

Forschungsberichte

iwb

Band 166

Martin Weißenberger

***Optimierung
der Bewegungsdynamik
von Werkzeugmaschinen
im rechnergestützten
Entwicklungsprozess***

***herausgegeben von
Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart***

Herbert Utz Verlag

UTZ

Forschungsberichte iwb

Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
der Technischen Universität München

herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
Technische Universität München
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb)

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.

Zugleich: Dissertation, München, Techn. Univ., 2001

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

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2007

ISBN 978-3-8316-0138-7

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München
Tel.: 089/277791-00 – www.utzverlag.de

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Verzeichnis verwendeter Formelzeichen und Abkürzungen	VI
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.1.1 Wettbewerbsfaktoren der Werkzeugmaschinenindustrie	1
1.1.2 Höhere Produktivität durch gesteigerte Bewegungsdynamik	3
1.1.3 Werkzeugmaschinen als komplexe mechatronische Produktsysteme	5
1.2 Problemstellung	6
1.3 Zielsetzung	7
1.4 Vorgehen	8
2 Stand der Forschung und Technik	10
2.1 Methoden und Werkzeuge für den Produktentwicklungsprozess	10
2.1.1 Konstruktionsmethodik	10
2.1.2 Rechnerunterstützung der Produktentwicklung	12
2.1.3 Berechnungs- und Simulationsmethoden	15
2.1.4 Integration von Gestaltung und Berechnung	18
2.1.5 Entwicklung mechatronischer Systeme	20
2.2 Entwicklung von Werkzeugmaschinen	23
2.2.1 Anforderungen und Aufbau spanender Werkzeugmaschinen	23
2.2.2 Vorgehensmethodik in der Werkzeugmaschinenkonstruktion	25
2.2.3 Simulation des Maschinenverhaltens im Entwicklungsprozess	27
2.2.4 Rechnerunterstützung im Produktentwicklungsprozess von Werkzeugmaschinen	29
2.3 Konsequenzen und Abgrenzung	30

3	Konzeption	33
3.1	Übersicht	33
3.2	Mechatronikgerechte Entwicklung von Werkzeugmaschinen	33
3.2.1	Anforderungen	33
3.2.2	Anpassung der Vorgehensmethodik im Entwicklungsprozess	35
3.3	Anwendung der Mehrkörpersimulationsmethode zur Bewertung und Optimierung der Bewegungsdynamik unter Betriebsbedingungen	38
3.3.1	Grundlagen der Mehrkörpersimulation	39
3.3.2	Ansatz	47
3.4	Informationstechnisches Konzept der Entwicklungsumgebung	52
4	Modellbildung und Simulation	54
4.1	Übersicht	54
4.2	Mehrkörpermodellierung der Maschinenstruktur	54
4.3	Abbildung von Linearführungssystemen	56
4.3.1	Anforderungen und Zielsetzung	56
4.3.2	Parametrisiertes Komponentenmodell einer Profilschienen-Wälzführung	57
4.4	Gestellkomponenten als flexible Körper	59
4.4.1	Anmerkungen zur Modellierung flexibler Körper	59
4.4.2	Modellierungskonzept für flexible Gestellkörper mit Kopplung über translatorische Bewegungsführungen	61
4.5	Einbindung der Vorschubantriebe in die MKS-Simulation	66
4.5.1	Antriebskonzepte für hochdynamische Werkzeugmaschinen	66
4.5.2	Ansätze zur mechatronischen Modellbildung	67
4.5.3	Abbildung rotatorischer Vorschubantriebe	68
4.5.4	Abbildung von Lineardirektantrieben	72
4.6	Einbindung der NC-Steuerungsfunktionalität	73

