

## **Multidisziplinäre Analyse und Optimierung eines elektromagnetischen Ventilantriebs mit Hilfe gekoppelter FE- und Netzwerksimulationen**

### **Multidisciplinary Analysis and Optimization of an Electromagnetic Valve Actuator by Means of Linked Finite Element and Network Simulations**

Dipl.-Ing. **Daniel Schlabe**, DLR, Oberpfaffenhofen

Dipl.-Ing. **Thomas Bödrich**, IFTE, TU Dresden

Dr.-Ing. **The-Quan Pham**, OptiY e.K., Aschaffenburg

Dipl.-Ing. **Thomas Ehre**, Stabilus GmbH, Koblenz

#### **Kurzfassung**

Die Fa. Stabilus GmbH entwickelt derzeit Gasfedern mit elektromagnetisch steuerbarem Ventil für den Einsatz im Automobil. Der elektromagnetische Ventilantrieb solcher Gasfedern ist ein komplexes mechatronisches System. Zur Beherrschung dieser Komplexität und der Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Teilsystemen werden sie beim Systementwurf getrennt mit verschiedenen Simulationsprogrammen modelliert und anschließend miteinander gekoppelt. Die stationären Magnetfelder des Antriebes werden mit dem Finite-Elemente-System FEMM zur Berechnung der wesentlichen Kennfelder behandelt, während die Dynamik des Systems mit dem Netzwerk-Simulationssystem SimulationX modelliert wird. Weiterhin wird die transiente Temperaturverteilung im Antrieb mit dem Finite-Elemente-Programm COMSOL beschrieben. Mit dieser Vorgehensweise kann man die Wirkprinzipien der Teilsysteme und deren Wechselwirkungen mit geringem Aufwand bis ins Detail parametrieren und berechnen. Zur Integration und Automatisierung dieser einzelnen Simulationsprozesse wird das multidisziplinäre Analyse- und Optimierungsprogramm OptiY verwendet. Dadurch werden zudem die Grundlagen für einen automatisierten Systementwurf mittels numerischer Optimierung geschaffen. Durch die Definition von Systemparametern und die Eingabe von Randbedingungen und Entwurfszielen in Form von Restriktionen und Gütekriterien der Optimierungsaufgabe werden die Eigenschaften des Antriebes hinsichtlich der Magnetkraft, der Verlustleistung und des Anzugsvorgangs mit numerischen Optimierungsverfahren systematisch verbessert.

## **Abstract**

The gas spring manufacturer Stabilus GmbH is currently developing gas springs with an electromagnetically operated valve for automotive applications. Such a valve actuator is a complex mechatronic system. During system design the several subsystems are modelled separately first and linked to each other in the next step. This makes complexity and the numerous interactions between the subsystems manageable. Steady state magnetic fields and force-stroke-current characteristics are determined by means of the finite element software FEMM. The dynamic behaviour is modelled in SimulationX. Further on the finite element program COMSOL is used to calculate the transient temperature distribution. This approach is suitable for an in-depth design of the subsystems and their interactions. The multidisciplinary analysis and optimization tool OptiY is used to integrate and automate the several simulation steps. Thus the fundamentals for an automated system design are accomplished. By defining system parameters, giving boundary conditions and objectives in terms of restrictions and quality criteria the characteristics of the actuator are improved systematically using numerical optimization procedures regarding magnetic forces, power losses and dynamic behaviour.

