

## Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>11</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>17</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>19</b>
<b>Formelzeichenverzeichnis</b>	<b>21</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>27</b>
<b>2 Stand der Erkenntnisse</b>	<b>29</b>
2.1 Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen . . . . .	29
2.1.1 Überblick und Einordnung . . . . .	29
2.1.2 Beschreibungsformen dynamischer Systeme . . . . .	32
2.1.3 Methoden zur strukturbeschreibenden, experimentellen Ermittlung von Schwingungskenngrößen . . . . .	42
2.2 Grundlegende Aspekte der Betriebsmodalanalyse . . . . .	45
2.2.1 Konzept und Annahmen der OMA . . . . .	45
2.2.2 Stochastische Kenngrößen und Modellierungen . . . . .	47
2.2.3 Messdatenaufnahme und Signalverarbeitung . . . . .	51
2.2.4 Identifikationsmethoden der Betriebsmodalanalyse . . . . .	53
2.3 Herausforderungen bei Durchführung der Betriebsmodalanalyse an Werkzeugmaschinen . . . . .	59
2.3.1 Zeitvarianz im Arbeitsraum . . . . .	59
2.3.2 Anregung von Werkzeugmaschinen durch den Zerspanprozess . . . . .	61
2.3.3 Bestimmung modaler Parameter bei Anregung durch den Zerspanprozess . . . . .	63
<b>3 Motivation, Forschungsfragen und Aufbau der Arbeit</b>	<b>67</b>
3.1 Motivation . . . . .	67
3.2 Forschungsfragen und -hypothesen . . . . .	67
3.3 Struktur der Arbeit . . . . .	69
<b>4 Zeitvarianz im Arbeitsraum</b>	<b>73</b>
4.1 Inhalt des Kapitels . . . . .	73
4.2 Veränderungen des dynamischen Verhaltens im Arbeitsraum . . . . .	73
4.2.1 Beschreibung durch Änderungen innerhalb der Nachgiebighäufigsfrequenzgänge . . . . .	73
4.2.2 Vergleichende Beurteilung von Frequenzgängen aus Impulshammeranregung mit Hilfe des Frequency Response Assurance Criterion (FRAC) . . . . .	77

4.2.3 Anwendung des Frequency Response Assurance Criterion (FRAC) auf Beschleunigungsantworten resultierend aus Verfahrbewegungen . . . . .	84
4.3 Schlussfolgerungen für die Auslegung einer zeitinvarianten Werkzeugbahn . . . . .	90
<b>5 Gestaltung einer analysegerechten Anregung durch den Zerspanprozess</b> . . . . .	<b>93</b>
5.1 Inhalt des Kapitels . . . . .	93
5.2 Berechnung der Zerspankräfte beim Fräsen . . . . .	94
5.2.1 Einflussgrößen auf die Spankraft . . . . .	94
5.2.2 Beschreibung mittels empirischen Modells . . . . .	97
5.3 Parameteridentifikation zur Modellierung der Zerspankräfte in einem Simulationsmodell . . . . .	101
5.3.1 Vorgehensweise . . . . .	101
5.3.2 Strukturparameter . . . . .	102
5.3.3 Prozessparameter und Geometrieparameter . . . . .	104
5.4 Simulative Parameterstudien zur Beeinflussung des Schnittkraftspektrums durch Modulation technologischer Parameter . . . . .	109
5.4.1 Modulation durch die Drehzahl . . . . .	110
5.4.2 Modulation durch das Werkstück . . . . .	115
5.4.3 Fazit zu den simulativen Untersuchungen . . . . .	117
5.5 Experimentelle Parameterstudien zur Beeinflussung des Schnittkraftspektrums durch Modulation technologischer Parameter . . . . .	118
5.5.1 Versuchsaufbau und Vorgehensweise . . . . .	118
5.5.2 Ausgangszustand ohne Modulation . . . . .	120
5.5.3 Modulation durch die Drehzahl . . . . .	122
5.5.4 Modulation durch das Werkstück . . . . .	131
5.5.5 Modulation durch das Werkzeug . . . . .	134
5.5.6 Betrachtung der Beobachtungszeit . . . . .	138
5.6 Schlussfolgerungen für eine analysegerechte Anregung . . . . .	140
<b>6 Charakteristika der Identifikationsmethoden</b> . . . . .	<b>141</b>
6.1 Inhalt des Kapitels . . . . .	141
6.2 Experimentelle Modalanalyse – Vergleichsgrundlage . . . . .	143
6.2.1 Durchführung . . . . .	143
6.2.2 Auswertung . . . . .	144
6.3 Pseudobetriebsmodalanalyse (Pseudo-OMA) durch Shaker-Anregung . . . . .	148
6.3.1 Diskretisierung und Durchführung . . . . .	148
6.3.2 Identifikation der modalen Parameter . . . . .	149
6.3.3 Diskussion der modalen Parameter – Vergleich zwischen Pseudo-OMA und EMA . . . . .	155
6.4 Betriebsmodalanalyse durch Prozessanregung . . . . .	157
6.4.1 Diskretisierung und Durchführung . . . . .	157
6.4.2 Identifikation der modalen Parameter . . . . .	163

