

Das universelle Finite-Elemente-Programmsystem COSAR - Gegenwärtiger Stand und Entwicklungstendenzen

Johannes Altenbach, Ulrich Gabbert

1. Einleitung

Das Programmsystem COSAR ist die leistungsfähigste Eigenentwicklung eines universellen FE-Programmsystems in der DDR. Im Auftrage der Hauptforschungsrichtung Festkörpermechanik des Forschungsprogramms Mathematik, Mechanik, Kybernetik und Informationsverarbeitung des zentralen Planes zur mathematischen, naturwissenschaftlichen und technischen Grundlagenforschung der DDR wurde 1975 im Wissenschaftsbereich Festkörpermechanik der Technischen Universität „Otto von Guericke“ Magdeburg mit der Konzipierung des COSAR-Systems begonnen.

Gestützt auf mehrjährige Erfahrungen bei der Entwicklung und der Anwendung von FE-Software für spezielle Anwenderbereiche wurde ein leistungsfähiges universelles System entwickelt, das den Anforderungen der Forschung und der industriellen Applikation in den unterschiedlichsten volkswirtschaftlichen Bereichen gerecht wird und sich durch hohe Nutzerfreundlichkeit auszeichnet (COSAR: Computer System for Analysis and Research).

Im Jahre 1980 konnte eine erste Version zur linearen elastostatischen Strukturanalyse unter besonderer Berücksichtigung der Berechnung dreidimensionaler Bauteile in die umfassende industrielle Nutzung überführt werden. 1984 wurde eine wesentlich verbesserte und erweiterte Version dokumentiert und nach eingehender Testung ab 1985 für die industrielle Anwendung freigegeben. Diese Version umfaßt die lineare elastostatische und elastodynamische Strukturanalyse für beliebige Bauteil- und Strukturgeometrie und realisiert alle technisch wichtigen Belastungen und Lagerungen. Darüber hinaus ermöglicht sie die Temperaturfeldberechnung für die betreffenden Bauteile und Strukturen. Die Programmversion COSAR/84 entspricht auf dem Gebiet der linearen Strukturanalyse dem Leistungsumfang der international führenden FE-Programmsysteme und zeichnet sich gegenüber diesen Programmen durch einige Besonderheiten aus.

COSAR/84 ermöglicht die Finite-Elemente-Analyse für alle typischen Modelle der Mechanik: kompakte, dreidimensionale Bauteile, Rotationskörper, Scheiben-, Platten-, Schalen- und Stabtragwerke. Durch eine einfache und mechanisch sinnvolle Kopplung unterschiedlicher Elementtypen gewährleistet COSAR/84 gegenüber vergleichbaren, international verfügbaren Systemen auch eine effektive Berechnung sehr komplexer Konstruktionen. Die einzelnen Teilsysteme von COSAR/84 sind Bestandteil eines einheitlichen Programmsystems und untereinander kompatibel (Bild 1). Die theoretischen Grundlagen, der Leistungsumfang, die Eingabevorschrift und die Hardwarebedingungen sind ausführlich dokumentiert.

COSAR/84 hat in der Industrie eine breite Anwendung gefunden und wird auch von Forschungsgruppen der Universitäten und Hochschulen sowie von Akademieinstituten genutzt; es gibt gegenwärtig ca. 50 COSAR-Installationen in der DDR. Entscheidend für die Akzeptanz von COSAR ist die hohe Nutzerfreundlichkeit des Systems durch eine dialogorientierte Dateneingabe, ein grafikunterstütztes Pre- und Postprocessing, zahlreiche Möglichkeiten der automatischen Datengenerierung, eine mehrstufige Substrukturtechnik, ein umfangreiches Fehlerdiagnosesystem u. a. m. Das gilt auch für die vielfältigen Serviceleistungen, die z. B. regelmäßige Kundenberatungen, Schulungs- und Weiterbildungsveranstaltungen umfassen.

COSAR/84 wurde als FE-Software für Computer des einheitlichen Systems der elektronischen Rechentechnik der sozialistischen Länder (ESER) entwickelt und vorrangig auf den Computern EC 1022, EC 1040, EC 1055 und EC 1056 genutzt. Die Hauptspeicheranforderung beträgt mindestens 200 K Bytes. Bei Nutzung einer größeren Hauptspeicherpartion sinkt die Liegezeit (I/O-Zeit), da die Anzahl der Datentransferoperationen zwischen Hauptspeicher und Plattenspeicher reduziert wird. Das Programmsystem COSAR in der Version COSAR/84 umfaßt zur Zeit etwa 1200 Unterprogramme. COSAR liegt vollständig sowohl in FORTRAN IV als auch in FORTRAN 77 vor; für die ESER-Version gibt es einige ASSEMBLER-Routinen, durch die insbesondere ein effektiver Datentransfer zwischen Kernspeicher und Plattenspeicher erreicht wird.

Für die Durchführung praktischer Rechnungen werden mindestens eine Arbeitsplatte und gegebenenfalls Magnetbänder zur Datensicherung benötigt. Für eine effektive Netzkontrolle und Ergebnisauswertung kann der Arbeitsplatz für Konstruktion und Technologie robotron AKT 6454 eingesetzt werden.

Die Übernahme von COSAR zur Nachnutzung ist unproblematisch. Kunden erhalten den rechenfähigen

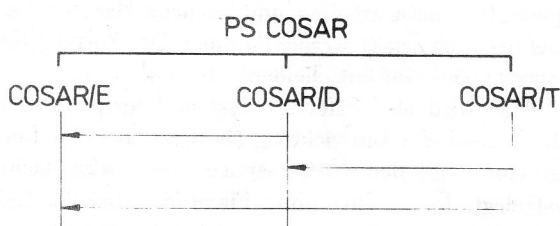


Bild 1
Systemstruktur des universellen FE-Programmsystem COSAR/84

Lademodul auf Magnetband, eine Anleitung zum Generieren des Systems, Testbeispiele, Jobsteuerprozeduren und das ausführliche Nutzerhandbuch (1300 Seiten).

COSAR-Installationen auf Computern außerhalb der EC-Reihe bereiten keine prinzipiellen Schwierigkeiten. Sie wurden in der Regel auf der Basis der FORTRAN 77-Version für unterschiedliche 16- und 32-Bit Computer erfolgreich realisiert.

Das universelle FE-PS COSAR befindet sich in einer ständigen Weiterentwicklung. Das betrifft sowohl den Ausbau und die Erhöhung der Effektivität der bestehenden Teilsysteme (z. B. Erweiterung der Elementkataloge, Implementierung von Algorithmen zur unkonventionellen Elementverknüpfung, Einbeziehung neuer Aufgabenklassen) als auch die Entwicklung ganz neuer Teilsysteme des Gesamtsystems.

Das universelle FE-PS COSAR besteht gegenwärtig aus folgenden Teilsystemen:

COSAR/E – Elastostatik (linear)

COSAR/D – Elastodynamik (linear)

COSAR/T – Temperaturfeld (T 84 linear, T 86 nicht-linear)

COSAR/G – Grafik

COSAR/R – ROBDIS (2D-Version für Mikrorechner, AC und PC)

COSAR/F – Fluid

COSAR/N – Nichtlineare Statik und Dynamik

Der vorliegende Beitrag gibt einen Einblick in die Entwurfsprinzipien und die Entwicklung des Programmsystems COSAR und einen Überblick über die in der industriellen Nutzung und in der Entwicklung und Testung befindlichen Teilsysteme.

In COSAR stehen zur Zeit mehr als 50 unterschiedliche finite Elemente zur Verfügung, die eine effektive Modellierung mit hoher Modellqualität ermöglichen.

Ferner gibt es eine spezielle Bibliothek von Standardstrukturen (Standard-Makroelemente), die in Verbindung mit der in COSAR realisierten mehrstufigen Substrukturtechnik zu einer besonders nutzerfreundlichen Datengenerierung auch für komplexe Strukturen führt. COSAR zeichnet sich gegenüber vielen vergleichbaren Systemen auch dadurch aus, daß leistungsfähige und mechanisch vernünftige Algorithmen für die Kopplung unterschiedlicher Elemente, für eine kompatible oder nichtkompatible Netzverfeinerung und für die Verbesserung der Spannungswerte in den Elementknoten und in den Randpunkten einer Struktur angeboten werden.

Die Entwicklung des PS COSAR erfolgte ausschließlich im Rahmen eines Universitätsbereichs in enger Verbindung von Forschung und Lehre und unter Nutzung aller Möglichkeiten der wissenschaftlichen Graduierung der Mitarbeiter. Bei der Konzeption und der Realisierung von COSAR wurden daher stets neben der Zielstellung der Schaffung leistungsfähiger Systeme für die mechanische Strukturanalyse in unterschiedlichen industriellen Bereichen auch die Schwerpunkte „Wissenschaftliche Grundlagen zur Festkörpermechanik“ und „Aus- und Weiterbildung von Studenten, wissenschaftlichen Mitarbeitern und praktisch tätigen Ingenieuren“ beachtet. Diese Aspekte haben die Qualität von COSAR wesentlich beeinflusst. Die praktizierte Einheit von theoretischer Grundlagenforschung, Anwendung und Vertrieb

ist eine wesentliche Voraussetzung dafür, daß das Entwicklerkollektiv in der Lage ist, das System dem internationalen Fortschritt auf dem Fachgebiet entsprechend weiterzuentwickeln, kurzfristig Adaptionen des Systems an neuen Aufgaben vorzunehmen und dabei eigene wissenschaftliche Beiträge zu leisten. Das von der Industrie in breitem Maße genutzte umfangreiche Leistungsangebot und eine Reihe von Verträgen zur wissenschaftlich-technischen Zusammenarbeit mit Forschungs- und Entwicklungsgruppen unterschiedlicher Bereiche unterstreichen die hohe volkswirtschaftliche Bedeutung dieser Arbeiten.

Der zunehmende Umfang der Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der numerischen Mechanik, der Entwicklung, Testung und Anwendung von FE-Software, der Serviceleistungen und der Koordinierung führten zur Gründung eines Methodisch-Diagnostischen Zentrums „Finite Elemente“ im Wissenschaftsbereich Festkörpermechanik.

2. Grundsätze für den Entwurf und die Entwicklung des PS COSAR

Ein universelles Finite Elemente Programmsystem ist ein hochwertiges Softwareprodukt. Die Bewertung von Softwareprodukten hängt vor allem von folgenden Faktoren ab:

- Produktqualität (theoretische Substanz und Leistungsumfang, Nutzerfreundlichkeit und -akzeptanz, Zuverlässigkeit, Robustheit, Flexibilität, Portabilität . . .)
- Produktkosten (Entwicklungskosten, Einsatzkosten, Wartungskosten . . .)
- Produktverfügbarkeit (Entwicklungszeit, Einsatzdauer, Service . . .).

Die Entwurfs- und Entwicklungskonzeption eines Softwareproduktes wird sowohl durch die wissenschaftlich-technische Zielstellung als auch durch die gegebenen personellen und materiell-technischen sowie ökonomischen Bedingungen bestimmt.