## **1. Einführung**

Die Modellierung, Simulation und rechnergestützte Optimierung technischer Systeme hält mehr und mehr Einzug in der Industrie. Gründe dafür sind die stetig steigende Komplexität und Funktionalität der Produkte. Am Beispiel eines elektromagnetischen Ventilantriebs einer Gasfeder der Fa. Stabilus GmbH werden im Folgenden der Einsatz von verschiedenen Modellen und die Nutzung computergestützter Optimierung im Entwurfsprozess illustriert. Im Bild 1 ist eine neuartige, für Automotive-Anwendungen vorgesehene Gasfeder mit einem elektromagnetischen Ventilantrieb schematisch dargestellt. Im stationären Zustand sind die Drücke in der rechten und linken Kammer identisch. Da jedoch die Fläche des Kolbenpaketes auf der rechten Seite größer ist als auf der linken, wirkt eine resultierende Kraft nach links. Diese bewirkt, dass das Kolbenpaket und die Kolbenstange ausgeschoben wird, wenn das Ventil geöffnet ist. Ist das Ventil geschlossen, so ist das Kolbenpaket im Druckrohr fest gebremst. Das Einbringen eines einfachen Elektromagneten in das Kolbenpaket ermöglicht die Steuerung des Ventils durch Anlegen einer externen Spannung. Dadurch kann die Gasfeder in jeder beliebigen Position fest gebremst werden. Dies ist z. B. für Kofferraumklappen sinnvoll.

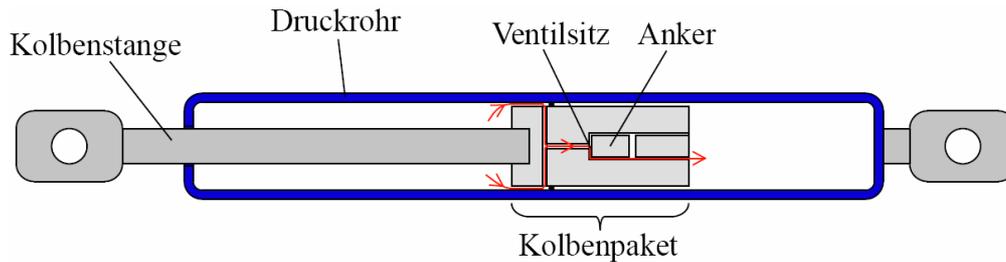


Bild 1: Schematische Darstellung einer Gasfeder mit Ventilantrieb

Die Herausforderungen bei der Entwicklung dieses Ventilantriebs sind der große Bereich der Umgebungsbedingungen wie Temperatur, Druck und Betriebsspannung, der zur Verfügung stehende Bauraum und natürlich die Produktionskosten. Daher ist im Entwurfsprozess eine multidisziplinäre Betrachtung des Systems Ventilantrieb sinnvoll, wenn nicht sogar unerlässlich.

## 2. Multidisziplinäre Modellierung und Simulation

Die Verwendung von Modellen und Simulation bewirkt, dass der Entwurf überschaubar und übersichtlich bleibt. Es können Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen den unterschiedlichen physikalischen Teilsystemen erkannt werden, die oft nicht vernachlässigbar sind. Damit ist eine neue Qualität der Produkte erreichbar. Im Folgenden werden die in [1] verwendeten Modelle und ihre gegenseitigen Verknüpfungen vorgestellt.

An erster Stelle steht die Modellierung und Simulation des stationären magnetischen Feldes des Antriebs mit der Finite-Elemente-Methode (FEM). Dabei findet das Freeware-Programm FEMM in der aktuellen Version 4.2 Verwendung. Der Einsatz der Software in [1] umfasst:

- die Analyse des Magnetkreises eines anfänglich vorliegenden Funktionsmusters,
- das Erstellen von Kennfeldern von Magnetkraft und Koppelfluss als Funktionen vom Spulenstrom und der Ankerposition,
- das Feststellen von Schwachstellen im Magnetkreis eines anfänglichen Funktionsmusters sowie
- die Einflussanalyse von konstruktiven Veränderungen am Antrieb.

Des Weiteren sind die FE-Modelle Grundlage für kennfeldbasierte Dynamikmodelle und für die computergestützte Optimierung. In Bild 2 ist die mit FEM ermittelte magnetische Flussdichte für eine Position des Ankers und einen definierten konstanten Spulenstrom

dargestellt. Mit Hilfe dieser Feldbilder können die stationären Eigenschaften des Antriebs leicht analysiert und Schwachstellen erkannt werden. Zudem können die Auswirkungen konstruktiver Änderungen leicht untersucht werden.

