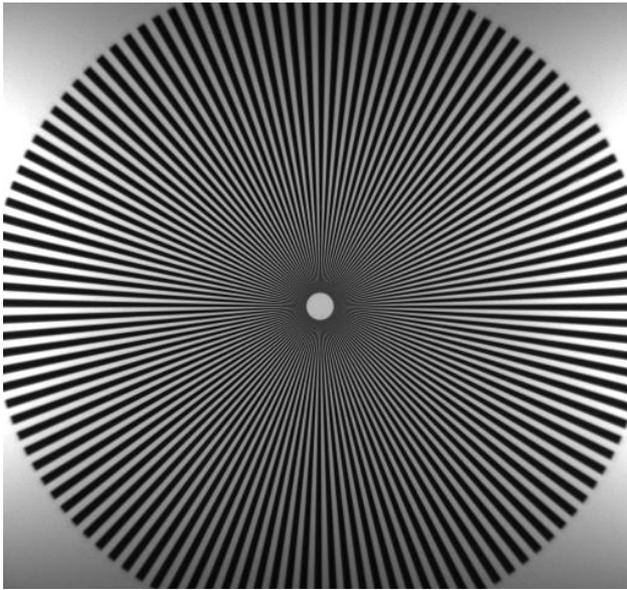


Abbildung 7.24 „Fokussierter Siemensstern“

Das für diese Aufnahmen verwendete Edmund-Optics-Siemensstern-Testmuster mit 120 Segmenten und 60 mm Durchmesser besitzt in seinem Zentrum einen unauflösbaren Bereich mit 2,5 mm Durchmesser. Mit Ausnahme des unauflösbaren Bereiches im Zentrum des Siemenssterns ist der Kontrast zwischen weißen und schwarzen Segmenten für alle Ortsfrequenzen des Siemensstern-Testmusters konstant. Die in Abbildung 7.24 gezeigte Aufnahme des Siemensstern-Testmusters hingegen zeigt deutliche Kontrastverluste zum Zentrum hin. Die Aufnahme des Siemenssterns wurde mit einer optimal fokussierten Kamera aufgenommen. In diesem Bild sind die höchsten auflösbaren Ortsfrequenzen für die betrachtete Kamera-Objektiv-Kombination abgebildet. Befindet sich das Kamerasystem nicht im Fokus, nimmt das Auflösungsvermögen durch die Eigenschaften des Zerstreuungskreises ab. Ein schlechteres Auflösungsvermögen führt zu einem größeren verschwommenen Bereich im Zentrum des Siemenssterns. In Abbildung 7.25 ist für dieselbe Kamera-Objektiv-Kombination eine Aufnahme des Siemensstern-Testmusters dargestellt. Die Kamera ist bei dieser Aufnahme auf ein Objekt fokussiert, welches sich 30 mm vor der eigentlichen Objektebene befindet.

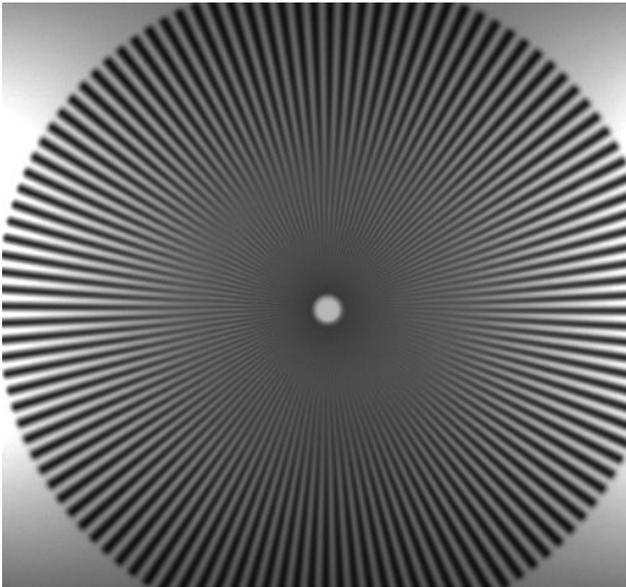


Abbildung 7.25 „Defokussierter Siemensstern“

Um ein Kamerasystem mit diesem Testmuster zu fokussieren, muss das Auflösungsvermögen der Kamera für verschiedene Bild- oder Gegenstandsweiten ermittelt werden. Damit das Auflösungsvermögen mit dem Siemensstern-Testmuster bestimmt werden kann, muss der Durchmesser des verschwommenen Bereichs in der Mitte des Testmusters gemessen und ausgewertet werden. In Kapitel 7.2.1 werden die zur Auswertung erforderlichen Bildverarbeitungswerkzeuge beschrieben.

7.1.2 Fokussieralgorithmen

Im Folgenden werden die getesteten Autofokusalgorithmen beschrieben. Anders als die bis jetzt vorgestellten Verfahren „Balkenmuster“ und „Siemensstern-Testmuster“ sind die Autofokusalgorithmen speziell für die Fokussierung von Kameras entwickelt worden. Die Algorithmen errechnen für jedes Bild einen Wert, der dem Grad der Fokussierung entspricht. Die Algorithmen werden entsprechend ihrer Funktionsweise in folgende Unterkapitel unterteilt:

$I(x, y, z)$	Intensitätswert des Pixels an der Stelle (x, y) im Bild für das Bild (z) der Fokussmessreihe
H	Höhe des Bildes in Pixel
W	Breite des Bildes in Pixel
$\overline{I(z)}$	Pixelintensität gemittelt über das gesamte Bild (z)
$h(i)$	Anzahl der Pixel im Bild mit der Intensität (i)

7.1.2.1 Differenzbasierende Fokussieralgorithmen

Die erste Gruppe der Autofokusalgorithmen, im Englischen auch als „Funktion based on image differentiation“ Algorithmen bezeichnet, basiert auf Intensitätsunterschieden zwischen benachbarten Pixeln im Bild [18]. Die Algorithmen unterscheiden sich durch die Anzahl der betrachteten Pixel und die unterschiedliche Gewichtung der ermittelten Intensitätsunterschiede. Diese Algorithmen arbeiten mit Kantenübergängen. Kantenübergänge in Bildern, die mit defokussierten Kameras aufgenommen wurden, sind durch die glättenden Eigenschaften des Zerstreuungskreises flacher als Kantenübergänge in Bildern, die mit fokussierten Kameras aufgenommen wurden.

- Absolut Gradient

$$f(z) = \sum_x \sum_y |I(x, y, z) - I(x, y - 1, z)| \quad (7.6)$$

Der Absolut Gradient-Fokusalgorithmus summiert die Beträge der Intensitätsdifferenzen zweier benachbarter Pixel in y-Richtung. Es werden die Intensitätsdifferenzen der Pixel über das gesamte Bild aufsummiert. Dieser Vorgang wird für alle Bilder, die zur Fokussierung aufgenommen wurden, wiederholt.

- Square Gradient

$$f(z) = \sum_x \sum_y (I(x, y, z) - I(x, y - 1, z))^2 \quad (7.7)$$

Wie beim Absolut Gradient-Fokusalgorithmus werden auch beim Square Gradient-Algorithmus die Unterschiede zwischen zwei benachbarten Pixeln in y-Richtung aufsummiert. Im Gegensatz zum Absolut Gradient werden die Intensitätsdifferenzen in den Pixelwerten anschließend quadriert, um signifikante Kanten besonders hervorzuheben.

- Netten's Filter

$$f(z) = \sum_x \sum_y (I(x - 1, y, z) - I(x + 1, y, z))^2 \quad (7.8)$$

Ähnlich dem Square Gradient-Algorithmus werden Intensitätsunterschiede zweier Pixel quadriert und aufsummiert. Für die Messung werden die Intensitätswerte zweier nicht in direkter Nachbarschaft stehender Pixel betrachtet. Dieser Algorithmus basiert auf Kantenübergängen in der horizontalen x-Richtung.

- Energy Laplace

$$f(z) = \sum_x \sum_y C(x, y, z)^2 \quad (7.9)$$

$$C(z) = I(z) * \begin{bmatrix} -1 & -4 & -1 \\ -4 & 20 & -4 \\ -1 & -4 & -1 \end{bmatrix}$$

Im Gegensatz zu den bereits vorgestellten Fokusalgorithmen arbeitet der Energy Laplace-Algorithmus mit einem Kantenfilter, der die Kanten im Bild hervorhebt. Anschließend wird das Quadrat der kantengefilterten Intensitätswerte für jeden einzelnen Bildpunkt aufsummiert. Der Kantenfilter hebt dabei gleichermaßen Strukturen in x- und in y-Richtung hervor.

- Laplacian

$$f(z) = \sum_x \sum_y (I(x, y-1, z) - 2I(x, y, z) + I(x, y+1, z))^2 \quad (7.10)$$

Der Laplacian-Autofokusalgorithmus summiert das Quadrat der Intensitätsunterscheide zwischen drei benachbarten Bildpunkten über das gesamte Bild auf. Der mittlere Bildpunkt wird doppelt gewichtet. Dieser Algorithmus arbeitet mit Kantenübergängen in horizontaler y-Richtung.

- Tenegrad's Function

$$f(z) = \sum_x \sum_y S_x(x, y, z)^2 + S_y(x, y, z)^2 \quad (7.11)$$

$$S_x(z) = I(z) * \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad S_y(z) = I(z) * \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Der Tenegrad-Algorithmus basiert wie der Energy Laplace-Fokusalgorithmus auf einem Kantenfilter. Als Katenfilter finden zwei Sobel-Operatoren Verwendung. Ein Sobelfilter zur Kantenerkennung in horizontaler x-Richtung sowie ein Sobelfilter in vertikaler y-Richtung. Die Summe der kantengefilterten Intensitätswerte wird quadriert und aufsummiert.

- Vollath's F4

$$f(z) = \sum_x \sum_y I(x, y, z) * I(x+1, y, z) - \sum_x \sum_y I(x, y, z) * I(x+2, y, z) \quad (7.12)$$

Dieser Algorithmus basiert auf dem Unterschied in der Pixelintensität zweier benachbarter Pixel. Im Gegensatz zu den andern in dieser Klasse vorgestellten Algorithmen wird der Intensitätswert des aktuellen Pixels mit der Pixelintensität des benachbarten Pixels gewichtet. Scharfe Kantenübergänge mit steil ansteigenden Intensitätswerten erhalten eine höhere Gewichtung und daraus resultiert ein maximaler Wert in dem Bild, in dem sich das System optimal im Fokus befindet.

7.1.2.2 Höhen- und tiefenbasierende Fokussialgorithmen

Der folgende Autofokusalgorithmus basiert auf hohen und tiefen Pixelintensitäten in den zu testenden Bildern. Durch die glättenden Eigenschaften des Zerstreungskreises besitzen defokussierte Bilder weniger sehr helle und sehr dunkle Bildbereiche. Algorithmen, die mit dieser Eigenschaft von defokussierten Bildern arbeiten, werden im Englischen als „Function based on depth of peaks and valleys“ bezeichnet [18].

- Signal Power

$$f(z) = \sum_x \sum_y (I(x, y, z))^2 \quad (7.13)$$

Der Signal Power-Autofokusalgorithmus summiert die quadrierten Pixelintensitäten eines Bildes auf. Dieser Algorithmus basiert auf den glättenden Eigenschaften des vergrößerten Zerstreungskreisdurchmessers bei defokussierten Bildern.

7.1.2.3 Kontrastbasierende Fokussialgorithmen

Die folgende Klasse der Autofokusalgorithmen, im Englischen als „Funktion based on image contrast“ bezeichnet, basiert auf den Kontrastunterschieden im untersuchten Bild. Defokussierte Kameras erzeugen Bilder mit weniger Kontrast als fokussierte Kameras.

- Variance

$$f(z) = \frac{1}{H * W} \sum_x \sum_y (I(x, y, z) - \overline{I(Z)})^2 \quad (7.14)$$

Der Variance-Autofokusalgorithmus summiert die Abweichungen vom mittleren Intensitätswert über das gesamte Bild auf. Größere Abweichungen vom Mittelwert,

die durch kontrastreiche Bilder hervorgerufen werden, werden höher gewichtet als kontrastarme Bilder.

- Normalized Variance

$$f(z) = \frac{1}{H * W * (\overline{I(z)})^2} \sum_x \sum_y (I(x, y, z) - \overline{I(z)})^2 \quad (7.15)$$

Ähnlich dem Variance wird beim Normalized Variance-Autofokusalgorithmus die Abweichung vom Mittelwert aufsummiert. Der Unterschied liegt in der Normierung der Messergebnisse.

- Absolut Variance

$$f(z) = \frac{1}{H * W} \sum_x \sum_y |I(x, y, z) - \overline{I(z)}| \quad (7.16)$$

Der Absolut Variance-Algorithmus summiert die Beträge der Intensitätsabweichungen vom Mittelwert. Die Beträge werden normiert und als Messergebnis ausgegeben.

- Vollath's F5

$$f(z) = \sum_x \sum_y I(x, y, z) * I(x+1, y, z) - H * W * (\overline{I(z)})^2 \quad (7.17)$$

Der Vollath F5 Algorithmus summiert die Pixelintensität des aktuellen Pixels gewichtet mit der Pixelintensität des Nachbarpixels in der x-Richtung. Weiterhin wird die durchschnittliche Pixelintensität mit der Anzahl der Pixel multipliziert. Das Ergebnis dessen wird von dem Messwert abgezogen.

7.1.2.4 Histogrammbasierende Fokussialgorithmen

Der letzte Autofokusalgorithmus basiert auf dem Histogramm des betrachteten Bildes. Die Intensitätsdifferenz zwischen dem hellsten und dem dunkelsten Pixel ist in defokussierten Bildern geringer als in Bildern, die mit dem korrekten Fokus aufgezeichnet wurden. Autofokusalgorithmen, die nach diesem Prinzip arbeiten, werden auch als „Funktion based on Histogram“ bezeichnet [18].

- Histogram Range

$$f(z) = \max_i (h(i) > 0) - \min_i (h(i) > 0) \quad (7.18)$$

Dieser Algorithmus basiert auf dem Histogramm des Bildes. Die Differenz zwischen dem hellsten und dem dunkelsten Pixel wird für jedes Bild berechnet.

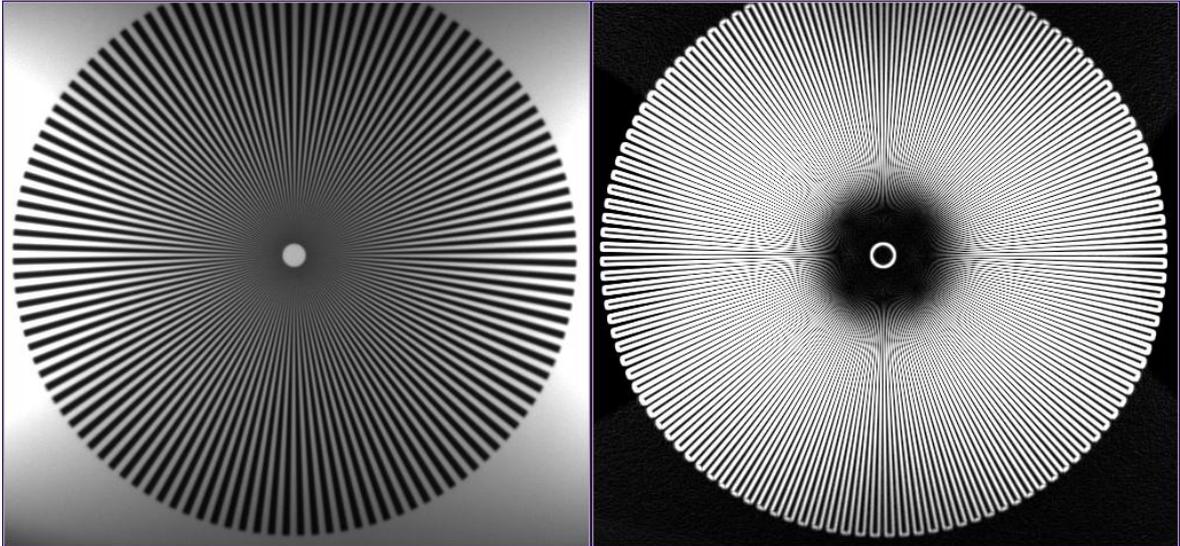
Die Umsetzung und Beurteilung der hier vorgestellten Verfahren und Algorithmen erfolgt in den nachfolgenden Unterkapiteln.

7.2 Realisierung der Verfahren und Algorithmen

Die Realisierung der beschriebenen Verfahren und Algorithmen wird in diesem Kapitel dargestellt. Das beschriebene Siemensstern-Verfahren zur Bestimmung der Fokusposition lässt sich mit den Bildverarbeitungswerkzeugen, die das Keyence-CV-5001 bietet, direkt auswerten. Die Autofokusalgorithmen lassen sich mit Ausnahme des Histogramm Range-Autofokusalgorithmus nicht auf dem Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystem umsetzen. Für die Überprüfung der Fokusalgorithmen wurden Beispielbilder aus dem Bildverarbeitungssystem exportiert und mit ImageJ ausgewertet.

