

Susanne C.N. Töpfer

**Automatisierte Antastung für die hochauflösende
Geometriemessung mit CCD-Bildsensoren**

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Diese Dissertation wurde an der Fakultät Maschinenbau der Technischen Universität Ilmenau zur Erlangung des akademischen Grades „Dr.-Ing.“ von Susanne C. N. Töpfer vorgelegt.

Tag der Einreichung: 05.11.2007

Tag der Verteidigung: 01.07.2008

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Linß
2. Gutachter: Prof. Dr. ir. P.P.L. Regtien
3. Gutachter: Dr.-Ing. Olaf Kühn

Gedruckt auf holz- und säurefreiem Papier, 100 % chlorfrei gebleicht.

© Weißensee Verlag, Berlin 2008
Kreuzbergstraße 30, 10965 Berlin
Tel. 0 30 / 91 20 7-100
www.weissensee-verlag.de
e-mail: mail@weissensee-verlag.de

Alle Rechte vorbehalten

Printed in Germany

ISBN 978-3-89998-135-3

Probleme kann man niemals mit derselben Denkweise lösen,
durch die sie entstanden sind.

(Albert Einstein, 1879 - 1955)

Danksagung

Während meiner Tätigkeit am Fachgebiet Qualitätssicherung von Juli 2002 bis Oktober 2007 entstand die vorliegende Dissertation. Ich bedanke mich bei dem Fachgebietsleiter Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Linß, der mir die Gelegenheit zur Promotion gegeben hat. Insbesondere die zahllosen Diskussionen des Konzeptes und der Dissertationsgliederung waren eine wertvolle Unterstützung bei der Entstehung der Arbeit.

Begleitend zur Dissertation sind einige Veröffentlichungen entstanden. Für die Unterstützung bei diesen Arbeiten möchte ich allen Mitautoren danken. Ebenso gilt mein Dank allen Mitarbeitern des Fachgebietes Qualitätssicherung für die ausgezeichnete Arbeitsatmosphäre und die kollegiale Zusammenarbeit bei der Erfüllung des Tagesgeschäfts.

Diese Arbeit wurde durch eine von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) finanzierte Stelle im Rahmen des Sonderforschungsbereiches SFB 622 „Nanopositionier- und Nanomessmaschinen“ ermöglicht. Daher danke ich Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. mult. Prof. h.c. Gerd Jäger, der den Sonderforschungsbereich an der TU Ilmenau etabliert hat.

Abschließend möchte ich meinen Dank gegenüber meiner Familie zum Ausdruck bringen, die durch ihre hervorragende Unterstützung von der Kindheit bis zum Studium die Voraussetzungen für diese Promotion geschaffen hat.

Kurzfassung

Gegenstand dieser Dissertation ist die Automatisierung der Antastung für die Messung geometrischer Merkmale mit Bildsensoren. Dabei wurde ein neuartiges theoretisches Modell für adaptive, intelligente Bildsensoren erarbeitet. Hervorstechende Eigenschaft dieser Bildsensoren ist die Fähigkeit, sich selbsttätig an die vorherrschenden Messbedingungen anzupassen. Entsprechend dem Informationsfluss umfassen die automatisiert einzustellenden Stufen die Beleuchtung, die Fokussierung und die Kantenortbestimmungsalgorithmen. Hauptziel der Dissertation ist die Realisierung objektiver Messungen mit Bildsensoren.

Stand der Technik sind subjektive Messungen, bei denen der Bediener fast alle Parameter manuell einstellt. Abhängig von seinem Wissen führen diese Einstellungen zu richtigen oder falschen Messergebnissen. Charakteristische Eigenschaft objektiver Messungen ist der gleichbleibende Betrag der Antastunsicherheit verbunden mit dem Auftreten konstanter, korrigierbarer systematischer Messabweichungen. Folglich ermöglichen objektive Messungen die Vergleichbarkeit der Messergebnisse verschiedener Bediener unabhängig von ihrem jeweiligen Wissensstand. Die bedienerunabhängige, automatisierte Antastung mit Bildsensoren stellt eine bedeutende Erweiterung des Standes der Technik dar.

