

313

Stefan Schwarz

**Prognosefähigkeit dynamischer Simulationen von
Werkzeugmaschinenstrukturen**

Stefan Schwarz

**Prognosefähigkeit dynamischer Simulationen von
Werkzeugmaschinenstrukturen**

Herbert Utz Verlag · München 2016

Forschungsberichte IWB
Band 313

Ebook (PDF)-Ausgabe:
ISBN 978-3-8316-7223-3 Version: 1 vom 30.05.2016
Copyright© Herbert Utz Verlag 2016

Alternative Ausgabe: Softcover
ISBN 978-3-8316-4542-8
Copyright© Herbert Utz Verlag 2016

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Lehrstuhl für
Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik

**Prognosefähigkeit dynamischer Simulationen von
Werkzeugmaschinenstrukturen**

Stefan Andreas Schwarz

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher,
RWTH Aachen

Die Dissertation wurde am 02.04.2015 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 31.07.2015 angenommen.

Stefan Schwarz

**Prognosefähigkeit dynamischer Simulationen
von Werkzeugmaschinenstrukturen**



Herbert Utz Verlag · München

Forschungsberichte IWB

Band 313

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2015

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2016

ISBN 978-3-8316-4542-8

Printed in Germany
Herbert Utz Verlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utzverlag.de

Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

Gunther Reinhart

Michael Zäh

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München. Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh und Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, den Leitern dieses Instituts, gilt mein besonderer Dank für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher, dem Leiter des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen am Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen, möchte ich mich herzlich für die Übernahme des Korreferats und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit bedanken. Für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann, dem Leiter des Lehrstuhls für Produktentwicklung der Technischen Universität München.

Großer Dank gebührt darüber hinaus Frau Ursula Rasthofer und Frau Sonja Schäufler sowie den Herren Fabian Distel, Wolfgang Pfeiffer und Christian Rebelein, die mit ihrer kritischen Begutachtung des Manuskripts wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Zudem möchte ich an dieser Stelle den Einsatz aller Studierenden – hervorzuheben sind Christoph Köbler, Alexander Sing und Martin Zöltsch – würdigen, die mich mit ihren Studienarbeiten bei der Erstellung dieser Dissertation unterstützt haben. Außerdem bedanke ich mich bei der DECKEL MAHO Pfronten GmbH und insbesondere Herrn Dr.-Ing. Thomas Garber für die gute Zusammenarbeit und die Bereitstellung der in dieser Arbeit verwendeten CAD-Modelle. Weiteren Dank möchte ich sämtlichen Mitgliedern der DFG-Forschergruppe „Dämpfungseffekte in Werkzeugmaschinen“ – besonders auch meinem Kollegen Klemens Niehues – aussprechen, die während der Anfertigung dieser Arbeit stets ein offenes Ohr für Fragen oder Diskussionen hatten.

Besonders bedanken möchte ich mich zudem bei meiner Frau sowie bei meiner gesamten Familie, die mir mit ihrer Zuversicht und großen Geduld auch in Momenten des Zweifels stets Rückhalt gegeben haben. Vielen herzlichen Dank dafür!

Gilching, im November 2015

Stefan Schwarz

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 Maschinenständer	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 Kugelgewindetriebe . .	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