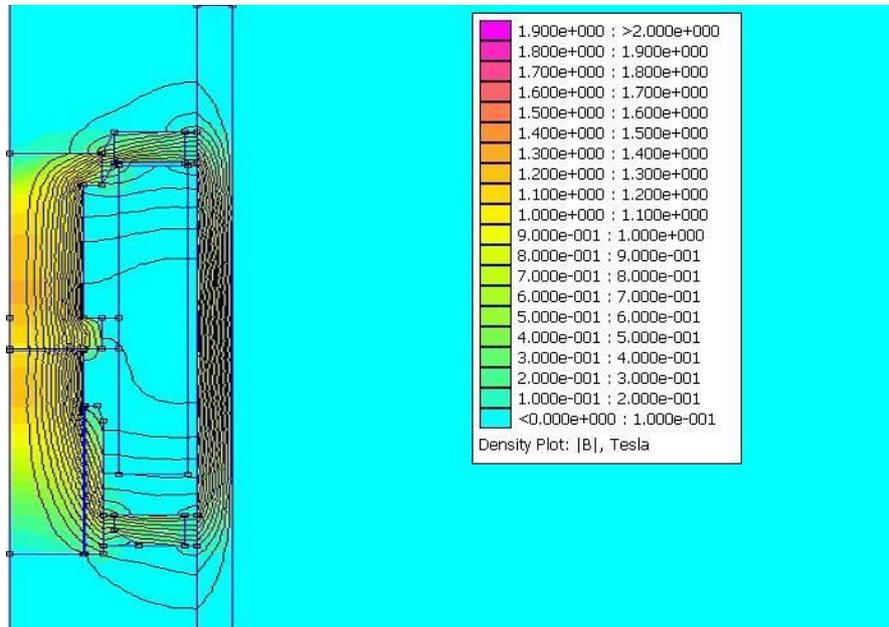


Bild 2: Magnetische Flussdichte und Flusslinien eines anfänglichen Funktionsmusters in FEMM (Axialsymmetrie, Halbschnitt, Symmetrieachse am linken Bildrand)

Bild 3 zeigt die mit stationären FEM-Rechnungen ermittelten Kennfelder der Magnetkraft und des Koppelflusses. Diese können für Dynamiksimulationen des Anzugsvorgangs in ein Dynamikmodell des Magnetantriebs eingebunden werden. Als Simulationsumgebung für das Dynamikmodell (Bild 4) wird SimulationX von ITI verwendet [2]. Hier müssen in erster Linie die Gleichungen

$$u_i = \frac{d\psi}{dt} \quad (1)$$

$$\psi = f(I_{Sp}, x) \quad (2)$$

$$F_m = f(I_{Sp}, x) \quad (3)$$

$u_i$  – Induktionsspannung;  $\psi$  – magnetischer Koppelfluss;  $F_m$  – Magnetkraft;  $I_{Sp}$  – Spulenstrom. numerisch gelöst werden. Die Gln. (2) und (3) entsprechen den oben genannten Kennfeldern.

