

Die zündende Idee mit CAE

Die Lebensdauer einer Hochspannungseinrichtung wird maßgeblich von deren geometrischer Auslegung beeinflusst. Ein fehlerhaftes Design führt zu Überbelastungen und einer vorzeitigen Alterung der Isolation. Erfahrungswerte und Expertenwissen sind Voraussetzungen für eine gute Dimensionierung. Die optimale Lösung findet das Finite-Elemente-Programm Comsol Multiphysics unter Mitwirkung von Matlab.

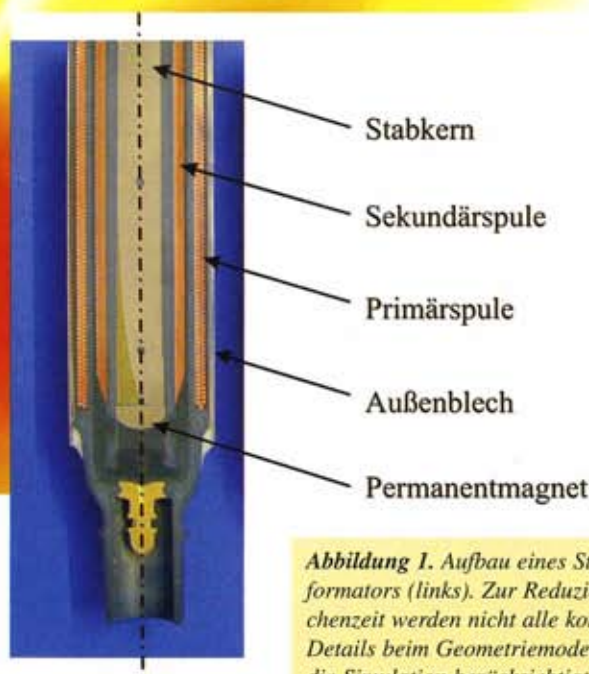
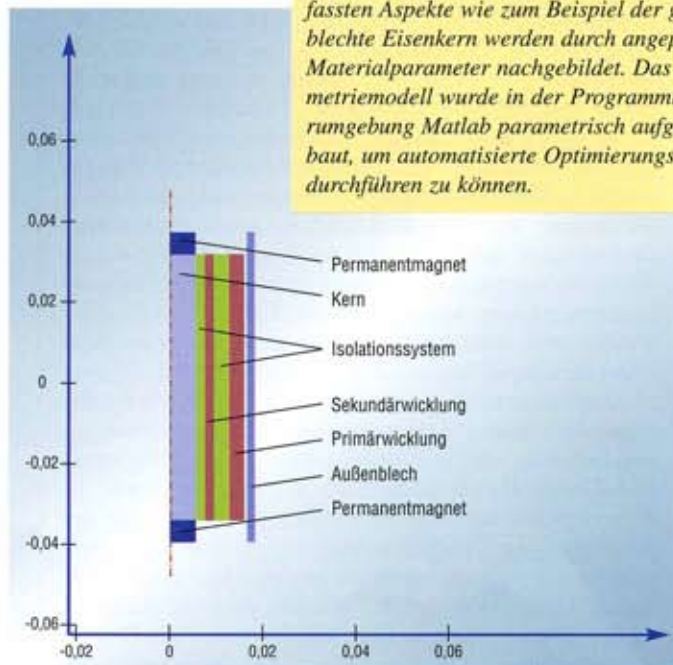


Abbildung 1. Aufbau eines Stabkerntransformators (links). Zur Reduzierung der Rechenzeit werden nicht alle konstruktiven Details beim Geometriemodell (rechts) für die Simulation berücksichtigt. Die nicht erfassten Aspekte wie zum Beispiel der gebliche Eisenkern werden durch angepasste Materialparameter nachgebildet. Das Geometriemodell wurde in der Programmierumgebung Matlab parametrisch aufgebaut, um automatisierte Optimierungsläufe durchführen zu können.

