

# Fehlertoleranz bei Antrieben auf der Spur

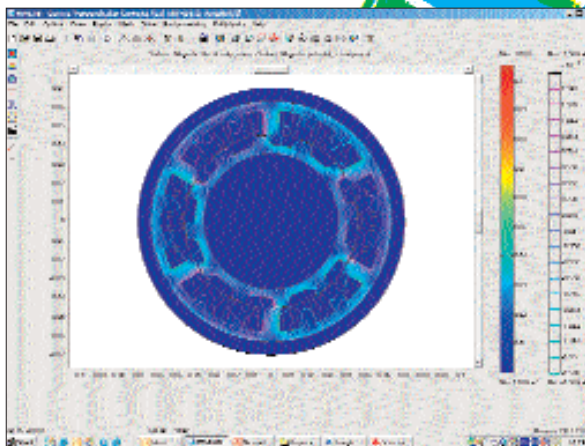
In vielen sicherheitskritischen Anwendungen ist es wünschenswert, einen Antrieb einzusetzen, der ein hohes Maß an Fehlertoleranz aufweist. Aufgrund seines einfachen Aufbaus ist hierfür der geschaltete Reluktanzmotor besonders geeignet. Der Einführungsbeitrag zur Coverstory beschreibt verschiedene Fehlereinflüsse auf das Verhalten eines derartigen Systems. Dabei wird das dynamische Verhalten durch ein mathematisches Modell abgebildet und im Rahmen von Simulationsrechnungen mit dem CAE-Tool Femlab analysiert. Kernstück der Modellbildung ist die geometrische und elektromagnetische gekoppelte Finite-Elemente-Methode.

Sein einfacher Aufbau macht den geschalteten Reluktanzmotor (SRM, Switched Reluctance Motor) besonders attraktiv für eine Fehlertoleranz-Analyse. Und dies, obwohl die einfache Struktur und Fertigung dieses Motors eines höheren Aufwands bei der Kommutierung bedarf. Auch ist der SRM nicht am starren Netz betreibbar, vielmehr ist der Einsatz von Leistungsumrichtern immer erforderlich. Dieses stellt freilich gegenüber anderen Antriebskonzepten wie Asynchron-

(ASM) oder Synchronmaschinen (SM) keinen Nachteil dar, da im Folgenden immer von geregelten Stellsystemen ausgegangen wird und diese im Falle von ASM und SM auch den Einsatz von Leistungsumrichtern erfordern. Vergleicht man darüber hinaus die Topologie typischer Leistungsumrichter für ASM und SM mit den von SRM-Umrichtern, so bedingt die Tatsache, dass bei einem typischen SRM-Umrichter die Leistungsschalter immer in Reihe mit den Spulenwicklungen des SRMs geschaltet sind, dass ein etwaiger Kurzschluss eines Leistungsschalters nicht zu einem Kurzschließen des Versorgungsnetzes führt. In einem solchen Fall kann die fehlerhafte Phase abgeschaltet und ein eingeschränkter Notbetrieb aufrechterhalten werden, so dass das Maß an Fehlertoleranz erhöht wird.

Da beim SRM ebenso wie bei der ASM auf Permanentmagnete verzichtet wird, werden bei stromlosen Phasenwicklungen aufgrund von induzierten Spannungen

*Juan D. Rodriguez Briso-Montiano, Robert Bosch GmbH, ist Hauptautor dieses Beitrags*



*Elektromagnetische Analyse eines 18/12 SRM im Normalbetrieb mit magnetischen Feldlinien und magnetischer Flussdichte*

Bilder (13): Bosch



keine drehmomentbildenden elektrischen Ströme generiert. Daher besitzt der SRM die sogenannte Fail-silent-Eigenschaft, was bedeutet, dass nach dem Auftreten eines oder mehrerer Fehler durch Ausschalten der magnetischen Erregung sich der Antrieb dennoch ruhig verhält, also auf das Restsystem beispielsweise keinen bremsenden Einfluss hat. Bei einer geeigneten gewählten Topologie kann auch bei dem Ausfall einer Phase der SRM weiterarbeiten. Dieser Betriebsmodus ist möglich, wenn eine größere Anzahl von Polen pro Phase vorhanden ist, oder dort, wo die Pole getrennt voneinander erregt werden können.

Das komplette Antriebssystem besteht aus SRM, Umrichter, Rotor-Positionsgeber und einer elektronischen Einheit für die Ansteuerung und die Realisierung der Kommutierungs- und Regelungsstrategie. Beim Design eines fehlertoleranten Systems, besonders bei der Entwicklung von Regelungs- und Ansteuerungsverfahren, müssen gute Kenntnisse über das dynamische Verhalten des Reluktanzmotors vorliegen. Alle Fehler, die im Gesamtsystem vorkommen können, müssen dabei betrachtet werden. Entscheidend ist, dass keine elektrischen Fehler im Rotor des SRM auftreten können, denn es gibt weder Magnete, Bürsten noch Wicklungen im Rotor. Anders sieht es bei mechanischen Defekten aus, etwa Lagerfehlern, die zum Taumeln des Rotors führen. Diese Effekte werden als statische oder dynamische Exzentrizität des Rotors bezeichnet. Die konzentrierten Wicklungen des Stators können zu elektrischen Fehlern führen und den Umrichter schädigen. Daneben können elektrische Fehler im Rotor-Positionsgeber fehlerhafte Kommutierungen bewirken.

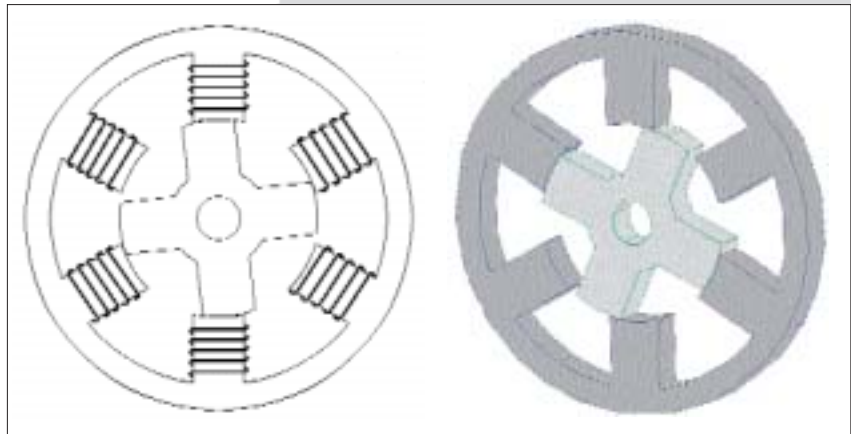
Im vorliegenden Artikel wird nun eine Methode erläutert, die es ermöglicht, das Verhalten von SRM unter normalen und fehlerhaften Betriebsbedingungen darzustellen. Dieser Artikel beschreibt einen Modellbildungsprozess, bei dem das dynamische Verhalten des Motors, teilweise unter Zuhilfenahme einer FE-Analyse, abgebildet wird. Hierbei finden die folgenden Betriebs- und Fehlermodi Berücksichtigung:

- fehlerfreier Betrieb,
- geöffnete Phase während des Betriebs,
- statische Exzentrizität des Rotors,
- dynamische Exzentrizität des Rotors.