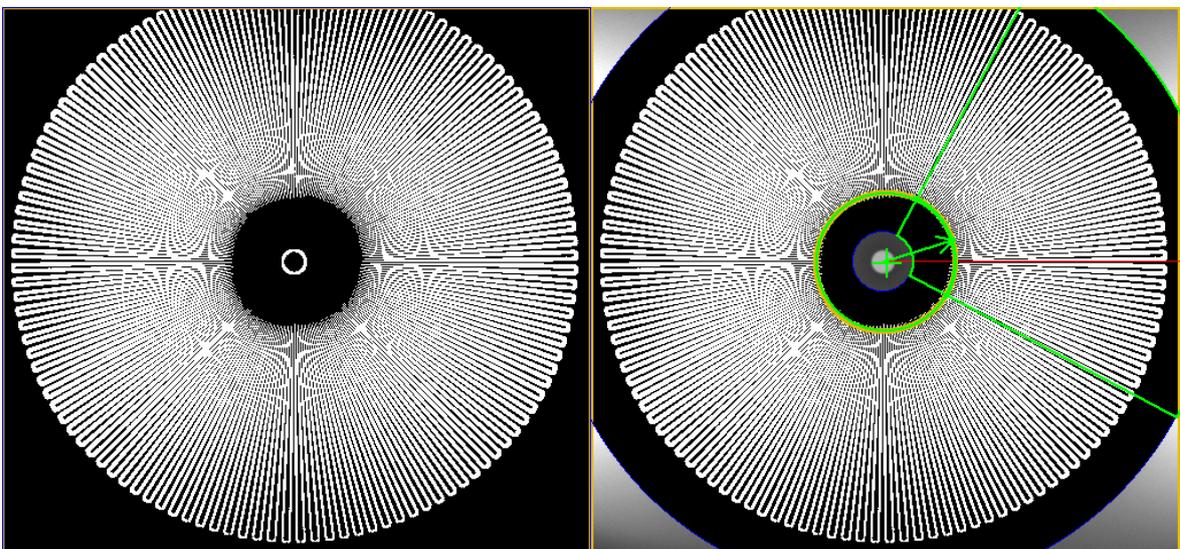
7.2.1 Fokussmessung mit dem Siemensstern-Testmuster

Die Auswertung des Siemensstern-Testmusters kann direkt auf dem Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystem erfolgen. Der Durchmesser des sich in der Mitte des Siemensstern-Testmusters ergebenden unscharfen Bereichs muss für die Bestimmung des Kamerafokusses gemessen werden. Um den Durchmesser dieses Kreises messen zu können, muss das Bild vorverarbeitet werden. Für die Vorverarbeitung des Bildes werden zunächst die Kanten durch einen Kantenfilter hervorgehoben. Abbildung 7.26 zeigt auf der linken Seite das unverarbeitete Bild und auf der rechten Seite das kantengefilterte Bild.



Abbildungen 7.26 „Siemensstern ungefiltert und Siemensstern Prewitt kantengefiltert“

Für die Hervorhebung der Kanten im Bild wird ein Prewitt-Kantenfilter eingesetzt. Dieser Kantenfilter hebt signifikante Kanten im Bild richtungsunabhängig hervor [5]. Um die Bildinformationen weiter einzuschränken, wird das aufgenommene Graustufenbild im Anschluss an die Kantenfilterung in ein Schwarzweißbild umgewandelt. Abbildung 7.27 zeigt auf der linken Seite das kantengefilterte Schwarzweißbild. In dem kantengefilterten Schwarzweißbild kann der Durchmesser des unscharf dargestellten Bereichs eindeutig bestimmt werden. Für die Vermessung von Kreisen steht in dem Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystem ein eigenes Werkzeug, das so genannte „Trend edge position“-Werkzeug, zur Verfügung. Dieses Werkzeug misst an einer einstellbaren Anzahl von Punkten die Kantenposition und interpoliert aus den Messwerten den Kreisdurchmesser. Abbildung 7.27 zeigt das „Trend edge position“-Werkzeug angewendet auf das vorverarbeitete Schwarzweißbild. Die grüne Linie stellt den aus den Messwerten interpolierten Kreis dar.



Abbildungen 7.27 „Siemensstern-Binärbild und Siemensstern-Kreisvermessung“

7.2.2 Fokussmessung mit den Autofokusalgorithmen

Die beschriebenen Autofokusalgorithmen können auf dem Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystem mit Ausnahme des Histogram Range-Algorithmus nicht implementiert werden. Für die Realisierung dieser Algorithmen kommt das frei verfügbare Programm ImageJ zum Einsatz. Die Autofokusalgorithmen können in diesem Bildverarbeitungsprogramm in Form eines selbst geschriebenen Macros umgesetzt werden. Der kommentierte Quellcode für die umgesetzten Autofokusalgorithmen befindet sich im Anhang A1.

Der Programmablauf der erstellten Macros ist Folgender: Das Programm öffnet die Bilder aus dem angegebenen Ordner, verarbeitet sie entsprechend dem eingestellten Autofokusalgorithmus und schließt die Bilder nach der Verarbeitung wieder. Die Fokussmesswerte werden nach der Auswertung aller Bilder normiert und ausgegeben. Im Gegensatz zu der Siemensstern-Fokussmessung arbeiten die Algorithmen unabhängig vom Motiv der aufgenommenen Bilder. Die Bilder sollten jedoch, um gute Messwerte für die Bestimmung des Fokus zu erhalten, einen hohen Kontrast und viele feine Strukturen aufweisen. Für den Test der Autofokusalgorithmen werden drei verschiedene Bildersätze mit unterschiedlichen Motiven zu jeweils 50 Bildern aufgenommen. Die Motive sind in Abbildung 7.28 ersichtlich.



Abbildung 7.28 „Autofokusalgorithmen-Testmotive“

Das erste Motiv ist das Siemensstern-Testmuster. Die Messwerte, die die Autofokusalgorithmen liefern, lassen sich direkt mit den Messwerten des Siemensstern-Verfahrens vergleichen. Weiterhin ist dieses Motiv kontrastreich und weist feine Strukturen auf. Das zweite Motiv ist eine Macroaufnahme einer Fliege [vgl. 10]. Dieses Bild besitzt viele feine Strukturen. Motiv drei zeigt eine technische Zeichnung des Aufgabenbereiches, in dem die Kameras eingesetzt werden. Mithilfe dieses Motivs wurden die Kameras im Vorfeld dieses Projekts eingestellt. Dieses Motiv weist einen sehr hohen Kontrast auf, besitzt allerdings wenig feine Strukturen. Die mit einer CV-S035CH aufgezeichneten Bilder befinden sich im Anhang A2. Die Bildweite, also die Dicke des

Distanzrings, ist für alle Bilder dieselbe. Die 50 Bilder eines Testsatzes unterscheiden sich nur durch den Abstand zwischen Kamera und Objektiv. Dieser Abstand wurde um 0,4 mm für jedes Bild mit der Linearachse variiert. Die beiden Bilder in Abbildung 7.29 zeigen ein Bild aufgenommen in der hinteren Endlage der Linearachse (links) und ein Bild desselben Motivs, aufgenommen in der vorderen Endlage der Linearachse (rechts).

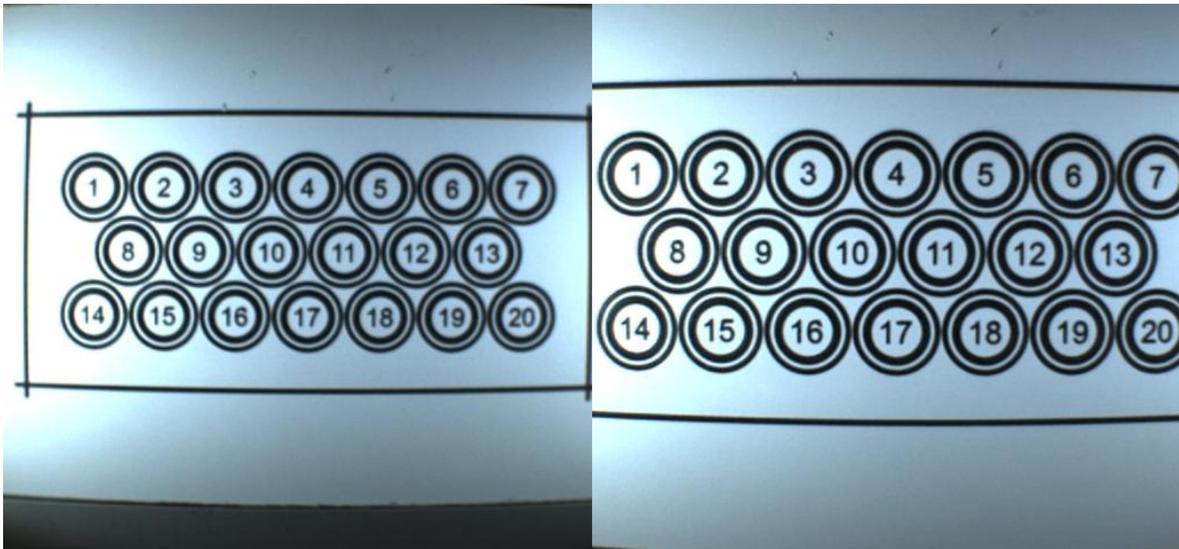


Abbildung 7.29 „Variation der Gegenstandsweite“

7.3 Bewertung der Algorithmen und des Verfahrens

Die Autofokusalgorithmen arbeiten unabhängig vom aufgenommen Motiv. Um zu prüfen mit welchen Motiven die Algorithmen die besten Ergebnisse liefern, wurden, wie in Kapitel 7.2.2 beschrieben, drei verschiedene Motive getestet. Die folgenden drei Diagramme 7.2, 7.3 und 7.4 zeigen die Messergebnisse der Autofokusalgorithmen für die drei Motive. Alle Messergebnisse sind auf den maximalen Wert normiert.

