

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Einleitung in die Thematik	1
1.2	Stand der Forschung	2
1.2.1	Taktile Messverfahren	2
1.2.2	Elektromagnetische Messverfahren	3
1.2.3	Sondenmessverfahren	3
1.2.4	Optische Messverfahren	4
1.2.4.1	Aktive Messverfahren	5
1.2.4.2	Passive Messverfahren	11
1.3	Ziel und Aufbau der Arbeit	14
2	Einsatz von Lasern zur Materialstrukturierung	17
2.1	Bearbeitung von Mikrostrukturen mit Nd:YAG-Lasern	18
2.2	Bearbeitung von Mikrostrukturen mit Excimerlasern	18
2.3	Entstehung von Artefakten bei der Bearbeitung	20
2.4	Strategien zur Stegreduktion	21
3	Theoretische Grundlagen zur optischen Strukturvermessung	23
3.1	Allgemeines Modell zur digitalen Bildgewinnung	23
3.1.1	Das perspektivische Abbildungsmodell	24
3.1.2	Das Linsenmodell	25
3.1.3	Das Sensormodell	26
3.1.4	Das Beleuchtungsmodell	27

3.2	Geometrisches Optikmodell	29
3.3	Wellenoptisches Beugungsmodell	33
3.3.1	Einleitende Betrachtung	34
3.3.1.1	Systemtheorie und Fourieroptik	34
3.3.1.2	Beugung	35
3.3.1.3	Licht als elektromagnetische Welle	35
3.3.1.4	Kohärenz und Inkohärenz	36
3.3.1.5	Überlagerung von Wellen	37
3.3.1.6	Von-Bieren-Bedingung	39
3.3.1.7	Fraunhoferbeugung	39
3.3.2	Fokussierte Abbildung bei kohärenter Beleuchtung . . .	41
3.3.3	Fokussierte Abbildung bei inkohärenter Beleuchtung . .	43
3.3.4	Defokussierte Abbildung eines Punktes	45
3.3.5	Vergleich kohärenter und inkohärenter Beleuchtung . . .	50
3.4	Abbildung komplexer Strukturen	51
3.5	Vergleich des geometrischen und wellenoptischen Modells	51
3.6	Physikalische Grenzen optischer Messverfahren	54
3.6.1	Axiale Auflösungsgrenze	54
3.6.2	Laterale Auflösungsgrenze	55
4	Fokusbasierte Tiefenvermessung	57
4.1	Funktionsprinzip des fokusbasierten Messverfahrens	57
4.2	Versuchsaufbau	60
4.3	Beleuchtung	64
4.4	Verschiedene Maße als Schärfekriterium	66
4.5	Kontrastverlauf für eine Messposition	68
4.6	Lokalisation des Schärfemaximums	72
4.6.1	Interpolation der Maximumposition	73
4.6.2	Interpolation mittels theoretischem Verlauf	73
4.7	Optimale Abtastung des Kontrastverlaufes	75
4.8	Detektion ungültiger Tiefenwerte	77
4.8.1	Abweichungen lokal benachbarter Messpunkte	77
4.8.2	Fehler in der Modellannahme	77

4.8.3	Abweichung des Schärfeverlaufs vom theoretischem Verlauf	78
4.9	Erzeugung eines realistischen Oberflächenmodells	78
4.10	Messfehler	79
4.10.1	Zufällige Messfehler	80
4.10.2	Systematische Messfehler	80
4.10.2.1	Öffnungsfehler	81
4.10.2.2	Koma	81
4.10.2.3	Verzeichnung	82
4.10.2.4	Astigmatismus	82
4.10.2.5	Bildfeldwölbung	82
4.10.2.6	Chromatische Aberration	84
4.10.2.7	Änderung des Bildinhalts im Auswertefenster .	85
4.10.2.8	Änderung der Objektiefe im Auswertefenster .	85
4.10.2.9	Einfluss benachbarter Objektbereiche	85
4.10.2.10	Über- und Untersteuerung analoger Bauelemente	85
4.10.2.11	Unterabtastung des Schärfeverlaufs	86
4.10.3	Objektabhängige Messfehler	86
5	Optimierung des Aufnahmevorgangs	89
5.1	Verwendung von a priori Wissen	90
5.2	Funktionsprinzip der Tiefenmessung	90
5.2.1	Wissensbasis	90
5.2.2	Motorsteuerung	91
5.2.3	Auswertung	93
5.3	Diskussion des Ansatzes	93
6	Experimentelle Ergebnisse	95
6.1	Verifikation des Verfahrens	95
6.1.1	Messgenauigkeit des Verfahrens	95
6.1.2	Wiederholgenauigkeit des Verfahrens	103
6.2	Optimierte Auffindung ungültiger Messwerte	105
6.2.1	Vermessung von Objekten mit Bereichen ohne Textur .	105
6.2.2	Vermessung von Objekten mit Bereichen starker Reflexion	107

6.3	Verwendung von a priori Wissen	109
6.4	Stege in laserstrukturierten Objekten	112
6.4.1	Helle Keramik	113
6.4.2	Kapton	115
6.4.3	Aluminium	117
7	Zusammenfassung	121
A	Anhang	125
A.1	Mathematische Sätze und Definitionen	125
A.1.1	Satz über implizite Funktionen	125
A.1.2	Fouriertransformation (eindimensional)	125
A.1.3	Inverse Fouriertransformation (eindimensional)	126
A.1.4	Fouriertransformation (zweidimensional)	126
A.1.5	Inverse Fouriertransformation (zweidimensional)	126
A.1.6	δ -Funktion	126
A.1.7	Faltung	127
A.1.8	Kreuzkorrelation	127
A.1.9	Autokorrelation	127
A.1.10	Autokorrelation (zweidimensional)	128
A.1.11	Parsevalsche Gleichung	128
A.1.12	Besselfunktion	128
A.1.13	si, sinc Funktion	128
A.1.14	“Nagelbrett“-Funktion	129
A.2	Berechnung der fokussiert kohärenten Punktantwortsfunktion .	129
A.3	Berechnung der defokussiert kohärenten Punktantwortsfunktion	130
A.4	Axialer Verlauf der Punktantwortsfunktion	131
	Literaturverzeichnis	133