

Beanspruchungsgerechtes Konstruieren

Kopplung von CAD und FEM

C. Bies, B. Mitschang und P. Mitschang*

Fachbereich Informatik, Universität Kaiserslautern, Postfach 3049, D-67653 Kaiserslautern

Eingegangen am 20. Oktober 1993/Angenommen am 6. Mai 1994

Zusammenfassung. Die Kopplung der Bereiche CAD und FEM ist ein wesentlicher Schritt hin zu dem übergeordneten Ziel des fertigungsgerechten und *beanspruchungsgerechten Konstruierens*. Neue Bauteile werden mit CAD-Systemen entworfen und deren mechanische Eigenschaften anschließend mittels FEM-Systemen analysiert. Da diese Systeme auf ähnlichen Bauteilgeometrien aufbauen, ist es naheliegend, die im CAD-System vorliegende Geometriebeschreibung für die FEM-Analyse zu übernehmen. Ein direkter Austausch der Geometriedaten scheitert jedoch, da sich die jeweiligen Geometriemodelle stark unterscheiden. Aus diesem Grunde findet herkömmlicherweise kein rechnergestützter Datenaustausch statt. In dieser Arbeit berichten wir über die Konzepte, die Realisierung sowie über erste praktische Einsatzerfahrungen und Systembewertung zu einem Geometrie-Transformator (entwickelt für die Systeme EUCLID und ANSYS), der eine (weitestgehend) automatische Umsetzung der Geometriedarstellungen durchführt und somit einen *durchgängigen rechnerunterstützten Prozeß* für die Konversion vom CAD- zum FEM-Modell ermöglicht.

Schlüsselwörter: CAD, FEM-Analyse, beanspruchungsgerechtes Konstruieren, Austausch von Geometriedaten

Abstract. The coupling of the two areas of computer-aided design (CAD) and finite-element analyses (FEM) marks an important step towards the overall goal of manufacturing and stress-optimized design. New parts are developed with the help of CAD systems and their mechanical and stress characteristics are analysed by means of FEM systems. Since both system types rely on similar geometry it is straightforward to use the CAD geometry also for FEM purposes. A direct exchange of the geometry data will fail because the two geometries are quite different. In this article we report

on the concepts, the realization as well as on first practical experiences and system assessment to a so-called geometry-transformer (designed for the EUCLID system and the ANSYS system), which employs an automatic geometry transformation, thus realizing a computer-supported conversion from CAD to FEM geometry.

Key words: Computer-aided design, finite-element analyses, stress-optimized (mechanical) design, exchange of geometry data

CR Subject Classification: J.6, H.4. m

1 Einleitung

Neben das Entwicklungsziel, *funktionsoptimale* Produkte zu gestalten, tritt in immer stärkerem Maße der Zwang, *kostenoptimale* Produkte zu schaffen. Dies kann nur durch eine Bauteiloptimierung sowohl in konstruktiver als auch in fertigungstechnischer Sicht gelingen.

Die Kosten, die ein Produkt in einem Unternehmen erzeugt, werden zum größten Teil schon während dessen Konzeptionsphase festgelegt. Zum Beispiel werden häufig durch Sicherheitszuschläge aus Belastungen überzogene Abmessungen, Toleranzen und teure Materialien abgeleitet, die wiederum bestimmte, z. T. kostenintensivere Fertigungsverfahren vorschreiben. Will man hier etwas ändern, so muß man schon zu einem sehr frühen Zeitpunkt alle am Herstellungsprozeß beteiligten Fachgebiete in die Produktentwicklung mit integrieren. Dies sind im wesentlichen die Arbeitsvorbereitung oder Arbeitsplanung auf fertigungstechnischer Seite und die technische Berechnung auf der Auslegungsseite. Grundlage für beide Arbeitsfelder ist (immer noch) die ‚technische Zeichnung‘, also die Bauteilgeometrie.

Schon in der Konzeptionsphase muß ein Datenaustausch zwischen den genannten Fachabteilungen mög-

* G.M. Pfaff AG, Abt. HTE, Königstraße 154, D-67653 Kaiserslautern

lich sein. Dabei wäre es wünschenswert, wenn alle Beteiligten ständig mit dem gleichen Grunddatenmodell und, wenn möglich, auch auf dem gleichen Datenbestand arbeiten würden. Durch die Heterogenität der beteiligten Systeme bedingt, kann der Datenaustausch allerdings nur in eine Richtung erfolgen. Im Mittelpunkt steht dabei das Modell des Konstrukteurs, welches er in seinem CAD-System entworfen hat. Diese Daten müssen über geeignete Schnittstellen zu den jeweiligen fachspezifischen Dienstprogrammen transferiert werden.

Im folgenden soll näher auf den Nutzen einer entsprechenden Schnittstelle zur technischen Berechnung eingegangen werden. Damit wird dann auch der weitere Fokus dieser Arbeit motiviert und entsprechend konkretisiert.

1.1 Allgemeine Problemstellung des beanspruchungsgerechten Konstruierens

Der Berechnungsingenieur benötigt für seine Arbeit nicht das fertige Bauteil mit allen Details, sondern nur die wesentlichen Abmessungen und die Belastungen nach Art, Größe und Ort. Diese Informationen kann der CAD-Konstrukteur schon im Konzept- bzw. Entwurfsstadium zur Verfügung stellen. Zum Teil bedingen sich diese Informationen auch gegenseitig, indem z. B. die Belastungen wiederum von der Masse und somit von den Abmessungen beteiligter Bauteile abhängen. Eine direkte, wenn möglich automatische und die wesentlichen Informationen umfassende Datenschnittstelle ermöglicht es dem Berechnungsingenieur, eine erste Auslegungsrechnung durchzuführen und die Bauteilabmessungen den Belastungen anzupassen. Dies kann auch in einem iterativen Prozeß geschehen, wenn die Belastungen wiederum von den Bauteilabmessungen selbst abhängen.

Wichtig bei dieser Vorgehensweise ist, daß die jeweiligen fachspezifischen Kenntnisse der Beteiligten (CAD-Konstrukteur und Berechnungsingenieur) und die jeweiligen Stärken der eingesetzten Programmsysteme (CAD-System und FEM-Programmsystem) optimal ausgenutzt werden. Dabei sind folgende Aspekte zu beachten:

(1) Der Konstrukteur hat primär die Funktionalität im Auge und mit dem CAD-System ein Werkzeug zur Verfügung, das ihn in seiner gestalterischen Arbeit, d. h. beim Erzeugen (der Geometrien) von Objekten und Baugruppen, optimal unterstützt.

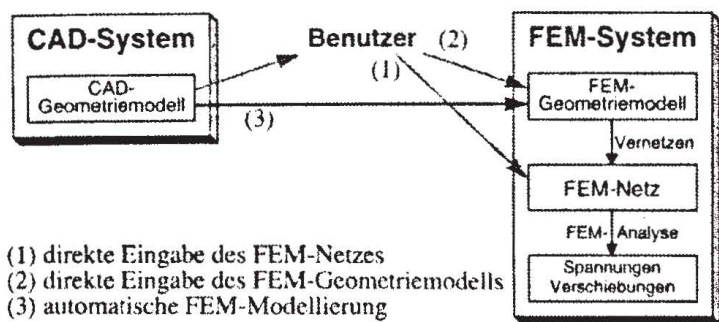
(2) Dem CAD-Programm auch noch Teile eines Berechnungsprogramms, wie z. B. die Vernetzung mit Finiten Elementen (FE) aufzubürden, kann nicht der richtige Weg sein, da es auf der Berechnungsseite Programmsysteme gibt, die gerade diesbezüglich ihre Stärken besitzen. Hinzu kommt, daß beim Vernetzen eines Objekts berechnungsspezifisches Know-how erforderlich ist und dieser Prozeß unbedingt von einem mit den Stärken des Berechnungsprogramms vertrauten Ingenieur durchgeführt werden sollte. Ein CAD-System mit inte-

griertem FE-Netzgenerator kann nur als ‚Black-box‘ funktionieren, da ein Konstrukteur in der Regel keine FE-spezifischen Kenntnisse besitzt. Diese Black-box arbeitet dann nach den einfachsten Regeln, und die Vielzahl der auf eine spezielle Situation zugeschnittenen Berechnungsmaßnahmen, die eigentlich berücksichtigt werden sollten, das System aber in hohem Maße unhandhabbarer machen, können vom Konstrukteur (als ungeübten Berechnungsingenieur) nicht angewandt werden. Übrig bleibt also eine stupide, in keinem Fall auf das vorhandene Bauteil ausgerichtete Vernetzungsregel. Die Folge sind sehr große FE-Modelle mit enormem Rechenzeit- und Plattenbedarf und einer scheinbar höheren Genauigkeit, die durch eine überzogene Netzverfeinerung suggeriert wird.

(3) Zu diesem Zeitpunkt wird ein weiteres Problem deutlich, nämlich die Vielzahl der Programmsysteme und das Fehlen einer einheitlichen Datenstruktur dieser FE-Programme. Um das generierte FE-Netz zu einem externen FEM-Lösungsalgorithmus (auch Solver genannt) zu übertragen, muß eine genau angepaßte Schnittstelle vorhanden sein. Will man mehrere Programme bedienen, so ist dieser Aufwand entsprechend oft zu leisten.

