

COMPUTATIONAL MECHANICS – GRUNDLAGE FÜR DIE ENTWICKLUNG INTELLIGENTER PRODUKTE

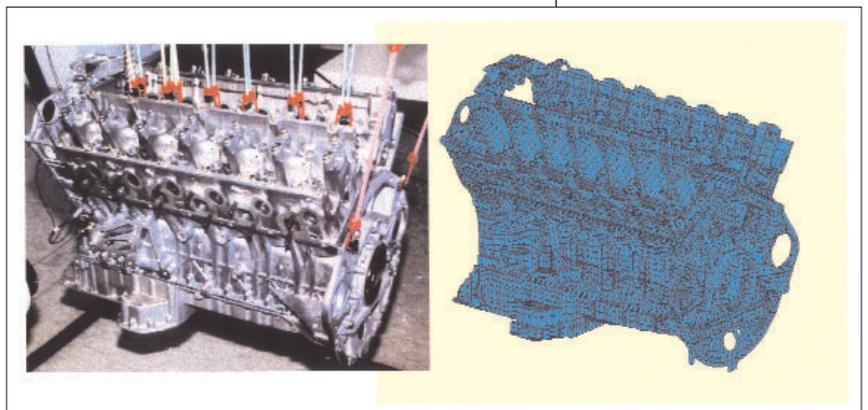
Ulrich Gabbert

Für die Entwicklung neuer Produkte des Maschinenbaus, der Elektrotechnik, der Verfahrenstechnik, der Fahrzeugtechnik, des Bauwesens, der Medizintechnik und vieler weiterer Industriezweige werden zunehmend computergestützte Methoden genutzt, die es auf der Grundlage virtueller Modelle ermöglichen, die Produkteigenschaften wirklichkeitsnah nachzubilden, zu analysieren und zu optimieren. Derartige computergestützte Entwicklungsprozesse sind für die Industrie von großer Bedeutung, weil zum einen Entwicklungszeiten reduziert und Kosten eingespart und zum anderen wertvolle Informationen über das zukünftige Produkt- und Systemverhalten bei unterschiedlichsten Betriebsbedingungen bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt gewonnen werden können. Der Entwicklung und industriellen Anwendung von leistungsfähigen computerorientierten Methoden kommt daher eine große wirtschaftliche Bedeutung zu. Im vorliegenden Beitrag wird zunächst ein Einblick in die Methoden- und Softwareentwicklungen auf dem Gebiet der computerorientierten Mechanik gegeben und danach an Hand von Anwendungsfällen exemplarisch gezeigt, welche Vorteile und Möglichkeiten sich durch den Einsatz dieser Methoden für die Entwicklung neuer „intelligenter“ Produkte ergeben können.

WAS IST „COMPUTATIONAL MECHANICS“

Das heute üblicherweise als computational mechanics (computerorientierte Mechanik) bezeichnete Gebiet befasst sich mit der Untersuchung und Entwicklung numerischer Methoden sowie der zugehörigen Algorithmen und Berechnungssoftware für die Lösung von ingenieurwissenschaftlichen Problemstellungen, deren physikalisches Verhalten durch adäquate mathematische Modelle beschrieben werden kann. Die integrierte Betrachtungsweise von Theorie, Experiment und Numerik einerseits und die Nutzung der Möglichkeiten moderner Computertechnik andererseits haben dieses Fachgebiet entscheidend geprägt. Die Verfügbarkeit immer leistungsfähigerer Rechensysteme – von Personalcomputern über Workstation zu Superrechnern mit Vektor- und Parallelprozessoren – hat in Verbindung mit Fortschritten auf theoretischem Gebiet, in der Messtechnik und der experimentellen Mechanik neue Möglichkeiten des virtuellen Entwurfs und der Simulation komplexer und zunehmend intelligenter werdender Produkte, Prozesse und Verfahren ermöglicht. Es gelingt inzwischen, auch für sehr komplexe Systeme wirklichkeitsnahe Computermodelle zu entwickeln, mit denen das Systemverhalten hinreichend genau beschrieben und bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen analysiert werden kann. Daraus lassen sich neue Einsichten und Erkenntnisse über das Systemverhalten gewinnen, die zu weiteren Verbesserungen und zur Optimierung genutzt werden können. Die virtuelle Produktentwicklung ist für die Industrie von zunehmender Bedeutung, weil Entwicklungszeiten reduziert und Kosten eingespart werden können. So werden heute in der PKW-Entwicklung

nur noch wenige Prototypen hergestellt und experimentell erprobt und statt dessen bestimmte Entwicklungsstapen ausschließlich unter Nutzung von Computermodellen durchlaufen. Natürlich kann auf experimentelle Untersuchungen und die Weiterentwicklung experimenteller Methoden nicht verzichtet werden. Es ist im



Gegenteil häufig unumgänglich, Computermodelle, die auf einer Vielzahl von Annahmen und Einschränkungen basieren, auf der Grundlage experimentell gewonnener Daten zu verifizieren und zu verbessern, bevor diese Modelle für weitergehende Untersuchungen und Entwicklungsschritte genutzt werden können. Zur Illustration dieser Vorgehensweise zeigt die Abbildung 1 einen 12-Zylinder V-Motor im Schwingungslabor des Institutes für Mechanik sowie ein für die Simulation des dynamischen Verhaltens des Motors unter Betriebsbedingungen genutztes Computermodell. Das Computermodell basiert auf der Methode der finiten Elemente (FEM),

Abbildung 1
Schwingungsmessung an
einem 12-Zylinder V-Motor
(li.) und mit Messdaten
abgeglichenes Computer-
modell (re.)

durch die das dynamische Verhalten des Motors näherungsweise durch ein System von gekoppelten gewöhnlichen Differentialgleichungen zweiter Ordnung beschrieben wird. Im vorliegenden Fall besteht dieses Differentialgleichungssystem aus ca. 220 000 Gleichungen. Für die Modellaufbereitung und die Simulation des dynamischen Verhaltens des Motors wurde die am Institut für Mechanik entwickelte FEM-Software COSAR genutzt. Ein derart komplexes Modell basiert auf zahlreichen Annahmen und Voraussetzungen, die natürlich die Qualität der numerischen Lösung entscheidend beeinflussen. So ist es bei komplexen Bauteilen praktisch nicht möglich, alle geometrischen Details im mathematischen Modell zu berücksichtigen; auch die Materialeigenschaften unterliegen fertigungsbedingten Schwankungen, die im Modell nicht erfasst werden können. Deshalb wurden an dem abgebildeten 12-Zylinder V-Motor zunächst die Eigenfrequenzen und Eigenformen gemessen, um unter Nutzung der Messergebnisse das Computermodell so zu modifizieren, dass die berechneten Ergebnisse im interessierenden Frequenzbereich mit den Messungen gut übereinstimmen. Dadurch wurde erreicht, dass das Computermodell wesentliche Aspekte des realen Bauteilverhaltens mit ausreichender Genauigkeit abbildet. Die durch die Diskretisierung des kontinuierlichen Problems und die verwendeten numerischen Lösungsverfahren zusätzlich auftretenden Fehler lassen sich während des Berechnungsprozesses in der Regel durch die Auswertung von Fehlerindikatoren gut kontrollieren und durch geeignete Maßnahmen hinreichend klein halten.

Die Modellbildung zum einen und die Methoden zur numerischen Lösung des Modellproblems zum anderen entscheiden maßgeblich über die mit einer Computersimulation erreichbare Ergebnisqualität, weshalb zunächst zur Modellbildung und zur Methodenentwicklung einige Ausführungen folgen sollen.

