

Multi-Domänen- und Multi-Ziel-Optimierung  
in der virtuellen Produktentwicklung

# Bis an die physikalischen Grenzen

Die Herausforderungen an die virtuelle Produktentwicklung, speziell wenn es um die schnelle Umsetzung von Konzepten für die Elektromobilität geht, erfordern neue Konzepte für Unternehmen und für Entwicklungsprozesse.

Die EM-motive GmbH als Gemeinschaftsunternehmen von Daimler und Bosch nutzt die gebündelten Kompetenzen eines Automobilherstellers und eines Automobilzulieferers, um neue Elektromotoren zu entwickeln und in Serie zu fertigen. Sie steht für wettbewerbsfähige Kosten bei höchster Qualität. Damit soll Elektromobilität zuverlässig, erschwinglich und schnell erlebbar werden. Die Redaktion des CADFEM Journals sprach mit Dr.-Ing. Marc Brück, Fachreferent für Simulationsmethoden bei der EM-motive GmbH, über die Rolle der Simulation in der Produktentwicklung.

**Herr Brück, welche Anforderungen sind bei der Entwicklung von elektrischen Traktionsmaschinen für Automobilanwendungen zu erfüllen?**

Die Anforderungen betreffen zunächst einmal alle bekannten physikalischen Domänen wie Thermodynamik, Strukturmechanik, Elektrotechnik und Akustik, die immer gleichzeitig zu beachten sind. Darüber hinaus müssen weitere Anforderungen erfüllt werden. Hervorzuheben sind die Sicherheit und die Kosten einer Maschine. Diese lassen sich nicht direkt einer physikalischen Domäne zuordnen, sondern hängen immer von mehreren Domänen gleichzeitig ab. Generell können die Anforderungen nicht getrennt voneinan-

der bewertet und optimiert werden, da die Wechselwirkungen immer domänenübergreifend auftreten.

**Können Sie ein Beispiel für solche Wechselwirkungen nennen?**

Ein typisches Beispiel ist eine Anforderungsanpassung „in letzter Minute“, etwa die Erhöhung der maximalen Drehzahl der Maschine. Eine Erhöhung der maximalen Drehzahl ist nur durch konstruktive Änderungen möglich, da beim bisherigen Design beispielsweise einer permanent-erregten Synchronmaschine mit vergrabenen Magneten die Stegdicke so gewählt wurde, dass genau die „bisher gültige“ maximale Drehzahl aus Festigkeitsgesichtspunkten möglich war.

Eine Erhöhung der Stegdicke mit dem Ziel, die mechanische Festigkeit zu steigern, führt nun unweigerlich zu einem erhöhten magnetischen Streufluss innerhalb des Rotors und damit zu einer Reduzierung des maximalen Drehmoments beziehungsweise der Leistung. Damit entsteht ein Konflikt mit anderen weiterhin bestehenden Anforderungen. Zur Kompensation des Verlustes an Drehmoment müsste zum Beispiel die Stromstärke in den Windungen erhöht werden, was wiederum unweigerlich zu erhöhten Ohmschen Verlusten und damit reduziertem Wirkungsgrad führt.

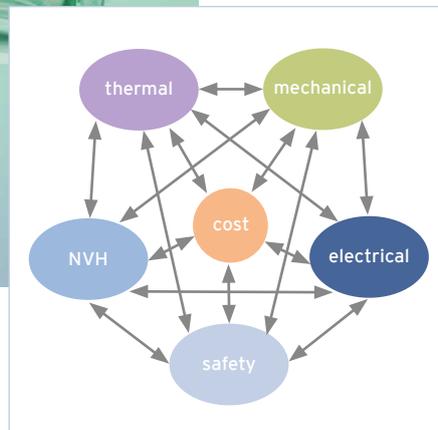


„Vielmehr ist eine Gesamtsystem-Simulation notwendig, bei der die dynamischen Wechselwirkungen zwischen den Komponenten mit berücksichtigt werden.“

Dr.-Ing. Marc Brück

Dieser Teufelskreis ließe sich noch weiter fortführen. Letztlich landet man bei der Erkenntnis, dass diese kurzfristige „kleine“ Anforderungsanpassung für die Entwicklung „Zurück auf Los“ bedeutet mit einer erneuten Optimierung über alle Domänen hinweg.





