

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	11
Tabellenverzeichnis	17
Abkürzungsverzeichnis	19
Formelzeichenverzeichnis	21
1 Einleitung	27
2 Stand der Erkenntnisse	29
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
3 Motivation, Forschungsfragen und Aufbau der Arbeit	67
3.1 Motivation	67
3.2 Forschungsfragen und -hypothesen	67
3.3 Struktur der Arbeit	69
4 Zeitvarianz im Arbeitsraum	73
4.1 Inhalt des Kapitels	73
4.2 Veränderungen des dynamischen Verhaltens im Arbeitsraum	73
4.2.1 Beschreibung durch Änderungen innerhalb der Nachgiebigkeitsfrequenzgänge	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
5	Gestaltung einer analysegerechten Anregung durch den Zerspanprozess	93
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
6	Charakteristika der Identifikationsmethoden	141
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
7 Zusammenfassung und Ausblick	183
Literaturverzeichnis	187
A Definitionen, Berechnungsverfahren und Identifikationsmethoden	205
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 A	229
A.9 Methode der kleinsten Fehlerquadrate	229
B Analysegerechte Anregung	231
B.1 Strukturparameter des Schnittkraftmodells	231
B.2 Schnittkraftversuche	232
B.2.1 Drehzahlmodulation	232
B.2.2 Modifikation des Werkstücks	235
C Identifikation modaler Parameter mittels EMA, OMA, Pseudo-OMA	237
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