Notation, Symbole und Abkürzungen¹

Notation und Indices

a	Skalar
$\{a\}$	Spaltenvektor
$[a]$	Matrix
$\mathbf{a}, \{\mathbf{a}\}, [\mathbf{a}]$	Intervallskalar, -vektor oder -matrix
$\langle a \rangle$	Set möglicherweise diskontinuierlicher Intervalle
$\langle\langle a \rangle\rangle$	konservative Schätzung eines Intervallsets
$\llbracket [a] \rrbracket$	konservative Schätzung einer Intervallmatrix
\underline{a}	untere Intervallgrenze oder Tensor erster Stufe
\bar{a}	obere Intervallgrenze
\bar{a}	arithmetisches Mittel
\underline{a}	Tensor zweiter Stufe
a_i	Element einer Matrix oder eines Vektors
a_{ij}, a_{ijkl}	Element eines Tensors erster bzw. zweiter Stufe
$\det [a]$	Determinante einer Matrix
$\text{diag} [a]$	Hauptdiagonale einer Matrix bzw. Diagonalmatrix
$[a]^{-1}$	Inverse einer Matrix
$[a]_{b \times b}$	Matrix der Dimension $b \times b$
$\frac{\partial}{\partial a}$	partielle Differentiation
\dot{a}	Differentiation nach der Zeit ($= \frac{\partial a}{\partial t}$)
$\{a\}', [a]'$	Projektion eines Vektors oder einer Matrix
$\{a\}^T, [a]^T$	Transponierte eines Vektors oder einer Matrix
$\{a\}^H, [a]^H$	Adjungierte bzw. komplex konjugiert Transponierte eines Vektors oder einer Matrix
a^*	konjugiert Komplexe zu a

¹ Die Notation für Intervalle und Fuzzy-Zahlen ist konsistent zu MOENS (2002, S. 27 f., 45 f.) gewählt. Sämtliche Größen des modalen Raums sind konsistent zu LIEVEN & EWINS (1992) bezeichnet, die Symbole für die Schraubenberechnung sind der VDI 2230 BLATT 1 entlehnt.

$ a $	Betrag einer komplexwertigen Zahl
$\angle a$	Phase einer komplexwertigen Zahl
$\Re(a)$	Realteil einer komplexwertigen Zahl
$\Im(a)$	Imaginärteil einer komplexwertigen Zahl
a_r	modale Größe der r-ten Eigenfrequenz
$\{a\}_r$	Eigenvektor der r-ten Eigenfrequenz
$(a_r)_i$	i-tes Element des Eigenvektors der r-ten Eigenfrequenz
a_A	analytisch bzw. rechnerisch ermittelte Größe
a_e	auf ein finites Element bezogene Größe
a_T	theoretisch exakte Größe
a_X	experimentell ermittelte Größe
\tilde{a}	Bedingung auf dem Gebietsrand
a^0	Anfangsbedingung
a_0	Nennwert bzw. auf den Ideal- oder Ausgangszustand bezogene Größe
a_{\perp}	normal zur Bezugsfläche orientierte Größe
a_{\parallel}	tangential zur Bezugsfläche orientierte Größe
a_{axial}	auf die Axialrichtung bezogene Größe
a_{KGT}	auf den Kugelgewindetrieb bezogene Größe
a_{obj}	auf eine Zielfunktion bezogene Größe
a_{PDF}	auf eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion bezogene Größe
a_{real}	auf das reale System bezogene Größe
a_{TCP}	auf die Wirkstelle bezogene Größe
$a_{\text{Stör}}$	Störgröße
a_{Stell}	Stellgröße
a_{Soll}	Sollgröße
a_X/a_A	Verhältnis aus Ist-Wert und Nennwert einer Größe

