

# CAD-FEM-Kopplung auf der Grundlage etablierter Datenschnittstellen

U. Gabbert, U. Lauschke, M. Zehn

*Die zunehmende Integration von Software im Bereich der rechnergestützten Produktentwicklung erfordert einen Datenaustausch zwischen dem Konstruktions- und dem Berechnungsprozeß (CAD-FEM-Kopplung). Im Beitrag werden der gegenwärtige Stand der Entwicklung diskutiert, über Erfahrungen und Ergebnisse der Kopplung mittels etablierter Datenschnittstellen (IGES, DXF) berichtet und besonders auf die sich im Rahmen des STEP-Projektes vollziehenden aktuellen internationalen Entwicklungen eingegangen. Das von den Autoren entwickelte Konzept zur CAD-FEM-Kopplung auf der Basis von STEP wird vorgestellt und bewertet.*

## 1 CAD-FEM-Kopplung und parallele Produktentwicklung

Die beständige Verringerung der Produktlebenszeiten und die Forderungen nach niedrigen Erzeugniskosten bei hoher Qualität (z.B. auch aus den Anforderungen der ISO 9001 Norm) erzeugen einen permanenten Druck auf die Entwicklungs- und Konstruktionsabteilungen in den Unternehmen zur Senkung der Produktentwicklungszeiten und -kosten. Um dies zu erreichen, muß der Entwicklungsprozeß immer stärker parallelisiert werden (Concurrent Engineering). Dies verlangt schon in relativ frühen Entwicklungsstadien einen zuverlässigen Austausch zwischen Konstruktion und Berechnung, um Bauteil- und Produkteigenschaften noch vor der Herstellung von Versuchsmustern zu simulieren und zu optimieren (Predictive Engineering) (Machner u.a., 1993).

Betrachtet man die Produktentwicklung als einen iterativen Optimierungsprozeß, so entsteht unter dem Einfluß algorithmischer und wissensbasierter Funktionen schrittweise, von der Ideenfindung über die Konstruktion bis hin zur Fertigung, ein immer qualifizierteres Produktmodell. Ein zunehmender Teil des Produktmodells wird rechnergestützt erzeugt. Die Speicherung und Verwaltung der Produktmodelle und der Zugriff darauf in gesamten Unternehmen erfordert mit steigender Komplexität den Einsatz neuer Datenverwaltungskonzepte (z.B. den Einsatz von Engineering Data Management Systemen). Dem Produktmodell zuzuordnen sind auch die zur Produktentwicklung benutzten FE-Modelldaten. Die Finite-Elemente-Modelle, die heute standardmäßig zur Computersimulation des statischen, dynamischen und thermischen Verhaltens benutzt werden (dazu gehören z.B. die Daten zur Beschreibung der FE-Netze, die Material-, Randbedingungs-, Belastungs-, Ergebnis- und Steuerdaten u.a.) sind als ein Partialmodell des allgemeinen Produktdatenmodells anzusehen. Der Wunsch, alle produktbeschreibenden Daten, Informationen und Methoden in einem Standard zusammenzufassen, um davon ausgehend mit unterschiedlichen Systemen zu kommunizieren, führte zur Entwicklung von STEP (STandard for the Exchange of Product Model Data).

Daneben existieren für den Datenaustausch in ingenieurtechnischen Systemen eine Reihe von sogenannten neutralen Files oder Datenstandards, die entweder mit einem bestimmten Softwarepaket (DXF [AutoCad], I-DEAS Universal Fileformat etc.) eingeführt wurden oder unternehmensspezifisch sind (z.B. Datenschiene-Daimler Benz) (Haas, 1993; Anderl, 1993). Als Vorläufer von STEP wurde in der Vergangenheit eine Anzahl software- und firmenunabhängiger Standards entwickelt (IGES, VDA/FS, SET usw.), die immer noch intensiv genutzt werden. Diese Standards haben auch weiterhin Bestand. Ein Grund dafür ist in den Kosten zu sehen, die einem Unternehmen für die Umstellung auf neue Softwareprodukte und Datenstrukturen entstehen. Ein anderer Grund besteht darin, daß diese *alten* Standards einen abgeschlossenen, eingeschränkten und damit auch überschaubaren Umfang sowie einen relativ einfachen Aufbau haben. STEP hat demgegenüber vor allem hinsichtlich des Datenkonzepts und des Datenumfangs erhebliche Vorteile, so daß mit STEP objektorientierte Produktmodellbeschreibungen möglich werden. Die *alten* Standards werden mittelfristig noch benötigt, um vorhandene Software, deren Ersatz für ein Unternehmen weder wirtschaftlich, organisatorisch noch fachinhaltlich gerechtfertigt ist, zu verbinden.

In vielen Unternehmen wird erst seit kurzem (mit der Verfügbarkeit neuer 3D-Systemkerne wie ACIS, PARASOLID u.a.) mit der 3D-Modellierung im Konstruktionsprozeß begonnen (Machner u.a., 1993), wo

durch erst eine leistungsfähige CAD-FEM-Kopplung für beliebige Bauteile möglich und sinnvoll wird. Um das Erzeugnis parallel entwickeln und optimieren zu können, ist eine enge Verbindung zwischen Konstruktion und Berechnung notwendig, die durch eine leistungsfähige CAD-FEM-Kopplung wesentlich gestützt wird (Teichmann, 1986). Deshalb versuchen die Autoren mit diesem Beitrag aus der Sicht ihrer eigenen Arbeiten zur Schnittstellenentwicklung und ihrer praktischen Erfahrungen bei der Anwendung die Möglichkeiten und Grenzen etablierter CAD-Standardschnittstellen aufzuzeigen und durch konkrete Beispiele zu belegen (Gabbert, 1987; Gabbert u.a., 1994). Die Ausführungen zum Entwicklungsstand und zur Nutzung von STEP insbesondere auch hinsichtlich der Verarbeitung von FE-Modellen sollen zeigen, welche Entwicklungen sich auf diesem Gebiet im Bereich des produktorientierten Datenaustausches abzeichnen.

## 2 Verschiedene Möglichkeiten der CAD-FEM-Kopplung

Betrachtet man das Finite-Elemente-Modell zur Analyse eines Bauteils, so besteht es im wesentlichen aus drei Teilen:

- dem FE-Berechnungsmodell (FE-Vernetzung, Lasten, Lager, Materialbeschreibungen usw.),
- dem FE-Berechnungsablaufmodell (Steuerung der Berechnung, Verfahrensparameter usw.) und
- dem FE-Ergebnismodell (Verschiebungen, Spannungen, Temperaturen usw.)