Bei der COSAR-Entwicklung wurde von folgenden Grundsätzen ausgegangen:

- Die Entwicklung wird sich über viele Jahre erstrecken.
- An der Entwicklung werden zahlreiche Mitarbeiter beteiligt sein. Es ist davon auszugehen, daß die Zusammensetzung der Entwicklergruppe starken Änderungen unterliegen wird (Spezifik von Hochschulkollektiven).
- Die Einsatzdauer des Systems wird hoch sein. Es muß daher ohne größere Eingriffe auf unterschiedlichen Rechnern arbeiten und an neue Hardwarebedingungen angepaßt werden können. Der Portabilität kommt somit eine entscheidende Bedeutung zu.
- COSAR wird als „offenes“ System konzipiert. Ein Endzustand der Entwicklung (bezogen auf den Leistungsumfang, den Nutzerservice usw.) wird nicht festgelegt. Es ist eine hohe Flexibilität bei der Berücksichtigung neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse und Nutzeranforderungen durch leichte Erweiterbarkeit des Systems zu sichern.

- Die Rechnerressourcen (z. B. Verfügbarkeit, Speicherkapazität, Rechengeschwindigkeit) für die Entwicklung und den späteren Einsatz stehen nie unbegrenzt zur Verfügung. Die Betriebsmittel sind daher optimal auszunutzen, wobei die Forderung nach Portabilität, Flexibilität und Erweiterbarkeit des Systems Vorrang hat.
- Das COSAR-System muß so entwickelt werden, daß es sowohl für wissenschaftliche Untersuchungen auf dem Fachgebiet als auch, mit hohem Nutzerservice ausgestattet, für die reine Applikation in Betrieben, Institutionen usw. eingesetzt werden kann. Die Realisierung muß so erfolgen, daß möglichst schnell nachnutzbare Versionen bereitgestellt werden können.
- Die Entwicklung und der Einsatz von COSAR berücksichtigt die Anforderungen der Aus- und Weiterbildung.

Ferner wurde bereits im Entwurfskonzept berücksichtigt, daß eine Entwicklung großer Programmsysteme eine parallele Erarbeitung von Teilkomponenten erfordert und daß die Qualifikationsstruktur der einzelnen Bearbeiter sehr unterschiedlich sein kann.

Unter den speziellen Bedingungen der COSAR-Entwicklung, d. h. einer Entwicklung des Gesamtsystems im Rahmen eines normalen Bereichs einer Universität, hat es sich bewährt, die Aufteilung und Zuordnung von Aufgaben der Systementwicklung vorrangig nach fachwissenschaftlichen Gesichtspunkten vorzunehmen und Grundlagenforschungen der Festkörpermechanik direkt mit der Softwarerealisierung für den jeweiligen Aufgabenkomplex zu verbinden. Die damit verbundenen Probleme der Planung und Leitung der Systementwicklung wurden zugunsten der tieferen wissenschaftlichen Durchdringung aller Teilgebiete und der damit verbundenen Erhöhung des wissenschaftlichen Niveaus in Kauf genommen.

Die Einbeziehung verschiedener Bearbeiter in die Programmerarbeitung machte die Vorgabe bestimmter Programmierungsgrundsätze notwendig. Das betraf z. B. solche Festlegungen wie:

- Verwendung einfacher und überschaubarer Programmstrukturen
- Vermeidung aller „Trickprogrammierungen“
- ausführliche innere Dokumentation durch aussagefähige Kommentare
- einheitliche Verwendung von Bezeichnungen
- exakte Ausfüllung vorgeschriebener Dokumentationsköpfe u. a. m.

Bei der Entwicklung des COSAR-Systems wurden bereits in der Entwurfsphase viele interne Schnittstellen für Änderungen und Erweiterungen in der Programmstruktur, der Datenstruktur und der Ablaufsteuerung vereinbart. Neben dem kontinuierlichen Ausbau des Leistungsumfangs eines vorhandenen Systems durch weitere Teilsysteme, die neue Forschungs- und Applikationsfelder erschließen, sind vor allem ständig Erweiterungen in den Elementkatalogen, den möglichen Belastungen und Randbedingungen, den numerischen Lösungsverfahren, den Möglichkeiten des Pre- und Postprocessing und vieles andere mehr erforderlich.

Nur so kann ein Programmsystem immer den aktuellen Erkenntnisstand in seinen Leistungsumfang aufnehmen und das internationale Niveau der Softwareentwicklung auf seinem Gebiet mitbestimmen.

Beim Entwurf des PS COSAR konnte keines der bekannten Entwurfsprinzipien, wie z. B.

- Top-Down-Entwurf
- Bottom-Up-Entwurf
- Datenorientierter Entwurf

in reiner Form angewendet werden.

Bei FE-Systemen beeinflussen die Datenstrukturen (Eingabemodell, rechnerinternes Modell, Schnittstellen) den Entwurfsprozeß wesentlich. Für COSAR wurde daher eine Entwurfsstrategie gewählt, die auf einer Verknüpfung des „Top-Down-Vorgehens“ mit dem „Datenorientierten Entwurf“ besteht, und die durch folgende Schritte gekennzeichnet ist:

- Entwurf der Grobstruktur des Gesamtsystems und Definition der zentralen Schnittstellen (Bild 2).
- Strukturierung der folgenden Ebenen in Top-Down-Reihenfolge durch Fixierung von Moduln mit bestimmten Eigenschaften und weitere Präzisierung der Datenstrukturen.
- Herstellung des Verbundes der Moduln durch Realisierung der Ablaufsteuerung. Damit entsteht die Grobstruktur des Systems in Form einer baumartigen Modulhierarchie.
- Grobentwurf der einzelnen Moduln, Fixierung interner Schnittstellen. Vervollständigen des Entwurfs bis zur untersten Ebene.
- Detaillierte Ausarbeitung der Moduln.

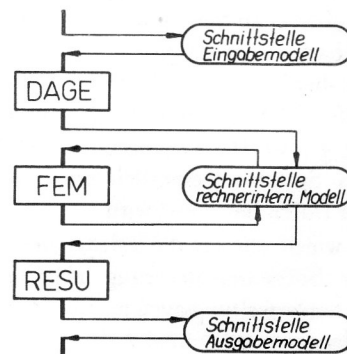


Bild 2

Grobstruktur des Systems COSAR mit den zentralen Datenschnittstellen

- DAGE – Pre-Prozessor zur Datengenerierung
- FEM – Analyse-Prozessor Finite-Elemente-Methode
- RESU – Post-Prozessor zur Ergebnisauswertung

Die FEM weist eine für die programmtechnische Realisierung günstige Struktur auf und unterstützt damit die strukturierte Programmierung. Die Prinzipien der strukturierten Programmierung sollen einen korrekten und widerspruchsfreien Programmablauf sichern und das Auftreten von Seiteneffekten vermeiden. Dazu wird in der Literatur eine Reduzierung der möglichen Ablaufvarianten auf die folgenden drei Elemente empfohlen:

- Sequenz
- zweifache Verzweigung
- Schleife mit Abfrage am Schleifenanfang.

Die Erfahrungen mit COSAR zeigen, daß es zweckmäßig ist, nur diese einfachen Strukturen zu benutzen.

Neben der Strukturierung kommt der Modularisierung eine wichtige Bedeutung zu. Von ihr hängen wesentlich die Möglichkeiten zur Veränderung und Erweiterung eines Systems ab. In einem Modul (Unterprogramm) werden inhaltlich unmittelbar zusammengehörige Funktionen zusammengefaßt. In COSAR ist dabei wieder ein enger Zusammenhang zur Finite-Elemente-Methode zu verzeichnen. Neben der inhaltlichen Gliederung ist für die Beurteilung der Qualität der Modularisierung die Verbindung der Moduln untereinander entscheidend. In COSAR wird zur Unterscheidung verschiedener Formen mit den Begriffen Prozessor, Modul und Basis-Modul gearbeitet. Prozessoren sind untereinander durch die extern gespeicherte Datenstruktur verknüpft, die sie verändern (Steuer- und Kontrollinformationen werden übergeben). Sie werden entsprechend ihrer Funktion inhaltlich zu Prozessorblöcken und Hauptprozessoren zusammengefaßt. Moduln haben keinen Zugang zur extern gespeicherten Datenstruktur, sondern nutzen vom Prozessor im Operativspeicher (in COMMON-Bereichen) bereitgestellte Daten, die sie verändern. Basis-Moduln tauschen Daten nur über ihre Parameterliste aus.

Die Erfahrungen mit COSAR zeigen, daß von mehreren Stellen aufgerufene Unterprogramme die Form von Basis-Moduln haben sollten. Anderenfalls sind bei Erweiterungen und Änderungen (die in der Regel auch Änderungen in den internen Datenstrukturen bedingen) Fehler durch Nebeneffekte vorprogrammiert. Die Prozessoren und Moduln haben eine starke Bindung zum rechnerinternen Modell, so daß Änderungen im Aufbau der Datenfelder möglichst zu vermeiden sind. Die Flexibilität und Erweiterbarkeit der Datenfelder von vornherein vorzusehen, ist daher besonders wichtig.

Für universelle FEM-Systeme ist die Verwaltung und Verarbeitung großer Datenmengen typisch, so daß die Effizienz des Systems wesentlich durch die Organisationsform der Daten bestimmt wird.

Für COSAR wurde ein auf die Belange der FEM und die beabsichtigte Softwarerealisierung abgestimmtes selbständiges Datenverwaltungssystem FEDAM (Finite-Element-Data-Management) entwickelt, das im Vergleich zu allgemeinen Datenbanksystemen durch eine spezielle Zielstellung gekennzeichnet ist. FEDAM übernimmt folgende Aufgaben:

- Bereitstellen eines virtuellen Speichers
- Verwalten des Operativ- und Externspeichers
- Realisierung des Datenzugriffs.

Problemorientierte Datenverwaltungssysteme sind virtuellen Speichern dann überlegen, wenn bei der Verarbeitung großer Datenmengen problemspezifische Gegebenheiten ausgenutzt werden können und damit eine deutliche Effektivitätssteigerung erreicht wird.

Durch FEDAM wird ein Seitenkonzept realisiert, bei dem der Operativ- und Externspeicher in Seiten gleicher Länge (die Seitenlänge ist einstellbar) unterteilt werden. Für die Speicherung der Problemdata werden Matrix

bzw. Vektorformate angeboten, deren Größe, Datentyp und Struktur vom Problemprogrammierer festgelegt werden können (Segmentierung erfolgt automatisch). Auf die so definierten Problemdata kann über einen automatisch vergebenen Matrixschlüssel sowie Zeilen- und Spaltenindizes zugegriffen werden. Falls die betreffende Seite nicht im Operativspeicher steht, ist ein Seitenwechsel erforderlich. Dabei hat sich für die gewählte Form der Datenverwaltung der LRU-Algorithmus (die am längsten nicht angeforderte Seite wird ausgelagert) dem zunächst realisierten FIFO-Algorithmus (die zuerst angeforderte Seite wird ausgelagert) als überlegen erwiesen. Die Problemdata werden mittels einer operativspeicherresidenten Listenmatrix verwaltet, zusätzlich wird für eine segmentierte Matrix eine Bildmatrix angelegt, die Informationen für jede Submatrix enthält. Das bedingt einen zweistufigen Zugriff, hat aber wesentliche Vorteile bei der Speicherung und Verwaltung der Daten. Die gewählte Datenstruktur unterstützt prinzipiell den direkten Zugriff zu den Daten über Indizes. Prinzipiell lassen sich auch Ringstrukturen realisieren.

Entscheidend für die Effektivität der Datenverwaltung ist die Häufigkeit des Seitenwechsels.