Symbole²

a, b	beispielhafte Größen oder Knoten
\mathcal{A}	dynamische Beschleunigbarkeit in $\text{mm s}^{-2} \text{N}^{-1}$ ($\text{rad s}^{-2} \text{N}^{-1} \text{mm}^{-1}$)
\hat{A}	Fuzzy-Set
A	Fläche in mm^2
$[A_{12}]$	Drehtransformationsmatrix von System 1 in das System 2
\hat{b}	äußere Volumenkraft in N mm^{-3}
$[B]$	Koeffizientenmatrix der Zwangsbedingungen
\underline{c}	Cauchy-Spannungstensor in N mm^{-2}
\hat{c}	Konstante in Konvergenzbetrachtungen
c	Dämpfungskonstante in N s mm^{-1} (N mm s rad^{-1})
$[C]$	Dämpfungskonstantenmatrix in N s mm^{-1} (N mm s rad^{-1})
d	hysteretischer Dämpfungskoeffizient in N mm^{-1} (N mm rad^{-1})
$[D]$	hysteretische Dämpfungsmatrix in N mm^{-1} (N mm rad^{-1})
d_2	Flankendurchmesser des Schraubengewindes in mm
\bar{D}_a	äquivalenter Spindeldurchmesser in mm
D'_A	Ersatz-Außendurchmesser des Grundkörpers in mm
$D_{A,Gr}$	Grenzdurchmesser in mm
D_{Ki}	Innendurchmesser der ebenen Kopfauflagefläche der Schraube in mm
D_n	Neendurchmesser des Kugelgewindetriebs in mm
d_w	Außendurchmesser der ebenen Kopfauflagefläche der Schraube in mm
\mathcal{D}	Nennerfunktion zur Berechnung des ungedämpften intervall- basierten Frequenzgangs
\mathcal{D}^{re} bzw. \mathcal{D}^{im}	reell- bzw. imaginärwertige Nennerfunktion zur Berechnung des lokal gedämpften intervallbasierten Frequenzgangs
e	Eulersche Zahl
$\{e\}$	kanonischer Einheitsvektor
E	Elastizitätsmodul in MPa

² Einheiten in Klammern stellen jeweils korrespondierende modale oder rotatorische Größen dar.

$[E]$	Elastizitätsmatrix in MPa
\mathcal{F}	Funktionsausdruck
f	Kraft in N (N mm)
F	Amplitude einer Kraft in N (N mm)
F_M	Montagevorspannkraft in N
g, h, i, j, k, l	Laufvariablen
$g(t)$	Zeitsignal
$G(\omega)$	Fourier-Transformierte
\check{h}	Höhe in mm
\hat{h}	Netzparameter bzw. Elementseitenlänge
H	Frequenzgang
i_r	engl. <i>Model Incompleteness Ratio</i> , Maßzahl für den Vergleich von analytischen und experimentellen Modellen
$[I]$	Einheitsmatrix
\bar{I}	mittleres Flächenträgheitsmoment in mm^4
$[J]$	Jacobi-Matrix
k	Steifigkeit in N mm^{-1} (N mm rad^{-1}) bzw. in N mm^{-3} bei Kontaktsteifigkeiten
k_n	Kugelkontaktsteifigkeit in N mm^{-1}
$[K]$	Steifigkeitsmatrix in N mm^{-1} (N mm rad^{-1})
l	Länge in mm
l_k	Klemmlänge in mm
m	Masse in t (t mm^2)
\check{m}	Anzahl der berücksichtigten Moden
$[M]$	Massenmatrix in t (t mm^2)
M_A	Anziehdrehmoment in N mm
n	Anzahl gemessener Freiheitsgrade
$\{n\}$	Normalenvektor
n_{sd}	Anzahl der Raumrichtungen
N	Anzahl der Freiheitsgrade, Schraubenanzahl oder Stichprobengröße
\hat{p}	Polynomordnung
P	Spindel- bzw. Gewindesteigung in mm
\hat{P}	Wahrscheinlichkeit