(4) Demgegenüber besitzt ein FE-Berechnungsprogramm im allgemeinen einen weniger ausgeprägten Geometrieteil, so daß das Erstellen von etwas komplizierteren Geometrien oftmals mit einem erheblichen Aufwand verbunden ist. Hier sollte die Funktionalität der CAD-Systeme vorab zum Einsatz kommen und schon „fertige“ Geometrien zur Verfügung stellen, die es dann nur noch zu vernetzen und zu berechnen gilt.

Faßt man dies alles zusammen, so erkennt man, daß ein von einem Konstrukteur entwickeltes CAD-Modell von diesem, zusammen mit dem Berechnungsingenieur, in ein FE-taugliches Geometriemodell zu abstrahieren und mit einer reinen Geometrieschnittstelle in das Berechnungsprogramm zu transferieren ist. Im Berechnungsprogramm kann dann unter Ausnutzung aller programmspezifischen Stärken ein Berechnungsmodell (FE-Netz) erstellt und eine Bauteiloptimierung durchgeführt werden. Die Ergebnisse aus einem so überarbeiteten Entwurf können von dem Konstrukteur sehr schnell und in einfacher Weise in das CAD-Modell rückübertragen werden, da dieses noch nicht zu stark detailliert ist. Zugleich zu dem beschriebenen Prozeß kann eine ähnliche Abstimmung mit der Fertigungsseite erfolgen, die zunächst das gleiche Geometriemodell benutzen sollte. Der Konstrukteur hat letztendlich die Aufgabe, z. T. gegenläufige Forderungen (Bauteiloptimierung durch FEM-Analyse sowie Arbeitsplanoptimierung bzw. fertigungstechnische Optimierung) gegeneinander abzuwägen und alle Informationen aus den Fachabteilungen in das CAD-Modell zu integrieren, um somit zu einer fertigungs- und beanspruchungsgerechten Modellierung zu gelangen. Durch die beschriebene Vorgehensweise lassen sich die Entwicklungszeiten und die Kosten gegenüber einer seriellen Arbeitsweise erheblich reduzieren.



- (1) direkte Eingabe des FEM-Netzes
 (2) direkte Eingabe des FEM-Geometriemodells
 (3) automatische FEM-Modellierung

Abb. 1. CAD/FEM-Kopplungsalternativen

1.2 Vorgehensweise zum beanspruchungsgerechten Konstruieren

Die prinzipielle Vorgehensweise des beanspruchungsgerechten Konstruierens ist die direkte Kopplung der Bereiche CAD und FEM über die Bauteilgeometrien. Da sowohl CAD-Systeme als auch FEM-Systeme auf im Prinzip ähnlichen Geometriemodellen aufbauen, ist es naheliegend, die im CAD-System vorliegende Geometriebeschreibung für die FEM-Analyse zu übernehmen. Ein direkter Austausch der Geometriedaten scheitert jedoch, da sich die jeweiligen Geometriemodelle im Detail unterscheiden.

Aus diesem Grunde findet herkömmlicherweise kein rechnergestützter Datenaustausch statt. Es ist die Aufgabe des Berechnungsingenieurs, die Geometrien (von Hand) umzusetzen. Dabei ist zu beachten, daß die FEM-Analyse andere Anforderungen an das Geometriemodell stellt als die CAD-Konstruktion. Im CAD-System liegt i. a. eine detaillierte und realitätsgetreue Darstellung des Bauteils vor. Im Gegensatz dazu muß der Berechnungsingenieur das CAD-Modell neu *strukturieren* und *abstrahieren* (vereinfachen), um eine FEM-Berechnung zu ermöglichen. Dabei bedeutet Strukturierung, das Modell in mehrere, einfachere und zusammenhängende Teilvolumen (Netzgebiete) zu zerlegen. Vereinfachung heißt, unwichtige Details wegzulassen und evtl. vorhandene Symmetrien auszunutzen. Zusätzlich ist es für die FEM-Analyse oft sinnvoll, von einer 3D-Darstellung auf eine 2D- oder gar 1D-Darstellung zu vereinfachen.

Es ist offensichtlich, daß diese erneute Eingabe der Bauteilgeometrie für die FEM-Analyse mühsam und fehleranfällig ist. Daher schlagen wir eine (weitestgehend) automatische Umsetzung der Geometriedarstellungen vor und ermöglichen damit einen *durchgängigen rechnerunterstützten Prozeß* für die Konversion vom CAD- zum FEM-Modell.

Unser Geometrie-Transformator (im folgenden als TEA bezeichnet) läßt sich durch folgende Eigenschaften charakterisieren. Das zugrundeliegende CAD-System (EUCLID) wurde um den Transformator TEA erweitert. Dieser erzeugt, mit interaktiver Unterstützung des bearbeitenden Ingenieurs, eine für das FEM-System (hier ANSYS) effizient weiterzuverarbeitende FEM-Geometrie. Im FEM-System entsteht dann durch anschließendes automatisches Vernetzen das gewünschte FEM-Netz, mit dem schließlich die FEM-Analyse

durchgeführt werden kann. Durch diese Teilung der Verantwortlichkeiten kann erreicht werden, daß die Stärken der eingesetzten Programmsysteme optimal ausgenutzt werden.

1.3 Struktur des Artikels

Nach einer kurzen Diskussion verschiedener Möglichkeiten zur Kopplung von CAD- und FEM-Systemen (in Kapitel 2), werden dann (in Kapitel 3) verschiedene Realisierungsansätze für die in Frage kommende Kopplungsalternative vorgestellt und bewertet. In Kapitel 4 beschreiben wir den Geometrie-Transformator TEA, der eine (weitestgehend) automatische Umsetzung der Geometriedarstellungen durchführt und somit einen *durchgängigen rechnerunterstützten Prozeß* für die Konversion vom CAD- zum FEM-Modell ermöglicht. Am Beispiel der Systeme EUCLID und ANSYS wird die Realisierung des Geometrie-Transformators TEA detailliert aufgezeigt. Verschiedene Vorgehensweisen zur Integration des beanspruchungsgerechten Konstruierens in den Konstruktionsprozeß werden dann in Kapitel 5 betrachtet, bevor dann in Kapitel 6 anhand von anschaulichen Beispielen über erste praktische Einsatzerfahrungen und Systembewertung unseres Geometrie-Transformators berichtet wird. In Kapitel 7 werden die wesentlichen Resultate dieser Arbeit nochmals zusammengefaßt und ein Ausblick auf weitere Arbeiten gegeben.

Dies alles sind die Ergebnisse eines Projekts im Fachbereich Informatik, das in Zusammenarbeit mit der G.M. Pfaff AG und der Arbeitsgruppe Maschinendynamik des Fachbereichs Maschinenwesen durchgeführt wurde.

2 Kopplung von CAD und FEM

Im folgenden werden verschiedene Möglichkeiten zur Kopplung von CAD- und FEM-Systemen vorgestellt und deren Eigenschaften kurz diskutiert. Abb. 1 gibt dazu eine graphische Darstellung. Als Ausgangspunkt für unsere Betrachtungen dient folgende und in Kapitel 1 schon motivierte Situationsbeschreibung: Bauteile werden mit einem CAD-System neu entworfen bzw. verbessert oder verfeinert und deren mechanische Eigenschaften anschließend mittels eines FEM-Systems analysiert.

Das konzeptionell einfachste Kopplungskonzept beruht nicht auf einem rechnergestützten Datenaustausch, sondern auf der Interaktion mit dem Berechnungsingenieur. Hierbei ist es dessen Aufgabe, die Bauteilgeometrie des CAD-Systems von Hand in eine FEM-Beschreibung umzusetzen. Dazu kann nun einmal das für die FEM-Analyse benötigte FEM-Netz direkt eingegeben werden, indem die Knoten und Elemente explizit definiert werden (Alternative (1) in Abb. 1).

Für komplexe Modelle ist dieses Verfahren allerdings zu umständlich und auch viel zu fehleranfällig. Daher bieten die meisten FEM-Systeme die Möglich-

keit, zunächst die Geometrie des Bauteils direkt (von Hand) einzugeben, die Vernetzung erfolgt dann jedoch automatisch durch das FEM-System (Alternative (2) in Abb. 1).

Es ist offensichtlich, daß die erneute Eingabe der Bauteilgeometrie und insbesondere des FEM-Netzes mühsam und fehleranfällig ist. Dennoch werden die CAD- und FEM-Systeme in der Praxis meist unabhängig voneinander betrieben mit dem Berechnungsingenieur als ‚Kopplungsinstanz‘. Die Gründe hierfür lassen sich im wesentlichen zurückführen auf die unterschiedlichen Eigenschaften der beteiligten Systeme. Im einzelnen ist hierbei zu nennen:

- FEM-Systeme verwenden in der Regel ein anderes Geometriemodell als CAD-Systeme, so daß ein mehr oder weniger hoher Aufwand zur Umformung (Konvertierung) der Geometriedaten entsteht.
- Eine FEM-Analyse stellt andere Anforderungen an das Geometriemodell als eine CAD-Konstruktion. Im CAD-System liegt i. a. eine detaillierte und realitätsgetreue Darstellung des Bauteils vor. Für die FEM-Berechnung wird jedoch ein einfacheres, abstrakteres Modell benötigt.