4.6.1	Grundbegriffe der NC-Steuerungstechnik	73
4.6.2	Einfluss der Führungsgrößenerzeugung auf Maschinendynamik und Genauigkeit	75
4.6.3	Kopplung von NC-Bearbeitungs- und MKS-Dynamiksimulation	78
4.7	Abbildung spanender Bearbeitungsprozesse	83
4.7.1	Problembeschreibung und Zielsetzung	83
4.7.2	Konzept zur Einbindung der Zerspankraftkinetik in ein MKS-Modell	84
4.7.3	Dynamisches Zerspankraftmodell für Fräsprozesse	87
5	Auswertung der MKS-Simulationsergebnisse und Rückführung in den Konstruktionsprozess	95
5.1	Problemstellung	95
5.2	Auswertemethoden zur Bereitstellung von Kennwerten	95
5.3	Belastungs- und Lebensdauerberechnung von Linearführungen	97
5.3.1	Allgemeiner Ansatz	97
5.3.2	Rechnerwerkzeug zur Belastungsanalyse und Lebensdauerberechnung	100
5.4	Kinematische Analyse der Maschinenverformung bei dynamischen Verfahrbewegungen	103
5.4.1	Motivation	103
5.4.2	Erfassung der Komponentenbeiträge zur TCP-Verlagerung	104
6	Umsetzung im rechnergestützten Entwicklungsprozess	110
6.1	Übersicht	110
6.2	Integration der Berechnungsschritte in eine CA-Prozesskette	110
6.3	Ansätze zur 3D-CAD-Modellierung von Werkzeugmaschinenentwürfen	114
6.3.1	Anforderungen an die 3D-CAD-Modellierung von Werkzeugmaschinen	114

6.3.2	Modellierungsstrategien für die 3D-CAD-Konstruktion von Werkzeugmaschinenentwürfen	115
6.3.3	Repräsentation unterschiedlicher Partialsichten	117
6.4	3D-CAD-integrierte Mehrkörpersimulation	119
6.4.1	Prinzipielles Vorgehen	119
6.4.2	Informationstechnische Konzeption und Leistungsvermögen 3D-CAD-integrierter MKS-Simulationsprogramme	120
6.4.3	MKS-gerechte Vereinfachung von Darstellungsgeometrie und Struktur komplexer CAD-Baugruppenmodelle	122
6.5	Integration von MKS- und FEM-Methode zur Modellierung flexibler Körper	124
6.5.1	Vorgehen unter Anwendung CAD-integrierter Berechnungsfunktionen	124
6.5.2	Konsistenz von MKS- und FEM-Partialmodellen	126
7	Anwendungsbeispiel	130
7.1	Zielsetzung und Vorgehen	130
7.2	Aufbau des MKS-Maschinenmodells	131
7.3	Betrachteter Bewegungszyklus und Bewertungskriterien	134
7.4	Verifizierung durch Vergleich von Simulation und Messung	137
7.4.1	Durchgeführte Untersuchungen im Zeit- und Frequenzbereich	138
7.4.2	Bewertung und Fazit der Verifizierung	138
7.5	Analyse des Maschinenverhaltens und Ableitung von Verbesserungsmaßnahmen	139
7.5.1	Regelabweichung an Maschinenachsen und TCP	139
7.5.2	Wechselwirkung von Antrieben und Maschinenstruktur	141
7.5.3	Kinematische Analyse der Maschinenverformung bei dynamischer Verfahrbewegung	143
7.5.4	Bewertung und abgeleitete Maßnahmen	146

7.6	Evaluierung und Optimierung der modifizierten Maschine	147
7.6.1	Regelabweichung an TCP und Maschinenachsen und kinematische Analyse	147
7.6.2	Erzielbare Regeldynamik und Anregung der Maschinenstruktur durch Antriebe und Führungsgrößen	148
7.6.3	Resultierende Bahnkurve bei optimierter Reglereinstellung	151
7.7	Erzielte Leistungssteigerung	151
7.8	Bewertung technischer und wirtschaftlicher Aspekte	153
8	Zusammenfassung und Ausblick	157
9	Literaturverzeichnis	160
Anhang		173
A	Anmerkungen zur 3D-CAD-integrierten MKS-Modellierung	173
B	Detaillierter Vergleich von Simulation und Messung für das Anwendungsbeispiel	179
B.1	Vergleich von experimenteller Modalanalyse und Eigenmodeberechnung am MKS-Maschinenmodell	179
B.2	Vergleich von Messung und Simulation des Bewegungsverhaltens	182
C	Analyse der optimierten Maschinenversion	187