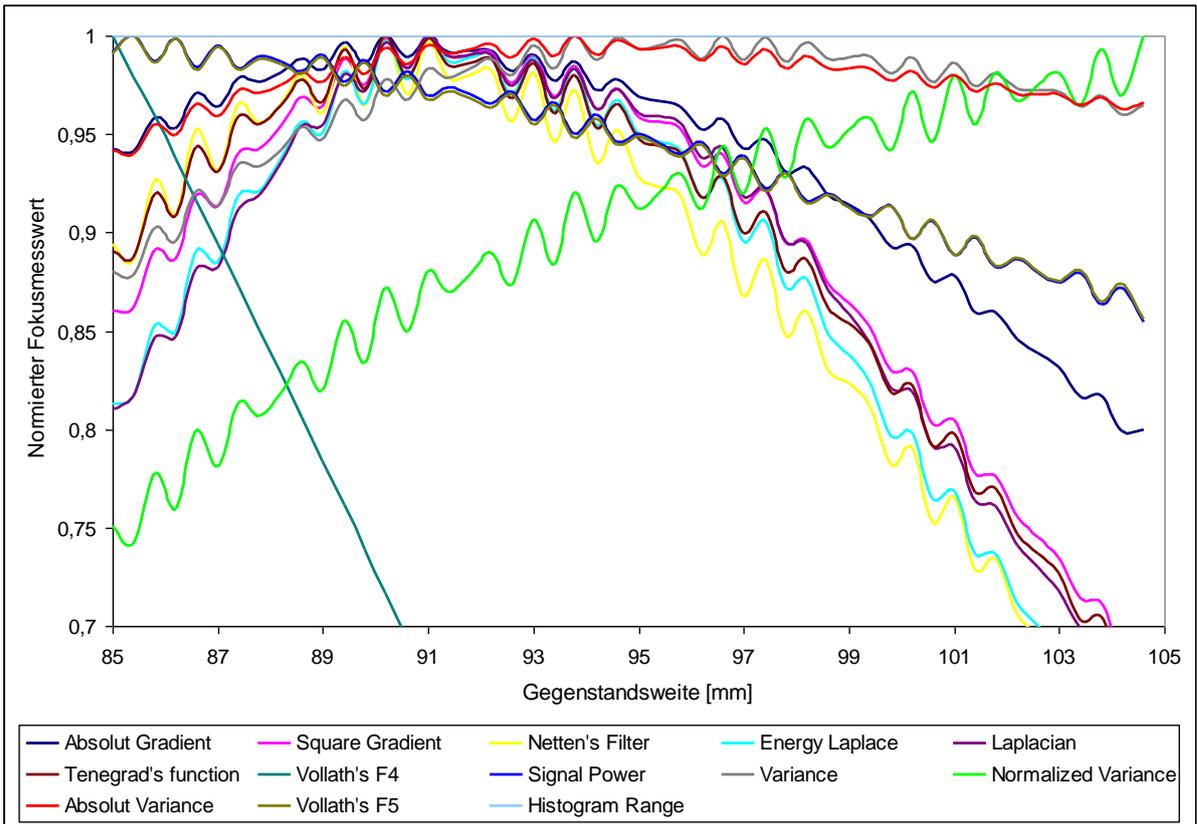


Diagramm 7.2 „Messergebnisse: Autofokusalgorithmen (Siemensstern)“

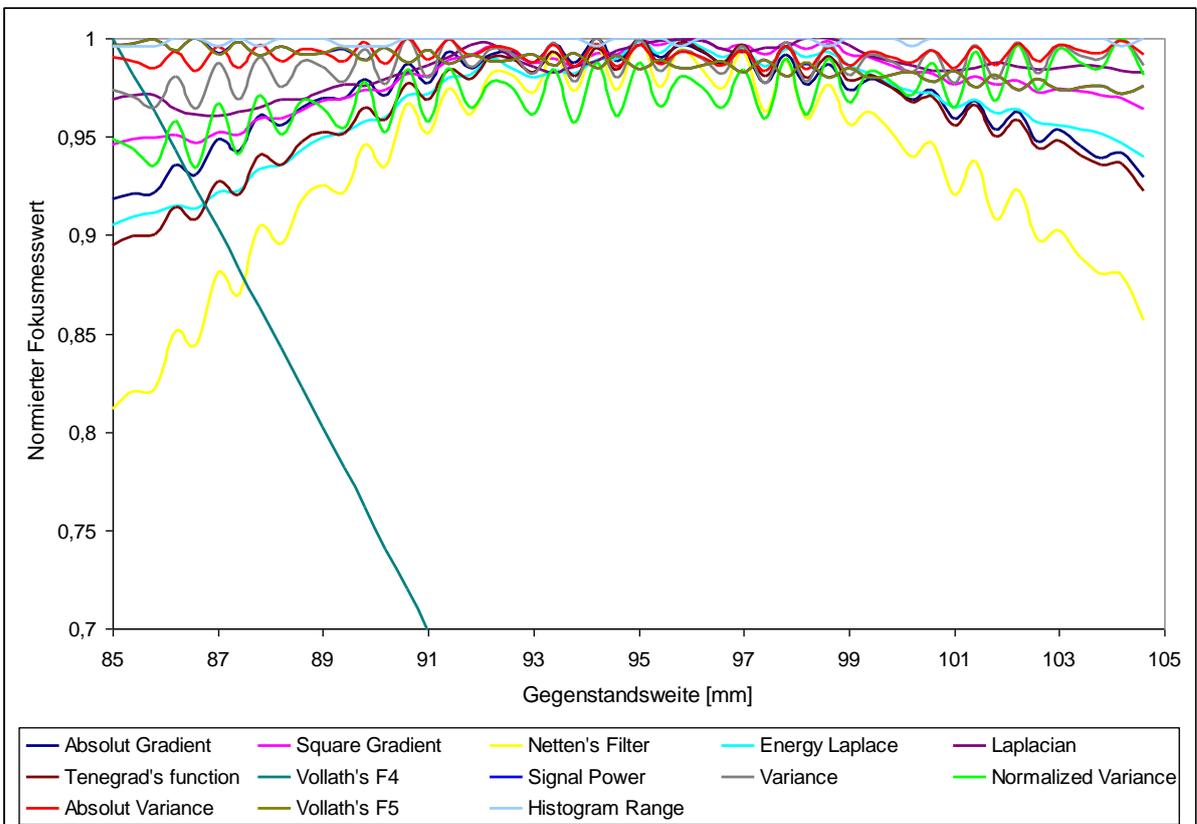


Diagramm 7.3 „Messergebnisse: Autofokusalgorithmen (Fliege)“

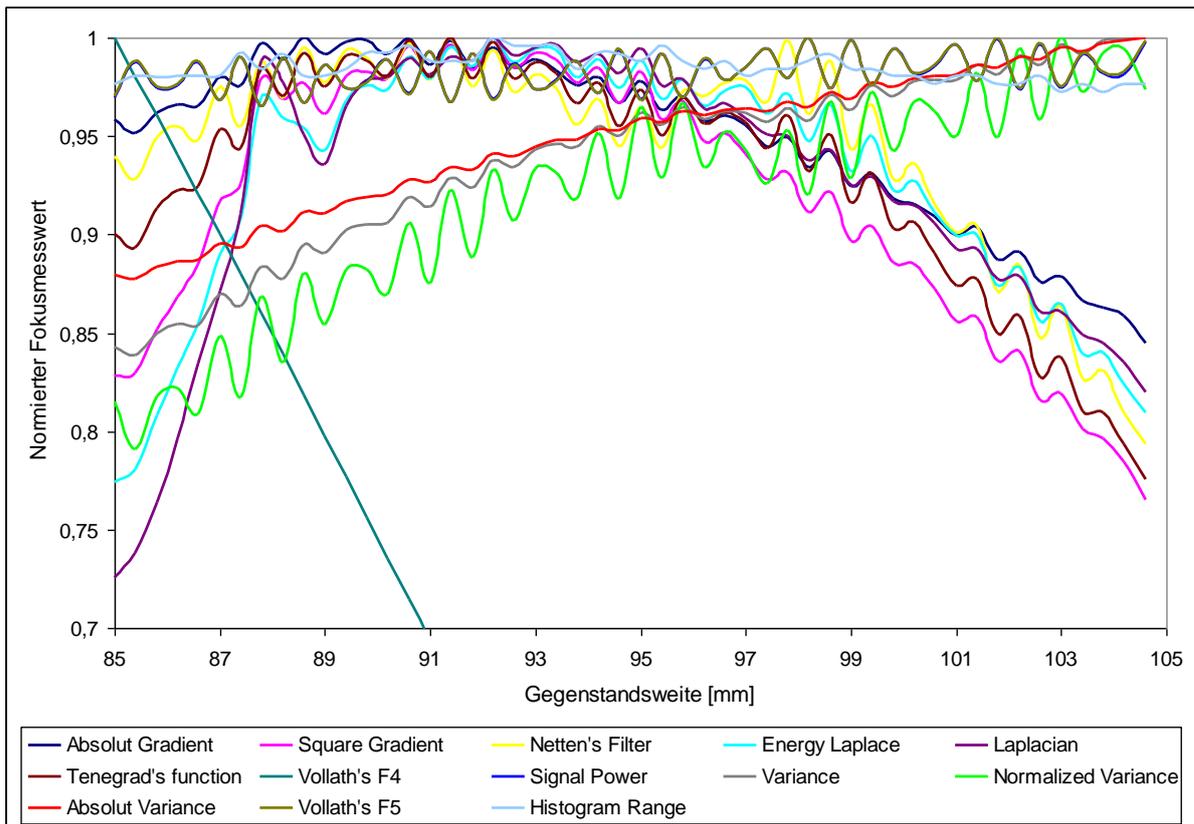


Diagramm 7.4 „Messergebnisse: Autofokusalgorithmen (technische Zeichnung)“

Ein Teil der betrachteten Autofokusalgorithmen liefert mit den getesteten Bildern keine verwertbaren Messergebnisse. Die Position des optimalen Fokus befindet sich in etwa in der Mitte des Diagramms. Unabhängig vom Motiv liefern folgende Autofokusalgorithmen keine verwertbaren Messergebnisse: Vollath's F4, Signal Power, Variance, Normalized Variance, Absolut Variance, Vollath's F5 und Histogram Range. Diese Algorithmen werden durch die sich ändernde Motivgröße beeinflusst und erfüllen die in Kapitel 6.2 aufgestellte Anforderung nicht. Sie werden von den weiteren Beurteilungen ausgeschlossen. Wie in den Messwerten der drei Motive deutlich zu erkennen ist, spielt das verwendete Motiv eine übergeordnete Rolle. Besonders die Messwerte, die die Algorithmen in Verbindung mit dem Siemensstern-Testmuster ergeben, lassen eine genaue Bestimmung der Fokusposition zu. In Diagramm 7.5 sind die Messwerte der Algorithmen aufgelistet, die verwertbare Messergebnisse liefern. Zusätzlich sind hier die normierten Messwerte, die das Siemensstern-Testmuster liefert, dargestellt.

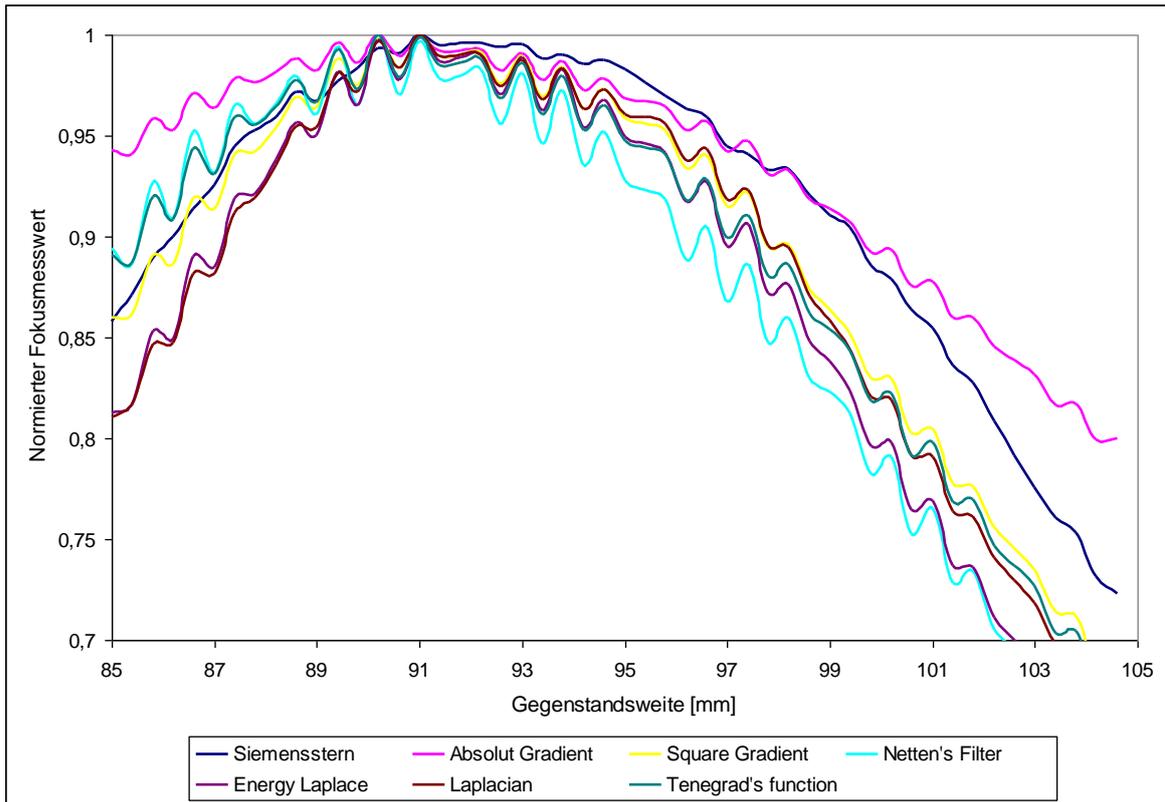


Diagramm 7.5 „Messergebnisse: ausgewählte Autofokusverfahren“

Die Bewertung dieser Verfahren und Algorithmen erfolgt anhand folgender, in Kapitel 6.1 aufgestellter Gesichtspunkte:

- Unimodalität: der Algorithmus liefert nur ein Maximum, welches der optimalen Fokusposition entspricht.
- Gutes Signal-Rausch-Verhältnis (SNR): der Algorithmus sollte möglichst eindeutige Messergebnisse liefern.
- Messbereich: das Verfahren muss in der Position, in der sich das Kamerasystem im Fokus befindet, ein scharf abgegrenztes Maximum liefern.

Der Bewertung der Autofokusverfahren liegt folgendes Schema zugrunde: ++ = 4 Punkte
+ = 3 Punkte - = 2 Punkte -- = 1 Punkt.

Tabelle 7.2 „Bewertungstabelle: Autofokusverfahren“

	Unmodalität	SNR	Messbereich	Ergebnis
Siemensstern	++	++	+	11
Absolut Gradient	+	+	-	8
Square Gradient	+	-	++	9
Netten's Filter	--	--	++	6
Energy Laplace	-	-	++	8
Laplacian	-	+	++	9
Tenegrad's function	-	-	++	8

Das Siemensstern-Verfahren liefert gute Messergebnisse, die den gestellten Anforderungen gerecht werden. Neben den allgemeinen Anforderungen, die in Kapitel 6.1 aufgestellt wurden, müssen auch die Anforderungen, die durch die Hard- und Software an den Algorithmus oder das Verfahren gestellt werden, erfüllt sein. Ein Teil der getesteten Autofokusalgorithmen liefert mit den in der Applikation aufgenommenen Bildern verwertbare Messergebnisse. Diejenigen Algorithmen, die durch die sich ändernde Größe des Bildes keine brauchbaren Messergebnisse liefern, wurden bereits aus den weiteren Beurteilungen ausgeschlossen. Das einzige Verfahren, welches sich auf der eingesetzten Hard- und Software umsetzen lässt und verwertbare Messergebnisse liefert, ist das Siemensstern-Testmuster.

7.4 Auswahl

Die Auswahl des für die Aufgabe geeigneten Algorithmus richtet sich nach den Anforderungen, die in Kapitel 6 aufgestellt wurden. Die allgemeinen Anforderungen wurden von vielen Algorithmen und vom Siemensstern-Verfahren erfüllt. Die Anforderung der Realisierbarkeit auf der bestehenden Hardware wird nur von dem Siemensstern-Verfahren und dem Histogram Range-Algorithmus erfüllt. Der Histogram Range-Algorithmus liefert jedoch keine verwertbaren Messergebnisse und wurde deswegen von weiteren Untersuchungen ausgeschlossen. Die Auswahl des geeigneten Algorithmus fällt somit auf das Siemensstern-Testmuster, welches gute Messwerte liefert und sich auf der bestehenden Hard- und Software umsetzen lässt. Die Messdatenauswertung der gelieferten Messwerte erfolgt in Kapitel 10.2.

8 Anforderungen an die Verschiebungsmessung

Neben der Einstellung des richtigen Kamerafokusses soll das Kalibrierprogramm die Verschiebung des Kamerabildes messen. Die Verschiebung des Bildes, die aus den Fertigungstoleranzen der CV-S035-Kameras und der CA-LS6-Objektive resultiert, lässt ein einfaches Austauschen einer defekten Kamera nicht zu. Das Bildverarbeitungsprogramm muss durch die große Verschiebung des Bildes zwischen den Kameras an jede Kamera individuell angepasst werden. Um Austauschbarkeit zu erreichen, soll die Verschiebung gemessen und korrigiert werden. Die Korrektur der Kameras soll in einem späteren Projekt erfolgen. In diesem Projekt wird die Verschiebung gemessen. Für diese Messung ergeben sich folgende Anforderungen, die zu erfüllen sind:

- Die Verschiebung des Bildes soll für die x- und y-Richtung und die Verdrehung separat gemessen werden.
- Die Verschiebung des Bildes soll in mm und in Pixel auf die Kamera bezogen ausgegeben werden.

9 Konzeption der Verschiebungsmessung

Das zu entwickelnde Kalibriermuster muss so aufgebaut sein, dass die Verschiebung des Bildes für jede Achse separat bestimmt werden kann. Weiterhin soll die Verschiebung des Bildes unabhängig von dem Abstand der Kamera zu dem Prüfmuster in mm angegeben werden können. Das Kalibriermuster, das für die Messung der Verschiebung entworfen wird, ist so an der Linearachse zu montieren, dass es sich für jede zu testende Kamera an derselben Position bezogen auf den Halter der Kamera befindet.

9.1 Testmuster

Für die Messung der Verschiebung wurde das in Abbildung 9.30 ersichtliche Kalibriermuster entworfen.

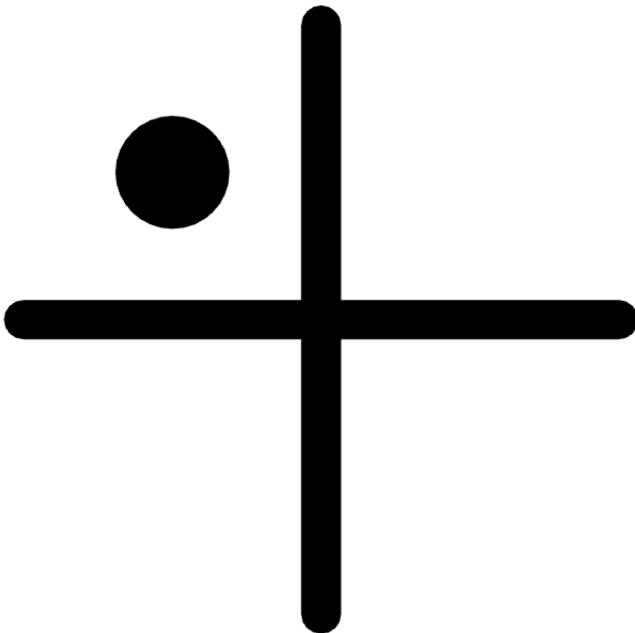


Abbildung 9.30 „Verschiebungsmessmuster“

Das Kalibriermuster besteht aus zwei wesentlichen Elementen:

- das Kreuz, mit dem die Verschiebung des Bildes in vertikaler y- wie in horizontaler x-Richtung sowie die Verdrehung des Bildes um die eigene Achse gemessen werden kann
- der Kreis in der oberen linken Ecke, mit dessen Hilfe die Skalierung des Bildes in mm unabhängig von der Verdrehung bestimmt werden kann.

Der schwarze Skalierkreis in der oberen linken Ecke hat einen Durchmesser von 12 mm.

Das Kalibriermuster ist wie in Abbildung 9.31 fest am Teststand montiert und mit Passtiften in der exakten Position fixiert.

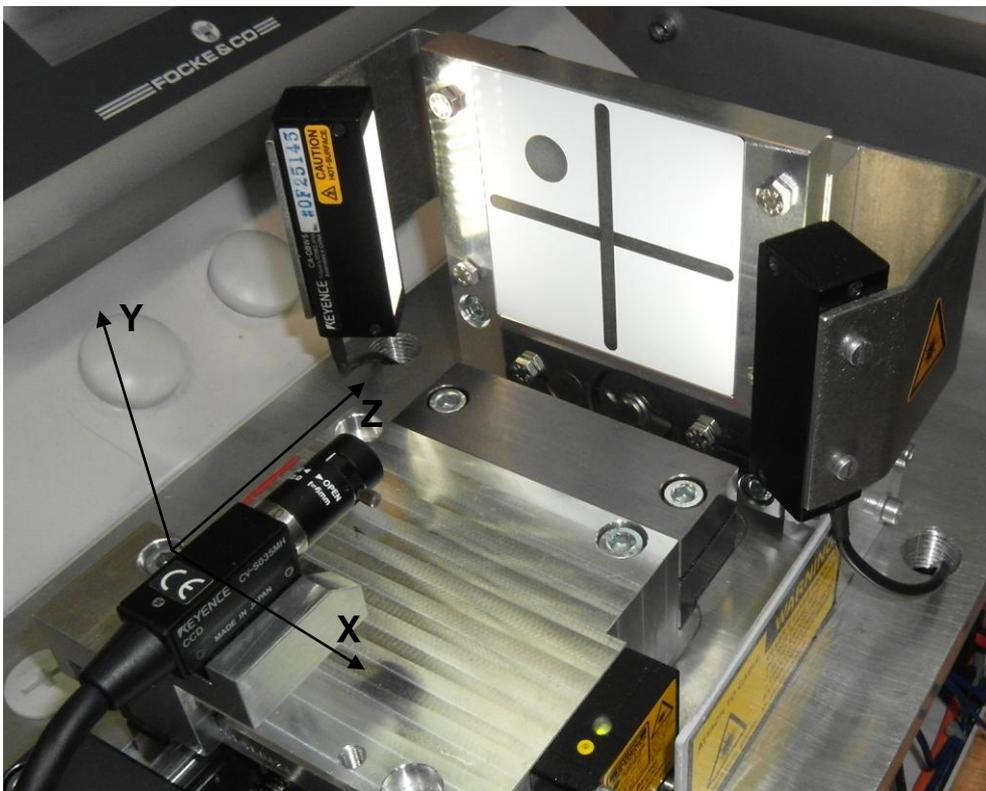


Abbildung 9.31 „Kamerateststand: Verschiebungsmessmuster“

Das Kalibriermuster ist so montiert, dass sich der Schnittpunkt der beiden Linien des Kreuzes direkt im theoretischen Zentrum des Kamerabildes befindet. Das theoretische optische Zentrum der Kamera wurde den Konstruktionszeichnungen der Kamera entnommen [2].