### CAD-FEM-Koppelung auf *Knopfdruck*?

In den seltensten Fällen erfolgt die Konstruktion und Berechnung in *einem* System und auf der Basis *einer* einheitlichen Datenstruktur. Die Erstellung der Eingabedaten ist aus der Sicht der FEM-Analyse der wesentliche Zeitfaktor für die gesamte Berechnung. Durch die Übernahme von im CAD-System erzeugten Geometriedaten über etablierte CAD-Datenstandards kann diese Zeit drastisch reduziert und damit der Aufbau des Berechnungsmodells (Preprocessing) rationalisiert werden. Dabei ist zu beachten, daß schon bei der Erzeugung der Daten im CAD-System und bei der Übergabe in die Standardschnittstelle die Anforderungen des Berechnungsprozesses berücksichtigt werden sollten. Die CAD-FEM-Kopplung scheint, glaubt man den Offerten vieler Systemanbieter, eine Art Zaubermittel zu sein, um die Bauteilberechnung mittels FEM auf *Knopfdruck* ohne weitere größere Mühen (und Kenntnisse?) an den Konstruktionsprozeß anzuhängen.

Eine sachliche Analyse der gegenwärtigen Möglichkeiten kommerzieller CAD- und FEM-Software und der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zeigt ernüchternd, daß der Berechnungsingenieur in den nächsten Jahren auch bei Standardanwendungen keine weitergehende Unterstützung im Hinblick auf einen automatischen Modellierungsprozeß erwarten kann. Eine Ausnahme bildet die Benutzung parametrisierter Berechnungsmodelle, deren Entwicklung sich allerdings nur dann lohnt, wenn für nahezu gleichartige Bauteile, deren Gestalt durch wenige Parameter beschrieben werden kann, eine Vielzahl von Berechnungen durchzuführen ist. Die mechanische Modellbildung bleibt ansonsten der entscheidende Schritt auf dem Weg zum FEM-Modell, von dem die Qualität der zu erreichenden Ergebnisse, der Aufwand für die Modellerstellung und die erforderlichen Hardwareressourcen abhängen. Für die Automatisierung dieses Schrittes gibt es zwar erste Ansätze (adaptive Modellbildung (Stein u.a., 1993)), ausgereifte und für die praktische Anwendung geeignete Lösungen sind jedoch noch nicht vorhanden.

So erfordert die Anwendung der FEM nach wie vor ein fundiertes Wissen auf dem jeweiligen Fachgebiet (Elastizitätstheorie, Festigkeitslehre, Schwingungslehre, Maschinendynamik, Strömungslehre, Thermodynamik usw.). Darüber hinaus gehören Kenntnisse in der FEM zu den unverzichtbaren Voraussetzungen für eine erfolgreiche Anwendung dieses hochwertigen Berechnungsverfahrens. Wer die Voraussetzungen und Annahmen nicht kennt, welche die benutzten finiten Elemente charakterisieren (Ansatzfunktion, Materialeigenschaften, Approximationseigenschaften), ist kaum in der Lage, die Ergebnisse hinsichtlich ihrer Qualität zu beurteilen. Bei dynamischen, zeitvarianten und nichtlinearen Problemen können auch die verwendeten numerischen Verfahren einen erheblichen Einfluß auf die Lösungsqualität haben, so daß hier eine besonders sorgfältige Kontrolle des Lösungsablaufes und der Ergebnisse erforderlich ist. Es muß in diesem Zusammenhang abschließend noch darauf hingewiesen werden, daß in vielen Fällen eine fundierte mechanische Modellbildung nur durch die Einbeziehung experimenteller Methoden gelingt. Die Methoden der Werkstoffdiagnostik und der experimentellen Mechanik (z.B. experimentelle Spannungsanalyse, experimentelle Modalanalyse) liefern wichtige Ausgangsparameter für die Berechnung und dienen der Absicherung und Verbesserung (updating) der Ergebnisse. Der FEM-Modellierungsprozeß erfordert aus den genannten Gründen beim Übergang vom CAD-Modell zum FEM-Modell in der Regel ein fachkundiges interaktives Eingreifen.

### Welche CAD-FEM-Kopplungen werden auf dem Softwaremarkt angeboten?

Eine Anzahl von CAD-Systemen bietet die Möglichkeit, FE-Vernetzungen innerhalb des Systems auszuführen. In der Regel bleiben dabei die Möglichkeiten der FE-Modellierung (Elementkatalog, Lasteintragung und Lastarten, Randbedingungen, Materialbeschreibungen, Regularität der Netze usw.) weit hinter denen universeller FEM-Systeme zurück, und die Anschaffungskosten sind oft erheblich. Sie bieten aber für den im CAD-System eingearbeiteten den Vorzug, das FE-Modell in der vertrauten Systemumgebung nutzen zu können. Für die Vernetzung kann direkt auf die Geometriebasis des CAD-Systems zurückgegriffen werden (u.a. sind z.B. Geometrie und "Beiwerk" trennbar). Die Übertragung der so erzeugten FE-Daten zu einem anderen FEM-System muß dann in Form der Eingabedaten (im ASCII-Format) dieses FEM-Systems erfolgen, da CAD-Schnittstellenstandards dafür bisher keine brauchbaren Möglichkeiten bieten (z.B. sind die in IGES vorgesehenen FEM-Entities unzulänglich). Meist wird die NASTRAN-Eingabe als quasi-Standard genutzt. Die Mehrzahl der auf dem Markt befindlichen FE-Systeme sind in der Lage, NASTRAN-Eingabedaten zu verarbeiten. Durch die Nutzung des NASTRAN-Datenfiles können nicht alle Möglichkeiten eines alternativen FE-Systems genutzt werden, so daß eine nachträgliche, meist aufwendige Editierung der Eingabedaten erforderlich ist. Der Datenaustausch über NASTRAN-Files oder alternative Eingabedaten von FEM-Programmen läßt keinen direkten Rückgriff auf die Geometrie mehr zu, wie er z.B. für die Gestaltoptimierung oder einfache Lageänderungen von Lasten, Lagern etc. und für Variantenrechnungen schnell im Preprozessor eines FEM-System realisierbar wäre.

Alle bisherigen Versuche zur Etablierung von CAD-FEM-Standards haben sich nicht durchsetzen können. Ein erfolgreicher Weg wurde in dieser Hinsicht in der ehemaligen DDR mit FEMDAS (TGL 44640, 1988) beschritten. Dieser Standard und die dazugehörigen Softwarewerkzeuge waren soweit ausgereift, daß sie bereits zum kommerziellen Datenaustausch genutzt wurden. Auf die neuen Entwicklungen, die sich gegenwärtig im Rahmen von STEP vollziehen, wird noch eingegangen.

