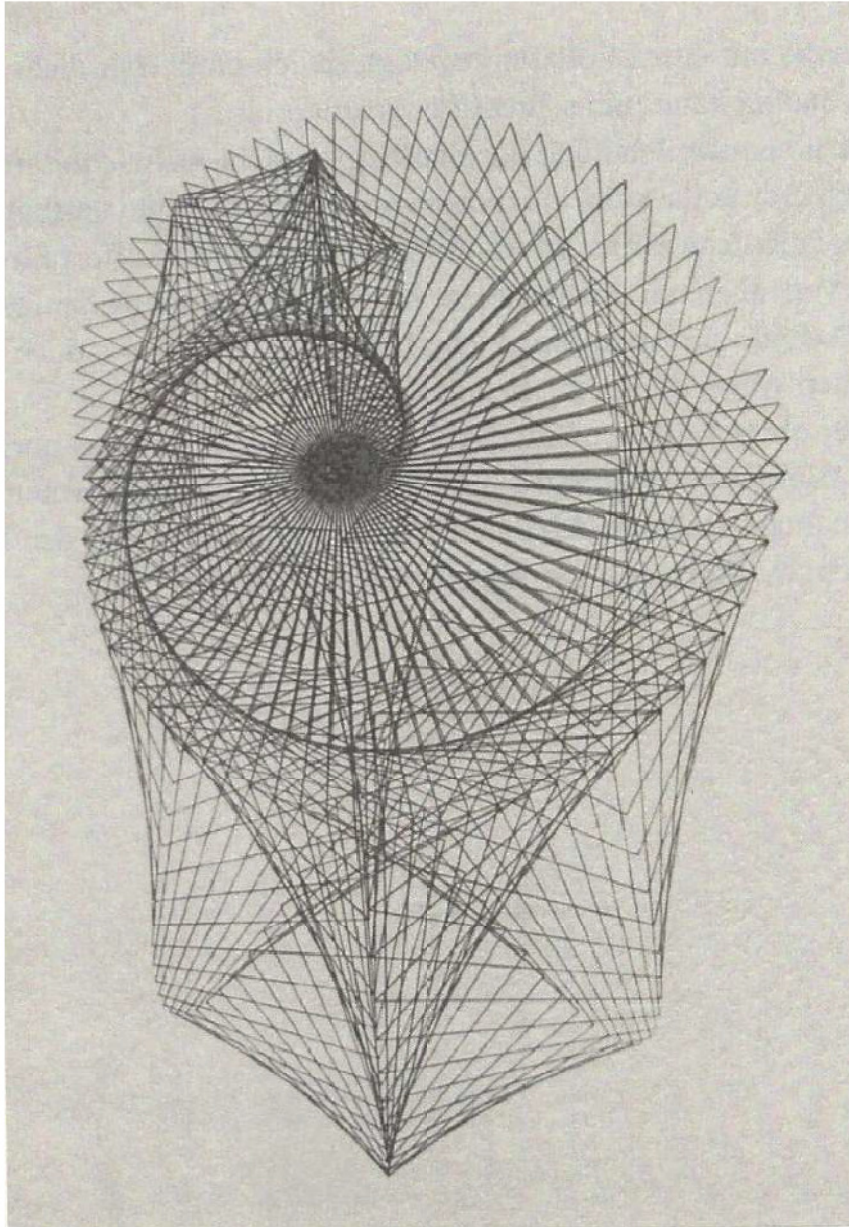


Knut Großmann

Die Entwicklung spanender Werkzeugmaschinen

Teil 1



Inhalt

Vorwort.....	8
0 Einführung.....	10
0.1 Definition und inhaltliche Abgrenzung	10
0.2 Konstruktiver Entwicklungsprozess und Methodik.....	13
0.3 Zerspanungsprozess, Grundaufbau und Hauptbaugruppen spanender Werkzeugmaschinen	16
1 Historie.....	28
1.1 Zur Geschichte der Werkzeugmaschine.....	28
1.1.1 Antriebskraft.....	28
1.1.2 Bewegungsführung - Ist das ein üblicher Begriff?.....	31
1.1.3 Schneidenwerkstoff.....	35
1.1.4 Automatisierung	36
1.1.5 Technologie	41
1.1.6 Modularisierung.....	48
1.1.7 Virtualisierung	49
1.2 Zu den Innovationsbereichen	50
1.2.1 Innovationsbereich modular	52
1.2.2 Innovationsbereich integrierend	52
1.2.3 Innovationsbereich dynamisch	53
1.2.4 Innovationsbereich intelligent	54
1.3 Zur Geschichte der Entwicklungswerkzeuge	54
1.3.1 Der Weg zum Papier	54
1.3.2 Mit Rechenschieber und Reißbrett	56
1.3.3 Prototyp und Nullserie	57
1.3.4 Ziel Konstrukteursarbeitsplatz?	59
1.3.5 CAD und FEM	60
1.3.6 PC und Standardsoftware	61
1.3.7 Maschinenuntersuchung und Abnahmewerkstück.....	62

