

# Berechnung der Verformung des Gestells einer Werkzeugmaschine

D. Fels, U. Gabbert, W. Funke, A. Buß

## 1. Einleitung

International hat sich im Werkzeugmaschinenbau als geeignetes Berechnungsverfahren für komplexe Bauteile die Finite-Elemente-Methode in der Praxis weitgehend durchgesetzt [1], [2]. Neben dem Berechnen des statischen Verformungsverhaltens von Gestellen, Betten, Spindelkästen, Bettschlitzen, Werkzeugträgern und Reitstöcken wird in einigen Arbeiten auch auf die Ermittlung von Verformungen unter Einbeziehung von Fugen (3) sowie von Kontaktkräften und Flächenpressungen an Werkzeugmaschinenführungen [4] hingewiesen. Auf die Berechnung thermischer Verformungen von Maschinenbaugruppen mit einem Finite-Elemente-Programm wird in [5] eingegangen.

Zur Abschätzung des statischen Verhaltens einer Futterteildrehmaschine wurden im Jahre 1977 erste eigene Untersuchungen durchgeführt. Dies gelang dem Maschinenhersteller damals nur in Kooperation mit der Sektion Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen der TU Dresden und dem Institut für Schiffbau in Rostock. Es konnte nachgewiesen werden, daß die Verformung des Bettes dieser Maschine einen relativ geringen Anteil an der Schnittstellenverformung hat.

Der hohe personelle Aufwand insbesondere im Bereich der Datenbereitstellung (Netzgenerierung und die hohen Rechnerkosten – Fremdenrechenzentrum) ließen aus ökonomischen Gründen weitere Anwendungen nur noch im begrenzten Umfang zu.

Erst mit dem Einstieg in die Nutzung des universellen Programmsystems – COSAR – und der damit gegebenen Möglichkeit der Nutzung der eigenen Rechentechnik wurde wieder systematisch an der rechnergestützten Verbesserung des statischen Verformungsverhaltens von Drehmaschinen gearbeitet.

## 2. Problemstellung – allgemein

Weltweit wird an der Verbesserung der Produktivität beim Drehen gearbeitet. Eine Zielrichtung besteht darin, die Produktivität pro Fläche zu erhöhen. Dies führte im Bereich der Mittel- und Großserienfertigung schon seit geraumer Zeit zur Entwicklung von Doppelspindeldrehmaschinen, die international als Senkrechtdrehmaschinen und als Frontdrehmaschinen vorhanden sind. Seit 1987 erfolgte mit sogenannten koaxialen Doppelspindlern das Eindringen in die Bereiche der Mittel- und Kleinserienfertigung. Bei all diesen Doppelspindlern tritt im Gegensatz zu den Einspindlern das Problem auf, daß eine gegenseitige Beeinflussung der Drehergebnisse dann gegeben ist, wenn der Kraftfluß der beiden ansonsten unabhängig voneinander

der arbeitenden Drehsysteme über ein gemeinsames Grundgestell erfolgt. Diese Art der Kopplung ist in vielen Fällen zwingend erforderlich.

Mit Beginn der Entwicklung einer neuen Frontdrehmaschinenbaureihe wurde die Zielstellung vorgegeben, daß eine gegenseitige Beeinflussung der Drehergebnisse infolge statischer, dynamischer und thermischer Einflüsse im Bereich der konzipierten technischen Parameter sowie bei Einhaltung kontinuierlicher Drehvorgänge nahezu ausgeschlossen wird.