### Wie sieht die CAD-FEM-Kopplung aus der Sicht der FEM-Systeme aus?

Es gibt kein größeres FEM-System, das nicht die Möglichkeit der CAD-FEM-Kopplung anbietet. Dabei wird in den meisten Fällen über die CAD-Schnittstellenstandards (IGES, DXF, VDA/FS, SET usw. (Haas, 1993)) die CAD-Geometrie eingelesen und kann damit im Preprozessing als Basis für die FE-Vernetzung benutzt werden. Diese Vorgehensweise stößt auf verschiedene Schwierigkeiten, die sich daraus ergeben, daß die aus den vollständigen Konstruktionsunterlagen übertragenen Daten eine Vielzahl von für die Vernetzung überflüssigen Inhalten (Texte, Bemaßungen, Einzelheiten, Schnitte) und Details enthalten, die für die Berechnung nicht relevant sind. Somit ist eine erste Forderung an eine derartige Kopplungslösung, daß die Daten *gefiltert* und überflüssige Informationen (sofern identifizierbar) ausgeblendet werden. Aber auch dann bleiben oftmals sehr viele Punkte, Linien, Flächen, Körper etc. übrig, die aus konstruktiven Details kommen oder durch fehlende Attribute nicht von anderen Geometrieelementen zu unterscheiden sind. Wenn sich der Bildschirm mit einer unüberschaubaren Objektmenge füllt, so daß kaum noch Einzelheiten zu unterscheiden sind, stellt sich bei der FE-Modellgenerierung immer die Frage, ob nicht die CAD-Datei verworfen und die Geometriegenerierung im Preprozessing auf der Grundlage von Zeichnungen erneut ausgeführt wird. Durch ein Zusammenwirken von Konstrukteur und Berechnungsingenieur kann hier eine fachlich begründete Selektion der Daten erreicht werden, wodurch eine Übertragung von *Datenfriedhöfen* vermieden wird.

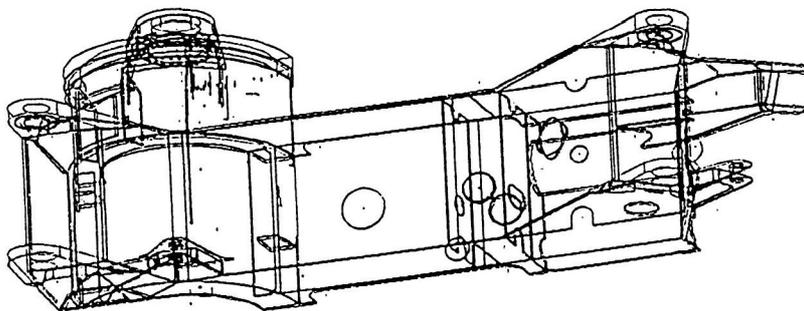


Bild 1. Unterbau der Auto-Beton-Pumpe M43 der Firma Putzmeister nach der IGES-Übertragung aus dem CAD-System (ME30) in einen FEM-Preprozessor (COSMESH)

Wichtig ist, daß die *gefilterten* CAD-Daten automatisch in solche Elemente des FE-Preprozessors umgewandelt werden, die von diesem verarbeitbar sind bzw. sich noch manipulieren lassen. Damit können Teilmengen des Geometriemodells für die FE-Vernetzung sinnvoll genutzt und Einzelheiten ergänzt sowie variiert werden. In den Bildern 1 und 2 ist eine derartige Kopplung an einem praktischen Problem dargestellt. Aus dem CAD-System ME30 (Hewlett-Packard) wurden IGES-Daten herausgeschrieben und im FEM-Preprozessor COSMESH (FEMCOS-GmbH) (Fischer, 1992, Gabbert u.a., 1992) des FEM-Systems COSAR (COSAR,1993) weiterverarbeitet. Trotz einer guten Datenfilterung zeigt das Bild 1, daß die von COSMESH erkannten Objekte darstellt, einige "unbrauchbare" Geometrielemente. Von diesem Geometriemodell ausge-

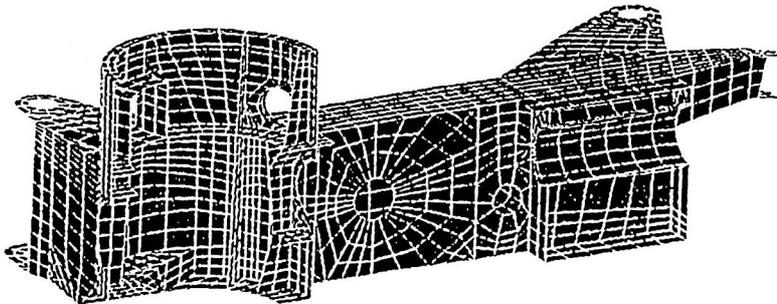


Bild 2. FEM-Netz, das grafisch-interaktiv mittels der in Bild 1 dargestellten CAD-Geometrie weitgehend automatisiert erstellt wurde

hend erfolgte dann unter Nutzung einer Substrukturtechnik und patchweise arbeitenden automatischen Netzgeneratoren die FEM-Modellbildung (Schalenmodell), die im Bild 2 nach der Weiterverarbeitung im FEM-System COSAR dargestellt ist (Bild 2 zeigt nicht alle Substrukturen). Eine Rückkopplung zum CAD-System z.B. bei der Gestaltoptimierung ist über die CAD-Standardschnittstellen immer möglich, sofern die FE-Systeme über entsprechende Exportfilter verfügen. Bei neuen Entwicklungen sollte in jedem Fall gesichert werden, daß während der FEM-Analyse das ursprüngliche Geometriemodell zur Verfügung steht, um aktuelle Entwicklungen auf dem FEM-Gebiet, z.B. die Modelladaptivität, fehlergesteuerte Netzanpassungen (Fels u.a., 1992), Formoptimierungen u.a., integrieren zu können. Bei einem objektorientierten Datenmodell, wie es beispielsweise im FEM-System COSAR realisiert ist, stellt eine derartige Modellerweiterung kein prinzipielles Problem dar.