q	modale Verschiebung in $\text{mm t}^{0,5}$ ($\text{rad mm t}^{0,5}$)
Q	Amplitude einer modalen Verschiebung in $\text{mm t}^{0,5}$ ($\text{rad mm t}^{0,5}$)
r	Index der aktuellen Mode
$\{\hat{p}\}$	Positionsvektor der Helixfunktion in mm
R	Radius in mm
\mathbb{R}	Menge der reellen Zahlen
\bar{R}_a	äquivalenter Radius in mm
R_I	Innenradius in mm
R_{jk}	Residuen der nicht berücksichtigten Moden im Frequenzgang $j - k$
$[R]$	Residuenmatrix der nicht berücksichtigten Moden
$[S]$	Sensitivitätsmatrix
t	Zeit in s
T	kinetische Energie in $\text{N mm (s}^{-2}\text{)}$
$[\hat{T}]$	Projektionsmatrix
u	Formänderungsenergiegedichte in N mm mm^{-3} ($\text{s}^{-2} \text{mm}^{-3}$)
U	Formänderungsenergie in $\text{N mm (s}^{-2}\text{)}$
$\ \Delta U\ $	Differenz der Energie-Normen für die Verzerrungen
$\ U_T\ $	Energie-Norm der theoretisch exakten Lösung
V	Volumen in mm^3
w	Wichtungsfunktion
\hat{w}	Biegelinie in mm
W	Dissipationsenergie in $\text{N mm (s}^{-2}\text{)}$
\hat{W}	Wichtungsfaktor
x, y, z	Position oder Verschiebung in mm (rad)
$\ \hat{x}_T\ _g$	Sobolev-Norm der g -ten Ordnung für die theoretisch exakte Lösung
X	Amplitude einer Verschiebung in mm (rad)
\hat{y}	Wert einer Zwangsbedingung
Y	dynamische Beweglichkeit in $\text{mm s}^{-1} \text{N}^{-1}$ ($\text{rad s}^{-1} \text{N}^{-1} \text{mm}^{-1}$)
α	dynamische Nachgiebigkeit in mm N^{-1} ($\text{rad N}^{-1} \text{mm}^{-1}$)
$\alpha_{\bar{m}}$	modal superponierte dynamische Nachgiebigkeit unter Berücksichtigung von \bar{m} Moden in mm N^{-1} ($\text{rad N}^{-1} \text{mm}^{-1}$)

$[\alpha]$	dynamische Nachgiebigkeitsmatrix in mm N^{-1} ($\text{rad N}^{-1} \text{mm}^{-1}$)
$\check{\alpha}_1, \check{\alpha}_2$	Proportionalitätsfaktoren
$\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2$	α -Levels
$\hat{\alpha}, \hat{\beta}, \hat{\gamma}, \hat{\chi}$	Winkel in rad
β	Parameter für Biegelinien von Balken
Γ	Rand des betrachteten Gebiets
Γ_D, Γ_N	Rand des betrachteten Gebiets mit Dirichlet- bzw. von-Neumann-Randbedingungen
δ_{ij}	Kronecker-Delta
δ	Relativbewegung von zwei Kontaktoberflächen in mm
$\underline{\epsilon}$	Verzerrungstensor
ζ	Dämpfungsgrad
η	Verlustfaktor
$\bar{\eta}$	äquivalenter Verlustfaktor
$\theta_x, \theta_y, \theta_z$	Winkel oder Verdrehung in rad
i	imaginäre Einheit ($= \sqrt{-1}$)
κ	Oberflächenfaktor
λ	Eigenwert
μ	Reibzahl
$\mu_{\hat{A}}$	Zugehörigkeitsfunktion des Fuzzy-Sets \hat{A}
ν	Poisson- bzw. Querkontraktionszahl
ξ	Elementkoordinaten in mm (rad)
π	Kreiszahl
ρ	Dichte in t mm^{-3}
$\bar{\rho}$	angepasste Dichte in t mm^{-3}
$\hat{\rho}$	größtmögliche(r) Kugel bzw. Durchmesser im Elementgebiet
σ	Spannung bzw. Flächenlast in N mm^{-2} oder Standardabweichung einer Normalverteilung in deren Einheit
$\underline{\sigma}$	Spannungstensor in N mm^{-2}
$\hat{\sigma}$	Aspektverhältnis
τ	Formfunktion
φ	Öffnungswinkel des Verformungskegels in $^\circ$
$\{\phi\}$	massenormierter Eigenvektor in $\text{t}^{-0,5}$ ($\text{t}^{-0,5} \text{mm}^{-1}$)

$[\phi]$	massennormierte Eigenvektormatrix in $\text{t}^{-0,5}$ ($\text{t}^{-0,5} \text{ mm}^{-1}$)
χ	Anteil der nominellen Kontaktfläche
$\{\psi\}$	Eigenvektor
$[\Psi]$	Eigenvektormatrix
ω	Kreisfrequenz bzw. Eigenkreisfrequenz in rad s^{-1}
Ω	betrachtetes Gebiet