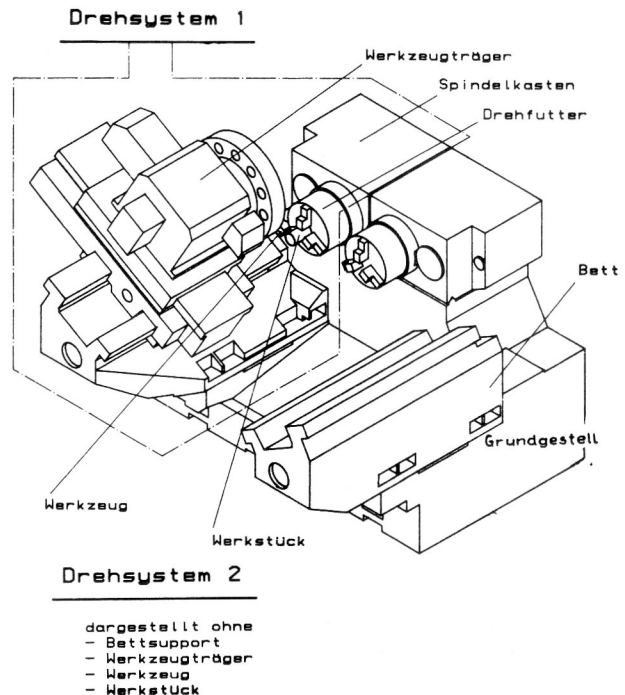
## 3. Aufgabenstellung

In Bild 1 ist der prinzipielle Aufbau einer Doppelspindel-Frontdrehmaschine dargestellt. Ausgewiesen sind die beiden unabhängig arbeitenden Systeme mit ihren Bausteinen:

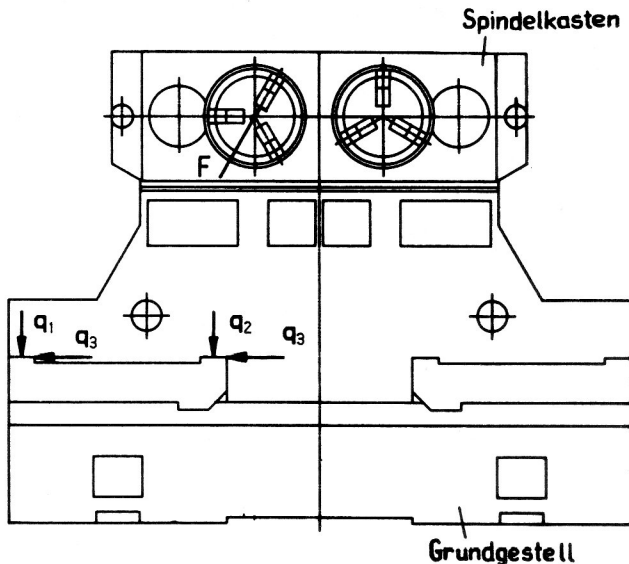
- Spindelkasten – Drehfutter – Werkstück – Werkzeug – Werkzeugträger – Bett.

Der Kraftfluß wird bei beiden Systemen über ein gemeinsames Grundgestell geschlossen.

Bei der Optimierung des statischen Verformungsverhaltens, dies soll im folgenden näher betrachtet werden, ist



**Bild 1**  
 Aufbau einer Doppelspindel-Frontdrehmaschine



**Bild 2**  
DFF – System Maschine Krafterleitung Lastfall 1

vorrangig darauf zu achten, daß Verlagerungen an der Wirkstelle Werkzeugschneide – Werkstück, die durch statische Kräfte des anderen Drehsystems hervorgerufen werden, ein Minimum anstreben.

Bei der durchzuführenden FE-Analyse sollten 4 Lastfälle zur Sicherung gezielter konstruktiver Arbeiten betrachtet werden.

**Lastfall 1:** vgl. Bild 2

- Belastung mit der Hauptschnittkraft  $F_H$  im Drehsystem 1
- Krafterleitung: in Spannbacken des Drehfutters, identisch mit Krafterleitung bei den experimentellen Untersuchungen,
- Drehsystem 2 unbelastet

**Lastfall 2:**

- Belastung mit Passivkraft  $F_P$  im Drehsystem 1,
- Drehsystem 2 unbelastet

**Lastfall 3:**

- Belastung durch die im Bearbeitungsprozeß auftretenden Kräfte  $F_H$ ,  $F_P$ ,  $F_V$   
Kraftangriffspunkt: Werkstückdurchmesser 250 mm  
Werkstücklänge 125 mm
- Drehsystem 2 unbelastet

**Lastfall 4:**

- In beiden Drehsystemen wirken die Kräfte  $F_H$ ,  $F_P$ ,  $F_V$ .
- Kraftangriffspunkt: wie Lastfall 3.

Es wurde vereinbart, die auf das Grundgestell wirkenden äußeren Kräfte mit folgenden Ansätzen zu ermitteln:

- Spindelseitig wurden die Bearbeitungskräfte auf die Lagerreaktionen der Drehspindel umgerechnet. Diese fanden über einen grob strukturierten Spindelkasten Eingang in die FE-Berechnung.

- Die auf den Bettsupport wirkenden Belastungen wurden mittels eines Programms zur Berechnung von Führungsbahnen auf die Anschraubflächen Bett – Grundgestell reduziert.