### 3 Entwicklungen zur CAD-FEM-Kopplung auf der Basis von STEP

#### Entwicklungsstand

Es kann im vorliegenden Beitrag davon ausgegangen werden, daß die traditionellen CAD-Datenschnittstellen (IGES, DXF, VDA-FS, SET) weit verbreitet und bekannt sind, so daß hier nur auf die aktuellen Entwicklungen, die sich im Rahmen von STEP vollziehen, eingegangen werden soll. Etwa seit 1983 versuchen verschiedene internationale Organisationen (International Standardisation Organisation (ISO Committee TC 184/SC4), National Bureau of Standards (NBS) und European Strategic Program of Research and Development in Information Technologie (ESPRIT)) alle Anstrengungen auf dem Gebiet der Datenaustauschformate zu koordinieren und einen international anerkannten Standard für den Austausch von produktbeschreibenden Daten zu erarbeiten (Machner, 1993, edv, 1990). Zunächst wurde richtig entschieden, nicht die Entwicklung eines existierenden Standards fortzusetzen, sondern auf der Basis der bisherigen Erfahrungen einen neuen internationalen Standard - STEP - zu entwickeln. Die STEP-ISO-Norm 10303 ist entsprechend der organisatorischen Unterteilung von STEP in die folgenden sieben Hauptgruppen (Serien) gegliedert (ISO, 1993):

1. ISO 10303-0 Serie: Grundlagen, Prinzipien
2. ISO 10303-10 Serie: Beschreibungsmethoden
3. ISO 10303-20 Serie: Implementierungsmethoden
4. ISO 10303-30 Serie: Testmethoden und -kriterien für die Prozessoren und Modellintegrität
5. ISO 10303-40 Serie: Das Kernmodell und die Basismodelle des STEP-Produktmodells
6. ISO 10303-100 Serie: Anwendungsmodelle
7. ISO 10303-200 Serie: Beschreibung von STEP-Anwendungsprotokollen

Referenzmodelle, Austauschformate sowie Abbildungsmechanismen werden mit Hilfe der formalen Spezifikationsprache EXPRESS beschrieben. Dies hat zwei Gründe. Zum einen wird damit eine eindeutige Beschreibung gewährleistet, und zum anderen besteht die Möglichkeit, Software für STEP-Anwendungen teilweise automatisch zu generieren. Der Entwurf des Referenzmodells kann graphisch mit Hilfe des Grafik-Editors EXPRESS-G durchgeführt werden. Die formale Spezifikation des Produktmodells wird unter Nutzung der Spezifikationsprache EXPRESS abgeleitet. Unter Zuhilfenahme der erweiterten Backus-Naur-Form ist die Abbildung von STEP-Produktmodelldaten in eine sequentielle Datei festgelegt. Auf der Basis von STEP lassen sich Partialmodelle entwickeln. Partialmodelle entstehen durch eine Zusammenfassung semantisch zusammengehörender Produktmerkmale, die in Objekten und Objektstrukturen abgebildet werden, und sind gewissermaßen Teilinformativmengen. Folgende drei Gruppen von Partialmodellklassen werden in STEP unterschieden:

#### Kern des Produktdatenmodells

Im Kern des Produktdatenmodells werden ein Rahmenkonzept für den Aufbau eines Produktdatenmodells aus einer Menge von Partialmodellen und Datenobjekte zur Verwaltung und Benennung definiert.

#### Anwendungsunabhängige Basismodelle

Dazu gehört bisher eine Anzahl von Partialmodellen, die unabhängig von einem Anwendungsgebiet entwickelt wurden, z.B.: Geometrical and Topological Representation, Materials, Visual Presentation, Shape Tolerance, Form Feature u.a.

#### Anwendungsabhängige Basismodelle

Dazu gehört bisher eine Anzahl von Partialmodellen, die abhängig von anwendungsbezogenen Funktionen entwickelt wurden, z.B.: Draughting, Ship Structures, Electrical Functional, Finite Element Analysis (enthält Datenobjekte zur Abbildung von ein-, zwei- und dreidimensionalen finiten Elementen) und Kinematics.

#### STEP-Part 104 - Finite-Element-Analysis

Im Rahmen des STEP-Projektes gibt es erstmals ernsthafte Bemühungen, die für die Beschreibung von Finite-Elemente-Modellen (FEM) erforderlichen Daten zu integrieren und zu standardisieren. Das STEP-FEM-Modell sieht in Part 104 eine Aufspaltung der Daten in die eigentlichen für die Berechnung benötigten FE-Modelldaten (FEAM), die Daten zur Steuerung einer FE-Berechnung (FEAC) und die Ergebnisdaten (FEAR) vor. Eine aus der Sicht der Autoren weitere richtige und wichtige Entscheidung bei der Gestaltung des STEP-FEM-Datenmodells besteht in der Unterstützung der Substrukturtechnik. Die Erfahrungen mit dem an der Universität Magdeburg entwickelten FEM-Datenstandard FEMDAS (Finite-Element-Data-Standard) haben gezeigt, daß auf die Substrukturtechnik, die von einer Reihe kommerzieller FE-Systeme (ANSYS, COSAR, ...) genutzt wird, nicht verzichtet werden kann. Die Arbeiten am STEP-FEM-Datenmodell sind allerdings bei weitem noch nicht abgeschlossen. Die STEP-Part-104-Beschreibung in (ISO, 1993) enthält zur Zeit lediglich die FEAM-Datendefinitionen für die lineare Elastostatik. Dazu gehören die Beschreibungen von finiten Elementen (Punkt-, Linien-, Flächen-, Volumenelemente) mit ihren topologischen und geometrischen Eigenschaften und den Assoziationen zu den Materialdaten. Das sind erfahrungsgemäß die Daten, die bei der Gestaltung eines FEM-Datenmodells die geringsten Probleme bereiten. Die Beschreibung von mehrstufigen Substrukturhierarchien, von Lastarten, Rand-, Zwangs-, Koppelbedingungen u.a. fehlt bisher, so daß eine abschließende Bewertung des FEM-Teils von STEP nicht möglich ist.

Es sollte aber auf ein aus der Sicht der Autoren schwerwiegendes Problem hingewiesen werden, das sich aus dem extrem aufgeblähten Umfang des Standards ergibt. Allein die bisher aufgenommenen Beschreibungen von finiten Elementen umfassen mehr als 100 Seiten des Standards, ohne daß nur annähernd die sich aus einer realen FEM-Anwendung ergebenden Anforderungen abgedeckt werden. (Im Vergleich dazu ist in FEMDAS für die Elementbeschreibung ein einziges Entity ausreichend, wobei ein konkretes Element und die dazugehörigen Daten über seinen Elementtyp (Name) identifiziert werden können). Die praktischen Erfahrungen beim FEM-Datenaustausch zeigen, daß mit wenigen grundlegenden Entities nahezu 100% der Daten universeller FEM-Systeme ausgetauscht werden können. Für die nicht übertragbaren Daten (dazu gehören z.B. auch die Steuerdaten eines FEM-Systems) müssen *Sender* und *Empfänger* Vereinbarungen treffen, wie diese Daten zu beschreiben und auszutauschen sind. Die Aufnahme dieser zahlreichen, kaum überschaubaren Sonderfälle in die Produktmodelldefinition würde dagegen den Rahmen einer handhabbaren Beschreibung sprengen. Der Dynamik der Forschung und Entwicklung auf dem FEM-Gebiet kann ein Standard ohnehin kaum Rechnung tragen. Die Anlage von STEP-FEM in Part 104 birgt die Gefahr, an der FEM-Realität vorbeizugehen.

