Computerstatik und Methode der finiten Elemente

Autor(en): **Anderheggen, Edoardo**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **97 (1979)**

Heft 50: **SIA-Heft 6**

PDF erstellt am: **15.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-85596

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Computerstatik und Methode der finiten Elemente

Von Edoardo Anderheggen, Zürich

Die moderne Computerstatik, die sich heute vorwiegend auf die Methode der finiten Elemente stützt, erlaubt das statische und dynamische Verhalten von Tragwerken mit Hilfe sehr wirklichkeitstreuer mathematischer Modelle zu analysieren. Im vorliegenden Artikel werden zuerst einige wichtige Grundgedanken der Methode der finiten Elemente kurz erläutert. Es wird dann auf Fragen der notwendigen kontinuumsmechanischen Ausbildung zukünftiger Konstruktionsingenieure eingegangen sowie auf einige Probleme, die sich in den Ingenieurbüros bei der Verwendung eigener Kleincomputer stellen können. Zuletzt wird versucht, die Bedeutung dieser ganzen Entwicklung für den Ingenieurberuf generell zu beurteilen.

L'emploi d'ordinateurs pour des problèmes de statique basé en grand partie sur la méthode des éléments finis permet aujourd'hui l'analyse statique et dynamique des structures à l'aide des models mathématiques très sophistiques. Dans cet article on essaie tout d'abord d'éclaircir certains princips théoriques fondamentaux de la méthode des éléments finis. On discute ensuite sur l'instruction nécessaire aux futures ingénieurs travaillant dans ce domaine aussi que sur certains problèmes qui peuvent se présenter quand des petits ordinateurs sont employés dans les bureaux d'études. Pour finir on essaye d'évaluer l'importance relative des ces dévelopements pour la profession d'ingénieur.

Modern structural analysis procedures mostly based on the finite element method allow the use of very sophisticated mathematical models for studying the static and dynamic behaviour of complex structures. In the present paper some basic theoretical principles of the finite element method are first reviewed. Questions concerning the necessary instruction of future civil and mechanical engineers working in this field are then discussed as well as some of the problems which may arise by the use of minicomputers in construction offices. Finally the relative importance of these developments for the engineering profession are assessed.

Es ist ein altes Begehren von Konstruktionsingenieuren, die bei statisch oder dynamisch beanspruchten Tragwerken entstehenden Verschiebungs- und Spannungszustände mit Hilfe mathematischer Modelle voraussagen zu können. Dies stellt seit über zwei Jahrhunderten das Ziel unzähliger Forschungsarbeiten dar. Dank der Leistungsfähigkeit moderner Computer ist es jedoch heute möglich geworden, mit mathematischen Modellen zu arbeiten, die das Tragverhalten von Bauwerken oder von Maschinenteilen unvergleichbar besser zu erfassen in der Lage sind als es früher nur mit Hilfe von Handrechnungen der Fall war. Entscheidende rein theoretische Fortschritte sind ebenfalls erzielt worden («Computer shapes theory»!). Vor allem ist es gelungen, das was früher eine Reihe einzelner Rechenverfahren zur Lösung spezifischer und oft allzu stark vereinfachter festigkeitstheoretischer Probleme war, mit einer einheitlichen, theoretisch sauber fundierten und für viele Problemarten allgemein anwendbaren Methode weitgehend zu ersetzen. Damit erklärt sich der erstaunliche Erfolg der Methode der finiten Elemente sowohl für *kontinuumsmechanische* als neuerdings auch für andere Anwendungen *(Wärmeleitung, elektrische und magnetische Felder, strömungstechnische Probleme* usw.).

Die moderne Computerstatik kann mit der FE-Methode weitgehend identifiziert werden, da andere Rechenverfahren heute nur in Spezialfällen eine Rolle spielen. Sie hat einen Reifegrad erreicht, der möglicherweise bei keiner anderen technischen Computeranwendung erreicht wurde. Weitere umwälzende theoretische oder methodologische Fortschritte sind allerdings in den achziger Jahren nicht zu erwarten. Dank leicht zugänglicher Hardware und benützerfreundlicher Software ist aber leicht vorauszusehen, dass in praktisch allen Ingenieurbüros, die in Bau- oder in Maschineningenieurwesen mit festigkeitstheoretischen Problemen zu tun haben, die FE-Methode zum alltäglichen Standardwerkzeug wird.

