

## Die Konstruktion von Elektroantrieben

*Bei der Entwicklung eines optimalen, kundenspezifischen Motors für Hybrid- und Elektrofahrzeuge müssen diverse elektronische und mechanische Komponenten als ein gemeinsames System entworfen und getestet werden. Die Entscheidung, welche Kompromisse an welcher Stelle einzugehen sind, fällt oft nicht leicht. Die EM-motive GmbH hat sich dieser Herausforderung durch die Entwicklung eines Multi-Domain-Workflows mit der Simulationssoftware von ANSYS sowie der ANSYS optiSLang-Optimierungssoftware gestellt.*



Trotz des umfangreichen Know-how's von EM-motive ist die Fertigung eines modularen Motors komplex und anspruchsvoll. Neben den typischen Rahmenbedingungen für die Konstruktion (Kosten, Einbauraum für den Motor, Kühlung und Wechselrichter-spezifische Eigenschaften) betreffen die kundenseitigen Anforderungen für jeden Motortyp ein breites Spektrum der bekannten physikalischen Bereiche:

- \* Thermodynamik: Kühlmitteldurchfluss und -temperatur, Umgebungs-, Wicklungs- und Magnettemperaturen
- \* Strukturmechanik: Einbauraum, Drehmoment, Leistung, Drehzahl, Toleranzen zu anderen Teilen und Lagerkräfte
- \* Elektrotechnik: Spannung, Strom, Wechselrichter-spezifische Eigenschaften
- \* Effizienz und Akustik: Luft- und Körperschall.

Hinzu kommt, dass alle zu optimierenden Parameter gleichzeitig berücksichtigt werden müssen. Auch andere Faktoren wie unerwünschte Nebengeräusche (Noise, Vibration, Harshness, NVH), Sicherheit sowie die Kosten für den Motor müssen mit einkalkuliert werden.

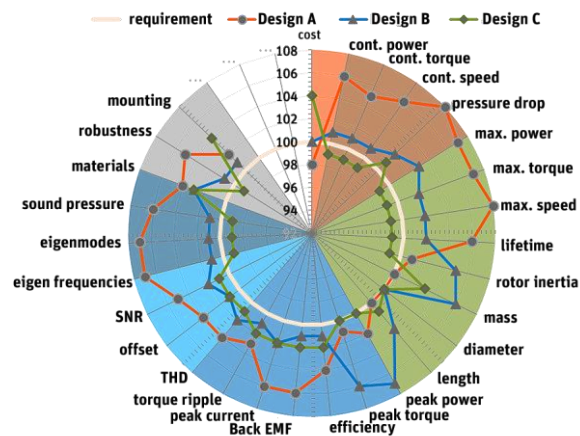
Die Ingenieure von EM-motive erkannten, dass in einer derart interaktiven Umgebung eine „klassische“ Komponentenentwicklung – bei der jede Komponente nach starren Lastenheft-Vorgaben separat konstruiert und anschließend alle Komponenten zusammengeführt werden – nicht mehr möglich ist. Stattdessen entwickelte das Unternehmen einen Simulationsworkflow, der die dynamischen Wechselwirkungen zwischen den Komponenten sowie alle notwendigen Parameter berücksichtigt, um optimale Lösungen zu ermitteln und die Robustheit der Konstruktion zu gewährleisten.

Dieser parametrisierte Workflow, der auch eine Sensitivitätsanalyse, eine Entwurfsoptimierung und eine Robustheitsbewertung unterstützt, umfasst neben der ANSYS-Simulationssoftware noch weitere Softwaretools und wurde in ANSYS optiSLang erstellt und gehostet. Diese Workflows unterstützen EM-motive bei der Entwicklung von Elektromotoren unter strengen Zeit- und Kostenvorgaben. Außerdem werden kundenspezifische Anforderungen an die Konstruktion erfüllt, zum Beispiel Anforderungsanpassungen eines Motorentwurfs „in letzter Minute“.

So wollte ein Kunde, dass die maximale Drehzahl für einen bestimmten Motor um 1.000/min erhöht werden sollte. Die Fliehkräfte aufgrund der erhöhten Drehzahl hätten jedoch zu einem Versagen der Rotorkonstruktion geführt. Die Ingenieure hatten die Möglichkeit, durch die Vergrößerung der Stegdicke der Taschen für die Magnete, die in die Rotorlamellen gestanzt wurden, den Belastungen durch die erhöhten Fliehkräfte entgegenzuwirken.

