

FEM *Finite Elemente Methode*

Richard Reinisch

LIT-108,109, DSK-486..489

1. Theoretischer Teil (Praktischer Teil folgt)

1.1 Einführung

Diese Methode ist ein **numerisches Rechenverfahren zur Lösung von Problemen der mathematischen Physik**. Vorrangig werden Probleme der Strukturmechanik (Statik und Dynamik) und stationäre bzw. instationäre Feldprobleme aus der Theorie der Wärmeleitung, der Strömungsmechanik, der elektromagnetischen und akustischen Wellentheorie gelöst. Die zugehörigen Gleichungen sind im Fall zwei- oder dreidimensionaler Probleme partielle Differentialgleichungen. Die FEM kann daher als Methode zur Lösung derartiger Differentialgleichungen eingesetzt werden.

Bei der Anwendung in der Strukturmechanik wird der Bauteil in sehr **viele, kleine Elemente zerlegt, deren physikalisches Verhalten** entweder näherungsweise oder exakt **bekannt ist**. Jedes Element ist für sich abgegrenzt und mit anderen Elementen oder der Umgebung (Auflagern usw.) nur an definierten Stellen den Nodes = Knoten verknüpft. Die damit nachgebildete Struktur soll möglichst die gleichen Eigenschaften aufweisen, wie der damit nachgebildete Bauteil, wobei die Anzahl, Art und Anordnung der Elemente wesentlich auf die Genauigkeit einwirken. Dadurch werden die Unbekannten des Problems anstatt durch kontinuierliche Funktionen an einer Vielzahl bestimmter Punkte (Knoten) definiert. Jede physikalische Größe die dort übertragen wird, läßt sich durch eine mathematische Gleichung beschreiben, das Strukturmodell wird ein Rechenmodell, aus den Differentialgleichungen entstehen, **bei einfachen Fällen lineare Gleichungssysteme**, die durch leistungsstarke Computer schnell gelöst werden können. Die Kostenreduktion der Hard- und Software und die Entwicklung leistungsfähiger Ein- und Ausgaberroutinen (Pre- und Postprozessoren) haben entscheidend zur Akzeptanz in der industriellen Praxis beigetragen.

Die Methode hat **folgende Vorteile**:

- 1 daß sie hinsichtlich anderen Theorien erweiterbar ist, also physikalisch und geometrisch nichtlineare Theorien, anisotrope oder viskoelastische Werkstoffe oder unstetige Schwingungen berücksichtigt werden können.
- 2 Experimentelle Versuche können auf ein Minimum beschränkt werden, was Entwicklungszeit und -kosten erspart.
- 3 Leistungsfähige Schnittstellen zu CAD erlauben, auch komplexe Strukturmodelle zu erzeugen und mit FEM analysieren zu lassen.
- 4 Diese ermöglicht auch die Optimierung von Bauteilen hinsichtlich Minimierung von Gewicht, Temperaturen usw.

Die Methode hat **folgende Nachteile**:

- 1 geschlossene Lösungen sind nicht möglich, daher ist die Beurteilung von Einzel-Einflüssen nicht einfach feststellbar.
- 2 die Verbesserung der Rechengenauigkeit hängt nicht nur von der Zahl der Elemente ab, sondern auch von deren Art und dem Grad des Näherungspolynoms.

1.2 Entwicklung

Wurden früher Berechnungen hauptsächlich aus Sicherheitsgründen durchgeführt, so stehen heute Wirtschaftlichkeitsüberlegungen im Vordergrund. Verkürzte Produktlebenszyklen zwingen zu rascher Konstruktion und Entwicklung, oft auch bei verminderten Herstellkosten und der Pflicht, sparsam mit Rohstoffen umzugehen. Die Bedeutung der Produktsimulation wird durch folgenden Sachverhalt deutlich: Der Anteil der Konstruktionsaufgaben liegt im Maschinenbau bei durchschnittlich 30% Auftragsdurchlaufzeit. Ferner werden die Herstellkosten eines Produktes bereits zu 75% in der Konstruktion festgelegt. Da Produktivität in der Fertigung bis 1965 weit mehr gesteigert wurde als in der Konstruktion, lag es nahe auch dort nachzuziehen, was der Einführung des FEM-Einsatzes stark entgegenkam.