9.2 Bildverarbeitung

Für die automatisierte Vermessung der Bildverschiebung und Verdrehung wurde auf Basis des Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystems ein Programm entwickelt. Das Kalibriermuster ist so vor der Kamera installiert, dass sich das Kreuz des Kalibrierusters direkt im Zentrum des Kamerabildes befinden müsste. Die Abweichungen von dieser Referenz wird von dem erstellten Programm gemessen. Die Verdrehung des Bildes im Bezug zum Kalibriermuster wird ebenfalls an dem Kreuz des Musters vermessen. Um die Verschiebung in x- und y-Richtung zu messen, befinden sich die in Abbildung 9.32 dargestellten Messfenster auf dem Kamerabild des Kalibrierusters.

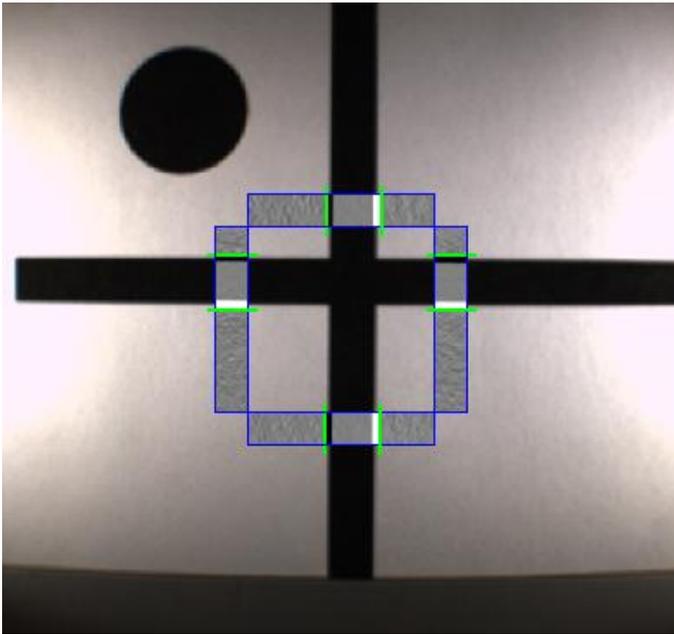


Abbildung 9.32 „Kantenvermessung: Verschiebungsmessmuster“

Um die Kanten des Kreuzes hervorzuheben, wird entsprechend der Richtung ein horizontaler oder ein vertikaler Sobel-Kantenfilter eingesetzt. Die grüne Linie an jeder Kante gibt die genaue Position der von dem „Edge position“-Werkzeug des Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystems gefundenen Kante an. Aus dem Messwert der beiden gefundenen Kanten einer Linie des Kreuzes wird der Mittelpunkt der Linie ermittelt. Die beiden, sich für eine Linie ergebenden Messwerte, werden gemittelt und ergeben die Verschiebung in der x- beziehungsweise der y-Richtung. Die Verdrehung des Bildes kann direkt ermittelt werden. In Abbildung 9.33 ist das „Edge Angle“-Werkzeug dargestellt, mit dem die Verdrehung gemessen wird.

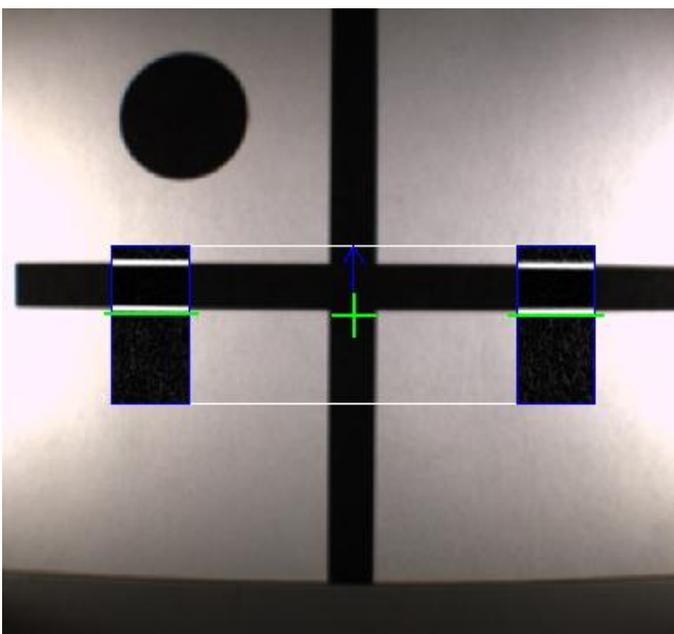


Abbildung 9.33 „Winkelmessung: Verschiebungsmessmuster“

Die Messwerte der Bildverdrehung werden von dem Werkzeug direkt in Winkelgrad ausgegeben. Die Messwerte der Bildverschiebung werden von dem „Edge position“-Werkzeug in Pixeln ausgegeben. Mit den oben genannten Messfenstern wird die Position des Kreuzes im Kamerabild getrennt für x- und y-Richtung berechnet. Durch die Annordnung des Testmusters sollte sich das Zentrum des Kreuzes direkt im Zentrum des Kamerabildes befinden. Die Abweichung des Bildes vom Optimum wird berechnet und ausgegeben. Um diese Verschiebungsmesswerte in eine Verschiebung der Kamera in mm umzurechnen, müssen die Pixelmesswerte skaliert werden. Für diese Skalierung wird der Durchmesser des Kreises in der oberen linken Ecke (s. Abbildung 9.34) mit dem „Trend edge position“-Werkzeug, wie es bereits in Kapitel 7.21 vorgestellt wurde, vermessen.

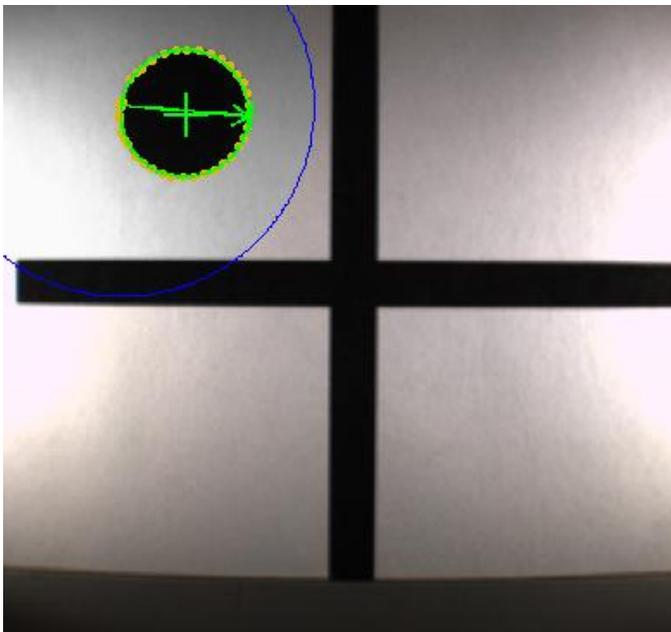


Abbildung 9.34 „Skalierung der Messergebnisse“

Die sich ergebenden Messwerte für die Verschiebung der Kameras in x- und y-Richtung geben an, wie weit die getestete Kamera in x- und y-Richtung verschoben werden muss, um ein Bild zu erzeugen, in dem sich das Kalibrierkreuz in der Mitte des Bildes befindet. In Abbildung 9.31 ist eine Kamera in dem Halter am Kamerateststand zusammen mit dem zugrunde gelegten Koordinatensystem dargestellt. Die statistische Auswertung der Verschiebungsmessdaten der vier zur Verfügung stehenden Kameras erfolgt in Kapitel 11.2.

10 Entwicklung des Kalibrierprogramms

In diesem Kapitel erfolgt die Beschreibung des für die Aufgabe entworfenen Kalibrierprogramms. Das Kalibrierprogramm vereint die beiden separat vorgestellten Aufgaben zu einem Prüfvorgang. Weiterhin werden durch das Kalibrierprogramm die Messwerte des Fokussiervorgangs ausgewertet. Für die Übersichtlichkeit wurde das Programm in einzelne Funktionsbausteine unterteilt. Das kommentierte TwinCAT-Programm befindet sich in Anhang A3. Die Bildverarbeitungsprogramme, die für die Verarbeitung der Kamerabilder verantwortlich sind, wurden bereits in Kapitel 7.2.1 und in Kapitel 9.2 beschrieben. In diesem Kapitel erfolgt die Beschreibung des Kalibrierprogramms, welches auf dem Steuerungsrechner unter TwinCAT ausgeführt wird. Die Beschreibung teilt sich in die Beschreibung der Kommunikation mit dem Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystem, die Datenauswertung, welche die Messwerte der Fokussmessung verarbeitet, und die Visualisierung, durch die der Ablauf des Prüfvorgangs gesteuert wird, auf.

10.1 Beschreibung der Kommunikation mit dem Bildverarbeitungssystem

Die Kommunikation zwischen dem Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystem und dem TwinCAT-Steuerungsrechner erfolgt über die Ethernet-Schnittstelle. Hierzu sind die beiden Komponenten über ein gekreuztes Ethernet-Kabel direkt miteinander verbunden. Die Befehle, mit denen das Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystem gesteuert und Daten von diesem angefordert werden können, wurden in Kapitel 4.2.1.3 vorgestellt. Für die Kommunikation mit dem Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystem wurden auf Basis der TwinCat TCP/IP Connection Server-Bibliothek Funktionsbausteine entwickelt, die im Folgenden vorgestellt werden.

10.1.1 FB_Connect_Keyence-Funktionsbaustein

Mit diesem Funktionsbaustein kann eine Verbindung zum Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystem aufgebaut werden. Bevor Daten zwischen dem Keyence-CV-5001 und dem Steuerungsrechner ausgetauscht werden können, muss mit diesem Funktionsbaustein eine Verbindung aufgebaut werden. Abbildung 10.35 zeigt den Funktionsbaustein mit den Ein- und Ausgängen.



Abbildung 10.35 „FB_Connect_Keyence-Funktionsbaustein“

Die Eingänge auf der linken Seite des Funktionsbausteins haben folgende Funktion: Mit dem „Enable“-Eingang kann der Baustein aktiviert und deaktiviert werden. Wird am „Enable“-Eingang eine steigende Signalfanke erkannt, wird der Baustein ausgeführt und es wird eine Verbindung zum Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystem etabliert. Mit den beiden anderen Eingängen werden dem Funktionsbaustein die Verbindungsparameter des Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystems übergeben. Die Ausgänge auf der rechten Seite des Funktionsbausteins haben folgende Funktion:

Nach dem Aufruf des Funktionsbausteins liefert der „Busy“-Ausgang solange ein Signal, bis die Verbindung aufgebaut ist. Über den „Socket“-Ausgang werden die internen Verbindungsparameter ausgegeben. Mit den Verbindungsparametern kann jeder Funktionsbaustein, dem diese übermittelt werden, auf den geöffneten Verbindungskanal zugreifen. Der „Error“-Ausgang liefert ein Signal, wenn der Verbindungsaufbau fehlgeschlagen ist. Der „ErrorID“-Ausgang liefert in diesem Fall eine Fehlernummer, um die Fehlerursache einzugrenzen.

10.1.2 FB_Disconnect_Keyence-Funktionsbaustein

Dieser Funktionsbaustein hebt eine bestehende Datenverbindung zwischen Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystem und Steuerungsrechner auf. Der Verbindungsabbau muss nach der Beendigung der Datenübertragung ausgeführt werden. Dieser Funktionsbaustein stellt die in Abbildung 10.36 dargestellten Ein- und Ausgänge zur Verfügung.

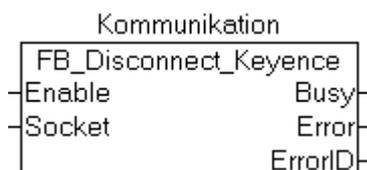


Abbildung 10.36 „FB_Disconnect_Keyence-Funktionsbaustein“

Der „Enable“-Eingang dient, wie bereits beschrieben, dem Aktivieren beziehungsweise Deaktivieren des Funktionsbausteins. Die internen Verbindungsparameter müssen für den Abbau der jeweiligen Verbindung dem „Socket“-Eingang des Funktionsbausteins zur

Verfügung gestellt werden. Die Ausgänge „Busy“, „Error“ und „ErrorID“ haben dieselbe Funktion wie beim „FB_Connect_Keyence“-Funktionsbaustein.

10.1.3 FB_Receive_Data-Funktionsbaustein

Für die Vermessung der korrekten Fokusposition müssen mehrere Kamerabilder nacheinander ausgewertet werden. Die Linearachse löst im Automatikbetrieb in festen Abständen ein Trigger-Signal aus. Empfängt das Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystem ein solches Trigger-Signal, wird ein Bild aufgenommen und ausgewertet. Die Messwerte dieser Datenauswertung werden von dem Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystem automatisch über die Ethernet-Schnittstelle an den Steuerungsrechner versendet. Um diese Messdaten zu empfangen, wird der „FB_Receive_Data“-Funktionsbaustein (s. Abbildung 10.37) eingesetzt.



Abbildung 10.37 „FB_Receive_Data-Funktionsbaustein“

Zusätzlich zu den bereits vorgestellten Ein- und Ausgängen verfügt dieser Funktionsbaustein über einen „Command_Data“-Ausgang. Dieser Ausgang stellt die empfangenen Messdaten in Form eines Arrays zur Weiterverarbeitung bereit.

10.1.4 FB_Send_Receive-Funktionsbaustein

Mit dem „FB_Receive_Data“ Funktionsbaustein können Messdaten, die das Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystem liefert, empfangen werden. Mit dem „FB_Send_Receive“-Funktionsbaustein (s. Abbildung 10.38) können zusätzlich auch Befehle an das Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystem gesendet werden.

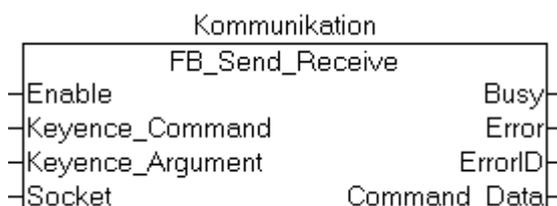


Abbildung 10.38 „FB_Send_Receive-Funktionsbaustein“

Das Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystem antwortet auf jeden von den im Kapitel 4.2.1.3 vorgestellten Befehlen mit dem Rücksenden einer Bestätigung. Der

„FB_Send_Receive“-Funktionsbaustein sendet nach dem Aktivieren durch den „Enable“-Eingang den am Eingang „Keyence_Command“ angelegten Befehl und das am Eingang „Keyence_Argument“ angelegte Argument an das Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystem. Der Funktionsbaustein wartet anschließend bis die Bestätigung vom Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystem eintrifft und gibt die zurückgesendeten Daten am „Command_Data“-Ausgang in Form eines Arrays aus.

10.2 Beschreibung der Datenauswertung

Die Auswertung der Messdaten, die das Siemensstern-Testmuster liefert, wird in diesem Kapitel beschrieben. Unterteilt wird dieses Kapitel in die Beschreibung des Funktionsbausteins, der die Messdaten aufnimmt (FB_Data_Collect) und den Funktionsbaustein, der die Messdaten auswertet (FB_Parabel_Fit).

10.2.1 FB_Data_Collect-Funktionsbaustein

Mit dem im vorigen Abschnitt beschriebenen Funktionsbausteinen können Befehle und Messwerte zwischen dem Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystem und dem TwinCAT-Steuerungsrechner ausgetauscht werden. Zur Messung der Position des Kamerafokusses müssen immer Aufnahmen mit verschiedenen Bildweiten oder wie in diesem Fall mit verschiedenen Gegenstandsweiten durchgeführt werden. Die Linearachse ermöglicht dies. Sie sendet im Automatikbetrieb an jeder anzufahrenden Position ein Trigger-Signal an das Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystem. Ausgelöst durch das Trigger-Signal wird vom Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystem ein Bild aufgenommen und mit dem erstellten Bildverarbeitungsprogramm untersucht. Die Messergebnisse werden anschließend über die Ethernet-Schnittstelle an den Steuerungsrechner übermittelt. Um diese Messdaten zu empfangen und in ein Array einzuordnen, wird der in Abbildung 10.39 dargestellte „FB_Collected_Data“-Funktionsbaustein verwendet.



Abbildung 10.39 FB_Data_Collect-Funktionsbaustein“

Dieser Funktionsbaustein sammelt eine einstellbare Anzahl an Messdaten und stellt sie am Ausgang „Collected_Data“ anderen Funktionsbausteinen zur Verfügung.

