

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungen und Formelzeichen	IV
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Aufbau der Arbeit	4
2 Grundlagen	6
2.1 Zahnräder	6
2.1.1 Geometrie der Zahnflanken	6
2.1.2 Geometrische Qualitätsmerkmale evolventischer Zahnräder	9
2.1.3 Zahnräder in der Mikrosystemtechnik	13
2.2 Verzahnungsprüfung	14
2.2.1 Verzahnungsmessgeräte	15
2.2.2 Koordinatenmesstechnik	16
2.3 Messunsicherheit	18
3 Stand der Forschung und Technik	23
3.1 Gestalterfassung im Mikrometerbereich	23
3.1.1 Taktile Gestalterfassung	24
3.1.2 Optische Gestalterfassung	29
3.1.3 Industrielle Computertomographie	30
3.2 Bestimmung der Messunsicherheit	31
3.2.1 Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)	32
3.2.2 Messunsicherheitsermittlung durch Simulation	33
3.2.3 Experimentelle Messunsicherheitsermittlung	35
3.2.4 Normale und Prüfkörper	37
3.3 Defizit	45
4 Mikroverzahnungsnormal für Mikrozahnräder	47
4.1 Anforderungen an ein Mikroverzahnungsnormal	49
4.1.1 Ähnlichkeit	50
4.1.2 Messbarkeit	51
4.1.3 Robustheit in Herstellung und Anwendung	52
4.2 Auslegung des Mikroverzahnungsnormal	55

4.2.1	Abbildung des Profils	55
4.2.2	Abbildung der Flankenlinie	61
4.2.3	Abbildung der Teilung	63
4.2.4	Abbildung der Zahnflankenfläche	66
4.3	Messung und Auswertung des Mikroverzahnungsnormal	68
4.3.1	Messung und Auswertung des Profils	68
4.3.2	Messung und Auswertung der Flankenlinie	80
4.3.3	Messung und Auswertung der Teilung	80
4.3.4	Messung und Auswertung der Zahnflankenfläche	81
4.3.5	Messbarkeit des Mikroverzahnungsnormal	82
4.4	Experimentelle Messunsicherheitsermittlung mit Mikroverzahnungsnormal	88
4.4.1	Bestimmung der Standardunsicherheit der Kalibrierung u_{cal} des Normal	89
4.4.2	Bestimmung der Standardunsicherheit des Messprozesses u_p bei der Messung des Normal	89
4.4.3	Bestimmung der systematischen Abweichung b	90
4.4.4	Bestimmung der Standardunsicherheit aus dem Produktionsprozess u_w	91
4.4.5	Bestimmung des Erweiterungsfaktors k	92
4.5	Vorgehen zur Auslegung, Realisierung und Anwendung des Mikroverzahnungsnormal	92
4.5.1	Zusammenfassung der für den Anwender erforderlichen Schritte zur Auslegung des Normal	92
4.5.2	Vorgehen zur Realisierung des Normal	94
4.5.3	Zusammenfassung zur Anwendung des Normal zur experimentellen Messunsicherheitsermittlung	95
5	Validierung des Mikroverzahnungsnormal	97
5.1	Ausrüstung und Messobjekt	97
5.2	Realisierung des Normal	101
5.2.1	Auslegung und Herstellung des Normal	101
5.2.2	Realisierte Gestalt des Normal	104
5.3	Aufzeigen der Messstrategie	109
5.3.1	Zahnradmodell	110
5.3.2	Messpunkteanzahl und -verteilung	111
5.4	Experimentelle Messunsicherheitsermittlung	122
5.4.1	Ermittelte Standardunsicherheit der Kalibrierung des Normal	123
5.4.2	Ermittelte Standardunsicherheit des Messprozesses bei der Messung des Normal	125
5.4.3	Ermittelte systematische Abweichung	129
5.4.4	Ermittelte Standardunsicherheit aus dem Produktionsprozess	132

5.4.5 Bestimmung der erweiterten Messunsicherheit	134
5.5 Exemplarische Anwendung in der Praxis	137
5.5.1 Ermittlung der Messunsicherheit	138
5.5.2 Überprüfung des Messprozesses	140
5.5.3 Qualifizierung des Messprozesses	142
5.5.4 Zusammenfassung exemplarische Anwendung	143
6 Bewertung und Ausblick	145
6.1 Bewertung der Ergebnisse	145
6.1.1 Gestaltung des Mikroverzahnungsnormal	145
6.1.2 Messergebnisse am Mikroverzahnungsnormal	146
6.2 Ausblick	147
7 Zusammenfassung	150
Literaturverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	XXII
Anhang	XXIX