



Kongress für Simulation im Produktentstehungsprozess 29./30. September 2011 Veitshöchheim

Meta-Modellierung zur Gewinnung von Ersatzmodellen aus Messdaten und FE-Analysen als Bausteine für die Multidomain-Simulation

Vortragender

Dr.-Ing. Pham, The-Quan
OptiY GmbH
Haselmühlweg 1
63741 Aschaffenburg



Weitere Autoren

Dr.-Ing. Kamusella, Alfred
Technische Universität Dresden,
Institut für Feinwerktechnik und
Elektronik-Design

1. Problemstellung

Multidomain-Simulation behandelt komplexe Systeme mit verschiedenen physikalisch-technischen Disziplinen. Für konkrete Produkte muss der Anwender die spezifischen Modelle selbst erstellen. Auf dem Markt existieren Software-Pakete wie Matlab/Simulink, MapleSim, Dymola, SimulationX usw. zur Modellierung und Simulation solcher Systeme mittels Netzwerk-Elementen jeweils mit einer eigenen Modellierungssprache. Zur Reduzierung des Modellierungsaufwandes stehen validierte Modellbibliotheken mit Bausteinen zur Systemsimulation zur Verfügung. Diese Modellbausteine beinhalten jedoch eine Vielzahl von wertmäßig noch unbekanntem Modellparametern, die mittels aufwändiger Messungen z.B. an Prototypen validiert werden müssen. Außerdem werden hierbei mathematisch idealisierte Netzwerkelemente zur Beschreibung des Komponentenverhaltens verwendet, was dazu führt, dass manche Effekte in der Systemsimulation nicht ausreichend behandelt werden können. Das Kernproblem ist die Sicherstellung der Glaubwürdigkeit der nichtmessbaren Simulationsergebnisse.

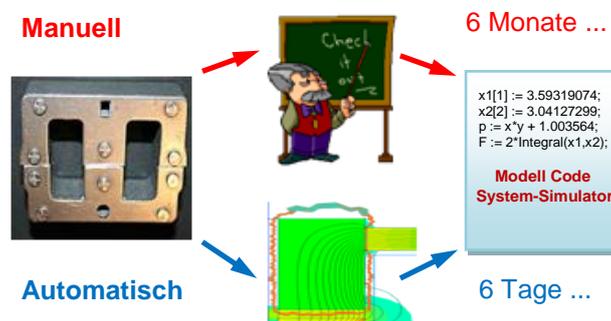


Bild 1: Unterschiedliche Wege zur Gewinnung der Modellcodes für Multidomain-Simulation

Auf der anderen Seite existiert bereits eine Vielzahl von spezialisierten Simulationssystemen auf dem Markt, die bestimmte Teilgebiete der Multidomain-Simulation wie Strömungssimulation, Festigkeitsberechnung, Wärmesimulation usw. abdecken. Sie basieren meist auf der Finite-Element-Methode. Ihr Einsatz bringt enorme Vorteile mit sich, denn aus erstellten CAD-Produktdateien kann man innerhalb sehr kurzer Zeit ein physikalisch-



technisches Modell mit viel weniger Modellparametern erstellen. Die Simulation liefert aufgrund des im System verfügbaren Expertenwissens ein detailliertes und validiertes Komponentenverhalten. Der Einsatz solcher FEM-Software ist in der Industriepraxis bereits bewährt und weit verbreitet. Zur Effizienzsteigerung bei der virtuellen Produktentwicklung besteht der Bedarf, anhand solcher validierter Finite-Element-Modelle automatisch Modellcode zu generieren, welcher direkt als Baustein in der Multidomain-Simulation verwendbar ist. (Bild 1).

Ein weiteres Problem ist die Einbindung von Messdaten in die Simulation. Es existieren viele Systeme, deren physikalisch-technischen Wirkprinzipien für die Modellierung zu komplex oder noch unbekannt sind. Nur Prototypen oder deren Messdaten sind für solche Systeme verfügbar. Zur Verbesserung der Produkteigenschaften muss man jedoch ein virtuelles Modell erstellen und damit Experimente durchführen. Bisher wird dieses Problem mittels Hardware-in-der-Loop (HiL) gelöst. Dabei werden die Modell-Experimente unter Einbeziehung von Prototypen durchgeführt. Eine elegantere und zeitsparende Lösung ist es jedoch, aus Messdaten Ersatzmodelle für die Prototypen zu gewinnen und dann als Bausteine in der Systemsimulation zu verwenden.