Es entstehen Modelle, anhand derer die betrachteten Fehler mittels charakteristischer dynamischer Systemantworten diagnostiziert werden. Diese Modelle sind die Basis für die Entwicklung von Regelungsstrategien, die auch beim Auftreten von Fehlern einen Notbetrieb des SRMs ermöglichen.

**Analyseverfahren und Modellbildung.** Die Erfahrung lehrt, dass der Aufbau von Prototypen sehr kostspielig und zeitaufwendig ist. Daher wird in einem ersten Schritt versucht, die auftretenden Fragen mittels Simulationsrechnungen zu beantworten, vorausgesetzt, dass ein die Effekte beschreibendes Modell vorhanden ist.

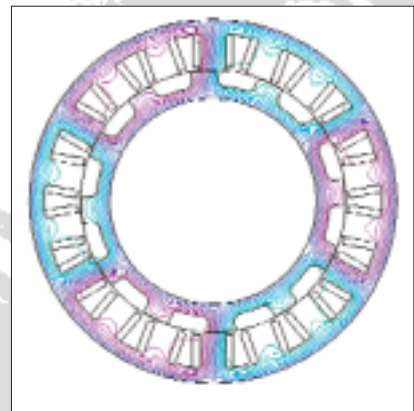
Während ein analytisches Modell Aussagen zur Abschätzung der Systemantwort gibt, benötigt man aufgrund des nichtlinearen Charakters des Motors für genauere Einblicke eine Methode, die diesen nichtlinearen Effekten, besonders im magnetischen Kreis, gerecht wird. Als erste Wahl hat sich die Methode der Finite-Element-Analyse (FEA) mittels Fem-



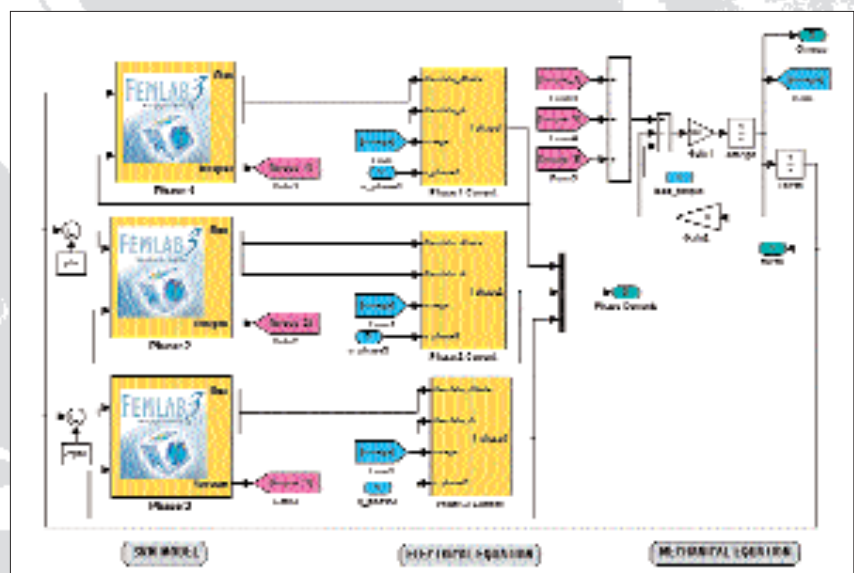
**Topologie eines 6/4-Reluktanzmotors, die als Grundlage der Analysen diente.** Der Motor besteht aus einem Stator mit einer geraden Anzahl von Polen (hier sechs) und einem Rotor (hier vier Pole). Auf den Polen des Stators befinden sich die Wicklungen. Fließt durch eine Phasenwicklung Strom, werden jeweils zwei gegenüberliegende Statorpole magnetisch erregt. Es bildet sich ein magnetischer Kreis, dessen Widerstand sich mit der gegenseitigen Stellung von Rotor- zu Statorpolen verändert. Es wird auf den Rotor solange ein Drehmoment ausgeübt, bis der energetisch minimale Zustand erreicht wird. Um eine fortlaufende Rotation des Rotors zu gewährleisten, muss beim Erreichen dieses Zustands auf eine nächste Phasenwicklung geschaltet werden, deren magnetischer Kreis in Richtung der gewünschten Rotorbewegung einen maximalen negativen Gradienten des magnetischen Widerstands aufweist. Die entsprechende Kommutierungsstrategie der Phasenwicklungen wird über eine elektronische Steuereinheit umgesetzt.

lab herausgestellt, die mit einer Verhaltenssimulation basierend auf Matlab und Simulink kombiniert wird.

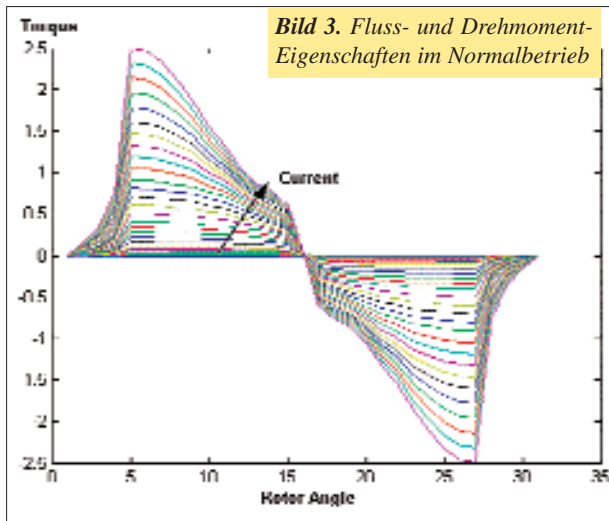
Das Simulink-Modell lässt sich in drei Hauptbestandteile aufteilen. Der erste ist ein FE-Modell eines 18/12 SRM (Topologie in Bild 1 dargestellt). Es beschreibt die magnetischen Verhältnisse in der Maschine, wobei die komplexe Berechnung mittels Femlab durchgeführt wird. Die Einbettung in das Simulink-Modell erfolgt durch die mit dem Femlab-3-Logo gekennzeichneten Blöcke gemäß Bild 2. Koppelgrößen sind hierbei das Drehmoment, die Phasenströme, der Rotorwinkel und die differentiellen magnetischen Flüsse.



