

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort	III
Kurzfassung	V
Abstract	VII
Inhaltsverzeichnis	IX
Abbildungsverzeichnis	XIII
Symbole und Abkürzungen	XVII
1 Einleitung und Zielsetzung	1
2 Stand der Technik	5
2.1 Messtechnische Verfahren zur Erfassung von Objektgeometrien	6
2.1.1 Streifenprojektion . . . . .	9
2.1.2 Inverse Streifenprojektion . . . . .	11
2.2 Qualitätskontrolle in der Leiterplattenindustrie . . . . .	13
3 Messtechnische Grundlagen	17
3.1 Strahlenoptik . . . . .	17
3.1.1 Brechung und Reflexion . . . . .	18
3.1.2 Reflexionsformen an lichtundurchlässigen Objekten . . .	19
3.1.3 Zentral perspektivische Abbildung . . . . .	21

3.2	Lochkamera . . . . .	22
3.2.1	Abbildungsmodell . . . . .	23
3.2.2	Bildverzeichnung . . . . .	24
3.3	Optimierungsalgorithmen . . . . .	28
3.3.1	Levenberg-Marquardt Algorithmus . . . . .	29
3.4	Geometrische Kamerakalibrierung . . . . .	31
3.4.1	Kamerakalibrierung nach Zhang . . . . .	33
3.5	Geometrische Kalibrierung einer Projektionseinheit . . . . .	37
3.6	Triangulation . . . . .	42
3.7	Epipolargeometrie . . . . .	45
3.7.1	Fundamentalmatrix . . . . .	47
3.8	Streifenprojektionsmessung . . . . .	49
3.8.1	Projektionsmuster . . . . .	50
3.8.2	Berechnung der Oberflächengeometrie . . . . .	57
3.9	Inverse Streifenprojektionsmessung . . . . .	59
3.9.1	Berechnung des inversen Musters . . . . .	60
3.9.2	Ablauf und Auswertung einer inversen Streifenprojek- tionsmessung . . . . .	66
3.10	Scheimpflugsche Regel . . . . .	70
4	Experimenteller Aufbau der Messeinrichtung . . . . .	73
4.1	Die Multi-Sensor-Streifenprojektionseinheit . . . . .	74
4.2	Abbildungsmodell der Scheimpflug-Kamera . . . . .	76
4.3	Abbildungsmodell des Projektors . . . . .	79
4.4	Kalibrierobjekte . . . . .	82
4.4.1	Kalibrierobjekt der Kamera . . . . .	82
4.4.2	Kalibrierobjekt des Projektors . . . . .	86
4.5	Ablauf der Kalibrierung . . . . .	88
4.5.1	Schritt 1: Kamerakalibrierung . . . . .	89
4.5.2	Schritt 2: Weltkoordinatensystem . . . . .	94
4.5.3	Schritt 3: Extrinsische Optimierung . . . . .	96
4.5.4	Schritt 4: Projektorkalibrierung . . . . .	97
4.6	Virtuelles Messsystem . . . . .	100

5	Messdurchführung und Auswertung	103
5.1	Streifenprojektion . . . . .	104
5.1.1	Messprinzip . . . . .	105
5.1.2	Projektionssequenz . . . . .	107
5.1.3	Ablauf einer Messung . . . . .	110
5.2	Inverse Streifenprojektion . . . . .	117
5.2.1	Berechnung des inversen Musters und der Vergleichsdaten	120
5.2.2	Prüfvorgang . . . . .	121
5.3	Quasi-Inverse Streifenprojektion . . . . .	125
5.3.1	Projektionssequenz und Berechnung der Vergleichsdaten	127
5.3.2	Prüfvorgang . . . . .	130
5.3.3	Berechnung der Objektpunkte . . . . .	134
6	Darstellung und Interpretation der Messergebnisse	139
6.1	Ergebnisse der Streifenprojektion . . . . .	139
6.1.1	Darstellung der Ergebnisse . . . . .	140
6.1.2	Interpretation der Ergebnisse . . . . .	142
6.2	Ergebnisse der inversen Streifenprojektion . . . . .	147
6.3	Ergebnisse der quasi-inversen Streifenprojektion . . . . .	149
7	Resultate und Fazit	153
7.1	Betrachtung der Kalibrierung . . . . .	153
7.2	Messanwendungen . . . . .	157
7.2.1	Streifenprojektionsmessung . . . . .	158
7.2.2	Inverse Streifenprojektionsmessung . . . . .	161
7.2.3	Quasi-Inverse Streifenprojektionsmessung . . . . .	165
7.3	Fazit . . . . .	166
8	Zusammenfassung	169
	Literatur	173
	Wissenschaftlicher Werdegang	187