

# CAD und Technische Mechanik

Friedmar Erfurt

## 1. Einführung

Die Ingenieurwissenschaft erschließt sich eine dritte Dimension. Stoff und Energie waren über Jahrhunderte Gegenstand des Bemühens der Techniker. Heute kommt die Information hinzu.

Der Computer hat sich mehr und mehr bereits zur rechten Hand des Ingenieurs entwickelt. Die Technische Mechanik spielte in diesem Prozeß eine tragende Rolle. Wissenschaftler dieser Disziplin erkannten sehr frühzeitig den Wert des neuen Arbeitsmittels.

Gegenwärtig scheint eine neue Etappe zu beginnen. Sie ist durch eine systematische Einbeziehung der Ergebnisse der Mechanikforschung in die praktische Ingenieur-tätigkeit gekennzeichnet.

Die Finite-Element-Methode wird bereits als ein Grundelement von CAD (Computer aided design) bewertet [1], [2]. Alle leistungsfähigen CAD-Systeme besitzen FEM-Schnittstellen [3].

Im folgenden sollen unter Beachtung der für die Volkswirtschaft der DDR typischen Gebiete der Festkörpermechanik einige Ausführungen zur „Computerisierung“ dieser Wissenschaft, zu neuen Problemen und Anforderungen bis hin zur akademischen Lehre gemacht werden.

## 2. Anforderungen an Programmsysteme aus Sicht der CAD-Entwicklung

CAD, CAM und CAD/CAM sind heute gemeinhin bekannte Begriffe geworden. Die Gewöhnung an sie sollte nicht verdecken, daß die Begriffsinhalte unscharf sind. Das birgt die Gefahr, daß in Unkenntnis alle Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, die in irgendeiner Weise mit dem Computer zu tun haben, als CAD ausgegeben werden.

Auch unter den CAD/CAM-Spezialisten gibt es keine völlig einheitlichen Auffassungen. Eine wörtliche Übersetzung hilft nicht weiter. Ein gangbarer Weg scheint es, unter CAD die rechnergestützte **Fertigungsvorbereitung** (d. h. sowohl die konstruktive wie auch die technologische) und unter CAM die rechnergestützte **Fertigungsdurchführung** zu verstehen. CAD/CAM verkörpert dann die integrierte Informationsverarbeitung von der Konstruktion über die Technologie bis zur Fertigung. Den Trennstrich zwischen CAD und CAM nach der technologischen Fertigungsvorbereitung zu ziehen, hat zumindest einen großen Vorteil aus Sicht der Informatik: Während die Lösung von Aufgaben der konstruktiven und technologischen Fertigungsvorbereitung gewöhnlich zeitkritisch erfolgt, müssen Aufgaben der Fertigungsdurchführung meist in Echtzeitverarbeitung erfolgen (Real-time). Das aber verlangt den Einsatz sehr unterschiedlicher Hard- und vor allem Softwaremittel. (Besonders muß die

Unterbrechungsbehandlung bei Real-time-Betriebssystemen hoch ausgebaut sein. Völlig andere Betriebssysteme, meist auch andere Sprachkonzepte sind die Folge.)

Selbst wenn man CAD auf die konstruktive Fertigungsvorbereitung im engeren Sinne eingrenzt, ergibt sich die Frage, was alles dazu gehört und ab wann z. B. Rechenprogramme der Technischen Mechanik zu CAD zu zählen sind.

Diese Frage ist unter Bezug auf die obige Definition von CAD/CAM relativ leicht und klar zu beantworten:

Rechenprogramme werden zu Komponenten von CAD genau in dem Moment, wo sie

1. in Systeme der integrierten Informationsverarbeitung eingebunden und
2. innerhalb solcher Systeme in die praktische tägliche Ingenieurarbeit einbezogen werden.

Das bedeutet vor allem, daß von seiten des Programmentwicklers ein Umdenken von den – zweifellos meist schon sehr komplizierten – wissenschaftlichen Problemen seiner relativ wenigen Programme auf den Datenfluß des Gesamtsystems oder, anders gesagt, vom ereignisbezogenen Denken zum prozeßbezogenen Denken vollzogen werden muß.