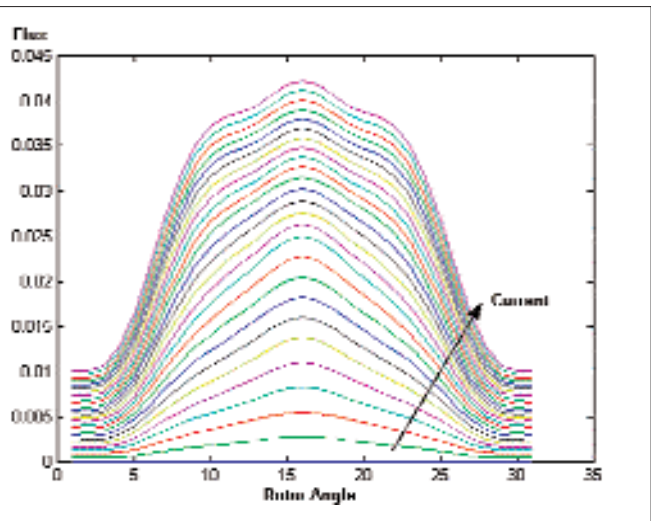
**Bild 1. Elektromagnetische Analyse eines 18/12 SRM**



**Bild 2. Grundstruktur des Simulink-Modells**



**Bild 3. Fluss- und Drehmoment-Eigenschaften in Normalbetrieb**



Der zweite Hauptbestandteil beschreibt das elektrische Verhalten der Statorspulen. Hier gilt pro Phase die Spannungsgleichung (1):

$$V = Ri + \frac{d\psi(\theta_m, i)}{dt} = Ri + \frac{\partial \psi(\theta_m, i)}{\partial i} \frac{di}{dt} + \frac{\partial \psi(\theta_m, i)}{\partial \theta_m} \frac{d\theta_m}{dt}$$

In der Gleichung (1) bedeutet  $V$  die Klemmenspannung jeder Phase des SRM,  $i$  ist der jeweilige Phasenstrom,  $R$  der ohmsche Spulenwiderstand,  $v_m$  ist die mechanische Winkelgeschwindigkeit des Rotors,  $\theta_m$  die Rotorposition und  $\psi$  ist der im magnetischen Kreis erzeugte Fluss.

Der erste Ausdruck auf der rechten Seite der Gleichung beschreibt den Ohm'schen Spannungsabfall in der Phasenwicklung, der zweite Ausdruck die gespeicherte Energie und der dritte Aus-

druck beschreibt den Einfluss des rotierenden Rotors. Der differentielle magnetische Fluss steht in einem nichtlinearen Zusammenhang mit der Rotorposition und dem durch die Wicklung fließenden Phasenstrom  $i$ . Dieser Zusammenhang wird durch eine FE-Berechnung approximiert.

Drehmoment und Rotorgeschwindigkeit werden durch Gleichung (2) in Beziehung gesetzt:

$$T_e - T_l = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m$$

Hierbei bezeichnen  $T_e$  das erzeugte Drehmoment,  $T_l$  das Lastmoment,  $J$  die Trägheit des Rotors und  $B$  den Reibungskoeffizienten.

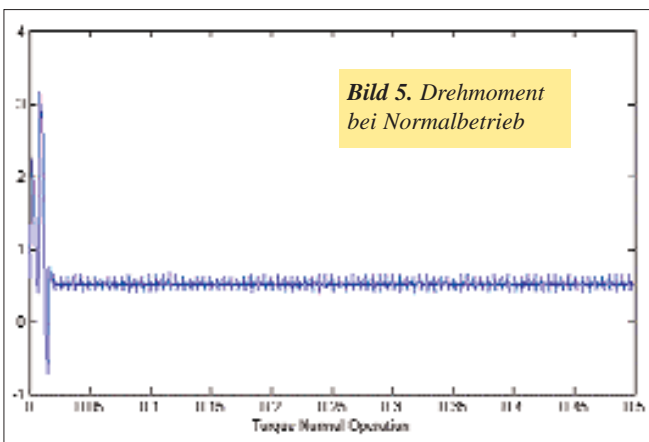
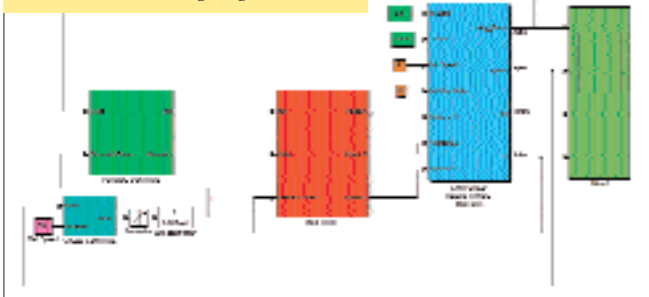
Der zuvor aufgezeigte Weg nutzt die direkte Matlab-Femlab-Kopplung. Hierbei wird bei jedem Integrationsschritt von Simulink eine gesamte Berechnung durchgeführt, was zu sehr langen Rechenzeiten führt. Um dies zu verhindern, wird ein Weg über eine Interpolationstabelle vorgezogen. Die Elemente dieser Tabelle werden aus Ergebnissen der FEA in Abhängigkeit des Phasenstroms und der Rotorposition erzeugt. Der Vorteil dieser Methode ist, dass die Berechnungen nur einmal für jede relevante Rotorposition und den Phasenstromwert durchgeführt werden müssen. Der durch die Interpolation hervor-

gerufene Fehler ist im Sinne der Aufgabenstellung vertretbar. Die Ergebnisse der Gesamtsimulation hängen stark von der Quantisierung des Betriebsbereichs und dessen Einfluss auf die Betriebspunktmatrix ab, deren Elementanzahl die Anzahl der erforderlichen Berechnungen bestimmt. Hierbei ist in Abhängigkeit der Ausrichtung der Aufgabenstellung der Trade-Off zwischen Modellfehler und Berechnungszeit zu treffen.

Im Fehlerfall weichen die Werte der Ohm'schen Wicklungswiderstände  $R$  und die der differentiellen magnetischen Flüsse von ihren Normwerten ab. Diese Abweichungen spiegeln sich sofort im Verlauf der Phasenströme und in dem vom Motor erzeugten Drehmomentverlauf wider, wodurch sich die Möglichkeit einer Fehlerdiagnose eröffnet. Entscheidend ist jedoch, dass all diese Effekte auch mittels Simulationsrechnungen gezeigt werden, was eine entsprechende Modellgüte erfordert.

**Fehleranalyse.** Die Kenntnis der Abhängigkeit der Flussverkettungen und ihre Änderungsrate als Funktion von Phasenstrom und Rotorposition sowie die der Drehmomentverteilung ist erforderlich, um bei gefordertem Systemverhalten eine

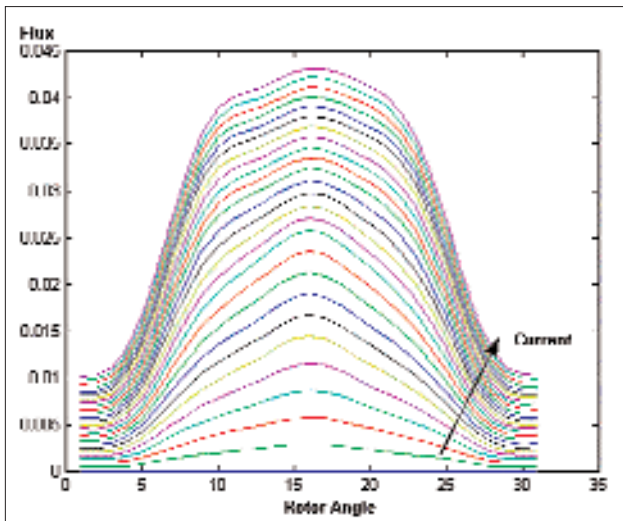
**Bild 4. Modell des geregelten SRM**



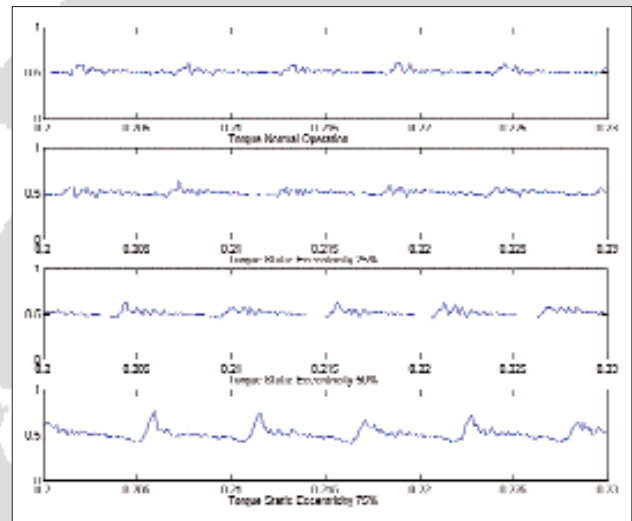
**Bild 5. Drehmoment bei Normalbetrieb**



