

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen	XVIII
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.....	7
1.4 Indirekte Erfassung der Maschineneigenschaften	8
1.5 Normen, Normungsgremien	9
2 Messgeräte zur Erfassung von Maschineneigenschaften.....	12
2.1 Geräte zur Messung von Wegen.....	12
2.1.1 Mechanische Wegmessgeräte	13
2.1.2 Potentiometer-Weggeber	15
2.1.3 Kapazitive Weggeber.....	17
2.1.4 Wirbelstrom-Weggeber.....	18
2.1.5 Induktive Weggeber.....	19
2.1.6 Optische Wegmessgeräte	24
2.1.6.1 Laser-Interferometer.....	24
2.1.6.2 Positionsempfindliche Photodiode	32
2.1.6.3 Laser-Distanz-Sensor	34
2.1.6.4 Inkrementaler Linearmaßstab.....	35
2.2 Geräte zur Messung von Winkeln	37
2.2.1 Seismischer Drehschwingungsaufnehmer	37
2.2.2 Elektronische Neigungswaage	39
2.2.3 Optische Winkelgeber.....	40

2.2.3.1 Autokollimator	40
2.2.3.2 Inkrementaler Winkelschrittgeber	42
2.3 Geräte zur Messung von Geschwindigkeiten	43
2.3.1 Elektrodynamische Geber	43
2.4 Geräte zur Messung von Beschleunigungen.....	45
2.4.1 Geräte zur Messung von Linearbeschleunigungen	45
2.4.2 Einrichtung zur Messung von Drehbeschleunigungen.....	46
2.5 Geräte zur Messung von Kräften	48
2.5.1 Dehnungsmessstreifen (DMS)	48
2.5.2 Piezoquarze	51
2.6 Interferometrische Verfahren zur Verformungsanalyse.....	55
2.6.1 Holografie	55
2.6.1.1 Verfahren der holografischen Interferometrie	55
2.6.1.2 Messaufbau	57
2.6.1.3 Beispiel.....	58
2.6.1.4 Verfahrensvarianten	59
2.6.1.5 Auswerteverfahren von Makrointerferenzmustern.....	64
2.6.1.6 Verfahrensgrenzen	66
2.6.2 Speckleinterferometrie	68
2.6.2.1 Verfahren der Speckleinterferometrie	68
2.6.2.2 Messaufbau	70
2.6.2.3 Beispiel.....	71
2.6.2.4 Verfahrensvarianten	73
2.6.2.5 Auswerteverfahren von Specklebildern	77
2.6.2.6 Verfahrensgrenzen	78
2.6.3 Vergleich holografischer Interferometrie und Speckleinterferometrie	79
2.7 Sensoren zur Messung von Temperaturen.....	80

DIREKTE MESSUNG UND BEURTEILUNG DER MASCHINENEIGENSCHAFTEN

3 Geometrisches und kinematisches Verhalten von Werkzeugmaschinen	83
3.1 Geometrische Abweichungen	86
3.1.1 Allgemeine Beschreibung der systematischen Abweichungen	86
3.1.1.1 Bewegung in einer Achse.....	86

3.1.1.2	Bewegung in mehreren Achsen.....	90
3.1.2	Allgemeine Beschreibung des statistischen Anteils der Abweichungen	94
3.1.3	Bestimmung der Werkstückmaßfehler aus den geometrischen Maschinenabweichungen.....	95
3.1.4	Linearisierte Beschreibung der statistischen Abweichungen	97
3.1.5	Messverfahren zur Ermittlung der geometrischen Maschineneigenschaften	101
3.1.5.1	Messprinzipien. Allgemeine Zusammenhänge, Begriffsdefinitionen	106
3.1.5.2	Messung der Tischgeradheit bzw. -ebenheit	110
3.1.5.2.1	Messverfahren mit Lineal und Wegaufnehmern	110
3.1.5.2.2	Messverfahren mit positionsempfindlicher Diode (PSD)	111
3.1.5.2.3	Messverfahren mit Autokollimator.....	112
3.1.5.2.4	Messverfahren mit elektronischer Neigungswaage	114
3.1.5.2.5	Messverfahren mit Laser-Interferometer und Winkeloption	115
3.1.5.3	Messung der Geraelinigkeit der Bewegung	116
3.1.5.3.1	Messverfahren mit dem Laser-Interferometer und Geradheitsoption (Wollaston-Prisma)	119
3.1.5.4	Messung der Positionierabweichung.....	121
3.1.5.4.1	Messung mit dem Stufenendmaß.....	126
3.1.5.4.2	Messung mit dem Laser-Interferometer	128
3.1.5.4.3	Messung mit dem inkrementalen Vergleichsmaßstab ...	130
3.1.5.5	Messung der Winkelabweichungen linear bewegter Achsen.....	131
3.1.5.5.1	Messverfahren mit Lineal und Wegaufnehmern	132
3.1.5.5.2	Messverfahren mit positionsempfindlichen Photodioden.....	133
3.1.5.5.3	Messverfahren mit Autokollimator.....	133
3.1.5.5.4	Messverfahren mit elektronischer Neigungswaage	134
3.1.5.5.5	Messverfahren mit Laser-Interferometer und Winkeloption	135
3.1.5.6	Statistische Auswertung	136
3.1.5.7	Messung der Winkligkeit mehrerer Achsen zueinander...	138
3.1.5.7.1	Messung mit verkörpertem Winkelnormal	139
3.1.5.7.2	Messverfahren mit dem Laser-Geradheitsmesssystem und Pentaprisma	140
3.1.5.7.3	Messverfahren mit Laser-Interferometer und Pentaprisma	141