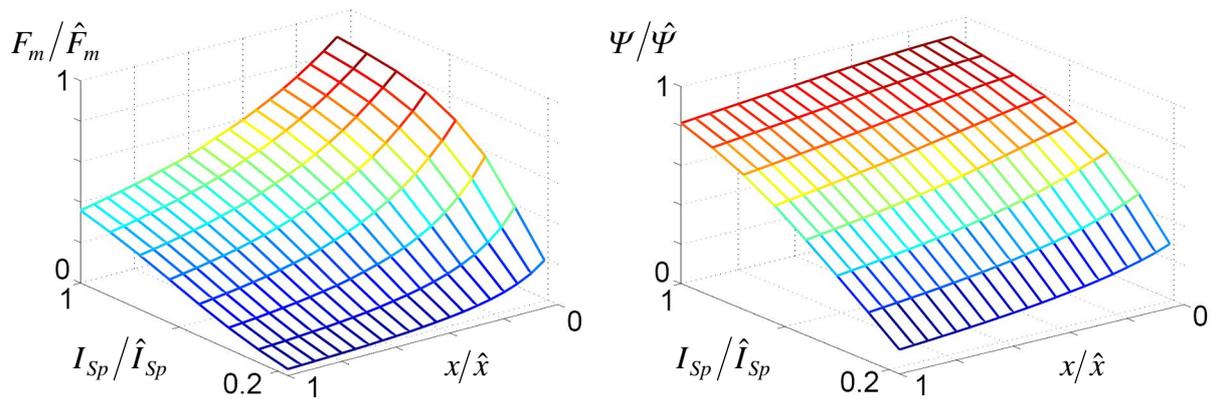


Bild 3: Normierte Kennfelder der Magnetkraft  $F_m$  und des Koppelflusses  $\Psi$  als Funktionen des Spulenstroms  $I_{Sp}$  und der Länge  $x$  des Arbeitsluftspalts

In Bild 4 ist das erstellte Dynamikmodell des Antriebs dargestellt. Feldverdrängungseffekte durch Wirbelströme im Eisen werden hierbei vernachlässigt. Sie können jedoch durch einen einfachen elektrischen Ersatzwiderstand ( $R_w$ ) näherungsweise modelliert werden. Neben den Gln. (1) bis (3) beinhaltet das Modell ein elektrisches und ein mechanisches Ersatzschaltbild. Letzteres modelliert Reibung, Dämpfung und die Rückstellfeder des Ankers. Zudem kann über die elektrischen und mechanischen Anschlüsse eine Kopplung an ein darüber liegendes System (z.B. Kofferraumklappe oder Kraftfahrzeug) erfolgen.