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

1.1.1 Wettbewerbsfaktoren der Werkzeugmaschinenindustrie

Moderne computergesteuerte Fertigungseinrichtungen stellen einen entscheidenden Schlüsselfaktor der Produktionstechnik dar. Die heutige Situation im Werkzeugmaschinenbau ist daher geprägt von der Forderung eines globalisierten Marktes nach einer ständigen Verbesserung der Produktivität der Maschinen. Hieraus ergeben sich kontinuierlich steigende Ansprüche vor allem an die erzielbare Mengenleistung, Arbeitsgenauigkeit, Flexibilität und Verfügbarkeit einer Maschine sowie an die aufzuwendenden Investitions- und Betriebskosten (s. [MILBERG 1992], [SCHELLEKENS U. A. 1998]). Gleichzeitig befindet sich die Werkzeugmaschinenindustrie in einer besonders starken, internationalen Wettbewerbssituation. Diese bewirkt, dass Neuentwicklungen unter erheblichem Zeit- und Kostendruck ausgeführt werden müssen. Der Markterfolg eines Unternehmens wird maßgeblich von der Realisierbarkeit kurzer *Time-to-Market* Zyklen bestimmt. Insbesondere für Unternehmen der Werkzeugmaschinenindustrie ist es also eminent wichtig, parallel mit einer Steigerung der Produktqualität die anfallenden Produktentstehungszeiten sowie Entwicklungs- und Fertigungskosten zu reduzieren (vgl. [REINHART U. A. 1994], [RANDOW 1998]).

In diesem Zusammenhang rückt die Leistungsfähigkeit der Produktentwicklung zunehmend als entscheidender Wettbewerbsfaktor in den Vordergrund. In dieser frühen Phase der Produktentstehung werden viele der für die spätere Qualitätsbewertung des Produktes durch den Kunden relevanten Faktoren, wie Funktion, Design und Kosten, in hohem Umfang festgelegt. Lösungsansätze zur Verbesserung von Effektivität und Effizienz der Produktentwicklung bietet die Einführung und der Einsatz neuer Strategien und Methoden der modernen Produktentwicklung (s. Bild 1.1). Wesentliche Impulse liefern hierzu die Konzepte des *Concurrent Simultaneous Engineering* (kurz CSE; Begriff nach [BULLINGER & WARSCHAT 1996]), die auf den Grundgedanken der Parallelisierung, Integration und Standardisierung beruhen. Ausgehend von einer prozessorientierten Sicht der Produktentwicklung als Teilprozess der gesamten Produktentstehung wird der Aufbau durchgängiger und integrierter Prozessketten angestrebt. Neben aufbau- und ablauforganisatorischen Aspekten kommt insbesondere der Unterstützung der Entwicklungsprozesskette mittels moderner Informations- und Kommunikationstechnologien eine zentrale Funktion zu. Der systematische Einsatz der 3D-CAD-Technologie in Verbindung mit Daten- und Projektmanagementsystemen sowie unterschiedlichsten CAE-Engineeringwerkzeugen eröffnet grundsätzlich die Möglichkeit, vorgegebene Entwicklungsziele effizienter zu erreichen

und Entwicklungsrisiken zu vermindern. Die digitalen Rechnermodelle werden dabei als sogenannte *virtuelle Prototypen* genutzt, um anhand von Simulationsuntersuchungen selbst Produkteigenschaften komplexer Systeme möglichst effizient und frühzeitig im Entwicklungsprozess bewerten und optimieren zu können. Damit soll noch vor der Fertigung des ersten physischen Produktexemplars abgesichert werden, dass die geforderten Leistungsdaten zuverlässig erreicht werden. Somit lassen sich zeit- und kostenaufwendige Nachbesserungen und Mängelbeseitigungen in späteren Produktenstehungsphasen vermeiden. Zudem können die 3D-Produktdaten für Aufgaben in späteren Phasen der Prozesskette, z. B. zur Fertigungs- und Montageplanung, weiterverwendet werden. Auf diese Weise kann insgesamt eine Verkürzung der Produktenstehungszeiten von der Idee bis zum ersten real gefertigten, kundengerechten Produkt erzielt werden.

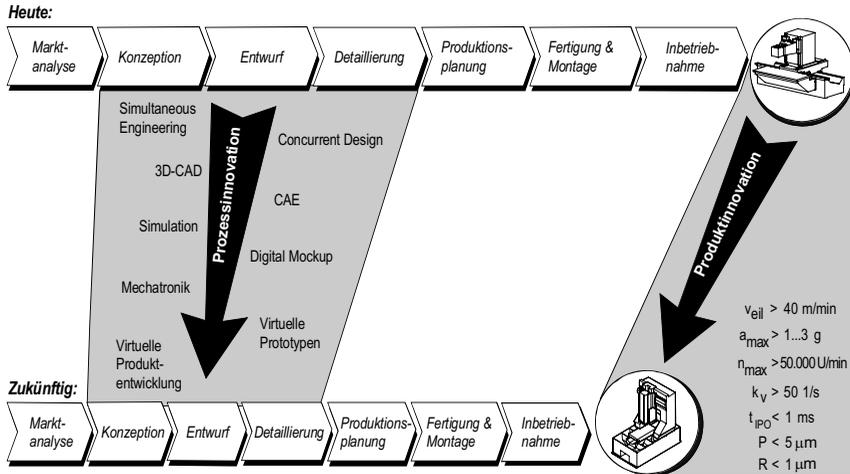


Bild 1.1: Innovation von Produktentwicklungsprozess und Produkt – Herausforderungen und Chancen im Werkzeugmaschinenbau