Hochspannungsimpulstransformatoren werden bei Ottomotoren zur Entzündung des Kraftstoff-Luft-Gemischs eingesetzt. Aktuelle Fahrzeuge sind mit zylinderselektiver Zündung ausgerüstet, so dass für jeden Zylinder ein Zündtransformator benötigt wird. Dieser ist direkt über der Zündkerze positioniert und stellt die benötigte Hochspannung sowie eine ausreichende Funkenenergie zur Verfügung, um die sichere Entflammung in jedem Arbeitspunkt des Motors einzuleiten. Der Einsatzort setzt eine besondere thermische und mechanische Festigkeit voraus, um den widrigen Umgebungsbedingungen standzuhalten. Besondere Aufmerksamkeit muss dabei der Auslegung des Isolationssystems gewidmet werden, da bei den engen geometrischen Verhältnissen die Grenzen der elektrischen Belastbarkeit erreicht werden.

Spezielle Kunststoffe isolieren die Primär- und Sekundärspule sowie den aus Stabkern und Außenblech bestehenden magnetischen Kreis voneinander. Des Weiteren sind die einzelnen Windungen der Spulen durch eine Lackbeschichtung isoliert. Optimal wäre eine in Längsrichtung möglichst lineare Potenzialverteilung, so dass die inneren Bereiche des Isolationssystems gleichmäßig beansprucht werden.

Um diese elektrische Beanspruchung der verwendeten Materialien zu neutralisieren, wird die örtliche Verteilung der elektrischen Felder durch die Veränderung der Geometrie gezielt beeinflusst. Bei gleichen Materialien verändern sich deshalb die kapazitiv wirkenden Bereiche. Allerdings kommt erschwerend hinzu, dass wegen des ausgeprägten magnetischen Streufelds die induzierten Spannungsbeiträge örtlich variieren. Folglich muss die Optimierung der Geometrie durch eine ge-



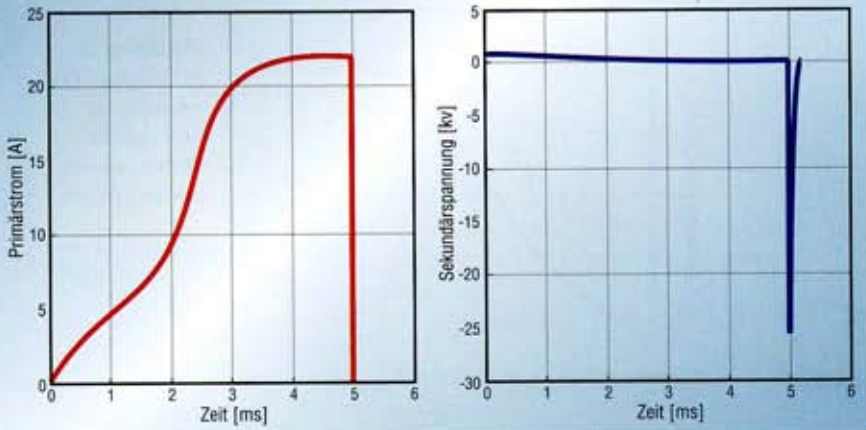


Abbildung 2. Zeitverläufe der Klemm-
größen Primärstrom (links) und Se-
kundärspannung

koppelte elektrisch-magnetische Feldbe-
rechnung erfolgen.

Funktionsprinzip und Modellierung.
Üblicherweise werden Impulstransforma-
toren in Stabkernbauweise ausgeführt.
Das linke Bild von Abbildung 1 zeigt die
wesentlichen konstruktiven Merkmale
dieser Komponenten anhand eines
Schnittbilds. In der Mitte befindet sich der
Stabkern. Dieser bündelt das magnetische
Feld in seinem Inneren und verbessert so-
mit die Kopplung zwischen Primär- und
Sekundärseite. Koaxial um den Kern sind
die Sekundär- und die Primärwicklung
angeordnet. Die Hochspannung baut sich
längs der Sekundärwicklung auf, so dass
ein besonderes Isolationssystem in ihrer
Umgebung erforderlich ist. Das Außen-
blech fungiert als Rückschluss für das
magnetische Feld und als mechanischer

Schutz. Bedingt durch die schlanke Bau-
weise ist ein geschlossener magnetischer
Kreis aus Isolationsgründen nicht denk-
bar. An beiden Enden des Stabkerns sind
Permanentmagnete positioniert, die den
Kern magnetisch vorspannen und somit
den Arbeitspunkt festlegen.