*Solche Wechselwirkungen treten jedoch nicht nur innerhalb der elektrischen Maschine, sondern auch im Zusammenspiel mit anderen Komponenten auf, oder nicht?*

Völlig korrekt. Wird ein Fahrzeug mit voll-elektrischem oder hybridem Antriebsstrang betrachtet, sind folgende Komponenten immer vorhanden:

- ein Energiespeicher, z.B. eine Batterie oder Brennstoffzelle,
- eine Leistungselektronik,
- eine elektrische Maschine, die sowohl als Motor als auch als Generator betrieben wird,
- ein Getriebe zur Drehzahl-Drehmoment-Wandlung und
- ein Fahrzeug mit jeweils individuellen Fahrern, die
- das Fahrzeug eventuell vernetzt in einer bestimmten Verkehrssituation bewegen.

Zwischen diesen Komponenten gibt es nun Wechselwirkungen in der elektromagnetischen, thermischen und mechanischen Welt. Zudem besitzt jede Komponente in der Regel ihr eigenes Steuergerät, die alle über CAN-Bus mit zusätzlichen Sensoren vernetzt sind. Die Regelung solcher komplexer Systeme erfolgt dann über kaskadierte Regelkreise.

*Und was bedeutet das für die virtuelle Produktentwicklung?*

**Bild 1:** Vielfältigste Wechselwirkungen zwischen den Domänen.

Dass eine „klassische“ Komponentenentwicklung mit starren Lastenheft-Vorgaben für die Schnittstellen nicht mehr ausreicht, um Produkte so zu entwickeln, dass sie im Systemumfeld alle Anforderungen erfüllen. Vielmehr ist eine Gesamtsystem-Simulation notwendig, bei der die dynamischen Wechselwirkungen zwischen den Komponenten mitberücksichtigt werden. Hierbei ist zu beachten, dass üblicherweise jeder Komponentenlieferant seine eigene Simulationslandschaft mit den verschiedensten Simulations-Software-Paketen im Einsatz hat.

*Wie haben Sie diese Herausforderung bewältigt?*

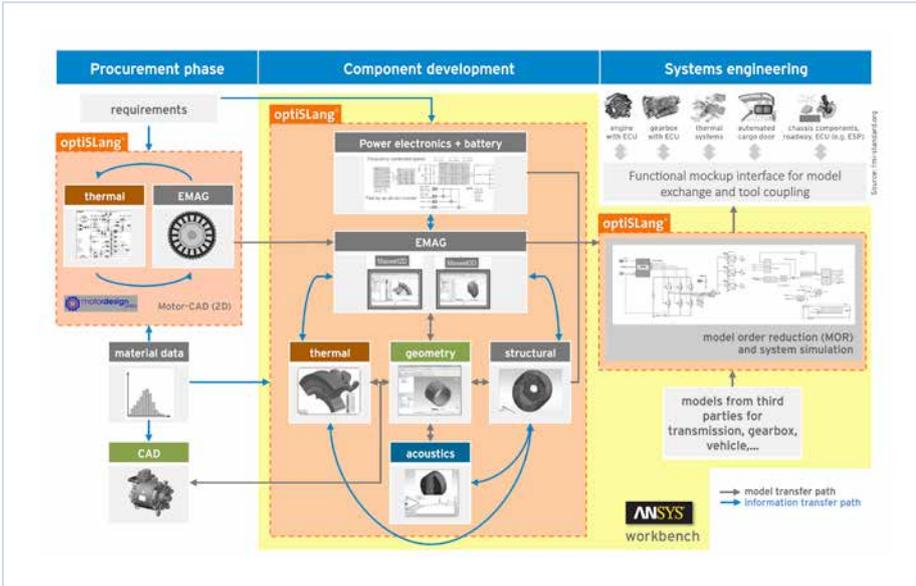
Unser Simulationsworkflow ist flexibel an die Anforderungen der einzelnen Produktentwicklungsphasen anpassbar. Während der Anfrage- und Angebotsphase wird ein erstes Maschinendesign durch Kopplung der Software-Pakete optiSLang und Motor-CAD unter Einbeziehung einer zentralen Materialdatenbank in der elektromagnetischen und thermischen Domäne auf die bis dahin bekannten Anforderungen hin optimiert und eine erste Preisindikation abgeleitet.

derungen hin optimiert und eine erste Preisindikation abgeleitet.