Dieser Artikel beschreibt einen neuartigen Ansatz zur Lösung solcher Probleme. Es handelt sich um die Meta- bzw. Ersatzmodellierungstechnik mittels des adaptiven Gauss-Prozesses. In den folgenden Abschnitten werden die Grundlagen dargestellt und eine konkrete Anwendung an einem elektromagnetischen Aktuator veranschaulicht.

2. Meta-Modellierung

Meta-Modellierung oder Ersatzmodellierung ist ein Prozess, um die mathematischen Beziehungen zwischen Modellparametern und Simulationsergebnissen aus einem existierenden Simulationsmodell zu ermitteln (Bild 2). Das Simulationsmodell wird dabei als Black-Box mit Eingangs- und Ausgangsgrößen betrachtet. Für jeden Punkt im Parameterraum erhält man durch Simulation einen Punkt im Entwurfsraum. Um die Abhängigkeit zwischen den Eingangs- und Ausgangsgrößen als eine mathematische Funktion darzustellen, benötigt man im Normalfall sehr viele Modellberechnungen. Bei der vollständigen Versuchsplanung wird ein Raster über den gesamten Parameterraum gespannt. Bei nichtlinearen Modellen muss man sehr viele Punkte in jeder Parameterrichtung festlegen. Außerdem steigt die Anzahl der Rasterpunkte exponentiell zu der Anzahl der Modellparameter. Für Modelle mit einer langen Berechnungszeit ist es praktisch unmöglich, alle Rasterpunkte zu berechnen, um die Ersatzmodelle zu gewinnen. Alle anderen Methoden der statistischen Versuchsplanung (z.B. Monte Carlo, Latin Hypercube, Zentral zusammengesetzte oder D-optimale Versuchspläne) benötigen zwar weniger Modellberechnungen, führen aber zu Meta- bzw. Ersatzmodellen, die das originale Modellverhalten häufig nur sehr schlecht abbilden.

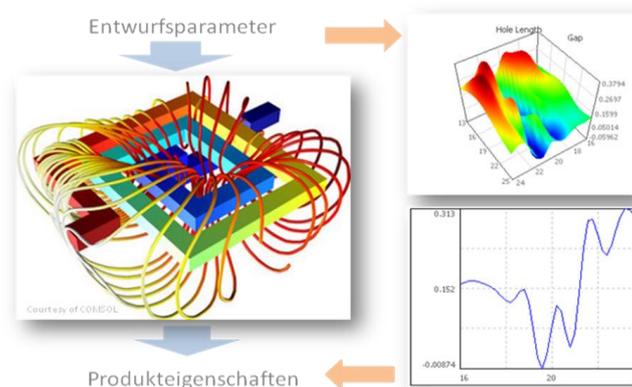


Bild 2: Prinzip der Meta-Modellierung



Ein effizienter Weg zur Gewinnung genauer Metamodelle ist die Anwendung adaptiver Abtaststrategien, wie sie der Gauss-Prozess [2] bereitstellt. Eine Rückkopplung des gewonnenen Metamodells zur Ermittlung weiterer Modellberechnungen ist zwingend erforderlich. Bei Linearität des Modells benötigt man dann nur wenige Modellberechnungen, starke Nichtlinearitäten führen zu einer größeren Anzahl von Modellberechnungen. Der gesamte Parameterraum wird adaptiv abgetastet (Bild 3). Es werden dabei nur so viele Abtastpunkte bzw. Stützstellen mit dem Modell berechnet, um ein hinreichend genaues Ersatzmodell zu bilden.