Das hätte jedoch zu einem erhöhten magnetischen Streufluss innerhalb des Rotors und damit zu einer Reduzierung des maximalen Drehmoments beziehungsweise der Leistung geführt. Eine Möglichkeit, diesen Verlust an Drehmoment zu kompensieren, wäre die Stromstärke in den Wicklungen zu erhöhen (dies ist aber nur dann möglich, wenn ein höherer Strom von der Batterie und dem Elektroniksystem bereitgestellt werden kann). Diese Lösung würde jedoch unweigerlich zu erhöhten Ohm'schen Verlusten und einem reduzierten Wirkungsgrad führen – und war für den Kunden nicht akzeptabel. Aus diesem Grund musste der gesamte Motor von Grund auf neu entwickelt werden, um alle Anforderungen zu erfüllen.

Glücklicherweise kann der Simulationsworkflow von EM-motive zur Analyse der Anforderungen an einen bestimmten Motor flexibel angepasst werden. Dabei ist es möglich, alle dynamischen Wechselwirkungen zwischen den Komponenten zu berücksichtigen und dem Kunden ein solides Verständnis der Kompromisse für jede Entwurfsentscheidung zu vermitteln. Der Workflow liefert die Grundlage, den besten Kompromiss zwischen oft widersprüchlichen Zielen zu finden.



Ein Spinnennetz-Diagramm veranschaulicht die drei Designkonzepte und zeigt, wie gut sie die Kundenanforderungen erfüllen.

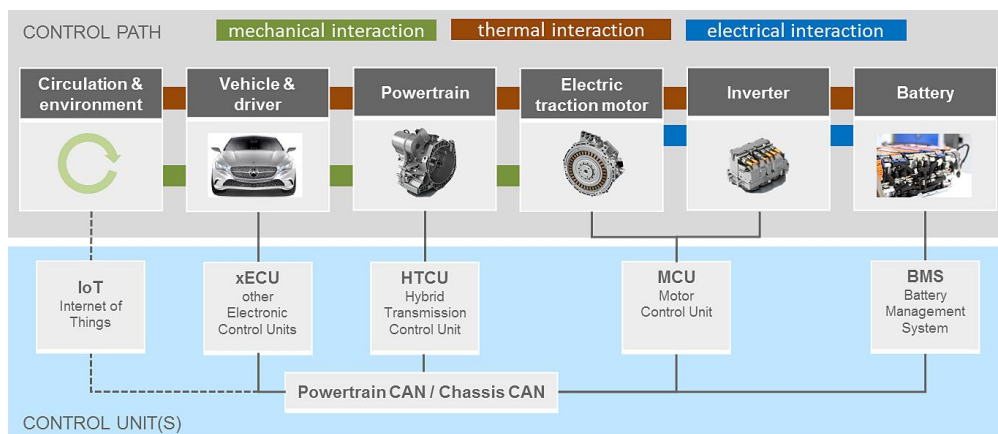
### Ein Workflow zur digitalen Entwicklung

Während der Anfrage- und Angebotsphase können die Design-Ingenieure durch Koppelung des ANSYS optiSLang-Workflow mit einer CAD-Software und unter Einbeziehung einer zentralen Materialdatenbank der elektromagnetischen und thermischen Bereiche verschiedene Varianten und Toleranzen zur Erfüllung der Kundenanforderungen prüfen. Damit können sie dem Kunden eine schnelle Antwort liefern, ob die Anforderungen mit verfügbaren Motoren erfüllt werden können oder ob eine neue Motorenentwicklung erforderlich wird. Durch eine Reihe von iterativen Phasen, in denen immer neue Anforderungen hinzukommen, wird ein neuer Motor in allen relevanten physikalischen Bereichen mit Hilfe der ANSYS-Simulationssoftware entworfen und optimiert. Eine gemeinsame Schnittstelle mit dem Systemsimulator ANSYS Simplorer hilft, den

Einfluss der Leistungselektronik auf die Leistung des Elektromotors zu prüfen. Die bidirektionale Schnittstelle zwischen ANSYS DesignModeler und dem verwendeten CAD-System erlaubt die Integration von parametrisierten Modellen von Hilfsgeometrien – zum Beispiel des Gehäuses – in den Systementwurf. Die ANSYS-Tools ermöglichen den Entwicklern nun die Verwendung von Ergebnissen des einen Solvers als Randbedingungen für einen oder mehrere weitere Solver. So können Kräfte aus einer elektromagnetischen Simulation mit ANSYS Maxwell als Anregungen für eine strukturelle Simulation mit ANSYS Mechanical verwendet werden.