Es ist das Ziel dieses Artikels, einen Beitrag zu leisten, damit die dazu notwendigen Umstellungen möglichst schmerzlos erfolgen können. Beginnend mit einem Überblick einiger wichtiger theoretischer Grundlagen werden deswegen Ausbildungsfragen besonders betont, weil diese für eine problemgerechte Anwendung der für viele Ingenieure neuen Methode im Vordergrund zu stehen scheinen. Es wird dann auf einige Probleme hingewiesen, die sich beim praktischen Einsatz von Computerstatikmethoden in den Ingenieurbüros stellen können. Im Schlusswort wird versucht, die Bedeutung dieser ganzen Entwicklung zu relativieren.

Theoretische Grundlagen der FE-Methode

Die Bildung des mathematischen Modells erfolgt, indem man sich das Tragwerk in eine oft grosse Anzahl «finiter Elemente» einfacher Geometrie unterteilt vorstellt. Die Elemente sind miteinander in Knotenpunkten, meistens End- oder Eckpunkten, verbunden. In jedem Knotenpunkt werden als Problemparameter die Verschiebungskomponenten W_i eingeführt, deren kinematische Kontinuität notwendig ist, d. h. deren Werte in allen angeschlossenen Elementen gleich sein müssen (z. B. zwei Verschiebungen für ebene Fachwerke oder für Scheiben, eine Verschiebung und zwei Rotationen für Platten usw.). Man bezeichne als W_i^e den *i*-ten, zu einem Knotenpunkt des *e*-ten Elementes gehörenden Verschiebungsparameter. Zu jeder Knotenverschiebung W_i^e wird eine entsprechende, in der gleichen Richtung definierte, Knoteneinspannkraft oder interne Elementreaktion R_i^e eingeführt.

Beschränkt man sich der Einfachheit halber auf linear-elastische Materalien, auf infinitesimale Verschiebungen und auf ungedämpfte Systeme, lassen sich die auf die Elementknoten wirkenden internen Reaktionskräfte des *e*-ten Elementes wie folgt bestimmen:

$$R_i^e = \sum_j (K_{ij}^e + K_{Gij}^e) \cdot W_j^e + \Sigma\, M_{ij}^e \cdot \ddot{W}_j^e + P_i^e$$

In der modernen Kontinuumsmechanik ist der obigen Formel zweifellos eine zentrale Bedeutung zuzuschreiben. Die K_{ij}^e Koeffizienten der linear-elastischen Elementsteifigkeitsmatrix stellen jeweils den Wert der *i*-ten Reaktionskraft infolge einer Knotenverschiebung $W_j = 1$ dar. Sind im Element Spannungen vorhanden (z. B. Scheibenspannungen bei Beulproblemen) wird der entsprechende Einfluss von den K_{Gij}^e Koeffizienten der geometrischen Steifigkeitsmatrix (oft auch Matrix der initialen Spannungen genannt) erfasst. Erfährt das Element ungleichmässige Bewegungen, entstehen im Elementinneren d'Alembertsche Trägheitskräfte, die zu beschleunigungsproportionalen, von dem M_{ij}^e Koeffizienten der Elementmassenmatrix erfassten Knotenkräfte führen. Wirken auf dem Element äussere Lasten oder treten Zwängungen auf (z. B. als Folge von Temperaturänderungen), sind die entsprechenden Knotenreaktionen durch die P_i^e Koeffizienten des Elementlastvektors gegeben.