Führende Werkzeugmaschinenunternehmen planen bzw. realisieren derzeit den Einstieg in die 3D-CAD-Technologie, um damit ihre Wettbewerbsfähigkeit zu sichern und zu steigern. Damit wird auch die Absicht verbunden, im Konstruktionsprozess vermehrt rechnergestützte Berechnungsmethoden zur Analyse und Optimierung komplexer Produkteigenschaften einzusetzen (z. B. [KLENK 1997]). Allerdings fehlt ein ausreichend an die Entwicklung von Werkzeugmaschinen angepasster Methodenbaukasten, um den damit verbundenen, höheren Aufwand im Entwicklungsprozess entsprechend effizient umzusetzen. Ferner erfüllen die verfügbaren Software-Systeme die funktionellen Anforderungen, die sich aus den spezifischen Eigenschaften des Produktes „Werkzeugmaschine“ ergeben, häufig nicht

bzw. nur unzulänglich (vgl. [WECK & DAMMER 1997]). Die Einführung konstruktionsbegleitender Berechnungs- und Optimierungsschritte, die über einfache Auslegungs- und Dimensionierungsrechnungen hinausgehen, ist vielen Werkzeugmaschinenunternehmen zur Zeit aufgrund der organisatorisch-personellen Struktur und der wirtschaftlichen Situation nicht möglich. Aus Zeit- und Kostengründen werden komplexe Berechnungsmethoden häufig erst beim Auftreten von Problemfällen an einem real ausgeführten Prototypen angewandt [SCHNEIDER 2000].

Um die anerkannten Potentiale moderner, rechnergestützter Produktentwicklungsmethoden in der Werkzeugmaschinenindustrie noch umfassender nutzbar zu machen, ist ein weiterer Transfer an die spezifischen Anforderungen des Werkzeugmaschinenbaus zu leisten. Insbesondere die verfügbaren CAE-Berechnungswerkzeuge und die Methoden zu deren Anwendung sind noch gezielter für die technologischen Problemstellungen einer Werkzeugmaschinenentwicklung aufzubereiten [REINHART U. A. 1998].

1.1.2 Höhere Produktivität durch gesteigerte Bewegungsdynamik

Ein Lösungsansatz zur Erhöhung der Maschinenproduktivität, der insbesondere von Herstellern von Fräsbearbeitungsmaschinen angestrebt wird, ist die gravierende Steigerung der Bewegungsdynamik der Maschinen. Hierunter ist vor allem eine Steigerung des Beschleunigungsvermögens zu verstehen, wodurch sich eine Verbesserung der dynamischen Bahngenauigkeit realisieren lässt, und erst in zweiter Linie eine Erhöhung der maximalen Verfahrensgeschwindigkeit. Dieser generelle Entwicklungstrend gilt gleichermaßen für Maschinenkonzepte zur Umsetzung fortschrittlicher Zerspantechnologien mit erhöhter Schnittgeschwindigkeit (*High-Speed-Cutting* HSC) als auch für Werkzeugmaschinen für konventionelle Bearbeitungsstrategien. Dabei ist die HSC-Bearbeitung in unterschiedliche Anwendungsbereiche zu differenzieren: Die gegenüber konventionellen Zerspanverfahren um das 5- bis 10-fach gesteigerten Schnittgeschwindigkeiten erlauben entweder eine Reduktion der Prozesskräfte bei Bearbeitung mit konventionellen Vorschüben ($v_f = 0,5\text{--}10\text{ m/min}$) und gleichen Zeitspannungsvolumina oder die Steigerung der Spanleistung durch höhere Vorschubgeschwindigkeiten ($v_f = 5\text{--}30\text{ m/min}$) bei vergleichbarem Schnittkraftniveau (vgl. [SCHULZ 1996A], [WECK & SCHUMACHER 1997]).

