

	Vorwort der Autoren	
	Warum haben wir dieses Buch geschrieben?	
1	Einleitung	
	Was ist die Kenntnis der Messunsicherheit wert?	1
2	Genauigkeitsangaben für KMG	5
2.1	Rückblick	5
2.1.1	Längenmessunsicherheit	5
2.1.2	Antastunsicherheit	6
2.2	Neue Genauigkeitskenngrößen: Angaben nach DIN EN ISO 10360	6
2.2.1	Ermittlung der Längenmessabweichung	6
2.2.2	Ermittlung der Antastabweichung für Einzelpunkte	7
2.2.3	Ermittlung der Antastabweichung für Scanning	8
2.2.4	Ermittlung der Antastabweichung für Mehrfachtaster	9
2.2.5	Ermittlung der Vierachsenabweichung von KMG mit Drehtisch	11
2.3	Geänderte Angaben in der Richtlinie VDI/VDE 2617 und der Normenreihe	14
2.4	Umgebungseinflüsse	15
2.4.1	Bodenschwingungen, Schall und Luftvibrationen	15
2.4.2	Temperatureinflüsse	16
2.4.3	Temperaturgradienten der KMG-Führungen	21
2.4.4	Temperaturgradienten innerhalb der KMG-Maßstäbe	23
2.4.5	Temperaturgradienten im Messobjekt	23
2.4.6	Lineare thermische Ausdehnung von Messobjekt und Maßstab	25
2.4.6.1	Temperaturmessung am Messobjekt	25
2.4.6.2	Temperaturmessung am Maßstab	26
2.4.6.3	Linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient α	26
3	KMG-Abweichungen von der Idealgeometrie	29
3.1	Führungsabweichungen des KMG	29
3.1.1	Prinzipielle Bewegungsmöglichkeiten (Freiheitsgrade) einer Führung	30
3.1.2	Bewegung des Portals beim Fahren in Y-Richtung	30
3.1.3	Bewegung des X-Schlittens am Portal	31
3.1.4	Bewegung der Z-Pinole im X-Schlitten	31
3.2	Abweichungen der Längenmesssysteme	32
3.3	Rechtwinkligkeitsabweichungen	32
3.3.1	Führungsabweichung und Winkelmessung	32

3.4	Rechnerische Korrektur der systematischen Geometrieabweichungen	34
3.4.1	Erfassung der Geometrieabweichungen mit Kugel- oder Lochplatten	35
3.4.2	Erfassung der Geometrieabweichungen mit dem Lasertracer	36
4	Auswirkungen der KMG-Abweichungen auf die Messergebnisse	39
4.1	Unterscheidung von Messelement und Prüfmerkmal	39
4.2	Einfluss der Komponentenabweichungen auf Messergebnisse	42
4.2.1	Auswirkung der Durchbiegung des Granittisches eines Portal-KMG	42
4.2.2	Auswirkung der rotatorischen Führungsabweichung der Traverse	45
4.2.3	Auswirkung der rotatorischen Führungsabweichung der Pinole	47
4.2.4	Auswirkung der Rechtwinkligkeitsabweichung zwischen zwei Achsen	50
4.2.5	Längendifferenz zweier Maßstäbe	51
5	Ein Werkzeug zur Ermittlung der Messunsicherheit – das „Virtuelle Koordinatenmessgerät“	53
5.1	Modell des Virtuellen KMG	53
5.2	Universelles KMG und kinematische Kette	55
5.3	Eingangsparameter	55
5.4	Erfassung der turnusmäßigen Eingangsparameter	56
5.4.1	Temperatureinflüsse	56
5.4.2	KMG-Geometrieabweichungen	57
5.4.3	Drift und Durchschnittsgeschwindigkeit	61
5.5	Erfassung der Eingangsparameter vor einer Messung	62
5.5.1	Tasteroffset	62
5.5.2	Tastercharakteristik	63
5.5.3	Thermischer Ausdehnungskoeffizient des Messobjekts	63
5.5.4	Rauheitskennwerte des Messobjekts	63
5.6	Der Kalibrierschein des KMG	65
5.7	Ausgabe der prüfmerkmalbezogenen Messunsicherheit	67
6	Messunsicherheit eines Prüfmerkmals	69
6.1	Messpunkte als Basis der Teilegeometrie und der Messunsicherheit	70
6.1.1	Glättungseffekt durch das Tastelement	71
6.1.2	Thermische Ausdehnung der Taster	71
6.1.3	Größe der Messbasis, beeinflusst durch Tastkugeldurchmesser	72
6.1.4	Abplattung an den Messpunkten	73
6.1.5	Ausgleichsverfahren: Gauß-, Hüll-, Pferch- und Minimelemente	75
6.1.6	Dokumentation der Koordinaten der Antastpunkte	76
6.1.7	Antaststrategie	77

