Józef KRZYŻANOWSKI, Wacław SKOCZYŃSKI, Józef ILCZYSZYN

Institut für Fertigungstechnik und Automatisierung
Technische Universität, Wrocław, Polen

BEWERTUNG DES VERFORMUNGSVERHALTENS BEIM RECHNERUNTERSTÜTZTEN KONSTRUIEREN VON WERKZEUGMASCHINEN

Zusammenfassung. In einzelnen Phasen des Produktentwicklungsprozesses tritt die Notwendigkeit der Konstruktionslösungsbewertung auf. Im Maschinenbau nimmt man in der Regel dabei, das Verformungsverhalten der Struktur unter Prozeßbelastungen, als wichtigstes Bewertungskriterium an. Diese Aufgabe ist, bei Strukturen von hohen Komplexität, nur mit Hilfe der Rechnerunterstützung lösbar. Im folgenden Beitrag wurde auf die Bedeutung der richtigen Bestimmung sowohl des Belastungszustandes als auch Bewertungskennwertes und entsprechenden Bezugswertes hingewiesen. Es wird ein im IFA der TU Wrocław entwickeltes System zur rechnerunterstützten Bewertung des statischen Verformungsverhaltens von Werkzeugmaschinen dargestellt.

1.Einleitung

Die Rechnerunterstützung des Konstruktionsprozesses wird meistens von den drei Hauptgesichtspunkten betrachtet:

- Verbesserung der Zugänglichkeit der Wissens- und Erfahrungsbestände sowie der Normen- und Katalogendaten,
- Befreiung des Konstrukteurs von den routinemäßigen Tätigkeiten bei der Aufstellung der Konstruktionsunterlagen,
- Ausnutzung, bei der Konstruktionsbewertung und -optimierung, der vom den aktuellen Stand der Technik angebotenen, potentiellen Möglichkeiten der rechnerischen und experimentellen Ermittlung der statischen, dynamischen und thermischen Verformungen der Maschinenstruktur.

Vor Allem dem dritten Aspekt gilt besondere Aufmerksamkeit, da sich das Problem der Konstruktionslösungsbewertung durch das ganze Produktentwicklungsprozeß durchzieht (Bild 1) und zugleich die Ausnutzung der genannten Möglichkeiten in der industriellen Praxis auf erhebliche Schwierigkeiten stößt.

Werkzeugmaschinen bilden Konstruktionen von hohem Komplexitätsgrad in Hinsicht sowohl auf ihre Struktur als auch auf die prozeßbedingte Belastungszustände. Erst also gegenwärtig haben die rasche Fortschritte der Informatikentwicklung die reelle Möglichkeiten der analytischen Ermittlung der Strukturverformungen geschaffen. Gleichzeitig entwickelten sich auch die rechnerunterstützte

Untersuchungsmethoden. Um diese Möglichkeiten auszunutzen muß man aber über einsatzfähige Bewertungsmethoden verfügen, die sowohl bei der Nachrechnung, als auch bei der Variantenrechnung effektiv einzusetzen sind. Es ist anzustreben, daß diese Bewertungsmethoden auch beim Auswerten der Untersuchungsergebnissen anwendbar wären.

