

## **Inhalt**

Abkürzungen und Formelzeichen.....	1
1 Einleitung und Überblick .....	5
1.1 Einleitung .....	5
1.2 Überblick .....	7
2 Stand der Technik.....	9
2.1 Das Koordinatenmessgerät .....	9
2.1.1 Aufbau und Funktion.....	9
2.1.2 Unsicherheitseinflüsse bei der Messung mit Koordinatenmessgeräten.....	10
2.1.2.1 Numerische Korrektur geometrischer Abweichungen .....	11
2.1.2.2 Numerische Korrektur von Antastabweichungen.....	12
2.1.3 Etablierte Verfahren zur Genauigkeitssteigerung von Koordinatenmessgeräten .	13
2.1.3.1 Substitutionsverfahren mit kalibrierten Messobjekten .....	13
2.1.3.2 Laser-Substitutionsverfahren .....	14
2.1.3.3 Fehlertrennverfahren durch Umschlag- bzw. Viellagenverfahren .....	15
2.2 Der Lasertracker .....	17
2.2.1 Aufbau und Funktion von Lasertrackern.....	17
2.2.2 Anwendungen von Lasertrackern mit Koordinatenmessgeräten .....	19
2.2.2.1 Kalibrierung großer Koordinatenmessgeräte .....	19
2.2.2.2 3D-Messsystem mit mehreren Lasertrackern.....	20
2.2.3 Unsicherheitseinflüsse bei der Längenmessung mit Lasertrackern.....	21
2.2.4 Weitere Lösungsansätze für Lasertracker.....	23
2.3 Zusammenfassung und Bewertung zum Stand der Technik.....	25
3 Additiv-Verfahren zur Genauigkeitssteigerung von Koordinatenmessgeräten.....	27
3.1 Prinzip .....	27
3.2 Mathematische Modellierung .....	28
3.3 Resultierende Messunsicherheit.....	32
4 Entwicklung des laserinterferometrischen Trackingsystems .....	37
4.1 Anforderungen aus der Aufgabenstellung .....	37
4.2 Funktionsprinzip.....	38
4.3 Das Laserinterferometer .....	41
4.3.1 Anforderungen .....	41
4.3.2 Aufbau und Wirkungsweise des Interferometers (Lösung) .....	43

4.4	Die Nachführeinrichtung um zwei Achsen .....	46
4.4.1	Anforderungen an die Mechanik.....	46
4.4.2	Anforderungen an die Antriebe.....	49
4.4.3	Aufbau und Wirkungsweise der Nachführeinrichtung (Lösung) .....	53
4.5	Gesamtkonstruktion und weitere messtechnische Komponenten .....	57
4.6	Positionsregelung.....	59
4.6.1	Auslegung des positionsempfindlichen Sensors .....	59
4.6.2	Beschreibung der Regelstrecke .....	60
4.7	Justage des Gesamtsystems.....	64
4.7.1	Justage der Drehachsen .....	64
4.7.1.1	Mathematische Beschreibung.....	66
4.7.1.2	Justierstrategie.....	67
4.7.2	Fokussierung des Messstrahls auf die Referenzkugeloberfläche.....	68
5	Analyse und Ermittlung der Längenmessunsicherheit.....	71
5.1	Einfluss des Laserinterferometers .....	72
5.1.1	Eingangsgröße Vakuumwellenlänge .....	73
5.1.2	Eingangsgröße Brechungsindex .....	73
5.1.3	Kombinierte Standardunsicherheit $u_c(l_{laser})$ .....	75
5.2	Einfluss der Referenzkugel .....	76
5.2.1	Eingangsgröße Formabweichung.....	76
5.2.2	Eingangsgröße Temperaturabweichung .....	77
5.2.3	Eingangsgröße Längenabweichung durch axiales Lagerspiel.....	77
5.2.4	Kombinierte Standardunsicherheit $u_c(\delta l_{ball})$ .....	77
5.3	Einfluss des Reflektors .....	78
5.3.1	Eingangsgröße Gesamtablenkung.....	78
5.3.2	Eingangsgröße Formabweichung.....	79
5.3.3	Kombinierte Standardunsicherheit $u_c(\delta l_{reflector})$ .....	79
5.4	Einfluss der Regelung.....	79
5.5	Unsicherheitsbudget .....	81
6	Integration des laserinterferometrischen Trackingsystems in das Koordinatenmessgerät .	85
6.1	Beschreibung der Schnittstellen .....	85
6.2	Rechnerische Erfassung und Auswertung der Messdaten.....	89

7	Messtechnische Vorbereitungen für das Additiv-Verfahren.....	93
7.1	Einmessung der Position des interferometrischen Trackingsystems .....	93
7.2	Einmessung des Tasters mit Reflektor .....	97
8	Anwendung des Additiv-Verfahrens.....	99
8.1	Formmessung an einem Ebenheitsnormal .....	99
8.1.1	Beschreibung der Messaufgabe.....	99
8.1.2	Messung bei optimaler Ausrichtung des interferometrischen Trackingsystems .	100
8.1.3	Einfluss der Ausrichtung des interferometrischen Trackingsystems.....	104
8.2	Profilmessung an einer Zahnradflanke .....	107
8.2.1	Beschreibung der Messaufgabe.....	107
8.2.2	Messablauf .....	108
8.2.3	Gegenüberstellung der Ergebnisse .....	109
9	Bewertung des Verfahrens .....	111
10	Zusammenfassung und Ausblick .....	113
10.1	Zusammenfassung.....	113
10.2	Ausblick.....	114
	Literatur .....	115
	Anhang A.....	121
	Anhang B.....	125
	Anhang C.....	135