

# Inhalt

Formelzeichen und Abkürzungen . . . . .	1
<b>1 Ziele und Methoden zur Erfassung der Maschinenkenngrößen . . . . .</b>	<b>11</b>
1.1 Bedeutung der Maschinenbeurteilung und -abnahme . . . . .	11
1.2 Direkte Erfassung der Maschineneigenschaften . . . . .	14
1.3 Indirekte Erfassung der Maschineneigenschaften . . . . .	15
1.4 Auslehren mit angepaßten Meßnormalen . . . . .	16
1.5 Normen, Normungsgremien . . . . .	16
1.6 Anforderungen an die Meßverfahren und Vorgehensweise . . . . .	18
<b>2 Meßgeräte zur Erfassung von Maschineneigenschaften . . . . .</b>	<b>21</b>
2.1 Geräte zur Messung von Wegen . . . . .	21
2.1.1 Mechanische Wegmeßgeräte . . . . .	22
2.1.2 Potentiometer-Weggeber . . . . .	24
2.1.3 Kapazitive Weggeber . . . . .	25
2.1.4 Wirbelstrom-Weggeber . . . . .	27
2.1.5 Induktive Weggeber . . . . .	28
2.1.6 Optische Wegmeßgeräte . . . . .	32
2.1.6.1 Laser-Interferometer . . . . .	32
2.1.6.2 Positionempfindliche Photodiode . . . . .	41
2.1.6.3 Laser-Distanz-Sensor . . . . .	43
2.1.6.4 Inkrementaler Linearmaßstab . . . . .	43
2.2 Geräte zur Messung von Winkeln . . . . .	46
2.2.1 Seismischer Drehschwingungsaufnehmer . . . . .	46
2.2.2 Elektronische Neigungswaage . . . . .	47
2.2.3 Optische Winkelgeber . . . . .	49
2.2.3.1 Autokollimator . . . . .	49
2.2.3.2 Inkrementaler Winkelschrittgeber . . . . .	50
2.3 Geräte zur Messung von Geschwindigkeiten . . . . .	51
2.3.1 Elektrodynamische Geber . . . . .	51
2.4 Geräte zur Messung von Beschleunigungen . . . . .	53
2.4.1 Geräte zur Messung von Linearbeschleunigungen . . . . .	53
2.4.2 Einrichtung zur Messung von Drehbeschleunigungen . . . . .	54
2.5 Geräte zur Messung von Kräften . . . . .	55
2.5.1 Dehnungsmeßstreifen (DMS) . . . . .	55
2.5.2 Piezoquarze . . . . .	59
2.6 Interferometrische Verfahren zur Verformungsanalyse . . . . .	62

2.6.1	Holografie . . . . .	62
2.6.1.1	Verfahren der holografischen Interferometrie . . . . .	62
2.6.1.2	Meßaufbau . . . . .	64
2.6.1.3	Beispiel . . . . .	65
2.6.1.4	Verfahrensvarianten . . . . .	66
2.6.1.5	Auswerteverfahren von Makrointerferenzmustern . . . . .	70
2.6.1.6	Verfahrensgrenzen . . . . .	73
2.6.2	Speckleinterferometrie . . . . .	74
2.6.2.1	Verfahren der Speckleinterferometrie . . . . .	74
2.6.2.2	Meßaufbau . . . . .	76
2.6.2.3	Beispiel . . . . .	77
2.6.2.4	Verfahrensvarianten . . . . .	78
2.6.2.5	Auswerteverfahren von Specklebildern . . . . .	83
2.6.2.6	Verfahrensgrenzen . . . . .	84
2.6.3	Vergleich holografischer Interferometrie und Speckleinterferometrie . . . . .	85
2.7	Sensoren zur Messung von Temperaturen . . . . .	86