Eine Erhöhung der maximalen Achsbeschleunigung sowie der erreichbaren Verfahrensgeschwindigkeiten der Maschinenachsen kann in unterschiedlicher Weise produktivitätssteigernd genutzt werden:

- *Höhere Bearbeitungsgenauigkeit und Maschinenfähigkeit:* Die hochgenaue Einhaltung einer technologisch optimalen Bahnvorschubgeschwindigkeit entlang einer programmierten Raumkontur durch die simultane Bewegung mehrerer, interpolierender Achsen erfordert deren ständiges Beschleunigen und Abbremsen. Somit bildet die Steigerung der Achsbeschleunigungen eine unerlässliche Voraussetzung für die angestrebte

Verbesserung der dynamischen Bahngenaugigkeit und damit der Präzision (Maßhaltigkeit und Formgenauigkeit) des gefertigten Bauteils (vgl. [HEISEL U. A. 1996]).

- *Niedrigere Haupt- und Nebenzeiten:* In Verbindung mit höheren Schnittgeschwindigkeiten wird eine deutliche Steigerung der beim Bearbeiten nutzbaren Bahnvorschubgeschwindigkeit möglich bzw. aus technologischen Gründen zwingend notwendig [LEWIS 1995], wodurch sich eine wirkungsvolle Reduktion der Hauptzeiten erzielen lässt. Dies ist von elementarer Bedeutung für hauptzeitintensive Bearbeitungsoperationen, wie sie z. B. im Werkzeug- und Formenbau typisch sind. Außerdem können auch alle nebenzeitrelevanten Bewegungsabläufe, wie Reversierbewegungen oder Werkzeugwechsel, in signifikant kürzerer Zeit absolviert werden. Dieser Vorteil kommt nicht zuletzt bei der Komplettbearbeitung prismatischer Werkstücke mit aufeinanderfolgenden Fräs-, Senk-, Bohr- und Gewindebearbeitungsoperationen zum Tragen (vgl. [KAUFELD 1996]).
- *Reduktion von Fertigungskosten:* Eine erhöhte Bewegungsdynamik der Maschine erlaubt, die Zeitanteile im Bearbeitungsablauf mit konstanten, optimalen technologischen Zerspanbedingungen für den Fräsvorgang maßgeblich zu steigern (z. B. konstanter Vorschub pro Schneide). Dies bewirkt i.a. eine deutliche Verlängerung der Werkzeugstandzeiten (vgl. [WECK & BRECHER 1997]), was zu einer vorteilhaften Reduzierung der Maschinenbetriebskosten beiträgt. Außerdem können in Verbindung mit HSC-Bearbeitungsstrategien auch höhere Oberflächenqualitäten erreicht werden, wodurch sich bei Schlichtbearbeitungen bereits Finishing-Qualität erzielen lässt und damit Folgebearbeitungsschritte eingespart werden können [SCHULZ 1996A].

Die zur Nutzung dieses Rationalisierungspotentials notwendige Leistungssteigerung der Maschinendynamik verdeutlichen folgende Zusammenhänge zwischen maximaler Vorschubgeschwindigkeit, erforderlichlichem Beschleunigungsvermögen und Regelungsdynamik der Vorschubachsen, z. B. bei einer Kreis- oder Eckenfahrt mit Krümmungsradius. Um bei gegebener Kreiskontur die nutzbare Bahnvorschubgeschwindigkeit verdoppeln zu können, ist die vierfache Achsbeschleunigung notwendig. Um hierbei keine höhere Bahnabweichung zuzulassen, muss die Geschwindigkeitsverstärkung der Achslageregler (k_v -Faktor) ebenfalls verdoppelt werden [HEISEL U. A. 1996], [PRITSCHOW 1996]. Aktuelle Serienmodelle von Fräsbearbeitungszentren erreichen Werte von bis ca. 0,2–1 g Maximalbeschleunigung bei Eilgängen von 30–60 m/min. Für neue Maschinengenerationen werden unter technologischen und wirtschaftlichen Aspekten derzeit Kombinationen von 1,5–3 g Beschleunigung bei maximalen Verfahrgeschwindigkeiten von 60–90 m/min als sinnvoll realisierbare und fertigungstechnisch nutzbare Zielgrößen angegeben (vgl. [FEINAUER 1998]).

Zur Bewertung des dynamischen Leistungsvermögens einer Werkzeugmaschine dürfen allerdings nicht nur die Angaben über die projektierten Maximalwerte der Achsbeschleunigungen und –verfahrgeschwindigkeiten herangezogen werden. Vielmehr sind diese stets