3.1.5.8 Parallelitätstsmessungen von Bewegungssachsen	142
3.1.5.9 Messung der Abweichungen rotatorischer Achsen	144
3.1.5.9.1 Grundlagen und Definitionen	144
3.1.5.9.2 Wiederholbarer und nichtwiederholbarer Rundlauffehler	150
3.1.5.9.3 Messung von Rundlaufabweichungen, der Axialruhe und des Planlaufes drehender Achsen nach DIN	151
3.1.5.9.4 Messung der Abweichung rotatorischer Achsen mittels Prüfkugel oder Prüfzylinder	153
3.1.5.9.5 Messungen mit Laser und positionsempfindlichen Photodioden	157
3.1.5.10 Ausleihen des Arbeitsraumes mit einem angepassten Messnormal	164
3.2 Kinematische Abweichungen	167
3.2.1 Allgemeine Beschreibung	167
3.2.2 Messverfahren zur Ermittlung der kinematischen Maschineneigenschaften	168
3.2.2.1 Vorschubfehlermessung an einer Drehmaschine (rotatorisch-translatorische Bewegungen)	168
3.2.2.2 Dreh- und Vorschubfehlermessung an einer Wälzfräsmaschine (rotatorisch-rotatorisch-translatorische Bewegungen)	171
3.2.2.3 Messung einer Zweiachsen-NC-Steuerung (translatorisch-translatorische Bewegungen)	174
3.2.2.4 Kreisformtest	175
4 Statisches Verhalten von Werkzeugmaschinen	180
4.1 Messtechnische Erfassung des Werkstückgewichtseinflusses	180
4.2 Messtechnische Erfassung des statischen Prozesslasteinflusses	183
4.3 Schwachstellenanalyse statisch belasteter Maschinenbauteile	187
4.4 Quasi-statische Last-Verformungsanalyse	188
4.5 Bestimmung statischer Verformungen mit Hilfe der Speckleinterferometrie	195
5 Thermisches Verhalten von Werkzeugmaschinen	197
5.1 Thermische Einflüsse auf Werkzeugmaschinen	197
5.2 Messtechnische Untersuchung des thermischen Verformungsverhaltens	200

5.2.1	Versuchsaufbau.....	200
5.2.2	Temperaturrentwicklung und Verformungsverhalten an der Zerspanstelle durch innere Wärmequellen.....	202
5.2.3	Temperatur- und Verformungsverhalten aufgrund thermischer Umgebungseinflüsse	206
5.2.4	Messung von Strukturverformungen.....	210
5.2.5	Bestimmung des zeitlichen Wärmeflusses.....	213
6	Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen	216
6.1	Grundlagen des dynamischen Verhaltens	217
6.1.1	Bestimmung von Systemkennwerten aus Messungen des dynamischen Nachgiebigkeitsverhaltens	220
6.1.2	Schwingungsarten und -ursachen.....	222
6.2	Mess- und Auswerteverfahren für die experimentelle Modalanalyse	228
6.2.1	Digitale Signalverarbeitung	228
6.2.2	Fourier-Transformation.....	231
6.2.3	Ermittlung des Übertragungsverhaltens	239
6.2.4	Messung von Eigenschwingungsformen, Bestimmung der modalen Parameter, Curve-Fitting-Verfahren	247
6.2.5	Testsignal- und Erregerarten.....	261
6.2.5.1	Anregungsformen.....	261
6.2.5.2	Erregerarten.....	263
6.3	Dynamisches Maschinenverhalten bei der Zerspanung mit definierter Schneidengeometrie (Fräsen, Drehen, Bohren, Räumen usw.)	272
6.3.1	Beschreibung des Regenerativen Effektes	272
6.3.2	Selbsterregte Schwingungen durch Lagekopplung	283
6.3.3	Beurteilung des Nachgiebigkeitsverhaltens	287
6.3.3.1	Bearbeitungssimulation von Dreh- und Fräsoperationen	287
6.3.3.1.1	Simulation im Frequenzbereich.....	287
6.3.3.1.2	Simulation im Zeitbereich	302
6.3.3.2	Messvorschrift zur Untersuchung spanender Werkzeugmaschinen	315
6.3.3.3	Stand der Technik.....	320
6.4	Dynamisches Maschinenverhalten bei der Zerspanung mit undefinierter Schneidengeometrie (Schleifen)	326
6.4.1	Beschreibung des Regenerativen Effektes bei der Zerspanung mit undefinierter Schneidengeometrie	327