Da sowohl CAD- als auch FEM-Programme auf ähnlichen Bauteilgeometrien aufbauen, ist es naheliegend, die im CAD-System vorliegende Geometriebeschreibung für die FEM-Analyse zu übernehmen. Daher beruht die dritte Kopplungsalternative (Alternative (3) in Abb. 1) auf einer (weitestgehend) automatischen Umsetzung der Geometriedarstellungen. Damit wird die Kopplungsinstanz Berechnungsingenieur durch ein Programmsystem ersetzt und somit ein *durchgängiger rechnerunterstützter Prozeß* für die Konversion vom CAD-zum FEM-Modell ermöglicht. In diesem Programmsystem wird das CAD-Modell ‚FEM-gerecht‘ aufbereitet, d. h., die Form des Bauteils wird mit Hilfe einiger geometrischer Operationen *abstrahiert* (vereinfacht) und *strukturiert*. Diese sog. **FEM-Modellierung** umfaßt folgende grundlegende Schritte:

- **Detailvernachlässigung**
Einzelheiten der Geometrie, die (fast) keinen Einfluß auf die FEM-Analyse haben, läßt man einfach weg, um Rechenzeit zu sparen. Beispielsweise können Nuten oder Bohrlöcher i. a. vernachlässigt werden, wenn diese klein gegenüber den Hauptabmessungen sind. Bei Flächen oder Volumina kann man gelegentlich den Verlauf von Begrenzungslinien bzw. -flächen vereinfachen, indem Details aus dem Rand gelöscht werden.
- **Symmetrie**
Bei symmetrischen Modellen mit symmetrischen Belastungen und Randbedingungen braucht nur ein Teil des Modells berechnet zu werden.
- **Dimensionierung**
Während Bauteile, deren Dicke gering im Verhältnis zu ihrer Ausdehnung ist, in CAD-Systemen oft in Volumenmodellen beschrieben werden, ist bei der FEM-Berechnung eine Approximation durch Schalenelemente, d. h. eine flächige Beschreibung, sinnvoller. Hierfür

müssen die betreffenden Teile des Modells durch Flächen ersetzt werden.

- **Strukturierung**

Um ein gutes FEM-Netz zu erhalten, muß das Modell strukturiert (oder diskretisiert) werden, das heißt, komplexe Flächen und Volumina werden in mehrere zusammenhängende **Netzgebiete** zerlegt. Netzgebiete sind Flächen (vorzugsweise mit drei oder vier Kanten) oder Volumina (mit vier, fünf oder sechs Flächen). Die Netzgebiete werden vom FEM-Netzgenerator mit finiten Elementen ausgefüllt (vernetzt).

Durch diese FEM-Modellierung läßt sich ein gegenüber den zuvor beschriebenen Alternativen anspruchsvolleres, aber auch deutlich leistungsfähigeres Kopplungskonzept bereitstellen. Die dabei möglichen verschiedenen Realisierungsalternativen werden in den nachfolgenden Kapiteln vorgestellt und bewertet.

3 Realisierungsansätze für die Komponente zur FEM-Modellierung

Im Prinzip gibt es die folgenden drei verschiedenen Ansätze für die Realisierung der Programmkomponente zur FEM-Modellierung:

- FEM-Modellierung als eigenständige Komponente,
- FEM-Modellierung als Erweiterung des CAD-Systems bzw.
- FEM-Modellierung als Erweiterung des FEM-Systems.

Zusätzlich besteht bei allen drei Alternativen die Möglichkeit, die Vernetzung des FEM-Geometriemodells in der FEM-Modellierung oder im eigentlichen FEM-System durchzuführen. Im folgenden diskutieren wir die Vor- und Nachteile der verschiedenen Realisierungsansätze anhand vier konkreter Systembeispiele.

3.1 Erzeugung des FEM-Netzes im CAD-System

Bei diesem Lösungsansatz wird die Komponente zur FEM-Modellierung in das CAD-System integriert. Diese Komponente übernimmt dann sowohl die FEM-Modellierung als auch das Vernetzen der Geometrie. Das dabei erzeugte FEM-Netz kann anschließend an das FEM-System übergeben werden, wo die FEM-Analyse stattfindet (Abb. 2).

FEM-Modellierungen, die nach diesem Prinzip arbeiten, sind für zahlreiche CAD-Systeme kommerziell erhältlich [5]. Allerdings beschränken sich die meisten darauf, die CAD-Geometrie *unverändert* in den FEM-Netzgenerator zu übernehmen und – soweit möglich – zu vernetzen. Die so erzeugten Netze bestehen in der Regel aus vielen kleinen Tetraedern und eignen sich oft nicht für eine FEM-Analyse. Spezifische Elemente des FEM-Systems sind nicht vorhanden, da das modellierte FEM-Netz auf möglichst viele FEM-Systeme passen soll. Eine Nachbearbeitung des Netzes im FEM-System

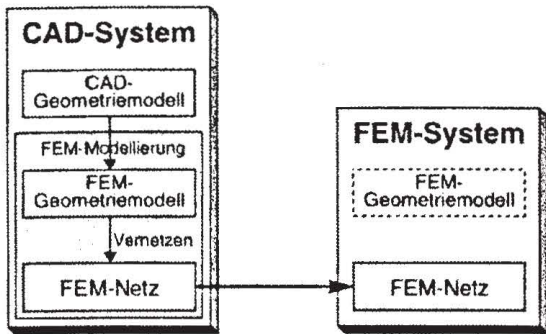


Abb. 2. Erzeugung des FEM-Netzes im CAD-System

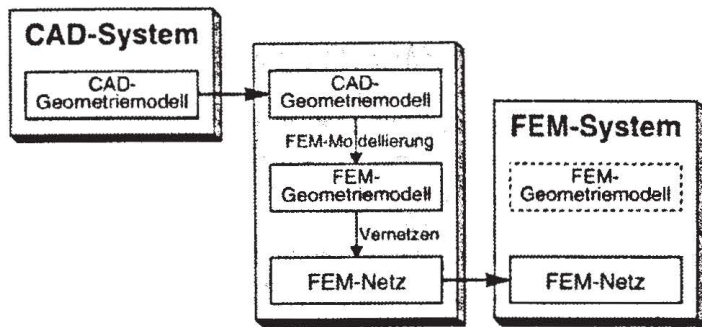


Abb. 3. Eigenständige Komponente zur FEM-Modellierung

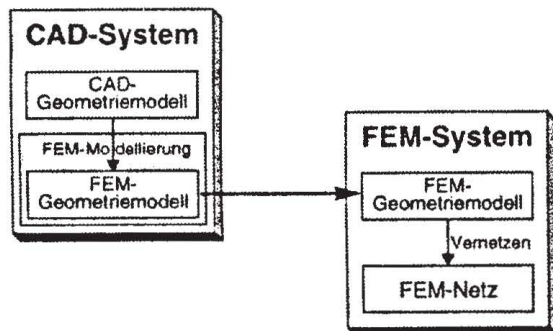


Abb. 4. FEM-Modellierung im CAD-System

ist daher angezeigt. Diese ist jedoch viel zu aufwendig und auch recht fehleranfällig, da wiederum von Hand korrigiert werden muß. Möchte man das FEM-Netz ändern, z. B. an kritischen Stellen verfeinern, so muß man stets in das CAD-System zurückgehen. Ein weiteres Problem ergibt sich daraus, daß der FEM-Lösungsalgorithmus, mit dem die FEM-Analyse durchgeführt werden soll, bestimmte Anforderungen an das FEM-Netz stellt (z. B. Elemente dürfen keine zu spitzen Winkel haben). Diese systemabhängigen Einschränkungen können natürlich auf Seiten des CAD-Systems nur schwer überprüft werden.

Der Vorteil dieses Konzeptes ist die einfache Realisierung. Erstens können durch die Einbindung der FEM-Modellierung in das CAD-System die Funktionen des CAD-Systems (z. B. interaktive Eingaben für die Aufbereitung des Modells) ausgenutzt werden. Zudem kann direkt auf die Datenstrukturen zugegriffen werden, d. h. eine Konvertierung der Geometriedaten ist nicht erforderlich. Zweitens bereitet die Übertragung des erzeugten FEM-Netzes keine Schwierigkeiten, da die erzeugte Datenstruktur sehr einfach aufge-

baut ist (im Prinzip nur Knoten und Elemente) und ohne aufwendige Konvertierung in jedes FEM-System eingegeben werden kann.

3.2 FEM-Modellierung als eigenständige Komponente

Die zweite Alternative besteht darin, die Komponente zur FEM-Modellierung als unabhängiges Programm zu implementieren. Die CAD-Geometriedaten werden über einen Konverter in die Komponente eingegeben. Dort erfolgt die interaktive Bearbeitung des CAD-Modells und die automatische Vernetzung nach vorgegebenen Parametern. Das erzeugte FEM-Netz wird ähnlich wie bei der ersten Lösung an das FEM-System übertragen, wo schließlich die eigentliche FEM-Analyse stattfindet (Abb. 3).