Um es an einem Beispiel zu verdeutlichen:

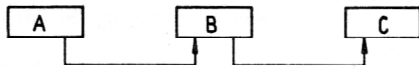
FEM – Programmentwickler haben ihre liebe Mühe und Not, die wissenschaftlichen Vorarbeiten und die rechen-technische Realisierung des Aufbaus von Elementmatrizen, des Gesamt-Gleichungssystems, der vielfältigen Lösungsverfahren und der Ergebnisaufbereitung zu bewältigen. Die Erstellung von Testbeispiel-Daten wird dabei nebenbei erledigt.

Völlig anders sieht das aber für die Anwender eines FEM-Programmsystems aus. Sie gehen vom ordnungsgemäßen Funktionieren als Selbstverständlichkeit aus. Ihr Problem ist die Bewältigung der Datenflut. Erst wenn diese vom Nutzer selbständig und effektiv erledigt werden kann, ist der Programmierer berechtigt, von einem „Beitrag zu CAD“ zu sprechen.

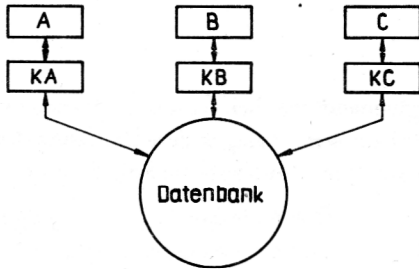
Bei der Gestaltung von CAD-Systemen hat sich unter den vorgenannten Aspekten ein Wandel vollzogen. In der Fachliteratur wird teilweise von drei Generationen gesprochen (siehe Bild 1). Bei wenig Erfahrung und wenigen vorhandenen Programmen wird meist der Weg der Entwicklung von Programmketten gewählt. Er erscheint am Anfang einfacher als der zunächst aufwendigere über die Datenbankkopplung.

Die Schwierigkeiten ergeben sich jedoch sehr schnell aus drei Gründen:

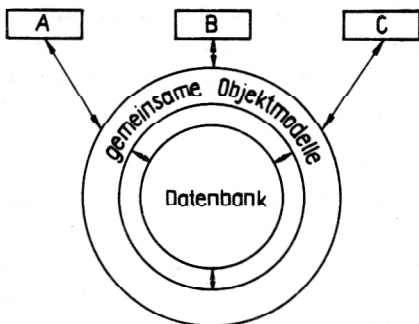
1. Bei Programmketten muß der gesamte Datenfluß durch alle Programme hindurch (bei single output-single input-Beziehungen). Dann hat **jede** Programmänderung eine Änderung aller anderen Programme zur Folge.



1. Generation : Programmkette



2. Generation : CAD - System mit Datenbanknutzung über gemeinsame Objektmodelle



3. Generation : CAD - System mit Datenbanknutzung über gemeinsame Objektmodelle

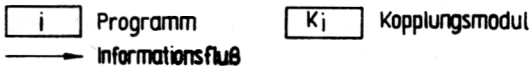


Bild 1  
Generation von CAD-Systemen

2. Bei Programmketten mit mehreren Ein- und Ausgängen pro Programm wird das vorgenannte Problem zwar vermieden, aber dafür ergeben sich bei größerer Programmanzahl sehr unübersichtliche Informationsbeziehungen (siehe Bild 2).

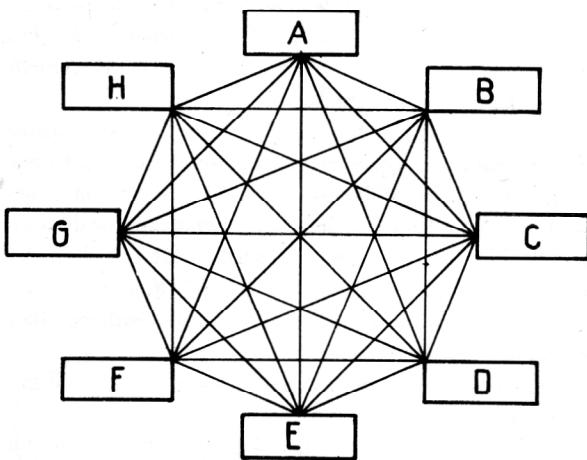


Bild 2  
Informationsfluß im Extremfall (jedes Programm korrespondiert mit jedem)