### STEP oder IGES?

IGES wird seit 1979 benutzt und ist (insbesondere die Versionen 3.0 und 4.0) der am weitesten verbreitete CAD-Standard. Die Entwicklung ist abgeschlossen, was für die Nutzer große Vorteile hinsichtlich der Zuverlässigkeit und Stabilität des Standards hat. IGES wurde zum Zwecke der Übertragung von Geometrie- und Topologiedaten geschaffen. Es gibt für praktisch alle CAD-Systeme IGES-Interpreter, deren Leistungsumfang jedoch nicht einheitlich ist, so daß mit Datenverlusten gerechnet werden muß (Herrmann, 1986). STEP wurde für den Austausch von Produktdaten geschaffen. Der Umfang der Übertragungsmöglichkeiten ist nahezu unbegrenzt. Dies hat aber auch zur Folge, daß ohne umfangreiches Wissen über die Strategie und die Definitionen von STEP, über "graphische und schematische Sprachen" die Schnittstellenprozessoren nicht programmiert werden können. Die Vorteile von STEP gegenüber IGES können wie folgt dargestellt werden:

1. STEP beinhaltet *mehr und bessere Definitionen* als IGES, da die Entwicklungserfahrungen der letzten 15 Jahre in die STEP-Entwicklung eingeflossen sind. Dies ermöglicht einen exakteren Datenaustausch zwischen CAD-Systemen.
2. STEP ist *anwendungsspezifisch*. Ist ein Design-Prozeß für einen speziellen Industriezweig kritisch, kann dieser Prozeß unter Schaffung und Nutzung eines Application Protocols effizienter gestaltet werden.
3. Durch die Nutzung der Spezifikationsprache EXPRESS können Anwendungsprogramme für Design und Manufacturing unter Verwendung einer offenen, geteilten Engineering-Datenbasis geschrieben werden.

### 4 Realisierung einer CAD-FEM-Kopplung auf der Basis von STEP

Das von den Autoren entwickelte Konzept zur CAD-FEM-Kopplung auf der Basis von STEP (eine ausführliche Darstellung dazu findet sich in Gabbert u.a. (1994)) definiert zunächst ein STEP-Partialmodell, das diejenigen STEP-Objekte umfaßt, die in den FEM-Preprozessor übertragen werden. Damit ist aber keine Einschränkung z.B. der Geometrieelemente verbunden, die im CAD-System benutzt werden dürfen. Eine *intelligente* Interface-Software muß dann die angebotenen STEP-Objekte in das Partialmodell abbilden. Ein dabei möglicherweise entstehender geringer Informationsverlust (z.B. Ordnung einer mathematischen Flächenbeschreibung durch Aufspalten in Teilflächen niedriger Ordnung) ist aus der Sicht der Anforderungen der FEM-Analyse unkritisch. Diese Vorgehensweise sichert die Konsistenz zum Geometriemodell des FEM-Preprozessors. Das bisherige Fehlen von volumenbezogenen Geometrieobjekten in STEP (ISO, 1993) machte es aus der Sicht der Anforderungen praktischer FEM-Analysen, die überwiegend auf Volumen- oder Schalenmodellen basieren, erforderlich, zusätzliche eigene Geometrieobjekte in STEP (sogenannte user-defined-entities) zu definieren. Eine Auswahl der Objekte des Partialmodells zeigt Bild 3.

<b>CARTESIAN POINT</b>	kartesischer 3D-Punkt, 3 Koordinaten
<b>POLYLINE</b>	Polygon aus 2 bis 4 Punkten
<b>CIRCLE 1C</b>	Kreisbogen aus einem Punkt durch Drehung um eine Achse aus zwei Punkten, zylindrisch linear
<b>CIRCLE 2C</b>	Kreisbogen aus zwei Punkten durch Drehung um eine Achse aus zwei Punkten, zylindrisch linear
<b>LINE 3P</b>	Linie durch drei Punkte, kartesisch quadratisch
<b>PATCH 2L</b>	reguläre Fläche zwischen zwei Linien (Kreisbogen, Polygon oder Linie durch drei Punkte), kartesisch linear
<b>PATCH 4P</b>	reguläre Fläche aus vier Punkten, kartesisch linear
<b>PATCH 4K</b>	reguläre Fläche zwischen vier Kanten (Linien) (Kreisbogen, Polygon oder Linie durch drei Punkte)
<b>SOLID 2P</b>	Volumenelement zwischen zwei beliebigen Flächen
<b>SOLID 3P</b>	Volumenelement zwischen drei beliebigen Flächen
<b>SOLID 8P</b>	Volumenelement aus 8 Punkten
<b>SOLID 12P</b>	Volumenelement aus 12 Punkten

Bild 3. Entities zur Geometriebeschreibung (Auswahl)

Das von einem CAD-System ausgegebene STEP-File wird in einem STEP-FEM-Prozessor verarbeitet, dazu zunächst eingelesen (Scanner), einer Grammatikkontrolle unterzogen (Parser) und dann eine intelligente Abbildung der angebotenen STEP-Objekte auf das STEP-FEM-Partialmodell durchgeführt (Translator). Diese Daten werden direkt an den FEM-Preprozessor übergeben. Bei der Nutzung von COSMESH wird dazu das *Protokoll-File* genutzt. Die Transformation einer Kreislinie läßt sich dann folgendermaßen darstellen:

**EXPRESS-Beschreibung:** ENTITY user\_defined\_entity\_circle1c  
SUBTYPE OF (curve);  
position: axis2\_placement\_3d;  
point: cartesian\_point;  
angle: degree;  
END\_ENTITY;