Mit Hilfe der Aufgabenstellung sollten folgende Bewertungen ermöglicht werden:

- Begründung gezielter Maßnahmen zur Minimierung der Verformung an der Wirkstelle Schneide – Werkstück bei Beibehaltung der äußeren Abmessungen des Bauteiles (z. B. Veränderung der Verrippung oder der Wanddicken).
- Optimierung des Masseeinsatzes
- Durch im Nachgang zur FEM-Berechnung zu führende experimentelle Untersuchungen sind Aussagen zur Genauigkeit abzuleiten. Auf dieser Basis sind weitere Empfehlungen zum Einsatz dieser Methode im Entwurfsstadium der Konstruktion zu geben.

## 4. FEM-Berechnungsmodell, Berechnungsstrategie

### 4.1. Geometrie

Das Grundgestell der Doppelspindel-Frontdrehmaschine ist eine dünnwandige Konstruktion in Gußeisenausführung, die im Inneren durch zahlreiche quer-, längs- und horizontal verlaufende Wände ausgesteift ist. Aus gießtechnologischen Gründen sind die Wände teilweise mit Durchbrüchen unterschiedlicher Größe versehen. Das Gestell ist auf einem als starr angenommenen Fundament verschraubt. Da das Ziel der Untersuchungen darin bestand, genaue Aussagen über das Deformationsverhalten des Grundgestells zu erhalten, wurde die reale Geometrie des Grundgestells (einschließlich der wesentlichen Durchbrüche und Versteifungen) im FEM-Modell mit hoher Genauigkeit abgebildet. Das kompakte Aufsatzbett (vgl. Bild 1) wurde nicht mit in das FEM-Modell einbezogen, da es möglich war, für alle interessierenden Lastfälle die entsprechenden Reaktionskräfte am Bettsupport in Form veränderlicher Flächenlasten zu ermitteln. Für den Übergang vom Spindelkasten zum Grundgestell war das nicht möglich, so daß der Spindelkasten in das FEM-Modell einbezogen werden mußte. Da es dabei jedoch im wesentlichen nur darauf ankam, eine wirklichkeitsnahe Kraftübertragung vom Drehfutter über den Spindelkasten auf das Grundgestell zu sichern, wurde die Geometrie des Spindelkastens nur näherungsweise im FEM-Modell berücksichtigt. Die Gesamtsteifigkeit des Kastens und die Steifigkeit der äußeren Wände wurden im FEM-Modell in guter Näherung erfaßt, wobei angenommen wurde, daß der Spindelkasten an den Anschraubflächen fest mit dem Grundgestell verbunden ist.

Von entscheidender Bedeutung für die Durchführung der Berechnung ist die Tatsache, daß das Grundgestell (einschließlich Spindelkasten) eine Symmetrieebene aufweist. Da es immer gelingt, eine beliebige Lastgruppe als Summe einer zur Symmetrieebene symmetrischen und einer antisymmetrischen Lastgruppe darzustellen, kann das FEM-Modell auf eine Hälfte reduziert werden, d. h., es braucht nur für das halbe Grundgestell eine FE-Vernetzung gemacht zu werden (siehe auch Abschnitt 4.4.).

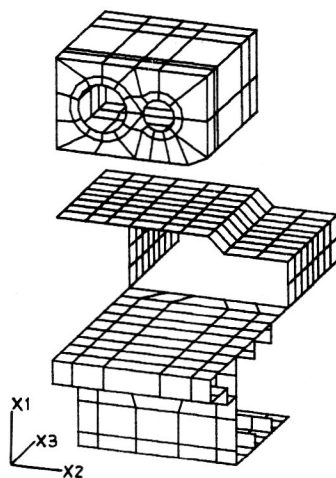
Es sind dann für dieses Modell zwei getrennte Rechnungen erforderlich, eine für die symmetrische Lastgruppe mit Symmetrierandbedingungen in der Symmetrieebene (die symmetrischen Verformungszustände sind Null) und eine für die antisymmetrische Lastgruppe mit Antisymmetrierandbedingungen in der Symmetrieebene (die antisymmetrischen Verformungszustände sind Null). Aus der Überlagerung der Ergebnisse (Subtraktion und Addition) lassen sich die kompletten Ergebnisse für beide Hälften ermitteln.