Neben dem theoretischen Modell eines adaptiven, intelligenten Bildaufnahmesensors sind die Kerninnovationen der vorliegenden Arbeit:

- ein Gesamtkonzept für die automatisierte Parametrierung zur Antastung mit Bildsensoren für die hochauflösende Geometriemessung,
- Erarbeitung von Qualitätskennzahlen zur Bewertung der Güte von Fokusfunktionen,
- Erarbeitung von Qualitätskennzahlen zur Bewertung der Kantengüte als Maß für die vorhandene Antastunsicherheit des jeweiligen Messpunktes,
- multiples Fokuskriterium, basierend auf einer Vielzahl unterschiedlicher Fokuskriterien einschließlich der Bewertung der Güte der generierten Fokusfunktionen,
- ein Verfahren zur automatisierten wissensbasierten Bestimmung der Antastrichtung.

Zusammenfassend stellt die berührungslose Geometriemessung mit einem adaptiven, intelligenten Bildsensor einen wesentlichen Evolutionsschritt in der optischen Längenmesstechnik dar. Sie erlaubt eine neue Qualität bei der Qualitätsprüfung von makroskopischen sowie von mikro- und nanoskaligen Qualitätsmerkmalen. Folglich ist eine wesentliche Steigerung der Prüfmittelfähigkeit zu erwarten.

Abstract

This thesis tackles the issue of automating the probing process in image based dimensional measurements. Thereby a novel theoretic model of an adaptive, intelligent image sensor has been developed. Salient feature of this sensor is its ability to adapt automatically to the prevailing measuring conditions. According to the information flow the automatically adjusted stages comprise illumination, focusing and edge probing algorithms. Main goal of this work is the attainment of objective measurements with image sensors.

State-of-the-art are subjective measurements where the operator adjusts most parameters manually. Depending on his knowledge these adjustments result in true or wrong measuring results. Characteristic feature of objective measurements is the constant level of the probing uncertainty combined with the occurrence of constant, corrigible systematic deviations. Thus, objective measurements enable the comparability of the measuring results of different operators independently from their individual knowledge. Automated probing with image sensors independent from the operator resembles an important extension of the state-of-the-art.

Besides the theoretical model of an adaptive, intelligent image sensor, the core innovations of the thesis at hand are:

- An overall concept for the automated parameter adjustment for probing with image sensors in order to perform dimensional measurements,
- Definition of quality measures for the evaluation of the quality of focus functions,
- Definition of quality measures for the edge quality as measure of the existing probing uncertainty of individual measuring points,
- A multiple focus criterion based on a variety of different focus criteria including the evaluation of the quality of the captured focus functions,
- A method for the automated, knowledge-based determination of the probing direction.

In conclusion non-contact dimensional measurements with adaptive, intelligent image sensors are a decisive evolution step in the field of optical coordinate metrology. They enable a novel quality in dimensional inspections of macroscopic, microscale and nanoscale inspection features. Consequently, a significant increase in measuring instrument capability is to be expected.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
<i>A</i>	<i>Untersuchungen zum aktuellen Entwicklungsstand der automatisierten Antastung für die hochauflösende Geometriemessung mit CCD-Bildsensoren</i>	
2	Stand der Technik	5
2.1	Definition des Begriffs „Antastung“	5
2.2	Hochauflösende CCD-Bildsensoren	6
2.2.1	Eigenschaften	7
2.2.2	Auflösungsgrenze	7
2.3	Notwendigkeit der automatisierten Antastung	8
2.3.1	Reduktion des Bedienerinflusses	9
2.3.2	Automatisierte Messungen	11
2.4	Verfahren zur automatisierten Antastung	12
2.4.1	Automatisierte Einstellung der Beleuchtungsintensität	13
2.4.2	Automatisierte Einstellung der Fokusposition	14
2.4.3	Automatisierte Einstellung der Kameraparameter	15
2.4.4	Automatisierte Generierung des Messfeldes (AOIs)	16
2.4.5	Automatisierte Einstellung des Kantenortkriteriums	17
2.4.6	Automatisierte Bestimmung der Geometrieelemente	19
2.4.7	Übersicht über am Markt befindliche Softwarepakete	20
2.5	Bedeutung für die automatisierte Prüfung von Mikro- und Nanostrukturen	22
2.6	Präzisierung der Aufgabenstellung	23