Beispiele:

- in der Felgenentwicklung konnte durch FEM der zeitliche und finanzielle Aufwand für die Kokillenkonstruktion und die anschließende Dauerprüfung halbiert werden, indem kostspielige Iterationschleifen zwischen Konstruktion und Versuch eingespart wurden (Quelle: Seiffert, Scharnhorst, VDI-Berichte 699, S.25, VDI-Verlag 1988).
- Entwicklung eines Kranhakens: Einsparung von ca. öS 2.8 Mio. und ein halbes Jahr Entwicklungszeit.
- Neuentwicklung eines Flaschenöffners aus Kunststoff anstelle von Metall: Einsparung von öS 350.000.- in der Entwicklungsphase.
- Herstellung von Waschbecken: bisher mußten Versuche durchgeführt werden, um den Nachweis einer Temperaturwechselfestigkeit von 5000x heiß und kalt zu erbringen, was ein halbes Jahr erforderte, mit der rechnerischen Methode konnten verschiedene Ausführungen in einer Woche getestet werden.

Am TGM wird derzeit mit COSMOS- und ANSYS-Software auf PC unterrichtet, für die Schüler steht eine limitierte COSMOS-Version für bis zu 50 Knoten oder Elementen auf 4 x 3 1/2"- Disketten zur Verfügung (Version 1.7) (PCN-LIT-108,109, PCN-DSK-486..489). COSMOS zeichnet sich durch eine besonders übersichtliche Menüführung aus, besitzt allerdings weniger Elemente zur Auswahl als ANSYS.

Weitere Beispiele zeigen die nächsten Seiten:

1.2 Klassische Anwender

Als „klassisch“ sollen hier die Anwender bezeichnet werden, bei denen Sicherheitsaspekte für die Wahl der Methode ausschlaggebend sind oder waren.

Klassischer Anwender der Finite Elemente Methode ist die Luft- und Raumfahrtindustrie. Hier hat man schon sehr früh die Leistungsfähigkeit dieses Berechnungsverfahrens bei der Auslegung von Flugzeugstrukturen und anderen Flugkörpern erkannt.

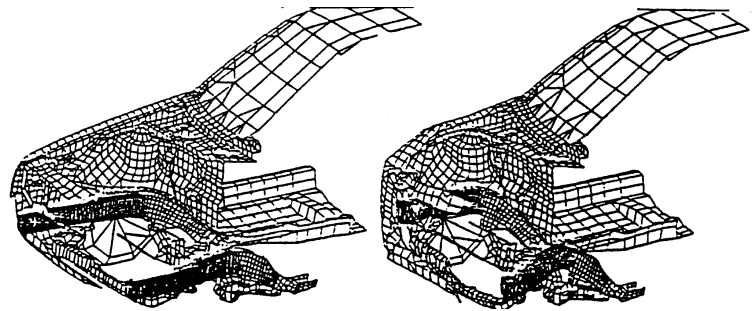


Bild 1: Crash-Simulation eines Pkw mit LS-DYNA3D, Quelle: VW AG

Auch in der Automobilindustrie hat die FEM eine ähnlich starke Verbreitung gefunden. Das Berechnungsspektrum reicht von der Dimensionierung der Schalldämpferanlage über die Optimierung des Fahrwerkverhaltens bis hin zur Berechnung kompletter Motorkomponenten. In zunehmendem Maße werden auch zeitaufwendige und kostspielige Experimente wie Windkanalversuche und CrashTests durch FEM-Simulation zwar nicht ersetzt, aber auf ein Mindestmaß reduziert.

Schwerfahrzeugbau und die Landtechnik zählen ebenso zu FEM-Anwendern wie der Anlagenbau oder der Kraftwerksbau. Hier sind insbesondere Rohrleitungs- und Behälterberechnungen zu erwähnen.

