

Inhaltsverzeichnis

Notation, Symbole und Abkürzungen	XI
1 Einleitung	1
2 Stand der Wissenschaft und Technik	3
2.1 Begriffsdefinitionen	3
2.2 Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen	6
2.2.1 Einfluss der Maschinenstruktur	6
2.2.2 Beurteilung der dynamischen Eigenschaften	7
2.2.3 Modellbildung und Modaltransformation	8
2.2.4 Experimentelle Modalanalyse	14
2.3 Dynamische Simulation von kontinuierlichen Strukturen	15
2.3.1 Methode der finiten Elemente	15
2.3.2 Güte der Näherungslösung	18
2.3.3 Diskretisierungsfehler	19
2.3.4 Fehler beim Lösen der Bewegungsgleichungen	23
2.3.5 Parametrisierung des Modells	26
2.4 Dynamische Modelle von Werkzeugmaschinenstrukturen	29
2.4.1 Strukturbauteile	30
2.4.2 Aufstellelemente	31
2.4.3 Verschraubte Fugen	31
2.4.4 Profilschienenführungen	34
2.4.5 Kugelgewindetriebe inkl. Lagerung	37
2.4.6 Gesamtmodell	40
2.5 Verifikation, Validierung und Vergleich dynamischer Modelle	41
2.5.1 Modellverifikation und -validierung	41
2.5.2 Verfahren des Model Updating	42
2.5.3 Vergleichsmaße	44
2.6 Unsicherheiten in strukturdynamischen Modellen	46
2.6.1 Probabilistische Ansätze	46
2.6.2 Nicht-probabilistische Ansätze	47
2.7 Zusammenfassung und Handlungsbedarf	50
3 Zielsetzung und Vorgehen	53
4 Erstellung prognosefähiger Modelle	55
4.1 Wie entsteht Prognosefähigkeit?	55
4.1.1 Prognosefähigkeit, Verifikation und Validierung	55
4.1.2 Konsequenzen für den Modellierungsprozess	57

4.1.3	Quantifizierung der Prognosefähigkeit	59
4.2	Methode zur Erstellung prognosefähiger Modelle	62
4.3	Formalisierte Beschreibung des Modellierungsprozesses	63
4.4	Charakterisierung der Modellannahmen	66
4.5	Quantifizierung aleatorischer Unsicherheiten	67
4.5.1	Dynamisch relevante Bereiche in Kontinua	68
4.5.2	Quantifizierung von Modellparametern	69
4.6	Begrenzung epistemischer Unsicherheiten	71
4.6.1	Vereinfachungen während der Modellierung	71
4.6.2	Begrenzung des Diskretisierungsfehlers	73
4.7	Recheneffiziente Integration von Unsicherheiten in Modelle . .	75
4.7.1	Randbedingungen und Auswahl des Verfahrens	75
4.7.2	Bestimmung des Intervall-Eigenwertproblems	78
4.7.3	Ungedämpfte intervallbasierte Frequenzgänge	81
4.7.4	Lokal gedämpfte intervallbasierte Frequenzgänge	84
4.8	Anmerkungen zur Anwendung der Methode	93
5	Prognosefähige Modellierung von Werkzeugmaschinenstrukturen	95
5.1	Zielsetzung der Modellierung	95
5.2	Strukturbauteile	96
5.2.1	Diskussion vorhandener Ansätze	97
5.2.2	Ableitung einer prognosefähigen Modellierung	100
5.2.3	Anwendung am betrachteten Maschinenstand	103
5.3	Aufstellelemente	106
5.3.1	Experimentelle Charakterisierung	107
5.3.2	Ableitung einer prognosefähigen Modellierung	110
5.3.3	Anwendung am betrachteten Aufstellelement	113
5.4	Verschraubte Fugen	116
5.4.1	Diskussion vorhandener Ansätze	117
5.4.2	Ableitung einer prognosefähigen Modellierung	117
5.4.3	Anwendung an einer einfachen Balkenstruktur	123
5.5	Profilschienenführungen	126
5.5.1	Ableitung einer prognosefähigen Modellierung	127
5.5.2	Anwendung an einer teilmontierten Maschinenstruktur	129
5.6	Kugelgewindetriebe inkl. Lagerung	132
5.6.1	Diskussion vorhandener Ansätze	133
5.6.2	Ableitung einer prognosefähigen Modellierung	137
5.6.3	Anwendung an einer teilmontierten Maschinenstruktur	144
5.7	Systematik der auftretenden Unsicherheiten	148
6	Anwendung an einem Bearbeitungszentrum	149
6.1	Betrachteter Versuchsträger	149
6.2	Größe der Streuungen und Einfluss der Unsicherheiten	150
6.2.1	Strukturbauteile	150

6.2.2	Aufstellelemente	154
6.2.3	Verschraubte Fugen	156
6.2.4	Profilschienenführungen	157
6.2.5	Kugelgewindetriebe inkl. Lagerung	160
6.3	Relevanz der Unsicherheiten für den Modellaufbau	162
7	Zusammenfassung und Ausblick	165
A	Anhang	167
A.1	Berechnung des äquivalenten Durchmessers von Spindelwellen	167
A.2	Berechnung der Steifigkeitsmatrix von Kugelgewindetrieben . .	168
A.3	Numerischer Vergleich der Kugelgewindetrieb-Modelle	171
A.4	Berechnung der Fugen des Versuchsträgers	172
A.5	Parameterdateien zur Ansteuerung von MSC.Nastran	177
	Literaturverzeichnis	181
	Verzeichnis betreuter Studienarbeiten	209