

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Technik der Formerfassung reflektierender Oberflächen</b>	<b>3</b>
2.1	Verfahren mit punktweiser Abtastung	5
2.1.1	Taktile Verfahren mit punktweiser Abtastung	5
2.1.1.1	Tastschnittgeräte	6
2.1.1.2	Koordinatenmeßgeräte	6
2.1.2	Optische Verfahren mit punktweiser Abtastung	8
2.1.2.1	Optische Verfahren mit punktweiser Abtastung auf Basis von Koordinatenmeßgeräten	9
2.1.2.2	Optische Verfahren mit punktweiser Abtastung ohne mechanische Referenzachsen	11
2.2	Verfahren mit flächenhafter Messung	12
2.2.1	Wellenoptische Verfahren mit flächenhafter Messung	13
2.2.1.1	Klassische Formprüfinterferometer	14
2.2.1.1.1	Das Twyman-Green-Interferometer	14
2.2.1.1.2	Das Fizeau-Interferometer	16
2.2.1.2	modifizierte Formprüfinterferometer	18
2.2.1.2.1	Formprüfinterferometer mit Meisterteil	19
2.2.1.2.2	Formprüfinterferometer mit autostigmatischer Anordnung	20
2.2.1.2.3	Formprüfinterferometer mit Aberrationskompensation	21
2.2.1.2.3.1	Aberrationskompensation durch refraktive Kompensationsoptik	21
2.2.1.2.3.2	Aberrationskompensation durch reflektive Kompensationsoptik	22
2.2.1.2.3.3	Aberrationskompensation durch diffraktive Kompensationsoptik	23
2.2.1.2.4	Formprüfinterferometer mit vergrößerter effektiver Wellenlänge	27
2.2.1.2.4.1	Infrarot-Interferometrie	27
2.2.1.2.4.2	Zwei- und Mehrwellenlängen-Interferometrie	28
2.2.1.2.4.3	Schräglicht-Interferometer	30
2.2.1.3	Weißlicht-Interferometer	32
2.2.1.4	Sub-Nyquist-Interferometer	33
2.2.1.5	Subapertur-Interferometer	34

2.2.1.6	Shearing-Interferometer.....	35
2.2.2	Geometrisch-optische Verfahren mit flächenhafter Messung.....	36
2.2.2.1	Experimentelle Strahlverfolgung.....	37
2.2.2.2	Foucaultsches Schneidenverfahren.....	38
2.2.2.3	Ronchi-Test .....	40
2.2.2.4	Hartmann- und Shack-Hartmann-Test.....	40
2.2.2.5	Reflexions-Moiré-Verfahren .....	44
2.2.2.6	Moiré-Deflektometrie .....	49
2.2.2.7	Deflektometrie und Rasterreflexionsverfahren.....	50
<b>3</b>	<b>Diskussion des Standes der Technik und Zielsetzung.....</b>	<b>57</b>
3.1	Diskussion des Standes der Technik .....	57
3.2	Zielsetzung .....	59
<b>4</b>	<b>Triangulationsverfahren zur Erfassung remittierender Oberflächen .....</b>	<b>61</b>
4.1	Das Triangulationsprinzip .....	64
4.1.1	Aktive Triangulation .....	66
4.1.2	Passive Triangulation .....	67
4.2	Grundlagen der Photogrammetrie .....	68
4.2.1	Die Zentralprojektion .....	69
4.2.2	Der Rückwärtsschnitt .....	72
4.2.3	Die Bündeltriangulation .....	74
4.2.4	Die Epipolargeometrie.....	76
4.2.5	Der Vorwärtsschnitt.....	78
4.3	Projektionsverfahren .....	82
4.3.1	Punktprojektionsverfahren .....	83
4.3.2	Streifenprojektionsverfahren .....	87
<b>5</b>	<b>Grundlagen der Rasterreflexions-Photogrammetrie .....</b>	<b>99</b>
5.1	Analyse des konventionellen Rasterreflexionsverfahrens.....	100
5.2	Aktive Rasterreflexions-Photogrammetrie .....	106
5.3	Passive Rasterreflexions-Photogrammetrie.....	112
5.4	Rekonstruktion der Oberfläche durch Integration der lokalen Neigung .....	121

<b>6 Die Referenzrasterstruktur .....</b>	<b>125</b>
6.1 Das Referenzmuster .....	125
6.1.1 Zweidimensionale Ortskodierung durch gekreuzte Streifenmuster .....	125
6.1.2 Absolute Ortskodierung durch Phasenschiebeverfahren und Graycode .....	127
6.1.3 Absolute Ortskodierung durch Weißlicht-Heterodynverfahren .....	129
6.2 Technische Umsetzung einer Referenzrasterstruktur .....	138
6.2.1 Einsatz von LCD-Flachbildschirmen als Referenzstruktur .....	143
6.2.1.1 Korrektur der Monitorkennlinie .....	143
6.2.1.2 Tiefpaßfilterung der Referenzmuster.....	146
6.2.1.3 Brechung am Monitor.....	148
6.2.1.4 Ebenheitsabweichung des Monitors .....	151
<b>7 Kalibrierung des Meßsystems .....</b>	<b>157</b>
7.1 Modellbildung des Meßsystems .....	157
7.1.1 Das Kameramodell .....	158
7.1.2 Das Referenzrastermodell .....	161
7.2 Kalibrierstrategie .....	169
7.2.1 Photogrammetrische Einmessung der Kamera .....	170
7.2.2 Photogrammetrische Einmessung des Referenzspiegels .....	171
7.2.3 Photogrammetrische Einmessung der Rasterstruktur .....	174
7.3 Beispielkalibrierung .....	178
<b>8 Meßaufbauten und Meßbeispiele .....</b>	<b>183</b>
8.1 Meßaufbauten .....	183
8.2 Meßbeispiele .....	187
<b>9 Erweiterung des Meßbereichs .....</b>	<b>191</b>
9.1 Erweiterung des Meßbereichs bei starker Krümmung der Oberfläche .....	192
9.2 Erweiterung des Meßbereichs bei starker Neigung der Oberfläche .....	195
<b>10 Untersuchung der Meßunsicherheit .....</b>	<b>199</b>
10.1 Messung an Referenzkörpern .....	199
10.2 Bestimmung der Meßunsicherheit nach GUM.....	204

---

<b>11 Ausblick: Messung refraktiver Optiken in Transmission .....</b>	<b>211</b>
<b>12 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>215</b>
12.1 Zusammenfassung .....	215
12.2 Ausblick.....	217
<b>13 Literaturverzeichnis.....</b>	<b>219</b>

## **Anhänge**

<b>A Technische Daten der Systemkomponenten.....</b>	<b>241</b>
A.1 Kamera .....	241
A.2 Objektiv .....	241
A.3 Frame Grabber.....	242
A.4 LCD-Flachbildschirm.....	242
A.5 Linearpositioniereinheit.....	243
<b>B Ausgleichungsverfahren.....</b>	<b>245</b>
B.1 Funktionales Modell.....	245
B.2 Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen .....	247
B.3 Ausgleichung mit Bedingungen zwischen Unbekannten .....	248
<b>C Objektrasterverfahren.....</b>	<b>249</b>