#### 4.2. Mechanisches Modell

Das Grundgestell ist ein typisches Falwerk. Es besteht im wesentlichen aus ebenen Wandscheiben, die biegesteif miteinander verbunden sind. Das Verhältnis Wandscheibendicke zu Seitenlänge liegt im Bereich von 1 : 20 bis 1 : 50, so daß Berechnungsmodelle auf der Grundlage der klassischen Kirchhoffschen Schalentheorie geeignet sind. Im FEM-System COSAR stehen für derartige Berechnungen Semiloof-Schalenelemente (Viereckelemente mit 8 Knoten und 32 Freiheitsgraden, Dreieckelemente mit 6 Knoten und 24 Freiheitsgraden) zur Verfügung [6], die sich für die Berechnung faltwerkartiger Konstruktionen als besonders leistungsfähig erwiesen haben [8].

#### 4.3. FE-Vernetzung

Die Vernetzung wurde so gestaltet, daß die reale Geometrie des Grundgestells möglichst genau abgebildet wird. Die Netzdichte (d. h. die Anzahl der finiten Elemente) bestimmt bei sonst korrekter Modellbildung im wesentlichen die Genauigkeit der Ergebnisse. Das Ziel besteht darin, mit einem möglichst groben Netz (d. h. mit einem aus ökonomischer Sicht minimalem Zeit- und Kostenaufwand) die interessierenden Ergebnisse mit der erforderlichen Genauigkeit zu berechnen. Da Strategien zur automatischen Netzadaption für Schalenelemente gegenwärtig noch nicht zur Verfügung stehen, wurden zunächst Voruntersuchungen zur Gestaltung der Vernetzung durchgeführt. Dazu wurden typische Grundstrukturen, aus denen das Drehmaschinen-gestell besteht (verrippte Kästen), einer



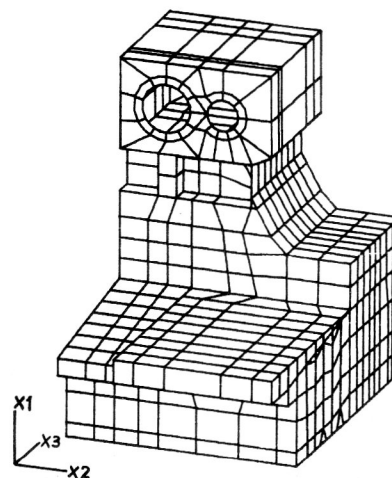
**Bild 3**  
Gestell DFF 2/124, FEM-Modell, Teilstrukturen

gesonderten Analyse unterzogen, um Aussagen über die erforderliche Netzdichte zu erhalten. Die Kästen wurden einseitig fest gelagert, unterschiedlichen Lastkombinationen ausgesetzt und die Ergebnisse für unterschiedliche Netzdichten auf den Seitenwänden (2 x 2, 3 x 3, 4 x 4 Elemente) verglichen. Es zeigte sich, daß der Verschiebungszustand ausreichend genau mit einer Vernetzung erreicht werden kann, bei der jede Seitenwand des Kastens (zwischen den Aussteifungen) durch ein 3 x 3-Elementnetz approximiert wird (Fehler in den Verschiebungen kleiner als 5 %). Durch diese Aussage war im wesentlichen die Anzahl der finiten Schalenelemente, mit denen das Grundgestell vernetzt werden mußte, festgelegt.

Für die eigentliche Netzgenerierung wurden die im Preprozessor des FEM-Systems COSAR angebotenen Standardstrukturen zur teilautomatischen Vernetzung von ebenen und profilkförmigen Strukturen (Strukturtypen 970 bzw. 980) eingesetzt. Das Grundgestell und der Spindelkasten wurden aus insgesamt 33 Substrukturen aufgebaut; für 30 dieser Substrukturen konnten die genannten automatischen Netzgeneratoren eingesetzt werden. Einige typische Substrukturen sind im Bild 3 dargestellt. Eine Gesamtansicht der Vernetzung zeigt Bild 4.

Die Vernetzung besteht aus insgesamt 1200 Semiloof-Schalenelementen, was zu 25000 Freiheitsgraden führt. Bei der Anwendung der Standardnetzgeneratoren konnten nicht immer alle geometrischen Besonderheiten einer Substruktur erfaßt werden, so daß ein nachträgliches Korrigieren der automatisch erzeugten Netze erforderlich war, z. B. zur Berücksichtigung der Durchbrüche. Die Durchbrüche wurden in der Regel mit vernetzt und den im Durchbruch liegenden Elementen ein sehr kleiner Wert für die Dicke zugewiesen.