MODELLBILDUNG

Das Verhalten eines physikalischen Systems wird durch Felder, wie z. B. das Temperaturfeld, das Verformungsfeld, das mechanische Spannungsfeld, das elektrische Spannungsfeld, das Magnetfeld usw., charakterisiert. Häufig stehen diese Felder in Wechselwirkung zueinander und müssen gemeinsam betrachtet werden. Man denke beispielsweise an piezoelektrische Materialien (z. B. Blei-Zirkonat-Titanat), die eine Kopplung zwischen mechanischen und elektrischen Feldern aufweisen, die bei einer Vielzahl von Sensoren und Aktoren technisch genutzt wird.

Aus Gleichgewichts- und/oder Bilanzbedingungen lassen sich Differentialgleichungen und/oder Integralgleichungen für die gesuchten Felder ableiten, deren Lösung das Verhalten des Modellsystems beschreibt. So lernt beispielsweise jeder Ingenieurstudent in der Grundlagenvorlesung Technische Mechanik die Differentialgleichung der Balkenbiegung vierter Ordnung $(EJv'''' - q = 0$ kennen, die es ihm ermög-

licht, die Verformung $v(x)$ eines Balkens – die so genannte Biegelinie – bei bekannten Lagerungsbedingungen unter der Wirkung von Linienlasten der Intensität $q(x)$ (Eigengewicht, Wind, Schnee u. ä.) sowie von Kräften und Momenten zu berechnen. Die Größe E bezeichnet den Elastizitätsmodul (eine aus einem Zugversuch experimentell bestimmbare Materialkenngröße), und J ist das so genannte Flächenträgheitsmoment, eine für jede beliebige Querschnittsform des Balkens berechenbare Größe. Die Gültigkeit dieser sehr einfachen gewöhnlichen Differentialgleichung, die eine wichtige Rolle im Maschinenbau, im Bauwesen und im Stahlbau spielt, ist an zahlreiche Annahmen gebunden (siehe Stichwort Bernoulli-Balken in [1]), deren Verletzung zu geringen bis hin zu extrem großen Abweichungen der mathematischen Lösung vom realen Verhalten eines Balkens führen kann. Das Beispiel soll verdeutlichen, dass die Berechnungsergebnisse für ein ingenieurwissenschaftliches Problem entscheidend von der Modellqualität und der Gültigkeit der getroffenen Modellannahmen abhängen, deren Überprüfung im konkreten Einzelfall meist nur auf experimentellem Wege möglich ist. Die mathematische Lösung des Modellproblems verursacht zusätzliche Fehler, und es lässt sich leicht vorstellen, dass es mit zunehmender Komplexität der Modelle immer schwieriger wird, die Qualität der berechneten Lösung im Hinblick auf das Ausgangsproblem zu überprüfen. Das ist übrigens eines der entscheidenden Probleme bei der Nutzung kommerzieller Softwareprodukte, die heute einen Problemlösungsumfang anbieten, der bis vor kurzem noch nicht vorstellbar war. Dadurch werden einem Nutzer Werkzeuge an die Hand gegeben, die es ihm scheinbar auch ohne Spezialkenntnisse gestatten, komplexe ingenieurwissenschaftliche Probleme zu lösen. Wir beobachten aber zunehmend, dass Nutzer derartiger Softwareprodukte keine ausreichenden Fachkenntnisse besitzen, die es ihnen ermöglichen würden, die erzielten Ergebnisse kritisch zu überprüfen und schwerwiegende Fehler zu vermeiden. Dazu kommt, dass auch Softwareanbieter auf einem hart umkämpften Markt potentiellen Kunden eine einfache Problemlösung suggerieren, um sie zum Kauf oder zur Nutzung eines teuren Softwareproduktes zu bewegen. Aber auch Experten gelingt es nicht immer, die Ursachen für ein offenkundig falsches oder mangelhaftes Ergebnis, das sie unter Nutzung eines kommerziellen Softwareproduktes erzielt haben, eindeutig aufzuklären, weil Lösungsdetails, die das Know-how der Softwareentwickler darstellen, meist nicht zugänglich sind.

Die reine Rechenzeit für die Lösung einer komplexen Berechnungsaufgabe kann in Abhängigkeit vom verwendeten Modell und der Leistungsfähigkeit des Rechnersystems mehrere Stunden, aber auch Tage und Wochen betragen. Trotzdem sind mit solch einem Modell oft nur globale Aussagen zu gewinnen, nicht aber Ergeb-

nisse in lokalen Bereichen. Hierfür sind Modelle erforderlich, die das Problem auf unterschiedlichen Skalen betrachten und dabei die erforderlichen Wechselwirkungen berücksichtigen, z. B. unter Nutzung von Mikro-Makro-Modellen.

METHODENENTWICKLUNG

Die meist sehr komplexen Modellgleichungen lassen sich in der Regel nur näherungsweise unter Einsatz von Computern lösen. Hierzu stehen computerorientierte Näherungsmethoden zur Verfügung, die im wesentlichen in den letzten fünfzig Jahren entwickelt, ständig verbessert und verfeinert und auf die Lösung zahlreicher ingenieurwissenschaftlicher Probleme zugeschnitten wurden. Zu den klassischen Näherungsmethoden gehören die FDM (*finite difference method*), die FVM (*finite volume method*), die FEM (*finite element method*) und die BEM (*boundary element method*) sowie viele darauf basierende Erweiterungen, Variationen und Spezialentwicklungen. Dem Anwender wird die Nutzung einer Methode durch die Verfügbarkeit leistungsfähiger, kommerzieller Softwareprodukte erleichtert, wobei ein Nutzer häufig das wesentliche Problem darin sieht, die formal richtige Handhabung der Software zu erlernen. Aus fachlicher Sicht sind aber Fragen nach der Existenz und Eindeutigkeit und nach den Bedingungen für die Konsistenz und Stabilität der Lösung entscheidend, da hiervon maßgeblich die Genauigkeit und die Zuverlässigkeit der Lösung eines Modellproblems abhängen.

Die heute bekannteste und im Ingenieurwesen am meisten genutzte Näherungsmethode ist die Finite-Element-Methode (FEM), deren Siegeszug in den sechziger Jahren begann. Das erste Lehrbuch wurde im Jahre 1967 von O. C. Zienkiewicz & R. L. Taylor, Pionieren dieser Methode, verfasst [2]. Seit Ende der sechziger Jahre wird am Institut für Mechanik der Otto-von-Guericke-Universität auf dem Gebiet der FEM geforscht und Mitte der siebziger Jahre begann die Entwicklung einer Reihe eigener Berechnungstools für die industrielle Nutzung. Die Wurzeln des kommerziellen FEM-Systems COSAR – eines der wenigen deutschen Softwareprodukte, das sich auf dem Markt behaupten konnte – liegen ebenfalls in dieser Zeit [3]. Heute wird diese Software am Lehrstuhl des Autors vor allem für weitere Methodenentwicklungen im Rahmen von Projekten der Grundlagenforschung genutzt, während die industrielle Anwendung und kommerzielle Erweiterung der Software in den Händen der Forschungsgesellschaft für Technische Mechanik mbH Magdeburg liegen (siehe www.femcos.de).

