

Inhaltsverzeichnis

0	Formel- und Kurzzeichen	iii
1	Einleitung	1
2	Stand der Technik und Grundlagen.....	3
2.1	Entwicklungsphasen der Werkzeugmaschine bis zur Abnahme	3
2.2	Numerische Methoden zur Verhaltensanalyse von Werkzeugmaschinen.....	5
2.2.1	Finite-Elemente-Methode	6
2.2.2	Mehrkörpersimulation	7
2.2.3	Digitale Blocksimulation.....	7
2.2.4	Überblick über gekoppelte Simulationsverfahren	7
2.3	Numerische Modellierung von Werkzeugmaschinen und deren Komponenten	8
2.3.1	Dämpfung und deren Eigenschaften	14
2.3.2	Werkzeugmaschine als mechatronisches System	16
2.3.3	Modellierung von Relativbewegungen	18
2.4	Mathematische Grundlagen	20
2.4.1	Grundgleichungen zur Systembeschreibung	20
2.4.2	Systemtheorie	24
2.4.3	Stabilitätsbetrachtung	25
2.5	Konzepte und Grundlagen der Modellordnungsreduktion	27
2.5.1	Einführung.....	27
2.5.2	Projektionsverfahren.....	27
2.5.3	Klassische Reduktionsverfahren.....	28
2.6	Fazit	31
3	Zielsetzung und Arbeitsschwerpunkte	33
4	Dynamisches Verhalten der Werkzeugmaschine	35
4.1	Einführung.....	35
4.2	Definition und Beschreibung der Mikrofräsmaschine	35
4.3	Versuchsbeschreibung und Durchführung der experimentellen Untersuchungen	36
4.3.1	Messgeräte und Messmethoden.....	36
4.3.2	Statische Nachgiebigkeit	40
4.3.3	Positionsabhängige dynamische Eigenschaften	42
4.3.4	Kreisformtest und Zeitverhalten	49
4.3.5	Zusammenfassung der experimentell ermittelten Ergebnisse.....	52
4.4	Beschreibung und Durchführung der Finite-Elemente-Analyse	57
4.4.1	Software und konventionelle Modellierung	57
4.4.2	Modellierung der Koppel- und Schnittstellen.....	60
4.4.3	Definition der Teilsysteme	63
4.4.4	Positionsabhängige dynamische Eigenschaften	65
4.4.5	Zeitverhalten.....	71
4.4.6	Zusammenfassung der numerisch ermittelten Ergebnisse.....	73
5	Moderne Modellordnungsreduktionsverfahren für Werkzeugmaschinen	79
5.1	Einführung und Übersicht	79
5.2	Padé-Approximation mittels Krylov-Unterraummethode	82
5.3	Einflussgrößen zur Erstellung des reduzierten Systems	85
5.3.1	Algorithmen und ihren numerischen Varianten	86
5.3.2	Entwicklungsgliederanzahl	92

5.3.3	Entwicklungspunkt	96
5.3.4	Deflationsgrenze	104
5.3.5	Zustand der Matrizen des Referenzsystems	105
5.4	Singulärwertzerlegungs-basierte Verfahren	110
5.4.1	Definition und Beschreibung singulärwertzerlegungs-basierter Verfahren	110
5.4.2	Hybride Reduktionsverfahren hochdimensionaler Ein- und Ausgangsräume	111
5.5	Fehlerabschätzung und Abbruchkriterium	117
5.5.1	Fehlerabschätzung für den automatisierten Abbruch	117
5.5.2	Heuristische Abschätzung	118
5.5.3	Singulärwertzerlegung	121
5.6	Eigenschaften des reduzierten Systems	121
5.7	Bewertung	124
5.8	Fazit	129
6	Mechatronische Simulation der Werkzeugmaschine	131
6.1	Einführung	131
6.2	Modellaufbereitung	132
6.2.1	Reduktion der Ein- und Ausgangsdimension im Finite-Elemente-Modell	132
6.2.2	Steigerung der Modellqualität und Nachbearbeitung reduzierter Systeme	135
6.2.3	Übertragung der Reduktionsergebnisse	139
6.3	Kopplung von Teilsystemen	140
6.3.1	Einleitung und Definition	140
6.3.2	Schleifenbildung	141
6.3.3	Ein- und Ausgänge	142
6.3.4	Berücksichtigung der Relativbewegung	147
6.4	Modellierung und Durchführung der mechatronischen Simulation	150
6.4.1	Regelung und Sollgrößeninterpolation	150
6.4.2	Sprungantwort	150
6.4.3	Numerischer Kreisformtest	152
6.5	Zusammenfassung und Fazit	153
7	Praxisorientierte Anwendung moderner Modellordnungsreduktionsverfahren	155
7.1	Einleitung	155
7.2	Modellierung und Anforderung an das Finite-Elemente-Modell	156
7.3	Parameter und Einstellung der Reduktionsalgorithmen	157
7.4	Verringerung der Rechenzeiten und Steigerung der numerischen Effizienz	158
8	Zusammenfassung und Ausblick	159
9	Literaturverzeichnis	161