Im Bereich des allgemeinen Maschinenbaus hat die Finite Elemente Methode als Hilfsmittel beim rechnerunterstützten Konstruieren ebenfalls stark an Bedeutung gewonnen. FEM soll dazu beitragen, daß auch im Konstruktionsbereich die Durchlaufzeit verkürzt wird und eine spürbare Produktivitätssteigerung einsetzt.

Auch für den Schiffbau und den Offshore-Bau ist FEM zu einem unverzichtbaren Werkzeug zum Nachweis der Funktionstüchtigkeit geworden.

Eine besonders große Resonanz hat die Methode im Bauwesen gefunden. Schlanke Schalenkonstruktionen, filigrane Brückenbauwerke oder auch netzartige Konstruktionen wie das Olympiazeldach in München wären ohne FEM kaum berechenbar. Die heute beim U-Bahn-Bau zum Stand der Technik zählenden neuen Tunnelvortriebstechniken hätten ohne FEM-Nachweise nie ihre Zulassung erhalten. Stützkonstruktionen von Seilbahnen werden mit FEM ebenso untersucht wie die Sickerströmungen bei Dämmen oder die Ausbreitung von Grundwasserver-schmutzungen.

1.3 Neuere Anwender

„Neuere Anwender“ nutzen die Methode hauptsächlich mit dem Ziel der Konstruktionsoptimierung, Entwicklungs-, Fertigungs- und Materialkosten zu minimieren, Entwicklungszeiten zu kürzen und gestiegene Qualitätsanforderungen zu befriedigen.

Ein Beispiel, wie die FEM sinnvoll im Entwurfsprozeß eingesetzt werden kann, zeigt **Bild 2**. Hier geht es um die optimale Auslegung einer Sonotrode. Die Sonotrode dient zur Kunststoffverschweißung. Damit eine durchgehende Schweißnaht erzeugt wird, muß die Unterkante der Sonotrode bei 20 kHz möglichst gleichmäßig schwingen. Dieses Ziel wurde bisher durch eine „trial-and-error“-Methode in zahlreichen Versuchen mit unterschiedlichen Varianten erreicht. Mit der FE-Analyse konnte der Aufwand reduziert werden, indem am Bildschirm das Verhalten von drei ausgewählten Punkten bei verschiedenen Frequenzen und für verschiedene Entwürfe verfolgt wurde. Damit konnten die Versuche auf wenige, erfolgversprechende Entwürfe reduziert werden.

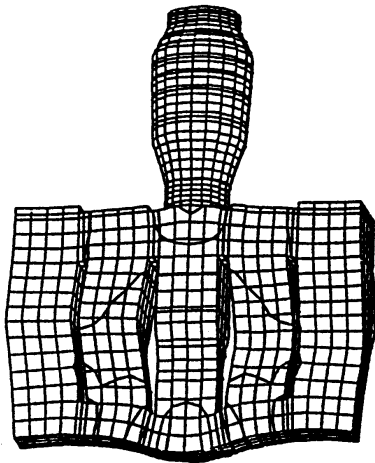


Bild 2: Sonotrode

FEM-Berechnungen erschließen insbesondere der chemischen Industrie neue Einsatzgebiete für ihre Verbundwerkstoffe. Mit der rechnerischen Spritzgußsimulation ist es möglich, das Formfullverhalten von Thermoplasten zu studieren.

In der Elektro- und Elektronikindustrie werden neben herkömmlichen Berechnungsaufgaben aus der mechanischen Konstruktion auch Analysen von elektrostatischen und elektromagnetischen Feldern durchgeführt. Die gestiegene Packungsdichte und die große Empfindlichkeit der SMD-Technik (SMD = Surface Mounted Device) hinsichtlich ungleichmäßiger Längenausdehnungen der unterschiedlichen Materialien führen dazu, daß die Temperaturanalyse von Leiterplatten zunehmend an Bedeutung gewinnt. Die Entwicklung piezoelektrischer und akustischer finiter Elemente erlaubt die Simulation von Hörschall-Wandlern, Ultraschall-Wandlern und Oberflächenwellenfiltern.

Aus dem Bereich der Freizeitindustrie ist der Einsatz von FEM beim Design von Turnschuhlaufsohlen, Tennisschlägern, Surfbrettern und Skiern bekannt.