B Theoretische Untersuchungen zur automatisierten Antastung für die hochauflösende Geometriemessung mit CCD-Bildsensoren

3	Modellierung des Messprozesses	25
3.1	Theoretisches Modell für die Messung mit einem adaptiven, intelligenten Sensor	25
3.2	Theoretisches Modell für die Geometriemessung mit CCD-Bildsensoren .	28
3.2.1	Sensorprozess	29
3.2.1.1	Beleuchtung und Wechselwirkung mit dem Messobjekt .	29
3.2.1.2	Optische Abbildung und Fokussierung	36
3.2.1.3	Abtastung der optischen Abbildung	37
3.2.2	Rekonstruktionsprozess	39
3.2.2.1	Bestimmung der AOI-Lage und der AOI-Größe	39
3.2.2.2	Bestimmung des Kantenorts	41
3.2.3	Subprozess	41
3.2.3.1	Transformation in eine metrische Größe	41
3.2.3.2	Bestimmung von Geometrieelementen	42
3.3	Relevante Modellparameter für die automatisierte Antastung	42
4	Methoden zur automatisierten Einstellung der Beleuchtungsintensität	44
4.1	Beleuchtungsgüte als Zielgröße	45
4.2	Beschreibung der Beleuchtungsoptimierung	47
4.2.1	Beleuchtungsoptimierung für eine Strukturkante	48
4.2.2	Beleuchtungsoptimierung für eine Fläche	50
4.3	Strategien zur Ermittlung des bidirektionalen Reflektanzkoeffizienten . .	51
4.3.1	Messfeldbezogene Strategie	51
4.3.2	Bildfeldbezogene Strategie	52
4.4	Beleuchtungsoptimierung für unterschiedliche Wellenlängen	53
4.4.1	Einfluss der Wellenlänge der Beleuchtung bei der Bildaufnahme .	53
4.4.2	Wechselwirkung zwischen Messobjekt und Wellenlänge der Beleuchtung	54
4.4.3	Mathematische Beschreibung für die wellenlängenabhängige Beleuchtungsoptimierung	56

5	Methoden zur automatisierten Einstellung der Fokusposition	57
5.1	Bildschärfe als Zielgröße	58
5.1.1	Bestimmung der Bildschärfe an einem Bild	58
5.1.2	Bestimmung der Bildschärfe an einer Bildsequenz	59
5.1.2.1	Eigenschaften einer idealen Fokusfunktion	60
5.1.2.2	Definition der Fokugüte	61
5.2	Beschreibung des Fokussierungsprozesses	64
5.2.1	Systemtheoretische Beschreibung der Defokussierung beim Einsatz telezentrischer Objektive	65
5.2.2	Ermittlung der Fokusposition	68
5.2.3	Fehlereinflüsse bei der passiven Fokussuche	69
5.3	Klassifizierung der Fokus Kriterien	70
5.4	Automatisierte Einstellung des Fokus Kriteriums	73
5.4.1	Vergleichbarkeit von Fokusfunktionen	74
5.4.2	Angabe der Unsicherheit der Fokusposition	75
5.4.3	Parametrierungsmodell	76
5.4.3.1	Multiples Verfahren mit a posteriori Filterung	76
5.4.3.2	Wissensbasierte Auswahl des Fokus Kriteriums	78
6	Methoden zur automatisierten Einstellung des Kantenortkriteriums	79
6.1	Kantengüte als Zielgröße	79
6.2	Beschreibung der Bestimmung des Kantenortes	82
6.2.1	Pixelgenaue Bestimmung des Kantenortes	83
6.2.2	Subpixelverfahren	83
6.3	Klassifizierung der Kantenortkriterien	84
6.4	Automatisierte Einstellung des Kantenortkriteriums	84
6.4.1	Art, Lage und Größe des AOIs	84
6.4.2	Anzahl, Art, Länge und Richtung der Suchstrahlen	86
6.4.3	Parametrierungsmodell	89
6.4.3.1	Modell für Kantenortbestimmung im Durchlicht	90
6.4.3.2	Modell für Kantenortbestimmung im Aufsicht	90
6.4.3.3	Ergebnis der automatisierten Kantenortbestimmung	91

