

# Simulation für Inspiration

Wie sich Simulations-Software sinnvoll in der Lehre einsetzen lässt.

Christian Schröder und Lars Fromme

**Modellierung und Simulation mit COMSOL Multiphysics lässt sich sinnvoll in die ingenieurwissenschaftliche Ausbildung integrieren. Auf diesem Wege erhalten Studierende eine solide Grundlage, um mit den erlernten Simulationsmethoden den Anforderungen der Industrie, insbesondere der kleinen und mittelständischen Unternehmen, gerecht zu werden.**

Vergleicht man heutige Entwicklungsprozesse mit denen vor wenigen Jahrzehnten, so wird deutlich, in welchem Umfang Computer- und insbesondere Simulationstechnologien in Unternehmen und Forschungseinrichtungen Einzug gehalten haben. Wurden anfangs von einigen Großunternehmen in der Luft- und Raumfahrt und auch in der Automobilindustrie eher rudimentäre Berechnungen zur ersten Absicherung der Konstruktionsentwürfe getätigt, so ist der virtuelle Prototypenbau heutzutage selbst in den Entwicklungsabteilungen kleiner und mittelständischer Unternehmen unverzichtbar. Die Anwendungen reichen von Strukturmechanik, Thermodynamik oder Elektrodynamik bis hin zu feldgekoppelten Aufgabenstellungen. Insbesondere bei den gekoppelten Aufgabenstellungen ist aufgrund der Komplexität der technischen Systeme oftmals ein multiphysikalischer Ansatz erforderlich. Eine einzige Simulationsdomäne reicht dann nicht mehr aus, um die physikalischen Wechselwirkungen im Modell zu erfassen.

Dies steht im Gegensatz zur „klassischen“ Lehre einzelner Teilgebiete wie Mechanik, Elektrodynamik oder Thermodynamik, die für sich genommen schon so komplex sind, dass sie meist getrennt betrachtet werden. In realen



Studierende des Fachbereichs Ingenieurwissenschaften und Mathematik der FH Bielefeld profitieren vom Simulationspraktikum.

Systemen treten jedoch oftmals Wechselwirkungen auf, die das Ergebnis signifikant beeinflussen. So ändert z. B. die Erwärmung eines stromdurchflossenen Leiters dessen Widerstand, was wiederum den Stromfluss verändert und damit via Joulescher Erwärmung die Temperatur des Leiters. Um reale Aufgabenstellungen zu lösen, gilt es daher in der Regel, gekoppelte Differenzialgleichungen aufzustellen und numerisch zu lösen. Nur mit Kenntnissen der entsprechenden Simulationsmethoden, den geeigneten Werkzeugen und dem Wissen über die vorherrschenden physikalischen Phänomene lassen sich ingenieurwissenschaftlichen Fragestellungen zielführend lösen.

Für den erfolgreichen Einsatz von Modellbildung und Simulation in der modernen Produktentwicklung sind sowohl geeignete Softwarewerkzeuge nötig, die den Anwender bei seiner Arbeit unterstützen, als auch entsprechend ausgebildete Mitarbeiter, die in der Lage sind, solche Systeme zu bedie-

nen und die Simulationsergebnisse korrekt zu interpretieren. Dafür ist ein gutes Verständnis der zugrundeliegenden mathematischen Methoden erforderlich, um die Möglichkeiten und insbesondere die Grenzen einer Simulation realistisch einschätzen zu können. Gerade im Hinblick auf die Anforderungen der Industrie wird es zunehmend wichtig, Modellbildung und Simulation in ingenieurwissenschaftlichen Studiengängen der Hochschulen als festen Bestandteil der Ausbildung zu integrieren.