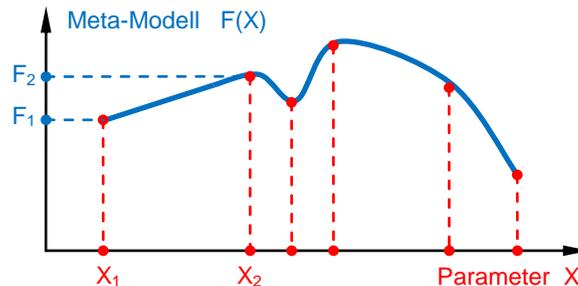


Bild 3: Adaptive Abtaststrategie zur Bildung genauer Ersatzfunktion

Da das Simulationsmodell hierbei eine Black-Box ist, sind diese Informationen zu Beginn der Meta-Modellierung nicht verfügbar. Es müssen mehrere Iterationen durchlaufen werden, um sie schrittweise zu gewinnen und den Parameterraum damit adaptiv abzutasten. Die Meta-Modellierung besteht aus folgenden Schritten:

- a) Auswahl einer Methode aus der statistischen Versuchsplanung zur Festlegung der anfänglichen Stützstellen
- b) Berechnen der Stützstellen mit dem originalen Modell
- c) Konstruieren des Ersatzmodells aus den vorhandenen Stützstellen
- d) Bewerten des Ersatzmodells und suchen nach weiteren Stützstellen
- e) Wiederholen der Schritte b), c) und d), bis eine definierte Genauigkeit des Ersatzmodells oder eine definierte Anzahl von Stützstellen erreicht wird.

Basierend auf den existierenden Stützstellen wird das Ersatzmodell mittels des Gauss-Prozesses gebildet [2]. Es besteht aus einem stochastischen Prozess mit einer multivariaten Normalverteilung und einem Polynom beliebiger Ordnung:

$$\begin{pmatrix} Y_0 \\ \mathbf{Y}^n \end{pmatrix} \approx N_{n+1} \left[\begin{pmatrix} \mathbf{f}_0^T \\ \mathbf{F} \end{pmatrix} \boldsymbol{\beta}, \sigma_z^2 \begin{pmatrix} 1 & \mathbf{r}_0^T \\ \mathbf{r}_0 & \mathbf{R} \end{pmatrix} \right]$$

Die approximierte Antwortfläche geht durch alle berechneten Punkte des Entwurfsraums. So erhält man ein Metamodell, das alle mit dem originalen Modell berechneten Punkte bzw. Stützstellen exakt wiedergibt. Außerdem liefert der Gauss-Prozess auch die Unsicherheit des Metamodells in den Zwischenräumen zwischen den Stützstellen. Damit ist es möglich, weitere Punkte im Parameterraum zu suchen und abzutasten, um diese Unsicherheit zu minimieren und ein noch genaueres Metamodell zu generieren. Die Suche nach weiteren Stützstellen erfolgt mit evolutionären Algorithmen, um lokale Optima zu überwinden.

Die Anzahl der erforderlichen Modellberechnungen bzw. Stützstellen ist von Fall zu Fall unterschiedlich und hängt von den folgenden 3 Faktoren ab:



- Anzahl der Modellparameter,
- Grad der Nichtlinearität des zu approximierenden Modells und
- Grad der Interaktion zwischen den Modellparametern.

Die erforderliche Anzahl der Modellberechnungen ergibt sich erst im Verlauf der adaptiven Abtaststrategie und kann vorher kaum abgeschätzt werden.

3. Automatische Code-Generierung mit OptiY®

Bei komplexen technischen Systemen ist es günstiger, spezialisierte Programme für die verschiedenen Komponenten zu verwenden, denn daraus resultieren folgende Vorteile:

- Einfache und schnelle Bedienung der Software
- Verfügbarkeit von Expertenwissen
- Detailliertes und validiertes Komponentenverhalten
- Eine geringe Anzahl von zu identifizierenden Modellparametern.