Die Finite-Element-Methode (FEM) löst die mathematischen Modellgleichungen näherungsweise. Dazu wird das Lösungsgebiet in eine endliche (finite) Anzahl von Teilgebieten, die so genannten finiten Elemente zerlegt. Die finiten Elemente haben unter anderem die Form von Linien, Dreiecken, Vierecken, Hexaedern, Tetraedern u. ä. Die gesuchten physikalischen Felder werden in jedem dieser Elemente durch lokal definierte Funktionen approximiert. Diese Nähe-

rungsfunktionen werden üblicherweise aus Polynom aufgebaut, die als Unbekannte meist die Feldgrößen (z. B. die Verschiebungen bei einem strukturmechanischem Problem) an charakteristischen Punkten im Element enthalten. Diese Unbekannten müssen geeignet bestimmt werden, denn mit ihrer Kenntnis ist die Lösungsfunktion insgesamt bekannt. Eine taugliche Möglichkeit dazu besteht beispielsweise darin, die beschreibenden Differentialgleichungen im Lösungsgebiet im integralen gewichteten Mittel zu erfüllen. So gelangt man bei zeitinvarianten (statischen) Problemen zu einem algebraischen Gleichungssystem für die Unbekannten des Näherungsansatzes. Bei Industrieanwendungen sind für die Erzielung einer ausreichenden Genauigkeit meist einige Zehntausend bis mehrere Millionen Gleichungen erforderlich. Bei zeitveränderlichen Vorgängen ergibt sich ein entsprechend großes System von gewöhnlichen Differentialgleichungen erster Ordnung (z. B. bei Wärmeleitungsproblemen) oder zweiter Ordnung (z. B. bei strukturdynamischen Problemen), dessen Lösung beispielsweise durch Zeitintegrationsverfahren erfolgt, was mit einer deutlichen Steigerung des Rechenaufwandes im Vergleich zu statischen Problemen einhergeht. In vielen Fällen sind die zu lösenden Gleichungssysteme hochgradig nichtlinear und oft auch nicht gut konditioniert, wodurch die Schwierigkeiten bei der numerischen Lösung des Modellproblems weiter deutlich zunehmen können.



BERECHNUNGS- UND SIMULATIONSSOFTWARE COSAR

Auf der Grundlage des oben skizzierten Lösungskonzeptes der Finite-Element-Methode wurde von uns das bereits erwähnte Softwareprodukt COSAR entwickelt. Im Zusammenhang mit dieser Entwicklung wurden zahlreiche originäre wissenschaftliche Ergebnisse erzielt, die ihren Niederschlag in Dissertationen und wissenschaftlichen Publikationen gefunden haben (siehe dazu die im Internet unter www.uni-magdeburg.de/ifme/l-numerik.html verfügbare Publikationsliste).

Der gegenwärtig nachnutzbare fachliche Leistungsumfang der entwickelten Finite-Element-Software COSAR ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Mitarbeiter und Doktoranden am Lehrstuhl

Abbildung 2
Fachsysteme des universellen FEM-Programmsystems COSAR

des Autors verfügen für wissenschaftliche Zwecke über direkte Zugriffsmöglichkeiten auf Teile des Quellcodes der Software, so dass das umfangreiche Softwaretool als Entwicklungsumgebung für neue Forschungsaufgaben genutzt werden kann. Für Vergleichszwecke und Testrechnungen stehen auch alternative kommerzielle Systeme auf dem Gebiet der FEM zur Verfügung, wie z. B. ANSYS, ABAQUS und NASTRAN, die jedoch geschlossene Systeme mit nur sehr geringen Eingriffsmöglichkeiten darstellen, so dass ihre Nutzung für methodenorientierte Neu- und Weiterentwicklungen stark eingeschränkt ist.

In den vergangenen Jahren lag einer der Schwerpunkte der wissenschaftlichen Arbeiten am Lehrstuhl des Autors auf der Entwicklung neuer finiter Elemente (siehe Abbildung 3) und numerischer Berechnungsverfahren für gekoppelte thermo-elektro-fluid-mechanische Feldprobleme, die für die Simulation intelligenter Struktursysteme eine entscheidende Rolle spielen. So wurde beispielsweise eine neue Klasse von geschichteten dünnen Schalelementen für die Berechnung von Strukturen mit integrierten flächenförmigen piezoelektrischen Aktoren und Sensoren entwickelt, getestet und implementiert, die so bisher in keiner anderen kommerziellen FEM-Software verfügbar ist. Diese Neuentwicklung ermöglicht unter anderem den rechnergestützten Entwurf, die Simulation und Optimierung von intelligenten Leichtbaukonstruktionen (z. B. aus Faserverbundmaterialien) für industrielle Anwendungen /6/, /10/.

alle Leichtbautragwerke sehr effizient unter Nutzung von Schalenmodellen berechnet werden, die auf der Mittelflächengeometrie basieren, wurden für die automatisierte Erzeugung dieser Mittelflächengeometrie neue wissenschaftliche Lösungskonzepte entwickelt /5/ und inzwischen auch erfolgreich im Rahmen der COSAR-Software realisiert.

Im Zusammenhang mit der Entwicklung intelligenter Strukturkonzepte kommt der Einbeziehung der Regelung in das strukturmechanische Modell eine entscheidende Bedeutung zu. Es lässt sich zeigen, dass ein optimaler Entwurf eines mit Aktoren und Sensoren versehenen strukturmechanischen Systems nur auf der Grundlage einer ganzheitlichen Modellbildung unter Einbeziehung der mechanischen Struktur, der Aktoren und Sensoren sowie der Regelung gelingt. Sehr einfache modellgestützte Regler lassen sich problemlos in einem FEM-System entwerfen und nutzen. Es ist aber nicht sinnvoll, die heute auf dem Gebiet der Regelungstechnik bereit stehenden Entwurfsmethoden und die dazu existierende Software (z. B. in Matlab/Simulink) in ein FEM-System zu implementieren. Daher wurde auch hier eine Kopplung über eine bidirektionale Datenschnittstelle realisiert, die es sowohl ermöglicht, Modelldaten aus dem FEM-System für die Reglersoftware zu exportieren als auch einen entworfenen Regler zu importieren (z. B. in Form von Reglermatrizen oder C-Software) /11/.

Ein neuer Weg zur Modellbildung komplexer Maschinensysteme wird mit der Nutzung elastischer Mehrkörpermodelle beschrieben, wodurch es möglich wird, sowohl ordnungsreduzierte Finite-Element-Modelle elastischer Teilsysteme, Starrkörpermodelle sowie eine Vielzahl von weiteren Submodellen (z. B. verschiedenste Lagertypen und Verbindungselemente, Aktoren, Sensoren, Regelung) so zu einem Gesamtmodell möglichst niedriger Ordnung zu verknüpfen, dass wesentliche Aspekte des Maschinensystems ganzheitlich abgebildet und für die Simulation des Systemverhaltens und seine Optimierung genutzt werden können.

Unter Nutzung von Evolutionsstrategien erschließt sich ein allgemeiner und vergleichsweise einfacher Zugang zur FEM-basierten Optimierung, der für die Verbesserung beliebiger Produktparameter eingesetzt wird. Dafür ist allerdings ein extrem hoher Rechenaufwand erforderlich, der sich aus der numerischen Berechnung einer Vielzahl von Designvarianten ergibt. Unter Nutzung von Strategien der Parallelverarbeitung gelingt es jedoch, die erforderlichen Berechnungen auf mehrere Workstations zu verteilen und dadurch die Gesamtrechenzeit deutlich zu reduzieren /9/.

Die methodenorientierten Entwicklungen sowie die Implementierung neuer oder verbesserter Methoden im Rahmen einer vorhandenen Softwareumgebung ermöglichen es, neue wissenschaftliche Erkenntnisse schnell auf viele weitere Anwendungsfälle zu übertragen und damit einer breiteren Nutzung zugänglich zu machen. Nachfolgend wird eine kleine Auswahl von Anwendungsfällen präsen-

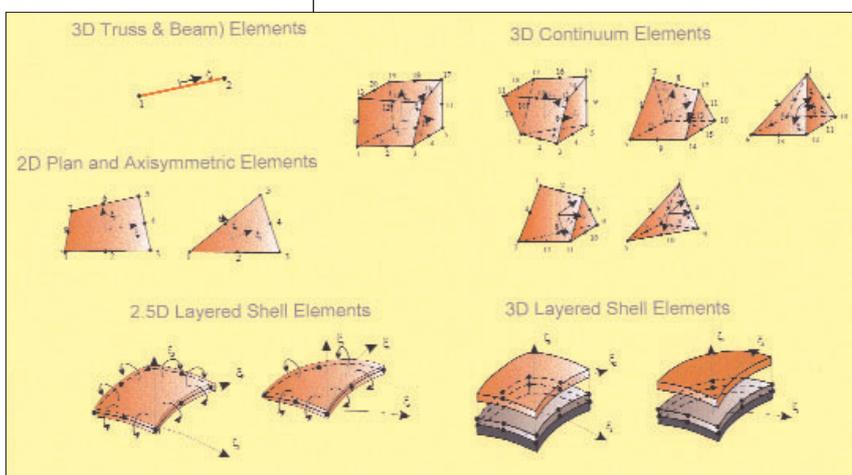


Abbildung 3
Ausschnitt aus dem
COSAR-Elementkatalog
(elektro-mechanische
Mehrfeldelemente)