3. Die Informationsflüsse haben nicht nur einen inhaltlichen, sondern auch einen zeitlichen Aspekt. Das bedeutet, daß i. allgm. die Informationen nicht vollautomatisch und ununterbrochen von Programm zu Programm weitergegeben werden. Vielmehr verlangt die große Heterogenität in der Ingenieur Tätigkeit, daß nach Durchlauf weniger in einer Aufgabe (Job) zusammengefaßter Programme die Arbeit des Rechners unterbrochen und das Ergebnis beurteilt wird. Die notwendige Folge ist das „Einfrieren“ von Datenbeständen in einer bestimmten Arbeitsetappe. Wenn das ohne Hilfe eines Datenbanksystems auf althergebrachte Weise, d. h. auf Magnetbändern oder auf gezielt angelegten Dateien, erfolgt, hat meist nur noch ein Programmentwickler die notwendige Übersicht. In der Praxis eines Konstruktionsbüros verfallen derartige Programmsysteme dagegen wegen des notwendigen Organisationsaufwandes meist der Ablehnung.

Die Einbindung von CAD-Programmbausteinen in Datenbanksysteme löst diese Probleme in gewisser Weise, da dort dem Nutzer das Wissen um die physische Abspeicherung seiner Datenbestände erspart bleibt. Er legt sie nur unter Namen ab, die sich relativ leicht mit betrieblichen Organisationslösungen in Einklang bringen lassen.

Eine andere, aber nicht weniger wichtige Problematik ist die ausreichende Dokumentation der Programme. Die heutigen Rechnersysteme sind vorrangig auf die Dialogarbeit orientiert. Damit ergibt sich die Möglichkeit und die Notwendigkeit, Programmdokumentationen maschinenlesbar für ein rechnergestütztes Erlernen der Programmanwendung zu gestalten.

### 3. Zur Entwicklung systematischer Problemlösungsverfahren in der Technischen Mechanik

Wie jede Wissenschaft ist auch die Technische Mechanik durch eine sehr vielschichtige Entwicklung geprägt. Eine Tendenz in der jüngeren Zeit zielt auf die Schaffung einheitlicher Theoriegebäude für die computergestützte Lösung sehr breiter Aufgabenklassen.

Drei Vertreter dieser Richtung seien hier ins Auge gefaßt: die Finite-Element-Methode (FEM), die Randintegralmethode (BIEM) und die Mehrkörperdynamik. Dabei geht es weniger um den Inhalt aus der Sicht der Mechanik (der ist ausführlich in einschlägigen Werken dargestellt [4] bis [6]), sondern um die Zielstellung der Anwendung.

Die FEM hat sich heute bereits zu einer universellen Lösungsmethode von Randwertaufgaben entwickelt, die nicht auf die Mechanik beschränkt ist. Der Grundgedanke, physikalische Felder durch Ansatzfunktionen in endlichen Gebieten zu approximieren und dabei den Freiheitsgrad der Lösung auf eine endliche Anzahl von Knoten-Variablen zu reduzieren, ist in doppelter Weise bedeutungsvoll:

- Es ergibt sich ein großdimensioniertes Gleichungssystem, das auf relativ bequeme Weise mit Hilfe des Computers gelöst werden kann.
- Gleichzeitig beinhaltet die FEM in gewisser Weise für den Nutzer eine Unterstützung bei der Modellbildung.

Das Gleiche trifft für die BIEM zu. Zwar werden bei dieser Methode die Feldprobleme durch einen grundsätzlich anderen Gedanken, durch Randintegrale genähert, für den Anwender aber stellt sie sich in sehr ähnlicher Weise wie die FEM dar. Er gibt in analoger Weise die Elemententeilung, Materialparameter, Randbedingungen und Belastungen vor. Vorzugsanwendungsgebiete dürften komplizierte räumliche Spannungsfelder sein, die Universalität der FEM wird kaum erreicht werden.

Eine dritte, noch in den Anfängen steckende universelle Methode, entwickelt sich mit der Mehrkörperdynamik (multi-rigid-body-systems). HAUGH [6] gibt dazu eine hervorragende Übersicht, in [7] werden Ergebnisse eines Forschungskollektivs am Institut für Mechanik der AdW dargestellt.