Die Zahl der Seitenwechsel in einem Zeitintervall hängt davon ab, wie häufig in diesem Intervall auf unterschiedliche Seiten zugegriffen wird. Daraus ergibt sich die Forderung, in häufig durchlaufenen Schleifen einen lokalen Datenzugriff zu sichern. Das kann durch geeignete Datenstrukturen und entsprechende Programmierung erreicht werden. Eine durch FEDAM angebotene Möglichkeit besteht darin, einzelne Seiten durch „Festschreiben“ zeitweise vom automatischen Seitenwechsel zu suspendieren, so daß die Daten in diesen Seiten bis zur „Freigabe“ verfügbar sind. Derartige Möglichkeiten können die Effektivität wesentlich steigern, bedingen aber eine erhöhte Aufmerksamkeit des Programmierers. Die FEDAM-Funktionen (Definition und Zugriff zu den Datenfeldern, Servicefunktionen) werden in Form von Unterprogrammaufrufen angeboten. FEDAM wurde zunächst vollständig in FORTRAN realisiert, um die Portabilität zu sichern. Eine erhebliche Effektivitätssteigerung konnte dadurch erreicht werden, daß die Routine, die den Datentransfer ausführt, in ASSEMBLER geschrieben wurde.

Alle Daten einer FEM-Analyse werden in COSAR als Vektoren und Matrizen gespeichert. Der innere Aufbau, d. h. die eigentliche Datenstruktur, ist das Ergebnis des Entwurfsprozesses. Sie soll

- das physikalisch-mathematische Modell eindeutig (möglichst redundanzfrei) beschreiben,
- einen schnellen Zugriff auf die Problemdata ermöglichen,
- einen geringen Speicherplatz beanspruchen und
- sich durch leichte Änderbarkeit und Erweiterbarkeit auszeichnen.

In COSAR ist eine mehrstufige Substrukturtechnik realisiert, bei der ein zu berechnendes Bauteil in Einzelteile zerlegt werden kann, die jeweils für sich vollständig beschrieben werden. Daraus ergibt sich eine zweckmäßige Unterteilung der Problemdata in strukturbezogene und zentrale Daten. Die Erfahrungen mit COSAR zeigen, daß eine Mischung von zentralen und strukturabhängigen

Daten unbedingt zu vermeiden ist, da es sonst Schwierigkeiten gibt, Strukturdaten im Rahmen einer Rechnung zu modifizieren. Eine solche Trennung ist im übrigen auch vorteilhaft für dezentrales Pre- und Postprocessing an Kleinrechnerarbeitsplätzen (getrennte Bearbeitung der Substrukturen). Auf Einzelheiten der umfangreichen COSAR-Datenstruktur kann hier nicht eingegangen werden. Es sei aber erwähnt, daß für die Datenfelder, die das physikalische Modell beschreiben (z. B. Topologie, Geometrie, Belastungen usw.), Vektoren mit folgendem Aufbau benutzt werden:

- sequentielle Liste
- Liste mit Inhaltsverzeichnis
- Liste mit Positionszugriff.

Dabei haben sich sequentielle Listen als nicht zweckmäßig erwiesen, da jeder nichtsequentielle Zugriff stets einen Suchprozeß ab Listenanfang bedingt. Inhaltsverzeichnis (mit Pointer-Eintragungen) ermöglichen dagegen über die Pointer einen direkten Zugriff zu den gewünschten Informationen. Ein Aktualisieren und Erweitern ist durch Ändern des Pointers problemlos möglich. In einigen Datenfeldern ist ein mehrstufiger Aufbau realisiert, d. h. von einem Primärverzeichnis wird auf ein Sekundärverzeichnis verwiesen, das dann die Pointer auf die Problemdateien enthält. Diese Listen mit Inhaltsverzeichnissen haben sich in COSAR als besonders geeignet erwiesen. Listen, bei denen auf die Daten nur über Positionszugriffe (Pointer) aus anderen Listen zugegriffen werden kann, eignen sich für die Abspeicherung von benötigten Real-Daten (z. B. Materialeigenschaften, Koordinatensysteme, Belastungen usw.).

Die Erarbeitung umfangreicher Softwareprodukte erfordert innerhalb der Entwicklergruppe eine gut durchdachte Organisation der notwendigen Arbeiten. Im Rahmen des COSAR-Projektes hat es sich nach anfänglichen Problemen als notwendig erwiesen, ein Organisationssystem zu entwickeln, das folgende Komponenten enthält:

- Entwicklungs- und Testorganisation
- Verwaltungsorganisation
- Dokumentationsorganisation
- Spezialdienste.

Dieses für ESER-Rechner geschriebene System, das auch für andere Entwicklungsaufgaben genutzt werden kann, stellt einen Satz einfach zu handhabender Prozeduren bereit, die den Problemprogrammierer weitgehend von der Arbeit mit dem Betriebssystem entlasten. Die Prozeduren arbeiten mit katalogisierten Entwicklungsbibliotheken, deren regelmäßige Wartung ebenfalls dem Organisationssystem obliegt (vgl. Bild 3). Der Programmierer braucht die Organisationsform der Dateien, Dateinamen und Datenträgertyp nicht kennen. Er weiß, daß die Moduln in geeigneten Bibliotheken aufbewahrt, aus seinen Quellmoduln Lademoduln erzeugt und die Lademodulbibliotheken im Programmverbinderlauf durchsucht werden. Das Organisationssystem nutzt Quelltextbibliotheken mit undefinierter Satzlänge, in denen überflüssige Zeichen nicht mit abgespeichert werden (bis 60 % Einsparung).

Die Komplexität der mit Software gegenwärtig und zukünftig zu lösenden Aufgaben erfordert in zunehmenden

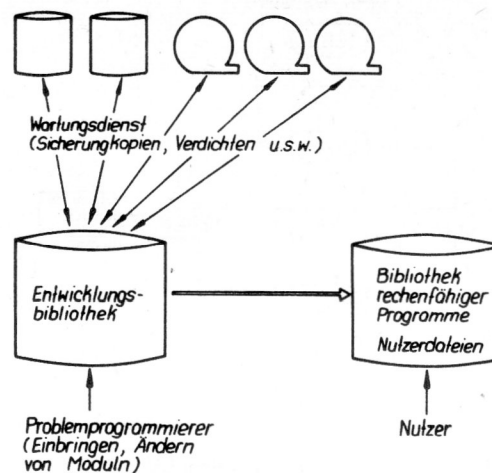


Bild 3
COSAR-Bibliotheksverwaltung

dem Maße das Zusammenwirken unterschiedlicher Systeme, und zwar unabhängig von der jeweiligen speziellen Datenstruktur eines Systems oder des Rechnertyps, auf dem das System arbeitet. Dieses Zusammenwirken über entsprechende Adapterprogramme zu organisieren, kann zur Verbindung zweier Systeme in bestimmten Fällen sinnvoll sein, scheidet aber als generelle Lösung wegen der Vielzahl der erforderlichen Programme aus. Als generelle Lösung ist die Festlegung international standardisierter Datenschnittstellen anzusehen, über die ein Datenaustausch (und damit eine Verbindung) zwischen den unterschiedlichsten Systemen möglich ist. Im Zusammenhang mit der FEM und den Aufgaben zur Schaffung durchgängiger rechnergestützter Lösungen für Konstruktion (CAD) und Berechnung (FEM), sind folgende zentrale Datenschnittstellen von Bedeutung:

- | | | |
|------|---------------------|---------------------------------------|
| 1 a) | FEM-System | FEM-System |
| 1 b) | Pre-Prozessor | FEM-System |
| 1 c) | FEM-System | Post-Prozessor |
| 2) | CAD-System | FEM-System (bzw. Pre-/Post-Prozessor) |
| 3) | Pre-/Post-Prozessor | Grafik-System (Hardware) |

Wenn man die unter 1) aufgeführten Schnittstellen zu einer FEM-spezifischen Schnittstelle zusammenfaßt, sind drei internationale Standards erforderlich. Eine Analyse der gegenwärtigen Situation läßt erkennen, daß als Schnittstelle für den Datenaustausch zwischen CAD-Systemen der IGES-Standard (International Graphics Exchange Specification) die bisher größte Verbreitung erfahren hat und alle großen kommerziellen CAD-Systeme IGES-Übersetzer anbieten.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist es daher zweckmäßig, diese Schnittstelle für die CAD/FEM-Kopplung zu benutzen.

Als Schnittstelle für geräteunabhängige Grafik-Software hat sicher GKS (Graphic Kernel System) die größten Aussichten, sich international durchzusetzen. Beide Standards sind „offen“ und befinden sich noch in der Entwicklung.

Der internationale Stand zur Erarbeitung einer standardisierten FEM-Schnittstelle ist noch nicht soweit fortgeschritten.

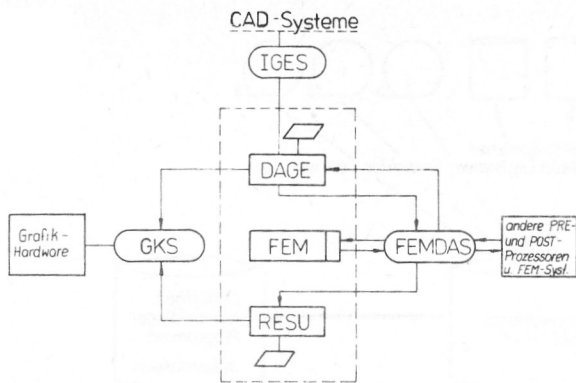


Bild 4
Standardschnittstellen für das Programmsystem COSAR
IGES – International Graphics Exchange Specification
GKS – Graphic Kernel System
FEMDAS – FEM-Datenschnittstelle

Ausgehend von den für das COSAR-System erforderlichen zentralen Standardschnittstellen (Bild 4) wurden daher in den letzten Jahren im Zusammenwirken der führenden FE-Softwareentwicklergruppen der DDR intensive Arbeiten zur Entwicklung einer standardisierten Datenschnittstelle FEMDAS für den Austausch von FEM-Daten eingeführt. FEMDAS ist ab 1. 1. 1988 als TGL 44 640 verbindlicher DDR-Standard und berücksichtigt die Erfahrungen und Ergebnisse vergleichbarer internationaler Arbeiten.

3. Elementkataloge des PS COSAR

Die Möglichkeiten der Approximation beliebiger Strukturen und die Aussagequalität einer Finite-Elemente-Analyse werden entscheidend durch die Vielfalt und die Qualität der einem universellen FE-Programmsystem angebotenen Elementtypen bestimmt. Während Spezialprogramme für spezielle Aufgabenklassen sich im allgemeinen auf wenige finite Elemente beschränken lassen, muß ein universelles FE-Programmsystem, das ein-, zwei- und dreidimensionale Probleme unterschiedlicher Aufgabenklassen erfassen will, der Elementauswahl besondere Beachtung schenken.

Im PS COSAR wurde folgendes Elementkonzept realisiert:

- In COSAR können Elemente mit beliebiger Knotenzahl, beliebigem Knotenfreiheitsgrad und beliebigen physikalischen Eigenschaften eingebracht werden. Dabei spielt es auch keine Rolle, ob die Elemente auf der Basis der Kraftgrößen- oder der Weggrößenmethode bzw. gemischter oder hybrider Methoden abgeleitet wurden. Damit ist sowohl eine beliebige Erweiterung der Zahl der verfügbaren Elemente des PS als auch eine Testung unterschiedlichster Elemente möglich. Da gerade die zuletzt genannte Möglichkeit für Nutzer außerhalb der COSAR-Entwicklergruppe interessant ist, wurden Schnittstellen vorgesehen, die eine einfache Implementierung und Testung neuer Elemente in COSAR ermöglichen, ohne daß genauere Kenntnisse über das Gesamtsystem erforderlich sind oder die Daten- und Programmstruktur signifikant beeinflusst wird.