**STEP-File:** user\_defined\_entity\_circle1c(Punkt1, Punkt2, Punkt3, Winkel);

**COSMESH-Protokollfile:** \C11C  
Punkt1, Punkt2  
Winkel  
Punkt3

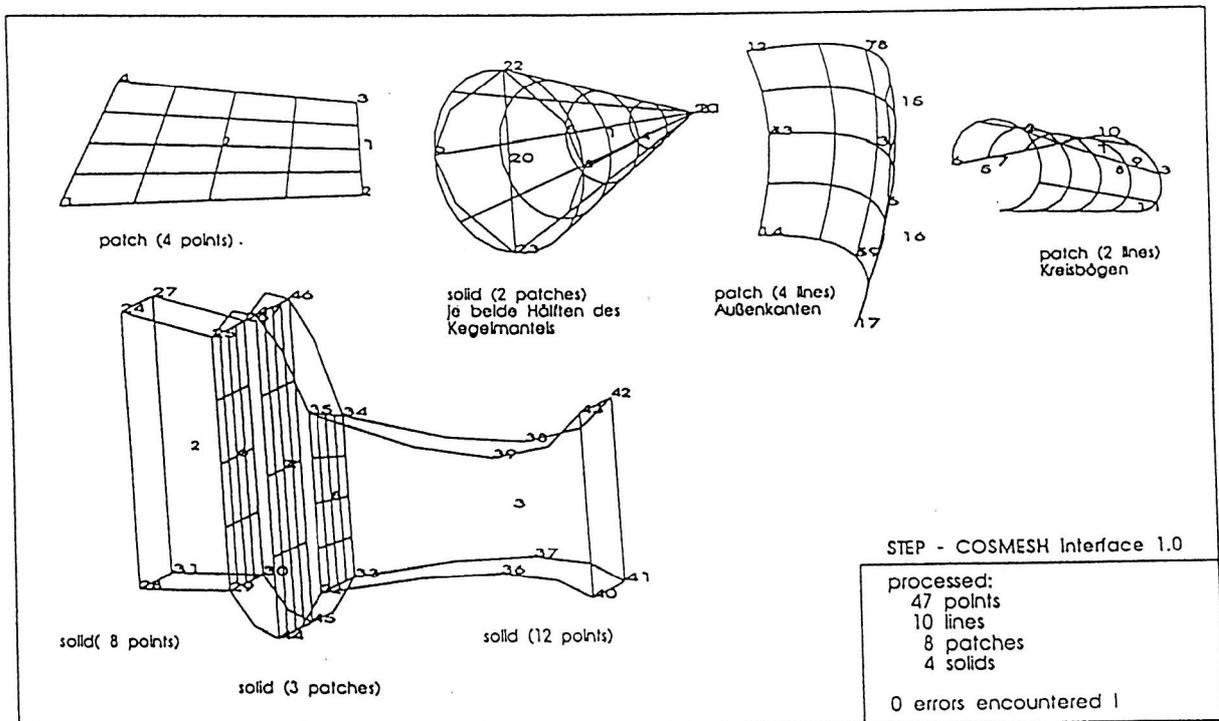


Bild 4. Geometrieobjekte (Auswahl) zum STEP-FEM Datenaustausch

Das Bild 4 zeigt eine Auswahl von Geometrieobjekten, die über das entwickelte STEP-FEM-Interface an den Preprozessor COSMESH übertragen und dort dargestellt wurden. Von diesen Geometrieobjekten ausgehend erfolgt dann die weitere interaktive, automatisierte FE-Netzgenerierung, Attributzuordnung bis hin zur Bereitstellung des rechenfähigen FEM-Modells. Über die zur Zeit noch laufenden Arbeiten zur Entwicklung eines kompletten FEM-Partialmodells einschließlich des erforderlichen FEM-STEP-Prozessors wird zu einem späteren Zeitpunkt berichtet.

## 5 Erfahrungen, Hinweise und Beispiele zur CAD-FEM-Kopplung

Bei der Nutzung von Standardschnittstellen sollte man zunächst der Schnittstelle selbst und ihrer Realisierung im jeweiligen Softwareprodukt Aufmerksamkeit widmen. Für das CAD-System ist zu beachten, daß

1. der von der CAD-Software angebotene Umfang des Standards in der Regel nicht vollständig ist,
2. softwareabhängige Dialekte des Standards nicht ungewöhnlich sind und
3. mit Fehlern (typisch z.B. spezielle Flächenbeschreibungen) gerechnet werden muß.

Den Systemunterlagen ist zu entnehmen, welche Elemente aus dem CAD-System übertragen werden können. Als erste Tests dazu sollten mit dem CAD-System verschiedene Beispiele mit unterschiedlichen Darstellungselementen in Schnittstellendateien ausgegeben und reimportiert werden. Verluste zeigen Einschränkungen oder Mängel in der Standardrealisierung auf. Softwareabhängige Dialekte des Standards zeigen sich, wenn in ein anderes CAD-System importiert wird. Aus den Erfahrungen mit IGES liegen hier umfangreiche Testbeispiele und Testergebnisse vor (Herrmann, 1986).

Auf der Seite des FEM-Systems ist hinsichtlich der Datenübernahme zu beachten, daß

1. der von der CAD-Schnittstelle angebotene Umfang und auch die Datenmenge verarbeitet werden kann,
2. schon beim Import möglichst eine Ausfilterung von Daten erfolgt, die für die Netzgenerierung nicht erforderlich sind und
3. bei der Importierung in den jeweiligen Preprozessor Geometrieelemente entstehen, die in diesem zu bearbeiten und zu manipulieren sind.

Probleme ergeben sich im FEM-Preprozessor häufig bei der Interpretation spezieller Flächenbeschreibungen (Gabbert u.a., 1994) und bei der Verarbeitung des schon bei einfachen Konstruktionen extremen Datenumfangs einer CAD-Schnittstellendatei. Eine sofortige Umsetzung des CAD-Files in FE-Netzstrukturen (grobe Netze zur weiteren Verfeinerung) sollte nicht erfolgen, um im Preprozessor soweit wie möglich geometriebezogen zu arbeiten und Änderungen, Varianten und Ergänzungen erzeugen zu können. Welche große Bedeutung einer guten Zusammenarbeit zwischen dem Konstrukteur und dem Berechnungsingenieur zukommt, verdeutlichen die Erläuterungen zu den nachfolgenden Beispielen.

### Beispiele

Das Bild 5 zeigt als erstes Beispiel einen Rohrkrümmer, der an einer Seite eingespannt ist. Für die Übergabe an den Preprozessor wurden im CAD-System ICEM (Control Data) bereits Bemaßungen und andere Zeichnungsdetails (Schriftfeld etc.) herausgenommen.