Ein solcher Realisierungsansatz wurde von M. Weck und A. Heckmann aus Aachen gewählt [13]. Als CAD-Geometriemodell in der Komponente FEM-Modellierung wird dort ein Facettenmodell verwendet. Um ein CAD-System an die FEM-Modellierung anzuschließen, muß dann lediglich ein Konverter implementiert werden, der die Geometriedaten des CAD-Systems in die Facettenrepräsentation der Komponente FEM-Modellierung umwandelt. Somit lassen sich auch relativ leicht andere CAD-Systeme an diese FEM-Modellierung anpassen. Die Operationen für die FEM-Modellierung und die Vernetzung sind recht leistungsfähig, so daß gute FEM-Netze generiert werden.

Nachteilig bei dieser Lösung ist der hohe Realisierungsaufwand, da keine Fähigkeiten des CAD- bzw. des FEM-Systems ausgenutzt werden. Deshalb müssen die Funktionen für die Verwaltung der geometrischen Daten, die interaktive Ein-/Ausgabeschnittstelle und der Netzgenerator neu programmiert werden. Da die Vernetzung auch hier nicht im FEM-System stattfindet, ergeben sich ähnliche Probleme wie beim ersten Lösungsansatz: Der Benutzer muß sich umgewöhnen, er kann nicht mehr die speziellen Fähigkeiten „seines“ FEM-Programms (z. B. besondere Elementtypen) nutzen. Änderungen des FEM-Netzes müssen außerhalb des FEM-Systems durchgeführt werden.

3.3 FEM-Modellierung als Postprozessor im CAD-System

Der von uns gewählte Lösungsansatz vermeidet die oben genannten Nachteile und ermöglicht eine leistungsfähige Konvertierung des CAD-Modells bei minimalem Aufwand. Die Komponente zur FEM-Modellierung ist in das CAD-System eingebunden. Dort wird das CAD-Modell vereinfacht und abstrahiert, wobei nach Möglichkeit bereits vorhandene Funktionen des CAD-Systems genutzt werden (Verwaltung der Datenstrukturen, Benutzer-Ein-/Ausgabe). Das so FEM-gerecht aufbereitete Geometriemodell wird anschließend in das Format des FEM-Systems konvertiert. Die Vernetzung erfolgt wie gewohnt automatisch durch den Netzgenerator des FEM-Systems (Abb. 4).

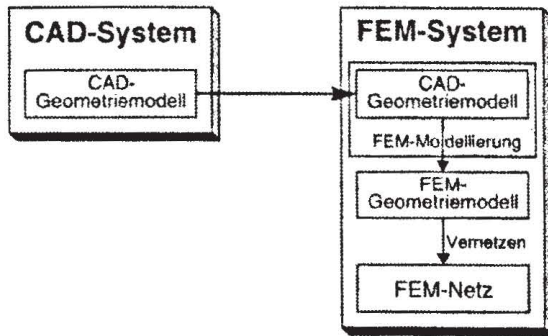


Abb. 5. FEM-Modellierung als Präprozessor im FEM-System

Durch die enge Anbindung der Komponente FEM-Modellierung an das CAD-System können auf der einen Seite sehr viele komplexe CAD-Funktionen wiederverwendet werden, was sich sehr positiv auf die Realisierungszeit und die Realisierungskosten auswirkt. Dadurch, daß die Netzgenerierungsfunktionen des FEM-Systems eingesetzt werden und im Gegensatz zu den vorgenannten Ansätzen keine Eigenrealisierungen verwendet werden, können hier die mächtigen und speziellen Fähigkeiten zur Netzgenerierung eines ausgereiften FEM-Systems in Anspruch genommen werden. Andererseits ist die Anpassung an dritte CAD-Systeme nicht so einfach wie es beispielsweise beim zweiten Lösungsansatz ist. Außerdem setzt dieses Konzept ein CAD-System, wie zum Beispiel das EUCLID-System, voraus, dessen Datenstrukturen und Operationen frei programmierbar sind. Eine detailliertere Diskussion dieses Realisierungsansatzes ist das Thema der nachfolgenden Kapitel.

3.4 FEM-Modellierung als Präprozessor im FEM-System

Dieser Lösungsvorschlag (Abb. 5) komplettiert die möglichen Realisierungsansätze für die Komponente zur FEM-Modellierung. Das FEM-System ist hier um einen Präprozessor erweitert, der (über einen Konverter) die CAD-Geometriedaten einliest und sie für das FEM-System aufbereitet.

Uns ist kein am Markt verfügbares System bekannt, das nach diesem Prinzip arbeitet. Eine Realisierung wäre ohnehin nur interessant, falls das FEM-System eine komfortable Entwicklungsumgebung für die FEM-Modellierung bereitstellt (z. B. interaktive Benutzerschnittstelle, einfacher Zugriff auf die Datenstrukturen, Boolesche Operationen). Da dies bei ANSYS, wie auch bei vielen anderen FEM-Systemen, nicht der Fall ist, haben wir diesen Ansatz nicht näher betrachtet. Dieser Systemansatz ist komplementär zum dritten Lösungsvorschlag, der einen Postprozessoransatz im CAD-System beschreibt. Allerdings scheinen die Realisierungskosten der Präprozessor-Lösung deutlich höher zu liegen als die der Postprozessor-Lösung.

4 Der Geometrie-Transformator TEA

Nachdem die verschiedenen Realisierungsansätze für eine Komponente zur FEM-Modellierung vorgestellt und bewertet wurden, soll hier nun der von uns favorisierte Lösungsvorschlag näher betrachtet werden.

Unsere Komponente zur FEM-Modellierung stellt einen Geometrie-Transformator (im folgenden als TEA¹ bezeichnet) dar, der als CAD-Postprozessor (Abschn. 3.3) realisiert wurde. Er läßt sich durch folgende Eigenschaften charakterisieren. Das zugrundeliegende CAD-System (EUCLID [6, 7]) wurde um den Transformator TEA erweitert. Dieser erzeugt, mit interaktiver Unterstützung des bearbeitenden Ingenieurs, eine für das FEM-System (hier ANSYS [2, 3, 4]) effizient weiterzuverarbeitende FEM-Geometrie. Im FEM-System entsteht dann durch anschließendes automatisches Vernetzen das gewünschte FEM-Netz, mit dem schließlich die FEM-Analyse durchgeführt werden kann.

Bevor nun die einzelnen Schritte der Konversion vom CAD- zum FEM-Modell beschrieben werden, sollen noch kurz die für die nachfolgenden Diskussionen wichtigen Datenstrukturen und die Ein-/Ausgabeschnittstellen der beiden zugrundeliegenden Systeme skizziert werden.

4.1 Das CAD-System EUCLID

EUCLID ist ein Volumenmodellierer mit einer hybriden Datenstruktur [11, 12]. Für das Geometriemodell eines jeden Entwurfsobjekts wird primär seine Entstehungsgeschichte als CSG-Baum gespeichert, hingegen wird zur graphischen Darstellung auf dem Bildschirm jeweils ein Begrenzungsflächenmodell (BRep-Modell) berechnet. Dabei werden gekrümmte Flächen (Patches) durch Facetten angenähert. Die Geometriedarstellung von EUCLID ist im linken Teil von Abb. 6 als vereinfachtes Informationsmodell graphisch wiedergegeben. Die CSG-Struktur besteht aus einfachen Grundkörpern (Quader, Prisma, Kugel, ...), die mit Hilfe von Booleschen Operationen (Vereinigung, Durchschnitt, Differenz) zu komplexen Körpern verknüpft werden. Eine Figur ist eine Menge von Körpern. Jeder Körper wird durch ein Facettenmodell repräsentiert, d. h. durch eine geschlossene Polyederfläche mit Materie. Eine Polyederfläche kann auch offen sein und/oder keine Materie besitzen. Selbst die Kombination offen/mit Materie ist möglich, sie repräsentiert in diesem Fall einen Halbraum (Teil des Raumes, der durch eine Fläche begrenzt wird). Eine Polyederfläche besteht aus einer Reihe von geschlossenen, flächigen Polygonzügen (Facetten). Für zwei benachbarte Facetten wird gespeichert, ob die über gemeinsame Punkte definierte gemeinsame ‚Kante‘ einen Winkel bildet, ob die beiden Facetten tangential ineinander übergehen oder ob sie innerhalb eines Patches liegen. Ein Polygonzug ist eine

¹ Das Acromym TEA steht für ‚Transformator EUCLID-ANSYS‘.

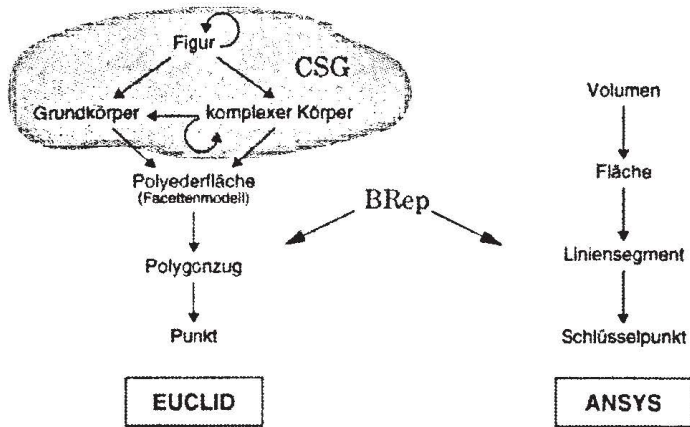


Abb. 6. Vereinfachte Informationsmodelle für EUCLID und ANSYS (nur Geometrie)

geordnete Menge von Punkten, die durch ihre Koordinaten im Raum repräsentiert werden.