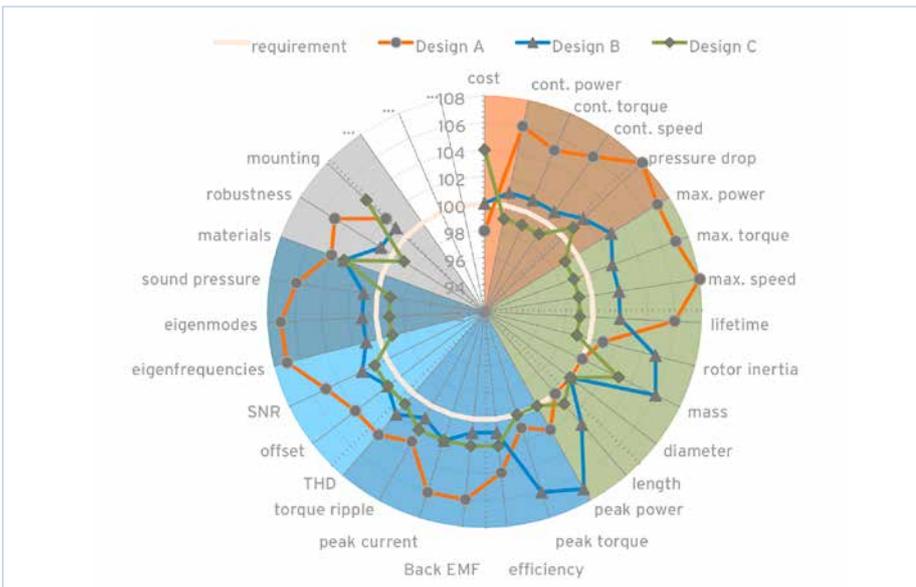
Während der folgenden Musterphasen werden die Aktivteile in ANSYS Maxwell unter Berücksichtigung von zusätzlichen Anforderungen weiter optimiert. Der Einfluss der Leistungselektronik auf die Performance der E-Maschine kann über eine Schnittstelle zum Systemsimulator ANSYS Simplorer berücksichtigt werden.

Die bidirektionale Schnittstelle zwischen ANSYS DesignModeler und dem verwendeten CAD-System erlaubt die Integration von parametrisierten Modellen von Hilfsgeometrien, zum Beispiel des Gehäuses. Ausgehend vom ANSYS Design-Modeler wird die Geometrie an die domänenspezifischen ANSYS Mesher und anschließend das Netz an die entsprechenden Solver weitergereicht. Die integrierten Schnittstellen erlauben nun eine Verwendung von Ergebnissen des einen Solvers als Randbedingung für einen oder mehrere weitere Solver. So können unter anderem Kräfte aus einer elektromagnetischen Simulation mit ANSYS Maxwell als Anregungen für eine strukturelle Simulation mit ANSYS Mechanical verwendet werden. Eine vollständig gekoppelte Simulation über die Domänen Elektromagnetik, Strukturmechanik, Thermodynamik und Akustik ist somit möglich.

Optional kann an dieser Stelle eine weitere Optimierungsschleife mit optiSLang realisiert werden. Diese ist allerdings aufgrund der detaillierten Rechenmodelle sehr zeitintensiv. Daher wird meist gleich der nächste Schritt des Workflows ausgeführt, nämlich die Extraktion von ordnungsreduzierten Modellen für eine Gesamtsystem-Simulation. Aus ANSYS Maxwell kann dies beispielsweise mit dem integrierten „Equivalent Circuit Extraction Toolkit“, kurz ECE-Toolkit, erfolgen.