10.2.2 Beschreibung der Fokusmessdatenauswertung

Mit dem vorgestellten Funktionsbaustein zur Datenaufnahme können die zur Fokussierung der Kameras benötigten Messdaten aufgenommen werden. Um diese Daten auszuwerten, wurde der Funktionsbaustein „FB_Parabel_Fit“ entwickelt. Dieser Funktionsbaustein wertet die gelieferten Messdaten aus und stellt die Ergebnisse an seinen Ausgängen zur Verfügung. Das Kapitel der Datenauswertung teilt sich in die Beschreibung der grundsätzlichen Form der Messdaten und die Beschreibung des entwickelten Funktionsbausteins zur Auswertung dieser auf.

10.2.2.1 Funktionstyp der Fokusmessdaten

In Kapitel 7.3 wurden bereits die Messdaten dargestellt, die das Siemensstern-Fokussierverfahren liefert, ohne weiter auf die Form der gelieferten Messwerte einzugehen. Diagramm 10.6 zeigt die Messwerte des Siemensstern-Fokussierverfahrens. In diesem Diagramm sind die unnormierten Messwerte dargestellt. Die Messwerte entsprechen direkt dem Durchmesser des verschwommenen Bereichs des Siemenssterns (ausgegeben in Pixel).

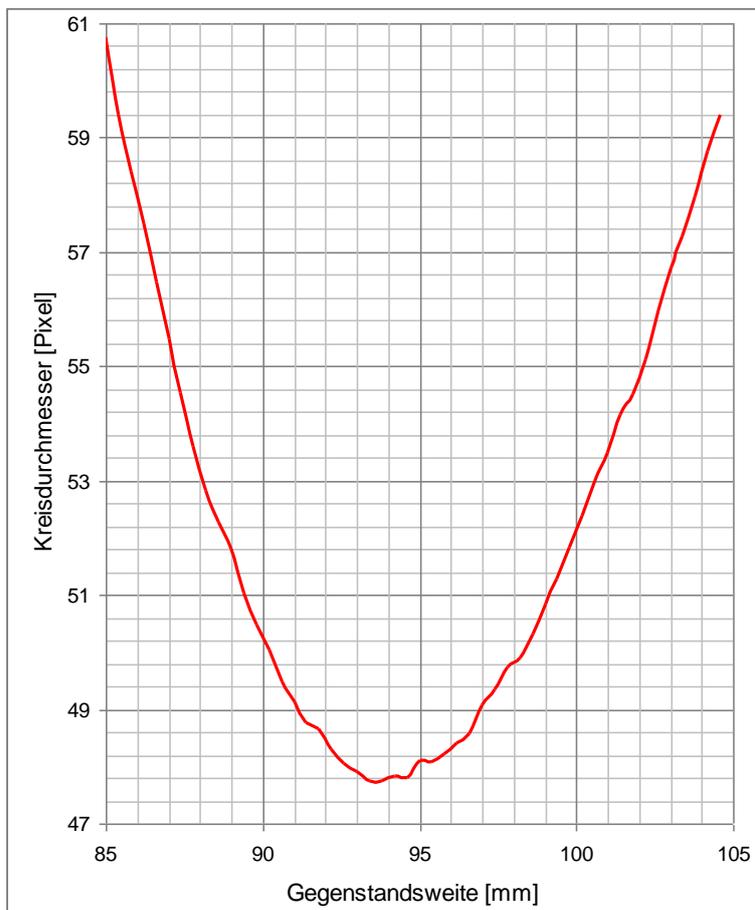


Diagramm 10.6 „Siemensstern-Messdaten: Gegenstandsweite“

Bevor diese Messdaten ausgewertet werden können, müssen sie umgerechnet werden. Die Messwerte geben die Änderung des Fokusmesswerts in Bezug auf die Gegenstandsweite an. Für die Berechnung des richtigen Distanzrings ist jedoch der Fokusmesswert in Bezug auf die Bildweite erforderlich. Die Messwerte lassen sich einfach mit der Abbildungsgleichung (Formel 3.2) umrechnen. Diagramm 10.7 zeigt die Fokusmesswerte bezogen auf die Bildweite.

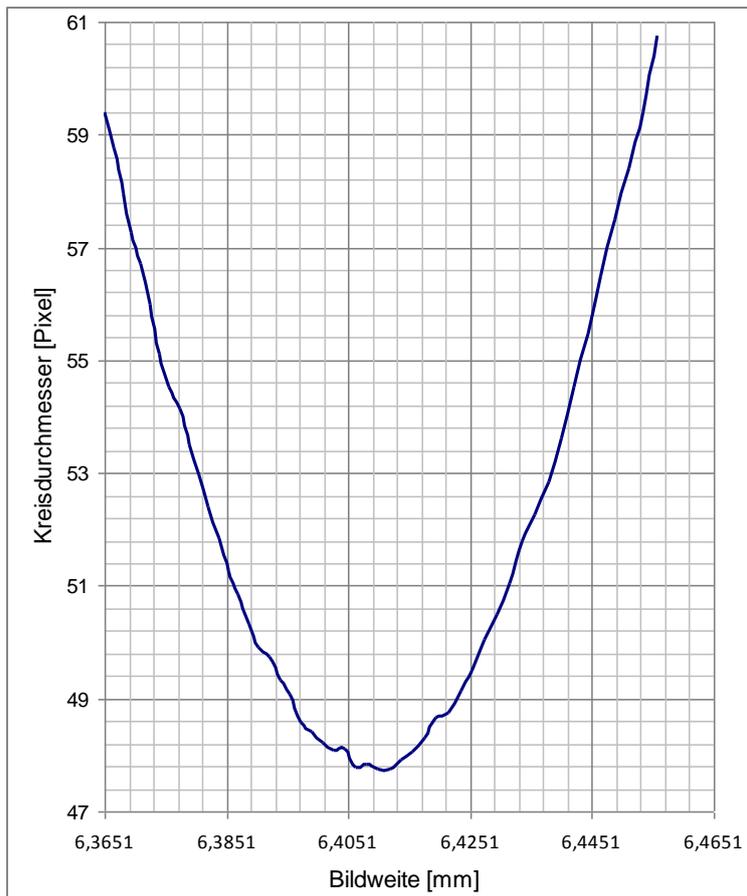


Diagramm 10.7 „Siemensstern-Messdaten: Bildweite“

Der Durchmesser des verschwommenen Bereichs erreicht sein Minimum dort, wo das Auflösungsvermögen der Kamera am Höchsten ist. Das Auflösungsvermögen ist an der Stelle am Höchsten, an der sich das Kamerasystem im Fokus befindet. Für eine exakte Bestimmung der Fokusposition ist es durch das Rauschen, welches die Messwerte aufweisen, nicht möglich, das Minimum der Funktion durch einfaches Suchen des kleinsten Messwerts zu erreichen. Der sich aus den Messergebnissen ergebende Funktionstyp lässt sich nicht alleine aus den Zusammenhängen der geometrischen Optik ableiten. Auch die PSF hat einen Einfluss auf den Funktionsverlauf. Die PSF, die in Kapitel 3.2.2 für ein idealisiertes, beugungsbegrenztes Kamerasystem in ihrem Verlauf auf dem Kamerasensor abgebildet ist, kann für ein reales Kamerasystem mit Abbildungsfehlern nur als grober Anhaltswert Verwendung finden. Die PSF eines realen

Kamerasystems (wie die Keyence-CV-S035-Kamera) besitzt einen anderen Verlauf. Da Autofokusalgorithmen und auch -verfahren Allgemeingültigkeit besitzen sollen und für die Fokussierung vieler verschiedener Kameras einsetzbar sein müssen, ist ein allgemeiner Funktionstyp zu finden, der den Anforderungen gerecht wird. Der Funktionstyp, der diese Aufgabe am Besten erfüllt, ist die Gaußfunktion [12]. Mithilfe der Gaußfunktion lässt sich das Verhalten der Messwerte mit hinreichender Genauigkeit abschätzen. In Diagramm 10.8 ist eine solche Gaußfunktion dargestellt.

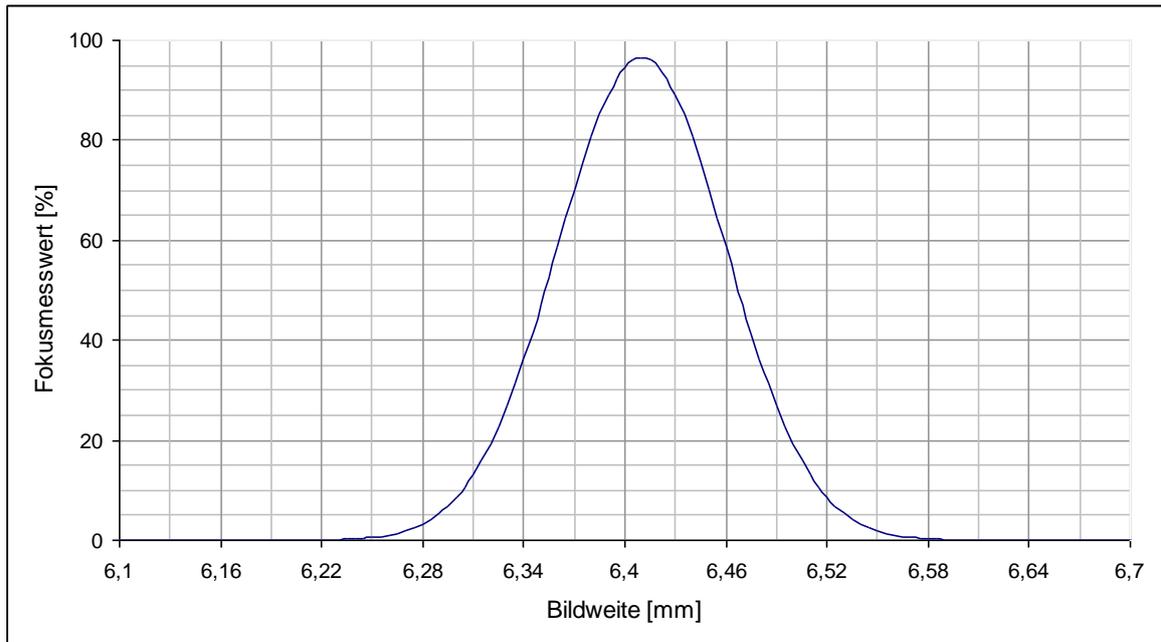


Diagramm 10.8 „Gaußkurve“

Eine Gaußkurve, wie sie in Diagramm 10.8 dargestellt ist, wird in der logarithmischen Darstellung (s. Diagramm 10.9) zu einer Funktion zweiten Grades, einer Parabel. Der Unterschied zwischen der Parabel aus Diagramm 10.9 und den realen Messwerten aus dem Diagramm 10.7 ist, dass die Messwerte, die mit dem Siemensstern aufgenommen wurden, für den besten Fokus ihr Minimum erreichen.

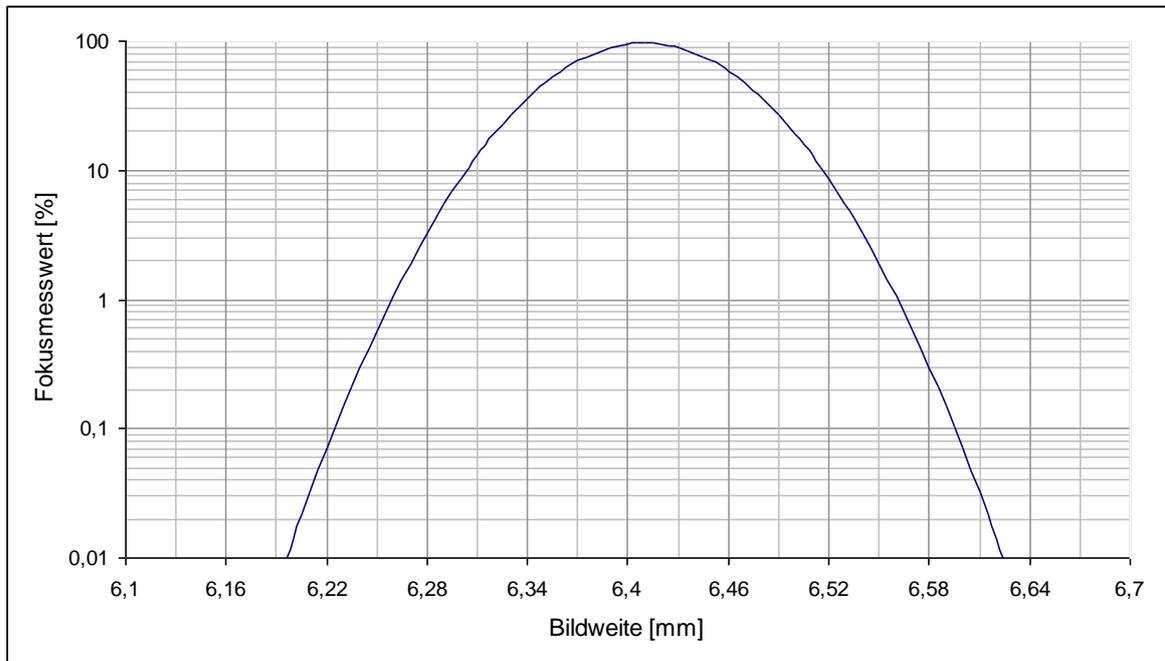


Diagramm 10.9 „Gaußkurve logarithmisch“

Die Aufgabe des „Parabel_Fit“-Funktionsbausteins ist es, die Parameter der Gaußfunktion zu ermitteln. Aus diesen lässt sich wiederum die Position des besten Fokusses (das Minimum oder Maximum der Kurve) bestimmen. Durch den begrenzten Verfahrensweg der Linearachse bilden die Messwerte immer nur einen Teil der Gaußkurve ab. Je nach verwendetem Distanzring wird ein anderer Teil der Gaußkurve gemessen. Um den Sachverhalt zu verdeutlichen, ist in Diagramm 10.10 für verschiedene Distanzringe (von links nach rechts dicker werdend) der Verlauf der sich durch die Variation der Gegenstandsweite ergebenden Fokussmesswerte dargestellt. Für jeden Distanzring wurden 50 Messwerte in dem 20 mm-Verfahrensweg der Linearachse aufgezeichnet.

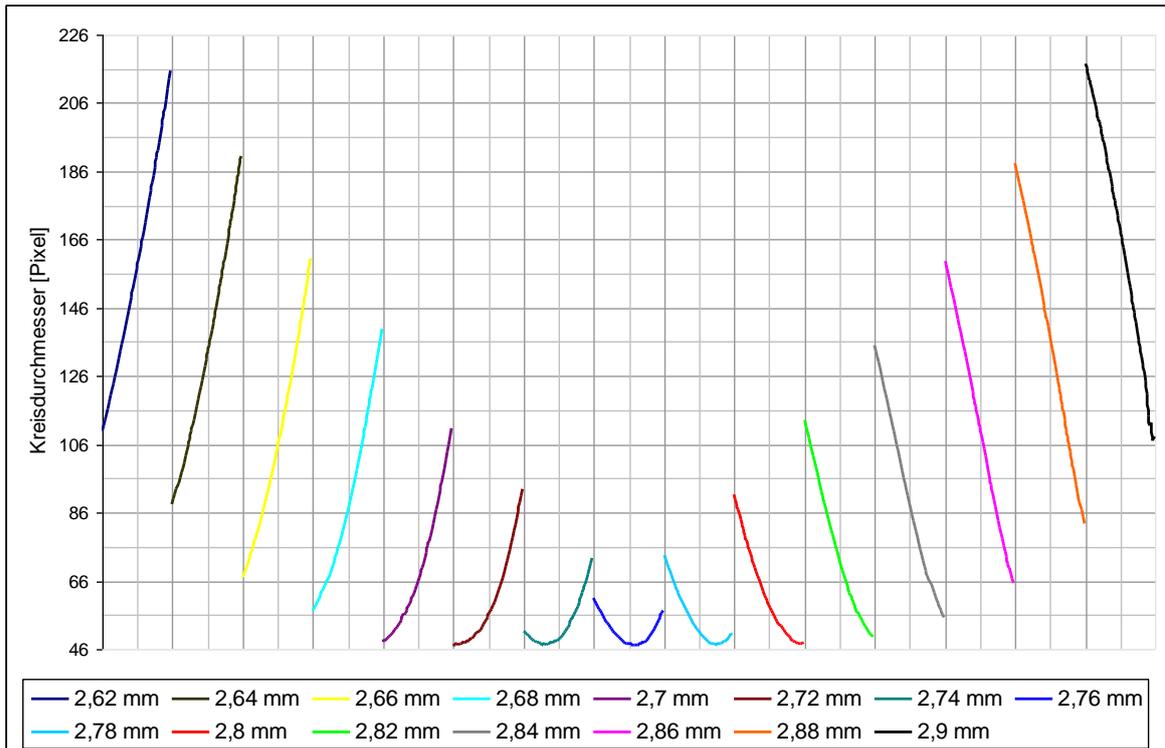


Diagramm 10.10 „Variation: Gegenstandsweite und Bildweite“

10.2.2.2 FB_Parabel_Fit-Funktionsbaustein

Der Funktionstyp der Fokusmessdaten wurde in Kapitel 10.2.2.1 beschrieben. In diesem Kapitel wird die Funktionsweise des „FB_Parabel_Fit“-Funktionsbausteins beschrieben, der die Daten der Fokusmessung auswertet. Der Verlauf der Messwerte, die das Siemensstern-Testmuster liefert, ist in guter Näherung gaußförmig oder in logarithmischer Darstellung parabelförmig. Durch die Annahme eines parabelförmigen Kurvenverlaufs für die Fokusmesswerte kann die Datenauswertung weiter vereinfacht werden. Diese Annahme liefert für den Bereich um die optimale Fokusposition gute Ergebnisse [4]. Die abgeflachten Randbereiche links und rechts von der Fokuskurve sind nur bei sehr starker Defokussierung zu messen. Eine solche Defokussierung kann im Rahmen dieses Projekts ausgeschlossen werden. Die Aufgabe des „FB_Parabel_Fit“-Funktionsbausteins ist es, die drei Parabelparameter aus einer Vielzahl von Messwerten zu berechnen. Für diese Aufgabe wurde die Methode der kleinsten Fehlerquadrate in den Funktionsbaustein implementiert. Mit dieser Methode kann die sich aus den Messwerten ergebende optimierte Ausgleichsparabel berechnet werden [14]. In Diagramm 10.11 ist die Kurve, die sich aus den Messwerten ergibt, in rot dargestellt. Die mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate berechnete Ausgleichsparabel ist in der Farbe blau abgebildet.