**Bild 6. Elektromagnetisches Verhalten in einem exzentrischen Rotor**



**Bild 7.** Fluss und Drehmoment-Eigenschaften mit 50 Prozent statischer Exzentrizität



**Bild 8.** Drehmomentverlauf im normalen Betrieb und im Betrieb mit statischer Exzentrizität

Strategie für eine Strom- beziehungsweise Drehmoment-Regelung in Abhängigkeit des Systemzustands (Normalbetrieb, Fehlerfall) für den SRM zu entwickeln.

Das Spektrum der in der Realität auftretenden Maschinenfehler lässt sich sehr gut auf grundlegende Veränderungen in der Maschine abbilden. Die Hauptmerkmale sind:

- geometrische Veränderungen, zum Beispiel hervorgerufen durch Lager-schäden
- Veränderungen der Materialeigen-schaften, wie Leitfähigkeit und Perme-abilität des Materials aufgrund erhöhter Betriebstemperatur
- Veränderungen der Windungszahl in einer Wicklung, zum Beispiel hervor-gerufen durch Windungskurzschlüsse
- Veränderungen der Wicklungswider-stände, zum Beispiel verursacht durch Wicklungskurzschluss oder Leiter-bruch.

Alle diese Struktur- und Parameterän-derungen müssen bei der Modellbildung berücksichtigt werden, wobei sich die speziellen Veränderungen auf Maschinen-seite in einer Anpassung des FE-Modells ausdrücken. Im Folgenden werden vier Fälle betrachtet:

- Normalbetrieb bei einer Drehzahl von 500 Umdrehungen pro Minute
- Betrieb mit exzentrischem Rotor, wo-bei mehrere Abweichungen (25, 50 und 75 Prozent) von der Normposition betrachtet werden (statische Exzentriz-ität)
- Dynamisch exzentrischer Rotor mit mehreren Abweichungen (25, 50 und 75 Prozent) von der mittigen Position
- Betrieb mit einer offenen Phase.

Alle internen Fehler, die den magneti-schen Kreis betreffen, müssen durch ein modifiziertes FE-Modell abgebildet werden. Die FEA liefert dann für die entspre-chenden Arbeitsbereiche die Elemente der

Interpolationsta-bellen, mit der das Simulink-Modell parametrisiert wird. Dieses Mod-ell ist schließlich die Basis der Fehlersimulation.

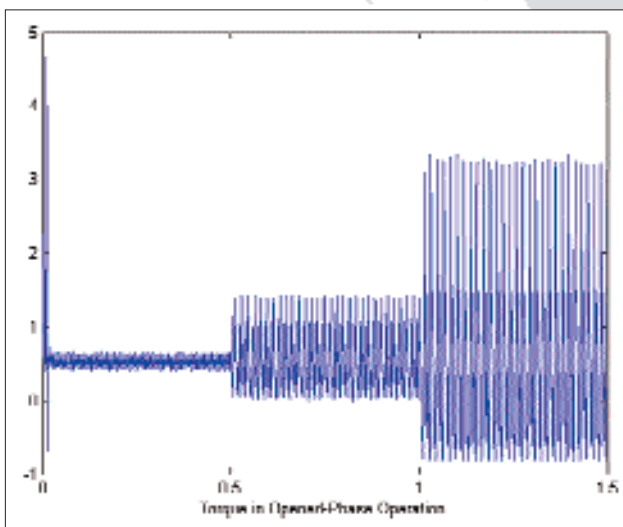
**Normalbe-trieb.** Im fehler-freien Fall erhält man als Resultat der FEA für den Fluss und für das charakteristische Drehmoment den in Bild 3 darge-stellten Zusam-menhang. Aus diesen Daten wird die Interpolations-tabelle generiert

und in das Simulink-Modell übernom-men. Da am Verhalten eines über Dreh-momente geregelten SRM Interesse be-steht, wird das Modell aus Bild 2 um die entsprechenden Reglerbausteine er-weitert. Es ergibt sich das Modell des ge-regelten SRM, wie es Bild 4 zeigt. Die mechanische Last des Systems wird mit 0,5 Newtonmeter vorgegeben. Die Simu-lation der Drehmomentsprungantwort zeigt das erwartete Verhalten, wie es Bild 5 zeigt: nach dem transienten Anlauf er-reicht das System einen stabilen stationä-ren Endzustand.

**Statische Exzentrizität.** Bei diesem Fehler arbeitet die Maschine mit einem Rotor in exzentrischer Lage. Die Folge sind unterschiedliche Luftspaltweiten. Bei der Modellierung wird angenommen, dass die Rotor-Achse um 0,075, 0,15 und 0,225 Millimeter nach rechts von seiner ur-sprünglichen Position versetzt wurde. Die-ser Versatz entspricht einer Exzentrizität von 25, 50 beziehungsweise 75 Prozent.

Da der Rotor um seine eigene Achse ro-tiert und diese exzentrisch zur Statorachse angeordnet ist, spricht man von einer stati-schen Exzentrizität. Die Berechnungen ergeben in diesem Fall eine magnetische Feldverteilung, wie sie in Bild 6 zu sehen ist. In den Bereichen niedriger Reluktanz, bedingt durch den kleineren Luftspalt, erhält man eine höhere Dichte des magneti-schen Flusses. Folglich ergibt sich eine unsymmetrische Verteilung von Fluss und Drehmoment (Bild 7).

Wie zuvor werden die Resultate der Be-rechnung in das Simulink-Modell des ge-regelten SRM übernommen. Bild 8 zeigt das Drehmomentverhalten des geregelten SRM in Abhängigkeit der drei betrachte-ten Grade der Exzentrizität. Deutlich ist zu erkennen, dass mit steigendem Grad der Exzentrizität die Drehmoment-Wel-ligkeit zunimmt.