Beispiele aus der Konsumgüterindustrie sind u. a. thermische Berechnungen an Bügeleisen, dynamische Untersuchungen an Waschmaschinen, Optimierung von Brillengestellen, aber auch, wie schon erwähnt, die Auslegung von Korkenziehern oder die Untersuchung von Waschbecken.

Auch in der Medizintechnik gibt es Problemstellungen, die mit FEM untersucht werden. So sind Anwendungen bekannt, die sich mit Hüftgelenkimplantaten, Zahnspannen oder intraokularen Linsen beschäfti-

gen. Zur optimalen Auslegung eines Herzschrittmachers wird das elektrostatische Feld am menschlichen Herzen untersucht.

In der Geophysik benutzt man ebenfalls FEM. So wird versucht, durch die FEM-Berechnung das Auseinanderdriften der Kontinentalschollen zu analysieren.

Der FEM-Einsatz zum Thema Baumchirurgie, das statische Verhalten von Pflanzen oder die Temperaturanalyse eines Maiskorns dürfen aber immer noch als exotische Anwendungen bezeichnet werden.

2 Berechnungsaufgaben

2.1 Statik und Dynamik

Berechnungsaufgaben der klassischen Mechanik waren bislang der Schwerpunkt beim Einsatz der Finite Elemente Methode. In erster Linie sind dies statische und dynamische, lineare und nichtlineare Berechnungsprobleme. Der Begriff „statische Berechnung“ steht in diesem Fall für Festigkeitsberechnungen, bei denen zeitabhängige Vorgänge oder Massenträgheits- und Dämpfungseffekte das Tragverhalten einer Struktur nur unwesentlich beeinflussen. Kann der Einfluß nicht vernachlässigt werden oder ist die Belastung zeitabhängig, so wird eine „dynamische Analyse“ erforderlich.

Typische FE-Anwendungen sind Untersuchungen, bei denen die Deformationen und Spannungen in einer Struktur unter einer vorgegebenen Last berechnet werden.

Beispiele für dynamische (zeitabhängige) Belastungen sind z. B. Wechselkräfte an rotierenden Maschinen, Schockbelastungen infolge Explosion, Zufallskräfte, wie sie bei Erdbeben auftreten oder auch wandernde Lasten auf einer Brücke.

Bild 3 zeigt das FE-Netz für den Schwenkarm eines Magnetplattenlaufwerks. Ziel der Analyse war die Bestimmung der Eigenfrequenzen und Eigenformen. Der Vergleich zwischen rechnerischer und experimenteller Untersuchung zeigt eine sehr gute Übereinstimmung.

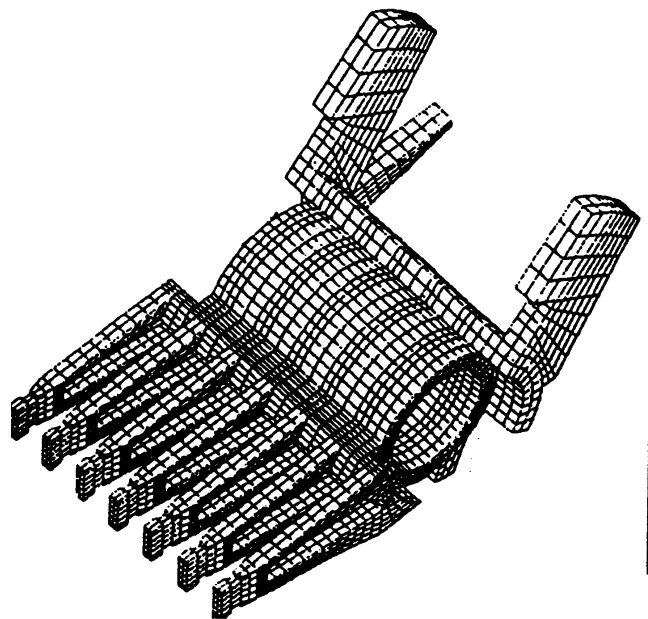


Bild 3: Schwenkarm eines Magnetplattenlaufwerks, Quelle Siemens AG, München

Man unterscheidet lineare und nichtlineare Analysen. Bei linearen Berechnungen ist die Matrix des Gleichungssystems konstant, d. h. die Verformungen und die sich daraus ergebenden Spannungen sind proportional zur Last (Beanspruchung). Mathematisch sind nichtlineare Berechnungen dadurch charakterisiert, daß die Gleichungsmatrix von der Verformung, d. h. vom unbekanntem Ergebnisvektor abhängig ist, was eine iterative Lösung erfordert.