Für die Systemsimulation müssen dann die Komponentenmodelle der unterschiedlichen Software-Programme wechselwirkend miteinander verkoppelt werden. In der Regel ist dies schwer zu realisieren, weil diese Simulationsprogramme häufig über keine einheitlichen Schnittstellen zur Co-Simulation mit anderen CAD/CAE-Systemen verfügen. Weiterhin sind die Komponentenmodelle sehr komplex und enthalten meist eine große Anzahl von Freiheitsgraden, die zu einem hohen Rechenaufwand für die Systemsimulation führt. Damit stößt man auf das Problem der technischen Machbarkeit.

Ein wesentlich besserer Weg besteht darin, schnellen Ersatzmodellcode aus den komplexen Komponentenmodellen mittels Meta-Modellierung zu gewinnen und diesen Modellcode in Form von Bausteinen in der Multidomain-Simulation zu verwenden. Dadurch wird die Berechnungszeit für das gesamte Produktmodell reduziert. Somit kann man mit dem Gesamtmodell rechenintensive Experimente durchführen, wie beispielsweise Robust-Optimierung, Zuverlässigkeitsanalyse, Regelung und Steuerungsentwurf, die eine große Anzahl von Modellberechnungen benötigen.

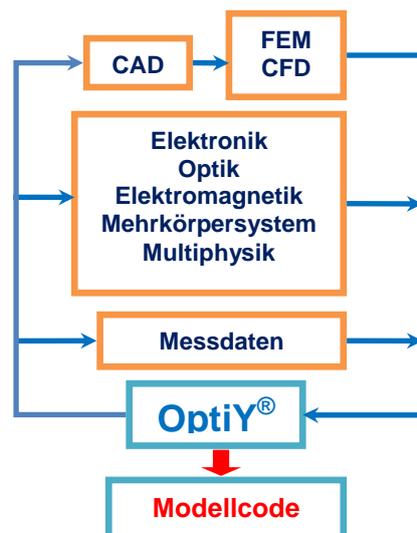


Bild 4: Multidisziplinäre Meta-Modellierung mit OptiY®

Die Vielfalt der in einer Berechnungsabteilung eingesetzten spezialisierten CAD/CAE-Softwaretools macht den Einsatz von Metamodellierungssoftware sehr attraktiv. Um diese Marktlücke zu schließen, wurde das multidisziplinäre Analyse- und Optimierungsprogramm



OptiY® entwickelt, das eine automatische Generierung von effizienten Metamodellen aus unterschiedlichen Modellklassen unterstützt (Bild 4). OptiY® bietet allgemeine und direkte Schnittstellen zu vielen kommerziellen Software-Systeme wie CAD, FEA, elektronische Schaltungssimulation, CFD, Mehrkörpersimulation, hausinternen Programmen usw. [1]. Darüber hinaus kann der Anwender schnell und einfach externe Programme für eine benutzerfreundliche Bedienung selbst integrieren. Die Einbindung erfolgt auf der Grundlage der NET. Framework®-Technologie und der modernen Programmiersprachen Visual Basic oder C#.

4. Elektromagnetischer Aktuator

Zur Demonstration der Metamodellierungstechnik wird ein elektromagnetischer Aktuator eines Blindenschriftprägers verwendet (Bild 5). Das Gesamtsystem besteht aus einer elektrischen Schaltung, einem magnetischem Kreis und dem mechanischen Teilsystem aus Prägenadel mit Rückhofeder. Die Erwärmung der Magnetspule wird berücksichtigt.