Zur Reduzierung der Rechenzeit wer-
den nicht alle konstruktiven Details bei
der Simulation berücksichtigt. Stattdessen
wird ein vereinfachtes Geometriemodell
(rechts in Abbildung 1) erstellt, das das
Verhalten des Impulstransformators be-
triebsnah nachbildet. Die vom Geometriemodell nicht erfassten Aspekte wie zum
Beispiel der geböckelte Eisenkern werden
durch angepasste Materialparameter
nachgebildet. Das Geometriemodell wird
in der Programmierumgebung Matlab pa-
rametrisch aufgebaut. Somit ist die Mög-

lichkeit der Integration in eine automati-
siert ablaufende Optimierungsroutine ge-
geben, und das Modell behält seine Flexi-
bilität in Bezug auf konstruktive Änderun-
gen des Impulstransformators.

Das Geometriemodell und die Parame-
ter der eingesetzten Materialien werden
an die Feldberechnungssoftware Comsol
Multiphysics weitergegeben. Eingangs-
größe für die Modellierung ist neben den
Geometrie- und Materialdaten der Verlauf
der Erregerspannung; durchgeführt wird
die gekoppelte Berechnung des magneti-
schen und des elektrischen Feldes. Das Er-
gebnis liefert die zeitliche Verläufe des
Primär- und des Sekundärstroms und den
der Sekundärspannung. Zusätzlich könn-
en anhand der Feldbilder Aussagen über
die Ausnutzung der eingesetzten Materia-
lien, Engpässe und Einsparpotenziale ge-
macht werden. Gegenüber einer Netz-
werkberchnung, die die zeitlichen Ver-
läufe der Klemmgrößen liefert, werden
bei einer Feldberechnung auch die parasitä-
ren Elemente berücksichtigt, die im Fal-
le einer kompakten hochbelasteten Anord-
nung ausschlaggebend sind. Die Berech-
nung des elektrischen und magnetischen
Feldes setzt eine gekoppelte transiente Si-
mulation des Transformators voraus. Nur
so werden die Auswirkungen der unter-

Modellierung koaxialer Spulenanordnungen

Die erste Maxwell'sche Gleichung beschreibt die Kopp-
lung der magnetischen Feldstärke mit der elektrischen
Stromdichte (1):

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

Die Rotationssymmetrie der Anordnung ermöglicht eine
Betrachtung in Zylinderkoordinaten, wodurch eine Ver-
einfachung des Differenzialgleichungssystems erreicht
wird.

Eine zylindrische Spule erzeugt ein magnetisches Feld
vorwiegend in radialer und longitudinaler Richtung. Wird
die azimuthale Komponente des magnetischen Feldes ver-
nachlässigt, gilt (2):

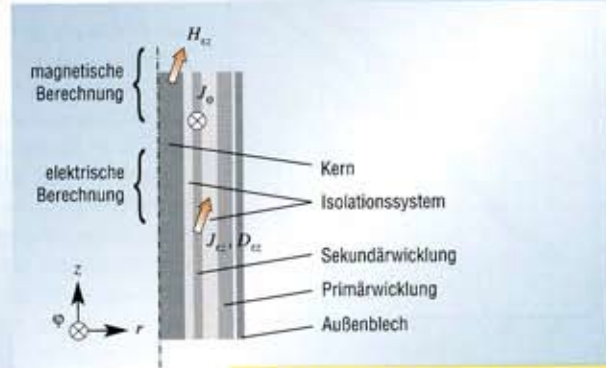
$$\text{rot } \vec{H}_{\varphi,z} = \vec{J}_{\varphi}$$