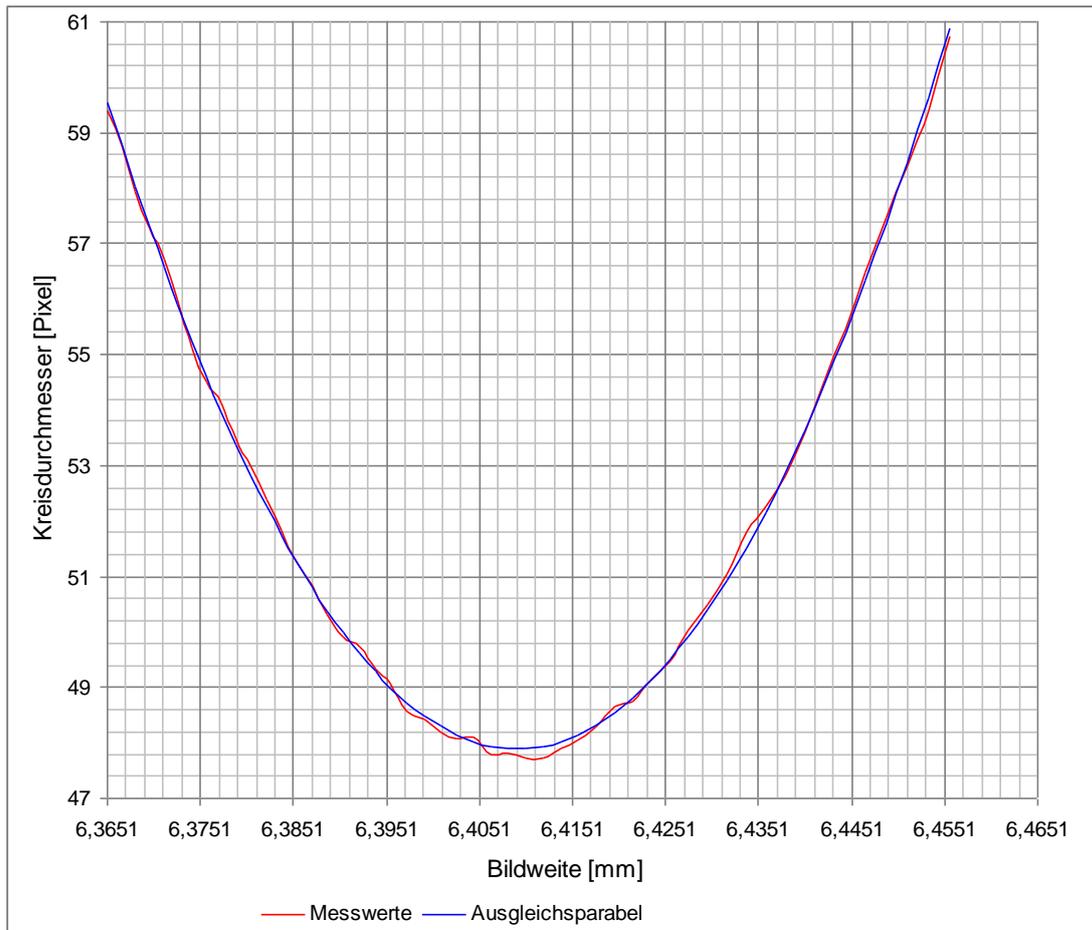


Diagramm 10.11 „Siemensstern-Messwerte und Ausgleichsparabel“

Aus den drei Parametern der Ausgleichsparabel lässt sich das Minimum der Fokusmessung exakt bestimmen. Die Bildweite der Kamera ist für diese Position optimal auf die aktuelle Gegenstandsweite abgestimmt, das System befindet sich im Fokus. Ist dieser Punkt für eine Kamera-Objektiv-Kombination gefunden, kann mithilfe der Abbildungsgleichung (s. Formel 3.2) und der Dicke des aktuellen Distanzrings das Aufmaß der Kamera errechnet werden. Wenn das Aufmaß für eine Kamera-Objektiv-Kombination bekannt ist, kann die Dicke des benötigten Distanzrings mit der Abbildungsgleichung für jeden Objektstand berechnet werden. Durch das Rauschen der Messwerte und den nicht exakt bekannten Funktionstyp, dem dieses folgt, liefert die Ausgleichsparabel fehlerhafte Messwerte, wenn sich das Minimum der Fokusfunktion nicht in den Messwerten befindet. Dies ist der Fall, wenn der Punkt, in dem die Kamera mit dem aktuellen Distanzring fokussiert ist, nicht innerhalb des Verfahrbereichs der Linearachse liegt. Um die Parameter der Ausgleichsparabel dahingehend zu überprüfen, wird das Minimum der sich aus den Parametern ergebenden Funktion berechnet und mit einem einstellbaren Grenzwert verglichen. Dieser Grenzwert kann fest für eine Kamera-Objektiv-Kombination eingestellt werden, da das Auflösungsvermögen und damit das Minimum dieser Funktion für alle Kamera-Objektiv-Kombinationen einer Baureihe

vergleichbare Werte aufweist. Sollte dieser fest eingestellte Grenzwert über- oder unterschritten werden, können die Parameter der Ausgleichsparabel nicht verwendet werden, um die exakte Fokusposition zu bestimmen. Für diesen Fall werden die Parameter einer Ausgleichsgeraden errechnet, die es ermöglichen, die ungefähre Dicke des erforderlichen Distanzrings zu errechnen. Die Messung wird anschließend mit einem neuen Distanzring mit einer anderen Dicke wiederholt, bis die Ausgleichsparabel Messwerte liefert die eine Bestimmung des Auflagemaßes ermöglicht. Der Funktionsbaustein besitzt die in Abbildung 10.40 dargestellten Ein- und Ausgänge.

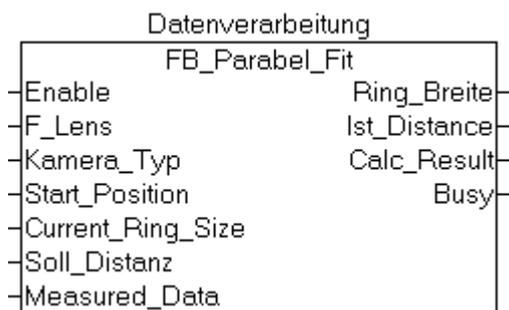


Abbildung 10.40 „FB_Parabel_Fit-Funktionsbaustein“

Neben dem bereits beschriebenen „Enable“-Eingang besitzt der „FB_Parabel_Fit“-Funktionsbaustein einen Eingang „F_Lens“, um die Brennweite des verwendeten Objektivs einzugeben. Mit dem Eingang „Kameratyp“ kann eingestellt werden, ob eine CH-S035CH-Schwarzweißkamera oder eine CH-S035CH-Farbkamera fokussiert werden soll. Die CH-S035CH-Farbkamera hat durch den vorgeschalteten Farbfilter ein schlechteres Auflösungsvermögen. Der Grenzwert für das Minimum des Kreisdurchmessers muss angepasst werden. Durch den Eingang „Start_Position“ wird der für die Berechnung erforderliche maximale Objektstand festgelegt. Am Eingang „Current_Ring_Size“ muss die für die Messung verwendete Distanzringdicke angegeben werden. Um die Kamera auf eine Distanz einzustellen, muss am Eingang „Soll_Distanz“ die gewünschte Gegenstandsweite vorgegeben werden. Der letzte Eingang dient zur Übergabe der Messwerte. Nach der Berechnung wird am Ausgang „Ring_Breite“ die Breite des Distanzrings ausgegeben, die für die nächste Messung erforderlich ist. Am Ausgang „Ist_Distance“ steht, wenn die Ausgleichsparabel richtige Messwerte liefert, die genaue Gegenstandsweite bereit, auf welche die Kamera fokussiert ist. Der Ausgang „Calc_Result“ liefert ein Signal, wenn die Ausgleichsparabel richtige Messergebnisse geliefert hat.

10.3 Beschreibung des Programmablaufs

Die Beschreibung des erstellten Programmablaufs erfolgt anhand der Visualisierung. Der Kalibriervorgang ist in einen festen Ablauf gegliedert, der durch die TwinCAT-Visualisierung gesteuert wird. Das erstellte Programm ist als Bootprojekt auf dem Steuerungsrechner hinterlegt. Wird dieser gestartet, erfolgt nach dem Hochfahren automatisch der Start des Kamera-Kalibrierprogramms und der Prüfablauf kann beginnen. Das in Abbildung 10.41 dargestellte Startmenü wird nach jedem Neustart angezeigt.

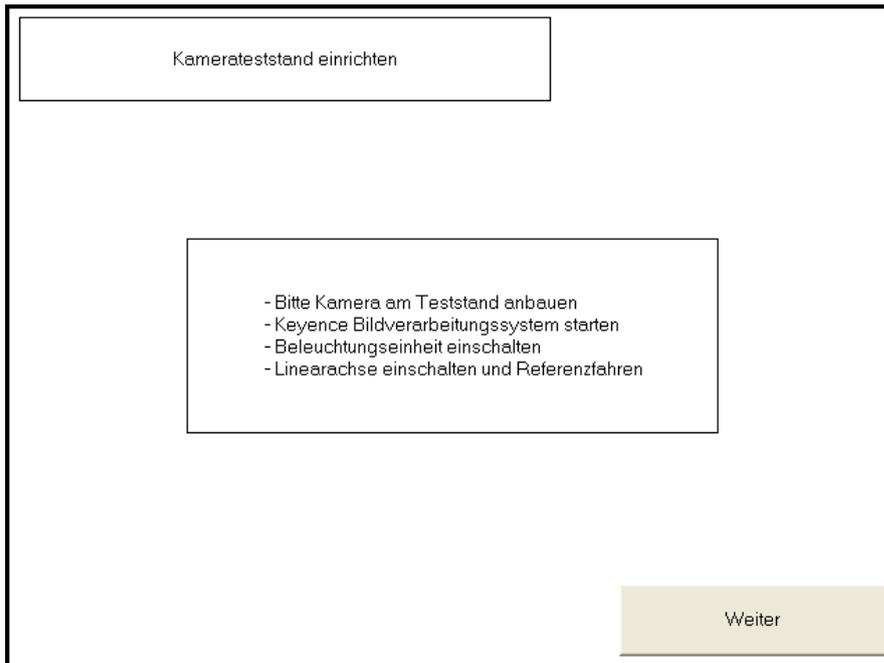


Abbildung 10.41 „Visualisierung: Kamerateststand einrichten“

Die Hinweistexte in der Visualisierung schildern die durchzuführenden Arbeitsschritte. Ist die Kamera am Prüfstand installiert und sind alle Komponenten des Kamerakalibrierstands gestartet, kann der Kameraeinstellvorgang durch Bestätigen der „Weiter“-Schaltfläche fortgesetzt werden. Im nächsten Schritt muss der zu kalibrierende Kameratyp ausgewählt und die Gegenstandsweite, für welche die Kamera fokussiert werden soll, eingestellt werden (s. Abbildung 10.42).

Kameraparameter eingeben

Für eine Farbkamera (CV-S035CH) bitte eine 1 eintragen.
Für eine Scharzweißkamera (CV-S035MH) bitte eine 0 eintragen.

0

Bitte den gewünschten Abstand zwischen
Objekt und Linsenvorderkante eingeben [mm].

95

Zurück

Weiter

Abbildung 10.42 „Visualisierung: Kameraparameter eingeben“

Wird der Kalibriervorgang durch Klicken der „Weiter“-Taste fortgesetzt, erfolgt durch das Kalibrierprogramm automatisch der Aufbau einer Datenverbindung mit dem Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystem. Sollte der Verbindungsaufbau fehlschlagen, wird eine Fehlermeldung ausgegeben und der Kalibriervorgang muss neu gestartet werden. Ist eine Datenverbindung etabliert, wird das entsprechende Bildverarbeitungsprogramm auf dem Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystem ausgewählt. Für jeden der beiden Kamertypen gibt es ein eigenes Bildverarbeitungsprogramm mit an die Kamera angepassten Einstellungen. Ist dieser Vorgang abgeschlossen, kann der Kalibriervorgang fortgesetzt werden. In Abbildung 10.43 ist das darauf folgende Menü dargestellt.

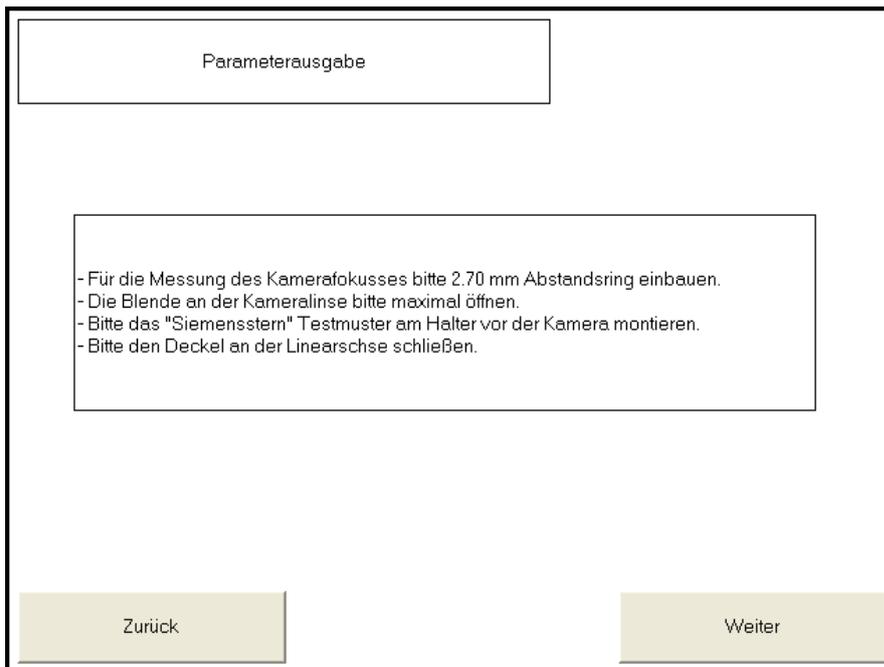


Abbildung 10.43 „Visualisierung: Parameterausgabe“

Für die Messung des Kamerafokusses müssen die in Kapitel 5.1 beschriebenen Distanzringe zwischen Kamera und Objektiv eingebaut werden. Für die erste Vermessung des Kamerafokusses wird ein Distanzring mit einer standardisierten Dicke verwendet. Diese standardisierte Dicke liefert für alle bisher betrachteten Kameras einen guten Ausgangswert, von dem aus die Messung beginnen kann. Im nächsten Schritt muss die Aperturblende der Kamera auf die maximale Stellung geöffnet werden, um einen möglichst kleinen Schärfentiefebereich zu erhalten. Die Fokusmesswerte bei geöffneter Blende sind wesentlich signifikanter als Fokusmesswerte bei geschlossener Blende. Um den Edmund-Optics-Siemensstern an der Linearachse zu installieren, wurde die Linearachse um die in Abbildung 10.44 dargestellte Halterung erweitert.