7	Kombinierte Einstellung von Beleuchtungsintensität, Fokusposition und Kantenortkriterium	92
7.1	Analyse der Wechselwirkungen zwischen Beleuchtungsintensität, Fokusposition und Kantenort	92
7.1.1	Beleuchtungsintensität und Fokusposition	92
7.1.2	Beleuchtungsintensität und Kantenort	96
7.1.3	Fokusposition und Kantenort	97
7.2	Entwicklung eines Algorithmus zur kombinierten Einstellung von Beleuchtungsintensität, Fokusposition und Kantenortkriterium	100
7.2.1	Regelungsstruktur für die kombinierte Parametereinstellung	101
7.2.2	Regelkreis für die Einstellung der Beleuchtungsintensität	102
7.2.3	Regelkreis für die Einstellung der Fokusposition	103
7.2.4	Kaskadierung der Einzelregelkreise	104
7.2.5	Steuerung für die Einstellung des Kantenortkriteriums	105
7.2.6	Parametrierungsstrategien	105
<i>C</i>	<i>Experimentelle Untersuchungen zur automatisierten Antastung für die hochauflösende Geometriemessung mit CCD-Bildsensoren</i>	
8	Versuchsanordnungen und Messobjekte	107
8.1	Aufbau der Messanordnung	107
8.2	Bildaufnahmesystem	108
8.3	Antast- und Messbedingungen	109
8.4	Auswahl der Messobjekte	111
9	Softwaretechnische Umsetzung eines Algorithmus zur kombinierten Einstellung von Beleuchtungsintensität, Fokusposition und Kantenortkriterium	113
9.1	Entwurf der Softwarestruktur	113
9.2	Funktionalität der einzelnen Module	115
9.2.1	Auxiliatormodul für den kaskadierten Regelkreis	115
9.2.2	Bildanalysemodul für die Bewertung der Messszene	118
9.2.3	Fokusmodul zur Berechnung und Bewertung von Fokusfunktionen	118
9.2.4	Signalflankenmodul zur Lokalisierung der Kante	119

10 Experimentelle Ergebnisse zur Antastung mit Bildsensoren unter Nutzung der automatisierten, wissensbasierten Parametrierung	124
10.1 Auswirkung von subjektiven, manuellen Parametereinstellungen	124
10.1.1 Beleuchtungsintensität	125
10.1.2 Fokusposition	125
10.1.3 Kantenortkriterium	126
10.2 Untersuchung der einzelnen Stufen der automatisierten, wissensbasierten Parametrierung	128
10.2.1 Einstellung der Beleuchtungsintensität	128
10.2.2 Einstellung der Fokusposition	128
10.2.3 Bestimmung der Kantengüte im kaskadierten Regelkreis	131
10.2.4 Einstellung des Kantenortkriteriums	132
10.3 Untersuchung des Gesamtsystems für die automatisierte, wissensbasierte Parametrierung an unterschiedlichen Messobjekten	133
10.3.1 Messobjekt 1: Kreiskalibrierschablone	135
10.3.2 Messobjekt 2: Leiterplatte	138
10.3.3 Messobjekt 3: Formplatte	139
10.3.4 Messobjekt 4: Endmaß	141
10.3.5 Messobjekt 5: Spektrometerbauteil	144
10.3.6 Messobjekt 6: Mikrotiterplatte	146
10.3.7 Vergleich zwischen Messungen mit automatisierter, wissensbasierter Parametrierung und Messungen unterschiedlicher Bediener	148
10.3.8 Bewertung der Ergebnisse des Systemtests	151
11 Zusammenfassung	155
Anhang	159
A Abbildungsverzeichnis	159
B Tabellenverzeichnis	163
C Literaturverzeichnis	166
D Verzeichnis häufig verwendeter Formelzeichen und Abkürzungen	175
E Messdaten und ergänzende Erläuterungen	183
F Dokumentation der Softwaremodule	189
Thesen der Dissertation	194