Bisherige Bemühungen [8] zur Schaffung universeller Lösungsverfahren in der Maschinendynamik gingen von bereits vorliegenden Bewegungsgleichungen aus, für die breit nutzbare Integrationsverfahren angeboten werden. Demgegenüber zielt die Methode der Mehrkörperdynamik analog wie die FEM und die BIEM auf eine automatisierte Erstellung und Lösung der Bewegungsgleichungen. Das führt auf großdimensionierte, i. allg. nicht-lineare Gleichungssysteme, die sich aus Differentialbeziehungen für die Bewegungsgleichungen und algebraischen Gleichungen zusammensetzen.

Die effektive numerische Behandlung setzt die Anwendung der Formelmanipulation voraus.

Für den Anwender ergibt sich lediglich die Aufgabe der Beschreibung der Struktur (Elemente; Bewegungsmöglichkeiten, z. B. Dreh- und Schubgelenke u. a.), deren Elementparameter und wirkender Kräfte.

Die Ergebnisdarstellung setzt praktisch den Einsatz der Computergrafik voraus.

#### 4. Probleme der Verknüpfung von CAD und Technischer Mechanik

Der Einsatz von Programmsystemen der Technischen Mechanik in CAD erschließt dem Nutzer neue Berechnungsmöglichkeiten, wirft für ihn aber auch eine Reihe neuer Fragen auf. Sie sind im Wesentlichen mit dem Problem der Datenfülle verknüpft.

FEM und BIEM erfordern Daten, die sich zumindest bezüglich der Elementgeometrie und -topologie nach relativ einfachen Verfahren gewinnen und somit auch teilweise algorithmieren lassen. Im Ergebnis dessen sind Netzgeneratoren in CAD-Systemen unerlässlich geworden, die einen doppelten Zweck erfüllen: Sie erzeugen die Eigenschaften sowohl sehr schnell als vor allem auch fehlerfrei.

Werkstoffparameter werden teilweise automatisiert übergeben, Randbedingungen und Belastungen aber müssen unbedingt vom Bearbeiter festgelegt werden.

Die Notwendigkeit, Daten an verschiedenartige FEM-Programme zu übergeben, führte zum Gedanken, Schnittstellen zum FEM-Datenaustausch zu standardisieren [9], [10]. In der DDR wurden diese Arbeiten unter Leitung des Methodisch-Diagnostischen Zentrums „Finite Elemente“ der TH Magdeburg sehr weit vorange-  
trieben [11].

Der Datenaustausch-Standard bezieht sich nicht nur auf die Eingabeschnittstelle, sondern auch auf die Übergabe von Ergebnisdaten. Damit wird die Mehrfachnutzung von Programmen zur Ergebnisauswertung (Postprozessoren) durch verschiedene FEM-Programme gesichert. Derartige Maßnahmen sind geeignet, die Menge der aufzubauenden und auszuwertenden Daten zu beherrschen. Eine zweite, wesentlich schwierigere Frage ist die nach der Qualität dieser Informationen.

Die Frage ist doppelt zu stellen:

- Sind die Ergebnisse „richtig“?
- Werden die Ergebnisse überhaupt in dem angebotenen Umfang benötigt?

Natürlich sind die Ergebnisse der heutigen numerischen Verfahren im Rahmen der Verfahrensgenauigkeit und der Modellgenauigkeit richtig. Den Verfasser erfüllt es aber mit einer gewissen Sorge, daß gegenwärtig unter dem Eindruck des Leistungsvermögens der Computer immer raffiniertere Berechnungsverfahren entwickelt werden und dabei der Blick auf das Gesamtproblem etwas in den Hintergrund gedrückt wird. Darauf hat auch Dym [12] bereits 1983 hingewiesen.

Zwei Beispiele sollen das Gesagte verdeutlichen.

- Das Ergebnis einer Durchbiegungsberechnung eines Balkens auf zwei Stützen mit mittlerer Einzellast verhält sich in Abhängigkeit von beidseitig fester Einspannung zu beidseitig gelenkiger Lagerung wie 1 : 4. Die möglichst genaue Erfassung der technischen Lagerbedingungen hat hier einen wesentlich größeren Einfluß auf das Ergebnis als eine verbesserte Biegetheorie.

