

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Stand der taktilen Mikrokoordinatenmesstechnik	5
2.1 Grundlagen der Koordinatenmesstechnik	5
2.2 Messverfahren für Mikrobauteile	7
2.3 Mikrokoordinatenmessgeräte	9
2.4 Prinzip eines Tastsystems	11
2.5 Kommerzielle 3D-Mikrotastsysteme	13
3. Piezoresistive 3D-Mikrotaster: Theoretische Betrachtungen	19
3.1 Mechanische piezoresistive Sensoren	19
3.1.1 Von der Entdeckung des piezoresistiven Effekts bis zu den Anwendungen	19
3.1.2 Physikalische und mechanische Eigenschaften von Silizium	20
3.1.3 Grundlagen des piezoresistiven Effekts	23
3.2 Herstellungsverfahren beim Silizium	28
3.2.1 Technologieprozesse der Mikrotechnik	28
3.2.2 Volumenmikromechanik beim Silizium	29
3.2.3 Oberflächenmikromechanik beim Silizium	30
3.3 Aufbau des Mikrotasters	30
3.3.1 Arbeitsprinzip des 3D-Mikrotasters	30
3.3.2 Mechanische Beanspruchung der Siliziummembran	32
3.3.3 FEM-Simulation der mechanischen Eigenschaften des Mikrotasters	34
3.4 Signalverarbeitung für den Mikrotaster	36
3.4.1 Energieumwandlungskette bei Mikrosystemen	36
3.4.2 Wheatstonesche Brückenschaltungen	37
3.4.3 Verstärkung der Brückenausgangsspannung	40
3.4.4 Filterung des Ausgangssignals	42
3.4.5 Analog/Digital-Umwandlung	43
4. Herstellung und Integration von 3D-Mikrotastern	45
4.1 Mikrotechnologische Herstellung von Kraftsensoren	45
4.1.1 Mikrotechnologische Herstellung von Silizium-Membranen	45
4.1.2 Mikrotechnologische Herstellung von Polymermembranen	52
4.2 Mikrotaststifte zur Oberflächenantastung	55
4.2.1 Taststifte mit 300-120 µm Kugeldurchmesser aus Rubin	55

4.2.2 Erosion von Taststiften mit bis 50 μm Kugeldurchmessern	56
4.2.3 Taststifte aus Polymer	59
4.3 Aufbau und Verbindung des Mikrotasters	65
4.3.1 Überblick in die Aufbau- und Verbindungstechnologie	65
4.3.2 Elektrische Kontaktierung des Sensorchips	65
4.3.3 Mechanische Verbindung von Taststift und Sensorelement	67
4.3.4 Aufnahme für den Mikrotaster	67
4.4 Integration des Mikrotasters	68
4.4.1 Elektromechanische Verbindung	68
4.4.2 Koordinatenmessgerät zur Erprobung des Tasters	69
5. Charakterisierung von Mikrotastern	71
5.1 Abschätzung der Messunsicherheit von Messungen	71
5.1.1 Grundbegriffe der Messtechnik	71
5.1.2 Berechnung der empirischen Standardmessunsicherheit	72
5.2 Verwendete Mikrotaster für die Charakterisierung	73
5.3 Charakterisierung von Mikrotastern in den Hauptachsen	75
5.3.1 Messgröße zur Mikrotastercharakterisierung	75
5.3.2 Steifigkeit und Bruchgrenzen	76
5.3.3 Sensorempfindlichkeit	80
5.3.4 Frequenzgang	87
5.3.5 Auflösungsgrenze des Sensorsignals	91
5.3.6 Temperaturverhalten	93
5.4 Charakterisierung des Mikrotasters in 3D	94
5.4.1 Mathematisches Modell des Tasters	94
5.4.2 Bestimmung der Tasterparameter	96
5.4.3 Kalibrierung und Messung einer Referenzkugel	98
6. Anwendungen in der Verzahnungsmesstechnik	105
6.1 Prinzip der Messung einer Evolventenverzahnung	105
6.1.1 Geometrie einer Evolventenverzahnung	105
6.1.2 Messung und Auswertung von Qualitätskenngrößen	106
6.1.3 Berechnung der Messunsicherheit nach dem GUM	110
6.2 PTB-Mikroverzahnungsnorm	112
6.2.1 Wirtschaftliche Aspekte für die Industrie	112
6.2.2 Produktähnliches Mikroverzahnungsnorm	112
6.2.3 Kalibrierung des produktähnlichen Mikroverzahnungsnormals	114
6.3 Messungen am Mikroverzahnungsnorm	115

6.3.1 Messaufbau und -vorgang	115
6.3.2 Messergebnisse für Module 1 mm und 0,5 mm	118
6.3.3 Messergebnisse für Modul 0,2 mm	120
6.3.4 Messergebnisse für Modul 0,1 mm	122
7. Zusammenfassung und Ausblick	125
8. Literaturverzeichnis	129
8.1 Eigene Veröffentlichungen	129
8.2 Betreute studentische Arbeiten	131
8.3 Weiterführende Literatur	132
Anhang	141
A. Prozessplan zur Herstellung von Silizium Kraftsensoren	141
B. Prozessplan zum Lift-Off	147
C. Prozessplan zum Aufgalvanisieren der Bumps	148
D. Prozessplan zur Herstellung von Polymerkraftsensoren	150
E. Messergebnisse für das Mikroverzahnungsnormal	157