Ein effektiver Berechnungsablauf (minimale Bandweiten, Strukturmodifikationen) wird durch die Anwendung der in COSAR verfügbaren mehrstufigen Substrukturtechnik erreicht [7]. Für die Durchführung der FEM-Analyse des Drehmaschinen-gestells hat sich eine zweistufige Substrukturtechnik als zweckmäßig erwiesen, d. h., das Gesamtmodell wird aus drei Hyperstrukturen erster Stufe gebildet (vgl. Bild 3).



**Bild 4**  
Gestell DFF 2/124, FEM-Modell, Gesamtansicht

- Vorbau (Substrukturen 1 bis 9),
- Mittelteil (Substrukturen 10 bis 30),
- Spindelkasten (Substrukturen 31 bis 32),

die zu einer Hyperstruktur zweiter Stufe (der Gesamtstruktur) zusammengesetzt sind.

Für den Zusammenbau der Substrukturen zu den Hyperstrukturen wurde erstmals ein neu geschaffener COSAR-Prozessor zum automatischen Erzeugen der Hyperstrukturtopologien eingesetzt, der das ursprüngliche manuelle Beschreiben der Knotenzuordnungen ablöst.

#### 4.4. Berücksichtigung der Symmetrie- und Antisymmetrierandbedingungen

Durch den Einsatz der Substrukturtechnik läßt sich bei Symmetrie- und Antisymmetrierandbedingungen eine sehr effektive Berechnungsstrategie verwirklichen, wenn möglichst wenig Substrukturen Knotenpunkte in der Symmetrieebene haben (günstig ist es auch, diese Strukturen in einer gesonderten Hyperstruktur zu erfassen). Nach der FEM-Analyse des symmetrischen Falls kann dann die Rechnung für den antisymmetrischen Fall als Wiederanlauf erfolgen (die Ergebnisfiles der ersten Rechnung sind vorher zu sichern!). Im Eingabedatensatz sind die Daten für die zum Symmetrieschnitt gehörenden Strukturen zu ändern (Elementdicken, Randbedingungen).

Beim Wiederanlauf müssen im COSAR-Initialisierungsprozess die Abarbeitungsmarken für diese Strukturen herabgesetzt werden (auf LAWO = 5), damit bis auf die Netzgenerierung diese Strukturen im COSAR-Analysesystem bis zur Berechnung der Superelementsteifigkeitsbeziehungen erneut aufgebaut werden. Alle übrigen, nicht zur Symmetrieebene gehörenden Superelemente werden unverändert aus der vorangegangenen Rechnung übernommen. Das trifft auch auf die Lastvektoren dieser Strukturen zu, da die eigentlich erforderliche Vorzeichenumkehr für alle Lasten im Antisymmetriefall bei der Überlagerung der Ergebnisdateien berücksichtigt werden kann. Entsprechende Programme zur Überlagerung der Ergebnisfiles sind vorhanden.

Bei Schalenstrukturen sind in der Symmetrieebene folgende Bedingungen zu erfüllen:

##### Symmetriefall:

An jedem Knoten in der Symmetrieebene sind die Verschiebungsfreiheitsgrade in Richtung der Normalen der Ebene und die Verdrehfreiheitsgrade, deren Drehvektoren in der Tangentialebene liegen (beim Semiloofelement sind das die dem Seitenmittenknoten zugeordneten Verdrehfreiheitsgrade), Null zu setzen. Für die Elemente, deren Flächen in der Symmetrieebene liegen, ist als Elementdicke die halbe Wanddicke einzusetzen.

##### Antisymmetriefall:

An jedem Knoten in der Symmetrieebene sind alle Verschiebungen tangential zur Symmetrieebene und alle Verdrehfreiheitsgrade, deren Drehvektor Normal zur Symmetrieebene liegt (bei den Semiloof-Elementen nicht vorhanden), Null zu setzen.

Für die Elemente, deren Flächen in der Symmetrieebene liegen, ist als Elementdicke die mit 0.7937 multiplizierte Wanddicke einzusetzen (Halbieren der Biegesteifigkeit).