Nachdem für alle Elemente des Systems die oben beschriebenen Koeffizienten vom Computer numerisch bestimmt worden sind (wofür man heute für alle denkbaren Elementtypen Algorithmen kennt), können die resultierenden Knotenkräfte R_i, die am zusammengesetzten System jeweils den Knotenverschiebungen W_i entsprechen, aus einer einfa-

chen Summation über die Beiträge der einzelnen Elemente wie folgt bestimmt werden:

$$R_i = \sum_e R_i^e = \sum_j (K_{ij} + K_{Gij}) \cdot W_i + \Sigma M_{ij} \cdot \ddot{W}_i + P_i$$

wobei von den ohne den Elementindex «e» geschriebenen Koeffizienten der globalen Systemmatrizen die gleichen Einflüsse berücksichtigt werden wie von den entsprechenden Elementkoeffizienten. Ist W_i eine freie Knotenverschiebung, muss R_i als resultierende Knotenkraft aus Gleichgewichtsgründen verschwinden. Ist W_i bei Auflageknoten bekannt, entspricht R_i der dazugehörigen Auflagekraft. Es ist dann leicht, zur Formulierung des linearen Gleichungssystems für linear-elastische, statische Analysen zu gelangen:

$$\sum_j K_{ij} \cdot W_j + P_i = O$$

oder zur Formulierung des Eigenwertproblems, das bei Stabilitätsanalysen zur Bestimmung des kritischen Lastkoeffizienten λ_{kr} führt:

$$\sum_j (K_{ij} + \lambda_{kr} \cdot K_{Gij}) \cdot W_j = O$$

oder zur Formulierung des Eigenwertproblems, aus dem die Eigenfrequenzen ω_n und die dazugehörigen Eigenschwingungsformen bestimmt werden können:

$$\sum_j (K_{ij} + \omega_n^2 \cdot M_{ij}) \cdot W_j = O$$

Die hier angegebenen, auf wenige Grundbegriffe beschränkten theoretischen Herleitungen sollen vor allem das Hauptmerkmal der Methode der finiten Elemente erläutern. Nämlich dass die *Beiträge einfach geformter Elemente, ohne auf die Komplexität des Gesamtsystems Rücksicht zu nehmen, zuerst getrennt voneinander erfasst werden, in dem die Koeffizienten der Elementmatrizen numerisch bestimmt werden.* Aus diesen werden dann die *Systemgleichungen* auf einfache Art und Weise zusammengestellt. Dieses Vorgehen erlaubt Computerprogramme zu entwickeln, mit denen mathematische Modelle für praktisch beliebige, aus ganz verschiedenen Tragelementen zusammengesetzte Systeme gebildet werden können, was von keinem anderen numerischen Verfahren auch nur annähernd erreicht wird.

Ausbildungsfragen

Konstruktionsingenieure werden auch in Zukunft die Computerprogrammierung nicht zu beherrschen brauchen. Die Entwicklung von Anwendungssoftware, und insbesondere von Grosssystemen, was die FE-Programme meistens sind, ist nämlich ein Beruf für sich geworden. Die *generellen theoretischen Grundlagen der FE-Methode gehören hingegen zur Ausbildung jedes Konstruktionsingenieurs sowohl auf HTL- wie auf Hochschulstufe.* Wie man jedoch im letzten Abschnitt (etwas demonstrativ) anzudeuten versucht hat, können diese theoretischen Grundlagen auf ein recht bescheidenes Minimum beschränkt werden. Theoretische Schwierigkeiten treten vor allem bei den Algorithmen zur Bestimmung der Koeffizienten der Elementmatrizen auf, wofür meistens mathematische Variationsprinzipien angewendet werden, sowie bei der Lösung der oft sehr grossen Gleichungssysteme und Eigenwertprobleme. Damit braucht sich jedoch der durchschnittliche Konstruktionsingenieur nur am Rande zu beschäftigen.