Nichtlinearitäten lassen sich in drei Arten untergliedern: in Geometrie-, Material- und Strukturnichtlinearität.

Unter **Geometrienichtlinearität** versteht man die Einbeziehung der Auswirkung großer Verformungen (Theorie II. Ordnung) und/oder großer

Dehnungen auf das Tragverhalten von Bauteilen. Dazu gehören auch Beul- und Stabilitätsuntersuchungen.

Von **nichtlinearem Materialverhalten** (Plastizität) spricht man, wenn die Spannungen von Dehnungen/Verzerrungen nichtlinear abhängig sind. Bei linear elastischen Materialien sind die Spannungen proportional zu den Verzerrungen. Diese Proportionalität gilt für viele Werkstoffe bei hinreichend kleinen Spannungen. Bei Entlastung von linearem Material geht die Dehnung auf Null zurück, bei elastischplastischem Material bleibt ein Restdehnung.

Hyperelastisches Verhalten zeigen Elastomere. Die Spannungs-Dehnungs-Beziehung ist wiederum nichtlinear. Die Entlastung erfolgt jedoch auf demselben Pfad wie die Belastung, so daß keine Restdehnung übrig bleibt.

Zeitveränderliches Materialverhalten tritt bei Metallen unter hohen Temperaturen, bei Polymeren und bei Glas auf. Man unterscheidet viskoelastisches Material, wo elastische und Kriech- und Relaxationseffekte (Glas) auftreten, und viskoplastisches Material, wo plastische sowie Kriech- und Relaxationseffekte gleichzeitig auftreten, wie z. B. bei Stahl unter hoher Temperatur.

Unter **Strukturnichtlinearität** versteht man veränderliche Randbedingungen, Kontaktprobleme oder unterschiedliche Schalterzustände bei Kontrollelementen.

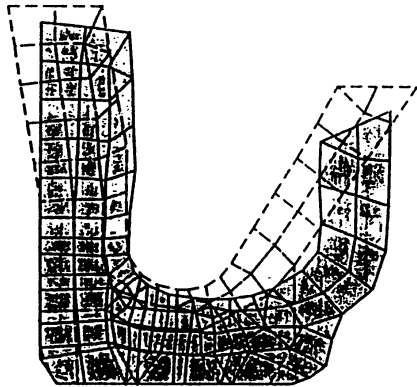


Bild 4: Nichtlineare Berechnung - Dichtring hyperelastisches Material

In **Bild 4** wird die Verformung eines Dichtrings (rotationssymmetrisches Bauteil) aus Elastomere gezeigt, der in eine ringförmige Gehäuse-nut aus Stahl eingelegt und verpreßt wird. Hier müssen alle drei Nichtlinearitäten berücksichtigt werden: große Dehnungen, nichtlineares Materialverhalten und Kontaktbedingungen.

2.2 Temperaturfelder und analoge Feldprobleme

Ein weiteres großes Anwendungsgebiet der FEM ist die Temperaturfeldberechnung. Es werden berücksichtigt die **Wärmeleitung** durch Energieaustausch mittels Transportmedium, der **Wärmeübergang** von einem Festkörper zu einem anderen Medium und die **Wärmestrahlung** als Energieübertragung durch elektromagnetische Wellen. Die Berechnungsprobleme können linear bzw. nichtlinear und stationär oder instationär sein. Die nichtlineare Analyse gestattet die Berücksichtigung von temperaturabhängigen Wärmeleitzahlen und Wärmequellen, von Strahlung und nichtlinearen Wärmeübergangseffekten. Sind die Temperaturverteilungen in Abhängigkeit eines Zeitverlaufs zu bestimmen, so ist eine transiente Analyse notwendig. Mit ihr können auch der Wärmegentransport und das Wärmespeichervermögen einer Struktur ermittelt werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Simulation von Phasenübergängen.