Abkürzungen

Abb.	Abbildung/-en
altgr.	altgriechisch
bspw.	beispielsweise
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
CAD	engl. <i>Computer Aided Design</i> , rechnerunterstütztes Konstruieren
d. h.	das heißt
f. bzw. ff.	folgende bzw. fortfolgende
DOF	engl. <i>Degree of Freedom</i> , Freiheitsgrad
EF	Eigenfrequenz
engl.	englisch
FEM	Finite-Elemente-Methode
FRAC	engl. <i>Frequency Response Assurance Criterion</i> , Vergleichsmaß für Frequenzgänge
FRF	engl. <i>Frequency Response Function</i> , Frequenzgangfunktion
ggf.	gegebenenfalls
ggü.	gegenüber
Gl.	Gleichung/-en
IESM	engl. <i>Inverse Eigensensitivity Method</i> , modalgrößenbasiertes Model-Updating-Verfahren
inkl.	inklusive
Kap.	Kapitel
KGT	Kugelgewindetrieb
lat.	lateinisch

MAC	engl. <i>Modal Assurance Criterion</i> , Vergleichsmaß für Eigenvektoren
max	Maximum
MCS	Monte-Carlo-Simulation
MIMO	engl. <i>Multiple Input Multiple Output</i> , System mit mehreren Eingängen und mehreren Ausgängen
min	Minimum
NFD	engl. <i>Natural Frequency Difference</i> , Maß für die Abweichung von Eigenfrequenzen in %
PDF	engl. <i>Probability Density Function</i> , Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion
PSF	Profilschienenführung
rel.	relativ/-e
RFM	engl. <i>Response Function Method</i> , frequenzgangbasiertes Modell-Updating-Verfahren
S.	Seite/-n
SISO	engl. <i>Single Input Single Output</i> , System mit einem Eingang und einem Ausgang
sog.	sogenannte/-en
sym	symmetrische Matrix
Tab.	Tabelle/-n
TCP	engl. <i>Tool Center Point</i> , Wirkstelle
u.	und
usw.	und so weiter
z. B.	zum Beispiel

1 Einleitung

Essentially, all models are wrong, but some are useful. However, the approximate nature of the model must always be borne in mind.

— George Box³

Fokus der Arbeit. Dynamische Simulationsmodelle von Werkzeugmaschinenstrukturen werden hauptsächlich als sog. *virtuelle Prototypen* eingesetzt, um das dynamische Verhalten der Maschine – wie in Abb. 1.1 skizziert – bereits während des Entwicklungsprozesses beurteilen und verbessern zu können (KEHL & ALTSTÄDTER 2003).

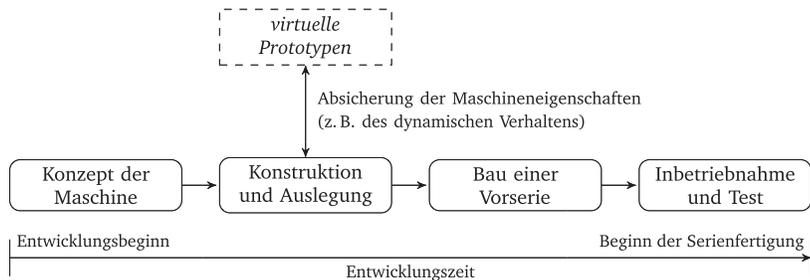


Abb. 1.1: Einsatz von virtuellen Prototypen im Entwicklungsprozess von Werkzeugmaschinen in Anlehnung an ALTINTAS ET AL. (2005)