In dieser Darstellung wird das magnetische Feld von der
azimutalen Komponente der Stromdichte erzeugt. Der
Beitrag der Verschiebungsstromdichte $\frac{\partial \vec{D}_{\varphi}}{\partial t}$ ist da-
bei nicht signifikant. Für die radiale und longitudinale
Stromverteilung gilt (3):

$$0 = \vec{J}_{r,z} + \frac{\partial \vec{D}_{r,z}}{\partial t}$$

Hiermit wird die elektrische Potenzialverteilung der rz-
Ebene unter Berücksichtigung der Leitungs- und Ver-
schiebungsvorgänge bestimmt. Dadurch wird die kapazi-
tative Kopplung der Spule an ihrer Umgebung berück-

sichtigt und die parasitäre Kapazität der Spule mitmo-
delliert. Somit wird Gleichung (1) in ein System von zwei
unabhängigen Differenzialgleichungen zerlegt, die jede
für sich Grundlage einer eigenständigen Feldberechnung
sind: Gleichung (2) für die magnetische Berechnung
und Gleichung (3) für die elektrische Berechnung.
Die zwei Berechnungen sind ausschließlich über die
Geometrie der Spule verknüpft. Durch den Vorschub der
Wicklung sind die azimuthale Stromdichte und die longi-
tudinale Stromdichte proportional.



**Prinzipieller Aufbau und Feldebene-
nen eines Stabkerntransformators**

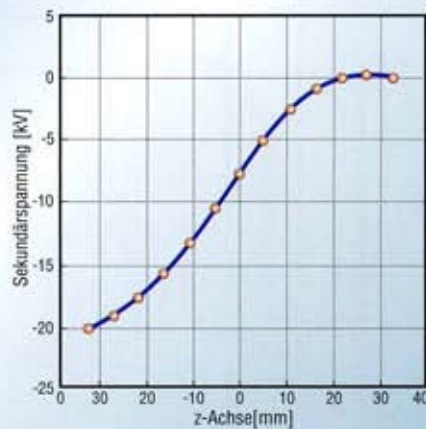
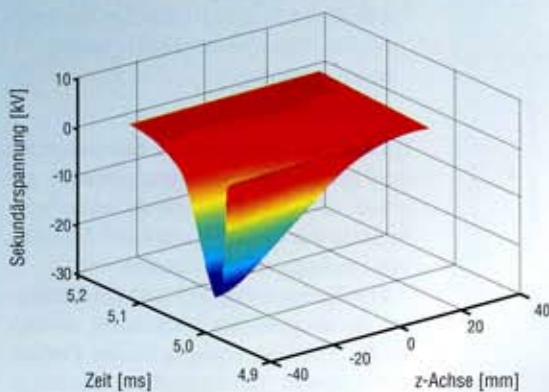


Abbildung 3.
Nichtlineare Potenzialverteilung zeitlich (links) und örtlich aufgelöst

schiedlichen Relaxationszeiten der eingesetzten Werkstoffe berücksichtigt.

Im Normalbetrieb werden an die Primärspule Rechteckspannungsimpulse angelegt, die zu einem entsprechenden Stromfluss führen. Somit wird ein magnetisches Feld aufgebaut, dessen Änderung eine Spannung in der Sekundärwicklung induziert. Zur elektrischen Berechnung wird in dem Bereich der Primärwicklung ein elektrisches Feld vorgegeben, das den Spannungsimpuls berücksichtigt. Die resultierende Stromverteilung wird in die magnetische Berechnung übernommen. Aus der magnetischen Feldverteilung werden die in den einzelnen Spulen induzierten Spannungsbeiträge berechnet und auf die elektrische Simulation rückgekoppelt. Somit ist die gegenseitige Beeinflussung des elektrischen und magnetischen Felds gleichermaßen implementiert und das Modell kann auftretende Schwingneigungen naturgetreu nachbilden.

Die Grafiken in Abbildung 2 zeigen die zeitlichen Verläufe der Klemmgrößen. Dem Spannungssprung wirken die induzierten Spannungsanteile entgegen, so dass der Strom nur langsam ansteigt (linke Grafik). Der magnetische Werkstoff geht nach 2 Millisekunden in Sättigung,

was sich im progressiven Anstieg des Stromverlaufes bemerkbar macht. Beim Erreichen der Ladezeit wird der Primärstrompfad unterbrochen. Durch den steilen Stromabrisss wird in der Sekundärwicklung eine negative Spannung induziert (rechte Grafik).