**Bild 9.** Drehmomentverlauf mit zeitlich nacheinander deakti-vierten Phasen

**Dynamisch-exzentrischer Rotor.** Bei dieser Betrachtung ist die Rotorachse ebenfalls bezüglich der Stator-Bohrungsachse versetzt. Im Gegensatz zum Fall der statischen Exzentrizität beschreibt hier die Rotorachse zusätzlich eine kreisförmige Bewegung um die Stator-Bohrungsachse. Man kann auch sagen, dass der Rotor um die Stator-Bohrungsachse taumelt. Dieser Zustand wird dynamische Exzentrizität genannt. Für die Analyse des Systemverhaltens wurde der Radius dieser Kreisbewegung jeweils zu 0,075, 0,15 und 0,225 Millimeter angenommen. Die FEA zeigt, dass die Dichte der Flusslinien im rechten Abschnitt noch höher ist als bei der statischen Exzentrizität. Der verzerrte Drehmomentverlauf lässt für den geregelten Betrieb eine höhere Drehmoment-Welligkeit erwarten. Diese bestätigt sich auch in der Simulation.

**Deaktivierte Phasen.** Dieser Fehler tritt zum Beispiel auf, wenn eine Wicklung bricht oder eine Phase des Leistungsstellers ausfällt. Zum Studium dieses Fehlertyps muss keine Modifikation am FE-Modell durchgeführt werden. Es ist aus-

reichend, bei der Berechnung lediglich die Stromanregung entsprechend zu wählen. Die Resultate dieser Berechnungen werden in entsprechende Interpolationstabellen in Simulink abgelegt, die dann beim Auftreten dieses Fehlers phasenselektiv umgeschaltet werden. Bild 9 zeigt als Ergebnis der Simulation einen Drehmomentverlauf, bei dem nach einer Zeit von 0,5 Sekunden eine Phase und nach 1 Sekunde eine weitere Phase deaktiviert wurde.

**Zusammenfassung.** In diesem Artikel wurde eine Vorgehensweise erläutert, wie sich anhand einer FEA das Verhalten eines SRM beim Auftreten spezieller Fehler analysieren lässt. Als Simulationsbasis wurde ein Simulink-Modell verwendet, bei dem die magnetischen Verhältnisse in der Maschine durch eine FE-Berechnung im CAE-Tool Femlab abgebildet wurden. Hierbei ergaben sich im Prinzip zwei Möglichkeiten. Die erste nutzt die direkte Kopplungsmöglichkeit von Femlab und Matlab/Simulink. Die zweite Möglichkeit führt über den Einsatz von Interpolationstabellen in Simulink, deren Elemente aus

den Resultaten der Femlab-Berechnungen gebildet wurden. Dieser Weg hat den Vorteil, dass gegenüber dem ersten die Simulationszeiten verringert werden. Allerdings sind im Vorfeld der Simulation für alle relevanten Betriebspunkte die FE-Berechnungen durchzuführen, um die erforderlichen Interpolationstabellen zu füllen. Die in diesem Artikel gezeigten Simulationsergebnisse basieren auf dieser Vorgehensweise.

JUAN R. BRISO-MONTIANO, ROLAND KARRELMAYER, ELMAR DILGER

#### INFOCORNER

Die Autoren sind in der Abteilung CR/AEF der Robert Bosch GmbH am Standort Schwieberdingen tätig. Zum Fehlerverhalten von geschalteten Reluktanzmotoren gibt es umfangreiche Literatur. Die Autoren verweisen hierzu gerne auf interessante Beiträge je nach Interessenslage.

Kontakt per E-Mail:

[Juan.Rodriguez3@de.bosch.com](mailto:Juan.Rodriguez3@de.bosch.com)

Weitere Informationen zu Femlab über [www.femlab.de](http://www.femlab.de)

## Auf vielen Hochzeiten gleichzeitig

**Mechatronik ist ein Paradebeispiel für multiphysikalische Aufgabenstellungen. Über Erfahrungen im Umgang mit CAE-Tools in dieser Hightech-Domäne sprach die Redaktion mit dem Leiter der Abteilung „Modellierung und Simulation“ des Fraunhofer-Instituts für Integrierte Schaltungen, Peter Schwarz.**

**Herr Dr. Schwarz, die Fraunhofer-Gesellschaft hat ja eine ganze Menge an Instituten. Kann die Einrichtung, an der Sie tätig sind, auf eine Alleinstellung verweisen?**

Aber sicher – zumindest was Umfang und Breite unserer Arbeit auf dem Gebiet der Simulation betrifft. Natürlich setzen auch viele andere Institute die Simulation in ihren Arbeitsgebieten – z. B. Energieversorgung, Logistik, Gebäudeauslegung oder Halbleitertechnologie – als wesentliches Hilfsmittel ein und entwickeln diese Methode weiter. Wir unterstützen Firmen bei der Entwicklung ihrer Anlagen, Geräte und Komponenten vor allem durch einen weitgefächerten Einsatz von Simulationswerkzeugen, bereiten dies durch Modellierung vor und setzen die Simulation auch für die Testvorbereitung

und die Optimierung der künftigen Produkte ein. Diese Arbeiten werden ergänzt durch die Entwicklung mathematischer Verfahren für Modellierung und Simulation, die zu neuen Softwarewerkzeugen führen und die als Add-on-Tools zu den weit verbreiteten, kommerziell verfügbaren Simulatoren eingesetzt werden.

**Wo kommen Ihre Dienstleistungen zum Einsatz?**

Die wichtigsten Anwendungsgebiete reichen von der Mikro- und Nanoelektronik über die Mikrosystemtechnik und Mechatronik bis zum Maschinen- und Anlagenbau, der Kommunikations- und Automatisierungstechnik.

**Typisch sind in diesen Bereichen Systeme, bei denen elektrische, mechanische, magnetische, fluidische und thermische Phänomene zusammenwirken. Mit welchen Herausforderungen ist man in diesem Multi-Domain-Engineering konfrontiert?**

Es muß das gesamte Spektrum von räumlich „winzigen“ Abmessungen im Mikro-

**„Unsere Grundsatz lautet: So genau wie nötig – und nicht so genau wie möglich – simulieren“**

**Kennt die Klaviatur der Physik rauf und runter: Peter Schwarz, Fraunhofer IIS, Außenstelle Entwurfsautomatisierung (EAS Dresden), Abteilung „Modellierung und Simulation“**



Bild: Fraunhofer IIS

meterbereich, zum Beispiel bei Sensoren, bis hin zu lokalen oder globalen informationstechnischen Vernetzungen überstrichen werden. Wir sprechen in diesem Zusammenhang gerne auch von „Multiphysics“ oder, wie Sie es nannten, „Multi-Domain“-Problemen. Für das detaillierte Verständnis des Gesamtsystems reicht häufig ein einziger Simulator nicht aus, oder aber sein Einsatz wäre mit unverträglichem hohem Modellierungsaufwand verbunden. Deshalb verwenden wir oft gekoppelte Simulatoren, wofür wir eigene Koppelsoftware entwickelt haben, die von Sockets auf der TCP/IP-Ebene bis zum Einsatz von Middleware wie Corba oder HLA reicht...