– COSAR bietet für die verschiedenen Teilsysteme leistungsfähige Elementkataloge an, denn die Einsatzmöglichkeiten eines Programmsystems werden in hohem Maße durch die direkt verfügbaren Elemente bestimmt.

- Als Standardelemente für die statische und dynamische Strukturanalyse werden ein-, zwei- und dreidimensionale isoparametrische Weggrößenelemente 2. Ordnung bevorzugt (Bild 5). Diese Elemente sind theoretisch gut untersucht und sie haben sich im praktischen Einsatz vielfach bewährt. Wie Bild 5 zu entnehmen ist, sind mit Ausnahme der Semiloof-Elemente alle Elemente der Klasse der kompatiblen Elemente mit C^0 -Stetigkeit zuzuordnen. Für alle Elemente wurden in Ergänzung bzw. Erweiterung der vorliegenden Aussagen umfangreiche eigene Elementstandardtests bzw. Benchmarks durchgeführt. Hervorzuheben ist, daß die Verfügbarkeit der Semiloof-Elemente im CO-

1. Vollkörper-elemente			
2. Räumliche Membranschalenel.			
3. Ebene Elemente			
4. Rotations-symmetr. Elemente			
5. Dicke Platten-u. Schalen-elemente			
7. Balken-elemente			
8. Stabschalen-elemente			

Bild 5
Elementkatalog für COSAR / E und COSAR / D

SAR-Elementkatalog sich sehr vorteilhaft auf die Modellierung komplexer Platten- und Schalenstrukturen und allgemeiner versteifter Flächen-tragwerke auswirkt. Eine Besonderheit des CO-SAR-Elementkataloges für die statische und dynamische Strukturanalyse ist auch die Aufnahme eines eindimensionalen Stabschalenelementes mit beliebigem Knotenfreiheitsgrad. Dieses Element wurde in den letzten Jahren theoretisch begründet und ausführlich getestet. Es hat sich für die globale Strukturanalyse dünnwandiger Konstruktionen bewährt.

- Die Standardelemente für die thermische Feldanalyse sind in Bild 6 zusammengestellt. Sie entsprechen im wesentlichen den in Bild 5 aufgeführten Elementen, haben jedoch je Knoten nur einen Freiheitsgrad, da die Temperatur eine skalare Feldgröße ist. Wegen der guten Erfahrungen, die bei der statischen und dynamischen Strukturanalyse mit den Semiloof-Elementen gemacht wurden, wurde der Elementkatalog für die thermische Analyse durch zwei Elemente ergänzt, die bei einer nachfolgenden Spannungs- und Verformungsbe-rechnung mit den Semiloof-Elementen kompatibel sind. Sie haben je Knoten den Freiheitsgrad 2 (Temperatur in der Mittelfläche, Temperaturdif-ferenz zwischen Ober- und Unterfläche des Flächentragwerkes).
- Der Standardelementkatalog für Aufgaben der Fluidmechanik stützt sich wiederum auf die geo-metrisch und topologisch gleichen Grundelemente wie bei den anderen Aufgabenklassen (Bild 7). Wegen der in diesem Teilsystem gewählten Geschwin-digkeits-Druck-Formulierung mit quadratisch-li-nearen Ansatzfunktionen erhöht sich jedoch der Freiheitsgrad der Elemente im Vergleich zur Fest-körpermechanik.

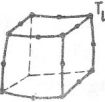
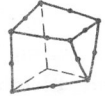
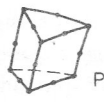
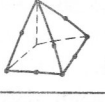
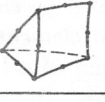
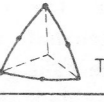
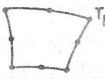


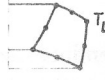




1. Vollkörper-elemente	 HK20	 AK18	 PK15
	 WK13	 CK12	 TK10
2. Ebene Elemente	 SRK 8	 SDK6	 SKM3
3. Rotations-symmetr. Elemente	 RRK8	 RDK6	 RKM3
4. Semiloof-kompabile Elemente	 SLRKT16	 SLDKT12	

Bild 6
Elementkatalog für COSAR / T

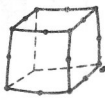



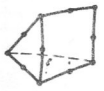






1. Vollkörper-elemente	 HK68	 AK61	 PK51
	 WK44	 CK41	 TK34
2. Räumliche Membran-elemente	 RKM24	 DKM21	
3. Ebene Elemente	 SRK20	 SDK15	 SKM8

Bild 7
Elementkatalog für COSAR / F

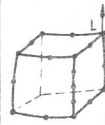
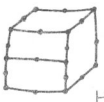
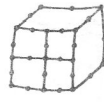
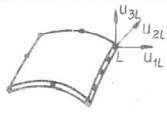
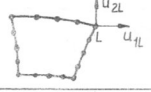
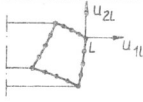
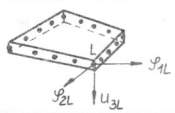
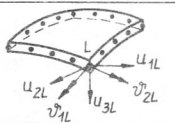
1. Vollkörper-elemente	 HK66	 HK75	 HK99
2. Räumliche Membran-schalen-elemente	RKM30		
3. Ebene Elemente	SRK16-32		
4. Rotations-symmetr. Elemente	RRK16-32		
5. Dicke Platten-elemente	PDRK 24-48		
6. Dicke Schalen-elemente	SDRK40-80		

Bild 8
Elementkatalog Übergangselemente

- COSAR stellt seinen Nutzern auch einen Katalog von Übergangselementen zur Verfügung (Bild 8), die für lokale Netzverfeinerungen und für die Erhöhung der Knotenzahl in Randbereichen eingesetzt werden können. Es sind isoparametrische Weggrößen-Elemente mit stückweisen Ansatzfunktionen zweiter Ordnung.

Ein besonderer Vorzug des PS COSAR ist die effektive Verbindung der Substrukturtechnik mit der Bereitstellung von Standard-Makroelementen (Standardstrukturen). Bild 9 enthält eine kleine Auswahl dieser Standard-Makroelemente. Zur Zeit bietet COSAR dem Nutzer ca. 30 derartiger Standardstrukturen an. Ferner wurde begonnen, das Konzept der Standard-Makroelemente auch

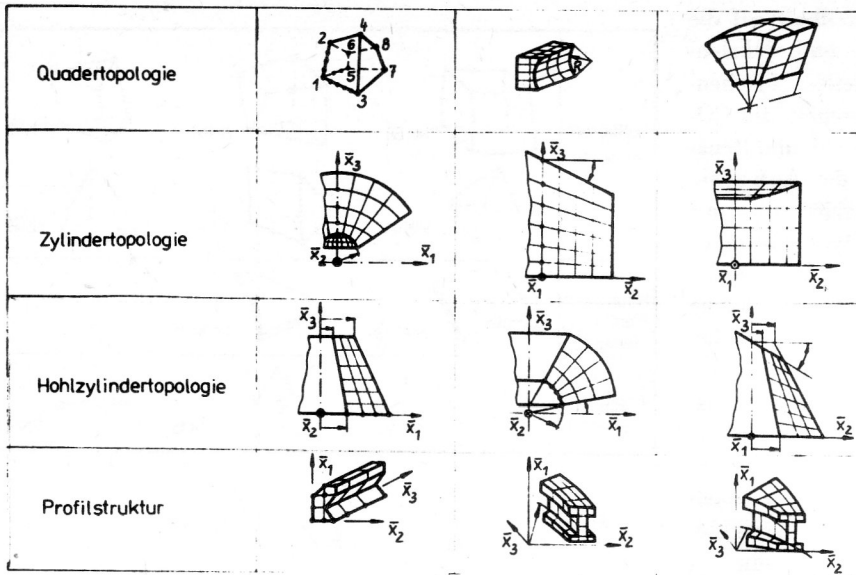


Bild 9
Elementkatalog Standard-Makro-Elemente
(Auswahl)

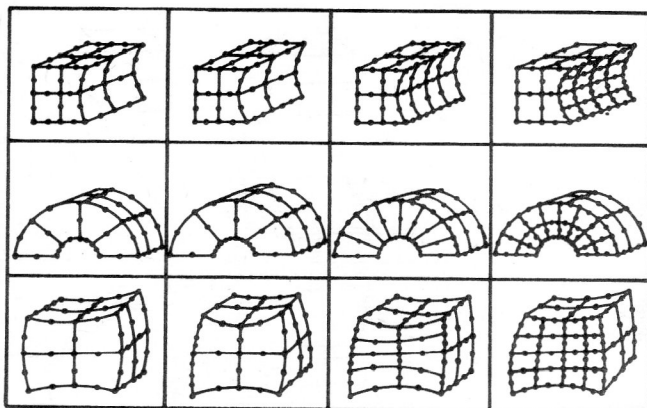


Bild 10
Elementkatalog Standard-Makro-Elemente für lokale Übergangs- und Netzverdichtungsbereiche

auf Übergangsstrukturen zu erweitern. Bild 10 zeigt einige der verfügbaren Makro-Übergangsstrukturen. Die Datengenerierung für Standardstrukturen kann einfach automatisiert werden. Bei einer Übereinstimmung von Standardstruktur und Substruktur erhält man für die Substrukturen optimale Gleichungsstrukturen und kann somit im allgemeinen auf den Einsatz von Umnummerierungsalgorithmen verzichten. Durch entsprechende Schnittstellen wurde auch in diesem Fall gesichert, daß Nutzer des COSAR-Systems weitere Makroelemente als Standardstrukturen einbringen können. Damit ist eine besonders für industrielle Nutzer interessante Möglichkeit gegeben, durch spezifische Standardstrukturen die FE-Analyse für ausgewählte Erzeugnisgruppen entscheidend zu rationalisieren und das Pre- und Postprocessing wesentlich zu vereinfachen.

Komplexe Konstruktionen des Bauwesens, des Maschinen-, Apparate- und Anlagenbaus und anderer Industriezweige sind im allgemeinen ein Ensemble aus kompakten 3D-, flächenhaften 2D- und stabförmigen 1D-Elementen. Ihre effektive Strukturanalyse setzt die Verfügbarkeit von leistungsfähigen finiten Elementen für unterschiedliche Modellklassen in einem Programmsystem und

die Möglichkeit ihrer mechanisch sinnvollen Kopplung voraus.

Bei einer Analyse der international angebotenen universellen FE-Programmsysteme stellt man allerdings fest, daß nur wenige Systeme die Möglichkeit zur Kopplung unterschiedlicher Elementtypen anbieten. Die Unverträglichkeit der verschiedenen Elementtypen bezüglich ihrer Formfunktionen und Knotenvariablen macht spezielle Maßnahmen erforderlich, wenn mechanisch sinnvolle Kopplungen erreicht werden sollen.

Das PS COSAR bietet seinen Nutzern als Standardlösung eine einfache Methode zur Kopplung unterschiedlicher Elemente an.