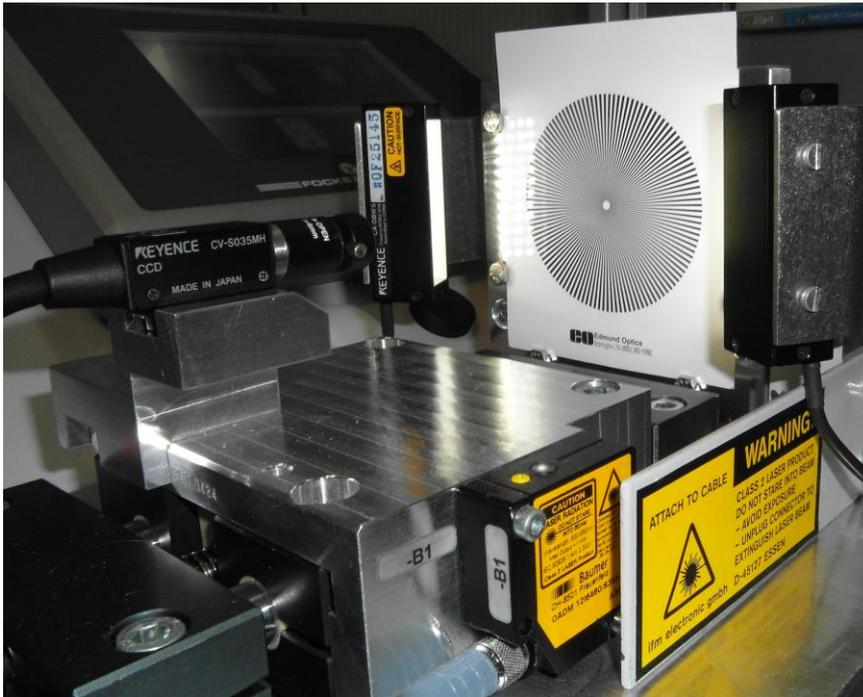


Abbildung 10.44 „Linearachse mit Siemensstern-Testmuster“

Um störende Fremdlichteinflüsse zu vermeiden, wird für die Messung die Abdeckhaube der Linearachse geschlossen. Ist die Abdeckung geschlossen, kann der Prüfvorgang fortgesetzt werden. Nach dem Bestätigen der „Weiter“-Taste erscheint das in Abbildung 10.45 dargestellte Menüfenster.



Abbildung 10.45 „Visualisierung: Parameter-Linearachse“

Gleichzeitig mit dem Erscheinen des Menüfensters wird die Helligkeit des Bildes angepasst. Für die Messungen des Fokusses mit dem Siemensstern ist es wichtig, dass die Helligkeit der Kamerabilder korrekt eingestellt ist. Die Bilder dürfen hierbei weder

überblendet noch zu dunkel sein. Um dies für alle Kameras zu gewährleisten, wird die Bildhelligkeit im Kamerabild gemessen und die Empfindlichkeit des Sensorelements angepasst. Durch die Einstellungen der Sensorempfindlichkeit kann die Bildhelligkeit in einem weiten Bereich exakt eingestellt werden. Sollte ein korrektes Einstellen der Bildhelligkeit nicht möglich sein, weil zum Beispiel die Blende nicht geöffnet wurde, erscheint eine Fehlermeldung. Bevor die Vermessung des Kamerafokusses beginnen kann, muss die Linearachse in den Automatikmodus geschaltet werden. Ist dies erfolgt kann mit Klicken der „Weiter“-Schaltfläche der Kalibriervorgang fortgesetzt werden. Daraufhin erscheint das in Abbildung 10.46 dargestellte Menü.



Abbildung 10.46 „Visualisierung: Fokussmessung starten“

In der oberen linken Ecke wird die Dicke des Distanzrings angezeigt, der für diese Messung einzusetzen ist. Die Messung muss nun manuell an der Linearachse gestartet werden. Ist die eingestellte Anzahl an Bildern aufgenommen und sind die Messdaten durch den „FB_Parabel_Fit“-Funktionsbaustein ausgewertet, öffnet sich das in Abbildung 10.47 dargestellte Fenster.

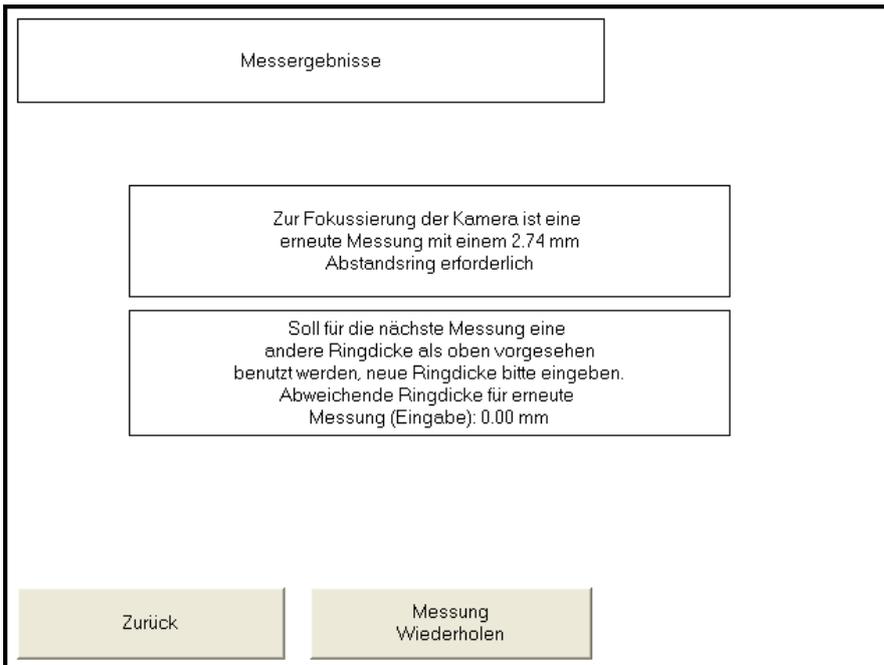


Abbildung 10.47 „Visualisierung: Fokussierung wiederholen“

Mit den aufgenommenen Messwerten kann die exakte Position des Kamerafokus nicht bestimmt werden. Die Berechnung der Ausgleichsparabel hat keine verwertbaren Messergebnisse geliefert. Für die nächste Messung wird die benötigte Distanzringdicke durch die Ausgleichsgerade approxiiert. Die Fokussierung muss mit der angezeigten Distanzringdicke wiederholt werden. Wurde die Messung des Kamerafokus mit dem angegebenen Distanzring wiederholt, erscheint, wenn die Messung erfolgreich war und die Ausgleichsparabel die Position des Kamerafokus ermitteln konnte, die in Abbildung 10.48 dargestellte Meldung.

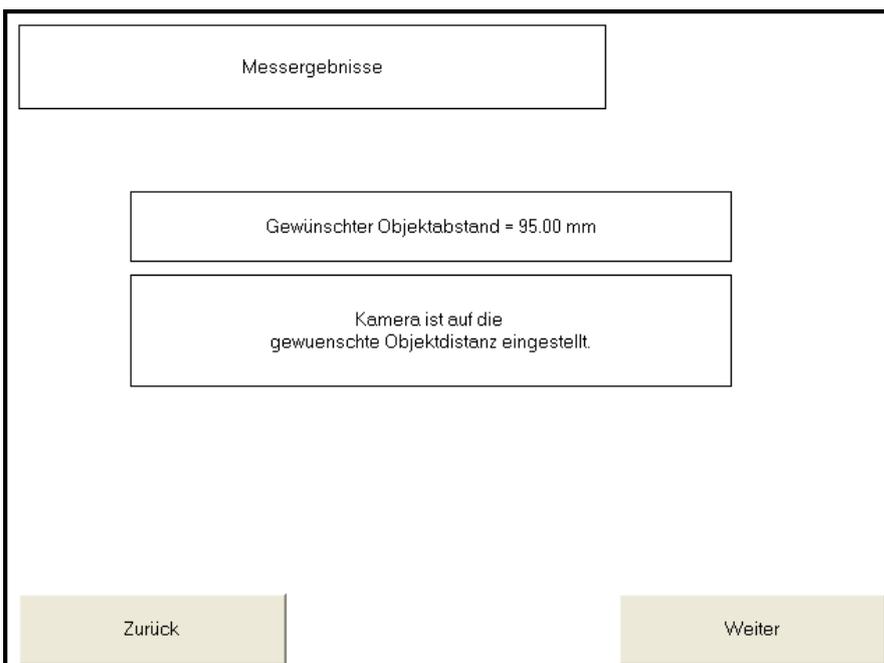


Abbildung 10.48 „Visualisierung: Fokussierung beendet“

Der Kalibriervorgang kann fortgesetzt werden. Im Anschluss an die Fokussierung der Kamera wird die Verschiebung des Kamerabildes gemessen. Für diese Messung muss das Siemensstern-Testmuster aus der Halterung entfernt und das in Kapitel 9.1 vorgestellte Kalibriermuster freigelegt werden (s. Abbildung 10.49). Um die Messwerte der Verschiebung der Kameras vergleichen zu können, muss die Linearachse auf eine definierte Position, die für alle Kameras dieselbe ist, positioniert werden.



Abbildung 10.49 „Visualisierung: Bildverschiebung messen“

Für die statistische Auswertung der Verschiebung, die in Kapitel 11.2 beschrieben wird, wurden alle Kameras in die hintere Endlage der Linearachse (größter Abstand zwischen Kamera und Kalibriermuster) gefahren. Ist die Kamera auf der Linearachse positioniert, kann die eigentliche Verschiebungsmessung durch das Bestätigen der „Weiter“-Taste gestartet werden. Es öffnet sich das in Abbildung 10.50 dargestellte Fenster mit den Ergebnissen der Verschiebungsmessung.

Verschiebung des Bildes	
Das Bild weist folgende Verschiebungen zur Referenz auf:	
Verschiebung in der X Richtung in Pixel(n)	-1.6 Pix
Verschiebung in der X Richtung in mm	-0.17 mm
Verschiebung in der Y Richtung in Pixel(n)	19.6 Pix
Verschiebung in der Y Richtung in mm	2.09 mm
Verdrehung des Bildes in °	0.9 °
Zurück	Weiter

Abbildung 10.50 „Visualisierung: Verschiebungsmesswerte“

Durch Klicken der „Weiter“-Taste kann der Prüfvorgang beendet werden. Die Verbindung zum Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystem wird aufgehoben und das in Abbildung 10.51 dargestellte Menü wird angezeigt.

Kalibriervorgang abschließen
Bitte die Blende am Objektiv einstellen. (Normaleinstellung Blende auf die Mitte zwischen "CLOSE" und "OPEN")
Kalibriervorgang beenden

Abbildung 10.51 „Visualisierung: Kalibriervorgang beenden“

Bevor die kalibrierten Kameras aus dem Prüfstand entfernt werden können und der Kalibriervorgang abgeschlossen werden kann, muss die Kamera abgeblendet werden (Standardeinstellung bei allen bisher verbauten Kameras). Durch das Abblenden des Kameraobjektives wird der Schärfentiefebereich vergrößert. Der Abstand, auf den die

Kamera fokussiert ist, ändert sich durch das Ablenden nicht. Sollte während des Prüfvorgangs ein Fehler auftreten, wird eine Fehlermeldung angezeigt (s. Abbildung 10.52).

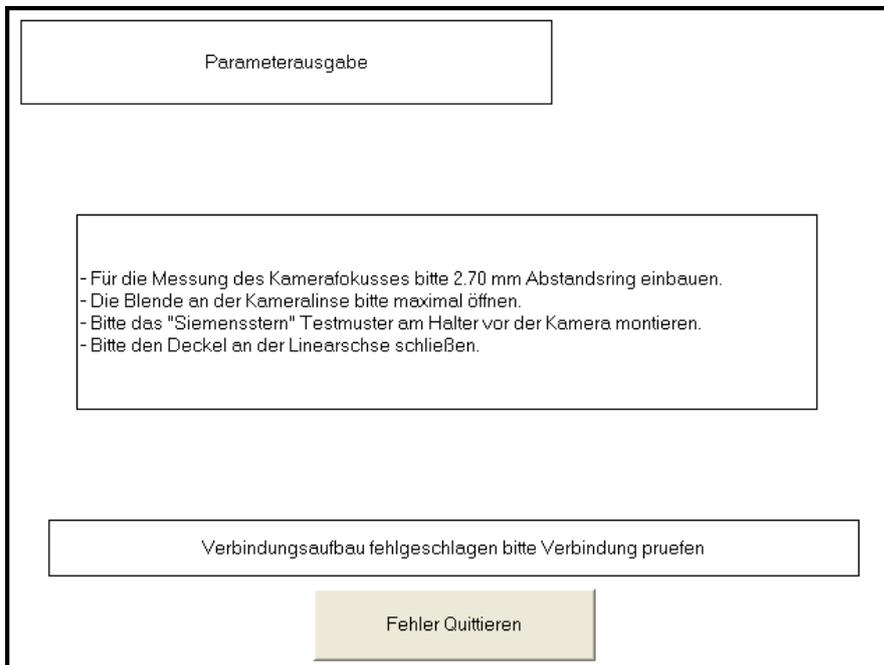


Abbildung 10.52 „Visualisierung: Fehlermeldung“

Diese beispielhafte Fehlermeldung wird angezeigt, wenn keine Verbindung zum Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystem aufgebaut werden konnte. Die Ethernet-Datenverbindung und das Keyence-CV-5001-Bildverarbeitungssystem müssen überprüft werden. Der Prüfvorgang muss nach der Überprüfung neu gestartet werden.

Teil III

Auswertung

11 Auswertung

Die Auswertung teilt sich, wie auch die Beschreibung der Anforderungen und die Durchführung, in die beiden separat betrachteten Aufgabenteile „Fokussierung der Kameras“ und „Messung der Bildverschiebung“ auf. Im Anschluss erfolgt in Kapitel 11.3 der Vergleich des neu entworfenen Kalibriervorgangs mit dem Kalibriervorgang, der im Vorfeld dieses Projektes für die Einstellung der Kameras genutzt wurde.

11.1 Auswertung der Fokussmessung

Das entwickelte Verfahren zur Fokussierung der Kameras mit dem Siemensstern-Testmuster wird in diesem Kapitel ausgewertet. Die besondere Herausforderung bei der Entwicklung des automatisierten Fokussiervorgangs war einerseits die Art, wie die für die Fokussierung der Kameras benötigten Bilderserien aufgenommen werden und andererseits die begrenzten Möglichkeiten der bestehenden Hard- und Software. Die Bilder, die zur Fokussierung der Kameras zum Einsatz kommen, werden mit unterschiedlichen Gegenstandsweiten aufgenommen. Gegenüber der für die Fokussierung von Kameras üblichen und in der Literatur gut dokumentierten Vorgehensweise über die Änderung der Bildweite ergeben sich hierdurch einige Besonderheiten: Durch die unterschiedlichen Gegenstandsweiten in denen die Bilder einer Bildserie aufgenommen werden, ergeben sich Bilder mit unterschiedlichen Bildausschnitten. Mehr als die Hälfte der getesteten Autofokusalgorithmen liefern mit dieser Art von Bildern falsche Messergebnisse. Weiterhin ist der Bereich, in dem die Gegenstandsweite verändert werden kann, begrenzt. In normalen Autofokus-anwendungen kann die Bildweite meist soweit verändert werden, dass die Kamera auf die minimale Distanz bis ins Unendliche fokussiert werden kann. Im Rahmen dieses Projektes kann die Gegenstandsweite lediglich um 20 mm verändert werden.

Um die Funktion des ausgewählten Siemensstern-Fokussierverfahrens zu verifizieren, wurden die in Kapitel 7.1.2 beschriebenen Autofokusverfahren umgesetzt. Die Autofokusalgorithmen, die ein richtiges Ergebnis liefern, erzeugen mit dem Siemensstern-Autofokusverfahren vergleichbare Messergebnisse. Neben der Überprüfung der Kamerabilder mit den Autofokusalgorithmen wurden die Bilder visuell untersucht. Zwischen Bildern einer Bildserie, die mit unterschiedlichen Gegenstandsweiten aufgenommen wurden, kann durch die visuelle Beurteilung der Bilder keine sichere Aussage über die Position des Kamerafokusses getroffen werden. Nur wenn geeignete

Testmuster mit vielen feinen Strukturen, wie zum Beispiel das Siemensstern-Testmuster, vergrößert dargestellt nebeneinander verglichen werden, kann die Position des Fokusses innerhalb der Bildserie visuell bestimmt werden. Aus den visuellen Beurteilungen der Bilder und den Ergebnissen, welche die Autofokusalgorithmen liefern, kann das Siemensstern-Testmuster als geeignetes Testmuster zur Fokussmessung der Kameras verifiziert werden.