Die in der Sekundärwicklung induzierte Stromdichte ist orts- und zeitabhängig. Dies ist begründet in der magnetischen Streuung und der magnetischen Sättigung sowie in der örtlich variierenden kapazitiven Belastung. Infolge des offenen magnetischen Kreises gibt es Feldlinien, die nur einen Teil der Sekundärwicklung umschließen. Dies führt zu einer unterschiedlichen Durchflutung der einzelnen Bereiche der Spule. Zusätzlich bewirken die Kapazitäten zwischen Sekundärwicklung und Kern und zwischen Sekundär- und Primärwicklung ein zeitliches Verzerrern der Hochspannung. Die induzierte Stromdichte teilt sich somit in einen Verschiebungsstrom durch die Kapazitäten und einen Leitungsstrom längst der Sekundärspule auf. Beide Effekte überlagern sich und haben eine nichtlineare Potenzialverteilung in axialer Richtung als Folge (Abbildung 3).

Durch die ungleichmäßige Spannungsverteilung kann es zum Versagen der Isolation zwischen einzelnen Lagen der Wicklung kommen. Die kurzgeschlossenen Lagen bewirken eine Neuverteilung des Potentials in Richtung einer höheren Nichtlinearität. Es kommt zu einem kumulativen Prozess, der die Reduktion des Sekundärspannungsangebots und somit den Ausfall der Komponente zur Folge hat.

Optimierung der Geometrie. Für die ideale Belastung der Isolierung ist eine lineare Potenzialverteilung entlang der Sekundärwicklung wünschenswert. Zur Optimierung wird die Geometrie in einem Variablenvektor parametrisiert. Hiermit können zwar beliebige mathematisch gültige Konfigurationen erstellt werden, sie müssen jedoch auf Herstellbarkeit hin überprüft werden. Dies erfolgt über das Setzen geeigneter Nebenbedingungen.

Cosmol Multiphysics liefert für jeden Variablenvektor eine gültige Potenzialverteilung. Die quadratische Abweichung von der idealen Kennlinie bildet die Zielfunktion für den in Matlab implementierten Optimierungsalgorithmus. Abbildung 4 zeigt als Ergebnis der Optimierung einen stark linearisierten Potenzialverlauf. Die mittlere normierte quadratische Spannungsabweichung wird von 0,4 für die Ausgangsgeometrie (gemäß Abbildung 1) auf 0,3 verbessert.

Fazit. Das prinzipielle Vorgehen zur multiphysikalischen Berechnung kompakter Betriebsmittel wurde am Beispiel der gekoppelten elektrisch-magnetischen Berechnung von Hochspannungsimpulstransformatoren vorgestellt. Zur Optimierung wird das Finite-Elemente-Programm Cosmol Multiphysics durch Matlab gesteuert. Es wird gezeigt, dass ein geeigneter Geometrievektor gefunden werden kann, der auch den fertigungsbedingten Nebenbedingungen genügt. Hierdurch konnte die Lebensdauer des Isolationssystems signifikant gesteigert werden. Das vorgestellte Verfahren ist universell anwendbar und kann um strukturelle mechanische und thermische Modelle erweitert werden. Im Idealfall könnten alle realen Umgebungsbedingungen implementiert werden, womit eine Lebensdauerprognose unter Verwendung geeigneter Werkstoffmodelle möglich wird.