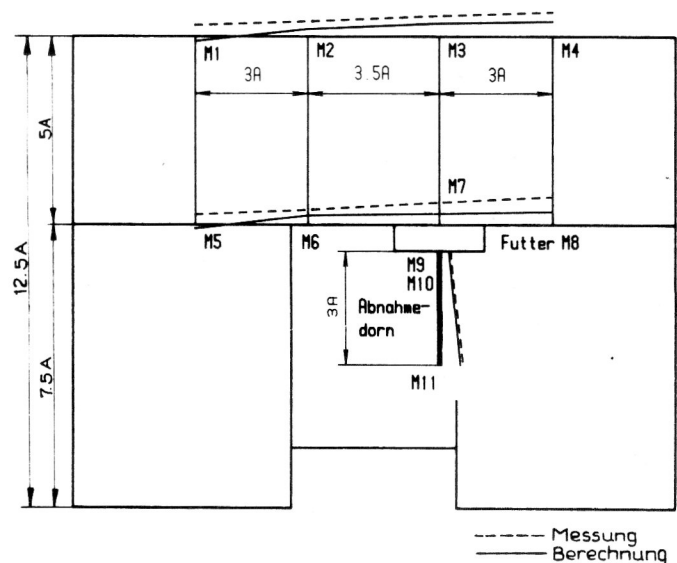
#### 4.5. Ablauf der Berechnungen

Für das universelle FEM-System gibt es inhaltlich einheitliche Versionen für 16- und 32-Bit-Rechner (vgl. dazu auch [9]). Die bevorzugte Arbeitsweise, die auch im vorliegenden Fall angewandt wurde, besteht daher darin, zunächst am Arbeitsplatz unter Nutzung von 16-Bit-Technik dialog- und grafikunterstützt das FEM-Modell aufzubauen und die erforderlichen Eingabedaten für die Beschreibung des FE-Netzes, des Materialgesetzes, der Belastungen und Randbedingungen bereitzustellen. Die eigentlichen FE-Analysen wurden im Stapelbetrieb auf einem 32-Bit-Rechner ausgeführt. Die Ergebnisauswertung erfolgte wieder dezentral an 16-Bit-Rechnern. Der Datenaustausch erfolgte jeweils über sequentielle ASCII-Files, die standardmäßig von COSAR bereitgestellt werden. Wenn nicht die Pre- und Postprozessoren des COSAR-Systems verwendet werden sollen, ist ein Datenaustausch über die in der DDR standardisierte FEM-Datenschnittstelle FEMDAS (TGL 44640) möglich.

### 5. Auswertung der Ergebnisse

Ergebnisse der FEM-Analyse des in Bild 4 angegebenen Drehmaschinenrundgestells sind insgesamt acht Datenfiles, die die Verschiebungen sämtlicher Knotenpunkte der Vernetzung enthalten (vier Lastfälle jeweils für den linken und rechten Teil des Gestells). Eine Auswertung der Ergebnisse ist aufgrund des großen Datenumfanges nur unter Nutzung von Möglichkeiten der grafischen Bildverarbeitung (wie sie beispielsweise durch den COSAR-Postgraf-Prozessor angeboten werden) möglich.

Zur Auswertung der Ergebnisse wurde weitgehend die beim Maschinenhersteller vorhandene 16-bit-Rechentechnik genutzt. Damit war eine effektive Darstellung der Verformung der Strukturen am Bildschirm gegeben.



**Bild 5**

Grundgestell – DFF 2/124 Lastfall 1 – Gegenüberstellung der Verschiebungen des Abnahmedornes auf Basis experimenteller Untersuchungen und FEM-Berechnungen

Zwei Darstellungsvarianten kamen zur Anwendung:

- verformtes bzw. unverformtes Elementenetz einer oder mehrerer Strukturen,
- Verschiebungen bzw. Spannungen wurden als farbige ISO-Flächen dargestellt.

Im Bild 5 ist eine Gegenüberstellung der Verschiebungen an ausgewählten Stellen des Grundgestells auf Basis der experimentellen Untersuchungen und FEM-Berechnungen ersichtlich.

In der Tendenz wird gleiches Verformungsverhalten nachgewiesen. Eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und FEM-Rechnung ergab sich für die Dornverlagerung (Differenz < 5 %).

Damit konnte die Zweckmäßigkeit des Verfahrens unter dem Gesichtspunkt hinreichender Genauigkeit bestätigt werden.