1 Einleitung

Die Geometriemessung mit Bildsensoren ist ein Teilgebiet der digitalen Bildverarbeitung. Sie ist für viele industrielle Anwendungsbereiche von Bedeutung. Beispielsweise existieren neben der Anwendung in der optischen Koordinatenmesstechnik zahllose Automatisierungslösungen für die geometrische Erfassung von Bauteilen im Takt der Produktionslinie. Teilweise kommen dabei auch Mehrkamerasysteme zum Einsatz.

Gegenwärtig sind ca. 80 Prozent aller Anwendungen der digitalen Bildverarbeitung dem Gebiet der Messtechnik und Qualitätssicherung zuzuordnen. Generell sind jedoch erst 20 Prozent aller möglichen Anwendungen bekannt bzw. technisch erschlossen [Sch06]. Besonders im medizinischen Sektor, mit der charakteristischen Forderung nach Sterilität und dem Vorhandensein vieler miniaturisierter Komponenten für die Medizintechnik, ist in den kommenden Jahren ein starker Zuwachs zu erwarten.

Die digitale Bildverarbeitung in Industrie, Medizin, Verkehr, Sicherheitstechnik und Gesellschaft gewinnt stark an Bedeutung. Attribute wie Digitalisierung, Miniaturisierung, Standardisierung, weltweit vereinheitlichte Schnittstellen, Vernetzung, Farbfähigkeit und wirtschaftlich erschwingliche Preise beschleunigen die Integration von Bildverarbeitungstechnologien in Produkte, Prozesse und Dienstleistungen. Die digitale Bildverarbeitung kann und wird einen wesentlichen Beitrag zur Steigerung der Gebrauchstauglichkeit und der Qualität von Produkten, Prozessen und Dienstleistungen leisten.

Aktuelle Trends auf dem Gebiet der digitalen Bildverarbeitung umfassen:

- Erhöhung der Auflösung von Bildsensoren,
- Einsatz schneller, standardisierter, digitaler Schnittstellen,
- Verbesserung der Beleuchtungs- und Abbildungssysteme,
- Steigende Auswertegeschwindigkeit der Systeme und
- Einsatz intelligenter Kameras.

Verglichen mit der Leistungsfähigkeit des menschlichen Auges (Abbildung 1.1) steckt die digitale Bildverarbeitung jedoch noch in ihren Kinderschuhen. Zur Illustration des noch Aufzuholenden sind nachfolgend einige Kennwerte des menschlichen Auges aufgelistet: 6-7 Millionen Zäpfchen zum Farbsehen, 75-150 Millionen Stäbchen zum Schwarzweiß-Sehen, Dynamik der Lichtempfindlichkeit 1: 1010, nahe 180 Grad Sehwinkel, scharfes Sehen im Zentrum, Stereobildaufnahme, Farbbilderfassung, Vorverarbeitung von Informationen bereits im Auge, Sehnerv mit 1 Million Nervenfasern und Beweglichkeit von Augen und Kopf. Das Gehirn verfügt über eine parallele Auswertung, über die Erkennungsfähigkeit aus Fragmenten, über die Fähigkeit der Detektion von Kanten in gestörten Bildern und über Farbkorrekturverfahren. Dabei ist zu beachten, dass die Bildaufnahme und die Bildauswertung eine Einheit bilden.