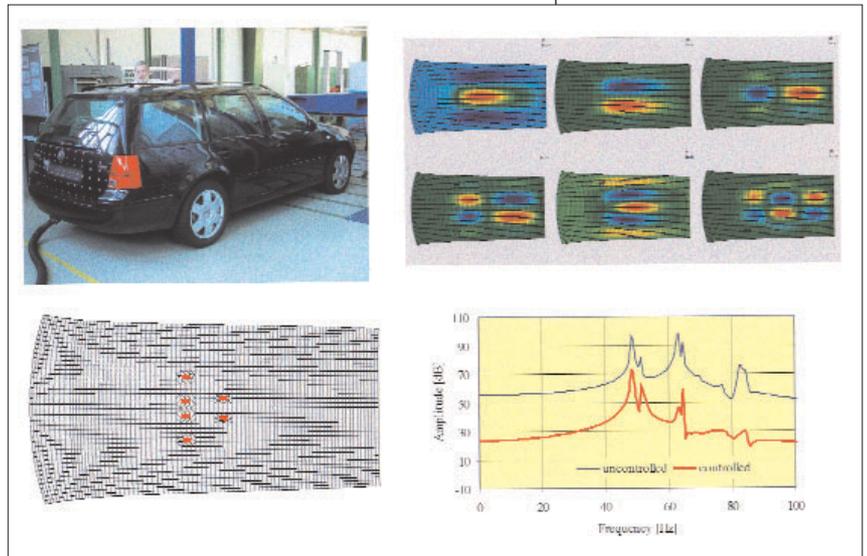
Durch eine über Standard-Datenschnittstellen (z. B. FEMDAS, NASTRAN, STEP, IGES, DXF) realisierte Verknüpfung der Berechnungssoftware COSAR mit einer Vielzahl weiterer kommerzieller Softwaretools wurde ein durchgängiger Produktentwicklungsprozess ermöglicht. So können beispielsweise aus 3D-CAD-Modellen eines Bauteils weitgehend automatisiert Berechnungsmodelle abgeleitet und die erforderlichen Datensätze für die Nutzung der COSAR-Software erzeugt werden. Ein generelles Problem stellt dabei die automatische Erzeugung von Mittelflächenmodellen aus 3D-Volumenmodellen dar, für die bisher keine den Bedürfnissen der Nutzer genügende Lösung existierte. Da nahezu

tiert, die einen Einblick in das Problemlösungspotential geben soll, das mit den von uns entwickelten computerorientierten Berechnungs- und Simulationsmethoden erreicht wurde.

ENTWICKLUNG INTELLIGENTER LEICHTBAUSTRUKTUREN

Wie eingangs bereits erwähnt wurde, nimmt die Entwicklung neuer, zunehmend intelligenter werdender Produkte heute eine wirtschaftliche Schlüsselstellung ein. Das Konzept der intelligenten (adaptiven) Strukturen orientiert sich am Verhalten biologischer Systeme, die in der Lage sind, intelligent auf sich ändernde Umgebungsbedingungen zu reagieren. Mit der strukturkonformen Integration von aktiven Materialien als Sensoren und Aktoren in die tragende Struktur und deren Verknüpfung über Regler lassen sich beispielsweise Struktursysteme mit der Fähigkeit zur automatischen Schwingungsunterdrückung oder Formstabilisierung entwickeln und technologisch nutzbar machen. Die dafür benötigten wesentlichen Komponenten sind in Abbildung 4 dargestellt. Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet wurden unter anderem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Innovationskollegs *Adaptive mechanische Systeme* gefördert. Dieses interdisziplinäre Forschungsprojekt, an dem Maschinenbauer (Werkstoffwissenschaften, Mechanik und Mechatronik), Naturwissenschaftler sowie Elektrotechniker der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg beteiligt waren, konzentrierte sich vorzugsweise auf Strukturen aus Leichtbaumaterialien (z. B. kohlefaserverstärkte Kunststoffe), in die piezoelektrische Keramiken als Sensoren und Aktoren integriert und über einen Regler verknüpft wurden. Die Erprobung und Verifikation der neuen Entwicklungen – z. B. neue aktive Materialsysteme und Prüfverfahren, neue Modellierungssysteme und Optimierungsmethoden, neue integrierte Verbindungs- und Stellelemente, neue Kalibriermethoden usw. – erfolgte zunächst an Hand von Labormodellen (z. B. Balken, Platten und Schalenstrukturen) sowie einer aus kohlefaserverstärktem Material aufgebauten industrienahen Zylinderstruktur (siehe: www.uni-magdeburg.de/adames/index.html). Einer unserer Forschungsschwerpunkte lag auf der Entwicklung von Modellierungs- und Optimierungswerkzeugen für den Entwurf intelligenter (adaptiver) Struk-

tursysteme, die in der Lage sind, Schwingungen als Folge äußerer Störungen automatisch zu reduzieren. Gemeinsam mit industriellen Partnern und weiteren Forschungseinrichtungen (FhG, DLR) wurden diese Arbeiten bis hin zur Entwicklung von ersten Prototypen für zukünftige Industrieprodukte geführt /4/. Auf drei illustrative Beispiele dafür soll nachfolgend näher eingegangen werden.



Adaptives PKW-Dachblech

Die Abbildung 5 zeigt eine von uns entwickelte Designvariante für ein adaptives Dachblech eines VW-Bora. Ziel der Entwicklung war es, neue Möglichkeiten zur Reduktion der Dachschwingungen zu erschließen und praktisch zu erproben, um dadurch einen Beitrag zur Verbesserung der Innenraumakustik zu leisten. Die Dachschwingungen regen bekanntlich das Luftvolumen im PKW-Innenraum zu Schwingungen an, die ein Passagier als Geräusch registriert. Zunächst wurden im Schwingungslabor des Institutes für Mechanik an einem Serienfahrzeug umfangreiche experimentelle Untersuchungen zum Schwingungsverhalten und zur Schallabstrahlung von PKW-Dachblechen durchgeführt. CAD-Datensätzen, die uns von VW zur Verfügung gestellt wurden, bildeten die Grundlage für die Entwicklung eines Finite-Element-Modells des PKW-Daches, das für die Berechnung optimaler Aktorpositionen an der Dachinnenseite geeignet sein sollte. Das Modell musste daher das Eigenschwingungsverhalten des realen PKW-Daches im unteren Frequenzbereich sehr gut nachbilden. Es zeigte sich, dass es dazu erforderlich war, die versteifenden Wirkungen der Dachkante sowie der A- und der B-Säule näherungsweise im Modell zu berücksichtigen. Unsere Untersuchungen zeigten aber auch, dass es für den gewünschten Zweck nicht notwendig war, ein komplettes Fahrzeugmodell zu benutzen, wodurch sich der erforderliche Rechenaufwand in Grenzen hielt. Die mit dem virtuellen Computermodell des PKW-Daches ermittelten Eigenschwingformen (einige der Schwingformen

Abbildung 5
Farbdarstellung der berechneten Eigenschwingformen des Dachbleches eines VW Bora (oben rechts); berechnete Verteilung von piezoelektrischen Funktionsmodulen (rot) auf dem Dachblech (unten links); Vergleich des Amplitudenfrequenzganges bei geregelterm und ungeregelterm Dachblech infolge einer Störeregung (unten rechts)