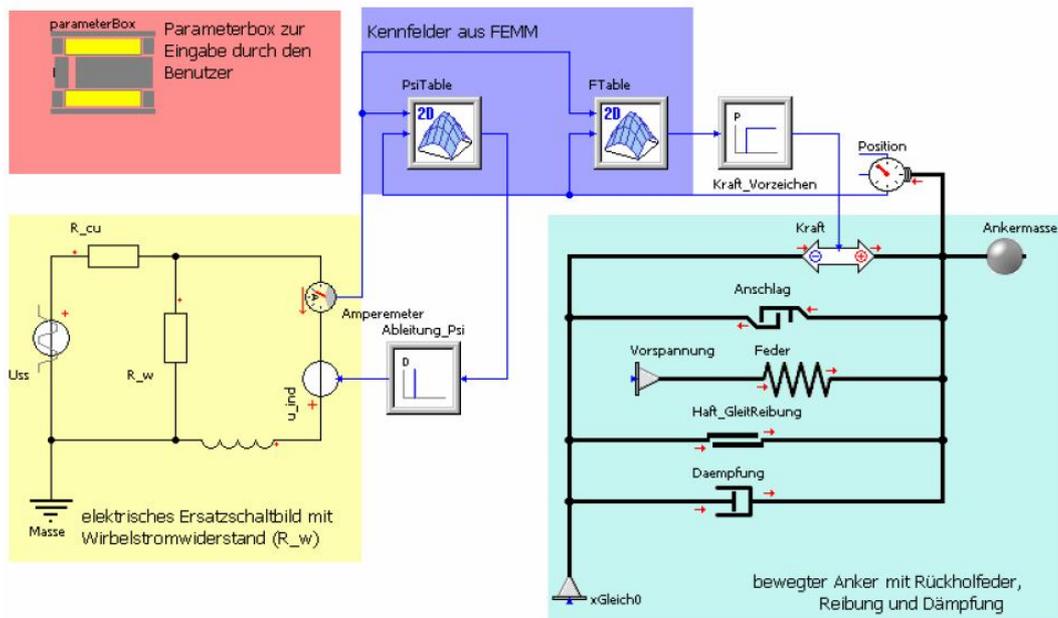


Bild 4: Kennfeldbasiertes Dynamikmodell des Antriebs in SimulationX

Die bisher beschriebenen Modelle genügen, um das statische und dynamische Verhalten des Antriebs nachzubilden. Um den Antrieb in weiteren Schritten optimieren zu können, sind jedoch noch Randbedingungen für zulässige Stromdichten und Verlustleistungen festzulegen, welche sich aus den vorgegebenen Randbedingungen der Temperatur ergeben. Zu diesem Zweck wurde mit COMSOL [4] ein transientes FE-Modell erstellt. Das reduziert den Aufwand für thermische Messungen an Funktionsmustern und Prototypen und senkt dadurch Entwicklungskosten. Zudem erhält man die Temperaturverteilung im gesamten Antrieb über der Zeit, vorausgesetzt, dass alle wesentlichen Effekte und Komponenten berücksichtigt werden. Eine solche Temperaturverteilung für einen bestimmten Zeitpunkt und Strom ist in Bild 5 zu sehen. Hiermit können nun Werte für zulässige Stromdichten und Verlustleistungen ermittelt werden.

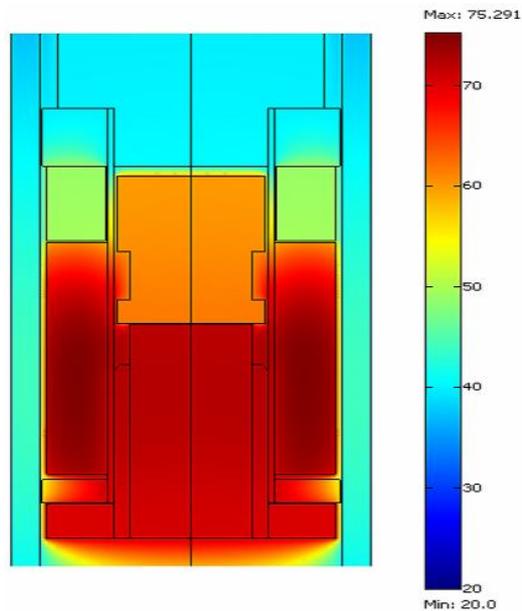


Bild 5: Simuliertes Temperaturprofil des überarbeiteten Antriebs

Alle hier beschriebenen Modelle konnten durch Messungen erfolgreich validiert werden und finden somit bei der Entwicklung neuer Antriebe bei Stabilis Verwendung.

### 3. Optimierung

Bei der Analyse und Modellierung eines anfänglichen Versuchsmusters stellte sich heraus, dass dieses in einem großen Bereich möglicher Umgebungsbedingungen (Spannung, Temperatur) zu wenig Kraft im stationären Zustand erzeugt. Dadurch wird die Gasfeder für diese Fälle funktionsuntüchtig. Das primäre Ziel bei der Optimierung ist daher die

Vergrößerung der Magnetkraft so, dass das Ventil unter allen Bedingungen zuverlässig öffnet. In einem ersten Schritt wurden konstruktive Veränderungen unter Verwendung der Modelle untersucht. So konnte eine erste Verbesserung erreicht werden. Weiterhin besteht die Möglichkeit, den Antrieb mit einer so genannten Übererregung anzusteuern. Dabei wird für den Anzugsvorgang des Ankers die volle Bordspannung an die Spule gelegt. Nach einer festgelegten Anzugszeit  $t_{anzug}$  kann durch Pulsen der Spannung ein geringerer Strom  $I_h$  zum Halten des Ankers nach Bild 6 eingestellt werden. Dadurch werden die Verlustleistung und die damit verbundene Erwärmung stark reduziert. Der Ventiltrieb kann demnach anders dimensioniert werden.