EUCLID besitzt eine komfortable interaktive Benutzerschnittstelle mit Bedienung über Maus und umfangreiche Menüs. Wichtig für die TEA-Realisierung ist insbesondere die Möglichkeit, benutzereigene FORTRAN-Programme in das System einzubinden, die sämtliche Funktionen von EUCLID als FORTRAN-Unterprogramme verwenden können.

4.2 Das FEM-System ANSYS

Das vereinfachte Informationsmodell der Geometriedarstellung in ANSYS ist im rechten Teil von Abb. 6 dargestellt. Im Gegensatz zu EUCLID wird in ANSYS eine reine BRep-Datenstruktur verwendet, die auf einer flexiblen B-Spline-Darstellung aufgebaut ist. Ein Volumen wird durch mehrere B-Spline-Flächen begrenzt. Eine Fläche wird von mehreren Liniensegmenten (B-Splines) umrandet. Ein Liniensegment hat zwei Schlüsselpunkte als Anfangs- bzw. Endpunkt. Für jeden Schlüsselpunkt werden die Koordinaten gespeichert.

Ein Volumen kann nur mit 3D-Volumenelementen, eine Fläche mit flächigen Elementen (z. B. mit Schalenelementen), ein Liniensegment mit linearen Elementen (z. B. mit Stäben oder Balkenelementen) vernetzt werden. Um eine gute Vernetzbarkeit zu erreichen, besteht ein FEM-Geometriemodell üblicherweise aus einer größeren Anzahl von Volumina, Flächen und/oder Liniensegmenten, die über gemeinsame Flächen, Liniensegmente bzw. Schlüsselpunkte miteinander verbunden sind.

Die Eingabe eines Geometriemodells in ANSYS erfolgt über Benutzerkommandos, die entweder eingetippt oder über ein Menü gewählt werden. Zunächst werden die Schlüsselpunkte mit ihren Koordinaten definiert. Darauf aufbauend werden anschließend Liniensegmente, Flächen und Volumina generiert. In der neuen ANSYS-Version 5.0 können Geometriemodelle auch mit Hilfe von Grundkörpern und Booleschen Operatoren definiert werden (ähnlich wie in EUCLID). Allerdings wird in ANSYS die Entstehungsgeschichte (CSG-Modell) nicht gespeichert.

4.3 Schritte der FEM-Modellierung

Im folgenden betrachten wir, wie eine Geometriedarstellung im CAD-Modell von EUCLID in ein FEM-Netz für ANSYS umgewandelt wird. Dabei werden die Geometriedaten zwischen den verschiedenen Darstellungsschemata transformiert. Die einzelnen Schritte dieser Konversion vom CAD- zum FEM-Modell sind in Abb. 7 veranschaulicht und werden im folgenden näher erläutert.

Das vom Benutzer eingegebene CAD-Modell liegt als Volumenmodell in facettierter Darstellung vor. Zunächst wird das Modell vereinfacht (abstrahiert) und in Netzgebiete zerlegt (strukturiert) (Schritt (1) und (2) in Abb. 7). Diese Operationen erfolgen interaktiv und in beliebiger Reihenfolge.

Bei der Operation ZERLEGEN werden die gewählten Objekte (Körper und/oder Flächen) entlang einer Ebene in jeweils zwei Teilobjekte geschnitten. Diese Operation ist mit Hilfe der angebotenen EUCLID-Routinen sehr einfach zu implementieren. ABSTRAHIEREN ersetzt einen Körper durch eine Fläche (Abb. 8). Zur Zeit ist der TEA noch nicht in der Lage, die Ausdehnung der Flächen zu korrigieren, um den Anschluß an die übrigen Objekte herzustellen. Diese Korrektur kann jedoch notfalls von Hand in EUCLID nachgeholt werden.

Die bei der FEM-Modellierung entstehenden Netzgebiete werden in der EUCLID-Datenstruktur gespeichert. Dreidimensionale Netzgebiete werden durch normale EUCLID-Körper im Facettenmodell (geschlossene Polyederfläche) dargestellt. Offene Polyederflächen repräsentieren die beim Abstrahieren erzeugten Flächen. Die erzeugten Netzgebiete sind i. a. nicht über gemeinsame Punkte, Linien oder Flächen miteinander verbunden, da EUCLID diese Darstellung nicht unterstützt.

Wenn der Benutzer die gewünschten Netzgebiete erzeugt hat, kann er mit der Operation TRANSFORM die Geometriedaten in das Format von ANSYS umwandeln (Schritt (3) in Abb. 7). Der Transformator extrahiert aus allen Polyederflächen (egal, ob offen oder geschlossen) die einzelnen Patches und wandelt sie in Spline-Flächen um. Dabei werden alle erforderlichen Schlüsselpunkte und Liniensegmente erzeugt. Bei dreidimensionalen Netzgebieten wird in ANSYS ein entsprechendes Volumen generiert. Bei sich berührenden Körpern und Flächen werden die gemeinsamen Punkte, Linien und Flächen identifiziert und nur einmal definiert. Abb. 9 zeigt die Transformation der zuvor in Abb. 8 abstrahierten Polyederfläche an einem Beispiel. Die Konvertierung der drei ebenen Patches ist einfach. Dagegen muß der gekrümmte Patch, der hier durch drei Facetten angenähert wird, durch eine Fläche mit gekrümmten Begrenzungslinien dargestellt werden.

Da im Moment keine geeignete neutrale Schnittstelle vorhanden ist², gibt der TEA das konvertierte Geometriemodell in Form von ANSYS-Kommandos in eine Datei aus (Schritt (4) in Abb. 7). Beim Start von

² Hier böte sich eine Verwendung von normierten Übergabeformaten wie z. B. STEP/EXPRESS [1, 9, 8] an.

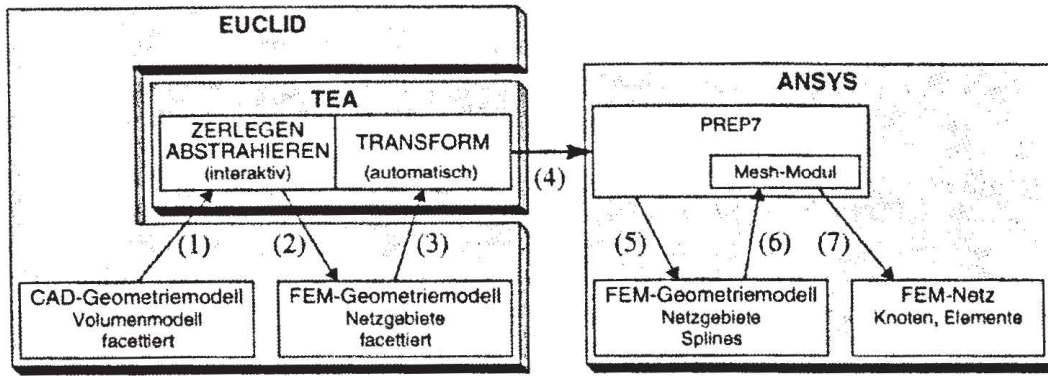


Abb. 7. Schematischer Ablauf der Konvertierung der Geometriedaten

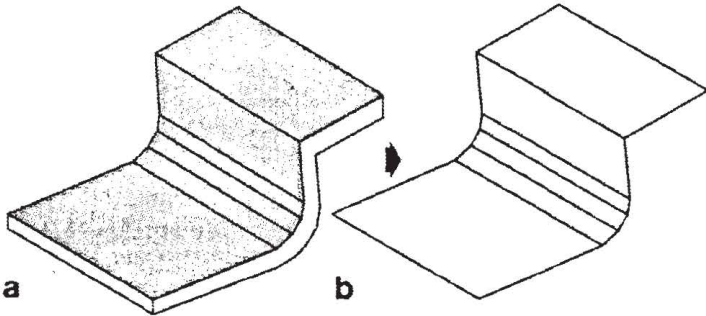


Abb. 8 a, b. Abstraktion eines Körpers. a Ausgangskörper, b erzeugte Polyederfläche

ANSYS liest der Präprozessor PREP7 die Daten ein und rekonstruiert die FEM-Geometrie (Schritt (5) in Abb. 7). Der Benutzer hat hier die Möglichkeit, kleine Verbesserungen am Modell vorzunehmen.

Alle weiteren Schritte folgen wie gewohnt. Der Benutzer gibt Vernetzungsparameter und Randbedingungen ein und startet den Netzgenerator, in ANSYS Mesh-Modul genannt (Schritt (6) in Abb. 7). Dieser erzeugt ein FEM-Netz, das aus Knoten und finiten Elementen besteht, und mit dem die FEM-Analyse durchgeführt wird (Schritt (7) in Abb. 7).