**„Das Unternehmen entwickelte einen Simulationsworkflow, der die dynamischen Wechselwirkungen zwischen den Komponenten berücksichtigt.“**

Mithilfe der verschiedenen in die ANSYS Workbench integrierten Tools ist es möglich, eine vollständig gekoppelte Simulation über die Bereiche Elektromagnetik, Mechanik, Thermodynamik und Akustik zu erstellen. Mit diesen auf Parametern basierenden Workflows können alle wichtigen Sensitivitätsstudien der physikalischen Domänen innerhalb der relevanten Konstruktion einschließlich der Toleranzbestimmung durchgeführt werden. Die Ingenieure können weitere Optimierungsschleifen hinzufügen. Aufgrund des widersprüchlichen Charakters der Ziele und Beschränkungen der unterschiedlichen Disziplinen und der Notwendigkeit, das Motorverhalten auf Systemsimulationsebene schnell überprüfen zu können, müssen „Reduced Order Models“ (ROMs) extrahiert werden. Mit dem in ANSYS Maxwell integrierten „Equivalent Circuit Extraction Toolkit“, kurz ECE-Toolkit, kann das Team reduzierte Modelle für eine Gesamtsystem-Simulation extrahieren.



*Der Designworkflow für einen Elektromotor muss alle diese internen und externen Komponenten umfassen.*