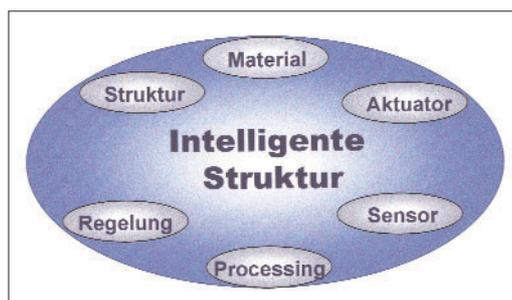


Abbildung 4
Komponenten intelligenter Strukturen

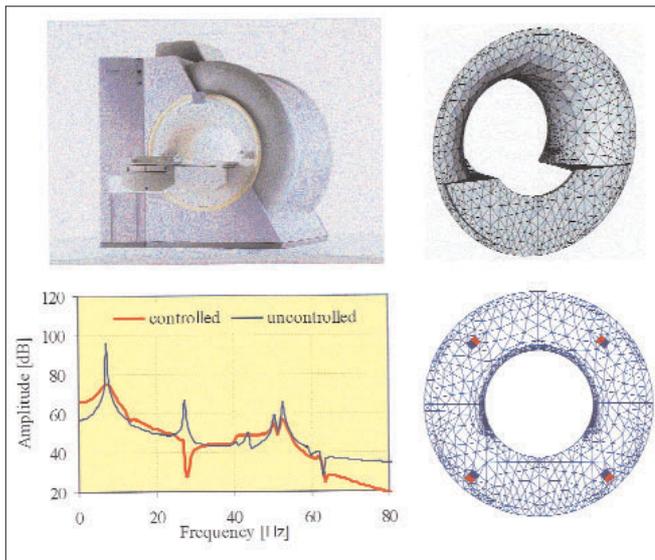


Abbildung 6
Aktive Schwingungsreduktion am Trichter eines Magnetspintomographen der Firma Siemens Medical Solutions; Berechnungsmodell des Trichters mit applizierten Aktoren und Sensoren (rot und blau); Vergleich des geregelten und ungeregelten Verhaltens des Trichters bei Impulsanregung

sind in Abb. 5 grafisch dargestellt) und Eigenfrequenzen stimmen in dem interessierenden Frequenzbereich sehr gut mit den Messdaten am realen PKW-Dach überein. Unter Verwendung dieses Computermodells wurden dann unter Nutzung eines von uns entwickelten modalen Steuerbarkeitsindex zweckmäßige Positionen für die Anordnung von dünnen piezoelektrischen Funktionsmodulen (PZT-Keramikplättchen) zur adaptiven Schwingungskompensation berechnet. Für dieses Design wurden unter Verwendung der erwähnten Kopplung zu Matlab/Simulink unterschiedliche modellbasierte Regler entworfen und das geregelte Verhalten des virtuellen Dachblechs bei unterschiedlichen Anregungen untersucht /10/. Die von uns entwickelte Lösungsvariante für die Platzierung der piezoelektrischen Patches (siehe Abb. 5) wurde schließlich auch praktisch realisiert und unter Laborbedingungen experimentell erprobt, wodurch die prinzipielle Funktionsfähigkeit des Designvorschlages bestätigt werden konnte.

Adaptiver Magnetspintomograph

In der Medizin eingesetzte Magnetspintomographen sind bekanntlich extrem laut, wovon eine erhebliche zusätzliche Belastung der Patienten resultiert. Unter anderem sind die dünnwandigen Verkleidungselemente, wie z. B. der Kunststofftrichter (Abb. 6), wesentlich für die Schallabstrahlung in den Außenraum verantwortlich. In Kooperation mit der Siemens Medical Solutions und anderen Projektpartnern (DLR, Universität

Linz) wurden an Prototypen derartiger Trichter aktive Maßnahmen zur Schallreduktion entwickelt und experimentell erprobt. Die Abbildung 6 zeigt einen von uns vorgeschlagenen ersten Entwurf für die Anordnung von piezoelektrischen Funktionsmodulen auf dem Trichter sowie die mit diesem Entwurf im virtuellen Simulationsmodell nachgewiesene Reduktion der Schwingungsamplituden bei einer definierten Anregung der Struktur /10/. Die Simulation basiert auf einem Schalenmodell, das die von uns entwickelten neuen elektro-mechanisch gekoppelten finiten Schalenelemente benutzt. Die optimalen Positionen der piezoelektrischen Funktionsmodule wurden unter Nutzung des Simulationsmodells berechnet, und dann diese Module automatisch in das virtuelle Trichtermodell integriert. Mit diesem Modell wurden auch hier unterschiedliche modellbasierte und auch adaptive Regler entwickelt und am virtuellen Modell des Trichters erprobt. Die von uns vorgeschlagene Designvariante wurde inzwischen hergestellt; die experimentelle Erprobung ist jedoch noch nicht abgeschlossen.

Elektronikbox

Häufig erfordern zu transportierende Gegenstände (z. B. elektronisches Equipment) oder Personen (z. B. beim Krankentransport) einen besonderen Schutz gegen äußere Störungen, durch die erhebliche Schwingungen angeregt werden können. Aus diesem Grund wurden im Rahmen einer GARTEUR Action Group (GARTEUR: Group for Aeronautical Research and Technology in EUROpe) zum Thema *Active Equipment Isolation and Structural Damping* von mehreren europäischen Partnern (Schweden, Frankreich, Großbritannien, Niederlande und Deutschland) theoretische und experimentelle Untersuchungen zu den Möglichkeiten einer aktiven Schwingungsisolation von sensiblen Transportbehältern, die extremen dynamischen Belastungen unterliegen, durchgeführt. Die Abbildung 7 zeigt einen der Prototypen der Box. Von uns wurden im Rahmen dieses Projektes Simulationsmodelle auf der Grundlage der FEM entwickelt, die anschließend von anderen Pro-

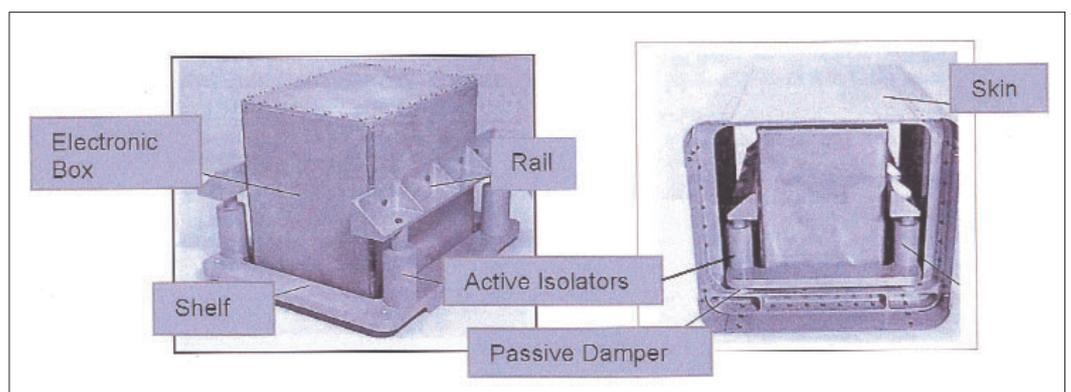


Abbildung 7
Prototyp einer schwingungsisolierten Elektronikbox

jektpartnern experimentell erprobt und verifiziert wurden. Die Simulationsmodelle wurden dann genutzt, um technologische Lösungen für die Realisierung einer aktiven Schwingungsunterdrückung computergestützt zu entwickeln und zu erproben /7/. Die Abbildung 8 zeigt eine von uns auf der Grundlage eines virtuellen Modells entwickelte Lösung, bei der parallel zur Tragstruktur der Box piezoelektrische Stapelaktoren integriert wurden, durch die eine zusätzliche aktive Dämpfung der Box erreicht werden soll. Unter Nutzung eines Reglergesetzes – zunächst wurde eine einfache Geschwindigkeitsrückführung erprobt – wurden aus den gemessenen Sensorsignalen an der Box (Geschwindigkeiten) elektrische Stellsignale für die Aktoren so berechnet, dass eine möglichst gute Dämpfung der Box erreicht wird (siehe Abb. 8).