Ein weiteres Problem steht aber sehr im Vordergrund. Dieses betrifft die *Wahl des mathematischen Modells,* also konkret die *Festlegung der Elementmasche, der Lastfälle,* usw., wenn das zu analysierende Tragwerk und die dazu verwendbaren FE-Programme gegeben sind. Als man noch ohne Computer auskommen musste, war man gezwungen, genau zu überlegen, wie man mit einem möglichst einfachen Modell die zur Bemessung des Tragwerkes wirklich notwendigen Informationen erhalten konnte. Man kam dabei oft auf gute Ideen (man denke etwa an die rechnerische Annahme gelenkig angeschlossener Fachwerkstäbe), die zu grossen Modellvereinfachungen führten, ohne auf das Wesentliche verzichten zu müssen. Wenn man mit FE-Programmen arbeitet, besteht hingegen die Gefahr, dass man nur versucht, die Geometrie des Tragwerkes so wirklichkeitstreu wie möglich zu modellieren, ohne sich sonst allzuviel zu überlegen. Man versucht z. B. sowohl das generelle Tragverhalten als auch Detailprobleme im gleichen Lauf zu analysieren. Obwohl die FE-Methode erlaubt, mit sehr wirklichkeitstreuen Modellen zu arbeiten, sind ihr leider *Grenzen gesetzt,* die man leicht überschreiten kann. Diesbezügliche Erfahrungen sind in der Praxis schon öfters teuer zu stehen gekommen. Auf der anderen Seite ist die FE-Methode ein Näherungsverfahren, dessen Resultate (ausser bei linear-elastischen, statischen Stabwerkproblemen) erst bei einer vernünftig gewählten, relativ engen Elementeinteilung brauchbar sind, was sowohl die Modellwahl als auch die Auswertung der Resultate erschwert. Obwohl in besonderen Fällen die Beratung von Spezialisten in Anspruch genommen werden kann, bleibt die Wahl oder mindestens die Beurteilung des verwendeten mathematischen Modells grundsätzlich im Kompetenzbereich des Konstruktionsingenieurs, der die Resultate dann auszuwerten hat. Damit ergibt sich ein wichtiges Ausbildungsziel, das nur erreicht werden kann, indem man den Studenten ermöglicht, vorhandene Computerprogramme zu verwenden und die daraus erhaltenen Resultate, am besten im Rahmen von Konstruktionsübungen, auszuwerten. Dies wäre mit der in den schweizerischen Hochschulen und in den vielen HTL-Schulen installierten Computerhardware im Prinzip heute schon möglich. Viele der heute in der Praxis verwendeten FE-Programme sind jedoch viel zu komplex, um sie mit vertretbarem Lernaufwand zu Übungszwecken einsetzen zu können.

Man kann sich weiter fragen, wie die «Computerstatik-Revolution» die sonstige festigkeitstheoretische Ausbildung von Ingenieuren zu beeinflussen hat. Dabei muss betont werden, dass neben den mechanischen Grundlagen, die sowieso Voraussetzung sind, das grundsätzliche, qualitative, oft ja *intuitive* Verständnis des Kräftespiels in einem Tragwerk für den projektierenden Ingenieur nach wie vor von grundlegender Bedeutung sind. Weiterhin kann dieses wichtige Ausbildungsziel in vielen Fällen am besten erreicht werden durch die Diskussion von einfachen analytischen Lösungen zu klar definierten Spezialproblemen oder mit Hilfe von Handrechenmethoden, die dem Student erlauben, nur mit Bleistift, Papier und Taschenrechner Verschiebungen und Schnittkräfte bei einfachen Tragwerken zu berechnen. Dazu gehören z. B., im Rahmen der einfachen Stabstatik, die Berechnung statisch bestimmter Systeme, die Kraftmethode und die Grundlagen der Plastizitätstheorie. Wenig sinnvoll erscheinen hingegen Methoden (z. B. die klassiche Deformationsmethode mit der absurden Trennung in verschiebliche und unverschiebliche Systeme, oder die Cross- und Kani-Methoden), deren Hauptziel in der Reduzierung des manuellen Rechenaufwandes liegt, ohne dass sie allzu viel zum grundsätzlichen Verständnis des Problems beitragen.

Wenig sinnvoll erscheinen auch analytische Verfahren, die ein allzu grosses, sonst unnötiges mathematisches Instrumentarium verlangen (z. B. bei der Lösung spezifischer Platten- oder Scheibenproblemen mit Hilfe von Reihenentwicklungen). Heute weiss man nämlich, dass man nicht mit Formeln, sondern nur durch die Anwendung numerischer Algorithmen dem Verhalten wirklicher, komplexer Tragwerke nahekommen kann. Wohl können analytische Lösungen zum generellen Verständnis des Verhaltens bestimmter Tragwerksarten verhelfen. Wenn der dazu notwendige mathematische Aufwand zu gross wird, ist es aber sicher sinnvoller, das gleiche, durchaus wichtige Ziel zu verfolgen, in dem die Resultate numerischer Computerberechnungen von den Studenten interpretiert und ausgewertet werden.