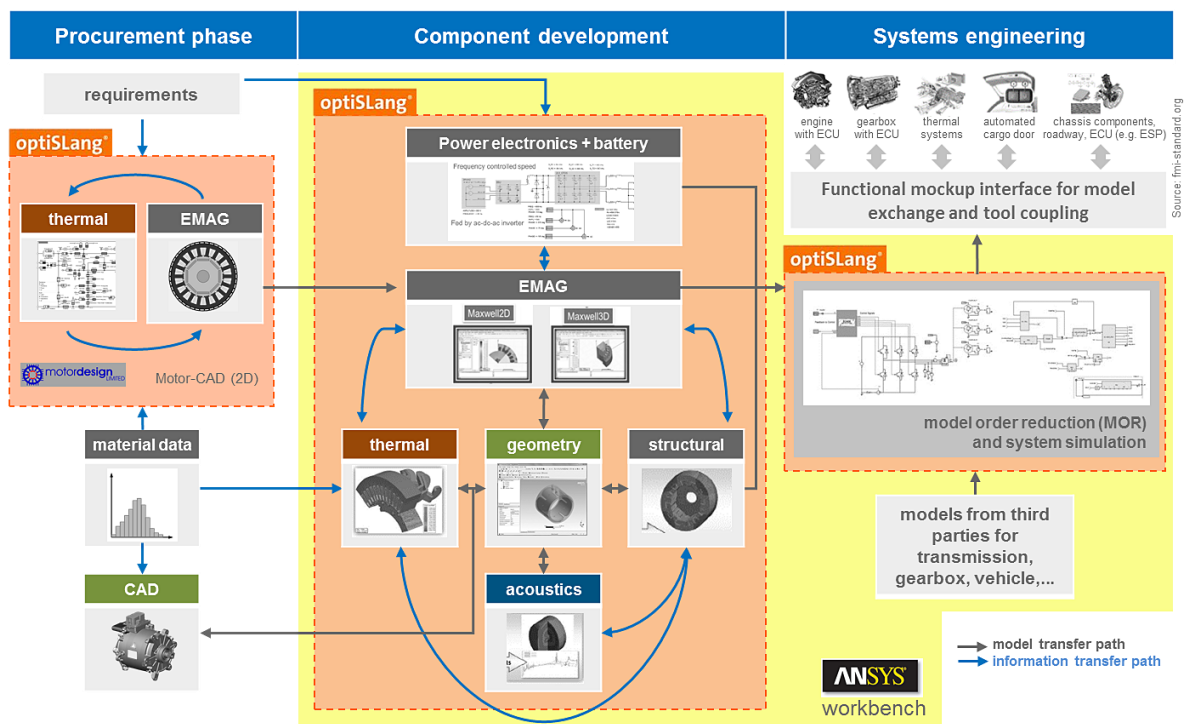
## Modellierung von Systemen

Die ROM-Modelle können in ANSYS Simplorer zu einer Gesamtsystem-Simulation gekoppelt werden. Es wird erneut ein parametrisierter Workflow in optiSLang erstellt. Optional können weitere Dritt-Modelle hinzugenommen werden, etwa ein Getriebemodell oder ein Gesamtfahrzeug-Modell. An dieser Stelle können die Ingenieure eine dritte Optimierungsschleife ausführen, um die Wechselwirkungen zwischen den Komponenten durch Variation, zum Beispiel von Reglerparametern, zu analysieren.

Um die Austauschbarkeit von Modellen mit zusätzlichen Motorkomponenten von Dritten zu gewährleisten, nutzen die Ingenieure das standardisierte Functional Mockup Interface (FMI) zur Erstellung von Modellen der Einzelkomponenten – die so genannten Functional Mockup Units (FMU). Diese FMUs werden mit Hilfe einer Drittsoftware erstellt und können auch unter Einhaltung von IP-Geheimhaltungspflicht ausgetauscht werden. Da sie lediglich standardisierte Ein- und Ausgänge besitzen, ist das produktspezifische Know-how nur dem Hersteller zugänglich. 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.

Die letzte Herausforderung besteht darin, den Kunden die optimierten Entwürfe so zu präsentieren, dass sie die verschiedenen Entwurfsvarianten und deren Abwägungen klar nachvollziehen können. Hierzu hat EM-motive ein Spinnennetzdiagramm entwickelt, das alle Leistungsindikatoren in dimensionslose Variablen transformiert und die Lastenheftforderungen als Standardisierungswerte verwendet. Es umfasst alle Bereiche und deren Lastenheftforderungen und ist zur besseren Unterscheidung der Bereiche mit einem farbigen Kuchendiagramm hinterlegt. 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 Entwurf eine Verbesserung der Akustik umgesetzt, sind die meist negativen Auswirkungen auf den Wirkungsgrad direkt ersichtlich. Da sich alle Ergebnisse – egal welcher Bereiche – auf die Lastenheftforderungen beziehen, ist sehr schnell erkennbar, in welchen Punkten die Lastenheftforderungen wie gut erfüllt werden.

Autor: Marc Brück, Senior Expert Simulation Technology, EM-motive GmbH, Hildesheim



Kontaktdaten ANSYS:

E-Mail: [info-germany@ansys.com](mailto:info-germany@ansys.com)

Internet: [www.ansys-germany.com](http://www.ansys-germany.com)

### Kasten 1: EM-motive

Die 2011 vom Automobilhersteller Daimler und dem weltweit führenden Automobilzulieferer Bosch gegründete EM-motive GmbH verfügt über offensichtliche Synergien beider Unternehmen: So verbinden sich die Kompetenzen von Daimler in den Bereichen Brennstoffzellen und Batterien mit dem Know-how von Bosch in der Entwicklung und Produktion von Elektromotoren, um elektrische Traktionsmotoren für Elektro- und Hybridfahrzeuge zu entwickeln und zu fertigen. Dank ihrer Modularität können diese Motoren an verschiedene Fahrzeugklassen angepasst werden und erfüllen die Spezifikationen vieler verschiedener Modelle. Seit 2012 hat das Unternehmen bereits mehr als 300.000 Elektromotoren für Kunden in ganz Europa gefertigt. [www.em-motive.com](http://www.em-motive.com)