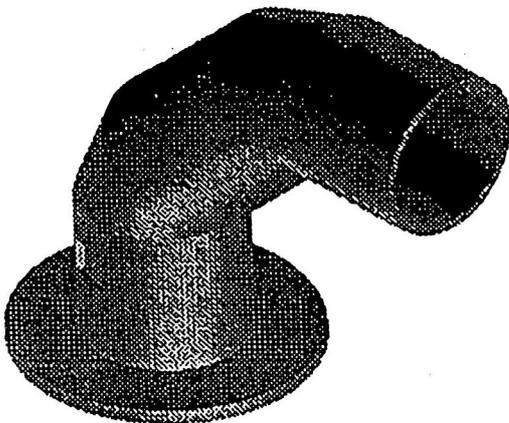


Bild 5. Volumenmodell eines Rohrkrümmers

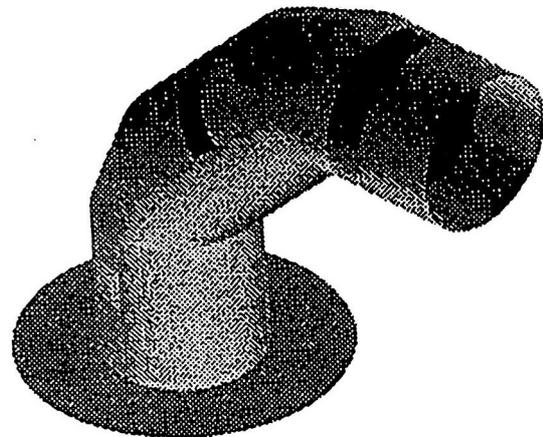


Bild 6. Schalenmodell

Die erste wichtige Entscheidung wird im CAD-System getroffen, wenn die Frage steht, in welcher Form der Körper in die Schnittstellendatei übertragen wird. Erfolgt die Konstruktion dreidimensional unter realer Modellierung der Wandstärken und gibt man dieses Modell in IGES aus, so erfolgt die Beschreibung als Kantenmodell (Glaskörpermodell). In der Regel wird man aber aus fachlichen Gründen eine derartige dünnwandige Struktur als Schalenmodell bearbeiten. Dazu ist eine Reduktion auf die Mittelfläche der Rohre erforderlich; Bild 6 zeigt diese Form der Beschreibung. Erfolgt die Ausgabe als Flächenmodell, kann für die Vernetzung der FEM-Preprozessor automatisch eine Zerlegung in Teilflächen vornehmen. Bild 7 zeigt diese Flächenstruktur (keine Vernetzung!), wie sie sich automatisch nach Einlesen der IGES Daten in COSMESH ergibt. Die aus dem CAD-System so übertragenen Geometriepunkte, Linien, Flächen und Solids sind geometrische Objekte, die im FEM-Preprozessor weiter bearbeitet werden können, z.B. durch Zuordnung von Attributen (z.B. Dicken, Materialeigenschaften, Lasten, Randbedingungen usw.). Schon im Konstruktionsprozeß sollten Bereiche in denen Lasten, Randbedingungen oder andere Werkstoffe vorliegen, durch Punkte, Linien, Flächen oder Volumenbereiche definiert werden. In Bild 6 sind diese Bereiche unterschiedlich grau dargestellt. Jeder nachträgliche Eingriff in das Geometriemodell (entsprechend Bild 5) im FEM-Preprozeß erfordert zusätzliche Eingabedaten, die oft nur mit erheblichem Aufwand interaktiv be-

reitgestellt werden können. In Bild 8 ist in der schwarz/weiß Kopie eines Ergebnisbildes der COSAR-Berechnung die Vernetzung zu erkennen, die nahezu vollständig automatisch erstellt wurde. Dazu reicht in COSMESH bei einer weitgehend gleichmäßigen Vernetzung die Eingabe nur eines Parameters, z.B. der mittleren Elementkantenlänge, aus.

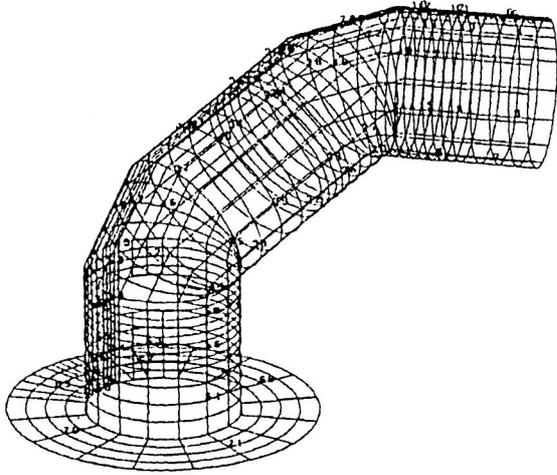


Bild 7. Flächenmodell in COSMESH

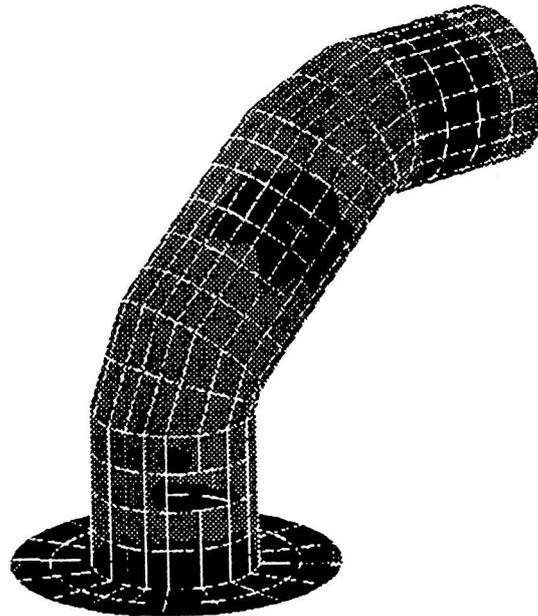


Bild 8. Darstellung der Spannungsverteilung in COSAR

Das bereits einleitend in den Bildern 1 und 2 dargestellte Bauteil wurde mit HP ME30 als 3D-Volumenmodell konstruiert, und die Übergabe für den Preprozessor erfolgte ebenfalls über IGES in Form von Punkten, Linien, und Flächen. Das durch den IGES-Adapter des FEM-Preprozessors COSMESH aufbereitete Geometriemodell ist in Bild 1 zu sehen. Da das Bauteil dünnwandig ist, bietet sich hier ebenfalls eine Berechnung als Schalenmodell an. Im Preprozessor wurde das importierte Modell bearbeitet und analog zur Darstellung in Bild 7 ein Mittelflächenmodell (Patchstruktur) erzeugt auf dessen Grundlage das im Bild 2 gezeigte FE-Modell generiert wurde. Das Mittelflächenmodell bildete die Grundlage für die numerische Simulation verschiedener konstruktiver Varianten, die parallel zur Detailkonstruktion ausgeführt wurden. Das FE-Modell wurde unter Nutzung einer Substrukturtechnik aufgebaut. Die im Preprozessor definierten Geometriebereiche wurden dazu Strukturen zugeordnet. Eine Rechenzeitanalyse zeigte, daß die FEM-Berechnung dieses Problems ohne Substrukturtechnik (trotz Bandweitenminimierung) eine etwa fünffach höhere Rechenzeit erforderte und auch ein etwa fünffacher Speicherplatzbedarf (Festplatte) nötig war, um alle während der Rechnung entstehenden Daten ablegen zu können.

