

# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen und Abkürzungen .....</b>	<b>XVIII</b>
<b>1 Ziele und Methoden zur Erfassung der Maschineneigenschaften .....</b>	<b>1</b>
1.1 Bedeutung der Maschinenbeurteilung und -abnahme.....	1
1.2 Anforderungen an die Messverfahren und Vorgehensweise bei der Durchführung .....	2
1.3 Direkte Erfassung der Maschineneigenschaften .....	5
1.4 Indirekte Erfassung der Maschineneigenschaften .....	7
1.5 Normen, Normungsgremien .....	8
<b>2 Messgeräte zur Erfassung von Maschineneigenschaften .....</b>	<b>11</b>
2.1 Geräte zur Messung von Wegen.....	11
2.1.1 Mechanische Wegmessgeräte.....	12
2.1.2 Potentiometer-Weggeber.....	14
2.1.3 Kapazitive Weggeber .....	15
2.1.4 Wirbelstrom-Weggeber.....	17
2.1.5 Induktive Weggeber .....	17
2.1.6 Optische Wegmessgeräte .....	21
2.1.6.1 Laser-Interferometer.....	21
2.1.6.2 Laser Tracker .....	29
2.1.6.3 Positionempfindliche Photodiode .....	32
2.1.6.4 Laser-Distanz-Sensor .....	34
2.1.6.5 Inkrementaler Linearmaßstab.....	34
2.2 Geräte zur Messung von Winkeln .....	36
2.2.1 Seismischer Drehschwingungsaufnehmer .....	36
2.2.2 Elektronische Neigungswaage .....	38
2.2.3 Optische Winkelgeber .....	39
2.2.3.1 Autokollimator .....	39
2.2.3.2 Inkrementaler Winkelschrittgeber.....	41
2.3 Geräte zur Messung von Geschwindigkeiten .....	42

2.3.1	Elektrodynamische Geber.....	42
2.4	Geräte zur Messung von Beschleunigungen.....	43
2.4.1	Geräte zur Messung von Linearbeschleunigungen.....	43
2.4.2	Einrichtung zur Messung von Drehbeschleunigungen.....	43
2.5	Geräte zur Messung von Kräften.....	45
2.5.1	Dehnungsmessstreifen (DMS) .....	45
2.5.2	Piezoquarze .....	49
2.6	Interferometrische Verfahren zur Verformungsanalyse .....	52
2.6.1	Holografie .....	52
2.6.1.1	Verfahren der holografischen Interferometrie.....	52
2.6.1.2	Messaufbau .....	53
2.6.1.3	Beispiel einer holografischen Messung.....	54
2.6.1.4	Verfahrensvarianten .....	56
2.6.1.5	Auswerteverfahren von Makrointerferenzmustern....	59
2.6.1.6	Verfahrensgrenzen .....	61
2.6.2	Speckleinterferometrie .....	62
2.6.2.1	Verfahren der Speckleinterferometrie .....	62
2.6.2.2	Messaufbau .....	65
2.6.2.3	Beispiel für eine Messung mit dem Speckleinterferometer .....	65
2.6.2.4	Verfahrensvarianten .....	67
2.6.2.5	Auswerteverfahren von Specklebildern .....	71
2.6.2.6	Verfahrensgrenzen .....	72
2.6.3	Vergleich holografischer Interferometrie und Speckleinterferometrie .....	72
2.7	Sensoren zur Messung von Temperaturen.....	73

## **DIREKTE MESSUNG UND BEURTEILUNG DER MASCHINENEIGENSCHAFTEN**

<b>3</b>	<b>Geometrisches und kinematisches Verhalten von Werkzeugmaschinen .....</b>	<b>77</b>
3.1	Geometrische Abweichungen.....	80
3.1.1	Allgemeine Beschreibung der systematischen Abweichungen 80	
3.1.1.1	Bewegung in einer Achse.....	80
3.1.1.2	Bewegung in mehreren Achsen.....	83
3.1.2	Allgemeine Beschreibung des statistischen Anteils der Abweichungen .....	87
3.1.3	Bestimmung der Werkstückmaßfehler aus den geometrischen Maschinenabweichungen .....	88
3.1.4	Linearisierte Beschreibung der statistischen Abweichungen ...	89