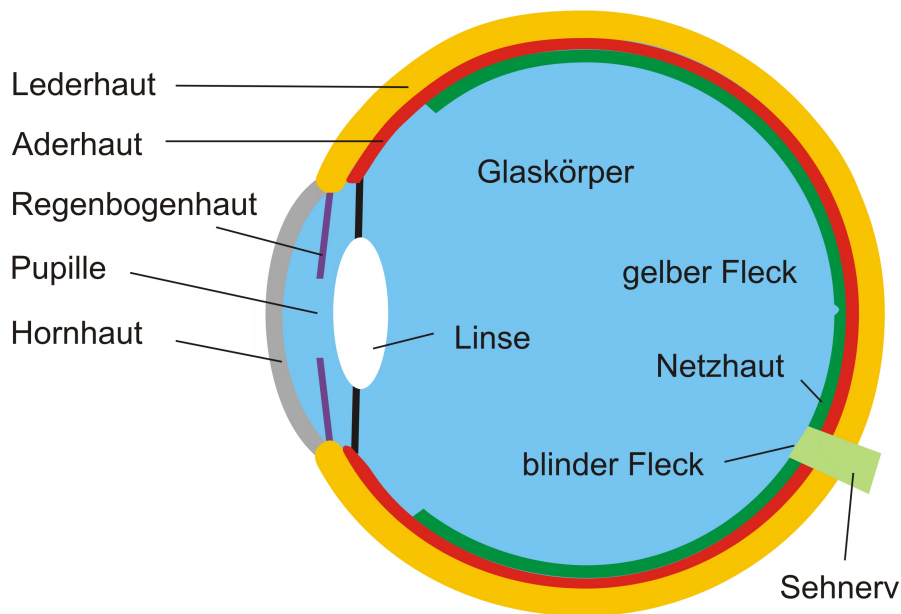


Abbildung 1.1: Schematische Darstellung des menschlichen Auges nach [Sei07]

Überträgt man die genannten Eigenschaften des Auges auf die Bildverarbeitung im Bereich Geometriemessung, so ergeben sich folgende Defizite:

- zu geringe Pixelanzahl,
- geringer Dynamikbereich,
- überwiegend Grauwertbildverarbeitung und
- Messungen in gestörten Bildern nicht möglich oder extrem fehlerbehaftet.

Die dem Auge innewohnende Eigenschaft der Adaptivität, welche sich durch eine automatische Anpassung an die vorhandenen Beleuchtungsbedingungen, die automatische Scharfstellung sowie die selbsttätige Analyse des Bildinhalts auszeichnet, werden von den vorhandenen technischen Systemen nur extrem unzureichend nachgebildet. Daher ist neben der hardwaretechnischen Weiterentwicklung der Bildsensoren eine wesentliche Herausforderung in der Erarbeitung einer intelligenten Algorithmik zur automatisierten Adaption der Bildaufnahmeparameter und der Bildauswertung zu sehen.

Gegenwärtig ist ein Bildverarbeitungssystem dadurch gekennzeichnet, dass es eine Vielzahl unterschiedlicher Parameter besitzt, die für eine fehlerfreie Funktion optimal eingestellt sein müssen. Bezogen auf die Geometriemessung bedeutet das, dass selbst bei kleinen Abweichungen der Einstellungen bereits gravierende Messabweichungen auftreten können. Das ist ein wichtiger Grund dafür, dass die taktile Koordinatenmesstechnik, obwohl sie langsamer ist und nur punktwise arbeitet, im Bereich der Präzisionsmesstechnik eine wesentlich höhere Verbreitung besitzt.