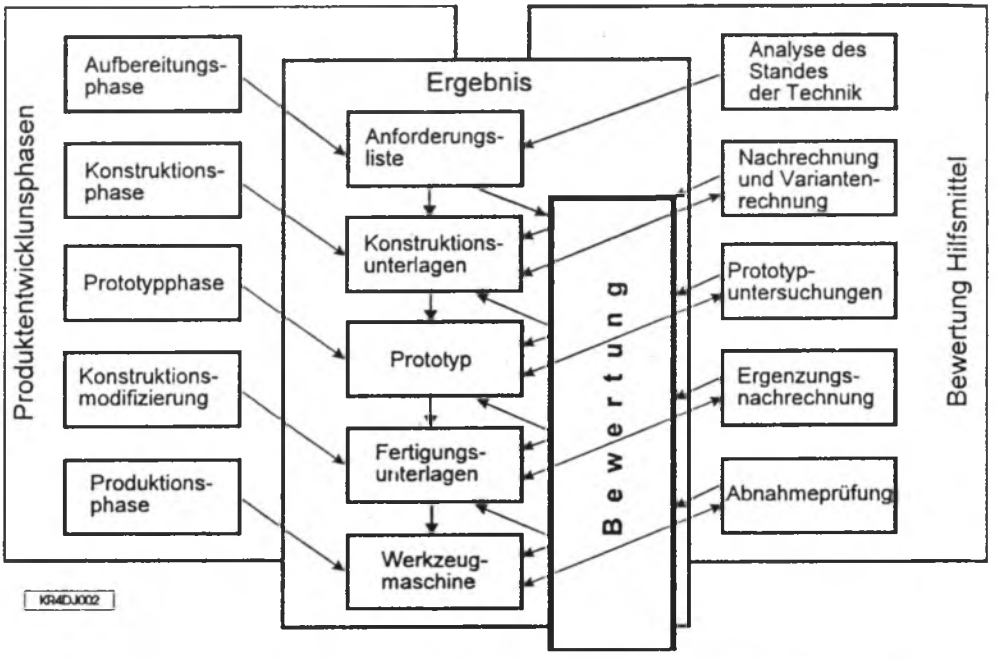

Bild 1. Schematische Darstellung des Produktentwicklungsprozesses im Werkzeugmaschinenbau

2. Voraussetzungen und Vorgehensweise bei der Überprüfung und Bewertung des Veformungsverhaltens

Vorgehensweise bei der analytischen Nachprüfung des Verformbarkeit einer Konstruktion zeigt das Bild 2. Aussagefähigkeit der Bewertungsergebnissen hängt entscheidend von der richtigen Formulierung und Lösung der vier folgenden Aufgaben ab:

I - Berechnungsmodellbildung,
II - Ermittlung des Belastungszustandes,
III - Bestimmung des Eigenschaftsbewertungskennwertes,
IV - Ermittlung des Bezugswertes für den Bewertungskennwert.

In das Berechnungsmodell sind alle Konstruktionsparameter und Zusammenhänge einzubeziehen, die einerseits die zu prüfende Konstruktionseigenschaften und andererseits das Betriebsverhalten der zu konstruierenden Maschine wesentlich beeinflußen.

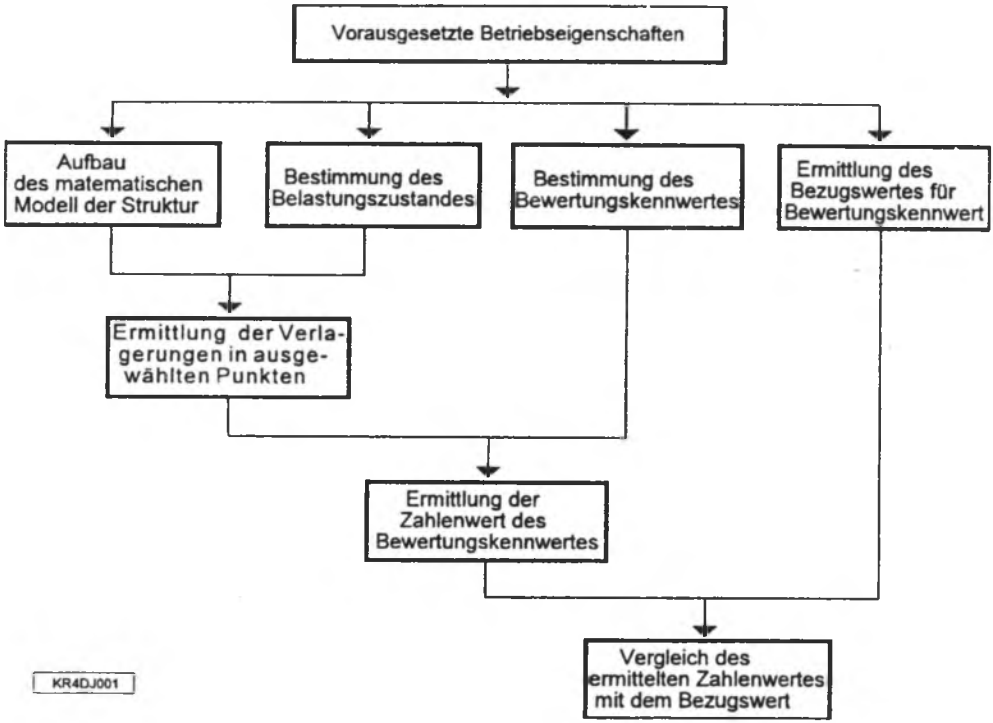

Bild 2. Vorgehensweise bei der Bewertung des Maschinenverformungsverhaltens

Die bei der Nachprüfung angenommene Belastungszustände sollen vor allem möglichst gut die reelle Betriebsbedingungen modellieren und zugleich repräsentativ für alle unter diesen Bedingungen auftretende Prozeßbelastungen sein, wobei hier unter dem Begriff *Belastungszustand* die Gesamtheit der folgenden Daten zu verstehen ist:

- Anzahl der, direkt oder indirekt mit dem realisierten Prozeß verbundenen Belastungskräfte (oder Momente),
- Koordinaten der Angriffspunkte dieser Kräfte,
- Belastungskräftevektorenkoordinaten.