1.3.8	Mit Simulation zur Virtualisierung	66
1.3.9	Vernetzung und Cloud.....	73
2	Grundlagen und Beispiele zur Verhaltensanalyse und -bewertung	75
2.1	Verhaltensbereiche und Bedeutung der Verhaltensermittlung	75
2.1.1	Geometrisch-kinematisches Verhalten	78
2.1.1.1	Bedeutung und Wesen des statischen Verhaltens	79
2.1.1.2	Belastung durch Eigengewichte	80
2.1.1.3	Belastung durch Prozesskräfte.....	84
2.1.1.4	Belastung durch Spannkkräfte	86
2.1.1.5	Verformungsanalyse	87
2.1.2	Thermisches Verhalten	94
2.1.2.1	Bedeutung und Wesen des thermischen Verhaltens	95
2.1.2.2	Temperatur- und Verformungsentstehung.....	98
2.1.2.3	Entstehung der thermisch bedingten Werkstückfehler.....	108
2.1.2.4	Analyse des thermischen Verhaltens	116
2.1.2.5	Reduzierung der thermisch bedingten Verlagerungen am TCP.....	118
2.1.3	Dynamisches Verhalten	121
2.1.3.1	Bedeutung und Wesen des dynamischen Verhaltens	121
2.1.3.2	Fundamentalschwingungen, Aufstellung und Isolation.....	123
2.1.3.3	Unwuchtschwingungen	125
2.2	Methoden der Verhaltensermittlung.....	128
2.2.1	Verhältnis von Messung und Berechnung	128
2.2.2	Messwertbasierte Verhaltensermittlung – reales Experiment	133
2.2.2.1	Typische Experimente zur Kinematik	134
2.2.2.1.1	Messausrüstung.....	134
2.2.2.1.2	Klassische kinematische Prüfung.....	138
2.2.2.1.3	Messungen mit dem Laserinterferometer	142
2.2.2.1.4	Genauigkeit im Bewegungsraum	150
2.2.2.1.5	Messungen mit dem Double-Ball-Bar.....	153

2.2.2.1.6	Kalibrierung.....	156
2.2.2.1.7	Anmerkungen zum Genauigkeitsbegriff	161
2.2.2.2	Typische Experimente zur Statik	164
2.2.2.2.1	Messausrüstung.....	164
2.2.2.2.2	Verformungsmessung und -verarbeitung	165
2.2.2.2.3	Schwachstellenanalyse	174
2.2.2.2.4	Statische Zerspankraftmessung.....	179
2.2.2.3	Typische Experimente zur Thermik	181
2.2.2.3.1	Messausrüstung.....	181
2.2.2.3.2	Versuchsbedingungen für thermische Maschinenuntersuchungen.....	183
2.2.2.3.3	Wärmestrommessung	184
2.2.2.3.4	Temperaturmessung	189
2.2.2.4	Typische Experimente zur Dynamik	192
2.2.2.4.1	Messausrüstung.....	192
2.2.2.4.2	Messung von Betriebsschwingungsformen	195
2.2.2.4.3	Ermittlung von Eigenfrequenz, Eigenschwingungsform und Dämpfung 197	
2.2.2.4.4	Experimentelle Modalanalyse	205
2.2.2.4.5	Messung des Nachgiebigkeitsfrequenzganges an der rotierenden Spindel 211	
2.2.2.4.6	Messung dynamischer Zerspankräfte	213
2.2.2.4.7	Identifizierung von Ratterschwingungen.....	214
2.2.3	Modellbasierte Verhaltensermittlung – virtuelles Experiment.....	216
2.2.3.1	Einführung in das Modellproblem	216
2.2.3.2	Kinematische Modelle	224
2.2.3.3	Belastungsmodelle.....	226
2.2.3.3.1	Statische Lastbeschreibung	226
2.2.3.3.2	Thermische Lastbeschreibung	233
2.2.3.3.3	Dynamische Lastbeschreibung	237
2.2.3.4	Verformungsmodelle und –berechnung.....	241