## 6 Zusammenfassung

Die durchgängige rechnergestützte Produktentwicklung erfordert den Datenaustausch zwischen dem Entwurfs-, Konstruktions- und Berechnungsprozeß. Für derartige Kopplungen stehen weit verbreitete, standardisierte Datenschnittstellen zur Verfügung. Im Beitrag werden die besonderen Probleme, die sich bei der Nutzung von Standardschnittstellen (IGES, DXF, STEP) beim Übergang vom CAD-System zum FEM-Berechnungssystem ergeben, diskutiert. Von den internationalen Entwicklungen zu STEP - dem zukünftigen Standard für eine einheitliche Produktdatenmodellierung - ausgehend, werden von den Autoren erste Ergebnisse zur CAD-FEM-Kopplung auf der Basis von STEP vorgestellt. Anwendungsbeispiele zeigen die bisher erreichte Funktionalität aber auch die Probleme einer automatischen CAD-FEM-Kopplung, die belegen, daß auch zukünftig eine enge Zusammenarbeit von Konstrukteur und Berechnungsingenieur erforderlich ist.

## Förderung

Die Arbeit wurde vom Ministerium für Wissenschaft und Forschung des Landes Sachsen-Anhalt im Rahmen des Projektes "Produktdatenmodelle zur durchgängigen Bearbeitung von Konstruktions-Berechnungs- und Fertigungsdaten" gefördert (FKZ 901 B 02328223).

## Literatur

1. Aas, J.: Data Exchange in Finite Element Analysis - a Functional Requirement Specification. Published by NAFEMS Ref.:R0005. Glasgow (1992).
2. Anderl, R.: CAD-Schnittstellen Methoden und Werkzeuge zur CA-Integration. Carl Hanser Verlag München Wien. (1993).
3. COSAR-Nutzerhandbuch. FEMCOS-GmbH Magdeburg. Ausgabe 1993.
4. Datenschnittstelle für Finite-Elemente-Modelle (FEMDAS). DDR-Standard TGL 44640. August (1988).
5. edv aspekte, 9. Jahrgang 2/1990.
6. Fels, D.; Gabbert, U.; Mücke, R.: Fehlergesteuerte Netzanpassung für 2D- und 3D- Finite-Elemente-Modelle. XXI. Internationaler FEM-Kongress, 16. und 17.11.1992, Baden-Baden.
7. Fischer, U.: COSMESH, interaktive Generierung von Schalen und Volumenmodellen. In: Beiträge III. Cosar-Konferenz Qualität und Effektivität von FEM-Berechnungen. 24. und 25.09.1992 Technische Universität Magdeburg.
8. Gabbert, U.: FEMDAS - Standardisierte Datenschnittstelle für den Austausch von FEM-Daten. Bauplanung - Bautechnik 41. Jahrgang. Heft 5. Mai (1987), S. 198-201.
9. Gabbert, U., Zehn, M.: Universelles FEM-System COSAR - ein zuverlässiges und effektives Berechnungswerkzeug für den Ingenieur. In: Beiträge III. Cosar-Konferenz Qualität und Effektivität von FEM-Berechnungen. 24. und 25.09.1992, Technische Universität Magdeburg.
10. Gabbert, U.; Krämer, M.; Lauschke, U.; Ullrich, W.; Wehner, P.: Produktdatenmodelle zur durchgängigen Bearbeitung von Konstruktions-, Berechnungs- und Fertigungsdaten im Pumpenbau - Abschlußbericht für das Projekt 901 B023228223. Institut für Mechanik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fluid-Ingenieurtechnik-GmbH Halle, (1994) (in Vorbereitung)
11. Haas, W.: CAD-Datenaustausch-Knigge. Springer-Verlag, (1993).
12. Heinrichs, H.; Aas, J. (Ed.): A Study of CAD Model Data Transfer Based on STEP. ESPRIT Project 2195. Kernforschungszentrum Karlsruhe. Januar 1991.
13. Herrmann, M.: Testfälle, Testwerkzeuge und Testergebnisse der AG20 der CEFE zur Untersuchung von Prozessoren zur IGES-Schnittstelle. VDI-Bericht 610.5 "Datenverarbeitung in der Konstruktion". VDI-Verlag Düsseldorf, (1986), S. 17-31.
14. ISO-Standard 10303. International Standards Organisation, Ausgabe (1993).
15. Klement, K.: Präsentation mit STEP. Springer-Verlag (1992).
16. Leal, D.: STEP FEA Project Meeting Report 3-7 February (1992). Published by NAFEMS Ref.:R0007. Glasgow (1992).
17. Leuridan, J.; Bey, I.: ESPRIT Project 322: CAD\*I CAD Interfaces Status Report 3. Kernforschungszentrum Karlsruhe. März (1987).
18. Ludwig, A.: ProSTEP Integrated Model Schema Version 1.0. Paper. Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH. 4.12.1992.
19. Machner, B.; Trippner, D.: ProSTEP - der Schritt zur Datenintegration. In CAD-CAM-Report Nr. 5, (1993), 124-131.
20. Purgathofer, W.; Schönhut, J. (ed.): Advances in Computer Graphics V. Springer-Verlag (1989).
21. Schlechtendahl; E. G.: Specification of a CAD\*I Neutral File for Solids Version 2.1. Springer-Verlag (1986).
22. Shah, J.J.; Mathew, A.: Experimental Investigation of the STEP Form-Feature Information Model. Computer Aided Design, Vol. 23, No. 4, (1991).
23. Stein, F.; Ohnimus, S.: Dimensions-Adaptivität bei Finite-Element-Berechnungen von Stäben und Platten. ZAMM 73, Nr. 6, (1993).
24. Teichmann, D.: Koppelung von Konstruktions- und Berechnungsprogramm (CAD-FEM). VDI-Bericht 610.5 "Datenverarbeitung in der Konstruktion". VDI-Verlag Düsseldorf, (1986) 59-74.
25. Trautheim, A.: Untersuchungen zur Schnittstellenproblematik im CAD-Bereich. In: Wissenschaftliche Zeitschrift der TU Dresden, 40, 2, (1991), 211-216.
26. Vergeest, J. S. M.: CAD Surface Data Exchange using STEP. In: Computer Aided Design, Vol. 23, No. 4, (1991).

---

*Anschrift:* Professor Dr.-Ing. habil. Ulrich Gabbert, Dipl.-Ing. Uwe Lauschke und Dr.-Ing. habil. Manfred Zehn, Institut für Mechanik, Otto-von-Guericke-Universität, Postfach 4120, 39016 Magdeburg