**... was geradezu prädestiniert ist für den Multiphysik-Experten?**

Wenn Sie wollen, ja. Mikrosystemtechnik

und Mechatronik sind typische Disziplinen für die Anwendung von gekoppelten Multiphysik-Rechnungen. Deshalb befassen wir uns insbesondere mit den elektrisch-mechanischen Wechselwirkungen in Sensoren und Aktoren, den thermisch-elektrischen Wechselwirkungen im Chip-Entwurf und den mechanisch-magnetisch-elektrischen Wechselwirkungen bei Aktuatoren wie Relais, Hubmagnete oder Linearmotoren. Übrigens haben wir uns bereits zu einem Zeitpunkt mit der Mixed-Signal-Simulation beschäftigt, als die kommerziell verfügbaren Simulatoren diese Aufgabe noch nicht genügend gut unterstützen konnten.

### Spielt das Design in 3D eine Rolle?

In der Mechatronik werden häufig Mehrkörpersimulationen im 1D- bis 3D-Bereich durchgeführt – oder, mathematisch gesprochen, werden Systeme gewöhnlicher Differentialgleichungen gelöst. In den mehr „mikroskopischen“ Anwendungsgebieten der Mikro- und Nanotechnologie spielt die 3D-Berechnung von Feldern und der Kopplung verschiedener Effekte auf Feldebene eine große Rolle. Viele Sensoren und Aktuatoren, beispielsweise Druck- und Beschleunigungssensoren, werden mit Hilfe von FEM-Simulatoren entwickelt, da zu ihrem Verständnis Feldprobleme mit Lösungsverfahren für partielle Differentialgleichungen behandelt werden müssen. Aus diesen Gründen ist auch das Zusammenspiel mit 3D-CAD-Programmen so wichtig, das erfreulicherweise durch die neutralen Austauschformate wie Iges und Step unterstützt wird.

### Im FEM-Bereich setzt Ihre Abteilung als „Universalsimulator“ das CAE-Tool Ansys ein. Dennoch setzen Sie auch auf das Berechnungsprogramm Femlab. Womit konnte Sie dieser Systemanbieter überzeugen?

An Femlab hat uns von Anfang an die Fokussierung auf Multiphysik-Phänomene interessiert. Hinzu kommt die Verfügbarkeit von Modellen für spezielle, aber sehr wichtige Bereiche wie Brennstoffzellen. Auch die ursprüngliche enge Verbindung mit Matlab war für uns interessant, da auch wir die Matlab/Simulink intensiv nutzen. Und schließlich war die Bereitschaft der Firma, mit uns auf dem Gebiet der Simulatorkopplung zusammenzuarbeiten, ein wichtiges Motiv für den Einsatz des Tools. Dadurch können wir jetzt Ansys und Femlab mit Schaltungs- und Systemsimulatoren koppeln.

### Erhalten Sie genügend Unterstützung durch das Support-Team von Femlab?

Auf jeden Fall, denn für unsere Nutzungsweise ist der Zugriff auf einige si-

mulatorinterne Daten erforderlich. Und den hat uns das Femlab-Team ermöglicht, wofür wir besonders dankbar sind. Der Zugriff auf interne Daten hat es uns auch ermöglicht, die Systemmatrizen aus Femlab zu exportieren. Im Falle linearer Systeme können wir anschließend mit mathematischen Verfahren der Ordnungsreduktion automatisch Modelle für eine Gesamtsystemsimulation erzeugen, die um Größenordnungen weniger Variable haben und entsprechend weniger Rechenaufwand benötigen, trotzdem aber noch ausreichend genau sind und daher in Systemsimulatoren eingesetzt werden können. Dafür werden die reduzierten Modelle als C-Code, als Matlab/Simulink-Beschreibung oder in verbreiteten Modellbeschreibungssprachen wie VHDL-AMS, Verilog-AMS oder Modelica ausgegeben.

### Worauf kommt es bei der Gesamtsimulation an? Gilt dabei eine Art Superpositionsprinzip?

Ja, wenn Sie unter Superposition – die im engeren Sinne ja nur für lineare Probleme gilt! – ein kluges Partitionieren eines Gesamtsystems, die effiziente Modellierung der Teilsysteme und anschließend das Zusammenfügen der Teilmodelle in einem Simulationslauf verstehen. In jedem Fall ist es wichtig, für jedes Teilsystem den „optimalen“ Simulator auszuwählen. Dies wird durch die Simulationsalgorithmen, die Modellbibliotheken und natürlich den Erfahrungsreichtum des Entwicklers bestimmt. Wichtig ist zudem, dass für jedes Teilsystem die geeignete Modellebene und Modellierungstiefe festgelegt wird, dass der Prozess der Modellbildung durch geeignete Software-Werkzeuge unterstützt wird und dass es verstanden wird, die Simulatoren richtig zu koppeln – im einfachsten Fall offline

durch Weiterreichen von Simulationsergebnissen, bei sehr vermaschten Systemen auch durch Online-Kopplung. Mit dieser Strategie lassen sich auch Regelvorgänge, die nur im Gesamtsystem verstanden werden können, analysieren. Das ist vor allem bei adaptiven Systemen wichtig, die sich automatisch an ihre Umgebung anpassen. Übrigens lautet unser Grundsatz stets dabei: So genau wie nötig – und nicht so genau wie möglich – simulieren!

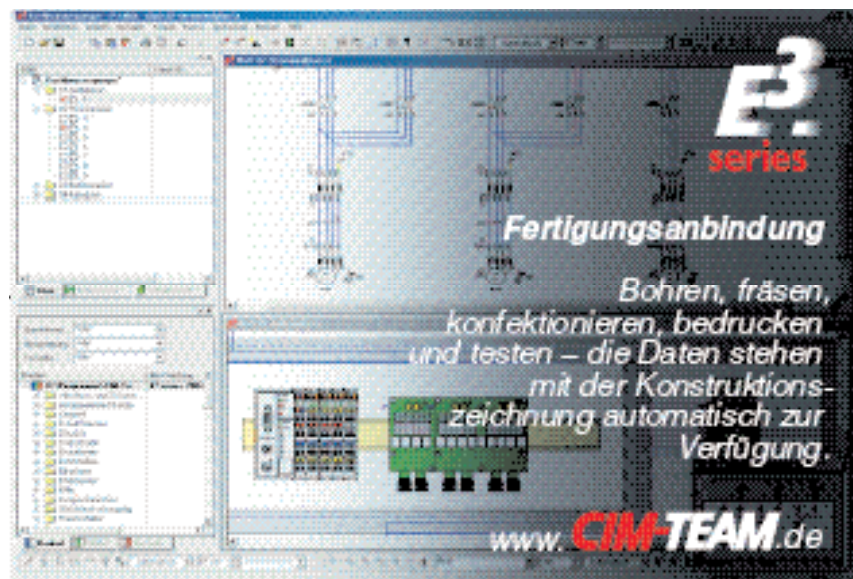
### Sie haben bereits auf die gute Zusammenarbeit mit Femlab hingewiesen. Doch scheint Ihre Sympathie für den Systemanbieter noch andere Gründe zu haben...