6.4.1.1	Systemnachgiebigkeitsverhalten Schleifmaschine-Schleifscheibe-Werkstück	328
6.4.1.2	Geometrie dynamischer Eingriffsverhältnisse beim Schleifen.....	331
6.4.1.3	Ermittlung der Übergangs- und Abhebefrequenz.....	335
6.4.1.4	Darstellung der Zeitspannungsvolumenänderung in der komplexen Ebene	338
6.4.1.5	Wellenbildung auf dem Werkstück	342
6.4.1.6	Grenzphasenkurve für werkstückseitiges Rattern	345
6.4.1.7	Wellenbildung auf der Schleifscheibe.....	349
6.4.1.8	Grenzphasenkurve für das schleifscheibenseitige Rattern	352
6.4.2	Möglichkeiten zur Erhöhung der Stabilität beim Schleifen	355
6.4.3	Stand der Technik von Schleifmaschinen	358
6.5	Einflussfaktoren auf das Ratterverhalten	362
6.6	Maßnahmen zur Verringerung der Ratterneigung	363
6.6.1	Aktive und passive Dämpfungssysteme.....	364
6.6.2	Verminderung des negativen Realteils.....	366
6.6.3	Werkzeuge mit ungleicher Teilung	370
7	Messtechnische Erfassung des dynamischen Verhaltens von Vorschubantrieben	373
7.1	Messtechnische Erfassung von Signalen der Antriebsregelkreise	374
7.2	Führungs- und Störungsverhalten	376
7.3	Frequenzgangmessung.....	378
7.3.1	Messung des Führungs frequenzgangs.....	379
7.3.2	Messung des Stör frequenzgangs	380
7.3.2.1	Messung mit periodischen Signalen.....	380
7.3.2.2	Messung mit einem Kraftsprung	382
7.4	Erfassung nichtlinearer Einflüsse in Vorschubsystemen	384
7.4.1	Kleinste verfahrbare Schrittweite	384
7.4.2	Kreisformtest.....	385
8	Geräuschverhalten von Werkzeugmaschinen	388
8.1	Grundbegriffe der Akustik.....	389
8.1.1	Schallkennwerte	389

8.1.2 Spektrale Zusammensetzung des Schalls	392
8.2 Analyse und Bewertung von Geräuschen	395
8.2.1 Frequenzbewertung	395
8.2.2 Zeitbewertung	396
8.2.3 Beurteilung zeitlich schwankender Geräusche	397
8.3 Schallmesstechnik zur Ermittlung der Geräuschemissionen von Maschinen	400
8.3.1 Schalldruckmessung	400
8.3.2 Analysiermesstechnik	402
8.3.3 Geräuschmessungen nach DIN 45635	404
8.3.4 Geräuschmessungen nach dem Schallintensitätsmessverfahren	408
8.4 Ortung von Schallanteilen und Rückschlüsse auf die Geräuschanregung bei Maschinen	413
8.4.1 Rundummessung im Fernfeld	413
8.4.2 Rundummessung im Nahfeld	414
8.4.3 Messung des Körperschalls	415
8.4.4 Ermittlung von Schallanteilen	416
8.4.5 Schmalbandanalysen	418
8.4.6 Kohärenzanalysen	420
8.5 Beurteilung des Geräuschverhaltens von Werkzeugmaschinen	422
8.6 Gehörgerechte Geräuschbeurteilung	431
8.6.1 Mess- und Analysetechnik zur gehörgerechten Geräuschbeurteilung	432

INDIREKTE BEURTEILUNG DER MASCHINENEIGENSCHAFTEN DURCH BEARBEITUNGSTESTS

9 Ermittlung der Arbeitsgenauigkeit mit Prüfwerkstücken	434
9.1 Werkstückmesstechnik	436
9.2 Abnahme- und Prüfwerkstücke	440
9.2.1 Prüfwerkstücke zur Ermittlung der Arbeits- und Positionsgenauigkeit	440
9.2.2 Prüfwerkstücke zur Ermittlung maschinentypischer Fehler	442

9.3 Fähigkeitsuntersuchungen zur Abnahme von Werkzeugmaschinen.....	449
9.3.1 Vorgehensweise	449
9.3.2 Einflussfaktoren	454
9.3.3 Statistische Auswertung.....	459
9.3.4 Abnahmerichtlinie.....	465
10 Beurteilung des statischen und dynamischen Verhaltens während der Bearbeitung.....	469
10.1 Verfahren zur Bestimmung der Grenzspanleistung	469
10.2 Praktisches Beispiel für eine rationelle Vorgehensweise	472
11 Zusammenfassung.....	476
12 Anhang	477
13 Literaturverzeichnis	483
14 Sachverzeichnis	493