## Einsatz in der Lehre

Der Einsatz moderner Simulationswerkzeuge in der Lehre bietet, abgesehen von einer reinen Vermittlung der Simulationsmethoden den Vorteil, den Lehrbetrieb abwechslungsreich und projektorientiert zu gestalten. Verschiedene Betriebsbedingungen lassen sich testen und ihre Auswirkungen anschaulich aufzeigen. Dies wäre bei realen Anlagen technisch nicht

Prof. Dr. Christian Schröder, Prof. Dr. Lars Fromme, Fachbereich Ingenieurwissenschaften und Mathematik, FH Bielefeld, Wilhelm-Bertelsmann-Str. 10, 33602 Bielefeld

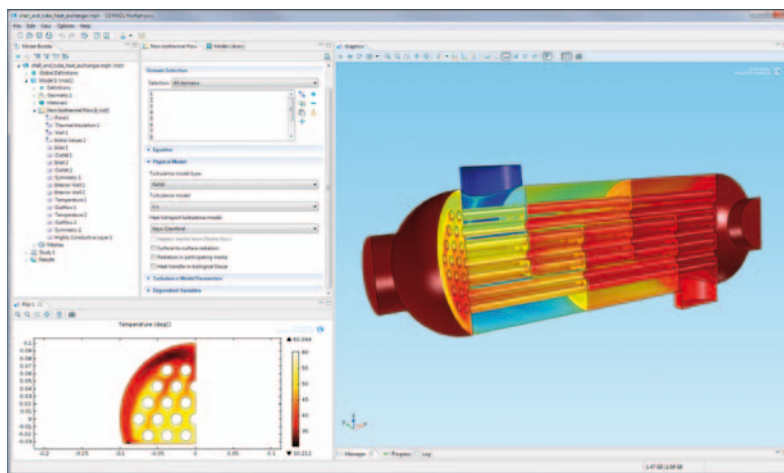


Abb. 1 In der Simulation lässt sich ein Rohrbündelwärmeübertrager mit luftdurchströmtem Mantel- und wasser-

durchströmten Rohrraum untersuchen. Die Temperaturverteilung auf den Oberflächen ist farblich kodiert.

möglich oder zu kostspielig. In der virtuellen Welt ist dagegen die Anzahl der verfügbaren Maschinen und Anlagen unbegrenzt.

Ein gutes Beispiel für die Integration von Modellbildung und Simulation in die ingenieurwissenschaftliche Ausbildung zeigt der Fachbereich Ingenieurwissenschaften und Mathematik (IuM) der Fachhochschule Bielefeld. Dort wird unter anderem die Simulationssoftware COMSOL Multiphysics seit über fünf Jahren zur Ausbildung der Studierenden eingesetzt. Der Fachbereich pflegt enge Kooperationen mit ortsansässigen Unternehmen und Forschungsinstituten. In allen Studiengängen ist die praxisorientierte Ausbildung oberstes Ziel.

### Die Wahl der Software

Für den Einsatz in der Lehre ist es entscheidend, dass ein Simulationswerkzeug komfortabel zu bedienen und besonders transparent und offen konzipiert ist sowie eine große Bandbreite an Anwendungsbereichen abdeckt. Mit COMSOL Multiphysics lassen sich die verschiedensten physikalischen Phänomene modellieren. Neben Strukturmechanik, Wärmetransport (Abb. 1), Elektrodynamik und Computational Fluid Dynamics (CFD) können auch chemische Reaktionen und Akustik simuliert werden. Darüber hinaus ist es auch möglich, eigene Gleichungen zu

implementieren. Das Besondere ist jedoch nicht, dass sich einzelne physikalische Phänomene für sich betrachtet untersuchen lassen, sondern miteinander kombiniert simultan lösen lassen. COMSOL ermöglicht Mehrfeldsimulationen, d. h. echte Multiphysik. Dabei kann jede Gleichung mit jeder anderen gekoppelt werden, ohne Einschränkungen bei den Kombinationsmöglichkeiten.