Wir glauben, dass der Systemanbieter ein sehr kundenorientiertes Marketing einsetzt und sich damit – zum Glück für die Anwender – in eine Reihe erfolgreicher CAD-Firmen einfügt. Dazu gehört auch die Übernahme von Dienstleistungen für Firmen, die noch nicht viele eigene Erfahrungen sammeln konnten. Von dieser Kundenorientierung profitieren wir bei den bereits erwähnten Unterstützungen für die Simulatorkopplung. Es hilft uns aber auch bei den Gesprächen mit unseren eigenen Kunden, die eine sachkundige und neutrale Beratung beim Einsatz von CAD-Techniken erwarten. Umgekehrt benötigen wir für die Vermarktung der bei uns entwickelten CAD/CAE-Werkzeuge einen geeigneten Vertriebspartner, der Femlab vielleicht werden könnte...

### Vielen Dank für das Gespräch!

INTERVIEW: BERNHARD D. VALNION

Weitere Informationen über das Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen unter: [www.eas.iis.fhg.de](http://www.eas.iis.fhg.de)



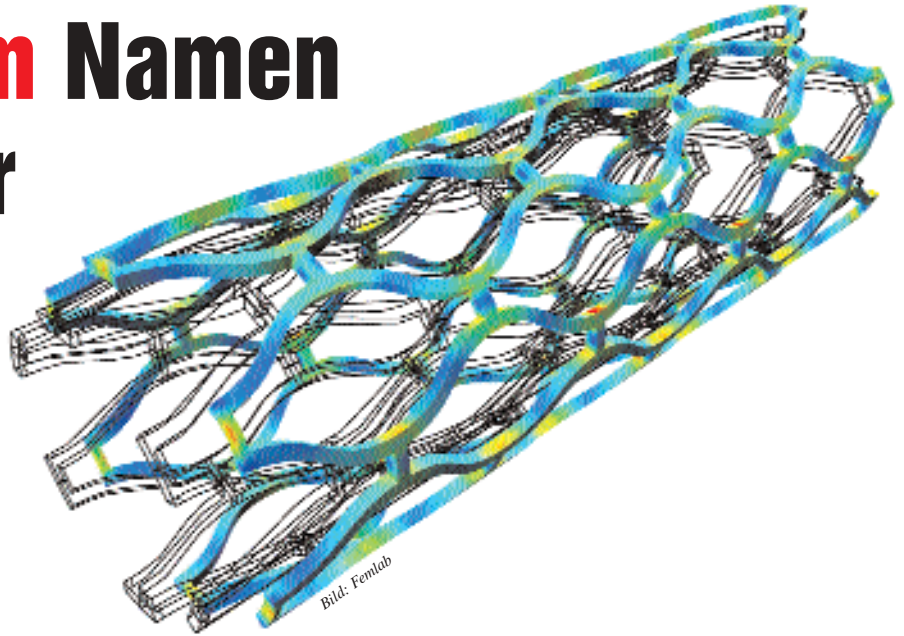
# Unter **neuem** Namen noch besser

**C**omsol Multiphysics 3.2 tritt die Nachfolge der weltweit eingesetzten Software Femlab 3.1 an. Mit dem neuen Namen will der Systemanbieter auf das breite Anwendungsspektrum der Software für technisch-wissenschaftliche Berechnungen noch deutlicher als bisher hinweisen. Svante Littmarck, CEO von Comsol Inc., sagte dazu auf Anfrage: „Wir haben uns für die Umbenennung entschieden, weil der neue Name entscheidend mehr Potenzial für unsere wachsende Produktlinie trägt.“ Wie bereits seit Jahren in Japan würde nun die Bezeichnung „Comsol Multiphysics“ weltweit verwendet.

Das neue Release weiß mit einer Vielzahl von Neuerungen zu glänzen. Vor allem Nutzer aus der Industrie dürften die neue CAD-Schnittstelle zu schätzen wissen. Sie erleichtert den Import von CAD-Daten in das Simulationsprogramm. Mit den optionalen Import-Modulen lassen sich nunmehr fast alle etablierten CAD-Formate und gar komplette Netze einlesen. Unterstützt werden unter anderem SolidWorks, Solid Edge, NX und Nastran. Die Grundfunktionalität wird vom CAD-Import-Modul bereitgestellt, das auf dem Parasolid-Geometriekern basiert und mit Hilfe von Acis auch das SAT-Format verarbeiten kann. Daneben ist der Import der Dateiformate Step und Iges möglich. Die Synchronisation mit dem CAD-Programm SolidWorks bildet eine produktive Umgebung für Design und Simulation. Zusätzlich erhältlich sind weitere CAD-Import-Module für die Formate Catia V4 und V5, Autodesk Inventor, Pro/Engineer und VDA-FS.

Völlig neue Möglichkeiten erschließen sich dem Anwender durch die Integration der Skriptsprache „Comsol Script“ in das Multiphysik-Tool. Die auch unabhängig erhältliche Interpretersprache gestattet flexiblere Lösungen von Modellierungsaufgaben durch zeilenorientiertes Programmieren per Skript oder Kommandozeile mit einem Umfang von 500 Befehlen für numerische Berechnungen und Visualisierungen.

Auch umgekehrt lassen sich Funktionen von Comsol Script in die grafische Benutzeroberfläche des Tools einbinden, um beispielsweise spezielle Modelleigenschaften zu definieren. Außerdem kann eine komplette Simulation, die zuvor über die grafische Benutzeroberfläche erstellt wurde, anschließend als zeilenorientierte



*Ein Stent ist eine Röhre mit einer Wand aus Drahtgeflecht, mit der eine Arterie während einer Angioplastie offen gehalten wird. Er wird über einen Ballonkatheter gezogen. Wird dieser aufgeblasen, dehnt er sich aus und verformt den Stent bis zur gewünschten Größe. Anschließend verbleibt der Stent in der Arterie, hält diese offen und verbessert den Blutdurchfluss zum Herzmuskel. Dieses Modell untersucht die Ausdehnung des Stents unter Berücksichtigung seiner superelastischen Eigenschaften. Mit dem „Structural Mechanics“-Modul von Comsol Multiphysics 3.2 können die von Mises Spannungen modelliert werden und seine mechanischen Eigenschaften modelliert werden.*

Model-M-Datei gespeichert, verändert und ausgeführt werden. Mit der Interpretersprache lassen sich mit nur geringem Aufwand iterative Parameterstudien und Optimierungsrechnungen durchführen.

Neu ist auch das System für die physikalischen Einheiten: alle Eingabemaschinen und Grafikausgaben kennzeichnen die Eingabeparameter mit den entsprechenden Einheitenkürzeln. Das macht es leicht, auch für Größen mit komplizierten, zusammengesetzten Einheiten oder solchen, in denen mehrere Einheiten gebräuchlich sind, korrekte Zahlenwerte einzugeben. Neben dem SI-Einheitensystem kann der Anwender auch das MPa, das CGS und das nichtmetrische britische System auswählen.

**In Bewegung.** Mit der neuen Funktion „Bewegte Netze“ lassen sich bequem zeitlich veränderliche Geometrien simulieren. Bedienerfreundliche Eingabemaschinen erleichtern das Definieren bewegter Teile, wie sie in mikroelektromechanischen Systemen (MEMS) vorkommen, aber auch in der Piezoelektrik, in biologischen Anwendungen oder bei freien Oberflächen von Wasserwellen. Der Anwender definiert lediglich den Typ der Bewegung, etwa die Auslenkung eines beweglichen Balkens im Strom einer Flüssigkeit, eines Gases oder für die schwappende Wasseroberfläche in einem Tank. Gekoppelt mit der neuen Netz-Funktion ist die geometrische Parametrisierung, also eine vorgeschriebene Veränderung der Geometrie, in

einer Simulation. Kleinere geometrische Änderungen können so im Handumdrehen ohne Wiedervernetzung innerhalb einer Skriptdatei berücksichtigt werden.

