

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen und Methodik	3
2.1	Zahnräder und Verzahnungsmessgrößen	3
2.2	Begriffe der Metrologie	7
2.2.1	Messgröße, Messwert und Messergebnis	7
2.2.2	Messunsicherheit	8
2.3	Verzahnungsmesstechnik.....	9
2.3.1	Aufbau moderner Messgeräte zur Messung von Verzahnungen	9
2.3.2	Details eines Verzahnungsmessgerätes	11
2.3.3	Ablauf einer Messung auf Verzahnungs- oder Koordinatenmessgeräten.....	12
2.3.4	Unsicherheitseinflüsse bei Verzahnungsmessungen	15
2.4	Methoden zur Ermittlung der Messunsicherheit.....	18
2.4.1	Analytische Messunsicherheitsermittlung	18
2.4.2	Experimentelle Messunsicherheitsermittlung.....	19
2.4.3	Messunsicherheitsermittlung durch Simulation.....	20
2.5	Messunsicherheitsermittlung mit dem VIRTUELLEN KOORDINATENMESSGERÄT	23
2.5.1	Prinzip des VIRTUELLEN KOORDINATENMESSGERÄTES	24
2.5.2	Mathematisches Konzept.....	25
2.5.3	Grenzen des VIRTUELLEN KOORDINATENMESSGERÄTES	27
2.6	Zielsetzung und wissenschaftliche Schwerpunkte dieser Arbeit	29
3	Mathematische Modellierung des Messprozesses auf Verzahnungsmessgeräten.....	31
3.1	Unsicherheitsbeiträge aus den translatorischen Führungen und Längenmesssystemen ..	32
3.1.1	Mathematisches Modell der translatorischen Achsen im VCMM.....	33
3.1.2	Beurteilung des Modells für die Beschreibung der translatorischen Achsen von Verzahnungsmessgeräten.....	35
3.2	Unsicherheitsbeiträge aus dem Drehtisch und der Aufspannung	37
3.2.1	Phänomenologische Beschreibung des Einflusses von Drehtisch und Aufspannung.....	38
3.2.2	Mathematische Beschreibung der Drehtischabweichungen nach <i>Trapet 1997</i>	42
3.2.3	Mathematisches Modell der Einflüsse aus der Aufspannung des Zahnrads.....	44
3.2.4	Beurteilung des entwickelten Modells.....	53
3.3	Unsicherheitbeiträge aus dem Scanning	55
3.3.1	Ansatz zur Modellierung des Unsicherheitsbeitrags des Scannings.....	56
3.3.2	Untersuchungen zur Identifikation signifikanter Eingangsparameter	57
3.3.3	Mathematisches Modell des Scanning Einflusses	68
3.3.4	Beurteilung des entwickelten Modells.....	73
3.4	Unsicherheitsbeiträge des Tastsystems.....	75
3.4.1	Mathematisches Modell des Antastverhaltens im VCMM.....	76
3.4.2	Beurteilung des Modells für die Beschreibung des Tastsystems von Verzahnungsmessgeräten	77
3.5	Unsicherheitsbeiträge aus den Umgebungsbedingungen.....	79
3.5.1	Mathematisches Modell der Umgebungsbedingungen im VCMM.....	79
3.5.2	Beurteilung des mathematischen Modells für die Beschreibung des thermischen Verhaltens von Verzahnungsmessgeräten	79
3.5.3	Anpassung des mathematischen Modells des Temperatureinflusses an die Geometrie von Verzahnungsmessgeräten.....	80