### Das richtige Maß Mathematik

Mathematik ist für viele der Studierenden, gerade am Anfang ihres Studiums, ein „Angstfach“. Die Herausforderung für die Dozenten und Professoren liegt darin, die Simulationsmethodik mit dem passenden Maß an Mathematik zu lehren. Anfangs ist es sicherlich sinnvoll, nur so viel wie nötig und

so wenig wie möglich an mathematischem Hintergrund zu vermitteln. Die Studierenden verfügen beim Einstieg in die Simulation üblicherweise nur über Grundkenntnisse aus dem 1. und 2. Semester, also im Wesentlichen Analysis, einfache gewöhnliche Differentialgleichungen und lineare Algebra. Dagegen fehlen grundlegende und praktische Kenntnisse in Vektoranalysis, partiellen Differentialgleichungen, Variationsrechnung und numerischer Mathematik. Hier bietet die Softwareumgebung COMSOL Multiphysics eine einfache Einstiegsmöglichkeit, da das System dem Anwender entsprechende Voreinstellungen anbietet, die er individuell anpassen oder im ersten Schritt einfach übernehmen kann. Der Anwender erhält dadurch recht schnell entsprechende „Erfolgslebnisse“, begreift die zugrundeliegende Mathematik und erkennt einen direkten praktischen Nutzen. Sämtliche Begriffe und mathematische Einzelheiten, um die Methode der Finiten Elemente (FEM) herzuleiten, lassen sich in COMSOL direkt anzeigen (z. B. mit Hilfe des „Equation View“) und nachvollziehen. Das führt besonders für Einsteiger zu einer „Entschärfung“ der durchaus anspruchsvollen Mathematik. Meist wird dafür in den Lehrmodulen ein durchgehendes Beispiel verwendet, damit die Studierenden anhand eines „roten Fadens“ die einzelnen Modellierungsstufen besser erfassen und verinnerlichen können.

Um die FEM im Detail zu erklären, dient in der Literatur

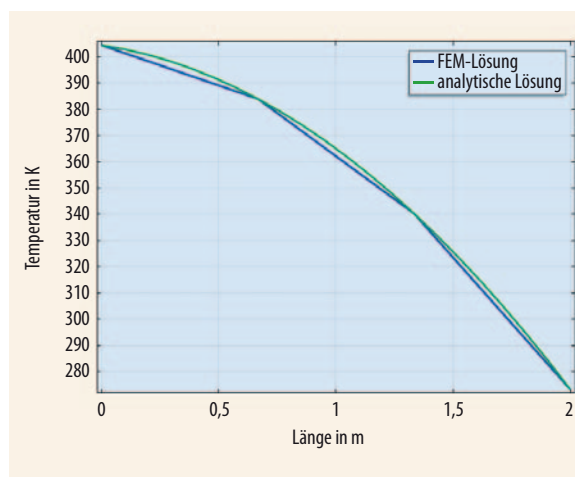


Abb. 2 Stationäre Temperaturverteilung in einem Eisenstab: Vergleich zwischen analytischer Lösung und numerischem Resultat unter Verwendung von linearen Ansatzfunktionen und drei finiten Elementen.

*Best of*

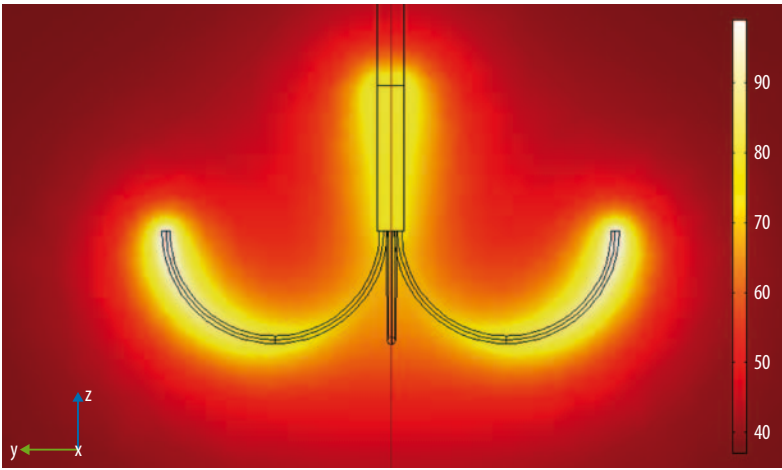


Abb. 3 Die Hochfrequenzablation ist eine medizinische Methode zur lokalen Zerstörung von Gewebe. Zu sehen ist die