Veränderlichkeit des Belastungszustandes bedeutet also, in den folgenden Betrachtungen, Variabilität dieser Parameter.

Maschinenkonstruktionen können, in Hinsicht auf ihre Belastungszustände, auf drei Gruppen geteilt werden:

1 - Systeme mit unveränderlichem Belastungszustand,

2 - Systeme mit den sich zyklisch wiederholenden Belastungszustandsänderungen, wobei die Belastungszyklen konstant bleiben; als Beispiel können hier die Sonderwerkzeugmaschinen genannt werden,

3 - Systeme mit der stochastischen Variabilität des Belastungszustandes; zu dieser Gruppe gehören Universalwerkzeugmaschinen. Ermittlung des represäsentativen Belastungszustandes bildet, bei dieser Maschinengruppe, die komplizierteste Aufgabe.

Die große Bedeutung ist der Bestimmung des Eigenschaftskennwertes beizumessen. Um die Eindeutigkeit und Aussagefähigkeit der Bewertung zu sichern muß dieser Kennwert:

- den Einfluß, der betrachteten Eigenschaften, auf das Betriebsverhalten der Maschine qualitativ (und wenn möglich auch quantitativ) korrekt ausdrücken,
- representativ sein für die Gesamtheit sowohl der Belastungszuständen, wie auch der Maschinenstrukturanordnungen, die beim Betrieb auftreten können.

Im Wesen der Bewertung liegt der Vergleich der Berechnungs- oder Meßergebnissen mit dem Bezugswert. Bei der Festigkeitsberechnungen ist dieser Wert, in der Regel, bekannt. Bei der Überprüfung des Strukturverformungsverhaltens dagegen stehen aber heutzutage keine Werte zu Verfügung (vgl. [1] und [2]). Es wurde zwar versucht diese als Mittelwerte aus der Untersuchungen an einem repräsentativen Werkzeugmaschinenspektrum zu gewinnen, aber die durchgeführte, breit angelegte statistische Untersuchungen haben keine eindeutige, zufriedenstellende Ergebnisse geliefert [1]. Die Ursachen dafür liegen darin, daß erstens die verwendete Kennwerte keine Eindeutigkeit der Bewertung sichern, und zweitens, daß die zulässige Verformungen eng mit den an die Maschine gestellten Funktionsforderungen verbunden werden sollen. Demnach kann es also keine allgemeingültige Werte geben. Die nötige Bezugswerte sind also, in jedem Bewertungsfall, aus diesen Anforderungen abzuleiten.

Aus der o.g. vier Hauptaufgaben, die bei der Bewertung des Verformungsverhaltens zu lösen sind, wird heutzutage nur die Berechnungsmodellbildung ausreichend entwickelt, wobei in Hinsicht auf die Möglichkeiten der Modellparameterbestimmung, sind die vorhandene Methoden nur bei der Ermittlung des statischen Verhaltens effektiv einsetzbar. Selbst aber in dem Falle werden die, dieses Verhalten beschreibende, Kennwerte meist *a priori* angenommen ohne ihre Aussagefähigkeit zu überprüfen In der Regel sind das, für nur einen ausgewählten Belastungszustand definierte Steifigkeits- oder Nachgiebigkeitswerte. Es ist zu unterstreichen, daß entsprechende Bezugswerte im Allgemeinen fehlen, was das ganze Bewertungsverfahren in Frage stellt [3].