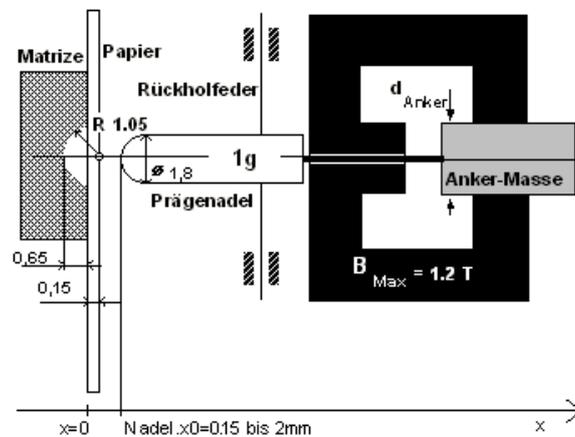


Bild 5: Antriebssystem des Brailleschriftdruckers

In einem ersten Schritt wurde das gesamte System des elektromagnetischen Aktuators nur mit Netzelementen aufgebaut, die aus der Modell-Bibliothek von SimulationX [4] stammen (Bild 6). Insbesondere für kompliziertere Magnetkreis-Geometrie stößt hierbei die hinreichend genaue Nachbildung mit magnetischen Netzwerk-Elementen sehr schnell an Grenzen. Jedoch konnte mit diesem Netzwerkmodell die Wechselwirkung zwischen allen Komponenten des elektromagnetischen Aktuators sehr gut nachgebildet werden.

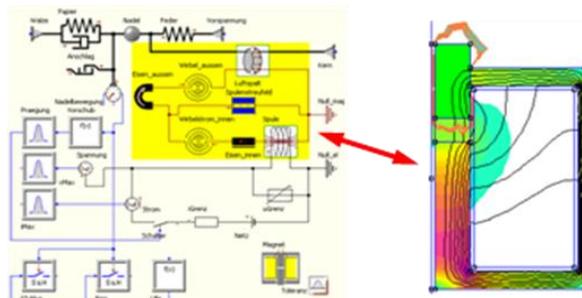


Bild 6: Netzwerk- und Finite-Elemente-Modell des Antriebes

In einem zweiten Schritt wurden dann die magnetischen Netzwerk-Elemente durch ein Ersatzmodell ersetzt. Dieses Metamodell wird aus der Finite-Element-Simulation mit der FEMM-Software gewonnen [5]. Unter Anwendung des Gauss-Prozesses erzeugt OptiY® automatisch den Modellcode des Meta-Modells nach iterativem Abarbeiten des FEMM-



Programms mit den Parameterkombinationen der erforderlichen Abtaststellen. Bild 7 zeigt die 3D-Darstellungen der Ersatzmodelle für die magnetische Kraft und die Flussverkettung in Abhängigkeit des Arbeitsluftspalts x und des Spulenstroms i :

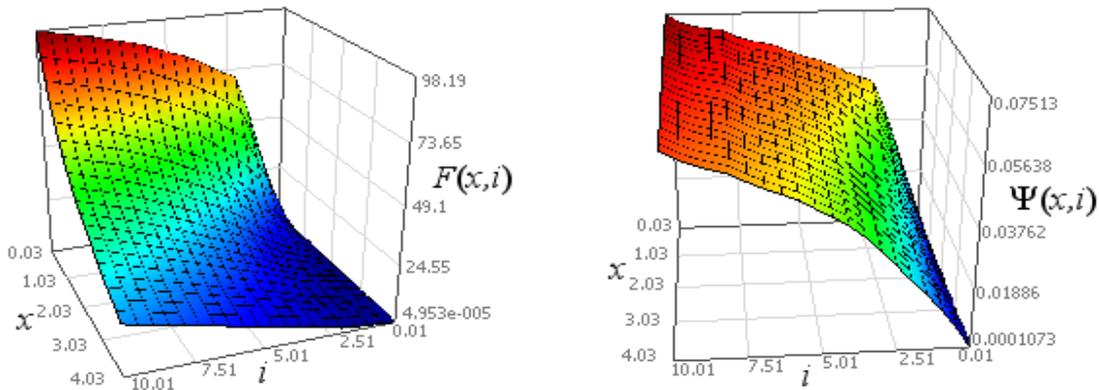


Bild 7: Ersatzmodelle der magnetischen Kraft und Flussverkettung

Bild 8 vergleicht das dynamische Verhalten des Blindschriftdruckers zwischen dem reinen Netzwerk-Modell und unter Einbeziehung des gewonnenen Ersatzmodells. Das Diagramm zeigt geringe Unterschiede in den Signalverläufen:

- Das Ersatzmodell beschreibt die räumliche Inhomogenität des magnetischen Feldes besser als die Ersatzstruktur aus magnetischen Netzwerk-Elementen.
- Insbesondere die Idealisierung des Spulenstreufeldes in Form von magnetischen Netzwerkelementen kann zu größeren Abweichungen führen, da keine Parameter-Identifikation anhand von Prototypen vorgenommen wurde.
- Wirbelströme und magnetische Hysterese wurden beim Vergleich nicht berücksichtigt. Die magnetischen Netzwerkwerk-Elemente bieten jedoch die Möglichkeit, diese Effekte zumindest qualitativ in der Systemsimulation zu berücksichtigen. Ersatzmodelle unter Berücksichtigung dieser beiden Effekte in der Finiten-Element-Simulation können zurzeit noch nicht gebildet werden.