2.2.3.4.1	Modelle mit konzentrierten Elementen	244
2.2.3.4.2	Modelle mit endlichen Elementen	248
2.2.3.4.3	Systemaufbau	253
2.2.3.4.4	Diskretisierung	256
2.2.3.4.5	Statischer Bereich	267
2.2.3.4.6	Thermischer Bereich	268
2.2.3.4.7	Frequenzbereich	279
2.2.3.4.8	Dämpfungsproblem	289
2.2.3.4.9	Zerspanungsstabilität	295
2.2.3.4.10	Zeitbereich	299
2.2.3.4.10.1	Funktionalismus der objektorientierten Simulation	311
2.2.3.4.10.2	Beispiele für Knoten, Elemente und Transformatoren	316
2.2.3.4.10.3	Strukturveränderlichkeit	323
2.2.3.4.10.4	Möglichkeiten und Beispiele für die Systemsimulation	323
2.3	Methoden der Verhaltensanalyse	333
2.3.1	Bewertung	333
2.3.1.1	Einzelne Kenngrößen eines Verhaltensbereiches	333
2.3.1.2	Mehrere Kenngrößen eines Verhaltensbereiches	334
2.3.1.3	Mehrere Kenngrößen aus verschiedenen Verhaltensbereichen	341
2.3.2	Sensitivitätsanalyse	342
2.3.3	Optimierung	342
2.3.3.1	Parameteroptimierung	344
2.3.3.2	Topologieoptimierung	352
2.4	Methoden zur Effizienzsteigerung der Analyse	354
2.4.1	Design of Experiment	354
2.4.2	Modellordnungsreduktion	354
2.4.2.1	Modellordnungsreduktion in der Statik	355
2.4.2.2	Modellordnungsreduktion in der Thermik	356
2.4.2.3	Modellordnungsreduktion in der Dynamik	359

3	Verzeichnis der Abkürzungen.....	360
4	Literaturverzeichnis	361

3 Verzeichnis der Abkürzungen

- BAZ Bearbeitungszentrum
- BMBF Bundesministerium für Bildung und Forschung
- CAD Computer Aided Design
- CAM Computer Aided Manufacture
- DBS Digitale Blocksimulation
- DBB Double-Ball-Bar
- DGL Differentialgleichung
- FE Finite Elemente
- FFT Schnelle Fourier Transformation (Fast Fourier Transformation)
- HiL Hardware-in-the-Loop
- KS Kinematiksimulation
- KSS Kühlschmierstoff
- L.FEM Lineare Finite Elemente Methode
- LI Laserinterferometer
- MDoF Multi Degree of Freedom
- MMS Mixed-Model-Simulation
- MKS Mehrkörpersimulation
- NL.FEM Nichtlineare Finite Element Methode
- PSF Profilschienenführungen
- SDoF Single Degree of Freedom
- SiL Software-in-the-Loop
- TCP Tool Center Point (Werkzeugeingriffspunkt)
- VR Virtual Reality
- WSt Werkstück
- WZ Werkzeug

4 Literaturverzeichnis

- [1] M. Weck, Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 1, Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1998.
- [2] G. Spur, Vom Wandel der industriellen Welt durch Werkzeugmaschinen, München, Wien: C.Hanser, 1991.
- [3] M. Weck, Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 2, Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1997.
- [4] M. Weck, Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 4, Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2001.
- [5] G. Spur und F.-L. Krause, Das virtuelle Produkt - Management der CAD Technik, München, Wien: C.Hanser, 1997.
- [6] Wikipedia, „Industrie 4.0,“ [Online]. Available: https://de.wikipedia.org/wiki/Industrie_4.0.
- [7] M. u. B. C. Weck, Werkzeugmaschinen und Fertigungssysteme 5, Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2006.
- [8] G. Spur, Die Genauigkeit von Maschinen, München, Wien: C.Hanser, 1996.
- [9] G. Jungnickel, „Simulation des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen,“ *Schriftenreihe des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen der TU Dresden*, 2000.
- [10] G. Jungnickel, „Simulation des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen-Modellierung und Parametrierung,“ *Schriftenreihe des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen der TU Dresden*, 2010.
- [11] K. Großmann, „Untersuchung des thermo-elastischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen-Grundlagen der experimentellen Analyse mit Hilfe der selektiven Thermografie,“ *ZWF 108 Seiten 492-497*, 2013.
- [12] Großmann, K., Kauschinger, B., Riedel, M., „Photogrammetrischer Modellbaukasten zur Erfassung von Bewegungsfehlern an Werkzeugmaschinen,“ in *s Photogrammetrie*,

Laserscanning, optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Olde3nburger 3D-Tage, 2012.