Dies ist erforderlich, da das dynamische Verhalten der Maschine einen wesentlichen Einfluss auf die Stabilität des Zerspanprozesses und somit auf die Leistungsfähigkeit der Werkzeugmaschine im Allgemeinen besitzt (SCHMITZ & SMITH 2009, S. 2). Da das dynamische Verhalten mechanischer Strukturen wie Werkzeugmaschinen jedoch eine globale Systemeigenschaft darstellt, die durch das Zusammenwirken sämtlicher Bauteile bestimmt wird (FINKE 1977, S. 3), ist eine vollständige Auslegung der dynamischen Eigenschaften bspw. durch Konstruktionsrichtlinien im Allgemeinen nicht möglich. Um die dynamische Güte verschiedener Konstruktionsalternativen mit geringem Aufwand beurteilen und kostengünstig vergleichen zu können, werden stattdessen die genannten Simulationsmodelle – meist auf Basis der Methode der finiten Elemente – eingesetzt (SCHNEIDER 2000, S. 74). Die Verwendung derartiger

³ BOX & DRAPER (1987, S. 424).

Modelle bringt jedoch nur dann einen wirklichen Mehrwert, wenn sie zur „Vorhersage des realen Verhaltens“ genutzt werden können (VERL & BRECHER 2012). Diese Anforderung lässt sich auch unter dem Begriff der *Prognosefähigkeit* zusammenfassen. Gleichzeitig ist der Modellaufbau jedoch mit zahlreichen Ungenauigkeiten behaftet, welche die Prognosefähigkeit beeinträchtigen und einerseits auf die Wechselwirkungen von Füge- und Koppelstellen zurückzuführen sind (WECK & BRECHER 2006b, S. 195). Das daraus entstehende Spannungsfeld stellt den Betrachtungsrahmen der vorliegenden Arbeit dar.

Intention und Aufbau. Die behandelte Themenstellung besitzt aus Sicht des Autors – neben der Leserschaft aus Wissenschaft und Forschung – auch für einige Anwender aus der Industriepraxis unmittelbare Relevanz. Deshalb wurde in dieser Arbeit versucht, beide Interessengruppen gleichermaßen zu berücksichtigen. Dies äußert sich zum einen darin, dass im Stand der Wissenschaft und Technik die für das Verständnis wesentlichen Zusammenhänge und Gleichungen aufgeführt sind, anstatt lediglich auf die entsprechenden Literaturquellen zu verweisen. Zum anderen werden bei der Vorstellung von Methoden, Verfahren und Modellierungsprozessen an mehreren Stellen Beispiele bemüht, um eine gewisse Anschaulichkeit zu gewährleisten. Darüber hinaus sind sämtliche relevanten Parameter der verwendeten Modelle oder entsprechende Querverweise angegeben, was eine Übertragung des hier Gezeigten auf verwandte Problemstellungen vereinfachen soll. Einige für die behandelte Themenstellung essentielle Begrifflichkeiten sind jedoch in der Literatur mit teilweise nicht eindeutigen oder widersprüchlichen Bedeutungen belegt. Um angesichts dessen zunächst eine konsistente und eindeutige Basis für die Arbeit zu schaffen, werden zu Beginn des nun folgenden Kapitels die erforderlichen Begriffe definiert, bevor anschließend der Stand der Wissenschaft und Technik präsentiert wird. Daraus resultiert der Handlungsbedarf, welcher sich im Anschluss in der Zielsetzung und dem Vorgehen widerspiegelt. Das Vorgehen leitet insgesamt drei aufeinander aufbauende Hauptkapitel mit steigendem Anwendungsbezug ein, die am Ende der Arbeit zusammengefasst werden und schließlich in einem Ausblick auf weiterführende Untersuchungsgebiete münden.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

2.1 Begriffsdefinitionen

Modell, Modellierung und Simulation (NEELAMKAVIL 1987, S. 6, 30 ff.). Ein Modell ist eine vereinfachte Darstellung eines Systems, eines Prozesses oder einer Theorie. Es ist dazu gedacht, unsere Fähigkeit zu steigern, das Systemverhalten zu verstehen, zu prognostizieren und – sofern möglich – zu kontrollieren. Dabei ist die Modellierung jener Vorgang, in welchem Zusammenhänge zwischen wichtigen Elementen des Systems hergestellt werden, während Modelle in Form von Zielen, Leistungskriterien und Randbedingungen beschrieben werden. Die Simulation ist der Vorgang, in dem durch den Aufbau des Modells und anschließende Versuche wichtige Aspekte des Systemverhaltens in Echtzeit oder in verkürzter bzw. gestreckter Zeitskala nachgestellt werden.