6.2	Beispiele für die Beeinflussung der Messunsicherheit von Prüfmerkmalen	82
6.2.1	Messung der Koaxialität zweier Bohrungen einer Gelenkgabel	82
6.2.2	Messung der Koaxialität zweier extrem kurzer Zylinder mit großem Abstand	85
6.2.3	Einfluss der Lage des Werkstückes auf dem KMG	88
6.2.4	Beispiel eines Werkstückes mit zwei parallelen Achsen	90
7	Ein Prüfkörper zur Ermittlung der Messunsicherheit	93
7.1	Prüfprozesseignung	94
7.1.1	Experimentelle Ermittlung der Messunsicherheit	94
7.2	Universeller Prüfkörper für die Prüfprozesseignung	96
7.2.1	Ausführung des Prüfkörpers	98
7.2.2	Kalibrierung des Prüfkörpers	99
7.2.3	Mögliche Auswertungen von Prüfmerkmalen	100
7.3	Beispiel einer Unsicherheitsberechnung nach dem experimentellen Verfahren	103
7.4	Beispiele praktisch durchführbarer Messungen	106
7.4.1	Formabweichung eines Zylinders	106
7.4.2	Formabweichung einer Ebene	107
7.4.3	Zylinderformabweichung und Achsrichtung von Zylinder A	108
7.4.4	Positionsabweichungen	109
7.4.5	Parallelität und Symmetrie von Ebenen	110
7.4.6	Konzentrität von Kreisen	111
7.4.7	Koaxialität mit günstigem Verhältnis von Länge zu Abstand	112
7.4.8	Koaxialität mit ungünstigem Verhältnis von Länge zu Abstand	113
7.4.9	Koaxialität Kurzkegel und Zylinder (Ventilsitz)	115
7.4.10	Gesamtlänge L des Prüfkörpers	116
8	Prüfkörper zur Überprüfung der KMG-Geometrie genauer betrachtet	117
8.1	Eindimensionale Prüfkörper	118
8.1.1	Parallelendmaße	118
8.1.2	Stufenendmaße	119
8.1.3	Loch- und Kugelleisten	121
8.1.4	Kugelbalken	123
8.1.5	Kugelstäbe	124
8.2	Zweidimensionale Prüfkörper	125
8.2.1	Kugelplatten	125
8.2.2	Lochplatte aus Zerodur®	126
8.3	Dreidimensionale Prüfkörper	127
8.3.1	Tetraeder	128
8.3.2	Kugelquader	129

8.4	Eigenschaften von Prüfkörpern	130
8.5	Thermisches Verhalten von Prüfkörpern	132
8.5.1	Wie genau muss die Temperatur gemessen werden?	134
8.5.2	Wo soll die Temperatur gemessen werden?	136
8.5.3	Wie genau muss der Ausdehnungskoeffizient α bekannt sein?	137
9	Ausblick	141
10	Literaturverzeichnis	143
11	Begriffe, kurz erläutert	145
12	Sachregister	159