Computerstatik im Alltag der Ingenieurbüros

Weil die Erfahrung zeigt, dass die Computerstatik als alltägliches Instrument des projektierenden Ingenieurs oft mit seiner diesbezüglichen Ausbildung steht und fällt, wurde dieses Thema in den letzten Abschnitten besonders betont. Andere Fragen verdienen jedoch auch Aufmerksamkeit.

Viele Ingenieurbüros werden in den achtziger Jahren mit der Frage konfrontiert sein, ob ein eigener Kleincomputer anzuschaffen ist oder ob die Dienste von Rechenzentren und Service-Büros bei Bedarf in Anspruch genommen werden sollen. Heute schon gibt es nämlich Kleincomputer, deren Anschaffungskosten selbst für kleine Ingenieurbüros erträglich sind, und deren Leistungsfähigkeit für die meisten alltäglichen statischen Berechnungen ausreicht. *Das Hardwareproblem ist sozusagen gelöst, leider wird aber das Softwareproblem noch für manche Jahre zu schaffen geben.* Es ist nämlich durchaus zu erwarten, dass in Zukunft die Hardwarekosten mehr und mehr vernachlässigbar sein werden im Vergleich zu den Kosten der Programmentwicklung, der Programmwartung und überhaupt des Know-Hows, das zu einem sinnvollen Einsatz technischer Anwendungsprogramme notwendig ist. Dies erklärt die zum Teil unvernünftig hoch aussehenden Rechenkosten, die manchmal von Rechenzentren verlangt werden müssen, wie auch die unerwarteten Schwierigkeiten und die hohen indirekten Kosten, die sich bei der Verwendung eines eigenen Kleincomputers ergeben können.

Sicher ist, dass bei der Anschaffung eines Kleincomputers die mitgelieferte oder sonst erhältliche Software sowie die zu erwartende Unterstützung eher zu evaluieren sind als die Hardware selber. Sicher ist auch, dass heute die grossen Rechenzentren bezüglich Anwendungssoftware immer noch wesentlich mehr anzubieten haben als das, was bei Kleincomputern erhältlich ist. Das wird sich aber möglicherweise schon in einigen Jahren ändern. Das Pendel wird dann, wenigstens für technische Anwendungen, eindeutig auf die Seite der Kleincomputer ausschlagen, wobei zentral gelegene Grosscomputer vor allem für Datenbankanwendungen eingesetzt werden. Nicht zu übersehen ist zudem die Möglichkeit, eigene, als intelligente Terminals verwendete Kleincomputer durch gewöhnliche Telephonwahlleitungen an Grosscomputer oder an Computernetzwerke anzuschliessen.

Bei den vielen in den Ingenieurbüros verstreuten Kleincomputern der achtziger Jahre wird man aber nicht nur von professionellen Programmierern entwickelte Fremdprogramme verwenden. Dank leicht zugänglicher Hardware und benützerfreundlicher Systemsoftware (interaktive Textverarbeitung, einfache Programmiersprachen wie PASCAL oder BASIC usw.) ist durchaus zu erwarten, dass manche Ingenieure, zuerst vielleicht als Nebenbeschäftigung, ihre *eigenen Kleinprogramme für wiederkehrende Anwendungen* oder ihre eigenen *Vor- und Nachlaufprogramme zu bestehenden Grossprogrammen* entwickeln werden. Dabei soll die Tatsache nicht als störend empfunden werden, dass für die genau gleiche Anwendung in vielen Ingenieurbüros immer wieder ähnliche Programme neu entwickelt werden. Der Aufwand für die Entwicklung eines Computerprogramms, das mehr oder weniger nur vom Programmierer selber verwendet wird, ist nämlich meistens um eine Grössenordnung kleiner als der zur Entwicklung eines Computerprogramms, das die genau gleichen Probleme löst, das aber allgemein verwendet werden kann. In manchen Fällen ist es sogar einfacher, ein eigenes Programm zu schreiben als eine fremde Benützeranleitung zu lesen. Etwas gefährlich dürfte es hingegen werden, wenn Ingenieurbüros auf die Idee kämen, als Nebenverdienst ihre Hausprogramme zu verkaufen. Nebenamtliche Programmierer (zu denen auch die meisten Hochschulforscher gehören) haben nämlich verständlicherweise die Tendenz, sich auf die mathematisch-algorithmische Lösung der gestellten Aufgaben zu konzentrieren. Dies ist jedoch für den professionellen Programmierer, und besonders bei computerstatischen Anwendungen, meistens die kleinste Sorge. Fragen der Benützerfreundlichkeit von Ein- und Ausgabe, der internen Datenorganisation, der Effizienz bei jeder Problemgrösse, der Maschinenunabhängigkeit, der Dokumentation sowohl der Eingabe als auch des Programms selber, der Benützerunterstützung und der Programmwartung spielen nämlich bei kommerziell anwendbaren Computerprogrammen in der Regel eine viel wichtigere Rolle.

