

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	VII
Formelzeichen	IX
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Herausforderung	1
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Forschungshypothesen	3
1.4 Aufbau der Arbeit	4
2 Grundlagen	5
2.1 Verzahnungen	5
2.1.1 Grundbegriffe und Geometrien an Verzahnungen	6
2.1.2 Verzahnungsfertigung	9
2.1.3 Mikroverzahnungen	11
2.1.4 Geometrische Qualitätsmerkmale und Verzahnungsabweichung	12
2.1.5 Verzahnungstoleranzen	14
2.1.6 Skin-Model Shapes	16
2.1.7 Zwischenfazit	17
2.2 Messtechnik	17
2.2.1 Produktionsintegrierte Fertigungsmesstechnik	18
2.2.2 Taktile Messtechnik	19
2.2.3 Optische Messtechnik	20
2.2.4 Computertopographische Messtechnik	22
2.2.5 Funktionsorientierte Messtechnik	23
2.2.6 Zwischenfazit	28
2.3 Messunsicherheit	29
2.3.1 Definition	29
2.3.2 Einflussgrößen	30

2.3.3 Richtlinien	30
2.3.4 Zwischenfazit	36
2.4 Qualitätsprüfung	36
2.4.1 Prüfstrategien	36
2.4.2 Rückführbarkeit	37
2.4.3 Prüfprozesseignung	38
2.4.4 Zwischenfazit	39
2.5 Statistische Versuchsplanung	39
2.5.1 Definition	39
2.5.2 Latin Hypercube Sampling	40
2.5.3 Zwischenfazit	41
2.6 Messdatenanalyse	41
2.6.1 Künstliche Intelligenz und Maschinelles Lernen	41
2.6.2 Statistische Kenngrößen	43
2.6.3 Analyse von Signaldaten	45
2.6.4 Zwischenfazit	47
2.7 Prozess- und Qualitätsregelung	47
2.7.1 Definition	47
2.7.2 Elemente eines Regelkreises	47
2.7.3 Qualitätsregelkreis	48
2.7.4 Zwischenfazit	48
3 Stand der Forschung	49
3.1 Anforderungen	49
3.2 Vorstellung und Einordnung bestehender Ansätze	50
3.2.1 Ansätze zur Bewertung der Fertigungsqualität von Mikroverzahnungen	50
3.2.2 Ansätze zu simulativen Zahnkontaktanalysen von Makroverzahnungen	52
3.2.3 Ansätze zur Mikroverzahnungsmessung mit der optischen Fokusvariationstechnologie	54
3.2.4 Ansätze zur Quantifizierung der Messunsicherheit bei funktionsorientierten Wälzprüfungen	55

3.2.5 Ansätze zu Qualitätsregelkreisen in der Verzahnungsfertigung	56
3.3 Forschungsdefizit	57
4 Lösungsansatz	61
4.1 Aufbau des Lösungsansatzes	62
4.2 Ausgangssituation der prototypischen Realisierung	63
5 Messzeitoptimierung und Messunsicherheitsermittlung der Fokusvariation	67
5.1 Versuchsaufbau für taktile und optische Messungen	67
5.1.1 Einrichtung zur Ermittlung eines optimalen Reinigungsverfahrens	67
5.1.2 Taktile Referenzmessungen	68
5.1.3 In-line Einrichtung der Fokusvariationstechnologie	70
5.2 Methode zur Ermittlung optimaler in-line Messparameter unter Berücksichtigung von Messzeit und Messunsicherheit	72
5.2.1 Identifikation optimaler Messparameter	72
5.2.2 Ausgewählte Methoden zur Bewertung der Messunsicherheit	74
5.2.3 Konzept der Prozesseignungsanalyse für die Validierung	75
5.3 Ergebnisse der Messzeitoptimierung sowie der Messunsicherheitsermittlung der Fokusvariation	76
5.3.1 Identifizierung eines optimierten Reinigungsverfahrens	76
5.3.2 Identifizierung optimierter Messparameter	77
5.3.3 Optimiertes Messprogramm	82
5.3.4 Messunsicherheiten des optimierten Messprogramms	83
5.3.5 Unsicherheit der virtuellen Zahnweitenprognose	84
5.3.6 Ergebnisse der Prüfprozesseignung	84
5.4 Diskussion der Ergebnisse	85
6 Qualifizierung des Einflanken-Wälzprüfstands	86
6.1 Experimenteller Aufbau	86
6.1.1 Einflanken-Wälzprüfstand für Mikrozahnräder	86
6.1.2 Meisterzahnräder	88
6.1.3 Spanndorn für das Prüfzahnrad	91