**Bild 2:** Ein Überblick über den Simulationsworkflow.



**Bild 3:** Spinnennetz-Diagramm in dimensionsloser Darstellung.

**Wie lassen sich diese reduzierten Modelle weiterverwenden?**

In ANSYS Simplorer lassen sich diese reduzierten Modelle zu einer Gesamtsystem-Simulation koppeln. Optional können weitere Modelle von Dritten, etwa ein Getriebemodell oder ein Gesamtfahrzeug-Modell, hinzugenommen werden. An dieser Stelle ist die dritte Optimierungsschleife möglich, innerhalb derer die Wechselwirkungen zwischen den Komponenten durch Variation, zum Beispiel von Reglerparametern, analysiert werden können.

Um schließlich die Forderung nach Austauschbarkeit von Modellen mit Dritten zu erfüllen, wird das Functional Mockup Interface (FMI) genutzt, um Black-

Box-Modelle der Einzelkomponenten, sogenannte Functional Mockup Units (FMU), zu erstellen. Diese FMUs können aus Sicht von Geheimhaltungsaspekten problemlos ausgetauscht werden, da sie lediglich standardisierte Ein- und Ausgänge besitzen, das produktspezifische Know-how allerdings nur dem Ersteller zugänglich ist.

Darüber hinaus besitzen die FMUs den Vorteil, dass sie sich in alle gängigen Software-Pakete zur Systemsimulation importieren lassen und somit zum Beispiel das Verhalten der E-Maschine als Einzelkomponente in der Simulationslandschaft eines Kunden oder Entwicklungspartners beschreiben können.

*Sie haben in Ihrem Workflow drei Optimierungsschleifen vorgesehen. An welcher Stelle führen Sie Toleranz- und Robustheitsanalysen durch?*

Prinzipiell ist das an allen drei Stellen möglich, am sinnvollsten jedoch in der ersten und letzten Optimierungsschleife, da dort der Erkenntnisgewinn am größten und die Rechenzeiten am geringsten sind. Vor allem in der ersten Optimierungsschleife lassen sich mit Hilfe der Toleranzanalyse wertvolle Erkenntnisse hinsichtlich der zu erwartenden Streuungen von Zielgrößen gewinnen, wenn die statistischen Schwankungen der Einflussgrößen berücksichtigt werden.

*Wie schaffen Sie es, die Ergebnisse dieser komplexen Berechnungen, die ja ebenfalls viele verschiedene Disziplinen betreffen, verständlich darzustellen und zu erläutern?*

Für die kompakte Darstellung des Erreichungsgrades von Anforderungen in den verschiedenen physikalischen Domänen hat sich eine besondere Form des Spinnennetzdiagramms bewährt. Hierbei werden alle Anforderungen in eine dimensionslose Darstellung transformiert. Anschließend lassen sich alle in einem einzigen Spinnennetzdiagramm darstellen, das zur besseren Unterscheidung der Domänen noch farblich mit einem Kuchendiagramm hinterlegt ist. Da sich alle Ergebnisse, egal welcher Domäne, auf die Lastenheftforderungen beziehen, ist sehr schnell erkennbar, in welchen Punkten die Lastenheftforderungen wie gut erfüllt werden. Alle Punkte, die außerhalb des 100 %-Referenzkreises liegen (Lastenheftforderung), erfüllen die Anforderungen. Auch Wechselwirkungen zwischen physikalischen Domänen sind sehr anschaulich darstellbar. Wird beispielsweise an einem Design eine Verbesserung auf Seiten der Akustik umgesetzt, sind die meist negativen Auswirkungen auf den Wirkungsgrad direkt ersichtlich.

*Herr Brück, wir danken für die Informationen und wünschen viel Erfolg bei der Multi-Domänen- und Multi-Ziel-Optimierung.*



**InfoUnternehmen**  
EM-motive GmbH  
www.em-motive.com

**InfoAnsprechpartner** | EM-motive  
Matthias Naumann  
matthias.naumann@em-motive.com

**InfoAnsprechpartner** | CADFEM  
Stefanie Gester  
Tel. +49 (0) 711-99 07 45-21  
sgester@cadfem.de