

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|------------|
| Kurzfassung | v |
| Abbildungsverzeichnis | xi |
| Tabellenverzeichnis | xiv |
| 1 Einleitung | 1 |
| 2 Stand der Technik | 3 |
| 2.1 Rauheitsmessung | 3 |
| 2.1.1 Taktile Rauheitsmessung | 4 |
| 2.1.1.1 Dreidimensionale taktile Rauheitsmesstechnik | 5 |
| 2.1.2 Optische Rauheitsmessung | 6 |
| 2.1.2.1 Punktsensoren | 7 |
| 2.1.2.2 Flächensensoren | 7 |
| 2.2 Rauheitsauswertung | 8 |
| 2.2.1 Profilorientierte Rauheitsauswertung | 8 |
| 2.2.2 3D-Rauheitsauswertung | 9 |
| 2.2.3 Strukturorientierte Auswertung | 10 |
| 2.3 Einpassverfahren | 11 |
| 2.3.1 Lp-Raum und Einpassnormen | 11 |
| 2.3.2 Betragsschätzer | 12 |
| 2.3.3 Kleinste-Fehlerquadrate-Schätzer | 13 |
| 2.3.3.1 Lineare Modellfunktion | 14 |
| 2.3.3.2 Einpassung mittels der kleinsten Fehlerquadrate Methode | 16 |
| 2.3.3.3 Satz von Gauß-Markow | 16 |
| 2.3.3.4 Einpassung mittels der kleinsten Fehlerquadrate bei Verwendung einer Gewichtsfunktion | 17 |
| 2.3.4 Tschebyschew-Norm | 18 |
| 2.3.5 Huber-k-Schätze | 18 |
| 2.4 Modellfunktionen für die Einpassung | 20 |
| 2.4.1 Polynomflächen | 20 |
| 2.4.2 Spline-Flächen | 21 |
| 2.4.2.1 B-Spline-Flächen | 21 |
| 2.4.2.2 P-Spline-Flächen | 24 |
| 2.4.3 Auf Sinusfunktionen beruhende Modellfunktionen | 27 |
| 2.5 Rekonstruktionsverfahren | 27 |
| 2.5.1 Auf polynomialen Interpolationsverfahren beruhende Verfahren | 28 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 2.5.2 | Auf Profilen basierenden Verfahren | 30 |
| 2.5.2.1 | Lagrange-Interpolation | 30 |
| 2.5.2.2 | Lineare Interpolation | 30 |
| 2.5.2.3 | Quadratische Interpolation | 31 |
| 2.5.2.4 | Kubische Interpolation | 32 |
| 2.5.2.5 | Kubische Spline-Interpolation | 32 |
| 2.5.3 | Auf Triangulation beruhenden Verfahren | 33 |
| 2.5.4 | Interpolation in Dreiecksnetzen | 35 |
| 2.5.4.1 | Lineare Interpolation in Dreiecksnetzen | 35 |
| 2.5.4.2 | Quadratische Interpolation in Dreiecksnetzen | 36 |
| 2.5.4.3 | Spline-Interpolation in Dreiecksnetzen | 37 |
| 2.5.4.4 | Akima-Interpolation | 38 |
| 2.5.5 | Auf gewichtete Mittelwertbildung beruhende Verfahren | 42 |
| 2.5.5.1 | Shepard-Interpolation | 42 |
| 2.5.5.2 | Kriging | 45 |
| 2.5.6 | Auf Spektralanalyse beruhende Verfahren | 45 |
| 2.5.7 | Auf physikalisch und geometrischen Annahmen beruhende Verfahren | 48 |
| 2.5.7.1 | Nearest-Point-Verfahren | 48 |
| 2.5.7.2 | Braile-Interpolation | 49 |
| 3 | Optische Messgeräte | 52 |
| 3.1 | Lichtmikroskop - optische Grundlagen | 52 |
| 3.1.1 | Definition der numerischen Apertur | 53 |
| 3.1.2 | Grenzen der Mikroskopauflösung | 55 |
| 3.1.3 | Gesamtvergrößerung | 57 |
| 3.1.4 | Schärfentiefe | 57 |
| 3.2 | Konfokales Mikroskop | 57 |
| 3.2.1 | Messprinzip | 58 |
| 3.2.2 | Ermittlung der Topographie | 59 |
| 3.3 | Weißlichtinterferometer | 61 |
| 3.3.1 | Messprinzip | 61 |
| 3.3.2 | Ermittlung der Topographie | 62 |
| 4 | Ermittlung der Messdaten | 64 |
| 4.1 | Probenauswahl | 64 |
| 4.2 | Durchführung der Messung | 65 |
| 4.3 | Belichtungsserien zur Erweiterung des Intensitätsbereichs | 66 |
| 5 | Optische Artefakte und Fehlstellen | 73 |
| 5.1 | Ursachen von optischen Artefakten | 73 |
| 5.1.1 | Ursachen von Überschwingern - „Bat-Wings“ bei Weißlichtinterferometern | 74 |
| 5.1.2 | Ursachen von Überschwingern bei konfokalen Mikroskopen | 75 |