- [13] K. Großmann, Dynamische Verhaltensanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen, TU Dresden: Habilitationsschrift, 1991.
- [14] M. Löser, „Ein Beitrag zur effizienten Analyse der Prozessstabilität beim HSC-Fräsen, Dissertation,“ *Schriftenreihe des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen, Tu Dresden, 2014.*
- [15] G. Klaus, Wörterbuch der Kybernetik, Berlin: Dietz, 1967.
- [16] B. Kauschinger, „Verbesserung der Bewegungsgenauigkeit an einem Hexapod einfacher Bauart,“ 2006.
- [17] L. Neidhardt, „Wälzkontaktbezogene Lebensdauer von Profilschienenführungen- Bewertung der experimentellen Ermittlung des Lebensdauerwertes,“ TU Dresden, 2013.
- [18] K. M. V. Großmann, „Hexapod für Handling-Zwischen Roboter und Werkzeugmaschine,“ *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb Zwf*, pp. 290-293, 6 2000.
- [19] F. Taylor, „On the art of cutting metals,“ *Transactions of American Society of Mechanical Engineers Vol. 28*, pp. 31-279, 1907.
- [20] O. V. H. Kienzle, „Spezifische Schnittkräfte bei der Metallbearbeitung,“ *Werkstofftechnik und Maschinenbau Bd. 47*, pp. 224-225, 1957.
- [21] H. Fischer, Die Werkzeugmaschine. Die Metallbearbeitungsmaschinen, Bd. 1, Berlin: Springer, 1905.
- [22] M. T. K. Weck, Dynamisches Verhalten spanender Werkzeugmaschinen, Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1977.
- [23] R. v. d. W. N. O. J. N. H. Faasen, „Prediction of regenerative Chatter by Modelling and Analysis of High-Speed Milling,“ *International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 43*, pp. 1437-1446, 2003.
- [24] H. Friedrich, „Über den Schnittwiderstand bei der Bearbeitung der Metalle durch Abheben von Spänen,“ *Zeitschrift des VDI, Bd. 53 Nr. 22*, pp. 860-866, 1907.

- [25] m. A. Y. Campomanes, „An Improved Time Domaine Simulation for Dynamic at Small Radial Immersion,“ *Transactions of the ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 125*, pp. 416-422, 2003.
- [26] A. (. Böge, *Formeln und Tabellen Maschinenbau-Für Studium und Praxis*, Wiesbaden: Vieweg, 2007.
- [27] S.-S. Kullagerfabriken, „SKF-Hauptkatalog,“ SKF GmbH, Schweinfurt, 1991.
- [28] S.-S. Kullagerfabriken, „SKF-Hauptkatalog,“ SKF GmbH, Schweinfurt, 2004.
- [29] J. Tlustý und A. Poláček, „Beispiel der Behandlung der selbsterregten Schwingungen der Werkzeugmaschinen,“ Vogel-Verlag Coburg, 1957.
- [30] S. Tobias und W. Fishwick, „A Theory of Regenerative Chatter,“ *The Engineer*, 1958.
- [31] S. Recklies, „Modellvorstellungen zur Entstehung selbsterregter Schwingungen an Werkzeugmaschinen,“ Dissertation, TU Dresden, 1972.
- [32] R. Arnold, „Mechanism of Tool Vibration in Cutting of Steel,“ *Proc. I. Mechanical Engineering 154*, 1946.
- [33] C. Brecher und M. Esser, „The Consideration of Dynamic Cutting Forces in the Stability Simulation of HPC-Milling Process,“ in s *Proceedings of the 1st International Conference on Process Machine Interactions*, Hannover, 2008.
- [34] H. Bosselt, *Simulation dynamischer Systeme. Grundwissen, Methoden, Programme*, Braunschweig: Vieweg-Verlag, 1989.
- [35] H. Bosselt, *Modellbildung und Simulation. Konzepte, Verfahren, Modelle*, Braunschweig: Vieweg-Verlag, 1992.
- [36] R. P. M. Fletcher, „A rapidly convergent descent methode for minimization,“ *The Computer*, 1963, Nr. 6.
- [37] W. Zangwill, „Minimizing a function without calculating derivates,“ *The Computer Nr. 10*, 1967.