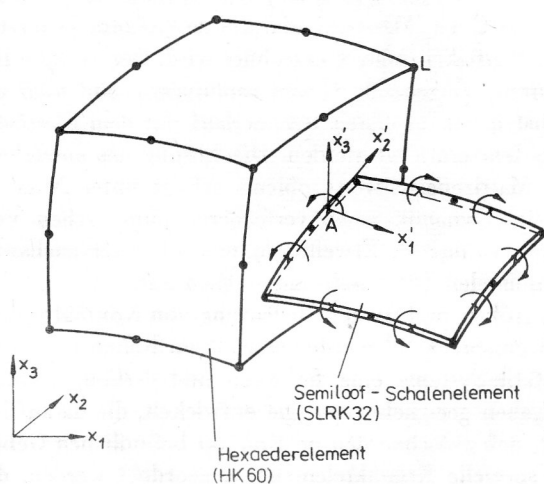
Diese Methode basiert auf der Formulierung von Zwangsbedingungen für die Freiheitsgrade des FE-Modells, die auf den im Kontakt befindlichen Flächen angeordnet sind und der Erfüllung dieser Zwangsbedingungen in den Systemgleichungen (z. B. Steifigkeitsbeziehung) mittels Penalty-Technik. Mit der Kopplung über Zwangsbedingungen steht eine sehr flexible, allgemeingültige Strategie zur Verfügung, die unabhängig von den zu koppelnden finiten Elementen eingesetzt werden kann. Die Entwicklung spezieller Übergangselemente (sogenannte transition elements) ist bisher nur für spezielle Fälle gelungen und scheidet daher als Basis für eine generelle Konzeption aus. Die Befürchtungen, daß durch die Zwangsbedingungen so starke Störungen in den Lösungen ausgelöst werden, daß die Ergebnisse insgesamt praktisch unbrauchbar werden, haben sich nicht bestätigt.

An Hand zahlreicher Test- und Anwendungsbeispiele konnte nachgewiesen werden, daß zwar örtliche Störungen für die in COSAR bisher realisierten Kopplungsmöglichkeiten auftreten, diese aber überraschend gering sind, das Gesamtverhalten nicht beeinflussen und bereits in der an der Kopplung beteiligten Elementschicht abklingen. Die Zwangsbedingungen (z. B. Identität der Verschiebungen und Biegewinkel) werden bei der entwickelten Strategie im Sinne der Kollokationsmethode punktweise formuliert.

Über die Anzahl und Lage der Kollokationspunkte kann die Qualität der Kopplung beeinflusst werden. Bei den in COSAR realisierten Koppelmöglichkeiten wurden die oben genannten Ergebnisse bei einer minimalen Anzahl von Kollokationspunkten (in der Regel wurden nur die Knotenpunkte an der Kopplung beteiligter Elemente benutzt) und damit minimalen numerischen Aufwand erreicht.

Die Zwangsbedingungsgleichungen stellen Nebenbedingungen des Variationsproblems dar und lassen sich sowohl mit der Methode der Lagrangeschen Multiplikatoren als auch der Penalty-Methode berücksichtigen. In COSAR wird die Penalty-Methode benutzt, bei der keine zusätzlichen Unbekannten erforderlich sind und auch die ursprünglich positiv definiten Koeffizientenmatrizen diese Eigenschaft beibehalten. Die Penalty-Zahl wird programmintern automatisch so ermittelt, daß sie den größten Wert in der Koeffizientenmatrix um die Hälfte derjenigen Dezimalstelle übersteigt, mit der der Rechner arbeitet.

Für die praktische Nutzung ist insbesondere die Kopplung von 3D-Raumelementen mit Semiloof-Schalenelementen bedeutsam, mit der eine effektive Modellierung und Berechnung von Konstruktionen, die aus kompakten und dünnwandigen Teilen aufgebaut sind, ermöglicht wird (Bild 11). Die unter Nutzung der Koppelstrategie durchgeführte statische und dynamische Untersuchung von Verdichterlaufrädern zeigt die Vorteile dieser Strategie. Durch die Anwendung der Substrukturtechnik ist es möglich, die aus unterschiedlichen mechanischen Modellen bestehenden Teile einer Konstruktion getrennt und unter Nutzung automatischer Datengeneratoren zu vernetzen und die Kopplung auf dem nächst höheren Strukturniveau zu beschreiben. In Ergänzung zu der allgemeinen Strategie der Einarbeitung von Zwangsbedingungen mit der Penalty-Methode können im PS COSAR



- 3 Verschiebungsfreiheitsgrade (z.B. u_{1L}, u_{2L}, u_{3L})
- x 1 Verdrehfreiheitsgrad (z.B. $\psi_{13A} = \frac{\partial u_{1A}}{\partial x_3}$)

Bild 11
Kopplung von 3D-Volumenelementen mit 2D-Semiloof Elementen

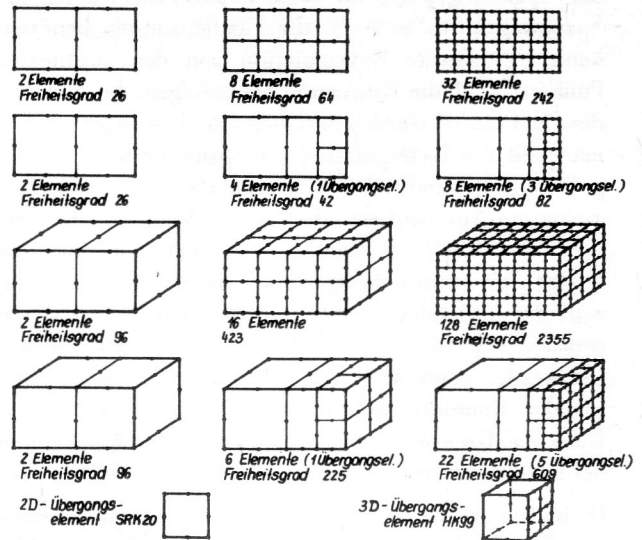


Bild 12
Lokale Netzverdichtung mit Hilfe der Übergangselemente SRK 20 und HK 96

auch die Übergangselemente nach Bild 8 eingesetzt werden. Dies ist besonders für starke lokale Netzverfeinerungen und für Knotenverdichtungen an Oberflächen von Interesse. Bild 12 zeigt zwei einfache Beispiele für den effektiven Einsatz von 2D- und 3D-Übergangselementen. Die Entwicklung der Formfunktionen für diese Elemente auf der Grundlage der gemischten Interpolationstechnik (Blending function method) sichert die volle Kompatibilität der Elementverknüpfungen. Der Einsatz von Übergangselementen wird daher besonders dann sinnvoll sein, wenn der Analysebereich direkt mit dem Kopplungs- bzw. Verdichtungsbereich zusammen fällt. Ausführliche numerische Tests haben auch bei sehr starker lokaler Netzverdichtung die Wirksamkeit und Qualität der COSAR-Übergangselemente bestätigt.

Die vom PS COSAR bevorzugt angebotenen Finite-Elemente-Modelle auf der Basis des Weggrößenverfahrens liefern für die Elementknotenpunkte die Spannungswerte mit einer geringeren Genauigkeit als die Verschiebungswerte. Die Ursache hierfür ist die Berechnung der Spannungswerte durch Ableitung der Verschiebungswerte, was bekanntlich zu einer Reduzierung der Konvergenzordnung der Näherungslösung führt. Die konventionelle Berechnung der Spannungen für die Elementknoten liefert daher in Gebieten mit hoher Spannungskonzentration Werte mit nicht ausreichender Genauigkeit, wenn nicht eine sehr feine Vernetzung erfolgt. Dies bereitet jedoch insbesondere bei einer Modellierung mit 3D-Elementen große Probleme, da ein vergleichbar feiner Vernetzungsgrad, wie er in solchen Fällen bei 2D-Elementen üblich ist, bei 3D-Modellen den Aufwand unverträglich hoch treibt.

Die Genauigkeit der in einem Element berechneten Spannungswerte ist bei finiten Weggrößenelementen abhängig von dem jeweiligen betrachteten Elementpunkt. Die besten Werte erhält man für die in COSAR verfügbaren isoparametrischen Elemente 2. Ordnung bekanntlich für die Stützstellen der Gauß-Integration, die minimal erforderlich sind (die sogen. optimalen Punkte). COSAR bietet daher dem Nutzer die direkte Berechnung

der Spannungswerte für diese Punkte an. Werden die Spannungswerte auch für die Elementknoten benötigt, kann eine lineare Extrapolation von den „optimalen Punkten“ auf die Knotenpunkte erfolgen. Im Rahmen des PS COSAR wurden umfangreiche Testungen zur Genauigkeit der Extrapolation der Spannungswerte durchgeführt. Dabei hat sich die lineare Extrapolation, die den geringsten Aufwand erfordert, als geeignet erwiesen. Sie wird in COSAR als Standardextrapolation benutzt. In letzter Zeit konnte nachgewiesen werden, daß das Konzept der optimalen Punkte und der linearen Extrapolationstechnik auch auf die Übergangselemente übertragen werden kann. Zugrunde gelegt werden dann die minimalen Gaußintegrationspunkte für jeden Teilbereich. Über die Grenzen der Teilbereiche ist bei Anwendung der Extrapolation eine Spannungsmittlung erforderlich.

Da im Innern einer Struktur in einem Knotenpunkt mehrere Elemente zusammenstoßen und die Spannungen für diesen Knoten elementweise berechnet werden, kann in COSAR sowohl eine Verbesserung des Spannungswertes für diesen Knoten durch Mittelung der elementweise berechneten Werte als auch eine Berechnung der auf Vergleichswerte bezogenen Knotenspannungsdifferenz erfolgen. Die letztere Größe ist ein Maß für die Genauigkeit der FE-Analyse in diesem Bereich.

Leider ist diese Vorgehensweise für die Randpunkte einer Struktur nicht mit gleichem Erfolg anwendbar, obwohl gerade in den Randzonen vielfach die maximalen Spannungswerte auftreten und der Ingenieur diese Werte zur Grundlage der beanspruchungsgerechten Dimensionierung benötigt. Für die generelle Abschätzung der Genauigkeit der FE-Analyse bietet sich im Randbereich die Kontrolle der Erfüllung der statischen Randbedingungen an. Als Maß wird jetzt die Differenz zwischen exakten und genäherten Randwerten auf entsprechend gewählte Vergleichswerte bezogen.

In COSAR wurde darüber hinaus ein Algorithmus implementiert und getestet, der für alle Oberflächen von Strukturen ohne tangentiale Krafteinleitung zu einer wesentlichen Verbesserung der Randspannungswerte führt. Der Algorithmus beruht auf der Vorstellung, daß auf die Oberfläche „fiktive“ Randmembranelemente ohne eigene Steifigkeit aufgebracht werden. Die statischen Randbedingungen normal zur Oberfläche können dann in die Spannungs-Dichtungsgleichungen eingearbeitet werden und man erhält eine bemerkenswerte Verbesserung der Werte für die Normalspannungen in der Randfaser bzw. Oberflächenschicht.

Die gedankliche Einführung „fiktiver Randmembranelemente“, die wiederum isoparametrische Elemente 2. Ordnung sind, läßt auch vermuten, daß das Konzept der „optimalen Punkte“ und der Gauß-Punktextrapolation sich auch auf die unmittelbaren Randbereiche anwenden läßt. Diese Vermutung konnte in letzter Zeit durch Testrechnungen bestätigt werden.