3.1.5	Messverfahren zur Ermittlung der geometrischen Maschineneigenschaften.....	93
3.1.5.1	Messprinzipien. Allgemeine Zusammenhänge, Begriffsdefinitionen .....	98
3.1.5.2	Messung der Tischgeradheit bzw. -ebenheit .....	101
3.1.5.2.1	Messverfahren mit Lineal und Wegaufnehmern.....	101
3.1.5.2.2	Messverfahren mit positionsempfindlicher Diode (PSD).....	102
3.1.5.2.3	Messverfahren mit Autokollimator .....	103
3.1.5.2.4	Messverfahren mit elektronischer Neigungswaage .....	104
3.1.5.2.5	Messverfahren mit Laser-Interferometer und Winkeloption.....	105
3.1.5.3	Messung der Geradlinigkeit der Bewegung .....	106
3.1.5.3.1	Messverfahren mit dem Laser-Interferometer und Geradheitsoption (Wollaston-Prisma) .....	109
3.1.5.4	Messung der Positionierabweichung.....	110
3.1.5.4.1	Messung mit dem Stufenendmaß .....	115
3.1.5.4.2	Messung mit dem Laser-Interferometer ..	116
3.1.5.4.3	Messung mit dem inkrementalen Vergleichsmaßstab .....	118
3.1.5.5	Messung der Winkelabweichungen linear bewegter Achsen .....	119
3.1.5.5.1	Messverfahren mit Lineal und Wegaufnehmern .....	120
3.1.5.5.2	Messverfahren mit positionsempfindlichen Photodioden.....	121
3.1.5.5.3	Messverfahren mit Autokollimator .....	121
3.1.5.5.4	Messverfahren mit elektronischer Neigungswaage .....	121
3.1.5.5.5	Messverfahren mit Laser-Interferometer und Winkeloption.....	122
3.1.5.6	Statistische Auswertung .....	123
3.1.5.7	Messung der Winkligkeit mehrerer Achsen zueinander .....	126
3.1.5.7.1	Messung mit verkörpertem Winkelnormal .....	127
3.1.5.7.2	Messverfahren mit dem Laser-Geradheitsmesssystem und Pentaprisma.....	127
3.1.5.7.3	Messverfahren mit Laser-Interferometer und Pentaprisma .....	128
3.1.5.8	Parallelitätsmessungen von Bewegungsachsen .....	129
3.1.5.9	Messung der Abweichungen rotatorischer Achsen ..	130
3.1.5.9.1	Grundlagen und Definitionen .....	131

3.1.5.9.2	Wiederholbarer und nichtwiederholbarer Rundlauffehler .....	136
3.1.5.9.3	Messung von Rundlaufabweichungen, der Axialruhe und des Planlaufes drehender Achsen nach DIN .....	137
3.1.5.9.4	Messung der Abweichung rotatorischer Achsen mittels Prüfkugel oder Prüfzylinder.....	138
3.1.5.9.5	Messungen mit Laser und positionsempfindlichen Photodioden.....	142
3.1.5.10	Auslehren des Arbeitsraumes mit einem angepassten Messnormal .....	149
3.2	Kinematische Abweichungen .....	152
3.2.1	Allgemeine Beschreibung .....	152
3.2.2	Messverfahren zur Ermittlung der kinematischen Maschineneigenschaften.....	152
3.2.2.1	Vorschubfehlermessung an einer Drehmaschine (rotatorisch-translatorische Bewegungen).....	152
3.2.2.2	Dreh- und Vorschubfehlermessung an einer Wälzfräsmaschine (rotatorisch-rotatorisch-translatorische Bewegungen) .....	155
3.2.2.3	Messung einer Zweiachsen-NC-Steuerung (translatorisch-translatorische Bewegungen) .....	158
3.2.2.4	Kreisformtest.....	159
<b>4</b>	<b>Statisches Verhalten von Werkzeugmaschinen</b> .....	163
4.1	Messtechnische Erfassung des Werkstückgewichtseinflusses.....	163
4.2	Messtechnische Erfassung des statischen Prozesslasteinflusses.....	165
4.3	Schwachstellenanalyse statisch belasteter Maschinenbauteile .....	168
4.4	Quasi-statische Last-Verformungsanalyse .....	170
4.5	Bestimmung statischer Verformungen mit Hilfe der Speckleinterferometrie .....	176
<b>5</b>	<b>Thermisches Verhalten von Werkzeugmaschinen</b> .....	179
5.1	Thermische Einflüsse auf Werkzeugmaschinen .....	179
5.2	Messtechnische Untersuchung des thermischen Verformungsverhaltens .....	181
5.2.1	Versuchsaufbau .....	181
5.2.2	Temperaturentwicklung und Verformungsverhalten an der Zerspanstelle durch innere Wärmequellen .....	184
5.2.3	Temperatur- und Verformungsverhalten aufgrund thermischer Umgebungseinflüsse .....	187