**DIREKTE MESSUNG UND BEURTEILUNG DER MASCHINENEIGENSCHAFTEN**

<b>3</b>	<b>Geometrisches und kinematisches Verhalten von Werkzeugmaschinen . . . . .</b>	<b>89</b>
3.1	Geometrische Abweichungen . . . . .	92
3.1.1	Allgemeine Beschreibung der systematischen Abweichungen . . . . .	92
3.1.1.1	Bewegung in einer Achse . . . . .	92
3.1.1.2	Bewegung in mehreren Achsen . . . . .	96
3.1.2	Allgemeine Beschreibung des statistischen Anteils der Abweichungen . . . . .	100
3.1.3	Bestimmung der Werkstückmaßfehler aus den geometrischen Maschinenabweichungen . . . . .	101
3.1.4	Linearisierte Beschreibung der statistischen Abweichungen . . . . .	102
3.1.5	Meßverfahren zur Ermittlung der geometrischen Maschineneigenschaften . . . . .	106
3.1.5.1	Meßprinzipien. Allgemeine Zusammenhänge, Begriffsdefinitionen . . . . .	111
3.1.5.2	Messung der Tischgeradheit bzw. -ebenheit . . . . .	114
3.1.5.2.1	Meßverfahren mit Lineal und Wegaufnehmern . . . . .	114
3.1.5.2.2	Meßverfahren mit positionsempfindlicher Diode (PSD) . . . . .	116
3.1.5.2.3	Meßverfahren mit Autokollimator . . . . .	117

3.1.5.2.4	Meßverfahren mit elektronischer Neigungswaage . . . . .	119
3.1.5.2.5	Meßverfahren mit Laser-Interferometer und Winkeloption . . . . .	120
3.1.5.3	Messung der Geradlinigkeit der Bewegung . . . . .	121
3.1.5.3.1	Meßverfahren mit dem Laser-Interferometer und Geradheitsoption (Wollaston-Prisma) . . . . .	124
3.1.5.4	Messung der Positionierabweichung . . . . .	125
3.1.5.4.1	Messung mit dem Stufenendmaß . . . . .	127
3.1.5.4.2	Messung mit Laser-Interferometer . . . . .	129
3.1.5.4.3	Messung mit dem inkrementalen Vergleichsmaßstab . . . . .	130
3.1.5.4.4	Statistische Auswertung . . . . .	132
3.1.5.5	Messung der Winkelabweichungen linearer bewegter Achsen . . . . .	135
3.1.5.5.1	Meßverfahren mit Lineal und Wegaufnehmern . . . . .	136
3.1.5.5.2	Meßverfahren mit positionsempfindlichen Photodioden . . . . .	136
3.1.5.5.3	Meßverfahren mit Autokollimator . . . . .	137
3.1.5.5.4	Meßverfahren mit elektronischer Neigungswaage . . . . .	137
3.1.5.5.5	Meßverfahren mit Laser-Interferometer und Winkeloption . . . . .	138
3.1.5.6	Messung der Winkligkeit mehrerer Achsen zueinander . . . . .	139
3.1.5.6.1	Messung mit verkörpertem Winkelnormal . . . . .	140
3.1.5.6.2	Meßverfahren mit dem Laser-Geradheitsmeßsystem und Pentaprisma . . . . .	141
3.1.5.6.3	Meßverfahren mit Laser-Interferometer und Pentaprisma . . . . .	142
3.1.5.7	Parallelitätsmessungen von Bewegungsachsen . . . . .	143
3.1.5.8	Messung der Abweichung rotatorischer Achsen . . . . .	144
3.1.5.8.1	Grundlagen und Definitionen . . . . .	145
3.1.5.8.2	Messung von Rundlaufabweichungen, der Axialruhe und des Planlaufes drehender Achsen nach DIN . . . . .	151
3.1.5.8.3	Messung der Abweichung rotatorischer Achsen mittels Prüfkugel oder Prüfzylinder . . . . .	153
3.1.5.8.4	Messung mit Laser und positionsempfindlichen Photodioden . . . . .	157
3.1.5.9	Auslehren des Arbeitsraumes mit einem angepaßten Meßnormal . . . . .	164
3.2	Kinematische Abweichungen . . . . .	169
3.2.1	Allgemeine Beschreibung . . . . .	169
3.2.2	Meßverfahren zur Ermittlung der kinematischen Maschineneigenschaften . . . . .	169
3.2.2.1	Vorschubfehlermessung an einer Drehmaschine . . . . .	