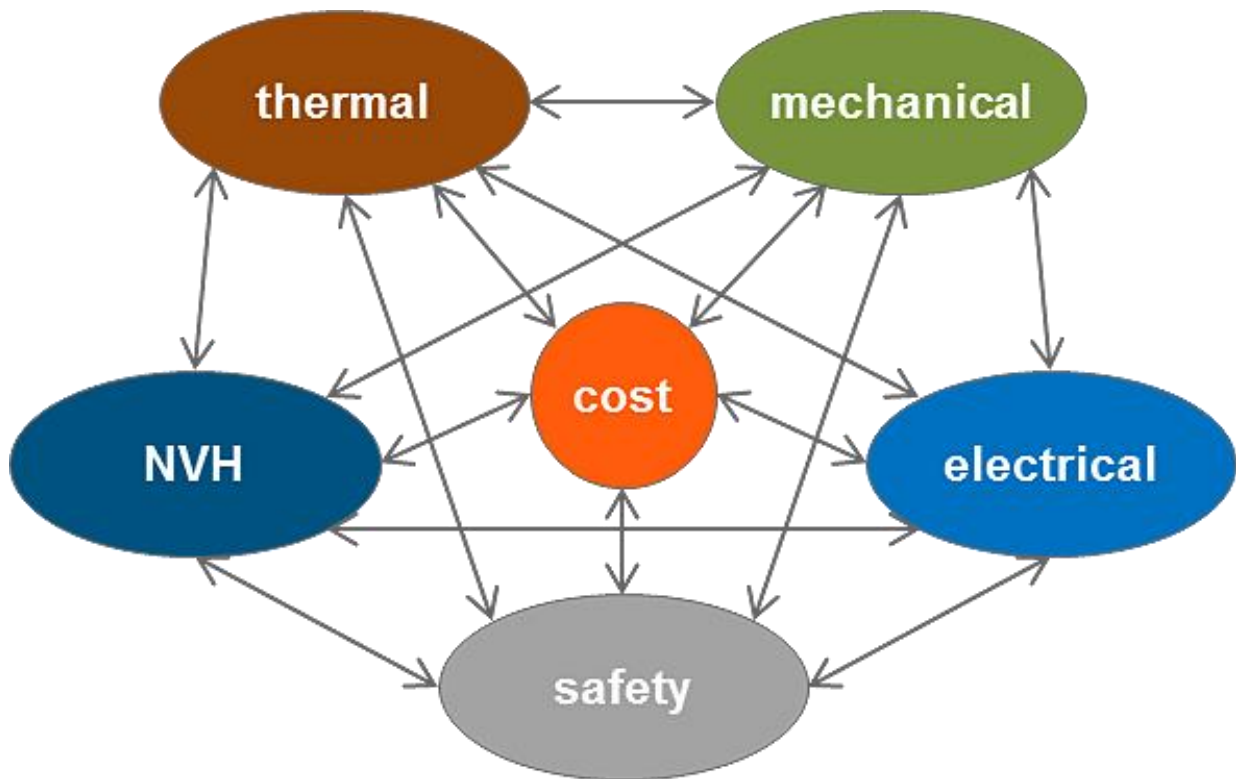


Chart (alle Bilder: ANSYS)

### Kasten 2: ANSYS

Die 1970 gegründete ANSYS, Inc. hat ihre Firmenzentrale südlich von Pittsburgh, USA und beschäftigt heute rund 3.000 Fachkräfte, darunter viele Experten in Engineering-Bereichen wie z.B. der Strukturmechanik, numerischen Strömungsmechanik, Elektronik und Elektromagnetik, Design-Optimierung, Embedded Software sowie Systems Engineering. Die ANSYS-Software unterstützt Kunden durch schnelle, genaue und verlässliche Simulationen, ihre komplexen Design-Herausforderungen in der Produktentwicklung klar zu strukturieren und mit hohem Erkenntnisgewinn zu bewältigen. In diesem Zuge ermöglicht die ANSYS-Technologie, dass Unternehmen mit hoher Sicherheit vorhersagen können, ob ihre Produkte im Alltag Erfolg haben werden. Somit hilft die ANSYS-Software den Kunden, die Produktintegrität und den Erfolg ihres Unternehmens durch stetige Innovationen sicherzustellen. ANSYS unterhält weltweit mehr als 75 strategisch angesiedelte Vertriebsstandorte sowie ein Netzwerk von Vertriebspartnern in über 40 Ländern. Die deutsche Niederlassung hat ihren Sitz an den Standorten Darmstadt, Hannover, Berlin und Otterfing bei München.