4.4 Systemintegration von TEA und EUCLID

Die Vorgehensweise zur Systemintegration von TEA in die EUCLID-Umgebung beruht auf der zuvor schon erwähnten Fähigkeit des CAD-Systems EUCLID, fremde FORTRAN-Programme einzubinden. Diese benutzergeschriebenen Applikationen werden per Menü gestartet und können sämtliche Funktionen von EUCLID als FORTRAN-Unterprogramme aufrufen. TEA wurde nun einfach als solch ein Applikationsprogramm integriert. Im folgenden wird dazu eine detailliertere Beschreibung gegeben, die insbesondere die kosteneffektive Wiederverwendung von EUCLID-Funktionen im TEA-Applikationsprogramm aufzeigt. Diese Details sind graphisch nochmals in Abb. 10, als Verfeinerung zu Abb. 7, dargestellt.

Während einer EUCLID-Sitzung steuert eine Softwarekomponente namens **Interaktiver Monitor** die Interaktionen zwischen dem Benutzer und dem Kern von EUCLID. Die Aktivierung einer Funktion beinhaltet i. a. drei Schritte:

- (1) Aufruf der Funktion über Menü oder Tastatur
- (2) Eingabe der Daten
- (3) Ausführung des entsprechenden Algorithmus.

Als Folge davon müssen benutzergeschriebene Applikationen mit interaktiven Eingaben aus zwei Dateien bestehen:

- Die erste Datei enthält eine FORTRAN-Subroutine, die die Menüstruktur festlegt. Für die TEA-Applikation ist das die Datei GRMTEA.
- In der zweiten Datei ist der eigentliche Ausführungsteil der Benutzerapplikation ebenfalls als FORTRAN-Subroutine, untergebracht. Im Falle der TEA-Applikation heißt diese Datei EXETEA.

Die Einbindung der Anwendung erfolgt zu Beginn einer Sitzung. Dabei wird die Menüstruktur-Subroutine GRMTEA gestartet. Diese teilt dem Interaktiven Monitor mit, wie die Menüs aufgebaut sind, welche Daten für eine bestimmte Funktion benötigt werden, und wie die Funktionscodes (Zeichenstring) festgelegt sind. Die benutzerdefinierten Menüs sind anschließend im Standardmenü von EUCLID verfügbar.

Der Aufruf einer Benutzerfunktion kann jederzeit während einer Sitzung erfolgen. Sobald alle notwendigen Daten eingegeben sind, ruft der Interaktive Monitor den Ausführungsteil EXETEA auf und übergibt den Funktionscode als Parameter. Abhängig vom Code verzweigt EXETEA in ein Unterprogramm, das die Funktion ausführt. Das Unterprogramm fragt die eingegebenen Daten beim Interaktiven Monitor ab. Bei der eigentlichen Bearbeitung innerhalb der Applikationsroutine werden, wo immer möglich, EUCLID-Funktionen ausgenutzt, wie zum Beispiel für folgende Aktionen:

- Zugriff auf die Geometrie-Datenstrukturen (Welche Eckpunkte hat Facette x?),
- Ausgaben am graphischen Bildschirm,
- Boolesche Operationen (z. B. für die Implementierung der Operation ZERLEGEN) oder
- Erzeugung neuer Objekte (z. B. Polyederfläche beim Abstrahieren eines Körpers).

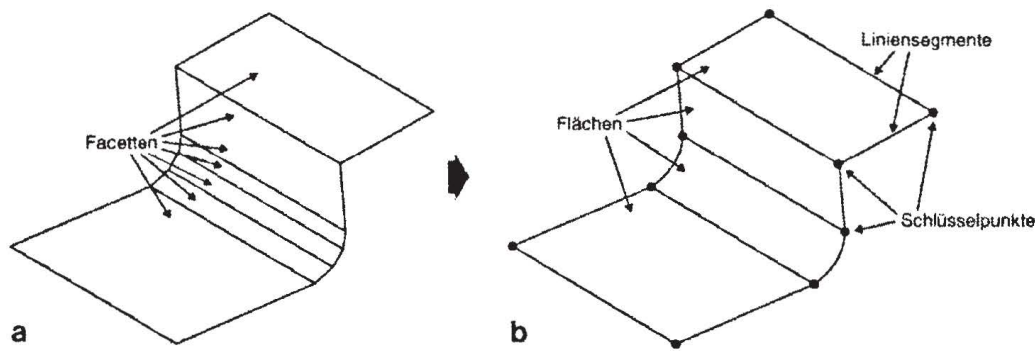


Abb. 9 a, b. Transformation einer Polyederfläche. a Offene Polyederfläche, b erzeugte Geometrie in ANSYS

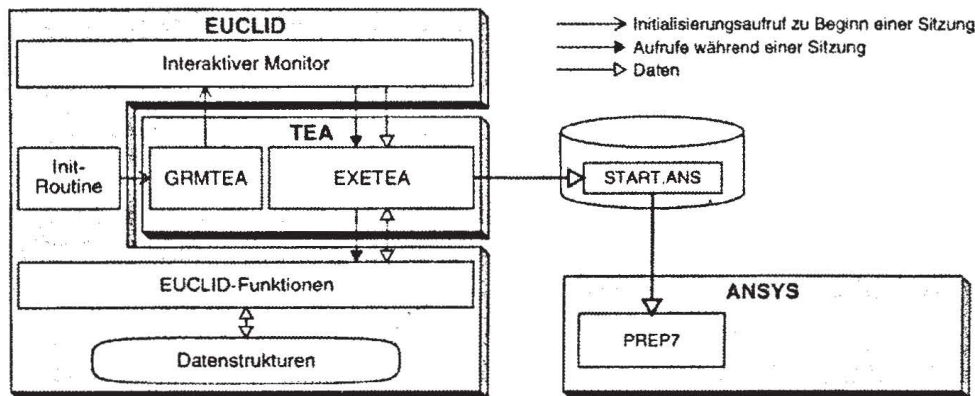


Abb. 10. Einbindung des TEA in EUCLID

5 Vorgehensweise für beanspruchungsgerechtes Konstruieren

Die FEM-Modellierung, das heißt die FEM-gerechte Aufbereitung des CAD-Modells, umfaßt einerseits die Vereinfachung (Abstraktion) und andererseits die Strukturierung des Modells. Was die Abstraktion betrifft, so wurde bisher lediglich die Ersetzung eines Körpers durch eine Fläche im TEA realisiert. Die beiden anderen Schritte, nämlich das Weglassen von Details und das Ausnutzen von Symmetrien, werden bisher nicht durch den TEA unterstützt. Es stellt sich allerdings hier die Frage, ob es überhaupt notwendig oder sinnvoll ist, diese Funktionen in den TEA einzubauen. Dieses Problem läßt sich wesentlich eleganter lösen, indem man den organisatorischen Ablauf bei der beanspruchungsgerechten Konstruktion eines Bauteils ändert.

Hierzu betrachten wir zunächst, wie die Konstruktion eines Bauteils üblicherweise aussieht (Abb. 11 a). Als erstes wird die Geometrie des Bauteils mit allen Details im CAD-System entworfen. Anschließend gibt der Berechnungsingenieur von Hand die Geometrie in das FEM-System ein, wobei er alle Vereinfachungen selbst vornehmen muß (im Kopf oder auf Papier). Nach dem Vernetzen der Geometrie folgt die FEM-Analyse. Die Ergebnisse dieser Analyse (Spannungen und Verschiebungen) können nun zur Verbesserung der CAD-Konstruktion herangezogen werden. Dieser Vorgang kann sich mehrmals wiederholen, bis die Konstruktion den Anforderungen genügt.

Mit Hilfe des TEA kann die Konvertierung des CAD-Modells teilweise automatisiert werden (Abb. 11 b). Hierfür muß jedoch ein vereinfachtes

CAD-Modell, bei dem unwichtige Details vernachlässigt und evtl. Symmetrien ausgenutzt sind, bereitgestellt werden. Diese Vereinfachungsschritte müssen von Hand in EUCLID vorgenommen werden. Der Nachteil dieser Vorgehensweise ist, daß bei jedem Verbesserungsschritt, d. h. bei jeder Änderung des exakten CAD-Modells, auch das vereinfachte Modell geändert oder neu hergeleitet werden muß. Erweitert man den TEA mit diesen Vereinfachungsschritten, so ändert sich im Prinzip nichts an dieser Situation. Der einzige Unterschied ist, daß die Vereinfachung nun etwas komfortabler im TEA statt in EUCLID erfolgt.

Unser Vorschlag zielt nun darauf ab, die CAD-Konstruktion in zwei Schritte aufzuteilen (Abb. 11 c). Im ersten Schritt erfolgt zunächst ein Grobentwurf. Dies bedeutet, daß man die Geometrie des Bauteils in vereinfachter Form eingibt, damit das Modell optimal vom TEA umgewandelt werden kann. Nun kann das Modell iterativ mit Hilfe der FEM optimiert werden. Erst wenn das CAD-Modell beanspruchungsgerecht konstruiert ist, werden im zweiten Schritt die für die FEM-Analyse unwesentlichen, aber für die CAD-Konstruktion und für die weitere Fertigung wichtigen Details ergänzt. Diese Vorgehensweise wird in manchen CAD-Systemen (etwa durch das System I-DEAS [10]) durch die Möglichkeit einer parametrisierten Konstruktion direkt unterstützt. Dabei können durch die Weitergabe der freien Geometrieparameter (z. B. die Länge eines Bauteils) die Ergebnisse einer FEM-Optimierung (als berechnete Wertebelegung dieser Geometrieparameter) sehr einfach in das CAD-System zurückgeführt werden.