Durch die neuen Gleichungslöser lassen sich nun auch größere Aufgabenstellungen in kurzer Zeit berechnen. Dank neuer Multigrid-Techniken für die Navier-Stokes-Gleichungen kann das Paket strömungsmechanische Probleme bis zu zehnmal schneller lösen als das Vorgänger-Release. Auch der Bereich des Speichermanagements wurde weiterentwickelt: Wurde bisher bei einigen Operationen nur das größte zusammenhängende freie Speichersegment ausgenutzt, steht jetzt der gesamte freie Speicher zur Verfügung. So können zeitabhängige Probleme der gleichen Größe wie stationäre Probleme gelöst werden.

Die verbesserten Solver machen Comsol Multiphysics zu einem FE-Programm, das die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen zeitabhängig berechnen kann. Diese Algorithmen sind für diejenigen interessant, die pulsformige Wellenphänomene simulieren möchten. Sie treten bei Radar oder in der Optik mit nichtlinearen Materialien auf. Die Software kann einen Frequenz-Sweep in einem Schritt ausführen; die Animationen verdeutlichen dabei, wie sich eine Welle ausbreitet und von Hindernissen gebeugt oder reflektiert wird. Elektromagnetische Analysen können nicht nur im Zeit-, sondern auch im Frequenzbereich oder miteinander gekop-

pelt durchgeführt werden. Zudem gibt es ein Interface, bei dem der Nutzer seine Koeffizienten und Parameter direkt in die Wellengleichung eingeben kann. Im Post-processing können schließlich die RLC-Parameter zum Beispiel von Schwingkreisen berechnet werden.

Erhöhten Bedienkomfort bieten im neuen Release die vordefinierten Multiphysik-Anwendungsmodi, die den Nutzer

automatisch zu häufig auftretenden gekoppelten Phänomenen führen, beispielsweise zu elektrothermischen, fluidthermischen, chemothermischen oder thermostrukturellen Anwendungen. Mit vordefinierten Masken für gekoppelte Prozesse wird deren Simulation jetzt genauso einfach wie die Modellierung eines einzelnen physikalischen Phänomens.

[www.femlab.de](http://www.femlab.de)

## Der Weg zu wissensbasiertem CAM ist frei

Mit der Version 9.5 von Hypermill stellt die Open Mind Technologies AG auf dem diesjährigen Megaevent im Herbst eine besonders bemerkenswerte Lösung vor, um bestehendes Wissen intelligent zu sichern und flexibel abzurufen. Darüber hinaus wird diese Version beim Programmierkomfort, bei der 5-Achs-Bearbeitung und der Kollisionsvermeidung Neuentwicklungen bieten, die nach Herstellerangaben eine noch höhere Prozesssicherheit gewährleisten sollen.

Die neue Version 9.5 ermöglicht es, Bearbeitungsstrategien und Werkzeuginformationen in einem Makro zu verknüpfen und in einer Datenbank abzulegen. Mit der Verwaltung dessen kann der Anwender nach bestimmten Kriterien suchen und gezielt auf Makros zugreifen. Dieser Automatismus und das einfache Zuweisen von Features und Makros reduzieren den Programmieraufwand auf ein absolutes Minimum. Selbst komplexe Aufgaben lassen sich so in sehr kurzer Zeit realisieren. Dass diese Lösung nicht nur in der Theorie, sondern in der Praxis zu drastischen Zeiteinsparungen führt, hat der Systemanbieter bereits mit seiner Workflow-orientierten CAM-Software Hyperfact gezeigt. Kunden berichten hier von Zeiteinsparungen bei der NC-Programmierung von 30 Prozent und mehr.

Zusätzlich zur kürzeren Programmierzeit bietet dieses Konzept einen weiteren entscheidenden Vorteil: Mit jedem neu programmierten Werkstück wächst das Know-how in der Datenbank, auf das Anwender bei der Programmierung zurückgreifen können. Im nächsten Schritt wollen die Entwickler des Tools eine Lösung für die Vergabe von Zugriffsrechten erarbeiten.

Die bereits mit der Version 9 vorgestellte Fräs-Stopp-Flächenbegrenzung für die 3D-Bearbeitung ist nun auch für die 5-Achs-Bearbeitung verfügbar. Das heißt, dass jetzt zusätzlich zur Begrenzung mittels Kurven auch Fräs- und Stoppflä-

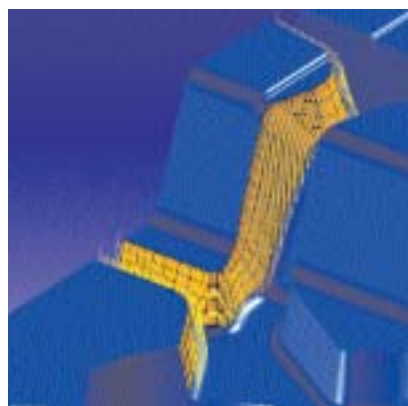


Bild: Open Mind

**Im 5-Achs-Bereich** wird der Rückzug auf die Sicherheitsebene um einen radialen Bereich erweitert

chen festgelegt werden können. Bearbeitungsbereiche für das Schlichten und die Restmaterial-Bearbeitung sind so präzise eingrenzbare. Im Ergebnis erhält der Anwender wesentlich exaktere Bearbeitungsbahnen und vermeidet das Berühren der angrenzenden Bereiche. Das Fahren auf eine Sicherheitsebene über dem Teil ist oft sehr zeitaufwändig oder auch wegen des möglichen Überschreitens der Verfahrenswege der Achsen nicht möglich. Deshalb wurde im 5-Achs-Bereich der Rückzug auf die Sicherheitsebene um einen radialen Bereich erweitert. Damit kann nun zwischen zwei Positionen auch neben dem Teil eine kollisions sichere 5-Achs-Bewegung generiert werden.

Mit der Einführung der automatischen Kollisionskontrolle und -vermeidung konnte Open Mind bereits in der Vergangenheit bei seinen Kunden punkten. Dieses Konzept wurde um die adaptive Kollisionsvermeidung erweitert. In Abhängigkeit von der zu bearbeitenden Geometrie und der Kinematik der Maschine werden nun absolut runde und ausgewogene Maschinenbewegungen erzeugt. Dadurch sinken die Bearbeitungszeiten und die Beanspruchung der Maschine.

**Euromold, Halle 6.0, Stand C102**

**Version 2.0  
jetzt verfügbar**

# MEDUSA<sub>4</sub>

Die 2D/3D  
Konstruktionslösung  
mit dem enormen  
Automatisierungspotential

nicht nur für den  
Maschinen-  
und Anlagenbau

- Mechanik
- Anlagenplanung
- E-Technik
- Fabrikplanung

**CAD Schroer**

[www.cad-schroer.de](http://www.cad-schroer.de)