3.6	Unsicherheitsbeiträge aus dem Werkstück	85
3.6.1	Beurteilung des mathematischen Modells zur Beschreibung des thermischen Verhaltens von Werkstücken für die Anwendung auf Verzahnungen.....	85
3.6.2	Beurteilung des mathematischen Modells zur Berücksichtigung der Oberflächenrauheit	86
3.7	Zusammenfassung der Modellierung des Verzahnungsmessprozesses	87
4	Berechnung der Messunsicherheit im VCMM-GEAR.....	89
4.1	Berücksichtigung von Unsicherheitsbeiträgen aus nicht korrigierten systematischen Abweichungen	90
4.1.1	Systematische Unsicherheitsbeiträge bei Koordinatenmessungen	90
4.1.2	Erweiterung der Rechenvorschriften um den systematischen Unsicherheitsbeitrag	92
4.1.3	Gegenüberstellung von Standardmessunsicherheit und symmetrischem Überdeckungsintervall.....	95
4.1.4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	98
4.2	Stabilität der Unsicherheitsberechnung	99
4.2.1	Auswahl eines geeigneten Stabilitätskriteriums	99
4.2.2	Abschätzung der erforderlichen Stabilität der Messunsicherheiten.....	101
4.2.3	Simulationen zur Festlegung geeigneter Grenzwerte für die ausgewählten Abbruchkriterien	102
4.2.4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	104
5	Umsetzung der mathematischen Modelle und der Messunsicherheitsberechnung in einem Softwarepaket.....	107
5.1	Konzept der Softwarestruktur des VCMM-GEAR	107
5.2	Basisklassen und Datenstrukturen	109
6	Erfassung der Eingangsparameter für die Anwendung des VCMM-GEAR	113
6.1	Geometrieabweichungen der translatorischen Achsen	114
6.1.1	Festlegung der kinematischen Achsfolge des Messgerätes	114
6.1.2	Durchführung der LaserTracer-Messungen.....	115
6.1.3	Analyse und Diskussion der translatorischen Geometrieabweichungen	116
6.2	Geometrieabweichungen der rotatorischen Achse.....	119
6.2.1	Erfassung der Winkelpositionsabweichung des Drehtisches.....	119
6.2.2	Erfassung der Exzentrizitäten und des Axialhubs des Drehtisches	122
6.2.3	Analyse und Beurteilung der Drehtischgeometrieabweichungen.....	124
6.3	Eingangsparameter für die Aufspannung.....	125
6.4	Einfluss der Umgebungstemperaturen	126
6.4.1	Erfassung der Umgebungstemperaturen.....	126
6.4.2	Analyse und Diskussion des Temperatureinflusses.....	128
6.5	Einfluss des Scannings.....	129
6.5.1	Rotatorischer Scanningbeitrag	129
6.5.2	Translatorischer Scanning-Beitrag	130
6.5.3	Analyse und Abschätzung des Scanning-Einflusses	132
6.6	Erfassung der Eingangsparameter des Messkopfsystems	133
6.6.1	Tastkopfcharakteristik	133
6.6.2	Einfluss des Taststifts auf die Tastkopfcharakteristik	136
6.6.3	Interpretation der Ergebnisse	136
6.7	Berücksichtigung weiterer Einflussgrößen	138
6.7.1	Werkstücktemperatur.....	138
6.7.2	Oberflächenrauheit	138

7	Anwendung des VCMM-GEAR	139
7.1	Beurteilung der Messunsicherheitsermittlung mit dem VCMM-Gear.....	139
7.1.1	Messobjekte und Durchführung	139
7.1.2	Anmerkung zu den Eingangsparametern der Simulation	141
7.1.3	Ermittlung der Messunsicherheit mit dem VCMM-GEAR	142
7.1.4	Vergleich der simulierten und der experimentell ermittelten Messunsicherheiten	143
7.2	Abschätzung des Zeitbedarfs für die Anwendung des VCMM-GEAR	148
8	Zusammenfassung und Ausblick	151
	Literaturverzeichnis.....	155
	Normen, Richtlinien.....	155
	Fachveröffentlichungen, Bücher, Abschlussberichte.....	157
	Anhänge	i
	Formelzeichen.....	i
	Indizes	vii
	Vereinbarungen.....	vii
	Abkürzungsverzeichnis.....	viii
A.1	Aufspannung	ix
A.1.1	Aufspannkonfiguration 3: Aufspannung zwischen Spitzen (Spitze oben und unten fest)	ix
A.1.2	Aufspannkonfiguration 4: Aufspannung zwischen Spitzen (Spitze unten fest, oben mitdrehend)	x
A.1.3	Aufspannkonfiguration 5: Aufspannung zwischen Spitzen (Spitze unten mitdrehend, oben fest)	xi
A.1.4	Translationsvektor und Rotationsmatrix der fünf Konfigurationen	xii
A.2	Scanning.....	xiv
A.2.1	Messungen mit Drehtisch.....	xiv
A.2.2	Messungen ohne Drehtisch	xv
A.2.3	Technische Umsetzung.....	xvii
	Mathematische Vorarbeiten zur Berechnung des Scanning-Einflusses in der Unsicherheitsbilanz.....	xvii
	Softwaremodule	xix
	Eingangsparameter für das mathematische Modell im VCMM-GEAR.....	xix
A.3	Berechnung der Messunsicherheit.....	xx
A.3.1	Standardmessunsicherheit mit systematischen Unsicherheitsbeiträgen	xx
A.3.2	Realisierung der Messunsicherheitsermittlung und Stabilitätsprüfung	xxi
	Berechnung der Varianz und Prüfung der Stabilität	xxi
	Berechnung des Überdeckungsintervalls	xxi
A.3.3	Ausgabe der Messunsicherheiten und Festlegung des Stabilitätskriteriums	xxii
A.4	Datenfluss zwischen VCMM-GEAR und Messgerätesoftware.....	xxiv
A.5	Zufallszahlengeneratoren	xxv
A.5.1	Zufallszahlengeneratoren im VCMM-GEAR	xxv
A.5.2	Auswahl und Prüfung verschiedener Zufallszahlengeneratoren zur Anwendung im VCMM-GEAR	xxvi
A.5.3	Erzeugung von Zufallszahlen verschiedener Verteilungsfunktionen.....	xxvii
A.5.4	Zeitaufwand für die Zufallszahlenerzeugung.....	xxviii