4. Charakteristik der im Einsatz befindlichen Teilsysteme von COSAR

Die unter 1. bis 3. beschriebenen allgemeinen Grundsätze, Entwicklungsprinzipien und Lösungsstrategien garantieren für alle COSAR-Anwender eine weitgehend

einheitliche Nutzung aller Teilsysteme des universellen Programmsystems. Das hat bei der Anwendung mehrerer Teilsysteme durch einen Nutzer und besonders bei den vielfach notwendigen Kopplungen der Teilsysteme große Vorteile und reduziert den Aufwand oft ganz erheblich.

Im folgenden werden die Teilsysteme von COSAR, die sich im praktischen Einsatz befinden, kurz beschrieben. Ausführliche Beschreibungen mit Beispielen findet man in den Nutzerhandbüchern.

4.1. COSAR/E 84 – Elastostatik

Das Teilsystem COSAR/E 84 ermöglicht die Berechnung von Verformungen und Spannungen auf der Grundlage der linearen Elastizitätstheorie. Das Material kann in beliebiger Weise inhomogen und anisotrop sein und eine Temperaturabhängigkeit aufweisen. Es lassen sich alle praktisch wichtigen Belastungen und Lagerungen realisieren. Die verschiedenen Lastarten können in beliebiger Weise kombiniert und zu Lastfällen zusammengefaßt werden.

Die Lösung der linearen Gleichungssysteme erfolgt auf der Grundlage des Block-Cholesky-Verfahrens, wobei nur die innerhalb der Skyline befindlichen Blockmatrizen verarbeitet werden.

Der Elementkatalog, die Makro- und Übergangselemente, die mehrstufige Substrukturtechnik und die generellen Kopplungsmöglichkeiten entsprechen einem Leistungsniveau, wie es von wenigen internationalen Programmen mit vergleichbarer Anwendercharakteristik erreicht wird. Zur Zeit befinden sich noch zwei wichtige Erweiterungen dieses Teilsystems in der Entwicklung und Testung:

- Stabilität von Stab- und Flächentragwerken
- Kontaktaufgaben.

Die Erweiterung auf die Lösung elastischer Stabilitätsprobleme (Ermittlung der kritischen Knick- bzw. Beullasten auf der Grundlage der Theorie 2. Ordnung) erfolgte unter Nutzung der Teilsysteme Elastostatik und Dynamik, wobei das Dynamiksystem so modifiziert wurde, daß statt der Massenmatrix die sogenannte geometrische Steifigkeitsmatrix berechnet wird. Der in diese Berechnung eingehende Grundspannungszustand muß zunächst in einem ersten Rechnerlauf mit dem Elastostatiksystem ermittelt werden. Die Lösung des entstehenden Matrizeigenwertproblems erfolgt unter Nutzung der im Dynamiksystem verfügbaren numerischen Verfahren, so daß die Erweiterung mit einem vergleichsweise minimalen Zusatzaufwand möglich war.

Der großen praktischen Bedeutung von Kontaktproblemen entsprechend wurde zunächst im Rahmen des Elastostatik-Systems eine für zwei- und dreidimensionale Aufgaben geeignete Strategie entwickelt, die darauf basiert, daß zwischen den im Kontakt befindlichen Gebieten spezielle Kontaktelemente angeordnet werden, deren normale und tangentialen Steifigkeiten solange iterativ modifiziert werden, bis die Kontaktbedingungen erfüllt sind. Die Berücksichtigung der Reibung erfordert ein inkrementelles Aufbringen der Last und eine iterative Anpassung an die Kontaktbedingungen in jedem Lastschritt. Durch die Anwendung der Substrukturtechnik gelingt es, die Iteration auf dem Niveau der Hyperstruktur nur mit

den unmittelbar zum Kontaktgebiet gehörenden Knoten durchzuführen, so daß ein sehr effektives Lösungsverfahren erreicht wird. Das Verfahren wurde für zweidimensionale und rotationssymmetrische Kontaktprobleme implementiert und erfolgreich getestet. Diese Arbeiten werden systematisch weitergeführt.

4.2. COSAR/D 84 – Dynamik

Das Teilsystem COSAR/D 84 ermöglicht die Eigenschwingungsberechnung (Eigenkreisfrequenzen und Eigenformen), die Berechnung stationärer Schwingungen bei harmonischer und periodischer Kraft- und Wegerregung und die Berechnung transientser Schwingungen bei beliebiger Kräfteerregung auf der Grundlage der linearen Elastizitätstheorie. Es lassen sich alle praktisch wichtigen Belastungen und Lagerungen realisieren, die Dämpfung kann berücksichtigt werden.

Für die Materialeigenschaften gelten die gleichen Bedingungen wie unter 4.1.. Die zusätzlich benötigte Dichte kann struktur- oder elementweise veränderlich sein.

COSAR ermöglicht die Arbeit mit konsistenten und diagonalisierten Massenmatrizen. Die Diagonalisierung, die im Vergleich zur Arbeit mit konsistenten Massenmatrizen zu numerisch effektiven Lösungsstrategien führt, erfolgt durch Zeilensummenbildung. Diese Art der Kondensation der Massenmatrix hat den Vorteil, daß die Trägheitswirkungen bei einer Starrkörperbewegung richtig wiedergegeben werden und so der Genauigkeitsverlust durch die Kondensation begrenzt wird. Bei der Anwendung der Substrukturtechnik zur Lösung dynamischer Aufgaben ist zu beachten, daß ohne die Kenntnis der Eigenfrequenzen keine „exakten Superelemente“ abgeleitet werden können. Im PS COSAR wird als Standardvariante eine einstufige Substrukturtechnik auf der Grundlage einer statischen Kondensation mit Anordnung zusätzlicher externer Knoten auf den Oberflächen und im Inneren der Strukturen empfohlen. Es erfolgt eine automatische Überprüfung der Brauchbarkeit der so erhaltenen Superelemente für den interessierenden Frequenzbereich.

Die Lösung der großdimensionalen Eigenwertprobleme erfolgt vorrangig auf der Basis einer Variante der Subspace-Iteration, die auf Mc Cormick und Noe zurückgeht. Die für viele technische Anwendungen besonders interessanten Frequenzen im unteren Frequenzbereich können damit effektiv und mit hoher Genauigkeit ermittelt werden. Für die transienten Aufgaben bietet COSAR folgende Zeitintegrationsverfahren zur Auswahl an:

- Newmark-Beta-Verfahren
- Wilson-Theta-Verfahren
- Zentrales Differenzenverfahren.

4.3. COSAR/T 84, COSAR/T 86 – Temperaturfeld

Das Teilsystem COSAR/T 84 ermöglicht die Berechnung der stationären Temperaturverteilung (Temperaturwerte und Temperaturgradienten) unter Berücksichtigung von beliebig verteilten Wärmequellen im Bauteil sowie Wärmeströmungen und Wärmeübergänge an der Oberfläche. Das Materialverhalten (Wärmeleitfähigkeit) kann inhomogen und anisotrop sein. Das System kann zur Lösung anderer Potentialprobleme benutzt werden (z. B. Strö-

mung, Elektrostatik, Torsion), die durch die gleiche mathematische Formulierung wie die Wärmeleitung beschrieben werden.

Das Teilsystem COSAR/T 84 wurde in den letzten beiden Jahren wesentlich erweitert. Die jetzt in die umfassende praktische Nutzung überführte Version COSAR/T 86 umfaßt auch die nichtlinearen und instationären Temperaturfeldberechnungen.

Die numerische Lösung des Problems mittels FEM führt auf ein Differentialgleichungssystem erster Ordnung, das nichtlinear ist, wenn die Materialwerte (z. B. Leitfähigkeit λ , spezifische Wärmekapazität $\rho \cdot c$, Wärmeübergangszahl α) oder Randbedingungen (z. B. Strahlung) von der Temperatur abhängig sind.

Die Lösung des Differentialgleichungssystems erfolgt in COSAR durch eine direkte Zeitintegration, wobei zunächst Einschritt-Theta-Verfahren benutzt werden, bei denen im Zeitintervall Δt ein linearer Temperaturverlauf angenommen wird. Das konkrete Integrationsverfahren kann durch die Wahl des Parameters Theta gesteuert werden (z. B.: 0 – Euler-Verfahren, 1/2 – Crank-Nicolson-Verfahren, 2/3 – Galerkin-Verfahren, 1 – Rückwärtsdifferenzenverfahren).

Umfangreiche numerische Tests haben gezeigt, daß mit Theta = 2/3 ein optimales Verfahren zur Verfügung steht, daß relativ unempfindlich gegenüber zu großen Schrittwerten ist; Oszillationen im Lösungsverlauf dämpfen sehr schnell aus. Die Lösung nichtlinearer Systeme erfordert im Zeitschritt eine iterative Strategie. Das gewählte Iterationsverfahren basiert auf dem Newton-Raphson-Verfahren; zur Reduzierung des Rechenaufwandes wird mit einer Sekantennäherung für die Jacobische Matrix gearbeitet. Auf dieser Grundlage wurde ein effektiver Berechnungsablauf entwickelt, der sowohl den linearen als auch den nichtlinearen Fall einschließt.

Die praktischen Erfahrungen bei der Lösung nichtlinearer Probleme nach der in COSAR realisierten Strategie zeigen, daß im Zeitschritt in der Regel nicht mehr als 3 bis 4 Iterationen benötigt werden, wobei im Zeitschritt mit einer konstanten Jacobischen Matrix gearbeitet werden kann. Bei einigen Beispielen mit extremen Nichtlinearitäten (z. B. Strahlung bei ungünstigen Materialparametern) war eine Konvergenz nur durch ein Aktualisieren der Jacobischen Matrix in jedem Iterationsschritt zu erreichen. Bei schwachen Nichtlinearitäten kann auf eine Iteration im Zeitschritt ganz verzichtet werden. Abschließend sei darauf hingewiesen, daß durch eine Iteration im Zeitschritt die durch die zeitliche Diskretisierung entstehenden Fehler nicht kompensiert werden können.

5. Konzeptionen für die in der Entwicklung und Testung befindlichen Teilsysteme von COSAR

5.1. COSAR/F – Fluidmechanik

Aufgrund von Anforderungen aus der Industrie und in enger Zusammenarbeit mit dem VEB Kombinat Pumpen und Verdichter Halle als einem der langjährigen Nutzer des universellen PS COSAR wurde in den letzten Jahren mit der Entwicklung des Teilsystems COSAR/Fluid begonnen.

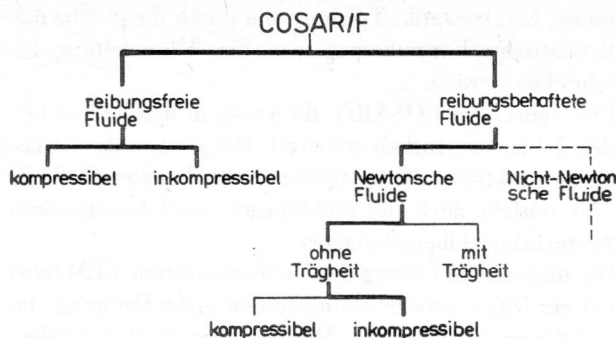


Bild 13
Programmkonzeption für COSAR / F

Durch die Verwendung einer vorhandenen ausgereiften Programm- und Datenstruktur als Basis für diese Entwicklung konnte in verhältnismäßig kurzer Zeit eine erste Version erarbeitet, getestet und in die praktische Nutzung überführt werden.

Während die Programmkonzeption von COSAR/F auf die Lösung ganz allgemeiner räumlicher Strömungsprobleme ausgerichtet wurde (Bild 13) lag der Schwerpunkt der programmtechnischen Realisierung zunächst auf der Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen für inkompressible Strömungen.