- Komplizierte inelastische mechanische oder gekoppelte thermisch-mechanische Probleme führen meist auf eine Fülle von bereitzustellenden Materialparametern und Randwerten.

Bei bekannten derartigen Werten eine numerische Lösung zu ermitteln, ist i. allg. ein lösbares Problem.

Gerechnet wird meist mit relativ einfachen, praktischen Bedingungen nicht entsprechenden Daten. Beispiele zeigen [13], daß u. U. der Einfluß der Material- und Randwerte so hoch wird, daß die Lösung fast beliebig „gesteuert“ werden kann.

Die Schlußfolgerung kann beileibe nicht darin bestehen, etwa die Weiterentwicklung der Berechnungsverfahren zu stoppen. Aber man sollte den durchaus nicht seltenen Gedanken begraben, daß die Werkstoffwissenschaftler dem Mechaniker die Materialparameter frei Haus liefern. Vielmehr sollte in der Weiterführung dieser Forschung mit der Verfahrensentwicklung zugleich die Frage untersucht werden, welchen Einfluß die Material-, Rand- und Lastdaten (auch hinsichtlich ihrer Unschärfe!) auf die Lösung haben und wie sie beschafft werden können. Zugegeben: es ist wesentlich angenehmer, Programme zu entwickeln als Versuchseinrichtungen für die Materialprüfung. Aber um die Frage der Bestimmung von Materialparametern ist gerade wegen der breiten Nutzbarkeit von Computerlösungen heute kein Bogen mehr zu machen.

Die Frage, ob ein Ergebnis überhaupt benötigt wird, ergibt sich aus dem Dilemma, daß die Einbeziehung von Programmsystemen der Technischen Mechanik in CAD

dazu führt, daß aus verschiedenen Gründen vom alten Ingenieurgrundsatz „So genau wie nötig“ abgewichen wird.

Aufwendige räumliche FEM- oder BIEM-Analysen werden gewöhnlich an konstruktiv fertig gestalteten Bauteilen durchgeführt. Beachtet werden sollte aber, daß der konstruktive Entwurfsprozess mit sehr groben Gedankenmodellen beginnt, für deren abschätzende Dimensionierung häufig sehr einfache Berechnungsverfahren ausreichend sind.

Das verlangt, ein hierarchisches Konzept für die Berechnungsverfahren zu realisieren. Das heißt, daß z. B. für FEM-Analysen sowohl schnelle, relativ grobe Lösungen auf Arbeitsplatzcomputern wie leistungsfähige, genauere Verfahren auf Großrechnern bereitgestellt werden.

Zwischen den Lösungen muß Kompatibilität in dem Sinne bestehen, daß in beiden Richtungen ein Modelltransfer möglich wird (z. B. Vorgabe von Ergebnissen des einfachen Modells als Belastungen oder Startverschiebungen des genaueren oder Einbeziehung reduzierter Massen- und Steifigkeitsmatrizen aus einer genaueren Rechnung in eine einfache Rechnung).

Sowohl die Substrukturtechnik als auch die Bandbreitenminimierung erlangen unter diesem Aspekt eine neue Bedeutung aus Sicht des zukünftigen Anwenders (und weniger aus Rechenzeiterparnis). Sie ermöglichen vorteilhaft Änderungen und Ergänzungen des Modells, ohne den gesamten Datensatz zu redigieren.

Bei der Gestaltung des FEM-Programmsystems GITRA II [14] wurde den genannten Problemen erhöhte Aufmerksamkeit gewidmet.

## 5. Neue Fragestellungen infolge der Informatikentwicklung

Die rasche Entwicklung der Informatik wirkt auf die Anwenderdisziplinen zurück. Für den Problemkreis der Technischen Mechanik sind drei Entwicklungen besonders bedeutungsvoll: die im Rahmen der künstlichen Intelligenz entstehenden Formelmanipulationssysteme bzw. die Expertensysteme sowie Möglichkeiten moderner Betriebssysteme.

Die Formelmanipulation auf dem Computer ist bereits den Kinderschuhen entwachsen, wovon eindrucksvolle Anwendungen in der Mechanik zeugen [15] bis [17].