5.2.4	Messung von Strukturverformungen.....	190
5.2.5	Bestimmung des zeitlichen Wärmeflusses .....	192
<b>6</b>	<b>Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen .....</b>	<b>195</b>
6.1	Grundlagen des dynamischen Verhaltens.....	195
6.1.1	Bestimmung von Systemkennwerten aus Messungen des dynamischen Nachgiebigkeitsverhaltens.....	199
6.1.2	Schwingungsarten und -ursachen .....	201
6.2	Mess- und Auswerteverfahren für die experimentelle Modalanalyse	205
6.2.1	Digitale Signalverarbeitung.....	205
6.2.2	Fourier-Transformation .....	208
6.2.3	Ermittlung des Übertragungsverhaltens .....	215
6.2.4	Messung von Eigenschwingungsformen, Bestimmung der modalen Parameter, Curve-Fitting-Verfahren .....	222
6.2.5	Testsignal- und Erregerarten .....	235
6.2.5.1	Anregungsformen.....	235
6.2.5.2	Erregerarten.....	236
6.3	Dynamisches Maschinenverhalten bei der Zerspanung mit definierter Schneidengeometrie (Fräsen, Drehen, Bohren, Räumen usw.) .....	245
6.3.1	Regenerativeffekt für Prozesse mit stehenden Werkzeugen (Drehen) unter Berücksichtigung des gerichteten Nachgiebig- keitsverhaltens.....	245
6.3.2	Selbsterregte Schwingungen durch Lagekopplung .....	255
6.3.3	Simulation des Ratterverhaltens mit Hilfe der Nachgiebigkeits- matrix für beliebige Prozesse mit definierter Schneider.....	258
6.3.3.1	Modell des Ratterverhaltens spanender Werkzeug- maschinen für den allgemeinen Prozessanwen- dungsfall.....	258
6.3.3.1.1	Allgemeine Grundlagen .....	258
6.3.3.1.2	Simulation im Frequenzbereich bei konstanten Richtungsfaktoren .....	267
6.3.3.1.3	Simulation im Zeitbereich.....	278
6.3.3.2	Maß- und Formabweichungen beim Ausspindeln von Bohrungen durch das dynamische Nachgie- bigkeitsverhalten .....	290
6.3.3.2.1	Bohrungsmaß- und Bohrungsformabweichungen durch den Schnittkrafteinfluss.....	291
6.3.3.2.2	Bohrungsmaß- und Bohrungsformabweichungen durch Umwuchtkräfte.....	301
6.3.3.3	Messvorschrift zur Untersuchung spanender Werkzeugmaschinen .....	305
6.3.3.4	Stand der Technik .....	310
6.4	Dynamisches Maschinenverhalten bei der Zerspanung mit undefinierter Schneidengeometrie (Schleifen) .....	316