Die Herleitung der Finite-Elemente-Gleichungen erfolgt auf der Grundlage der Geschwindigkeit-Druck-Formulierung mit dem Galerkin-Verfahren.

Dafür sprechen die folgenden Gründe:

- Die Formulierung ist auch für 3D-Probleme anwendbar.
- Die Ansatzfunktionen müssen nur C^0 -stetig sein.
- Die Randbedingungen für Geschwindigkeiten, Druck und Geschwindigkeitsgradienten können direkt in die Matrixgleichungen eingearbeitet werden.
- Es sind auch Probleme mit freien Oberflächen lösbar.

Es sei jedoch darauf hingewiesen, daß bei einer Geschwindigkeits-Druck-Formulierung die Formfunktionen für Geschwindigkeit und Druck nicht unabhängig voneinander gewählt werden dürfen, wenn eine eindeutige Lösung gesichert werden soll (Einhaltung der LBB-Bedingung). Im Rahmen der 1. Version wurden für 2D- und 3D-Probleme finite Elemente mit quadratischem Ansatz für die Geschwindigkeiten und linearem Ansatz für den Druck eingesetzt.

Der Leistungsumfang der 1. Version beschränkt sich auf die Elemente des Elementkataloges COSAR/F (Bild 7) und setzt für die betrachteten strömenden Medien die Gültigkeit folgender Bedingungen voraus:

- Gültigkeit des Stokesschen Reibungsgesetzes
- keine Temperaturabhängigkeiten in der Strömung
- Die Bewegungen erfolgen im laminaren Geschwindigkeitsbereich.
- Trägheitseinflüsse werden vernachlässigt (schleichende Strömungen).

COSAR/F nutzt alle Servicefunktionen des Gesamtsystems im Pre- und Postprocessing-Bereich (z. B. automatische Datengenerierung, grafische Netz- und Ergebnisdarstellung, Fehlerdiagnosesystem usw.). Zur Lösung der linearen Gleichungssysteme wurde als direktes Lösungs-

verfahren ein modifizierter Cholesky-Algorithmus auf der Basis des Uzawa-konjugierten Gradientenverfahrens implementiert.

Es sei noch angemerkt, daß die Untersuchungen von Potentialströmungen mit dem Programmzweig COSAR/T durchgeführt werden können; die für die Ermittlung der Strömungsgeschwindigkeiten erforderlichen Ableitungen der Potentialfunktion wurden dafür in COSAR/T ergänzt.

5.2. COSAR/C – Bruchmechanik (crack)

Die Erforschung des Bruchverhaltens von Konstruktions- und Werkzeugwerkstoffen ist von großer volkswirtschaftlicher Bedeutung. Der Bruch ist die gefährlichste Versagensursache einer Konstruktion. Es kommt häufig zum Totalausfall einer Maschine mit hohen Sachschäden und Nachfolgeausfällen. Das Versagen einer Konstruktion durch Bruch ist leider auch vielfach mit der Gefährdung von Menschenleben verbunden.

Die konventionellen Methoden der Festigkeitsberechnung reichen nicht immer aus, um eine hohe Bruchsicherheit zu gewährleisten. Das gilt im besonderen Maße für Sprödbrüche, die infolge technologisch bedingter oder während des Betriebes entstandener Risse schon bei relativ niedrigen Beanspruchungen ausgelöst werden können.

Im Wissenschaftsbereich Festkörpermechanik wurde daher frühzeitig begonnen, spezielle FE-Softwarelösungen für den Anwendungsbereich der linear-elastischen Bruchmechanik auszuarbeiten und in die Anwendung zu überführen. Mit dem Programm CRACK 2D stand bereits 1979 ein leistungsfähiges FE-Softwarepaket zur bruchmechanischen Analyse ebener elastostatischer Rißprobleme für die industrielle Anwendung zur Verfügung. Ab 1981 konnten im Rahmen der speziellen COSAR-Software auch dreidimensionale elastostatische Rißprobleme mit dem Programm CRACK 3D gelöst werden.

Die theoretischen Arbeiten und die Softwareentwicklung zur linear-elastischen Bruchmechanik wurden in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Festkörperphysik und Elektronenmikroskopie (IFE) der AdW der DDR in Halle durchgeführt. Wegen der Priorität der Entwicklung des universellen FE-Systems COSAR wurden in den letzten Jahren diese Programme nur am IFE angewendet und weiterentwickelt. Eine Einbeziehung bruchmechanischer Analysen erfolgte nur im Rahmen von COSAR-ROBDIS.

Der erreichte Stand der Entwicklung des COSAR-Systems ermöglicht jetzt die Ausarbeitung eines eigenen Teilsystems COSAR/C zur Lösung allgemeiner, linear-elastischer Rißprobleme.

COSAR/C nutzt für die Ermittlung der Deformations- und Spannungsfelder in Bauteilen mit Riß den gesamten Leistungsumfang der Teilsysteme COSAR/E, COSAR/D und COSAR/T.

Ferner stehen alle Serviceleistungen des Gesamtsystems zur Verfügung.

Der Elementkatalog von COSAR/E wird durch knotendistordierte 2D- und 3D-Elemente ergänzt, da bekanntlich bei isoparametrischen Elementen 2. Ordnung eine Verschiebung der Seitenmittenknoten auf die 1/4-

Position für die zugeordnete Elementecke gerade die für linear-elastische Rißprobleme typische Spannungssingularität $\sim (r^{-1/2})$ erzeugt. Ferner besteht auch die Möglichkeit, mit Hilfe der Übergangselemente (Bild 8) im Rißbereich eine wesentliche Verdichtung der Knoten-anordnung vorzunehmen.

In Ergänzung zu diesen Elementen enthält der Element-katalog von COSAR/C auch 2D- und 3D-Elemente auf der Basis der gemischten bzw. hybriden Formulierungen. Das Makro-Standard-Elementkonzept wird schrittweise auf typische Rißanordnungen erweitert und wiederum effektiv mit der Substrukturtechnik von COSAR ver-bunden.

COSAR/C bietet dem Nutzer die für die Anwendung ty-pischen Bruchkenngößen zur Auswahl an.

Das Teilsystem COSAR/C wird ab 1989 in einer 1. Ver-sion für die breite Anwendung verfügbar sein.

6. Konzeption und Entwicklung von COSAR/N – Nichtlineare Festkörpermechanik

Ein Schwerpunkt der Entwicklungsarbeiten von COSAR besteht gegenwärtig darin, in breitem Maße die Lösung nichtlinearer Probleme zu ermöglichen. Ausschlagge-bend dafür waren der erreichte Entwicklungsstand des Systems, das Interesse der COSAR-Nutzer, mit dem Sys-tem auch komplizierte physikalisch und geometrisch nichtlineare Probleme lösen zu können und das Ziel der Entwicklergruppe, auch auf diesem Gebiet ein interna-tional konkurrenzfähiges FEM-System zu entwickeln.

Während das COSAR-Teilsystem zur nichtlinearen, in-stationären Temperaturfeldberechnung fertiggestellt ist und in der Version COSAR/T86 in die praktische Nut-zung überführt wurde, befindet sich das Teilsystem COSAR/N gegenwärtig in der Entwicklungs- und Test-phase.

Die Konzeption für COSAR/N umfaßt sowohl die Lö-sung physikalisch als auch geometrisch nichtlinearer Auf-gabenklassen, wobei auch beide Arten von Nichtlinearitäten gleichzeitig auftreten können. Im Rahmen der Be-rücksichtigung geometrisch nichtlinearen Verhaltens wer-den zunächst nur große Verschiebungen bei kleinen Ver-

zerrungen berücksichtigt. Bild 14 zeigt den geplanten Leistungsumfang des Systems. Mit dem Zweig Dynamik wird eine Lösung nichtlinearer transienter Vorgänge durch Zeitintegrationsverfahren (step-by-step-solution) ermöglicht.

Die Berücksichtigung nichtlinearen Materialverhaltens im Rahmen eines universellen FEM-Systems erfordert eine Programmkonzeption, die offen ist für unterschied-liche Konstitutivgleichungen. Als theoretische Basis bie-tet sich dafür eine von Bergander vorgeschlagene Stan-dardformulierung in Form eines Satzes von Differential-operatoren erster Ordnung bezüglich der Zeit an, für de-ren Nutzung in COSAR die programmtechnische Basis geschaffen wurde, so daß „Materialprogramme“ auf der Grundlage der Standardformulierung implementiert wer-den können.

In COSAR/N wurde zunächst der Zweig zur Berücksich-tigung elastisch-plastischen Materialverhaltens realisiert. Zur Beschreibung der Zusammenhänge im elastisch-pla-stischen Bereich gibt es prinzipiell zwei Möglichkeiten: die Deformationstheorie und die Fließtheorie, die beide voraussetzen, daß sich die Verzerrungen in einen elasti-schen und einen plastischen Anteil aufspalten lassen. We-gen ihrer Allgemeingültigkeit wird der Fließtheorie, die auf Prandtl und Reuß zurückgeht, der Vorzug gegeben.

Als Fließbedingung wird eine Formulierung vom Typ „Elastischer Zylinder“ und als Deformationsgesetz für den Fließ- und Verfestigungsbereich die Prandtl-Reuß-Gleichung verwendet.

Es gelingt auf dieser Basis, ein recht allgemeines Mate-rialverhalten mit einer überschaubaren Anzahl von Para-metern zu erfassen.

Die Aufspaltung der Verzerrungen in einen elastischen und einen nichtelastischen Anteil führt dazu, daß auch die Steifigkeitsmatrix in einen elastischen und einen nichtelastischen Anteil zerlegt werden kann. Die FEM-Diskretisierung führt auf ein Matrizendifferentialglei-chungssystem, dessen Lösung durch Zeitintegrationsver-fahren oder stückweise Linearisierung erfolgen kann. Für eine iterative Verbesserung der Lösung im Zeit- bzw. Lastschritt stehen zahlreiche Verfahren zur Verfügung (z. B. Newton-Raphson-Verfahren, Quasi-Newton-Ver-fahren u. a.).

Die Programmstruktur von COSAR enthält Schnittstel-len für das Implementieren unterschiedlicher Iterations-verfahren. In COSAR wurde zunächst das Newton-Raph-son-Verfahren benutzt.

Der Hauptaufwand des Newton-Raphsonschen Verfah-rens besteht in dem ständigen Neuaufbau und der In-vertion der vollständigen Jacobischen Matrix (tangen-tiale Steifigkeitsmatrix). Die Verwendung einer konstan-ten Jacobischen Matrix (modifiziertes Verfahren) führt zu einer Abnahme der Konvergenzgeschwindigkeit und kann im Extremfall zu einem divergenten Lösungsverhalten führen. Die Verwendung einer linearisierten Jaco-bischen Matrix, die am Beginn eines neuen Zeitschrittes einmal aktualisiert wird, hat sich bei der Temperatur-feldberechnung als geeigneter Kompromiß erwiesen. Diese Strategie wird zunächst auch bei nichtlinearen Problemen der Festkörpermechanik benutzt.