Die in [15] ausgewiesenen Rechenzeitreduzierungen bei Matrixtransformationen auf 10 % gegenüber Sparsematrix-Routinen sprechen ebenso für sich wie die qualitativ neuartige Behandlung nichtlinearer Stabilitätsprobleme in [16], [17].

Expertensysteme sind auf dem Gebiet der Mechanik nicht bekannt [18]. Die Entwicklung solcher Systeme zur Unterstützung der Modellbildung, zunächst eingegrenzt auf bestimmte Spezialgebiete, verspricht einen hohen Effekt hinsichtlich der stärkeren Nutzung von numerischen Verfahren in der Ingenieurpraxis.

Eine Fülle neuer Möglichkeiten geben UNIX-kompatible Betriebssysteme [19] (in der DDR als PSU (ESER) und MUTOS (K 1630) verfügbar). Sie sichern zum Einen die Portabilität von Software-Lösungen, d. h. die problemlose Übertragung von einem Computersystem auf ein anderes. Von noch größerer Bedeutung sind – ganz ab-

gesehen von einer Reihe sehr effektiver Software-Werkzeuge – die Fähigkeiten der Kommandosprache dieser Betriebssysteme, die denen von Programmiersprachen entsprechen (IF-THEN-ELSE-Beziehungen, Laufanweisungen u. a.). Damit wird u. a. eine streng modulare Gestaltung von Programmsystemen möglich. Große Software-Systeme lassen sich wesentlich effektiver entwickeln.

## 6. Auswirkung auf die Lehre der Technischen Mechanik

Die Ausbildung von Ingenieuren in Technischer Mechanik hat sich über einen Zeitraum von einigen Jahrzehnten inhaltlich und methodisch nur wenig verändert.

Jetzt steht das Problem an, zur Sicherung der CAD-Technologie einen breiten Kreis von Ingenieurstudenten, vor allem von Konstrukteuren des Maschinenbaus, mit der Nutzung der neuentstandenen Programmsysteme der Technischen Mechanik vertraut zu machen. Mehr Zeit steht kaum zur Verfügung, so daß kein „Aufsetzen“ auf den bisherigen Stoff, sondern eine Durchdringung der traditionellen Lehrgebiete mit dem Ziel der theoretischen Vorbereitung auf die FEM und andere Verfahren nötig ist.

Intensive Diskussionen im Kreise der Mechanik-Hochschullehrer der TII Karl-Marx-Stadt haben zur Überzeugung geführt, daß sowohl die stofflich methodischen wie die organisatorischen Fragen der computerorientierten Mechanik-Grundlagenausbildung lösbar sind.

Schwieriger erscheint folgendes Problem: Den systematischen, computerorientierten Lösungsverfahren ist gemeinsam, daß der anwendende Ingenieur weder das zugrunde liegende Differentialgleichungssystem noch das Lösungsverfahren kennen muß, sondern relativ einfach die Elemente, die Topologie, die Randbedingungen und die Belastungen beschreibt und dann seine Resultate erhält. Damit ergibt sich eine neuartige Spezifik: Der Nutzer arbeitet mit fremden Wissen!

Die Rechenprogramme bleiben für ihn eine „Blackbox“, die solange zufriedenstellende Resultate liefern, wie die Anwendungsgrenzen nicht überschritten werden.

Aber gerade hierin liegt das Problem: Gewöhnlich versagen die Programme bei falscher Anwendung nicht den Dienst, sondern liefern nach wie vor Rechenergebnisse, die sich rein äußerlich nicht oder nur wenig von richtigen Resultaten unterscheiden. Es muß deshalb das vorrangige Bildungs- und Erziehungsziel bei einer neuartigen Grundausbildung in Technischer Mechanik sein, zwar den Computer zum alltäglichen Arbeitsmittel zu machen, aber dabei die blinde „Computergläubigkeit“ von vornherein zu beseitigen.

Das bessere Verständnis der mechanischen Vorgänge, das anschaulichere Studium von Verformungs-, Spannungs- und Bewegungserscheinungen kann durch eine gute Demonstrations- und Übungssoftware und eine entsprechend abgestimmte Vorlesungs- und Übungsgestaltung erreicht werden.