WERKZEUGMASCHINEN MIT MAGNETSCHWEBE- UND DIREKTANTRIEBSTECHNIK

Auch im klassischen Maschinenbau, z. B. im Werkzeugmaschinenbau, in der Roboter- und Handhabungstechnik, in der Maschinenmesstechnik aber auch im Bauwesen (Erdbebensicherheit), in der Mikrosystemtechnik und in vielen weiteren Bereichen werden in letzter Zeit neue intelligente Systemkonzepte verfolgt /4/. Eine hochinnovative aktuelle Entwicklung ist der Einsatz der Magnetschwebe- und Direktantriebstechnik, die durch den Hochgeschwindigkeitszug Transrapid einen großen Bekanntheitsgrad erreicht hat, in Werkzeugmaschinen.

Die Abbildung 9 zeigt das erste Funktionsmuster eines magnetgelagerten und durch einen Torquemotor angetriebenen Rundtisches der Firma w.i.t. Wiemers innovative Technik GmbH Magdeburg/Barleben, die Inhaber der entsprechenden Patente ist. Die bisherige Bauweise von Werkzeugmaschinen zur Bearbeitung großer und schwerer Werkstücke besteht darin, die Werkstücke auf wälzgelagerten Spanntischen aufzunehmen, die dann von Antriebsmechanismen in Bewegung gesetzt werden. Die in den Wälzlagern enthaltenen Spiele und das Verschleißverhalten der Lagerungen bestimmen maßgeblich die erreichbare Genauigkeit und Toleranz der zu bearbeitenden Werkstücke. Der Einsatz von verschleißfreien Magnetlagern führte bereits beim ersten Funktionsmuster zu einer hohen Bewegungsgenauigkeit, durch die eine präzise mechanische Fertigung schwerer Werkstücke möglich ist. Die Entwicklung ausgereifter Werkzeugmaschinen mit Magnetschwebe- und Direktantriebstechnik erfordert jedoch zuverlässige Auslegungs- und Optimierungsmethoden. Die konstruktive Weiterentwicklung unter Einbeziehung von Simulationsmodellen wird in nächster Zeit zur Serienreife des intelligenten Rundtisches führen, wobei am Lehrstuhl des Autors zusätzliche adaptive Konzepte hinsichtlich einer weiteren Steigerung der Fertigungsgenauigkeit bei hohen Bearbeitungsgeschwindigkeiten untersucht werden. Möglichkeiten dafür ergeben sich beispielsweise durch die Integration von Sensoren und Aktoren in der Schnellspannplatte

des Rundtisches, wodurch in Verbindung mit der Regelung der Lager- und Positioniermagnete eine weitere Genauigkeitssteigerung möglich ist, wie erste Simulationsrechnungen an einem Modellsystem gezeigt haben. Durch die Einbeziehung elastischer Submodelle mit integrierten piezoelektrischen Aktoren, wie sie in dem FEM-System COSAR erzeugt werden können, sowie der entsprechenden Submodelle für die Magnetlagerungen und die Regelung in ein Mehrköpersimulationsmodell gelingt es, das im Fertigungsprozess auftretende dynamische Verhalten der Werkzeugmaschine bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen zu simulieren und daraus Erkenntnisse für die Weiterentwicklung und die Optimierung der Werkzeugmaschine zu gewinnen.

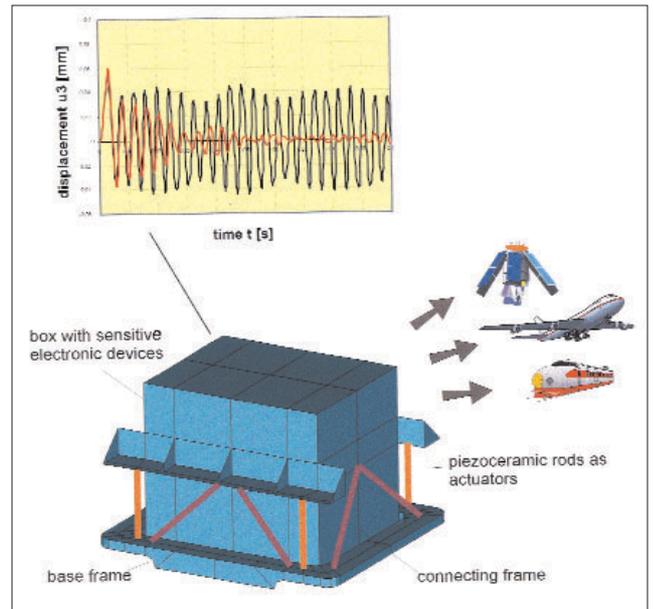
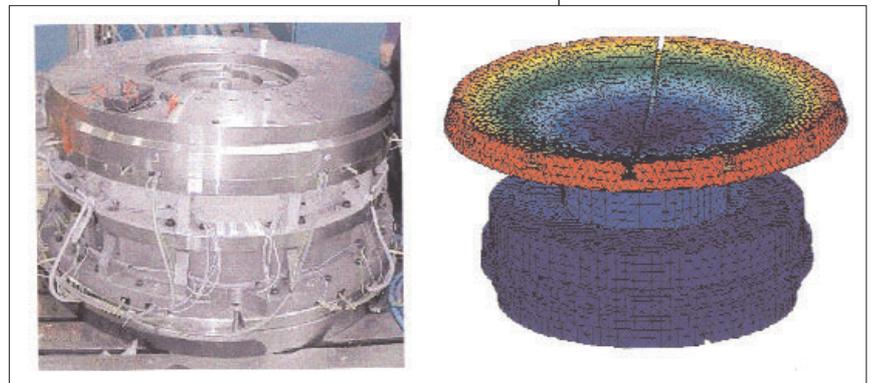


Abbildung 8 Adaptive Schwingungsreduktion der Elektronikbox mit Hilfe von piezoelektrischen Stapelaktoren



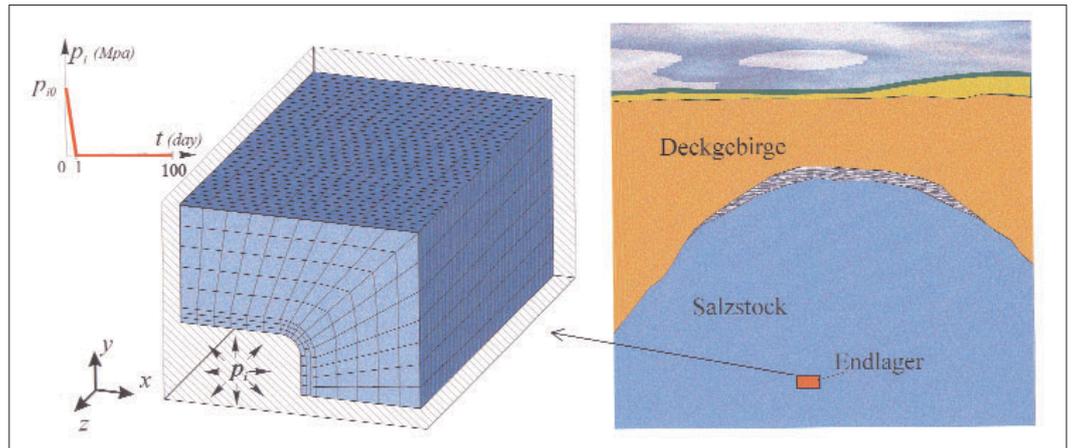
UMWELTECHNIK

Ein aktuelles und wirtschaftlich bedeutendes Gebiet ist die Umwelttechnik, wo es unter anderem um den verstärkten industriellen Einsatz nachwachsender Rohstoffe (siehe z. B. NAROSSA®), die Nutzung erneuerbarer Energien und den nachhaltigen Umwelt- und Klimaschutz geht. Dazu gehören auch Konzepte für die Vermeidung neuer und die sichere Endlagerung bereits vorhandener hochgefährlicher Abfälle (z. B. Atommüll). Für viele Umweltprobleme gibt es heute bereits ausgereifte Methoden, um auf der Grundlage virtueller Modelle Langzeitprognosen abzuleiten, die allerdings nur dann zuverlässige Informationen liefern können, wenn auch die notwendigen Eingangsdaten in der erforderlichen Qualität bereitstehen.