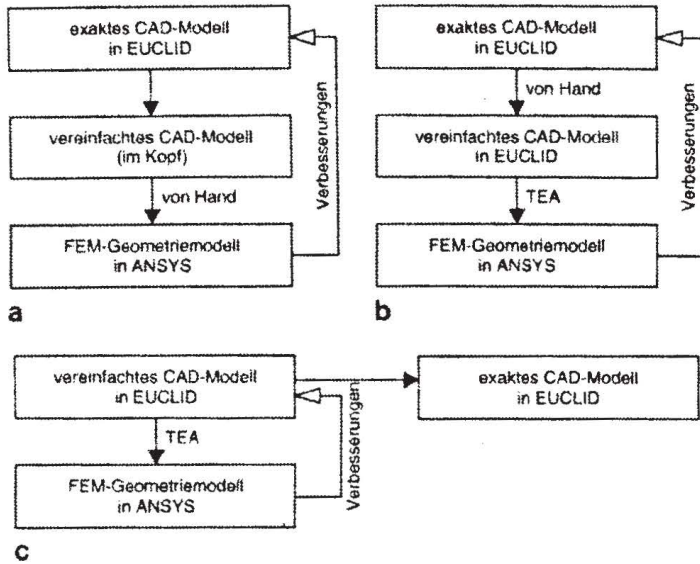


Abb. 11 a–c. Konzepte des beanspruchungsgerechten Konstruierens. **a** Konventionelle Vorgehensweise, **b** Einsatz der TEA, **c** Flexibilität durch Anpassung des CAD- and das FEM-Modell

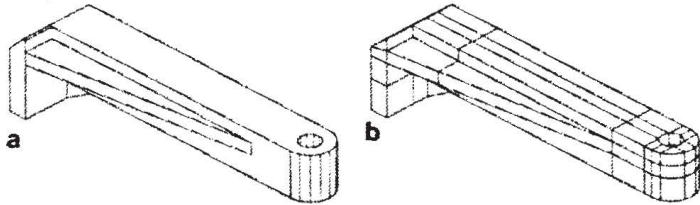


Abb. 12 a, b. FEM-Modellierung und Transformation eines Trägers. **a** CAD-Modell in EUCLID, **b** Zerlegung in Netzgebiete

6 Beispiele

Der Einsatz des TEA soll im folgenden an zwei praktischen Beispielen vorgeführt werden. Bei dem ersten Beispiel handelt es sich um einen Träger zur Aufnahme von Schablonen an einem Positioniergetriebe, mit dessen Hilfe Applikationen auf Schuhe aufgenäht werden sollen. Der Träger sitzt an einer sehr exponierten Stelle und beeinflusst durch seine Steifigkeit die erreichbare Positioniergenauigkeit und durch seine Masse die erreichbaren Drehzahlen. Hier handelt es sich um zwei gegenläufige Zielsetzungen. In Abb. 12 sehen wir auf der linken Seite das in EUCLID entworfene, vereinfachte CAD-Modell (Grobentwurf). Deutlich zu erkennen ist die facettierte Darstellung des Körpers. Der Träger soll mit Volumenelementen vernetzt werden. Hierfür wird er zunächst im TEA in einfachere Teilvolumina (Quader und dreieckige Prismen) zerlegt (Abb. 12b). Die gekrümmten Flächen sind auch hier noch in Facetten aufgelöst, was aber im Bild aufgrund der schlechten Auflösung nur ungenau zu sehen ist.

Anschließend wird die Geometrie in das Format von ANSYS transformiert. Dabei werden die gekrümmten Flächen durch Spline-Flächen approximiert. In Abb. 13a sind die einzelnen Teilvolumina der resultierenden FEM-Modellierung in ANSYS zu sehen. Nun kann das Modell in ANSYS vernetzt werden. Das Ergebnis der Vernetzung ist in Abb. 13b dargestellt.

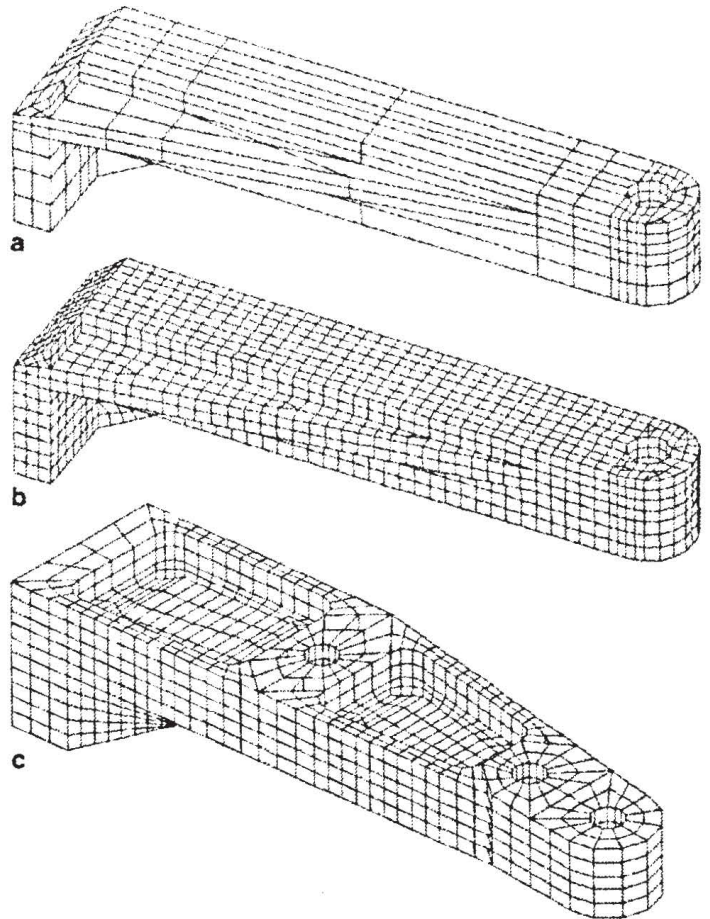


Abb. 13 a–c. FEM-Modellierung und Optimierung eines Trägers. **a** FEM-Geometriemodell in ANSYS, **b** FEM-Netz, **c** Träger nach Bauteiloptimierung

Die FEM-Analyse hat weitreichende Auswirkungen auf die Geometrie des Trägers. Die bisher eingesetzten Träger wurden aus Magnesium gefertigt, was fertigungstechnisch nicht unproblematisch ist. Eingesetzt werden sollte der fertigungstechnisch günstigere Werkstoff Aluminium, der zwar um 60 % steifer als Magnesium, dafür aber um 50 % schwerer ist. Eine reine Substitution ohne Geometrieänderung hätte bei 50 % mehr Masse lediglich 25 % mehr Steifigkeit gebracht. Durch eine Bauteiloptimierung mit der FE-Methode ist es gelungen, den Steifigkeitszuwachs auf 30 % zu erhöhen, wobei der Massenzuwachs mit 25 % in einem noch vertretbaren Rahmen lag. Abb. 13c zeigt das FEM-Modell des optimierten Trägers. Der Zeiteanteil für die Modellerstellung betrug etwa 30 % der Gesamtzeit für die Optimierungsaufgabe. Durch den Einsatz des CAD/FEM-Transformators TEA konnte der Gesamtaufwand für die Bauteiloptimierung um 25 % reduziert werden. Indirekt bedeutet dies 25 % mehr Berechnungskapazitäten. Dieses Beispiel zeigt sehr deutlich, welche Potentiale in einer CAD/FEM-Kopplung bzw. im beanspruchungsgerechten Konstruieren liegen.

Im zweiten Anwendungsbeispiel des TEA betrachten wir den Aspekt der Abstraktion (Abschn. 4.3 und Abb. 8). Abb. 14a zeigt eine Spannklammer (rechts in Seitenansicht, links ein Teil des Modells in Schrägansicht) als typisches Beispiel für eine dünnwandige Kon-