3. Aufbau des Systems zur rechnerunterstützten Bewertung des Verformungsverhaltens an Werkzeugmaschinen

Im Institut für Fertigungstechnik und Automatisierung der Technischen Universität Wrocław wurde ein System zur Bewertung des Verformungsverhaltens von Werkzeugmaschinen entwickelt, dessen Aufbau sich auf der dort ausgearbeiteten Bewertungsmethode stützt [3] (Bild 3). Die vom diesen System verarbeiteten Daten sind die, durch die Belastungskräfte hervorgerufene, Verlagerungen der ausgewählten Punkten der Maschinenstruktur. Bei dieser Voraussetzung ist ohne Bedeutung ob die Verlagerungswerte aus der Berechnungen oder Messungen kommen. Wichtig ist nur, daß diese der angenommen Bewertungsmethode gemäß ermittelt wurden.

Der Aufbau des Systems entspricht dem im Bild 2 dargestellten allgemeinen Bewertungsalgorithmus. Es wurde an ein, ebenfalls im IFA der TU Wrocław entwickelten, Berechnungssystem zur Ermittlung des Verformungsverhaltens der Spindel-Lager-Systeme angeschloßen. Dies erlaubte den Arbeitsaufwand bei der Eigenschaftsbewertung wesentlich zu reduzieren.

Aktuell wird das System für die Bewertung von statischen Eigenschaften der Drehmaschinen voll ausgebaut. Dies bedeutet, daß für diesen Maschinenart wurden in den Systemdatenbasen alle notwendigen Daten gesammelt und gespeichert.