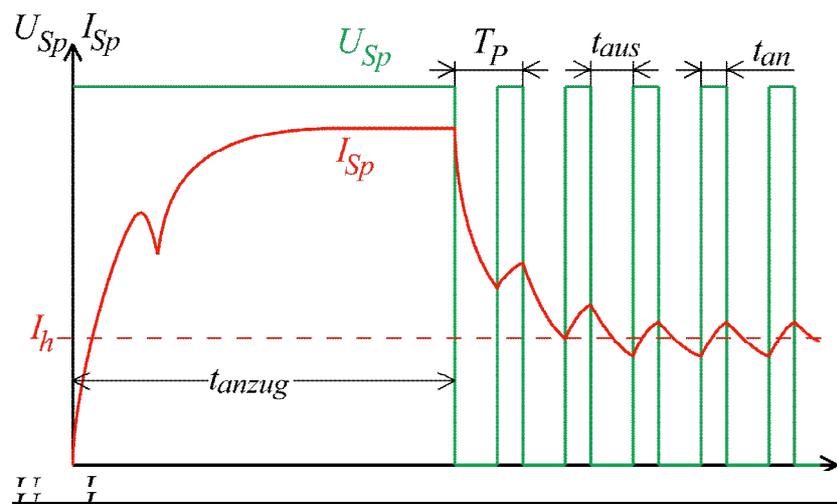


Bild 6: Prinzipieller Verlauf von Spulenstrom und -spannung bei Übererregung

Die Dimensionierung soll nun nicht durch manuelles Variieren von Entwurfsparametern erfolgen, sondern durch rechnergestützte Optimierung unter Verwendung von OptiY [3]. Hier stehen verschiedene Optimierungsstrategien zur Verfügung wie etwa das Hooke-Jeeves-Verfahren, Evolutionäre Algorithmen sowie die Rastersuche. Die Dimensionierung wird nach folgendem Schema durchgeführt:

- Ermitteln der zulässigen Stromdichte und Verlustleistung gemäß den thermischen Randbedingungen durch transiente thermische FEM-Rechnung,
- Eingabe der Randbedingungen und anschließende Optimierung des Antriebs mit OptiY, dazu stationäre magnetische FEM-Rechnungen zum Ermitteln der Anzugskraft bei maximalem und der Haltekraft bei minimalem Arbeitsluftspalt,
- Erstellen eines konstruktionsgerechten Entwurfes durch sinnvolles Runden der gefundenen Parameter sowie anschließendes Erstellen und Auswerten der Kennfelder für Magnetkraft und Koppelfluss mit FEMM

Bild 7 zeigt den Ablaufplan (Workflow) in OptiY. Auf der linken Seite befinden sich Nennwerte, die entweder als Variable oder Konstante deklariert werden können. Damit hat man die Möglichkeit, neben den zu variierenden Entwurfparametern auch konstante Randbedingungen vorzugeben (wie etwa die minimal und maximal zulässige Spulentemperatur). Die maximal zulässige Verlustleistung der Spule wurde mit dem thermischen FEM-Modell einmalig bestimmt und als konstante Randbedingung in OptiY berücksichtigt.

Die Nennwerte werden bei jedem Simulationsdurchlauf von OptiY in einer Text-Datei abgelegt. Diese dient als Schnittstelle zwischen OptiY und dem FE-Modell. Anschließend wird FEMM gestartet und ein LUA-Skript für die FE-Simulation ausgeführt. Die Ergebnisse aus der FEM-Simulation werden wiederum in eine Textdatei geschrieben und an OptiY zurückgegeben, wo sie dann als Restriktionsgrößen bewertet werden.