Die auf diese Weise ermittelten Temperaturfelder werden oft für eine nachfolgende Festigkeitsuntersuchung weiterverwendet.

Bild 5 zeigt den Rohrquerschnitt einer Kaffeemaschine: Ziel war es, die Wassertemperatur für das Aufbrühen des Kaffees heraufzusetzen. Durch höhere Temperatur wird das Aroma verbessert. Als eine mögliche Konstruktionsverbesserung wurde vorgeschlagen, die Querschnitte von Wasserrohr und Heizungsrohr so zu ändern, daß weniger Wärme verlorenght. Mit Hilfe der FE-Analyse und unter Verwendung des Optimie-

rungsalgorithmus wurde, ausgehend von einem vorgegebenen Querschnitt, ein Querschnitt mit verbessertem Wärmeverhalten bestimmt.

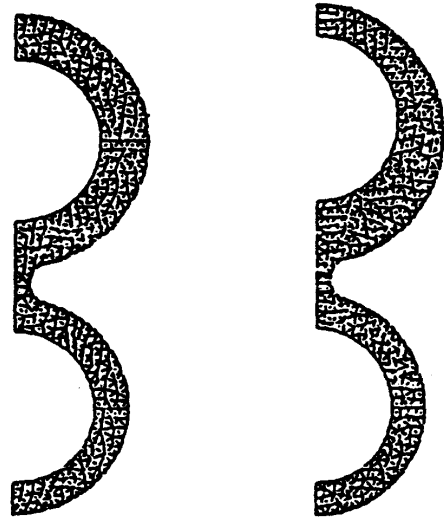


Bild 5: Temperaturfeldanalyse - Optimierung des Querschnitts hinsichtlich der Wärmeleitung
links: bestehendes Design, rechts: optimierter Querschnitt
Quelle: SIEMENS AG

Die Differentialgleichung für das Wärmefeld ist analog zu vielen anderen Differentialgleichungen, die andere physikalische Zusammenhänge beschreiben. So können mit dem Wärmeleitungsmodul eines FE-Programms z. B. Diffusion, Torsion (Prandtl'sche Spannungsfunktion), Potentialströmung oder Sickerwasserströmung bearbeitet werden. Auch elektrostatische Felder oder stationäre Stromleitungsprobleme können mit dem Wärmeleitungsmodul gelöst werden.

2.3 Elektrische Felder

Die Analogie zwischen Wärmeleitung und Elektrostatik legt nahe, FEM-Berechnungen auch auf elektrostatische Feldprobleme anzuwenden. Bei der Wärmeleitung muß zur Bestimmung der Temperaturfelder die sog. „Poisson-Gleichung“ gelöst werden. Mit einer analogen mathematischen Formulierung kann auch die elektrostatische Potentialverteilung beschrieben werden. Den Größen: Temperatur, Wärmeleitfähigkeit und Wärmestromdichte entsprechen in der Elektrostatik das elektrische Potential, die Dielektrizitätskonstante und die Ladungsdichte. Bei stationärer Stromleitung entspricht der Temperatur das elektrische Potential und der Wärmeleitung die elektrische Leitfähigkeit.

2.4 Magnetfelder

Magnetfeldanalysen mit der Finiten Elemente Methode gestatten die Berechnung und Dimensionierung von Relais-Spulenkörpern, elektromotorischen Antrieben, Schaltern oder die Optimierung der Feldverteilung in Dünnschichtspeichereinheiten. Stationäre Magnetfeldprobleme werden in der Regel im 2-d Fall über ein Vektorpotential und für 3-d Strukturen über das Skalarpotential gelöst. Transiente und harmonische (infolge Wechselstrom) Magnetfelder werden heute meist nur für zweidimensionale oder axialsymmetrische Problemstellungen angeboten. Einige Programme bieten aber bereits dreidimensionale transiente Magnetfeldanalysen.