| 5.1.3 | Einfluss optischer Artefakte auf das Rauschverhalten der Topographie Mikroskope | 76 |
| 5.2 | Ursachen von Fehlstellen in der optischen Messtechnik | 76 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5.2.1 | Allgemeine Ursachen für Fehlstellen | 77 |
| 5.2.2 | Fehlstellen bei WLI | 81 |
| 5.3 | Rekonstruktion von Fehlstellen | 81 |
| 5.3.1 | Erweiterung der Shepard-Interpolation auf von der Messgüte abhängige Gewichtungsfunktionen | 82 |
| 5.3.1.1 | Gewichtung in Abhängigkeit eines gleitenden Mittelwertes bzw. Medians | 83 |
| 5.3.1.2 | Gewichtung in Abhängigkeit der Oberflächensteigung | 84 |
| 5.3.1.3 | Gewichtung in Abhängigkeit der Lichtintensität | 84 |
| 5.3.1.4 | Gewichtung in Abhängigkeit der Schiefe der konfokalen Kurve | 86 |
| 5.3.1.5 | Gewichtung in Abhängigkeit von der Halbwertsbreite | 87 |
| 5.3.1.6 | Gewichtung in Abhängigkeit vom Lichtanteil innerhalb des Auswertebereichs | 88 |
| 5.3.1.7 | Gewichtung aufgrund unterschiedlicher Auswertemethoden bei Weißlichtinterferometern | 88 |
| 5.3.2 | Vergleich der Rekonstruktionsverfahren | 88 |
| 5.3.2.1 | Vergleich der Rekonstruktionsverfahren anhand simulierter Oberflächen | 89 |
| 5.3.2.2 | Vergleich der Rekonstruktionsverfahren anhand realer Oberflächen | 94 |
| 6 | Robuste Bezugsflächenbestimmung | 101 |
| 6.1 | Definition der robusten Bezugsflächen | 101 |
| 6.2 | Einfluss asymmetrischer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen auf die robuste Bezugsflächenfindung | 103 |
| 6.3 | Dynamische Gewichtung für die iterative Einpassung mittels der kleinsten Fehlerquadrate Methode zur Findung der robusten Bezugsfläche | 104 |
| 6.3.1 | Ermittlung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen von strukturierten Oberflächen | 105 |
| 6.3.2 | Bestimmung der Gewichtungsfunktion | 109 |
| 6.3.2.1 | Maximumsbestimmung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen | 110 |
| 6.3.2.2 | Standardabweichungsbestimmung einer Ersatznormalverteilung | 114 |
| 6.3.2.3 | Herleitung der Gewichtungsfunktion | 115 |
| 6.3.3 | Generierung von a priori Wissen über die Wahrscheinlichkeitsverteilungen von typischen Oberflächenarten | 118 |
| 6.3.3.1 | Anhand von sandgestrahlten Proben | 119 |
| 6.3.3.2 | Anhand von Flachproben | 120 |
| 6.3.3.3 | Anhand von Zylinderlaufbahnen | 122 |
| 6.3.4 | Verfahrensablauf der Einpassung | 123 |
| 6.3.5 | Robustheitsuntersuchung | 124 |
| 6.3.6 | Einpassergebnisse | 127 |
| 7 | Zusammenfassung | 130 |
| | Literaturverzeichnis | 132 |

| | |
|---|------------|
| A Messgeräte | 149 |
| A.1 Somicronic Surfscan 3S | 149 |
| A.2 NanoFocus μ Surf | 149 |
| A.3 Veeco Wyko NT1100 | 150 |
| B Probenspezifikationen | 152 |
| B.1 sandgestrahlte Proben | 152 |
| B.2 Flachproben | 152 |
| B.3 Zylinderproben | 153 |
| C Abkürzungen der Dichtefunktionen | 154 |
| D Vergleich der Einpassgüten | 156 |
| D.1 Vergleich der Einpassgüten der sandgestrahlten Proben | 156 |
| D.1.1 Anhand der Sf-Probe | 156 |
| D.1.2 Anhand der Sm-Probe | 159 |
| D.1.3 Anhand der Sg-Probe | 162 |
| D.2 Vergleich der Einpassgüten der Flachproben | 165 |
| D.2.1 Anhand der F1-Probe | 165 |
| D.2.2 Anhand der F2-Probe | 168 |
| D.3 Vergleich der Einpassgüten der Zylinderproben | 171 |
| D.3.1 Anhand der ZA-Probe | 171 |
| D.3.2 Anhand der ZB-Probe | 174 |
| D.3.3 Anhand der ZC-Probe | 177 |
| Lebenslauf | 180 |