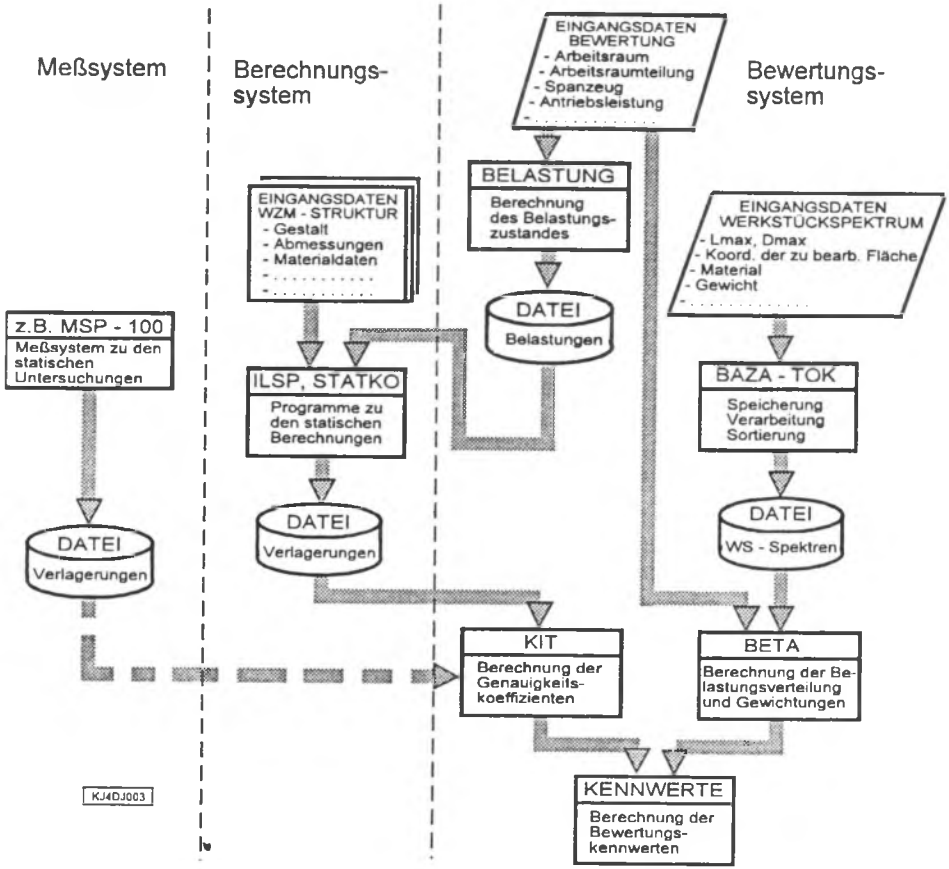

Bild 3. Aufbau des im IFA der TU Wrocław entwickeltes Bewertungssystems

4. Grundlagen der Bewertungsmethode

Bei der Formulierung der Methode zur Bewertung des statischen Eigenschaften wurde als Ausgangspunkt der, von der Maschinenverformungen auf die Fertigungsgenauigkeit ausgeübte Einfluß angenommen, da diese Verformungen sich unmittelbar, durch die relative Verlagerung des Werkzeugs gegenüber dem Werkstück im Arbeitsraum der Maschine, auswirken. Bei der Flächenerzeugung ändert sich die Lage des Wirkpunktes (und damit auch des Zerspankraftvektors) gegenüber der Struktur der Maschine und gleichzeitig ändert sich auch diese Struktur, infolge der Bewegungen der Baugruppen (Support, Tisch, Spindelkasten usw.). Die in verschiedenen Punkten des Arbeitsraums ermittelten Eigenschaftskennwerte können sich demgemäß beträchtlich untereinander unterscheiden. Die angenommene Bewertungskenngröße soll also das möglichst optimale Maß für die Eigenschaftsverteilung im ganzen Arbeitsraum der Maschine bilden. Gleichzeitig, um die Eindeu-

tigkeit der Bewertung zu sichern, soll bei Drehmaschinen die Tatsache berücksichtigt werden, daß die gleichen relativen Werkzeug-Werkstück-Verlagerungen völlig andere Auswirkung auf die Fertigungsgenauigkeit (ISO Qualität) ausüben können. Diese hängt vom Drehdurchmesser (radiale Lage des Wirkpunkts) ab. Die Fertigungsgenauigkeit wird mittels ISO-Qualität IT beschrieben, wobei in einem Nennmaßbereich jeder IT-Zahl ein bestimmter Maßabweichungsbereich (Toleranzfeld) zugeschrieben ist. Da für die Bezeichnung der ISO-Qualität ganze Zahlen verwendet werden, weist der Zusammenhang zwischen Genauigkeit und Maßabweichungen einen unstetigen Charakter auf. Um diesen Nachteil zu überwinden wurde die Tatsache ausgenutzt, daß die ISO-Qualität in allen Nennmaßbereichen monoton von den Maßabweichungen abhängt. Dies erlaubte einen Genauigkeitskoeffizienten K_{IT} einzuführen, der alle reellen Werte annehmen kann. Die in ISO-Normen angegebenen Zahlenwerte (siehe DIN 7151) erlauben die Abhängigkeit des K_{IT}-Koeffizienten von der Durchmesserabweichung Δd folgend ausdrücken [3]:

$$K_{IT} = 5 \lg(\Delta d) - 1{,}6 \lg(d) + 2{,}5 \qquad (1)$$

hierbei ist: K_{IT} - Genauigkeitskoeffizient,
Δd - Durchmesserabweichung in mm,
d - Drehdurchmesser in mm.

Mit Hilfe der Abhängigkeit (1) kann die Menge der Wirkpunktverlagerungsvektoren in eine ihr entsprechende Menge der Genauigkeitskoeffizienten K_{IT} umgewandelt werden. Eine für den ganzen Arbeitsraum der Maschine globale Bewertungskennzahl W^S wurde als gewichtete Mittelwert der Genauigkeitskoeffizienten K_{IT} definiert:

$$W^S = \sum_{j=1}^{n} w_j K_{IT} \qquad (2)$$

hierbei ist: W^S - Bewertungskennzahl für statisches Verformungsverhalten,
K_{IT} - Zahlenwert des Genauigkeitskoeffizienten in dem j-ten Elementarfeld,
w_j - dem j-ten K_{IT}-Koeffizient zugeschriebene Gewichtung,
n - Anzahl der Arbeitsfeldelemente.

Der Gewichtungskoeffizient w_j drückt dabei die Wahrscheinlichkeit aus, daß die Zerspankraft in dem j-ten Arbeitsfeldelement auftreten wird, wobei das Arbeitsfeld, in Hinsicht darauf, daß die Verlagerungen diskret Ermittelt werden können, wird auch diskretisiert durch die Teilung auf Elemente. Um die Gewichtung w_j zu ermitteln, wurden statistische Untersuchungen an einem repräsentativen Drehteilespektrum durchgeführt und die gewonnenen Informationen in einer Datenbasis zusammengefaßt. Sie enthält z.Z. Daten über ca 2000 Drehteile. Die Organisation der Datenbasis ermöglicht eine einfache Bildung der Teilmengen gemäß den Bewertungsbedingungen. So wird z.B. die Datenmenge an die Dimensionen des Arbeitsraums der zu bewerteten Werkzeugmaschine angepaßt, um die Werkstücke, die auf der betreffenden Maschine nicht bearbeitet werden können, auszuschließen. Der Bezugswert für die Bewertungskennzahl W^S soll aus den, an die konstruierte Werkzeugmaschine gestellten Betriebsanforderungen (hinsichtlich der Fertigungsgenauigkeit) hervorgehen. Sollen diese nicht formuliert werden (und so ist es heutzutage in der Praxis üblich) so wurde die Annahme vorgeschlagen, daß die Verformbarkeit der Maschine, bei voller Ausnutzung ihrer Antriebsleistung, das Erreichen einer Genauigkeit zulassen soll, welche den Maßen ohne Toleranzangaben bei dem Fertigungsgenauigkeitsgrad "mittel" oder "fein" entsprechen (ungefähr IT13 oder IT12).