---

6.4.3 Vergleich zwischen Pseudo-OMA und Prozess-OMA . . . . .	172
6.4.4 Vergleich zwischen EMA und Prozess-OMA . . . . .	174
6.5 Schlussfolgerungen hinsichtlich Identifikationsmethoden der OMA an WZM im Prozess . . . . .	180
<b>7 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>183</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>187</b>
<b>A Definitionen, Berechnungsverfahren und Identifikationsmethoden</b>	<b>205</b>
A.1 Grundbegriffe der Signaltheorie . . . . .	205
A.2 Zufallsprozess, Stationarität und Ergodizität . . . . .	205
A.3 Leistungsdichtespektren . . . . .	207
A.4 Kalman Filter . . . . .	209
A.5 Aufnahmezeit und Abtastung . . . . .	210
A.6 Kurtosis . . . . .	211
A.7 Singulärwertzerlegung (SVD) . . . . .	212
A.8 Identifikationsverfahren . . . . .	212
A.8.1 Basic Frequency Domain Method . . . . .	212
A.8.2 Frequency Domain Decomposition . . . . .	213
A.8.3 Enhanced Frequency Domain Decomposition . . . . .	214
A.8.4 Curve-Fit Frequency Domain Decomposition . . . . .	215
A.8.5 Poly-Reference Least Squares Complex Frequency (p-LSCF) . . . . .	216
A.8.6 Ibrahim Time Domain (ITD) . . . . .	217
A.8.7 Least Squares Complex Exponential (LSCE) . . . . .	218
A.8.8 ARMA Modelle . . . . .	220
A.8.9 Kovarianz gesteuerte SSI-Methoden (Cov-SSI) . . . . .	221
A.8.10 Daten-basierende SSI-Methoden (DD-SSI) . . . . .	225
A.8.11 Bestimmung modaler Parameter aus der Systemmatrix <b>A</b> . . . . .	229
A.9 Methode der kleinsten Fehlerquadrate . . . . .	229
<b>B Analysegerechte Anregung</b>	<b>231</b>
B.1 Strukturparameter des Schnittkraftmodells . . . . .	231
B.2 Schnittkraftversuche . . . . .	232
B.2.1 Drehzahlmodulation . . . . .	232
B.2.2 Modifikation des Werkstücks . . . . .	235
<b>C Identifikation modaler Parameter mittels EMA, OMA, Pseudo-OMA</b>	<b>237</b>
C.1 Stationarität der Antwortmessung bei sinusförmiger Anregung . . . . .	237
C.2 SVD-Zerlegung bei Pseudo-OMA und OMA . . . . .	238
C.3 Modale Parameter bei Prozess-OMA mit Sinus-Anregung . . . . .	239
C.3.1 Modale Parameter Frequenzbereichsmethoden . . . . .	239
C.3.2 Modale Parameter Zeitbereichsmethoden . . . . .	240

C.4 Vergleich der Anregungsarten sinusförmig und zufällig bei Prozess-OMA . . . . .	242
C.5 Vergleich EMA und Pseudo-OMA . . . . .	243
C.6 Vergleich Pseudo-OMA und OMA (Prozess) . . . . .	245
C.7 Vergleich EMA und Prozess-OMA . . . . .	247