Letztlich ist die Modellbildung und das Übertragen von Berechnungsergebnissen auf die reale Ausgangssituation zu trainieren. Dazu bietet die Grundvorlesung nur wenig Platz. Zu dem ist die Fachspezifik zu berücksichtigen, so

daß entsprechende Lehrveranstaltungen im Fachstudium eingeordnet werden müssen.

Für das Studium der Mechanik-Spezialisten, der Studenten der Fachrichtung „Angewandte Mechanik“, sollte abschließend bemerkt werden, daß die notwendige stärkere Ausprägung des schöpferischen Mitwirkens bei der konstruktiven Gestaltung der Erzeugnisse kaum durch mehr Konstruktionslehre-Ausbildung, wohl aber durch ein systematisches und individuelles Modellbildungs- und -auswertungstraining erreicht werden kann.

#### LITERATUR

- [ 1 ] Krause, F.-L.: Veränderungen der Konstruktionstätigkeit durch CAD-Systeme. Zeitschr. wirtschaftl. Fertigung 80 (1985), S. 60 – 66.
- [ 2 ] Spur, G.; Krause, F.-L.: CAD-Technik. Carl Hanser Verlag. München, Wien (1984).
- [ 3 ] Eigner, M.; Maier, H.: Einführung und Anwendung von CAD-Systemen. Carl Hanser Verlag. München, Wien (1982)
- [ 4 ] Zienkiewicz, O. C.: Methode der finiten Elemente. Fachbuchverlag Leipzig (1983).
- [ 5 ] Brebbia, C. A.: The Boundary Element Method for Engineers. Halsted Press, Wiley, New York (1978).
- [ 6 ] Haugh, E. J.: Computer Aided Analysis and Optimization of Mechanical System Dynamics. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, New York, Tokio (1984).
- [ 7 ] Clauß, R.; Keil, A.; Maifer, P.; Wolf, C.-D.: Dynamik-Simulation ausgewählter Klassen von Starrkörpersystemen mit Anwendungen in der Manipulator-/Robotertechnik. Akademie der Wissenschaften der DDR, Institut für Mechanik, Karl-Marx-Stadt (1986).
- [ 8 ] Gumpert, W.: Einsatz von ad-hoc-Modellen in der Maschinendynamik. Diss. B, TH Karl-Marx-Stadt (1983).
- [ 9 ] I G E S 2 . 0 : ANSI-Standard (USA).
- [ 10 ] Groth, B.; Hilber, H. M.; Katz, C.; Werner, H.: FEDIS – Finite Element Data Interface Standard. Bericht Kernforschungszentrum Karlsruhe (1985).
- [ 11 ] FEM-Datenschnittstelle. TH Magdeburg, Methodisch-diagnostisches Zentrum Finite Elemente (1986).
- [ 12 ] Dym, C. L.: Analysis and modeling in mechanics: An informal view. Computers & Structures 16 (1983), S. 101 – 107.
- [ 13 ] Leopold, J.: Private Mitteilung. TH Karl-Marx-Stadt, Sektion Fertigungsprozeß und -mittel, 1985.
- [ 14 ] Anwendungsbeschreibung FEM-Programmsystem GITRA II. TH Harl-Marx-Stadt, Sektion Maschinen-Bauelemente, 1986.
- [ 15 ] Gattass, M., Abel, J. F.: Three dimensional linear dynamic analysis of buildings. Computers & Structures 17 (1984), S. 96 – 103.
- [ 16 ] Noor, A. K., Peters, J. M.: Reduced basis technique for nonlinear analysis of structures. AIAA-J. 18 (1980), S. 455 – 462.
- [ 17 ] Noor, A. K.; Peters, J. M.: Recent advances in reduction methods for instability analysis of structures. Computers & Structures 16 (1983), S. 67 – 80.
- [ 18 ] Mensel, G.; Michel, J.: Möglichkeiten des Einsatzes wissenschaftlicher Systeme in der Fertigung. Zeitschr. Wirtschaftl. Fertigung 80 (1985), S. 495 – 500.
- [ 19 ] Mc Gilton, H.; Morgan, R.: Introducing the UNIX-System. Mc Graw-Hill Book Company. New York (1983).