Das im Bild 4 dargestellte Berechnungssystem zur Bewertung der statischen Eigenschaften von Drehmaschinen setzt sich aus einigen Programmodulen zusammen, die miteinander mit dem Verwaltungsprogramm LATHE verbunden sind. Das Programm LATHE ermöglicht, neben Verwaltungsfunktionen, die Eingabe der den Arbeitsraum beschreibenden Daten wie: Abmessungen, Teilung und

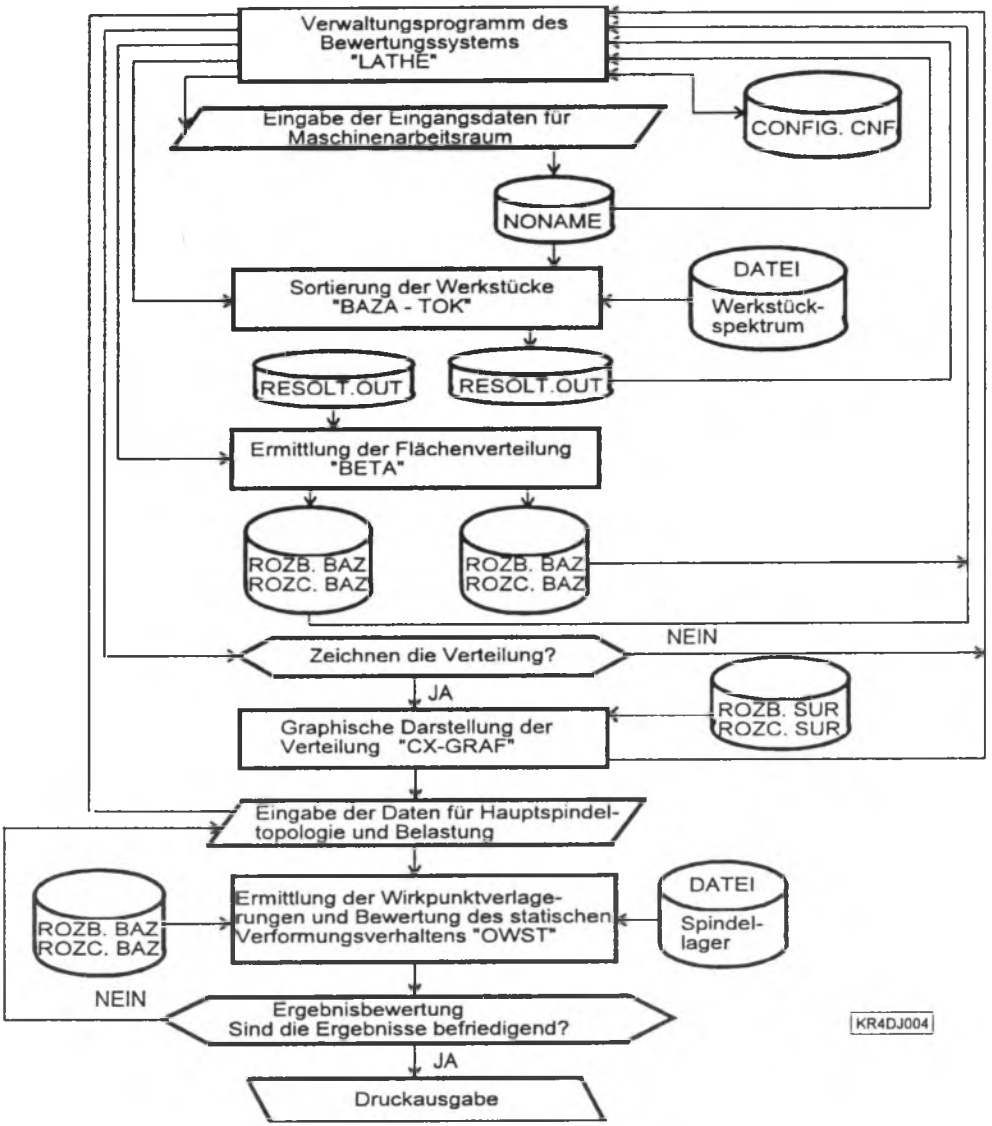

Bild 4. Struktur des Programmsystems zur Bewertung der statischen Eigenschaften von Drehmaschinen