Verifikation, Validierung und Prognosefähigkeit (NEELAMKAVIL 1987, S. 76). Eine Verifikation stellt sicher, dass ein Modell den Spezifikationen entspricht und dass weder Fehler in der Modellstruktur noch in den -algorithmen oder in der Implementierung vorliegen. Die Validierung ist der Prozess, in dem nachgewiesen wird, dass ein Modell innerhalb seines Anwendungsgebiets hinreichend genau für die beabsichtigte Anwendung ist. Es kann dabei zwischen rückwirkender, prädiktiver und struktureller Validität unterschieden werden. Rückwirkend valide ist ein Modell, das bestehende, bekannte Daten hinreichend genau wiedergibt. Prädiktive Validität ist gegeben, wenn dieselbe Eigenschaft für zukünftige, unbekannte Daten vorliegt. Von struktureller Validität wird gesprochen, wenn das Modell das innere Verhalten des realen Systems glaubwürdig abbildet. Als prognosefähig werden in dieser Arbeit Modelle bezeichnet, die verifiziert sind und alle drei Validitätseigenschaften erfüllen.

Aleatorische Unsicherheit (OBERKAMPF & ROY 2010, S. 51 f.). Eine aleatorische⁴ Unsicherheit ist eine nicht reduzierbare Unsicherheit während der Modellierung oder der Simulation, die aufgrund system- oder umgebungsinhärenter Variationen auftritt. Derartige Unsicherheiten verändern sich von Exemplar zu Exemplar oder von Zeitpunkt zu Zeitpunkt innerhalb bekannter Streubereiche. Aleatorische Unsicherheiten können deshalb mit Wahrscheinlichkeits- oder Frequenzverteilungen beschrieben werden, sofern dazu hinreichend Informationen vorhanden sind.

⁴ Lat. *alea*, „Würfel“.

Epistemische Unsicherheit (OBERKAMPF & ROY 2010, S. 53 f.). Eine epistemische⁵ Unsicherheit ist eine Unsicherheit während der Modellierung oder der Simulation, die aufgrund von Kenntnismangel auftritt und sich durch Wissenszugewinn reduzieren lässt. Der Kenntnismangel selbst hat seinen Ursprung entweder in Unklarheiten, in ungenügender Genauigkeit oder in Widersprüchen. Epistemische Unsicherheiten können in zwei Typen unterschieden werden: Im Falle einer **erkannten** epistemischen Unsicherheit wurde eine bewusste Entscheidung getroffen, um diese zu charakterisieren, mit ihr in irgendeiner Weise umzugehen oder sie aufgrund praktischer Einschränkungen – wie hinsichtlich Zeit oder Kosten – zu ignorieren. Im Gegensatz dazu wird im Fall einer **verdeckten** – also unbewussten – epistemischen Unsicherheit nicht erkannt, dass das Wissen über das modellierte System unvollständig und diese Wissenslücke relevant für den Modellierungsprozess ist.

Fehler (OBERKAMPF & ROY 2010, S. 57 f.). Ein Fehler ist eine Abweichung einer Größe von ihrem wahren Wert. Im Vergleich zur Betrachtung von Unsicherheiten ist der Grund der Abweichung nicht relevant. Der wahre Wert ist zuvor zu definieren. Er ist in numerischen Simulationen selten, in experimentellen Untersuchungen dagegen nie bekannt. Der Nutzen einer Fehlerbetrachtung hängt daher von der Definition des wahren Werts und von dessen Genauigkeit im Vergleich zur Abweichung ab.