Da hier eine Vielzahl von Parametern variiert werden kann, läßt sich die FEM besonders effektiv einsetzen.

Z. B. bei Magnetfeldproblemen, bei Akustikaufgaben (Schallabstrahlung) oder bei elektrostatischen Problemen. Bei solchen Aufgaben wird sinnvollerweise der umgebende Luftraum durch Boundary Elemente abgedeckt, die sich bis ins Unendliche erstrecken (infinite boundary elements). Die Struktur selbst wird durch Finite Elemente beschrieben. Dies erspart die aufwendige Modellierung des Luftraums, was insbesondere bei 3-dimensionalen Aufgaben von Bedeutung ist und es wird auch die „künstliche“ Vorgabe von Randbedingung im Nahbereich vermieden.

3. Design-Optimierung

Gleichzeitig mit der Entwicklung von FEM-Programmen hat die Hardwareleistung enorm zugenommen. Während die Analyse eines Bauteils bisher häufig bereits Stunden auf den Rechnern erforderte, ist es nunmehr möglich, eine Reihe von Varianten in diesem Zeitraum zu berechnen. Damit eröffnen sich weite Möglichkeiten, um mit Hilfe der Programme Varianten und Verbesserungen berechnen zu lassen und dem Anwender ein zielgerichtet geändertes Modell mit Ergebnissen zu liefern.

Die Design-Optimierung gehört zu diesen Anwendungsmöglichkeiten, die erhöhte Computer-Ressourcen erfordert, jedoch überzeugende Resultate erzielt. Die bisherige Anwendung der FEM lieferte Ergebnisse für ein definiertes Bauteil, überließ es jedoch dem Anwender, bei unbefriedigenden Ergebnissen die notwendigen Schlüsse zu ziehen oder die sinnvollen Änderungen abzuleiten. Viele technische Anwendungen lassen eine Vielzahl von Änderungen zu, und die zur Änderung freigegebenen Parameter beeinflussen zahlreiche unterschiedliche Zustandsgrößen. Ein Ingenieur, der nicht die ausreichende Erfahrung mit Bauteilen dieser Art hat, kann auch schon bei wenigen Parametern nicht mehr überblicken, welche Änderung der Parameter die Ergebnisgrößen jeweils in welche Richtung beeinflusst.

Da die FEM das geeignete Werkzeug darstellt, um einzelne Lösungen für eine jeweilige Parameterkombination zu berechnen, ist nur noch eine Kopplung mit einer geeigneten Optimierungsstrategie erforderlich. Damit kann das Programm automatisch mit gegebenen Parametern eine Analyse durchführen, die Ergebnisse sichern, mit geänderten Parametern ein weiteres Ergebnis erstellen und darauf aufbauend zielgerichtet eine Variante entwickeln, bei der die zugrundeliegenden Parameter zu einem optimalen Ergebnis führen.

Während viele technische Fragestellungen die Minimierung von Bauteilgewichten oder von tragenden Querschnitten betreffen, hat sich jedoch gezeigt, daß diese Möglichkeiten nicht ausreichen. Auch Steifigkeiten, Frequenzen, Temperaturen oder elektrische Feldstärken können Zielgrößen sein. Während die Programme zum Teil bereits diese Möglichkeiten bieten, finden sie nur langsam Anwendung im Ingenieuralltag.

4. Integration

Ein großes Thema wird die Integration sein. Ein modernes FEM-Programm muß mit der Hardwareentwicklung Schritt halten. Es werden zunehmend Hardwareroutinen für Matrizenoperationen bis hin zur Gleichungsaflösung übernommen, es wird die Parallelverarbeitung unterstützt und der Datenaustausch zwischen unterschiedlichen Rechnern ermöglicht.

Integration im Softwarebereich heißt, daß Eingabe- und Ausgabedaten standardisiert werden, sodaß unterschiedliche Programme wie CAD-Programme, FE-Programme, aber auch Textverarbeitungsprogramme miteinander kommunizieren können. Mit den Standards DXF (zu AutoCad), IGES, VDA-FS und STEP und mit POSTSCRIPT und HPLC wird dies bereits heute ermöglicht.