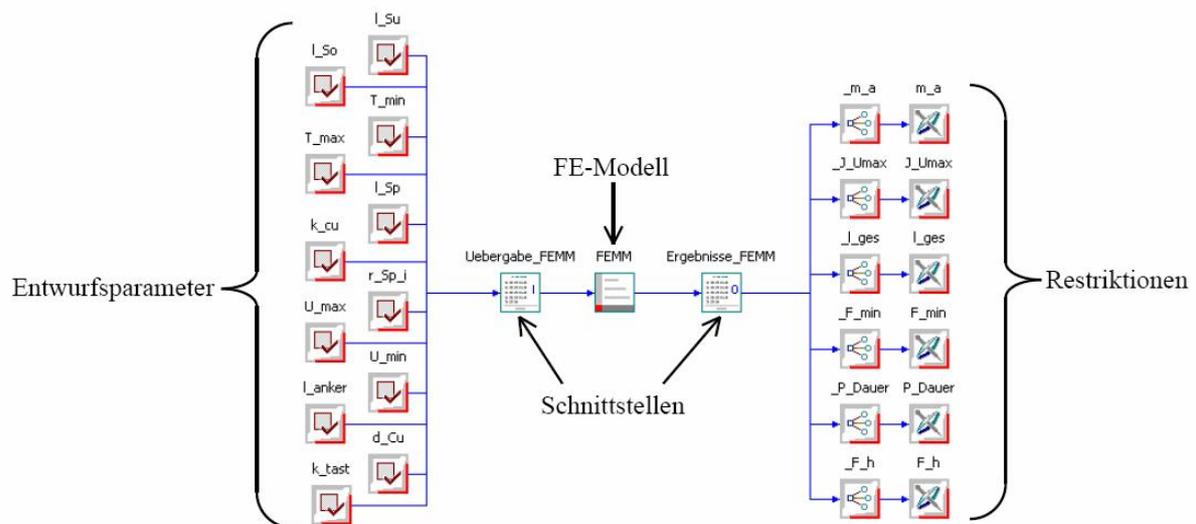


Bild 7: Workflow der statischen Optimierung des Antriebs in OptiY

In mehreren Schritten ist so ein optimierter Antrieb entstanden, der alle gewünschten Randbedingungen erfüllt und das Ventil unter allen Umgebungsbedingungen öffnet. Die Magnetkraft bei maximalem Luftspalt konnte sogar verzehnfacht werden. Der obige Workflow in OptiY ist auch für weitere Entwurfsaufgaben nutzbar. So kann der Antrieb beispielsweise automatisch an neue Randbedingungen angepasst werden.

Abschließend soll kurz auf die Kopplung von OptiY mit mehreren Modellen eingegangen werden. Im Rahmen der Diplomarbeit [1] stand die Optimierung der statischen Magnetkraft

im Vordergrund. Dynamische Eigenschaften wie etwa Anzugszeiten oder ein mechanisches Pulsen des Antriebs spielen eine untergeordnete Rolle. Das dynamische Verhalten lässt sich bei Bedarf jedoch einfach durch die Kopplung von OptiY sowohl mit FEMM als auch mit SimulationX optimieren. Dazu können gemäß Bild 7 zuerst Kennfelder für die statische Magnetkraft und den stationären Koppelfluss in FEMM erzeugt und diese anschließend an das Dynamikmodell in SimulationX übergeben werden. Ein solcher Workflow ist in Bild 8 dargestellt. Alternativ können hier auch andere Dynamiksimulatoren wie etwa Dymola eingebunden werden. Die Schnittstellen sind in diesem Fall entsprechend anzupassen.