Teilungsschritt. Das Programm zur Bedienung der Datenbasis BAZA-TOK dient der Sortierung der Werkstücke nach angegebenen Kriterien und erlaubt die Einführung von zusätzlichen Daten, sowie ihre Ausgabe, Aktualisierung und Kontrolle. Das Ziel des Unterprogramms BETA ist die Ermittlung (aus Daten, die die nach dem Sortierungsablauf gebildene Werkstückteilmenge beschreiben) der statistischen Verteilung der zu bearbeitenden Flächen im Arbeitsraum der betrachteten Maschine. Das Unterprogramm OWST erlaubt die Ermittlung der Verformungen des Hauptspindelsystems und

der Bewertungskennzahlen [4]. Es können dabei interaktiv die Daten über Hauptspindeltopologie, Anzahl der Stützstellen, Lagerart, Belastungen, Abmessungen des Arbeitsraums und Spindelantrieb, angegeben werden. Mittels des Programms OWST werden die von den statischen Verformungen bedingten Verschiebungen des Wirkpunktes, sowie auch die Bewertungskennzahlen ermittelt, unter Berücksichtigung der Verteilung der Belastungshäufigkeit im Arbeitsraum und der Verformungen des Werkzeugsystems (wenn man über diese Informationen verfügt). Die mit diesem Programm verbundene Datenbasis enthält Daten über alle Wälzlagerarten, die bei der Lagerung der Werkzeugmaschinenhauptspindeln Einsatz finden.

5. Schlußfolgerungen

Das dargestellte Bewertungssystem hat in der Praxis den Einsatz beim Umkonstruieren des Hauptspindelsystems einer numerisch gesteuerten Futterdrehmaschine gefunden. Um eine Anwendung auch bei der experimentellen Analyse zu ermöglichen, wurde eine entsprechende Meßmethode entwickelt, die sowohl die Belastung als auch die Messung der Verlagerung in beliebigen Punkten des Bearbeitungsfelds realisieren läßt [3].

Die in der Bewertungsmethode ausgenutzte Datenbasis wird ständig um die Beschreibung von weiteren Werkstücke ergänzt.

Bei der Verbreitung der flexiblen Fertigungssysteme wird die Erfassung in den Datenbasen (zwecks Ausnutzung bei der automatischen Gestaltung des Bearbeitungsablaufs) der anzufertigenden Werkstücke, vor allem hinsichtlich der zu bearbeitenden Flächen, notwendig sein [5],[6]. Es wird also die Möglichkeit bestehen, diese Daten (nach ihrer Umsetzung) auch zur Ermittlung der Belastungsverteilung bei der Bewertung der Maschineneigenschaften auszunutzen.

Schrifttum

1. Weck M.: Werkzeugmaschinen, Bd.4 - Meßtechnische Untersuchung und Beurteilung, VDI-Verlag, Düsseldorf 1985.
2. DIN 8602, Verhalten von Werkzeugmaschinen unter statischer und thermischer Beanspruchung, 1985.
3. Krzyżanowski J: Grundlagen zur Bewertung des Verformungsverhaltens von Werkzeugmaschinen (in Polnisch), Wyd.Pol.Wroc., Wroclaw 1990.
4. Krzyżanowski J., Ilczyszyn J., Skoczyński J., Rutkowska I.: Bearbeitung des Programmsystems zur Bewertung des statischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen (in Polnisch), Raport Inst. Techn.Masz. i Automat. P.Wr., Ser.: Sprawozdania Nr 11/91, (unveröffentlicht).
5. Michaelis D.: Rechnergestützte Werkstückanalyse zur Auslegung von Fertigungsmitteln, Industrie Anzeiger, 1982, 83.
6. Tönshoff H.K., Bussman J., Granow R.: Untersuchung von Werkstückspektren bei der Entwicklung eines Fertigungssystems zur Drehteilbearbeitung, VDI-Zeitschrift, 1981, 17, 721-727.

Gutachter: Jan Kosmol