

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
	<i>A 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 Geometrielemente	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 Fokusgüte	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 Fokuskriterien	70
5.4	Automatisierte Einstellung des Fokuskriteriums	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 Fokuskriteriums	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 Auflicht	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	Signalfankenmodul 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