Temperaturverteilung im Gewebe um eine vierarmige Sonde herum nach einer zehnminütigen Behandlung.

meist eine abstrakte mathematische oder aber eine auf die Strukturmechanik ausgerichtete Herangehensweise. An der FH Bielefeld wird bewusst ein anderer Zugang gewählt. Die FEM wird quasi „zu Fuß“, d. h. Schritt für Schritt an einem einfachen eindimensionalen Beispiel aus der Wärmeleitung, mit Hilfe von „Bleistift und Papier“ entwickelt. Bei diesem Beispiel handelt es sich um die Modellierung eines zwei Meter langen Eisenstabes, der mit einer Isolationsschicht ummantelt ist und eine interne Wärmequelle (z. B. durch Joulesche Erwärmung hervorgerufen) aufweist. Als Randbedingungen sind eine zusätzliche Wärmequelle am linken Rand des Stabes sowie eine Kühlung auf der rechten Seite vorgegeben. Diese sind unterschiedlich realisiert, zum einen als Neumann-Randbedingung, bei welcher der Wärmefluss über den entspre-

chenden Rand vorgegeben ist, zum anderen als Dirichlet-Rand, bei dem der Wert der Temperatur fix vorgegeben ist. Somit lässt sich der Einfluss unterschiedlicher Randbedingungen auf das Ergebnis untersuchen. Die Studierenden lernen an diesem einfachen Beispiel unter anderem, dass alle Knotenwerte der FEM-Lösung von allen vorgegebenen Daten, insbesondere von den gewählten Randbedingungen abhängen. Diese Erkenntnis sensibilisiert die angehenden Ingenieure, zunächst über die Modellannahmen und Eingabeparameter nachzudenken, anstatt einfach „drauflos“ zu simulieren. Des Weiteren existiert für dieses Beispiel auch eine einfache analytische Lösung, so dass jederzeit ein Vergleich zwischen dem numerischen und analytischen Ergebnis möglich ist (Abb. 2). Hiermit lässt sich der Einfluss weiterer „Stellschrauben“ der

FEM an diesem Beispiel, nämlich einer feineren Diskretisierung und der Verwendung von Ansatzfunktionen höherer Ordnung, sehr gut veranschaulichen und diskutieren. Nachdem dieses einfache eindimensionale Beispiel verstanden ist, ist die Verallgemeinerung auf höhere Dimensionen für die Studierenden problemlos nachvollziehbar. Der Vorlesungsstoff wird darüber hinaus im Rahmen eines Simulationspraktikums praxisnah vertieft.

### Umsetzung vor Ort

Am Fachbereich Ingenieurwissenschaften und Mathematik wird COMSOL Multiphysics derzeit im Bachelor-Studiengang Informatik eingesetzt. Im Modul „Numerische Mathematik“ werden im 3. Semester mit Hilfe von COMSOL in Kombination mit anderen Software-Werkzeugen (wie beispielsweise MATLAB) die Grundlagen der numerischen linearen Algebra und der numerischen Lösung gewöhnlicher Differentialgleichungen behandelt. Im 4. Semester folgt das Modul „Numerische Simulation“, in dem insbesondere die Methode der Finiten Elemente anhand des oben erwähnten Beispiels aus der Wärmeleitung entwickelt wird. Begleitet wird die Vorlesung von einem vertiefenden Seminar und einem Simulationspraktikum. Besonders letzteres schließt den Bogen zum mathematischen Unterbau wie er in der Vorlesung behandelt wird und führt zu den für Studieren-

