

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 Geradlinigkeit 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 | Parallelitätsmessungen von Bewegungsachsen | 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 | Auslehren 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 | Temperaturentwicklung 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 Wärmeffusses..... | 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 Regenerativeffektes | 272 |
| 6.3.2 | Selbsterregte Schwingungen durch Lagekopplung..... | 283 |
| 6.3.3 | Beurteilung des Nachgiebigkeitsverhaltens | 287 |
| 6.3.3.1 | Bearbeitungssimulation von Dreh- und Fräsoptionen | 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 Regenerativeffektes 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 Führungsfrequenzgangs..... | 379 |
| 7.3.2 | Messung des Störfrequenzgangs..... | 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 |