6.4.1	Beschreibung des Regenerativeffektes bei der Zerspanung mit undefinierter Schneidengeometrie.....	317
6.4.1.1	Systemnachgiebigkeitsverhalten Schleifmaschine-Schleifscheibe-Werkstück.....	318
6.4.1.2	Geometrie dynamischer Eingriffsverhältnisse beim Schleifen.....	320
6.4.1.3	Ermittlung der Übergangs- und Abhebefrequenz.....	324
6.4.1.4	Darstellung der Zeitspannungsvolumenänderung in der komplexen Ebene.....	327
6.4.1.5	Wellenbildung auf dem Werkstück.....	330
6.4.1.6	Grenzphasenkurve für werkstückseitiges Rattern ....	333
6.4.1.7	Wellenbildung auf der Schleifscheibe.....	337
6.4.1.8	Grenzphasenkurve für das schleifscheibenseitige Rattern.....	339
6.4.2	Möglichkeiten zur Erhöhung der Stabilität beim Schleifen.....	342
6.4.3	Stand der Technik von Schleifmaschinen .....	344
6.5	Einflussfaktoren auf das Ratterverhalten.....	348
6.6	Maßnahmen zur Verringerung der Ratterneigung.....	349
6.6.1	Aktive und passive Dämpfungssysteme.....	350
6.6.2	Verminderung des negativen Realteils.....	352
6.6.3	Werkzeuge mit ungleicher Teilung.....	356
<b>7</b>	<b>Messtechnische Erfassung des dynamischen Verhaltens von Vorschubantrieben .....</b>	<b>359</b>
7.1	Messtechnische Erfassung von Signalen der Antriebsregelkreise .....	360
7.2	Führungs- und Störungsverhalten.....	362
7.3	Frequenzgangmessung .....	363
7.3.1	Messung des Führungsfrequenzgangs.....	364
7.3.2	Messung des Störfrequenzgangs.....	365
7.3.2.1	Messung mit periodischen Signalen.....	365
7.3.2.2	Messung mit einem Kraftsprung.....	367
7.4	Erfassung nichtlinearer Einflüsse in Vorschubsystemen.....	368
7.4.1	Kleinste verfahrbare Schrittweite.....	368
7.4.2	Kreisformtest.....	369
<b>8</b>	<b>Geräuschverhalten von Werkzeugmaschinen .....</b>	<b>373</b>
8.1	Grundbegriffe der Akustik .....	374
8.1.1	Schallkennwerte .....	374
8.1.2	Spektrale Zusammensetzung des Schalls.....	377
8.2	Analyse und Bewertung von Geräuschen.....	378

8.2.1	Frequenzbewertung .....	378
8.2.2	Zeitbewertung .....	380
8.2.3	Beurteilung zeitlich schwankender Geräusche.....	381
8.3	Schallmesstechnik zur Ermittlung der Geräuschemissionen von Maschinen.....	383
8.3.1	Schalldruckmessung.....	384
8.3.2	Analysiermesstechnik.....	385
8.3.3	Geräuschemessungen nach DIN 45635.....	387
8.3.4	Geräuschemessungen nach dem Schallintensitätsmess- verfahren .....	391
8.4	Ortung von Schallanteilen und Rückschlüsse auf die Geräusch- anregung bei Maschinen.....	395
8.4.1	Rundummessung im Fernfeld .....	395
8.4.2	Rundummessung im Nahfeld .....	396
8.4.3	Messung des Körperschalls .....	397
8.4.4	Ermittlung von Schallanteilen .....	398
8.4.5	Schmalbandanalysen .....	399
8.4.6	Kohärenzanalysen .....	401
8.5	Beurteilung des Geräuschverhaltens von Werkzeugmaschinen .....	402
8.6	Gehörgerechte Geräuschbeurteilung .....	410
8.6.1	Mess- und Analysetechnik zur gehörgerechten Geräuschbeurteilung.....	412

## **INDIREKTE BEURTEILUNG DER MASCHINENEIGENSCHAFTEN DURCH BEARBEITUNGSTESTS**

<b>9</b>	<b>Ermittlung der Arbeitsgenauigkeit mit Prüfwerkstücken .....</b>	<b>413</b>
9.1	Werkstückmesstechnik .....	415
9.2	Abnahme- und Prüfwerkstücke .....	418
9.2.1	Prüfwerkstücke zur Ermittlung der Arbeits- und Positions- genauigkeit .....	419
9.2.2	Prüfwerkstücke zur Ermittlung maschinentypischer Fehler...	421
9.3	Fähigkeitsuntersuchungen zur Abnahme von Werkzeugmaschinen..	427
9.3.1	Vorgehensweise .....	427
9.3.2	Einflussfaktoren .....	431
9.3.3	Statistische Auswertung .....	435
9.3.4	Abnahmerichtlinie .....	441

<b>10 Beurteilung des statischen und dynamischen Verhaltens während der Bearbeitung</b> .....	445
10.1 Verfahren zur Bestimmung der Grenzspanleistung .....	445
10.2 Praktisches Beispiel für eine rationelle Vorgehensweise .....	448
<b>11 Zusammenfassung</b> .....	451
<b>Anhang</b> .....	453
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	459
<b>Sachverzeichnis</b> .....	469