6.2	Laserinterferometrie zur Messung von Achsabweichungen	93
6.3	Evaluierung der Messunsicherheit	94
6.3.1	Parameter des Messprogramms	95
6.3.2	Unsicherheitsbewertung der Achspositioniergenauigkeit	99
6.3.3	Bestimmung der Sensitivitätskoeffizienten	100
6.4	Messunsicherheitsmodell der Einflanken-Wälzprüfung	101
6.4.1	Unsicherheit der Anfangskalibrierung	102
6.4.2	Unsicherheit der Einspannsituation	104
6.4.3	Unsicherheit des Messprozesses	104
6.5	Ergebnisse und Messunsicherheitsbudget	106
6.6	Untersuchung der Prüfprozesseignung	108
6.7	Diskussion der Ergebnisse	108
7	Validierung der analytischen Drehwegsimulation	110
7.1	Analytische Drehweg-Simulation	110
7.2	Experimentelles Vorgehen	112
7.3	Vergleichende Signalanalyse	113
7.3.1	Methodisches Vorgehen	113
7.3.2	Filtermethoden zur Beseitigung unerwünschter Exzentrizitäten	114
7.3.3	Identifizierung der optimalen Filtermethode	116
7.3.4	Vergleich der Simulationsdaten mit den Daten des Prüfstands	117
7.4	Diskussion der Ergebnisse	121
8	Quantifizierung der Simulations- bzw. Gesamtunsicherheit	124
8.1	Ansatz für die Bewertung der Simulationsunsicherheit	124
8.1.1	Methode	124
8.1.2	Vorgehensweise	126
8.2	Analyse der optischen Messdaten	126
8.2.1	Vorverarbeitung	127
8.2.2	Clustering	128
8.2.3	Statistische Formanalyse	129

8.3 Generierung von künstlichen Zahnrädern	133
8.3.1 Validierung	136
8.4 Monte-Carlo-Simulation von Skin Model Shapes	138
8.5 Simulation der künstlich generierten Zahnräder	140
8.6 Diskussion der Ergebnisse	144
8.6.1 Bewertung der Simulationsunsicherheit	144
8.6.2 Qualifizierung	145
9 Integration des Qualitätsregelkreises	147
9.1 Entwicklung eines adaptiven Qualitätsregelkreises	147
9.2 Analyse des Wälzfräsvorprozesses	148
9.2.1 Versuchsreihe mit eindimensionalen Variationen	149
9.2.2 Identifikation kritischer Einflussgrößen	150
9.2.3 Versuchsreihe mit mehrdimensionalen Variationen	151
9.3 Verarbeitung von Messdaten	156
9.3.1 Messung und Datenexport	156
9.3.2 Messdatenvorverarbeitung	156
9.3.3 Ermittlung von Verzahnungsabweichungen	158
9.4 Analyse der Daten des Korrekturalgorithmus	159
9.5 Training des Korrektualgorithmus	164
9.6 Entscheidungslogik für die Korrektur	171
9.7 Rückführung der Korrekturwerte an die Werkzeugmaschine	172
9.8 Grafische Benutzeroberfläche für die Mensch-Maschine-Kommunikation	173
9.9 Validierung	174
9.10 Diskussion der Ergebnisse	176
10 Diskussion und Ausblick	178
10.1 Diskussion	178
10.2 Ausblick	180
11 Zusammenfassung	182

Liste eigener Veröffentlichungen	184
Literaturverzeichnis	188
Abbildungsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis	IX
Anhang	XIII
A1 Angaben zur Alicona µCMM	XIII
A2 Ermittlung der Messunsicherheit der Fokusvariation auf der Alicona µCMM	XVI
A3 Prüfzertifikate der Lehrzahnräder	XX
A4 Messaufbau des Interferometers zur Achsvermessung des Einflanken-Wälzprüfstands	XXII
A5 Sensitivitätskoeffizienten des Messunsicherheitsbudget von dem Mikro-Einflanken-Wälzprüfstand	XXIII
A6 Auflistung der ermittelten Messunsicherheiten aller funktionalen Parameter der Einflanken-Wälzprüfung auf dem Mikro-Einflanken-Wälzprüfstands	XXV
A7 Code des Generierungsprozesses	XXVI
A8 Vergleich der funktionsorientierten Parameter der Einflanken-Wälzprüfung	XXVII
A9 Kompletter Versuchsplan der DOE	XXIX
A10 Analyse der optischen Messdaten	XXXVIII
A11 Messunsicherheitsbudget der virtuellen Zahnweitenprognose	XLII
A12 Ergebnisse der Analyse des Wälzfräsprozesses	XLIII