RADU CERNAT, DIRK PEIER,
TYCHO WEISSGERBER

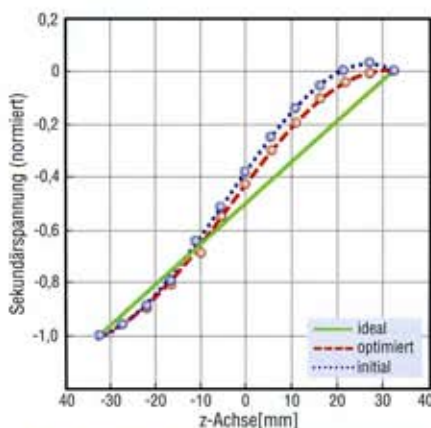


Abbildung 4. Verbesserung des Potenzialverlaufs durch die optimierte Geometrie

INFOCORNER

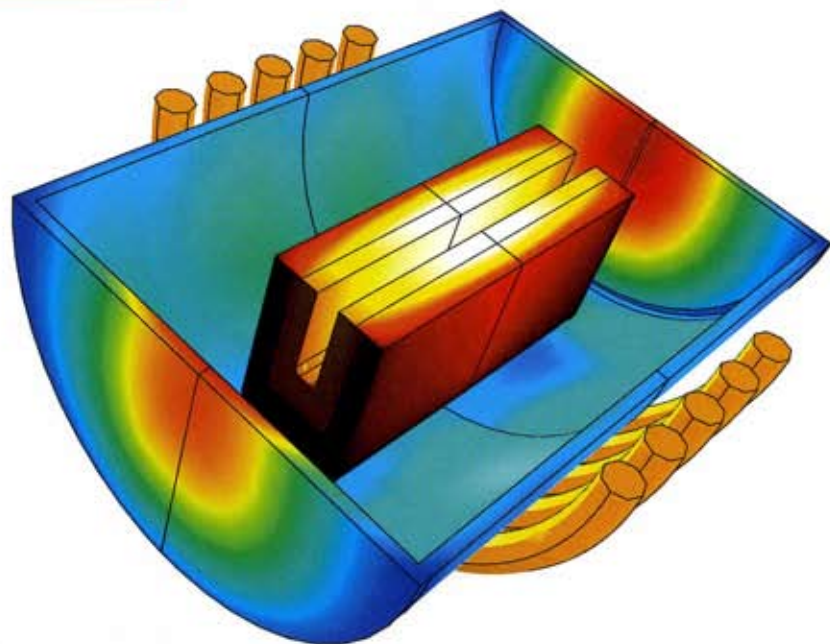
Zu den Autoren:

Radu Cernat und Dirk Peier sind am Lehrstuhl für Hochspannungstechnik und Elektromagnetischer Verträglichkeit der Universität Dortmund tätig, Tycho Weißgerber bei der Pulse GmbH am Standort Dortmund. Weitere Informationen zu Cosmol Multiphysics unter www.femlab.de

Elektromagnetik leichter verstehen

Bei der Entwicklung von elektrischen und magnetischen Bauteilen müssen typischerweise verschiedene physikalische Phänomene aus dem Niederfrequenz- oder dem Gleichstrombereich berücksichtigt werden. Mit dem neuen AC/DC-Aufsatz des CAE-Tools Comsol Multiphysics von Comsol AB mit Sitz in Stockholm lassen sich Motoren, Magnete, Transformatoren, Starkstromleitungen und Energieumwandlungssysteme simulieren und optimieren. Das Modul bewährt sich bei der Erstellung von Schaltplänen, bei der Konfiguration von Kühlsystemen, bei der Fehleranalyse sowie in allen anderen Bereichen, in denen durch die Einbeziehung multiphysikalischer Aspekte, etwa von Strom- und Wärmeverlusten, realistische Simulationsmodelle notwendig sind.

Mit der Ergänzung können allgemeine statische und quasistatische elektromagnetische Untersuchungen in 2D-, 2D-achsensymmetrischen und 3D-Geometrien durchgeführt werden. Es ermöglicht zeitharmonische, transiente und statische Analysen. Elektromagnetische Phänomene können beispielsweise auch mit akustischen oder strukturmechanischen Prozessen gekoppelt werden, um rotierende Maschinen zu analysieren oder den Frequenzverlauf von Lautsprechern zu bestimmen. Praktisch beliebige multiphysikalische Kopplungen sorgen für ein Höchstmaß an Flexibilität. Multiphysikalische Kopplungen für rotierende Maschinen und induktive Erwärmung gehören



zum Lieferumfang des Moduls, so dass das vollständige Modell schnell erstellt werden kann.