Maschinenstruktur. Die vorliegende Arbeit beschränkt sich auf die Betrachtung der Maschinenstruktur von spanenden Werkzeugmaschinen. Da in der einschlägigen Literatur unterschiedliche Auffassungen darüber zu finden sind, welche Komponenten einer derartigen Maschine damit gemeint sind, folgt eine kurze Definition des Begriffs und eine Übersicht der enthaltenen Komponenten. Spanende Werkzeugmaschinen lassen sich nach NEUGEBAUER (2012, S. 290) grundsätzlich in die in Tab. 2.1 aufgeführten Baugruppen gliedern. Der Begriff Maschinenstruktur umfasst in der vorliegenden Arbeit die mechanischen Komponenten der Baugruppen 3 bis 6, wobei Motoren, Kupplungen und Klemmeinrichtungen ausgenommen sind. Sämtliche Gestellbauteile (Baugruppe 3) werden fortan als **Strukturbauteile** bezeichnet, die mit Hilfe von **verschraubten Fugen** verbunden sind. Als Führungen (Baugruppe 4) kommen bei modernen Werkzeugmaschinen vorwiegend Kompaktwälzführungssysteme mit umlaufenden Wälzkörpern zum Einsatz, die in dieser Arbeit **Profilschienenführungen** genannt werden. Bei Verwendung konventioneller Antriebsmotoren (Baugruppe 5) wird die Umsetzung von Rotation in Translation hauptsächlich über **Kugelgewindetriebe** realisiert, die ihrerseits geeignet gelagert sind. Die Maschinenaufstellung auf dem Fundament (Baugruppe 6) erfolgt typischerweise mit **Aufstallelementen** in verschiedenen Bauformen. Eine Maschinenstruktur setzt sich somit aus den in Abb. 2.1 dargestellten Komponenten zusammen.

⁵ Altgr. *epistími*, „Wissenschaft“.

1. Werkzeug- und Werkstückaufnahme
2. Hauptspindelbaugruppe
3. Gestellbauteile wie Betten, Ständer, Schlitten, Traversen, Tische usw.
4. Führungen zum Ermöglichen von Bewegungen zwischen Gestellbauteilen
5. Antriebsbaugruppen zum Erzeugen notwendiger Bewegungen
6. Maschinenaufstellung und Fundament
7. Automatisierungsbaugruppen für den Wechsel und die Speicherung von Werkzeugen und Werkstücken
8. Maschinensteuerung einschließlich Bedienteile und Sicherheitseinrichtungen
9. Ver- und Entsorgungseinrichtungen z. B. für Dämpfe, Kühlschmierstoff, Späne
10. Maschinenverkleidung und -einhausung

Tab. 2.1: Baugruppen spanender Werkzeugmaschinen nach NEUGEBAUER (2012, S. 290)

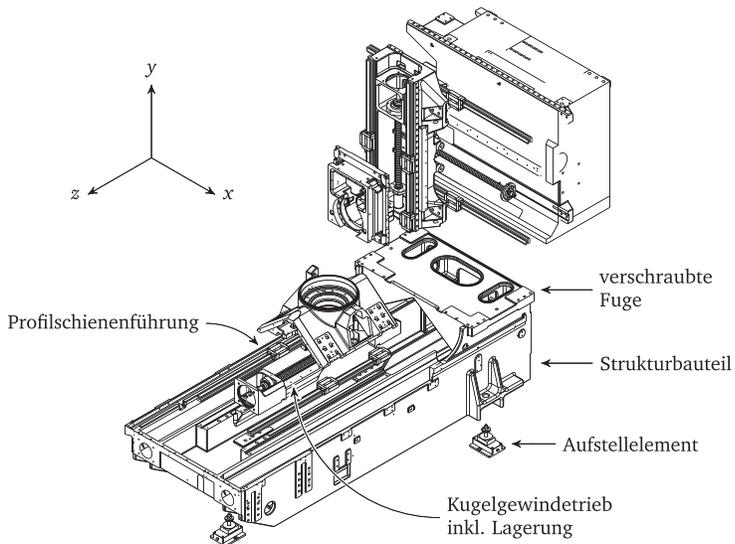


Abb. 2.1: Typische Komponenten der Maschinenstruktur einer spanenden Werkzeugmaschine mit zugehörigem Maschinenkoordinatensystem