

I. Inhaltsverzeichnis

I. Inhaltsverzeichnis	I
II. Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	III
III. Formelzeichen	IX
1 Motivation, Methodisches Vorgehen und Aufbau der Arbeit	1
1.1 Methodisches Vorgehen	2
1.2 Formulierung der Forschungsfragen	3
1.3 Aufbau der Arbeit	4
1.4 Heuristischer Bezugsrahmen	6
1.5 Auswahl des Untersuchungsobjekts	7
2 Werkzeugmaschinen als Kern einer flexiblen Produktion	9
2.1 Werkzeugmaschinen und der Aufbau der seriellen Kinematik	9
2.1.1 Klassifizierung von Werkzeugmaschinen und Anforderungen an die Konstruktion	10
2.1.2 Eigenschaften serieller Kinematiken und die geometrischen Abweichungen	11
2.1.3 Messtechnische Erfassung der geometrischen Abweichungen bei Werkzeugmaschinen	15
2.1.4 Thermo-mechanische Einflüsse als Störgröße der idealisierten seriellen Bewegung	17
2.1.5 Steuerungsseitige Kompensation und Vernetzung von Werkzeugmaschinen	19
2.1.6 Taktile Messsysteme auf Werkzeugmaschinen	20
2.2 Mathematische Beschreibung serieller Kinematiken	21
2.2.1 Beschreibung mit homogenen Transformationsmatrizen (HTM)	21
2.2.2 Beschreibung mit dem Matrix Summation Approach (MSA-Modell)	26
2.3 Qualitätsprüfung und Information in einer industrialisierten Produktion	28
2.3.1 Serielle Kinematiken als metrologische Referenz	29
2.3.2 Werkzeugmaschinen als Sonderform von Koordinatenmessgeräten und vice versa	31
3 Messunsicherheitsbestimmung bei Koordinatenmessungen	35
3.1 Bedeutung der Rückführung und Annahmeprüfungen für Koordinatenmessgeräte	35
3.2 Bestimmung der aufgabenspezifischen Messunsicherheit bei Koordinatenmessungen	38
3.2.1 Messunsicherheitsbestimmung mithilfe materieller Normale	40
3.2.2 Messunsicherheitsbestimmung durch Simulation	41
3.2.3 Messunsicherheitsbilanz für Koordinatenmessungen	42
3.3 Zwischenfazit: Fertigungsintegrierte Messprozesse auf Werkzeugmaschinen als Sonderfall einer Koordinatenmessung	47
4 Modellbasierte Messunsicherheitsbestimmung für Geometriemessungen mit Werkzeugmaschinen	51
4.1 Aufbau eines Messsystems aus Werkzeugmaschine und Tastsystem	51
4.2 Quantifizierung der Einflüsse auf den Messprozess	52
4.2.1 Kenntnis der geometrischen Abweichungen als notwendige Bedingung für die Messunsicherheitsbestimmung	53
4.2.2 Temperatur als Einflussfaktor auf die Maschinengenauigkeit	55
4.2.3 Einfluss des Tastsystems und Messwertaufnahme	55
4.2.4 Bauteileigenschaften und Bauteilverhalten	56
4.3 Messunsicherheitsbestimmung für das Messsystem „Werkzeugmaschine“	58

4.3.1	Messunsicherheitsbestimmung mithilfe materieller Normale	58
4.3.2	Messunsicherheitsbestimmung mithilfe von Simulationsansätzen	59
4.3.3	Dynamische Messunsicherheitsbilanz für das Messsystem	60
4.3.4	Simulative Bestimmung der Längenmessabweichung für das Messsystem	65
4.3.5	Diskussion der Übertragbarkeit der Verfahren	71
4.4	Regelmäßige Überwachung des Messsystems	71
5	Validierung der Messunsicherheitsbestimmung an beispielhaften Messsystemen	75
5.1	Fallstudie Hermle C800U in der Produktionsumgebung	75
5.1.1	Aufbau des Messsystems und Untersuchung des Antastvorgangs	76
5.1.2	Bestimmung der Messunsicherheit mithilfe eines kalibrierten Bauteils	80
5.1.3	Bestimmung der Messunsicherheit durch adaptierte Simulation	82
5.1.4	Dynamische Berechnung der Messunsicherheitsbilanz	83
5.1.5	Diskussion des Einflusses der Maschinenkinematik	87
5.1.6	Weitergehende Diskussion und Bewertung des Erkenntnisgewinns	89
5.2	Fallstudie Hermle B300U in thermisch kontrollierbarer Umgebung	90
5.2.1	Aufbau des Messsystems	91
5.2.2	Referenzmessungen und Validierung der Modellierung für thermisch wechselnde Umgebungsbedingungen	93
5.2.3	Bestimmung der Messunsicherheit mithilfe eines kalibrierten Bauteils	98
5.2.4	Dynamische Berechnung mit Messunsicherheitsbilanz	103
5.3	Zwischenfazit zu den bisherigen Ergebnissen	107
6	Entwicklung eines Messverfahrens zur Überprüfung der Messsystemeignung	109
6.1	Aufbau des Messsystems und Funktionsprinzip der Messung	110
6.1.1	Erfassung der rotatorischen Abweichungen	114
6.1.2	Erfassung der Rechtwinkligkeitsabweichungen	117
6.1.3	Erfassung der translatorischen Abweichungen	117
6.2	Modellierung des Messsystems und Messunsicherheitsbetrachtung	120
6.2.1	Virtuelles Messgerät und Simulation des Messprozesses	120
6.2.2	Mathematische Betrachtung der Messunsicherheit des Verfahrens	127
6.3	Vergleichsmessungen an der Werkzeugmaschine	128
6.4	Kritische Reflexion und Erkenntnisgewinn	130
7	Zusammenfassung und Ausblick	133
7.1	Reflektion des Erkenntnisgewinns und der Forschungsmethodik	133
7.2	Ausblick und zukünftige Forschungsfragen	135
	Kurzfassung	137
	Abstract	138
	IV. Anhang	139
	V. Literaturverzeichnis	153
	VI. Eigene Veröffentlichungen	167