Zur Erarbeitung weiterer Optimierungsvorschläge wurde eine Beurteilung der in den Einzelstrukturen auftretenden Vergleichsspannungen  $\sigma_v$  durchgeführt (die Darstellung erfolgte in Form von Farbflächengrafiken; aus reproduktionstechnischen Gründen mußte auf eine Wiedergabe im Beitrag verzichtet werden). In einem ersten Arbeitsschritt wurden auf Basis eines gewählten Bewertungsmaßstabes für  $\sigma_v$  Wanddickenänderungen in einzelnen Strukturbereichen vorgeschlagen.

Der wesentliche Vorteil einer FEM-Analyse ergibt sich aus der Tatsache, daß es bereits in der Entwicklungsphase einer neuen Konstruktion gelingt, durch Variantenrechnungen den Einfluß konstruktiver Änderungen zu ermitteln (z. B. Wanddickenänderungen, Einfluß zusätzlicher Versteifungen usw.), ohne daß jeweils ein kostenaufwendiger Musterbau erforderlich ist. Voraussetzung ist dafür jedoch, daß neben der Berechnungssoftware erfahrene Berechnungsingenieure und die notwendigen Hardwareressourcen vorhanden sind.

## 6. Zusammenfassung, Erfahrungen

Der vorliegende Beitrag informiert beispielhaft über den Einsatz der FEM (Programmsystem COSAR) zur wirklichkeitsnahen Berechnung des statischen Verformungsverhaltens des Gestells einer Doppelspindel-Frontdrehmaschine. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, daß neue Anforderungen an die Gestaltung von Werkzeugmaschinen mit dem Ziel der Steigerung der Leistungsfähigkeit unter Beachtung der Materialökonomie den Einsatz moderner computergesteuerter Entwurfs- und Berechnungsverfahren erfordern.

## Verwendete Bezugszeichen

- $F_H$  – Hauptschnittkraft
- $F_P$  – Passivkraft
- $F_V$  – Vorschubkraft
- $\sigma_v$  – Vergleichsspannung

## LITERATUR

- [ 1 ] Weck, M.: Leistungssteigerung moderner Produktionsmaschinen. Ind. Anz. Nr. 36 v. 6. 5. 1986, 108. Jg.
- [ 2 ] Lull, u. a.: Einsatz von Pre- und Postprozessoren für die FEM-Strukturanalyse von Werkzeugmaschinenstellen. Maschinenbautechnik H. 12, 1988, S. 532.
- [ 3 ] Tanner, A.: Zur statischen Analyse von Wälzführungen mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente. Maschinenbautechnik 36 (1987), Heft 11, S. 511 – 516.
- [ 4 ] Weck, M., Schöllhorn, H.-D.: Kontaktkräfte mit Hilfe der FEM berechnen. Ind. Anz. Nr. 36 v. 6. 5. 1986, 108. Jg., S. 43 – 46.
- [ 5 ] Spur, G., Hoffmann, E., Paluncis, Z.: Reduzierung thermisch bedingter Verformungen von Drehmaschinen-Spindelstöcken durch konstruktive Maßnahmen. Konstruktion 38 (1986) H. 8, S. 293 – 296.
- [ 6 ] Autorenkollektiv: Nutzerhandbuch COSAR. Teil I – Grundlagen. TU Magdeburg, Methodisch Diagnostisches Zentrum „Finite Elemente“.
- [ 7 ] Gabbert, U.: Die Finite-Elemente-Methode in den Ingenieurwissenschaften unter dem Aspekt der rechen-technischen Realisierung im Rahmen universeller Programmsysteme. Diss. B, TU Magdeburg 1987.
- [ 8 ] Fels, D.: Konzeptioneller Aufbau, Implementierung und Testung von Elementkatalogen universeller Finite-Element-Programmsysteme. Diss. A. TU Magdeburg 1985.
- [ 9 ] Altenbach, J., Gabbert, U., Fels, D.: COSAR – Ein bewährtes System für die Praxis und Forschung. Technische Mechanik 11 (1990) 3.

## Anschrift der Verfasser:

Dr.-Ing. D. Fels  
Dr. sc. techn. U. Gabbert  
Technische Universität „Otto v. Guericke“  
PSF 124  
Magdeburg  
3010  
Dr.-Ing. Funke  
Dipl.-Ing. Buß  
VEB Werkzeugmaschinenfabrik Magdeburg