Für die Einstellung der Parameter eines Bildverarbeitungssystems benötigt der Bediener jedoch umfangreiches Expertenwissen, welches in vielen Fällen nicht vorhanden ist. Somit werden in der industriellen Praxis die Parameter des optischen Koordinatenmessgerätes oder des Bildverarbeitungssystems durch den Bediener oft so eingestellt, dass das in der Zeichnung eingetragene Sollmaß näherungsweise als Messergebnis eintritt. Alle nachfolgenden Messungen werden bei den einmal festgelegten Einstellungen durchgeführt. Dadurch wird weniger eine physikalisch richtige Messung durchgeführt, sondern vielmehr eine Relativmessung zum ersten Messobjekt. Das ist ohne weiteres möglich, da die Geometriemessung mit Bildsensoren mit dem systeminhärenten Problem der mangelnden Rückführbarkeit der Messergebnisse behaftet ist. Prinzipiell gilt für die Parametereinstellung an Bildverarbeitungssystemen, dass ungünstige Einstellungen, beispielsweise Überstrahlung des Bildes an den Kanten, zu falschen Bildinformationen und folgerichtig zu falschen Messergebnissen führen. Gleichzeitig kann jede Information des Messobjektes, die nicht bei der Bildaufnahme erfasst wird, nicht ausgewertet werden. Diese Faktoren sowie die extrem hohe Parameteranzahl illustrieren, warum die optimale Einstellung der Parameter eines Bildverarbeitungssystems so schwierig ist und von Befürwortern der taktilen Messtechnik nicht ganz zu Unrecht als „Magie“ bezeichnet wird.

Folglich wird in der industriellen Praxis häufig bei ungünstigen Parametereinstellungen gemessen. Dadurch ist die tatsächliche Messunsicherheit signifikant schlechter als die durch die Leistungsfähigkeit des Bildverarbeitungssystems unter optimalen Bedingungen zur Verfügung stehende. Das stellt einen extremen Effizienzverlust dar. Stand der Technik ist die Existenz von Lösungen einzelner Aufgaben bei der Parametereinstellung. Beispielsweise existiert ein Verfahren für die automatisierte Einstellung der Beleuchtungsintensität (Beleuchtungsoptimierung). Weiterhin gibt es verschiedene Verfahren für die automatisierte Fokussierung sowie erste Lösungsansätze für das weitgehend automatisierte Setzen der Messfelder. Um die beschriebene Ineffizienz bei der Nutzung von Bildverarbeitungssystemen zu beseitigen, ist jedoch ein übergreifendes Konzept, welches einen ganzheitlichen Lösungsansatz verkörpert, erforderlich. Die Bearbeitung dieser Aufgabenstellung durch Industrieunternehmen führte bisher zu Teil- und Inzellösungen ausgewählter Aspekte bei der optimalen Parametereinstellung eines Bildverarbeitungssystems.

Die vorliegende wissenschaftliche Arbeit präsentiert ein übergreifendes Konzept für die automatisierte Geometriemessung mit Bildsensoren. Sie soll einen Beitrag leisten, um die Leistungsfähigkeit der Bildverarbeitung ein kleines Stück an die überragenden Fähigkeiten des menschlichen Auges heranzuführen. Kernziel dieser Arbeit ist die Objektivierung der optischen Präzisionsantastung mit Bildsensoren für die Geometriemessung. Das führt zwangsweise zur Erhöhung der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse. Durch die Objektivierung der optischen Präzisionsantastung wird der Einfluss des Bedieners eines optischen Koordinatenmessgerätes signifikant reduziert. Neben der einfacheren Bedienung des Messgerätes besteht der wesentliche Nutzen in der industriellen Praxis in der Gewährleistung der Vergleichbarkeit der Messergebnisse. Durch die automatisierte Einstellung der Parameter des Bildverarbeitungssystems treten keine unbekannt systematischen Messabweichungen infolge ungünstiger Parametereinstellungen auf. Dadurch sind die systematischen Messabweichungen beherrschbar und korrigierbar. Unabhängig vom jeweiligen Bediener stellt sich im Rahmen der Messunsicherheit dasselbe Messergebnis, welches mit denselben systematischen Messabweichungen behaftet ist, ein. Dadurch wird die Vergleichbarkeit der Messergebnisse sichergestellt. Die Erfüllung dieser einfachen Forderung stellt einen Meilenstein für die Geometriemessung mit Bildsensoren dar.