	(rotatorisch-translatorische Bewegungen) . . . . .	170
3.2.2.2	Dreh- und Vorschubfehlermessung an einer Wälzfräsmaschine (rotatorisch-rotatorisch-translatorische Bewegungen) . . . . .	173
3.2.2.3	Messung einer Zweiachsen-NC-Steuerung (translatorisch-translatorische Bewegungen) . . . . .	176
<b>4</b>	<b>Statisches Verhalten von Werkzeugmaschinen</b> . . . . .	<b>178</b>
4.1	Meßtechnische Erfassung des Werkstückgewichtseinflusses . . . . .	178
4.2	Meßtechnische Erfassung des statischen Prozeßlasteinflusses . . . . .	181
4.3	Schwachstellenanalyse statisch belasteter Maschinenbauteile . . . . .	185
4.4	Quasi-statische Last-Verformungsanalyse . . . . .	186
4.5	Bestimmung statischer Verformungen von Linearführungssystemen mit dem Verfahren der Speckleinterferometrie . . . . .	193
<b>5</b>	<b>Thermisches Verhalten von Werkzeugmaschinen</b> . . . . .	<b>195</b>
5.1	Thermische Einflüsse auf Werkzeugmaschinen . . . . .	195
5.2	Meßtechnische Untersuchung des thermischen Verformungsverhaltens . . . . .	198
5.2.1	Versuchsaufbau . . . . .	198
5.2.2	Temperaturentwicklung und Verformungsverhalten an der Zerspanstelle durch innere Wärmequellen . . . . .	200
5.2.3	Temperatur- und Verformungsverhalten aufgrund thermischer Umgebungseinflüsse . . . . .	203
5.2.4	Messung von Strukturverformungen . . . . .	205
5.2.5	Bestimmung des zeitlichen Wärmeflusses . . . . .	208
<b>6</b>	<b>Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen</b> . . . . .	<b>211</b>
6.1	Grundlagen des dynamischen Verhaltens . . . . .	211
6.1.1	Bestimmung von Systemkennwerten aus Messungen des dynamischen Nachgiebigkeitsverhaltens . . . . .	215
6.1.2	Schwingungsarten und -ursachen . . . . .	217
6.2	Meß- und Auswerteverfahren für die experimentelle Modalanalyse . . . . .	223
6.2.1	Digitale Signalverarbeitung . . . . .	223
6.2.2	Fourier-Transformation . . . . .	226
6.2.3	Ermittlung des Übertragungsverhaltens . . . . .	234
6.2.4	Messung von Eigenschwingungsformern, Bestimmung der Modalen Parameter, Curve-Fitting-Verfahren . . . . .	244

	6.2.5 Testsignal- und Erregerarten . . . . .	258
	6.2.5.1 Anregungsformen . . . . .	259
	6.2.5.2 Erregerarten . . . . .	260
6.3	Dynamisches Maschinenverhalten bei der Zerspanung mit definierter Schneidengeometrie (Fräsen, Drehen, Bohren, Räumen, usw.) . . . . .	269
	6.3.1 Beschreibung des Regenerativeffektes . . . . .	269
	6.3.2 Selbsterregte Schwingungen durch Lagekopplung . . . . .	280
	6.3.3 Beurteilung des Nachgiebigkeitsverhaltens . . . . .	282
	6.3.3.1 Bearbeitungssimulation von Dreh- und Fräsoptionen . . . . .	282
	6.3.3.1.1 Simulation im Frequenzbereich . . . . .	282
	6.3.3.1.2 Simulation im Zeitbereich . . . . .	299
	6.3.3.2 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 . . . . .	321
	6.4.1.3 Ermittlung der Übergangs- und Abhebefrequenz . . . . .	325
	6.4.1.4 Darstellung der Zeitspannungsvolumenänderung in der komplexen Ebene . . . . .	328
	6.4.1.5 Wellenbildung auf dem Werkstück . . . . .	332
	6.4.1.6 Grenzphasenkurve für werkstückseitiges Rattern . . . . .	335
	6.4.1.7 Wellenbildung auf der Schleifscheibe . . . . .	339
	6.4.1.8 Grenzphasenkurve für das schleifscheibenseitige Rattern . . . . .	342
	6.4.2 Möglichkeiten zur Erhöhung der Stabilität beim Schleifen . . . . .	344
	6.4.3 Stand der Technik von Schleifmaschinen . . . . .	347
6.5	Einflußfaktoren auf das Ratterverhalten . . . . .	353
6.6	Maßnahmen zur Verringerung der Ratterneigung . . . . .	354
	6.6.1 Aktive und passive Dämpfungssysteme . . . . .	355
	6.6.2 Verminderung des negativen Realanteils . . . . .	356
	6.6.3 Werkzeuge mit ungleicher Teilung . . . . .	358
<b>7</b>	<b>Kinematisches und dynamisches Verhalten der Vorschubantriebe</b> . . . . .	<b>361</b>
7.1	Aufbau von Bahnsteuerungen . . . . .	361
7.2	Bahnfehler an Werkzeugmaschinen . . . . .	363
	7.2.1 Bahnfehler bei der Konturerzeugung . . . . .	363