11.2 Auswertung der Verschiebungsmessung

In diesem Kapitel wird die Vermessung der Bildverschiebung ausgewertet. Neben der Verifizierung des erstellten Testmusters zur Messung der Bildverschiebung wird hier auch auf die potenziellen Fehlerquellen, welche die Verschiebung auslösen, eingegangen. Für das gesamte Projekt standen vier verschiedene CV-S035-Kameras und fünf CA-LS6-Objektive zur statistischen Auswertung zur Verfügung. Mit dieser Anzahl an Kameras und Objektiven lässt sich nur eine eingeschränkte Aussage über die zu erwartenden Toleranzen bezüglich der Bildverschiebung für verschiedene Kamera-Objektiv-Kombinationen treffen. Neben den CV-S035-Kameras und den CA-LS6-Objektiven als Fehlerquelle der Verschiebung muss auch der Montagevorgang als Fehlerquelle betrachtet werden. Wiederholte Messungen haben gezeigt, dass die größte Fehlerquelle für die Bildverschiebung die CV-S035-Kameras sind. Neben diesen erzeugen auch die CA-LS6-Kameraobjektive und der Montagevorgang der CV-S035-Kameras Verschiebungen des Kamerabildes. Die Fehler, die durch die CA-LS6-Objektive entstehen, können nach Auswertung aller zur Verfügung stehenden CA-LS6-Objektive auf ± 6 Pixel respektive 0,75 mm zusammengefasst werden. Die Bildverschiebungen, die durch die CA-LS6-Objektive entstehen, wirken sich gleichermaßen in x- und y- Richtung auf das Kamerabild aus. Der Montagevorgang der Kameras am Prüfstand erzeugt weitere Verschiebungen des Bildes. Die Fehler, die durch die Montage entstehen, sind richtungsabhängig. In horizontaler x-Richtung können sie nach vielfach wiederholten Messungen auf ± 4 Pixel respektive 0,5 mm zusammengefasst werden. In vertikaler y-Richtung kann die Bildverschiebung, die durch den Montagevorgang entsteht, vernachlässigt werden. In Diagramm 11.12 und 11.13 sind die Verschiebungen der Kamerabilder aller zur Verfügung stehenden Kameras, bezogen auf das theoretische optische Zentrum der CV-S035-Kameras, separat für die x- und y- Richtung aufgelistet, inklusive dem zu erwartenden Fehlerbandes, welches durch die CA-LS6-Objektive und den Montagevorgang entsteht.

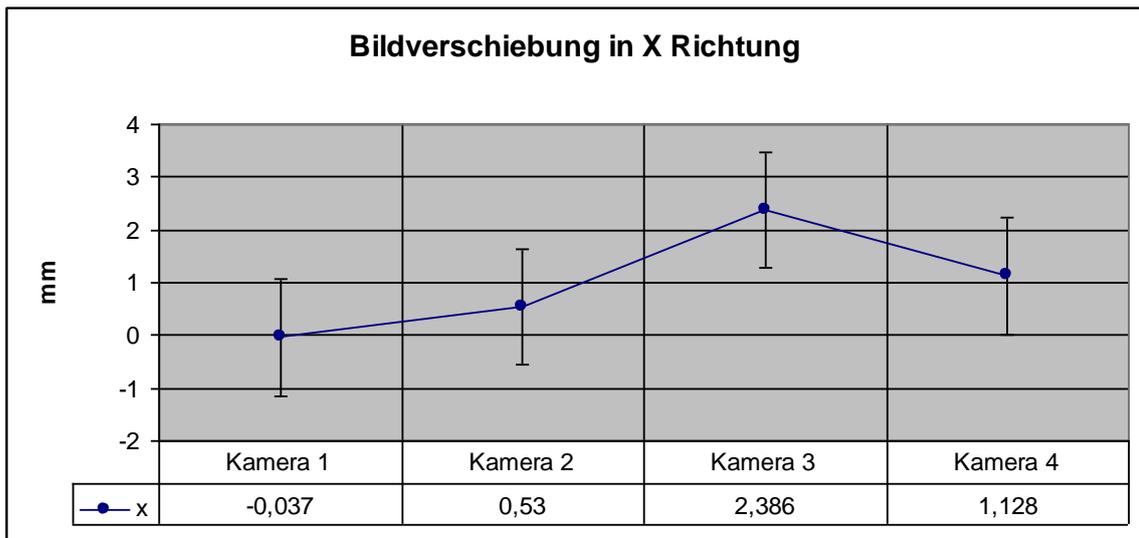


Diagramm 11.12 „Bildverschiebung in x Richtung“

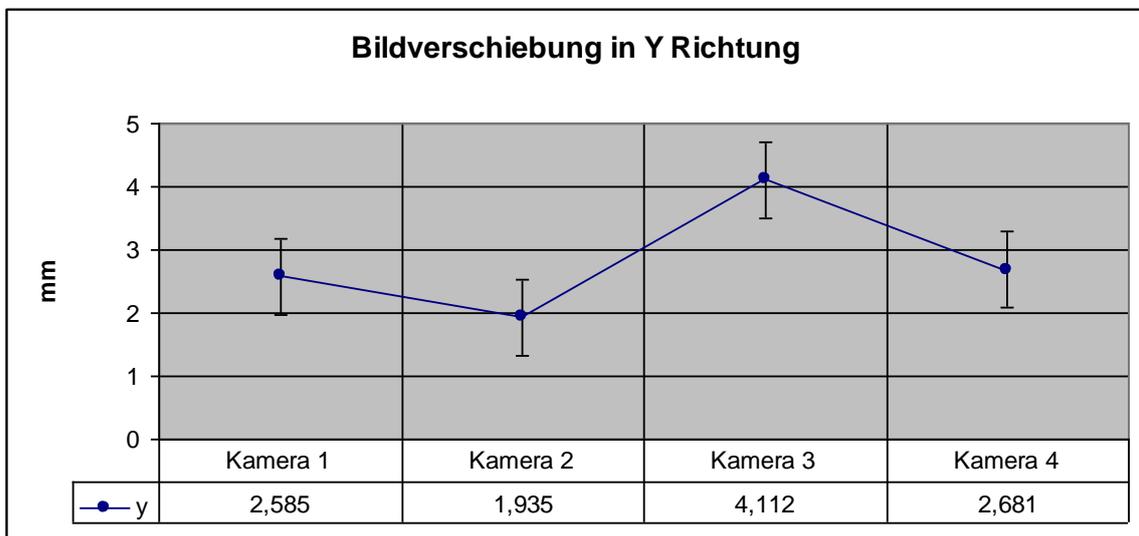


Diagramm 11.13 „Bildverschiebung in y Richtung“

Neben der Verschiebung des Kamerabildes in der x- und y- Richtung wurde auch die Verdrehung der Kamerabilder bezogen auf die Waagerechte vermessen. Die Messungen haben gezeigt, dass die Verdrehung des Bildes nur von der CV-S035-Kamera erzeugt wird, die Objektive und der Montagevorgang haben keinen Einfluss auf die Verdrehung des Kamerabildes. In Tabelle 11.3 sind die gemessenen Verdrehungen für die vier zur Verfügung stehenden Kameras aufgelistet.

Tabelle 11.3 „Bildverdrehung“

	Verdrehung
Kamera 1	-0,87°
Kamera 2	-1,16°
Kamera 3	0,1°
Kamera 4	-1,11°

Das erstellte Bildverarbeitungsprogramm ermöglicht es, die Verdrehungen und Verschiebung jeder Kamera-Objektiv-Kombination zu vermessen. Mit dem Bildverarbeitungsprogramm und dem Wissen über das zu erwartende Fehlerband kann in einem nachfolgenden Projekt ein Verfahren entwickelt werden, um diese Verschiebungen mechanisch zu korrigieren. Die mit den zur Verfügung stehenden CV-S035-Kameras durchgeführten Tests haben gezeigt, dass die Verschiebung und Verdrehung der Kameras mit dem erstellten Programm zuverlässig und reproduzierbar gemessen werden können.

11.3 Auswertung des Kalibriervorgangs

Im letzten Kapitel der Auswertung wird der neu erstellte Kalibriervorgang mit dem im Vorfeld des Projektes verwendeten visuellen Prüf- und Einstellvorgangs verglichen. Die beiden Verfahren sollen insbesondere bezüglich der benötigten Zeit und der gelieferten Genauigkeit verglichen werden. Ziel dieser Bachelorthesis war es, den bestehenden Vorgang der Kamerakalibrierung durch geeignete Methoden zu automatisieren. Mit dem gewählten Ansatz des Siemensstern-Testmusters für die Fokussierung der Kameras und der entsprechenden Datenauswertung konnte diese Aufgabe erfüllt werden. Der Vorgang des Einstellens der Kameras auf eine gewünschte Gegenstandsweite durch die visuelle Überprüfung der Kamerabilder durch einen fachkundigen Mitarbeiter, hat im Vorfeld dieses Projektes bis zu drei Stunden in Anspruch genommen und häufig zu unbefriedigenden Ergebnissen geführt. Die erreichte Genauigkeit durch die visuelle Einstellung der Kameras entsprach nicht den Anforderungen. Der neu entwickelte Prüfvorgang ermöglicht es, die Kamera automatisiert zu fokussieren. Für die Fokussierung wird eine Bilderserie mit der Linearachse aufgenommen und ausgewertet. Lässt sich aus den aufgenommenen Messwerten die Position des Kamerafokusses bestimmen, wird die benötigte Distanzringdicke berechnet und ausgegeben. Kann die Fokusposition aus den ermittelten Messwerten nicht ermittelt werden, muss die Messung mit einem anderen Distanzring wiederholt werden. Für die erneute Messung wird anhand der Messwerte eine Dicke für den benötigten Distanzring approximiert. Während der Tests des Fokussierverfahrens hat sich gezeigt, dass für alle zur Verfügung stehenden Kameras maximal Messungen mit drei Distanzringen erforderlich sind, um die Position des Kamerafokusses zu ermitteln. Die mit dem Siemensstern-Fokussierverfahren und der Auswertung der Messdaten erreichte Genauigkeit ermöglicht es, die Kameras sicher und reproduzierbar einzustellen. Die Messungen haben weiterhin gezeigt, dass die erreichte Genauigkeit nicht durch das Siemensstern-Fokussierverfahren begrenzt wird, sondern durch die endliche Dickenabstufungen der Distanzringe und die Fertigungstoleranzen dieser. Mit dem neu entwickelten Kalibrierprogramm können die CV-S035-Kameras in

maximal zehn Minuten auf jede gewünschte Gegenstandsweite mit der geforderten Genauigkeit eingestellt werden. Die meiste Zeit wird für die Montage der Kameras und das Starten der Hard- und Softwarekomponenten benötigt. Der eigentliche Fokussiervorgang inklusive der Vermessung der Bildverschiebung benötigt durchschnittlich vier Minuten.

12 Zusammenfassung

Die Aufgabe in dieser Bachelorthesis war es, einen automatisierten Einstellvorgang für Keyence-CV-S035-Bildverarbeitungskameras zu entwickeln. Dieser automatisierte Vorgang ersetzt den visuellen Einstellvorgang durch einen fachkundigen Mitarbeiter.

Für die Lösung der Hauptaufgabe, das Fokussieren der CV-S035-Kameras, das mit dem alten Einstellverfahren bis zu drei Stunden in Anspruch genommen hat und unbefriedigende Ergebnisse lieferte, wurden verschiedenste Lösungsansätze implementiert und auf ihre Funktionsfähigkeit hin untersucht und bewertet.

Der gewählte Ansatz des Siemensstern-Testmusters stellte sich für diese Aufgabe als optimale Lösung heraus. Für die automatisierte Beurteilung der Messergebnisse zur Fokussmessung wurden eigene Funktionsbausteine entwickelt und in TwinCAT PLC Control realisiert.

Für die zweite Aufgabe, die Vermessung der Bildverschiebung zwischen verschiedenen CV-S035-Kameras, wurden statistische Untersuchungen mit den zur Verfügung stehenden CV-S035-Kameras und CA-LS6-Objektiven durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sollen für weitere Projekten genutzt werden, um die Verschiebung der Kamerabilder mechanisch zu kompensieren.

Bei der Untersuchung und bei der Realisierung der Fokussierverfahren wurde besonderer Wert auf die Wiederverwendbarkeit der Softwarekomponente gelegt. Die erstellten Funktionsbausteine können mit wenigen Anpassungen auch für andere Kameras eingesetzt werden. Die Messdatenauswertung ist hierzu separat von der Datenaufnahme und der Kommunikation mit dem Kamerasystem umgesetzt worden, sodass Messdaten, die über eine andere Kommunikationsschnittstelle von einer anderen Kamera ermittelt wurden, ebenfalls ausgewertet werden können.

Das im Rahmen dieser Bachelorthesis erstellte automatisierte Kalibrierprogramm wird zukünftig bei der Firma Focke & Co. (GmbH & Co. KG) für die Kalibrierung der CV-S035-Kameras eingesetzt und ersetzt den bisherigen zeit- und fehleranfälligen Vorgang.

Literaturverzeichnis

- [1] Bähr, Vögtle (Hrsg.): Digitale Bildverarbeitung. Anwendung in Photogrammetrie, Kartographie und Fernerkundung, H. Wichmann Verlag, Hüthig GmbH (1998), ISBN: 3-87907-270-1.
- [2] Bedienungsanleitung des Multikamera-Hochgeschwindigkeits-Bildverarbeitungssystem. Modellreihe CV-5001, Keyence Corporation (September 2009), 2. Auflage.
- [3] Blaschek, Roman: Signalgenerator für Siemenssterne, Studienarbeit im Institut für Informatik, Humboldt-Universität zu Berlin.
- [4] Brázdilová, Silvie Luisa: Autofocusing in Automated Microscopy, Faculty of Informatics, Masaryk University, 2006.
- [5] Burger, Burge: Digitale Bildbearbeitung. Eine Einführung mit Java und ImageJ, Springer-Verlag (2006) , 2. Auflage, ISBN: 3-540-30940-3.
- [6] Demant, Streicher-Abel, Springhoff: Industrielle Bildverarbeitung. Wie optische Qualitätskontrolle wirklich funktioniert, Springer-Verlag (2011), 3. aktualisierte Ausgabe, ISBN: 978-3-642-13096-0.
- [7] Gonzalez, Woods: Digital Image Processing, Pearson Prentice Hall (2008), 3. Auflage, ISBN: 978-0-13-168728-8.
- [8] Groen, Young, Ligthart: A Comparison of Different Focus Functions for Use in Autofocus Algorithms, Department of Applied Physics, Delft University of Technology, 2600 GA Delft, The Netherlands (1985).
- [9] Hecht, Eugene: Optik, Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH (2005), 4. Auflage, ISBN: 3-486-27359-0.
- [10] http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Focus_stacking_Tachinid_fly.jpg, [09.01.2012].
- [11] Jähne, Bernd: Digitale Bildverarbeitung, Springer-Verlag (2002), 5., überarbeitete und erweiterte Auflage, ISBN: 3-540-41260-3.
- [12] Lee, Kim, Nam, Lee, Kwon, Kim: Implementation of a passive automatic focusing algorithm for digital still camera, Division of Electronics and Information Technology, Korea Institute of Science and Technology.
- [13] Liu, Wang, Sun: Dynamic evaluation of autofocus for automated microscopic analysis of blood smear and pap smear, Advanced Micro and Nanosystems Laboratory, University of Toronto.

- [14] Papula, Lothar: Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Band 3, Friedr. Vieweg&Sohn Verlagsgesellschaft mbH (1999), 3. Auflage, ISBN: 3-528-24937-4.
- [15] Parker, J. R.: Algorithms for image processing and computer vision, Wiley Computer Publishing (1997), ISBN: 0-471-14056-2.
- [16] Pedrotti, Pedrotti, Bausch, Schmidt: Optik für Ingenieure. Grundlagen, Springer-Verlag (2008), 4. Auflage, ISBN: 978-3-540-73471-0.
- [17] Russ, John C.: The Image Processing Handbook, Taylor&Francis Group (2007), 5. Auflage, ISBN: 0-8493-7254-2.
- [18] Santos, Ortiz de Solórzano, Vaquero, Pena, Malpica, Del Pozo: Evaluation of autofocus functions in molecular cytogenetic analysis, Journal of Microscopy, Vol. 188, Pt 3, 3 December 1997.

Anhang

Anhang A1: Macros Autofokusalgorithmen ImageJ

Anhang A2: Beispielbilder Autofokusalgorithmen

Anhang A3: Quellcode TwinCAT Kamerakalibrierungsprogramm

Die Anhänge A1, A2 und A3 sind in elektrischer Form auf einer CD abgelegt und beim Prüfer Prof. Dr.-Ing. Jörg Dahlkemper einzusehen.

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit im Sinne der Prüfungsordnung nach §16(5) APSO-TI-BM ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen habe ich unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Ort

Datum

Unterschrift