Aus der Gruppe der „Descent“-Methoden und Gradien-tenverfahren setzt sich international zunehmend die

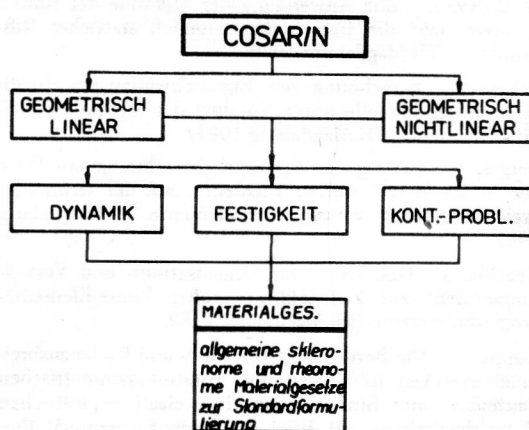


Bild 14
Geplanter Leistungsumfang für COSAR / N

BFGS-Methode durch. Die Konzeption von COSAR/N sieht eine wahlweise Ansteuerung unterschiedlicher Iterationsverfahren vor, so daß ein für das jeweilige Problem optimal angepaßtes Verfahren zum Einsatz gebracht werden kann.

Bei den geometrisch nichtlinearen Problemen müssen der infinitesimale Verzerrungstensor und der Cauchysche Spannungstensor der linearen Analyse durch Tensoren ersetzt werden, die ein richtiges Abbild der großen Verschiebungen und Verzerrungen erzeugen. Dafür eignet sich der Green-Lagrangesche Verzerrungstensor und der 2. Piola-Kirchhoffsche Spannungstensor. Das entstehende nichtlineare Gleichungssystem zur Verschiebungsberechnung läßt eine allgemeine geschlossene Lösung nicht zu. Zur Lösung wird der gesamte Belastungsprozeß in eine endliche Anzahl von Lastinkrementen oder Zeitschritte unterteilt und Gleichgewichtszustände zwischen äußeren und inneren Beanspruchungen bezugnehmend auf den vorherigen Schritt untersucht. Der so ermittelte Verschiebungszuwachs wird dann zum Gesamtzustand hinzu addiert. Mit Hilfe eines eingefügten Iterationsprozesses im Last- oder Zeitschritt kann eine Verbesserung des durch die Linearisierung des Gleichungssystems entstandenen Fehlers erreicht werden.

In der Literatur findet man vorrangig die Lagrangesche Beschreibungsform für den Verformungsvorgang. Es wird noch unterschieden zwischen einer „Update“ – und einer „Total“-Lagrangeschen Form (UL bzw. TL). Beide sind in ihrer Anwendung gleichberechtigt. Der wesentliche Unterschied besteht im Bezugssystem. Für die TL-Formulierung ist die Referenzkonfiguration der Ausgangszustand. Dagegen werden bei der UL-Form alle Größen auf den unmittelbar vorhergehenden Schritt bezogen.

Im Rahmen von COSAR wird zunächst die UL-Formulierung realisiert, da dabei weitgehend auf bereits vorhandene Moduln zum Aufbau der linearen Steifigkeitsbeziehung zurückgegriffen werden kann.

Die variable, erweiterbare Daten- und Programmstruktur (interne Schnittstellen) und eine allgemeine Strategie der Steuerung des Berechnungsablaufes sichert auch für COSAR/N eine große Flexibilität.

Zwei Aspekte seien besonders dabei hervorgehoben:

- Eine effektive Berechnungsstrategie setzt eine Programmkonzeption voraus, die die Vorteile der Substrukturtechnik auszunutzen erlaubt. Insbesondere bei lokalen Nichtlinearitäten ermöglicht die Substrukturtechnik eine erhebliche Rechenzeiteinsparung, da das Aktualisieren der Matrizen und Vektoren im Iterationsprozeß auf die Strukturen beschränkt bleibt, die tatsächlich nichtlinear sind.
- Der Realisierung einer variablen Ablaufsteuerung kommt insbesondere bei nichtlinearen Rechnungen eine besondere Bedeutung zu. Typisch ist, daß die momentane Berechnungsstrategie durch einen Satz von Steuerparametern festgelegt wird, der sowohl Eingabegrößen als auch Informationen über den aktuellen Zustand der Berechnung enthält. Die Steuerparameter, die durch das Fortschreiten der Berechnung modifiziert wurden, sind in einer Steuerliste abgelegt, die einen Bereich für die Globalstrategie und

Bereiche für jede Substruktur enthält, so daß ein strukturweise unterschiedlicher Berechnungsablauf realisiert werden kann.

7. Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag informiert über den gegenwärtigen Stand des universellen Programmsystems COSAR und die in der Entwicklung befindlichen Systemerweiterungen. Dabei wurde keine Vollständigkeit angestrebt und es konnten programmtechnische Realisierungen meist nur angedeutet werden. Auf eine Darstellung der theoretischen Grundlagen wurde weitgehend verzichtet. Für weitergehende Informationen wird auf das Literaturverzeichnis verwiesen, daß einen Überblick über die im Rahmen der COSAR-Entwicklung bisher entstandenen Bücher und Dissertationen A und einige Artikel der letzten beiden Jahre zu den theoretischen Grundlagen und Realisierungen von COSAR enthält. In diesen Arbeiten findet man weitere ausführliche Hinweise auch auf die internationale Literatur. Der Beitrag enthält auch keine Anwendungsbeispiele zu COSAR. Hierzu wird auf die nachfolgenden Publikationen in „Technische Mechanik“ 9(1988), Heft 1 verwiesen.

LITERATUR

- [1] Altenbach, J.; Sacharov, A. (Hrsg.): Die Methode der finiten Elemente in der Festkörpermechanik. VEB Fachbuchverlag Leipzig 1982, Carl-Hanser-Verlag München 1982, Verlag Vyscha škola Kiev 1982 (russ.).
- [2] Fischer, U. (Hrsg.): Finite-Elemente-Programme der Festkörpermechanik. VEB Fachbuchverlag Leipzig 1986.
- [3] Nutzerhandbuch Programmsystem COSAR: Teil I – Grundlagen. Teil II – Eingabevorschrift. TH Magdeburg, WB Festkörpermechanik, Methodisch-Diagnostisches-Zentrum „Finite Elemente“.

Dissertationen A

- [1] Gabbert, U.: Beitrag zur Anwendung der Methode der finiten Elemente auf die Berechnung des Spannungs- und Verformungszustandes dreidimensionaler Körper. TH Magdeburg 1973.
- [2] Todorov, M.: Anwendung finiter hybrider Spannungselemente in der Elastostatik. TH Magdeburg 1978.
- [3] Fritzsche, G.: Zur Berechnung des Verschiebungs- und Spannungszustandes von Rotationskörpern unter beliebiger Belastung. TH Magdeburg 1979.
- [4] Wiltinger, L.: Zur Anwendung der Methode der finiten Elemente auf die Berechnung räumlich statischer Rißprobleme. TH Magdeburg 1980.
- [5] Zehn, M.: Berechnung der Eigenschwingungen dreidimensionaler Modelle unter Nutzung der Methode der finiten Elemente. TH Magdeburg 1981.
- [6] Berger, H.: Beitrag zur Spannungsberechnung mit Hilfe der Methode der finiten Elemente auf der Grundlage dreidimensionaler Verschiebungselemente. TH Magdeburg 1982.
- [7] Grochla, J.: OSCAR – Ein Organisations- und Verwaltungssystem zur Entwicklung großer Finite-Elemente-Programmsysteme. TH Magdeburg 1982.
- [8] Köppe, H.: Die Berechnung von Stoß- und Wellenausbreitungsvorgängen in ebenen und rotationssymmetrischen Bauteilen unter Einbeziehung eines elastisch-plastischen Materialverhaltens mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode. TH Magdeburg 1984.
- [9] Limpert, H.: Rationelle Datenspeicherung und -verwaltung und numerische Untersuchungen für ein Finite-Elemente-Programmsystem. TH Magdeburg 1984.

- [10] Fels, D.: Konzeptioneller Aufbau, Implementierung und Testung von Elementkatalogen universeller Finite-Elemente-Programmsysteme. TH Magdeburg 1985.
- [11] Scholz, E.: Kompatible finite Übergangs-, Rand- und Standardstrukturelemente zur effektiven mechanischen Strukturanalyse von Rand- und Übergangsbereichen. TH Magdeburg 1986.
- [12] Börgers, M.: Entwurfsprinzipien, theoretische Grundlagen und rechentechnische Realisierung eines Finite-Elemente-Grafiksystems FEGRAF. TH Magdeburg 1986.
- [13] Zwicke, M.: Ein quasi-eindimensionales finites Element für die globale mechanische Strukturanalyse dünnwandiger, stabähnlicher Konstruktionen. TU Magdeburg 1987.
- [14] Krämer, M.: Anwendung der Methode der finiten Elemente zur Berechnung zwei- und dreidimensionaler Strömungen in Pumpen und Verdichtern. TU Magdeburg 1987.
- [15] Lenz, W.: Konzeption und Realisierung elastisch-plastischer Verformungs- und Spannungsberechnungen im Finite-Elemente-Programmsystem COSAR. TU Magdeburg 1987.
- Artikel:
- [1] Gabbert, U.; Berger, H.: Universelles FEM-System COSAR-Erfahrungen bei der industriellen Applikation. Wiss. Zeitschr. Techn. Hochsch. Magdeburg 30 (1986) Heft 7.
- [2] Gabbert, U.; Baumgarten, H.: Nichtlineare instationäre Temperaturfeldberechnungen mit der Finite-Elemente-Methode. Techn. Mech. 8 (1987) Heft 2.
- [3] Gabbert, U.; Köppe, H.; Baumgarten, H.; Lenz, W.: Nichtlineare Berechnungsstrategien im universellen FEM-System COSAR. XI. Internationaler Kongreß über Anwendungen der Mathematik in den Ingenieurwissenschaften. Berichte 2, Weimar 1987.
- [4] Altenbach, J.; Gabbert, U.; Krämer, M.: COSAR/Fluid-Erweiterung des FE-Programmsystems COSAR auf Probleme der Fluidmechanik. Internationales schiffstechnisches Symposium Rostock 1987.
- [5] Fischer, U.: Zur Berechnung von Spannungsintensitätsfaktoren mit finiten Elementen nach der Energiemethode. Techn. Mech. 7 (1986) Heft 1.
- [6] Altenbach, J.; Zwicke, M.: Theoretische Ableitung und Bewertung unterschiedlicher quasi-eindimensionaler Modelle für die statische Strukturanalyse dünnwandiger komplexer Konstruktionen. Techn. Mech. 7 (1986) Heft 3.
- [7] Altenbach, J.; Schneider, F.; Zwicke, M.: Eigenschwingungsanalyse prismatischer Stabschalen mit gemischt offen-geschlossenen Querschnitten. Techn. Mech. 8 (1987) Heft 4.
- [8] Gabbert, U.: Zwangskopplung von Schalen- und 3D-Finite-Elemente-Modellen mittels Penalty-Methode. Techn. Mech. 7 (1986) Heft 3.
- [9] Altenbach, J.; Horeschi, H.; Scholz, E.: Datengeneratoren universeller Finite-Elemente-Programmsysteme. Techn. Mech. 8 (1987) Heft 1.
- [10] Altenbach, J.; Scholz, E.: Ableitung von Formfunktionen für finite Standard- und Übergangselemente auf der Grundlage der gemischten Interpolation. Techn. Mech. 8 (1987) Heft 2.
- [11] Altenbach, J.; Scholz, E.: Verbesserte Spannungsanalyse für Rand- und Übergangselemente eines FE-Strukturmodells. Techn. Mech. 8 (1987) Heft 4.