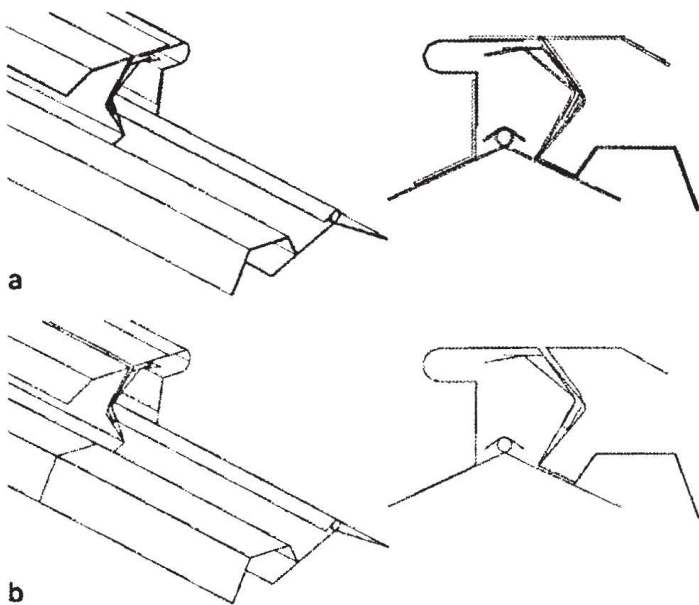


Abb. 14 a, b. FEM-Modellierung und Transformation einer Spannklemmer. a CAD-Modell in EUCLID, b FEM-Modellierung (Zerlegung und Abstraktion)

struktions. Im Gegensatz zum ersten Beispiel läßt sich die FEM-Berechnung für diesen Konstruktionstyp am effektivsten mit flächigen Elementen (Schalenelementen) durchführen. Dazu sind in der FEM-Modellierung flächige Netzgebiete zu erzeugen (Abstraktionsschritt). Damit diese Netzgebiete sauber aneinander passen, sind zusätzlich mehrere Zerlegungsschritte notwendig. In Abb. 14b ist das zerlegte und abstrahierte Modell zu sehen. Insbesondere der Vergleich der Seitenansichten zeigt sehr deutlich die Ersetzung von Volumen- zu Flächenteilen (Abstraktion). Analog zur normalen Vorgehensweise folgt nun die mit Hilfe des TEA automatische Transformation nach ANSYS und anschließend die Vernetzung und Berechnung des Modells in ANSYS. Damit ergeben sich ähnliche Graphiken wie in Abb. 13 dargestellt, jedoch haben wir aus Platzgründen und aufgrund der sehr schlechten Bildauflösung auf deren Darstellung verzichtet.

7 Zusammenfassung

Bei der Konstruktion neuer Bauteile werden immer häufiger CAD- und FEM-Systeme eingesetzt. Obwohl in beiden Programmen ähnliche Geometriemodelle verwendet werden, ist ein direkter Austausch der Geometriedaten nicht möglich oder nicht sinnvoll, da bei der FEM-Analyse ein abstrakteres, weniger detailliertes Modell erforderlich ist, während im CAD-System eine detaillierte, wirklichkeitstretreue Geometriebeschreibung stattfindet.

Unser Transformator TEA ermöglicht eine durchgängig rechnergestützte Kopplung von CAD und FEM. Die CAD-Geometrie wird zuerst FEM-gerecht aufbereitet und anschließend in das Format des FEM-Programms umgewandelt. Die Vernetzung der Geometrie und die FEM-Analyse erfolgen dann wie gewohnt.

Durch die konsequente Nutzung vorhandener Funktionen der beiden Systeme (in unserem Fall EUCLID und ANSYS) konnte der Aufwand für die Realisierung des Transformators TEA stark verringert werden.

Der TEA wurde im Rahmen einer Diplomarbeit entworfen und bei der G.M. Pfaff AG implementiert. Die bisherigen Erfahrungen mit dem TEA sind vielversprechend. Es zeigte sich, daß die Übertragung der CAD-Geometrie nach ANSYS durch den TEA deutlich beschleunigt werden konnte. Darüber hinaus erleichtert die enge Bindung des TEA an die vorhandenen Systeme die Benutzung des TEA: Da der TEA dieselbe Benutzeroberfläche verwendet wie EUCLID, kommen EUCLID-erfahrene Benutzer auf Anhieb und ohne Einarbeitung mit dem FEM-Modellierung zurecht. Auch die Berechnungsingenieure müssen sich nicht umstellen, sie können weiterhin mit „ihrem“ Programm arbeiten und deren (Spezial-) Funktionen nutzen.

Unsere bisherigen Erfahrungen haben weiterhin gezeigt, daß durch eine Anpassung des CAD-Modells an das FEM-Modell auch eine Optimierung des organisatorischen Ablaufs für das beanspruchungsgerechte Konstruieren stattfindet. Damit ist eine sehr effektive Rückführung von den Ergebnissen der FEM-Analyse als Verbesserungen in eine Entwurfsüberarbeitung möglich. Diese Vorgehensweise führt dann insgesamt zu einer deutlichen Verringerung der Entwicklungszeiten und reduziert somit auch die entstehenden Kosten.

Ohne weiteres kann der hier vorgestellte Ansatz erweitert werden, damit neutrale Systemschnittstellen [1], wie z. B. die STEP/EXPRESS-Normen [9, 8] direkt unterstützt werden. Hierzu ist nur das Transformationsmodul des TEA anzupassen. Alle anderen Komponenten und insbesondere die TEA-Schnittstelle zum Benutzer sowie der gesamte Ablauf bleiben davon unverändert. Da die Vorteile einer solchen Schnittstellennormierung offensichtlich sind, sehen wir deren Realisierung als einen wichtigen Punkt für weitere Arbeiten an.

Literatur

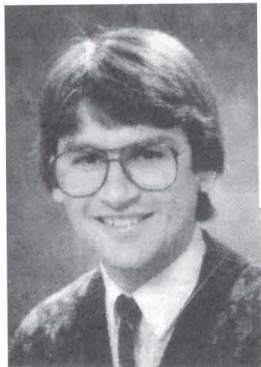
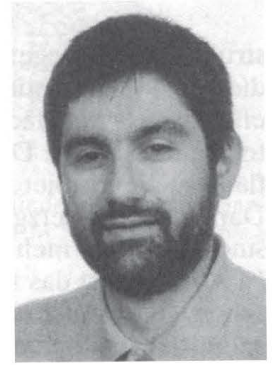
1. Anderl, R.: CAD-Schnittstellen, Methoden und Werkzeuge zur CA-Integration. München, Wien: Carl Hanser 1993
2. DeSalvo, G.J. Swanson, J.A.: ANSYS User's Manual. Houston: Swanson Analysis Systems Inc. 1985
3. Solid Modeling Seminar. Houston: Swanson Analysis Systems Inc. 1986
4. Introduction to ANSYS. Houston: Swanson Analysis Systems Inc. 1987
5. EUCLID-IS – F.E.M. Application Reference Manual. München: Matra Datavision GmbH 1989
6. EUCLID-IS – 3D Volumenmodellierung. Referenzhandbuch. Version 2.2-0. Ausgabe 1.0, Band 1, 2 und 3. München: Matra Datavision GmbH 1990
7. EUCLID-IS – Programming Reference Manual. Version 2.2-B. Vol. I, II und III. München: Matra Datavision GmbH 1991
8. ISO CD 10303-11: Product data representation and exchange – Part 11: The EXPRESS language reference manual. TC 184 SC 4, N 83 (1993)

9. Grabowski, H., Anderl, R. Schilli, B.: STEP – Entwicklung einer Schnittstelle zum Produktdatenaustausch. VDI-Z 131, Nr. 9 (1989)
10. I-DEAS. Master Series. Structural Dynamics Research Corp., 2000 Eastman Dr., Milford, Ohio 45150–2789
11. Mortenson, M.E.: Geometric modeling. New York: John Wiley & Sons 1985
12. Straßer, W. Seidel, H.-P. (eds): Theory and practice of geometric modeling. New York, Berlin, Heidelberg: Springer 1989
13. Weck, M., Heckmann, A.: Finite-Element-Vernetzung auf der Basis von CAD-Modellen. Konstruktion 45, 34–40 (1993)



Dipl.-Inform Carlo Bies (Jg. 1966). Studium der Informatik an der Universität Kaiserslautern (1986–93). Seit Nov. 1993 Systementwickler bei DACOS Software GmbH, St. Ingbert. Besondere Forschungsinteressen: Datenbanksysteme in Ingenieur Anwendungen.

Dr.-Ing. Bernhard Mitschang (Jg. 1959). Studium der Informatik an der Universität Kaiserslautern (1977–1982), seit 1983 wissenschaftlicher Mitarbeiter im Sonderforschungsbereich 124 am Fachbereich Informatik der Universität Kaiserslautern, 1988 Promotion. Von Okt. 1989 bis Dez. 1990 Post-doctoral Fellow in IBM Research, San Jose, Kalifornien. Seit 1991 in der Projektleitung des Teilprojekts D 2 im Sonderforschungsbereich 124 am Fachbereich Informatik der Universität Kaiserslautern. Hauptarbeitsgebiete: Ingenieur Anwendungen für Datenbanksysteme (DBS), Anfrageverarbeitung in DBS, Parallelisierung in DBS, Wissensbankverwaltungssysteme (WBVS), Modellierung von Anwendungen in DBS und WBVS. Mitgliedschaften in der Gesellschaft für Informatik (GI), Association for Computing Machinery (ACM) und IEEE Computer Society (IEEE).



Dr.-Ing. Peter Mitschang (Jg. 1960). Studium des Maschinenbaus an der Universität Kaiserslautern (1981–1987), seit 1987 Mitarbeiter in der Grundlagenforschung der G.M. Pfaff AG und wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachbereich Maschinenwesen der Universität Kaiserslautern, 1990 Promotion. Ab 1990 verantwortlich für den Bereich Strukturtechnik, seit 1991 Leiter der Abteilung Handhabungstechnologie bei der G.M. Pfaff AG, Kaiserslautern. Hauptarbeitsgebiete: CAD- und CAE-Anwendungen im Maschinenbau, Maschinendynamik, Handhabungssysteme. Mitgliedschaft im Verein Deutscher Ingenieure (VDI).