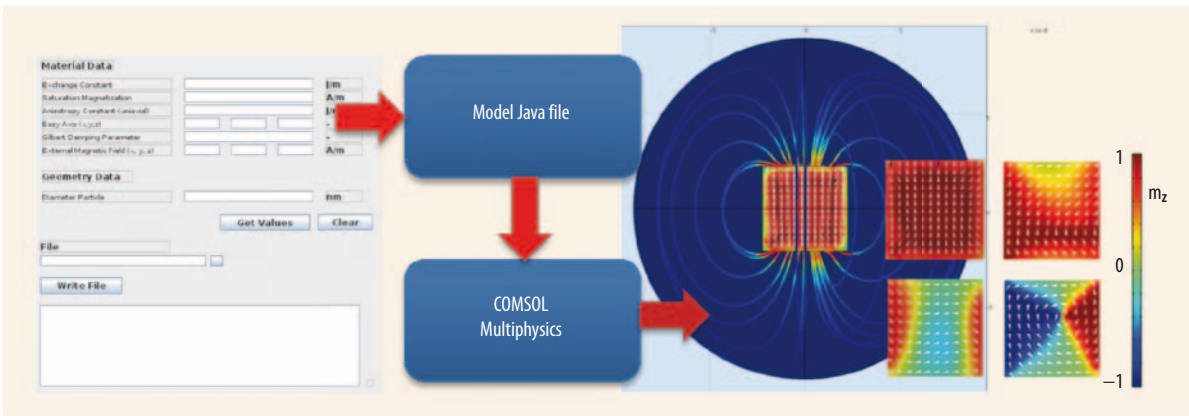


Abb. 4 Für die Modellierung und Simulation magnetischer Nanopartikel werden z. B. die mikromagnetischen Gleichungen

mit Hilfe der „schwachen Formulierung“ in COMSOL implementiert und simultan zu den Maxwell-Gleichungen gelöst.

de und Lehrende motivierenden „Aha-Effekten“.

Letztendlich erlangen die Studierenden ein grundsätzliches, aber fundiertes Verständnis der FEM und verstehen, wie die Methode im Simulationsprogramm umgesetzt worden ist. Sie sind in der Lage, die numerischen Ergebnisse zu beurteilen und kennen die „Stellschrauben“ der FEM-Simulationen. In den Master-Studiengängen „Elektrotechnik“ und „Optimierung und Simulation“ kommt COMSOL Multiphysics in den Modulen „Theoretische Elektrotechnik“ und „Multiphysiksimulationen“ in einem begleitenden Praktikum zum Einsatz. Im Unterschied zum eher methodischen Einsatz in den Bachelor-Modulen liegt hier der Schwerpunkt auf der Vermittlung von Problemlösungsstrategien für komplexe, technische Fragestellungen, vor allem von feldgekoppelten Phänomenen. Die Modulprüfung besteht aus einem praktischen Teil, in dem die Studierenden eine selbst gewählte Problemstellung bearbeiten, einer Ausarbeitung der Ergebnisse in Form eines wissenschaftlichen Artikels und einem mündlichen Teil, in dem es gilt, die Ergebnisse unter „Konferenzbedingungen“ zu präsentieren.

Bester Beweis für die hervorragende Eignung von COMSOL Multiphysics für den Lehrbetrieb sind die vielfältigen und vor allem

anspruchsvollen Projekte, die die Studierenden im Rahmen der Modulprüfungen abliefern. Die Bandbreite reicht von Simulationen zur Hochfrequenzablation in der lokalen Tumorbehandlung (Abb. 3) bis zu einer optimierten Auslegung von Fußbodenheizungen.

Neben der Lehre wird COMSOL in mehreren Forschungsprojekten im Fachbereich IuM eingesetzt (Abb. 4) [1]. Gemeinsam mit Industrieunternehmen werden darüber hinaus zahlreiche anwendungsorientierte Fragestellungen mit COMSOL bearbeitet. Damit kommt die Ausbildung mit COMSOL auch den Forschungsprojekten zu Gute.