Vor einiger Zeit wurde von uns eine Simulationssoftware entwickelt, die eine bessere

Abbildung 9 Links: Prototyp eines magnetgeführten und durch einen Torquemotor angetriebenen Werkzeugmaschinenrundtisches (mit freundlicher Genehmigung der w.i.t. Wiemers innovative Technik GmbH Magdeburg/Barleben, die Inhaber der entsprechenden Patente sind); rechts: Berechnete erste Eigenform des Rundtisches, die eine pilzförmige Schwingform der Aufspannplatte zeigt

Abbildung 10
Prinzipische Skizze der Lage
einer Endlagerstätte im
Salzgestein



Vorhersage des Langzeitverhaltens von unterirdischen Kavernen im Salzgestein ermöglichen soll, wobei neben den mechanischen Belastungen (z. B. durch den Gebirgsdruck) auch thermische Einflüsse einbezogen wurden. Die numerische Lösung des dreidimensionalen Problems basiert auf einem parallelisierbaren expliziten Lösungskonzept des gekoppelten thermo-mechanischen Problems unter Berücksichtigung großer Verformungen und nichtlinearer Stoffgesetze /8/. Die Abbildung 10 zeigt die Anordnung einer typischen Kaverne im Salzgestein und ein Berechnungsmodell, das zur Verifikation der Software genutzt wurde. In Abbildung 11 sind Ergebnisse einer Simulation dargestellt,

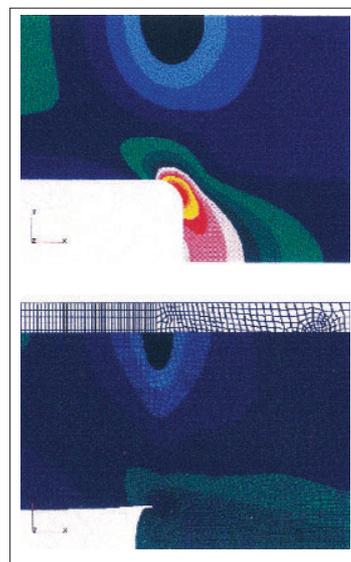


Abbildung 11
Spannungen im Salz nach
Ausbruch einer Kaverne (Bild
oben) und nach 100 Tagen
(Bild unten); deutlich ist das
Relaxieren der Spannungen
zu erkennen.

Zunächst kommt es durch das Einbringen der Kaverne zu einer Störung des ursprünglichen Gleichgewichtszustandes im Salzgestein, wodurch große Spannungen vor allem in den Ecken der Kaverne initiiert werden. Unter Wirkung der Gebirgslast kommt es zum Fließen und damit zur Reduktion der maximalen Spannungen im Salzgestein, wie der Abbildung 11 zu entnehmen ist. Bei realistischen Modellen zur Simulation des Langzeitverhaltens erreichen die numerisch zu lösenden nichtlinearen Gleichungssysteme schnell

Größenordnungen von einigen Millionen Gleichungen, für deren Lösung die Nutzung von Parallelrechnern erforderlich ist /9/.

MEDIZINTECHNIK

In der Medizin und der Medizintechnik wurden in den zurückliegenden Jahren verstärkt computerorientierte Methoden der Mechanik eingesetzt, um neue innovative Lösungen zu entwickeln. Allerdings ist die Modellbildung und die messtechnische Gewinnung von Materialparametern für biologische Materialien (Knochen, Sehnen, Gewebe, Muskeln usw.) ein heute noch nicht zufriedenstellend gelöstes Problem. Die Modellqualität wird auch hier von der Zielstellung bestimmt, die mit dem jeweiligen Modell angestrebt wird.

Vor einiger Zeit wurden von uns Finite-Element-Modelle von Kniegelenken entwickelt (siehe Abbildung 12), die Aufschluss über die lokalen Belastungssituationen im Gelenk liefern sollten, die durch Fehlstellungen und Fehlbelastungen nach Unfällen verursacht werden /12/. Für die Modellentwicklung wurden CT- und MRT-Daten von Patienten verwendet. Durch Vergleich mit der Ausgangssituation ist es einem Orthopäden unter Einbeziehung der Simulationsergebnisse möglich, den lokalen Einfluss von Fehlbelastungen im Kniegelenk zu erkennen und durch angepasste Trainingsprogramme zu reduzieren.

Im Rahmen einer gemeinsam mit dem Institut für Biomaterialien (IBM) in Heiligenstadt betreuten Promotion werden zur Zeit neue Modellvorstellungen entwickelt, die das lastgesteuerte Umbauverhalten des Knochens (*bone remodeling*) am Interface zwischen Knochen und einzementierter Hüftgelenkendoprothese berücksichtigen /13/, um auf diesem Wege einen Beitrag zur Aufklärung und Vermeidung von Versagensmechanismen zu leisten. Die Modellvorstellungen für das lastgesteuerte Umbauverhalten des Knochens werden im Rahmen der FEM eingesetzt, um unter Verwendung von individuellen Patientendaten das Verhalten unterschiedlicher Endprothesenformen bei typischen Belastungssituationen zu analysieren und Schlussfolgerungen für das Langzeitver-

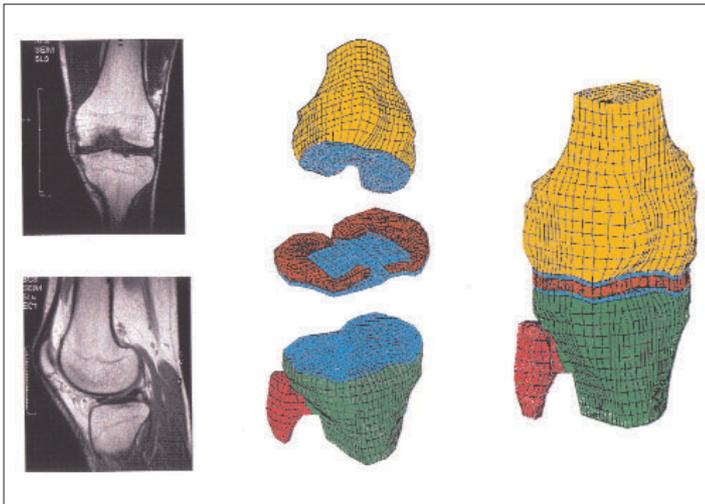


Abbildung 12
MRT-Aufnahmen eines Kniegelenkes und daraus generiertes Berechnungsmodell

halten abzuleiten. Die Abbildung 13 zeigt das Bild eines solchen FEM-Modells und die mit dem Modell berechnete Beanspruchungsverteilung in einem Oberschenkelknochen mit einem einzementiertem Hüftgelenkschaft bei einer typischen Belastungssituation des Hüftgelenkes (2500 N). Die maximalen Zugspannungen im Knochen treten in den gelben und roten Bereichen auf, die blauen Bereiche werden auf Druck beansprucht.

Unter Nutzung von Computermodellen und individuellen Patientendaten wird es in Zukunft möglich sein, für jeden einzelnen Patienten eine optimale Prothesenform zu berechnen und das zukünftige Verhalten des Hüftgelenkes bei unterschiedlichen Belastungssituationen zu untersuchen.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der vorliegende Beitrag gibt einen Einblick in das Gebiet der computerorientierten Mechanik, das heute eine wesentliche Grundlage für die Entwicklung vielfältiger neuer technischer Produkte darstellt. Neben einer kurzen Einführung in die Grundlagen wurde anhand von ausgewählten Anwendungsbeispielen aus dem Arbeitsgebiet des Autors und seines Lehrstuhl ein Überblick über die vielfältigen Einsatzfelder und Anwendungsmöglichkeiten von numerischen computerorientierten Methoden der Mechanik gegeben.