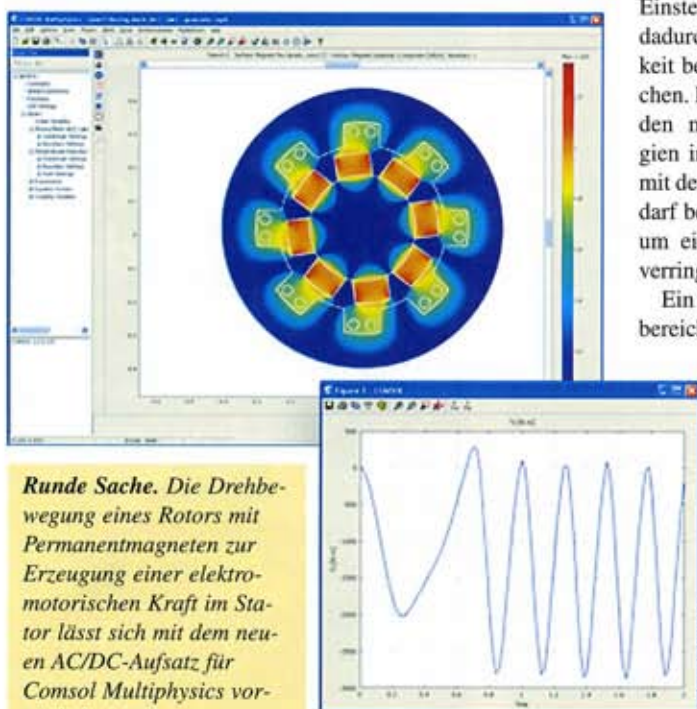
Zu den wichtigsten Eigenschaften zählen die Möglichkeiten zur Berechnung bewegter Netze und von Drehmomenten, die sich insbesondere bei der Modellierung rotierender Maschinen bewähren. Bei der Simulation größerer Systeme unter Verwendung infiniter Elemente kann der Anwender Felder ins Unendliche definieren und dabei zugleich das Modellgebiet eingrenzen. Mit Vektorelementen höherer Ordnung lässt sich die Effizienz der Solver-Einstellungen verbessern und dadurch eine höhere Genauigkeit bei der Berechnung erreichen. Das Modul profitiert von den neuen Solver-Technologien in Comsol Multiphysics, mit denen sich der Speicherbedarf bei bestimmten Aufgaben um eine ganze Zehnerpotenz verringert.

Ein wichtiger Anwendungsbereich der Software ist die Charakterisierung und Parametrisierung modellierter Systeme für Spice und andere Simulationsumgebungen für elektrische Schaltungen. Die Werte konzentrierter Parameter wie Induktivität oder Kapazität werden automatisch extrahiert, wenn es zum

Damit's schneller geht: Das Anwendungsbeispiel Heißwandofen für die Herstellung von Halbleitern ist der Modellbibliothek von Comsol Multiphysics beigelegt.

Beispiel darum geht, den Wert eines Festwiderstands zu ermitteln. Die Software leistet jedoch noch viel mehr, indem sie automatisch den Temperaturgradienten in einem Widerstand ermittelt und für einen temperaturabhängigen Schaltungsbetrieb ein Spice-Modell übernimmt. Umgekehrt kann bei größeren Systemen, für die bereits ein vollständig spezifiziertes Spice-Modell vorliegt, die entsprechende Spice-Netzliste in ein Comsol-Modell importiert werden, um das gesamte System zu simulieren. Dies ermöglicht die Interaktion zwischen idealen Schaltungselementen, die von Spice ermittelt werden, mit einem vollständig ausgearbeiteten, multiphysikalischen Modell eines zentralen Schaltungselements, das aufgrund von Wärme- oder Struktureffekten Änderungen im Betriebsablauf bewirkt.

Produktiver arbeiten. Um dem Anwender den Einstieg in die vielfältigen Möglichkeiten des Tools zu erleichtern, enthält die Software eine Modellbibliothek mit 25 Beispielen. Eine typische Anwendung zeigt die induktive Erwärmung in einem Heißwandofen für die Herstellung von Halbleitern. Die Beispiele enthalten detaillierte Erläuterungen der zugrunde liegenden physikalischen Phänomene sowie eine Anleitung zur Erstellung des Modells. Die Beispiele können auch als Basis zur Erstellung eigener Modelle verwendet werden. www.femlab.de



Runde Sache. Die Drehbewegung eines Rotors mit Permanentmagneten zur Erzeugung einer elektromotorischen Kraft im Stator lässt sich mit dem neuen AC/DC-Aufsatz für Comsol Multiphysics vorzüglich simulieren.

Bilder (3): Comsol