Eine detailliertere Beschreibung des Beispiels ist in [3] zu finden.

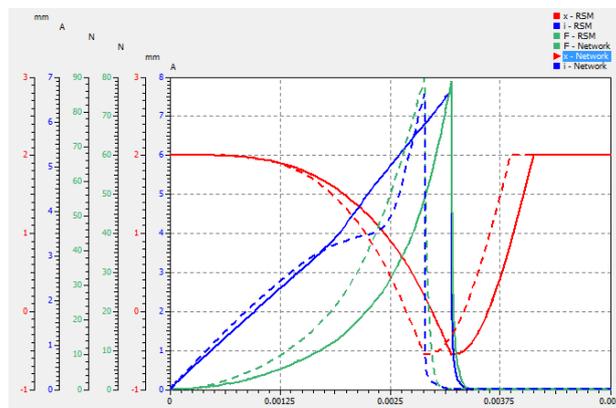


Bild 8: Vergleich der dynamischen Simulation zwischen Netzwerk- (strich) und Ersatzmodell (durchgezogen). x – Nadelweg, i – Spulenstrom, F – magnetische Kraft



5. Zusammenfassung

Die Modellierung komplexer technischer Systeme mit Netzwerk-Elementen ist ein geeigneter Ansatz. Der Zeitaufwand ist jedoch groß und die Modellierung ist manchmal schwierig für spezielle Anwendungen. Die Meta-Modellierung ist ein effektiver Weg zur automatischen Gewinnung schneller Ersatzmodelle aus komplexen Komponentenmodellen in spezialisierten CAD/CAE-Systemen. Die Anwendung des adaptiven Gauss-Prozesses ermöglicht eine sehr effiziente Abtastung des Parameterraums zur Bildung eines hinreichend genauen und auswertbaren Ersatzmodells. Es werden nur so viele Abtast- bzw. Stützpunkte mit dem originalen Modell berechnet, wie es erforderlich ist.

Die Algorithmen sind in der multidisziplinären Analyse- und Optimierungssoftware OptiY® implementiert, die über direkte und allgemeinen Schnittstellen zu vielen kommerziellen CAD/CAE-Software verfügt. Damit lässt sich effizienter Ersatzmodellcode aus spezialisierten Modellklassen schnell und einfach gewinnen. Diese Ersatzmodelle können dann als Bausteine für die Multidomain-Simulation von komplexen technischen Systemen verwendet werden.

Die Fallstudie mit einem elektromagnetischen Aktuator demonstriert die Arbeitsweise und den Nutzen der Meta-Modellierungstechnik. Die Simulation mit dem Ersatzmodell aus spezialisierter Finite-Element-Software liefert bei komplizierter Magnetkreis-Geometrie deutlich bessere und genauere Ergebnisse, als mit dem Netzwerkmodell. Außerdem existieren für das Ersatzmodell weit weniger Modellparameter, die validiert werden müssen.

6. Referenzen

- [1] OptiY. *Software und Dokumentation*. OptiY GmbH 2011. www.optiy.eu
- [2] Pham T.Q., Kamusella A., Neubert H.: *Auto-Extraction of Modelica Code from Finite Element Analysis or Measurement Data*. 8. International Modelica Conference, 20.-22. März 2011 in Dresden
- [3] http://www.optiyummy.de/index.php/Software:_FEM_-_Tutorial_-_Magnetfeld
- [4] SimulationX. *Software und Dokumentation*. www.iti.de
- [5] FEMM. *Software und Dokumentation*. www.femm.info