Die qualifizierte Anwendung computerorientierter Methoden sowie deren fachliche Weiterentwicklung erfordern vertiefte Kenntnisse in

den mathematischen und ingenieurwissenschaftlichen Grundlagen, in der numerischen Mathematik und Mechanik und in der Ingenieurinformatik. Die große Zunahme der Anwendungen von Berechnungs- und Simulationsmethoden muss daher einhergehen mit einer entsprechend ausgerichteten grundlagenorientierten Ingenieurausbildung. Gerade die zunehmende Dominanz der Informations- und Kommunikationstechniken und der einfache Zugang zu leistungsfähigen aber auch mit großen Unzulänglichkeiten versehenen Softwareprodukten und Informationssystemen erfordern heute von Ingenieuren ein gesichertes Basiswissen, das ihnen ermöglicht, richtige Entscheidungen treffen zu können – Entscheidungen, die mit der Verantwortung für die Sicherheit und die Zuverlässigkeit von Ingenieurprodukten verbunden sind und von denen häufig auch die Umsätze und die Gewinne eines Unternehmens abhängig sind /14/. Die Verknüpfung von Theorie, Experiment und Numerik sowie die Entwicklung einer Denkfähigkeit, die zur logisch strukturierten, schrittweise vereinfachten Modellbildung befähigt (Unterscheidung zwischen wesentlichen und unwesentlichen Phänomenen, Grenzbetrachtungen und Abschätzung zulässiger Parameterbereiche), muss daher eine zentrale Aufgabe der Ingenieurausbildung an Universitäten bleiben.

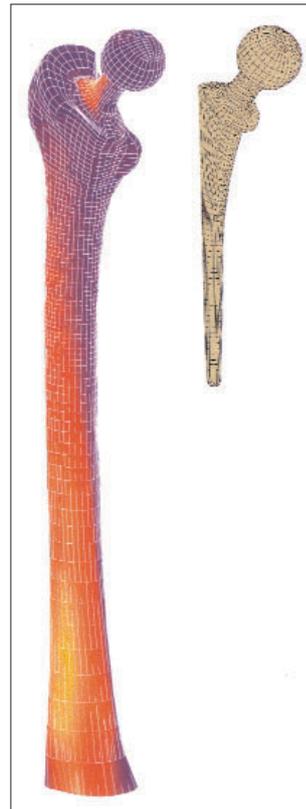


Abbildung 13
Berechnete Beanspruchungsverteilung als Farbbild in einem rechten Femur mit implantiertem Hüftschaft bei einer Hüftgelenksbelastung von 2500 N (gelbe und rote Farben markieren Zugspannungen, die blauen Bereiche werden auf Druck beansprucht)

Literatur

- /1/ Gabbert, U., Raecke, I.: *Technische Mechanik für Wirtschaftsingenieure*, Carl Hanser Verlag, Fachbuchverlag Leipzig 2003.
- /2/ Zienkiewicz, O. C., Taylor, R.L.: *The Finite Element Method*, McGraw-Hill 1967. Fifth edition published by Butterworth-Heinemann 2000.
- /3/ Dankert, J., Gabbert, U.: Grundlagen des Programmsystems COSAR, *Berichte der Tagung Festkörpermechanik*, Fachbuchverlag, Leipzig, 1976, Bd. A, Beitrag XII.
- /4/ Gabbert, U.: Research activities in smart materials and structures and expectations to future developments. *J. of Theoretical and Applied Mechanics*, 3, 40, 2002, pp. 549-574.
- /5/ Gabbert, U., Wehner, P.: The product data model as a pool for CAD- and FEM-data. *Engineering with Computers*. (1998) 14: 115-122.
- /6/ Gabbert, U., Köppe, H., Seeger, F., Berger, H.: Modeling of smart composite shell structures. *J. of Theoretical and Applied Mechanics*, 3, 40, 2002, pp. 575-593.
- /7/ Berger, H., Gabbert, U., Köppe, H.: Designing high precision smart structures by the finite element method, in Ohayon, R., Bernadou, M. (Eds.): *Tenth International Conference on Adaptive Structures and Technologies*, Technomic Publishing Co., Inc. Lancaster, Basel 2000, pp. 501-507.
- /8/ Gabbert, U., Honecker, A., Köppe, H., Nipp, H.K.: Numerical analysis of large geomechanical problems in civil engineering by the dynamic relaxation technique. *Computing in Civil and Building Engineering*, A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, 1995, pp. 1275-1281.
- /9/ Grochla, J., Köppe, H., Gabbert, U.: Lösung komplexer dynamischer Aufgabenstellungen mit expliziten Verfahren auf Parallelrechnern, *PAMM*, Volume 2, Issue 1, 2003, pp.232-233.
- /10/ Seeger, F., Gabbert, U., Köppe, H., Fuchs, K.: Analysis and design of thin-walled smart structures in industrial applications. *SPIE Proceedings Series*, Vol. 4698, 2002, 342-350.
- /11/ Nestorović Trajkov T., Köppe, H., Gabbert, U.: Comparison of controller design approaches from a vibration suppression point of view, *SPIE Proceedings Series*, Vol. 5049, 2003, paper 39.
- /12/ Rohde, F., Raecke, I.: Festigkeitsanalyse eines menschlichen Kniegelenkes, in *Die Methode der finiten Elemente in der Biomedizin und angrenzenden Gebieten*, Universitätsverlag Ulm 1996.
- /13/ Rost, J., Liefeth, K.: Finite element analysis of micro-motions at the interface bone cement/prosthesis stem of total hip replacement, *Proceedings of the European Medical & Biological Engineering Conference*, Nov. 4-7, 1999, Vienna, Austria.
- /14/ *Denkschrift zur Didaktik der Mechanik*, erarbeitet von einem Ausschuss der Gesellschaft für Angewandte Mathematik und Mechanik (GAMM) unter Leitung von E. Stein, Deutsches Komitee für Mechanik, April 1999.



Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Ulrich Gabbert,

geboren 1947, studierte an der TH Magdeburg Maschinenbau/Stahlbau und promovierte dort 1974. Nach einer Tätigkeit als Berechnungsingenieur im Kombinat Pumpen und Verdichter Halle kehrte er 1979 als Oberassistent an die TH Magdeburg zurück. Von 1983 bis 1991 leitete er das Methodisch-

Diagnostische Zentrum Finite Elemente, das sich mit der Entwicklung von Berechnungssoftware und deren industrieller Anwendung befasste. Im Frühjahr 1990 war er Mitbegründer des Ingenieurbüros FEMCOS GmbH Magdeburg. Seit 1992 ist er Professor für Numerische Mechanik. 1993 initiierte er den interdisziplinären Forschungsverbund „Adaptive mechanische Systeme“, der unter seiner Leitung in den Jahren 1996 bis 2001 von der Deutschen Forschungsgemeinschaft als Innovationskolleg finanziell gefördert wurde. Seit 1997 ist er im BMBF-Leitprojekt „Adaptronik“ für den Arbeitsschwerpunkt „Modellierung“ verantwortlich. Er ist Mitbegründer des im Jahre 2002 von der DFG an der Otto-von-Guericke-Universität eingerichteten Graduiertenkollegs „Mikro-Makro-Wechselwirkungen.“ Schwerpunkte seiner Forschungen sind die ganzheitliche Modellbildung, Simulation und Optimierung von intelligenten Strukturen, die numerische Lösung von Mehrfeldproblemen, das Hochleistungsrechnen sowie die Genauigkeit und die Zuverlässigkeit von numerischen Methoden der Mechanik.