

**Entwicklung eines hybriden Messsystems zur In-Situ-Form- und
Rauheitsmessung mikrostrukturierter, optischer Funktionsflächen**

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Karsten Schneefuß
aus Menden (Sauerland)

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. (BR) Prof. h.c. (TJ) Dr. h.c. Tilo Pfeifer
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Heinrich Schmitt

Tag der mündlichen Prüfung: 15. Juli 2005

D 82 (Diss. RWTH Aachen)

1	EINLEITUNG	1
2	STAND DER TECHNIK	5
2.1	DIE MIKROSTRUKTURPRÜFUNG IM KONTEXT DER FERTIGUNGSMESSTECHNIK	5
2.2	HERSTELLUNG GROßFLÄCHIG MIKROSTRUKURIERTER OBERFLÄCHEN	7
2.2.1	<i>Herstellung und Anwendung optischer Funktionsflächen</i>	7
2.2.1.1	Grautolithografie	8
2.2.1.2	Interferenzlithografie	9
2.2.1.3	Ultrapräzisionszerspanung	10
2.2.2	<i>Forderungen an In-Situ-Messverfahren</i>	12
2.3	MESSVERFAHREN FÜR DIE MIKROSTRUKTURPRÜFUNG	15
2.3.1	<i>Mikrostreifenprojektion</i>	17
2.3.2	<i>Chromatischer Sensor</i>	18
2.3.3	<i>Formprüfinterferometrie</i>	19
2.3.4	<i>Weißlichtinterferometrie</i>	20
2.3.5	<i>Konfokale Mikroskopie</i>	22
2.3.6	<i>Streulicht- und fourieroptische Messung</i>	23
2.4	FAZIT	24
3	AUFGABENSTELLUNG UND ZIELSETZUNG	27
4	INTERFEROMETRISCHE FORMPRÜFUNG VON MIKROSTRUKTUREN	31
4.1	SYSTEMAUFBAU	32
4.1.1	<i>Interferometrische Strahlengänge</i>	32
4.1.2	<i>Vergrößerungsmethoden</i>	35
4.1.2.1	Objektivaufbau	35
4.1.2.2	Fernrohraufbau	37
4.1.2.3	Mikroskopaufbau	37
4.2	ENTWICKLUNG DER AUSWERTUNGSGRUNDGESAMHEITEN	40
4.2.1	<i>Einzelnutmessung</i>	40
4.2.2	<i>Messung mehrerer Nuten</i>	44
4.2.3	<i>Geschwindigkeitssteigerung durch interferometrische Nulltests</i>	46
4.2.3.1	90°-Prismen	47
4.2.3.2	Würfecken	49
4.2.3.3	45/90°-Nuten	50
4.2.3.4	Compound Parabolic Concentrator	51
4.3	AUTOMATISCHE AUSRICHTUNG DES MESSSYSTEMS	52
4.3.1	<i>Konzept der automatischen Messsystemausrichtung</i>	53
4.3.2	<i>Geometriemessung mittels automatischer Messsystemausrichtung</i>	54
4.4	MESSBEREICHSERWEITERUNG	55
4.4.1	<i>Diffraktive Kompensationsoptiken</i>	56
4.4.2	<i>Mehrwellenlängeninterferometrie</i>	57
4.4.2.1	Simulationen zur Gittermessung	59
4.4.3	<i>Sub-Apertur-Interferometrie</i>	62
4.4.3.1	Simulationen zur Asphärenmessung	64
4.5	MESSUNSICHERHEITSBETRACHTUNG	67
4.6	FAZIT	71
5	FOURIEROPTISCHE ANALYSE VON MIKROSTRUKTUREN	73
5.1	SYSTEMENTWICKLUNG	74

5.1.1	<i>Beugungstheoretische Grundlagen</i>	74
5.2	MODELLGESTÜTZTE ENTWICKLUNG DER AUSWERTUNGSPARAMETER.....	78
5.2.1	<i>Prismenarrays</i>	79
5.2.1.1	Prismenbreite.....	79
5.2.1.2	Nuthöhen- bzw. Nutwinkeländerungen.....	80
5.2.1.3	Symmetrieänderung.....	81
5.2.1.4	Rauheitsänderung.....	81
5.2.1.5	Einzelne Defekte.....	82
5.2.2	<i>Ergebnisse weiterer Teststrukturen</i>	83
5.3	AUTOMATISCHE AUSRICHTUNG DES MESSSYSTEMS.....	84
5.3.1	<i>Fokuspunktsuche</i>	84
5.3.2	<i>Einfluss von Verkipfung und Verschiebung der Probe</i>	85
5.3.3	<i>Einfluss von Abstandsänderungen</i>	86
5.4	KONZEPTIONIERUNG DES HYBRIDEN MESSSYSTEMS.....	86
5.4.1	<i>Systemaufbau</i>	87
5.4.2	<i>Messunsicherheitsbetrachtung</i>	88
5.5	FAZIT.....	89
6	ANWENDUNGEN UND ERGEBNISSE.....	91
6.1	INTERFEROMETRISCHE FORMPRÜFUNG VON MIKROSTRUKTUREN.....	91
6.1.1	<i>Formmessung bei Mikroprismen- und Pyramidenarrays</i>	92
6.1.1.1	Messung mit dem Objektivaufbau.....	92
6.1.1.2	Messung mit dem Linnik-Aufbau.....	95
6.1.1.3	Vergleich mit anderen Messsystemen.....	96
6.1.2	<i>Messung sphärischer Mikrolinsenarrays</i>	97
6.1.2.1	Form- und Radiusmessungen von Mikrolinsenarrays.....	98
6.1.2.2	Vergleich mit anderen Messsystemen.....	100
6.1.3	<i>Nulltests bei Mikroprismen- und Pyramidenarrays</i>	102
6.1.4	<i>Messbereichserweiterung</i>	105
6.1.4.1	Messung von Gitterstrukturen mittels Mehrwellenlängeninterferometrie.....	106
6.1.4.2	Messung von Asphären mittels Sub-Apertur-Interferometrie.....	107
6.2	MIKROSTRUKTURPRÜFUNG MITTELS FOURIEROPTISCHER ANALYSE.....	110
6.2.1	<i>Untersuchungen von Mikroprismenarrays</i>	110
6.2.1.1	Untersuchung der Prismenbreite.....	111
6.2.1.2	Rauheitsänderung auf der Mikrostruktur.....	111
6.2.2	<i>Gitter</i>	112
6.2.3	<i>Würflecken</i>	113
6.3	EINSATZ ZUR IN-SITU-MESSUNG GROßFLÄCHIG MIKROSTRUKTURIERTER OBERFLÄCHEN.....	114
6.3.1	<i>Interferometrische Messungen</i>	114
6.3.2	<i>Automatische Justage</i>	115
6.3.3	<i>Fourieroptische Messungen</i>	116
6.4	FAZIT.....	117
7	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	119
8	LITERATUR.....	123
8.1	FREMDE VERÖFFENTLICHUNGEN.....	123
8.2	EIGENE VERÖFFENTLICHUNGEN.....	130