7.2.2	Bahnfehler im Lageregelkreis . . . . .	363
7.3	Meßtechnische Erfassung des Verhaltens von Vorschubantrieben . . . . .	368
7.3.1	Ermittlung der größten und kleinsten Bahngeschwindigkeit . . . . .	369
7.3.2	Ermittlung der kleinsten Schrittweite . . . . .	371
7.3.3	Messung des Beschleunigungs- und Positionier- verhaltens . . . . .	372
7.3.4	Bestimmung der dynamischen Bahnabweichungen . . . . .	374
7.3.5	Der Kreisformtest . . . . .	379
7.3.6	Bestimmung des Übertragungsverhaltens von Lageregelkreisen . . . . .	382
7.3.7	Messung und Optimierung der Geschwindigkeitsverstärkung ( $K_v$ -Faktor) . . . . .	386
7.3.8	Einflüsse der mechanischen Übertragungssysteme . . . . .	390
7.4	Inbetriebnahme . . . . .	392
<b>8</b>	<b>Geräuschverhalten von Werkzeugmaschinen . . . . .</b>	<b>394</b>
8.1	Grundbegriffe der Akustik . . . . .	394
8.1.1	Schallkennwerte . . . . .	394
8.1.2	Spektrale Zusammensetzung des Schalls . . . . .	398
8.2	Analyse und Bewertung von Geräuschen . . . . .	400
8.2.1	Frequenzbewertung . . . . .	400
8.2.2	Zeitbewertung . . . . .	401
8.2.3	Beurteilung zeitlich schwankender Geräusche . . . . .	402
8.3	Schallmeßtechnik zur Ermittlung der Geräuschemission von Maschinen . . . . .	405
8.3.1	Schallpegelmessung . . . . .	405
8.3.2	Analysiermeßtechnik . . . . .	406
8.3.3	Geräuschmessungen nach DIN 45635 . . . . .	409
8.3.4	Geräuschmessungen nach dem Schallintensitäts- meßverfahren . . . . .	413
8.4	Ortung von Schallanteilen und Rückschlüsse auf die Geräuschregung bei Maschinen . . . . .	417
8.4.1	Rundummessung im Fernfeld . . . . .	418
8.4.2	Rundummessung im Nahfeld . . . . .	419
8.4.3	Messung des Körperschalls . . . . .	420
8.4.4	Ermittlung von Schallanteilen . . . . .	421
8.4.5	Schmalbandanalysen . . . . .	422
8.4.6	Kohärenzanalysen . . . . .	424
8.5	Beschreibung des Geräuschverhaltens von Werkzeugmaschinen . . . . .	426

## INDIREKTE MESSUNG DER BEURTEILUNGSMERKMALE DURCH BEARBEITUNGSTESTS

<b>9</b>	<b>Arbeitsgenauigkeit (Beurteilung der bearbeiteten Werkstücke) . . . . .</b>	<b>432</b>
9.1	Werkstückmeßtechnik . . . . .	433
9.2	Abnahme- und Prüfwerkstücke . . . . .	436
9.2.1	Prüfwerkstücke zur Ermittlung der Arbeits- und Positionsgenauigkeit . . . . .	437
9.2.2	Prüfwerkstücke zur Ermittlung maschinentypischer Fehler . . . . .	437
9.3	Maschinen- und Prozeßfähigkeit . . . . .	443
<b>10</b>	<b>Grenzspanleistung (Beurteilung des dynamischen Verhaltens während der Bearbeitung) . . . . .</b>	<b>455</b>
<b>11</b>	<b>Zusammenfassung . . . . .</b>	<b>459</b>
<b>12</b>	<b>Normen und Richtlinien . . . . .</b>	<b>460</b>
<b>13</b>	<b>Literatur . . . . .</b>	<b>465</b>
<b>14</b>	<b>Sachwortverzeichnis . . . . .</b>	<b>478</b>