5. Benutzeroberfläche

Die Handhabung von FEM-Programmen wird ständig vereinfacht. Noch 1980 mußten stapelweise Inputlistings durchgeforstet werden, um maximale Spannungen oder Verschiebungen aufzufinden. Heute werden Ergebnisse durch farbige Plots am Bildschirm dargestellt. Ziel ist es heute, den Bildaufbau zu beschleunigen, die Benutzeroberfläche zu vereinfachen und Benutzerhilfen, wie z. B. automatische Lastschrittsteuerung für nichtlineare Aufgaben, einzubauen.

6. FEM an einer höheren Abteilung für Maschinenbau/ Kraftfahrzeugtechnik

Da die Finite Elemente Methode als mathematisches Näherungsverfahren in der Konstruktion, Entwicklung und Fertigung eingebunden ist, ist sie durch zahlreiche Querverbindungen mit den einzelnen Gegenständen verbunden und auch fächerübergreifend.

Folgende Gegenstände sind Voraussetzung oder Nutznießer der FEM:

Elektronische Datenverarbeitung im 2. und 3. Jahrgang (je 2 Wochenst.): Gleichungslösungen

Mechanik im 2. bis 4. Jahrgang (je 3 Wochenst.): Festigkeits-, Schwingungs-, Bewegungs-, Strömungs- und Wärmelehre

Maschinenelemente im 2. und 3. Jahrgang (3 und 5 Wochenst.): Bauteilkonstruktion und Berechnung

Konstruktionsübungen im 2. bis 5. Jahrgang: wie vorher

Fertigungstechnik im 2. bis 5. Jahrgang: Optimale Fertigungsstruktur

Mathematik im 4. Jahrgang (3 Wochenst.): Matrizenrechnung

Motoren-, Fahrzeug- und Leichtbau im 4. und 5. Jahrgang sowie aktuelle **Fachgebiete**

Laboratorium im 5. Jahrgang: besonders für fächerübergreifende Übungen der FEM geeignet

7. Zusammenfassung

- 1 Strukturberechnungen mit der FEM haben **in allen Bereichen der Technik eine herausragende Bedeutung** gewonnen, da es mit ihrer Hilfe gelingt, kompliziert geformte Bauteile einer komplizierten statischen oder dynamischen mechanischen thermischen, fluidischen oder auch elektrischen Belastung auszusetzen und diese dann ausreichend zu analysieren.
- 2 Dabei wird infolge der erforderlichen Idealisierung des Realkörpers durch die Ersatz- Vernetzung eine gewisse **Erfahrung des Anwenders** erforderlich, um a) örtliche Besonderheiten in der Geometrie, Lasteinleitung und -verteilung zu erfassen b) den richtigen Elementtyp (unterscheiden sich nach Geometrie, erfaßbarer Beanspruchung, Genauigkeit, Ordnung usw.) sowie dessen Feinheit zu wählen.
- 3 Aus Kontrollgründen wird die **Nachrechnung mit konventionellen Rechenverfahren** (geschlossenen Näherungsverfahren), auch wenn nur grobe Ergebnisse zu erwarten sind, **DRINGEND EMPFOHLEN!**

8. Literatur

Zienkiewicz, O.C.: The Finite Element Method. Reprinted 3.revised edition, McGrawHill Book Comp., London/ New York/ Tokyo, 1983

Bathe, K. J.: Finite-Element-Methoden. Springer Verlag, Berlin/ Heidelberg/ New York/Tokyo, 1985

Knothe K. u. Wessels H.: Finite Elemente. Springer Verlag, Berlin/Heidelberg/ New York/Tokyo, 1991

Dubbel-Taschenbuch für den Maschinenbau, 17. Auflage, Springer Verlag, Berlin/ Heidelberg/ New York/ Tokyo, 1991

ANSYS-Seminarunterlagen, Fa. CAD-FEM, Grafing b. München, 1993

PCN-LIT-108, 109, PCN-DSK-486..489 □