Schlusswort

Man hat im letzten Abschnitt versucht, auf einige Punkte hinzuweisen, die zu berücksichtigen sind, wenn in einem Konstruktionsbüro Soft- und Hardwareanschaffungen evaluiert werden. Es ist jedoch klar, dass dieser Entscheid meistens nicht nur aufgrund möglicher computerstatischer Anwendungen getroffen werden soll. Allgemein kann gesagt werden, dass die doch sehr spektakulären Erfolge der FE-Methode allein nicht eine Revolution in der Arbeitsweise von Konstruktionsingenieuren herbeiführen können, weil die Tragwerksanalyse nur eine, und nur selten die wichtigste der vielen Aufgaben ist, die täglich gelöst werden müssen. Es darf an dieser Stelle nicht verschwiegen werden, dass bei anderen für den Konstruktionsingenieur durchaus relevanten Gebieten auch *Misserfolge* zu verzeichnen sind. Als Misserfolg sind zum Beispiel die weltweit doch beachtlichen Forschungsarbeiten zu bezeichnen, die den automatischen optimalen Entwurf und die Bemessung von Tragwerken mit Hilfe mathematischer Optimierungsmethoden (z. B. die lineare Programmierung) zum Ziel hatten. Es war dabei ein Fehler zu glauben, der Computer könne selbständig wichtige Bemessungsentscheide treffen, die nach wie vor nur dem verantwortlichen Ingenieur zustehen können. Bemessungsprogramme, die meistens empirisch arbeiten, werden heute praktisch nur für besondere Standardkonstruktionen (z. B. im Wagen- oder Schiffbau) verwendet, wo eine klar definierte und vorgegebene Anzahl von Bemessungsparametern jeweils zu bestimmen ist, oder dort wo es Normen gibt (z. B. die Stahlbetonnormen gewisser Länder), die genaue Bemessungsvorschriften enthalten. Dabei sind leider diese Normen nur selten computergerecht formuliert, was die Entwicklung entsprechender Computerprogramme wesentlich erschweren kann.

Zu anderen Misserfolgen führte auch machmal der Versuch, Computer für Anwendungen zu verwenden, bei denen der Aufwand für die Spezifikation der Ausgangsdaten zu gross ist im Vergleich zu dem, was der Computer dann mit diesen Daten anfangen kann. Soll z. B. ein Ausführungsplan vom Computer automatisch gezeichnet werden, darf die Spezifizierung der dazu notwendigen Eingabedaten nicht aufwendiger sein als die manuelle Durchführung der Zeichnung selber.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Computer, in aller erster Linie bei der Tragwerksanalyse, zu sehr grossen Fortschritten, jedoch noch nicht zu einer tiefgreifenden Revolution in der Arbeitsweise von Konstruktionsingenieuren geführt hat, wie das bei anderen Berufsgattungen der Fall war. Der Ingenieurberuf ist vielleicht zu vielseitig, um in so kurzer Zeit revolutioniert zu werden. Ob, wie und wann ein derartig ehrgeiziges Ziel erreicht werden kann, ist heute noch nicht allzu klar. Darüber soll jedoch in einem anderen, dem «Computer Aided Design» gewidmeten, Artikel dieser Serie näher berichtet werden.

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. *E. Anderheggen*, Institut für Informatik, ETH-Hönggerberg, 8093 Zürich.