### Lernergebnisse und Fazit

In den einzelnen Modulen der verschiedenen Studiengänge erlangen die Studierenden ein grundsätzliches Verständnis der FEM sowie deren Umsetzung in COMSOL. Sie können in der virtuellen Umgebung experimentieren, um den Einfluss von Randbedingungen zu verstehen und diese richtig zu definieren. Sie können die Ergebnisse beurteilen und interpretieren und sich auf dieser Basis weiterbilden und spezialisieren. Auch Zusatzwissen zur FEM, zu Solvern oder gleichungsbasiertem Modellieren lässt sich nun leichter aneignen. Die Studierenden lernen die Flexi-

bilität von COMSOL Multiphysics voll auszunutzen (z. B. im Rahmen des „Weak Form Modeling“) und entwickeln eigene individuelle Anwendungen. Insgesamt motiviert der erlernte Umgang mit der Simulationsumgebung zur weiteren Beschäftigung mit anspruchsvoller Mathematik. Der Einsatz von COMSOL Multiphysics im Physik-Praktikum in Kombination mit Experimenten ermöglicht darüber hinaus „Messungen“ am virtuellen Modell (Techniken wie Integration über Flächen oder Volumina werden so plausibel) und erlaubt die einfache Überprüfung intuitiver Vorstellungen. Dies ermöglicht den Studierenden die Auswertung von Zusammenhängen und Größen, die experimentell nur schwer oder gar nicht zugänglich sind.

Insgesamt bietet die Integration der Modellierung und Simulation mit COMSOL Multiphysics in der ingenieurwissenschaftlichen Ausbildung eine solide Grundlage, mit der die Studierenden in der Lage sind, den Anforderungen der modernen Produktentwicklung gerecht zu werden.

- [1] L. Teich, A. Hütten und C. Schröder, Utilization of COMSOL Multiphysics' JAVA API for the Implementation of a Micromagnetic Modeling and Simulation Package with a Customized User Interface, COMSOL Conference Europe, Mailand 2012, [www.comsol.com/conference2012/europe/](http://www.comsol.com/conference2012/europe/)

## Simulationssoftware für Hexapodsysteme

**Hersteller:** Physik Instrumente (PI).

**Angebot:** Neue Simulationssoftware „PIVeriMove“ für mehr Bediensicherheit bei Hexapodsystemen. Sie ist für alle Hexapodsysteme verfügbar.

**Merkmale:** Parallelkinematische Hexapodsysteme erlauben mit ihren sechs Freiheitsgraden der Bewegung eine flexible Positionierung im Raum. Dabei muss sichergestellt sein, dass Aufbauten auf der Plattform oder der Hexapod selbst Objekte aus der Umgebung nicht berühren (z. B. in einer Vakuumkammer, bei empfindlichen Messaufbauten oder wenn Elemente einer Produktionsstrecke in der Nähe sind). Die Simulationssoftware ermöglicht es nun, die Anwendungsumgebung grafisch darzustellen und die Hexapodbewegungen darin zu simulie-



ren. Die nötigen Objekte lassen sich einfach konfigurieren: Sie werden entweder direkt in der Software aus Grundformen wie Zylindern oder Quadern definiert, oder das Programm bindet importierte CAD-Daten mit wählbarem Detaillie-

rungsgrad ein. Anschließend werden mit diesen Daten die Abstände zu einem Hindernis und die resultierenden Stellwege berechnet. Die Software bietet zusätzlich die Möglichkeit, Konfigurationen direkt auf dem Controller zu speichern. Sie prüft dann jede kommandierte Position vor dem Ausführen und verhindert, dass Positionen oder Trajektorien, die zu einer Kollision führen würden, angefahren werden.

■ Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG  
Auf der Römerstr. 1  
76228 Karlsruhe  
Tel.: +49 (0)721 4846-0  
Fax: +49 (0)721 4846-1019  
E-Mail: [info@pi.ws](mailto:info@pi.ws)  
Website: [www.pi.ws](http://www.pi.ws)