

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen	XVII
1 Ziele und Methoden zur Erfassung der Maschineneigenschaften	1
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
2 Messgeräte zur Erfassung von Maschineneigenschaften	11
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 Positionsempfindliche 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	Piezokerze	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 Speckleinter- ferometer	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

3	Geometrisches und kinematisches Verhalten von Werkzeugmaschinen	77
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 Maschinen-eigenschaften.....	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 Weg-aufnehmern.....	101
3.1.5.2.2	Messverfahren mit positionsempfind-licher 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-Interfero-meter und Winkeloption	105
3.1.5.3	Messung der Geraidlinigkeit der Bewegung	106
3.1.5.3.1	Messverfahren mit dem Laser-Inter-ferometer und Geraidheitsoption (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 positionsempfind-lichen 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-Interfero-meter 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 Winkel-normal	127
3.1.5.7.2	Messverfahren mit dem Laser-Gerad-heitsmesssystem und Pentaprisma.....	127
3.1.5.7.3	Messverfahren mit Laser-Interfero-meter und Pentaprisma	128
3.1.5.8	Parallelitätstsmessungen von Bewegungssachsen	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 Rundlauf Fehler	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 positions-empfindlichen Photodioden.....	142
3.1.5.10	Ausleihen 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 Maschinen-eigenschaften.....	152
3.2.2.1	Vorschubfehlermessung an einer Drehmaschine (rotatorisch-translatorische Bewegungen).....	152
3.2.2.2	Dreh- und Vorschubfehlermessung an einer Wälz-fräsmaschine (rotatorisch-rotatorisch-translatorische Bewegungen)	155
3.2.2.3	Messung einer Zweiachsen-NC-Steuerung (translatorisch-translatorische Bewegungen)	158
3.2.2.4	Kreisformtest.....	159
4	Statisches Verhalten von Werkzeugmaschinen	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 Speckle-interferometrie	176
5	Thermisches Verhalten von Werkzeugmaschinen	179
5.1	Thermische Einflüsse auf Werkzeugmaschinen	179
5.2	Messtechnische Untersuchung des thermischen Verformungs-verhaltens	181
5.2.1	Versuchsaufbau	181
5.2.2	Temperaturrentwicklung 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
6	Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen	195
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	Regenerativer Effekt für Prozesse mit stehenden Werkzeugen (Drehen) unter Berücksichtigung des gerichteten Nachgiebigkeitsverhaltens.....	245
6.3.2	Selbsterregte Schwingungen durch Lagekopplung	255
6.3.3	Simulation des Ratterverhaltens mit Hilfe der Nachgiebigkeitsmatrix für beliebige Prozesse mit definierter Schneide.....	258
6.3.3.1	Modell des Ratterverhaltens spanender Werkzeugmaschinen für den allgemeinen Prozessanwendungsfall.....	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 Nachgiebigkeitsverhalten	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 Zeitspanungsvolumenänderung 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
7	Messtechnische Erfassung des dynamischen Verhaltens von Vorschubantrieben	359
7.1	Messtechnische Erfassung von Signalen der Antriebsregelkreise	360
7.2	Führungs- und Störungsverhalten.....	362
7.3	Frequenzgangmessung	363
7.3.1	Messung des Führungs frequenzgangs.....	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
8	Geräuschverhalten von Werkzeugmaschinen	373
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	Geräuschmessungen nach DIN 45635	387
8.3.4	Geräuschmessungen nach dem Schallintensitätsmessverfahren	391
8.4	Ortung von Schallanteilen und Rückschlüsse auf die Geräuschanregung 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

9	Ermittlung der Arbeitsgenauigkeit mit Prüfwerkstücken	413
9.1	Werkstückmesstechnik	415
9.2	Abnahme- und Prüfwerkstücke	418
9.2.1	Prüfwerkstücke zur Ermittlung der Arbeits- und Positionsgenauigkeit	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

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