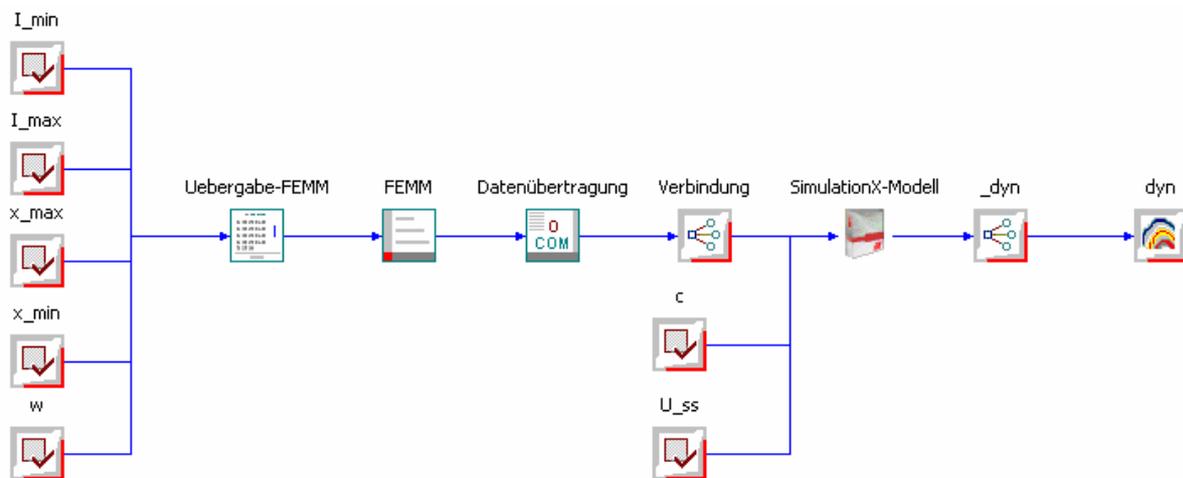


Bild 8: Workflow zur Optimierung von dynamischen Eigenschaften des Antriebs in OptiY

#### 4. Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde eine neue Entwurfsmethodik zum Beherrschen komplexer mechatronischer Systeme vorgestellt. Während andere Lösungsansätze versuchen, alle Teilsysteme möglichst kompakt in einem Simulationssystem zu behandeln, werden hier unterschiedliche Teilsysteme mit verschiedenen spezialisierten CAD/CAE-Programmen modelliert. Die Vorzüge der einzelnen Simulationssysteme können somit optimal genutzt und auch kostenfreie spezialisierte Simulationsumgebungen (z.B. FEMM) können verwendet werden. Diese Vorteile machen die Herangehensweise insbesondere für Entwicklungen interessant, bei denen neue innovative Produkte entwickelt, die Investitionen und damit auch Risiken in der Entwicklung jedoch gering gehalten werden sollen. Zudem lassen sich durch geeignete Software-Kombinationen für eine große Breite von Applikationen schnell Lösungen für die ganzheitliche Systemsimulation finden, welche sich sonst nur mit umfangreichen und entsprechend teuren Systemsimulatoren und domänenabhängig ggf. umständlichen Modellimplementierungen ermitteln ließen.

Am Beispiel eines elektromagnetischen Ventilantriebes für eine Gasfeder der Fa. Stabilus GmbH wird diese Entwurfsmethodik veranschaulicht. Die magnetischen Eigenschaften und Kennfelder des Antriebes werden mit dem FEM-System FEMM berechnet, während die Dynamik mit dem Netzwerk-Simulationssystem SimulationX simuliert wird. Ergänzt werden die Modelle durch die Simulation der transienten Temperaturverteilung mit dem FEM-Programm COMSOL. Zur Integration und Automatisierung dieser einzelnen Simulationsprozesse wird das multidisziplinäre Analyse- und Optimierungsprogramm OptiY verwendet. Durch die Definition von Systemparametern sowie die Eingabe von Randbedingungen und Entwurfszielen in Form von Restriktionen und Gütekriterien werden die Eigenschaften des Antriebs hinsichtlich Magnetkraft und Verlustleistung mit numerischen Optimierungsverfahren systematisch verbessert.

Mit dieser Methodik können auch weitere, beliebig komplexe mechatronische Systeme systematisch entworfen werden, beispielsweise auch unter Einbeziehung der Zuverlässigkeit und der Toleranzen (siehe [5] bis [8]).

- [1] Schlabe, D.: Modellierung, Simulation und Optimierung eines elektromagnetischen Ventilantriebs. Diplomarbeit. TU Dresden 2008
- [2] [http://www.iti.de/simulation/simx\\_about\\_d.htm](http://www.iti.de/simulation/simx_about_d.htm), verfügbar am 06.01.2009
- [3] <http://www.optiy.de>, verfügbar am 25.01.2009
- [4] <http://www.femlab.de>, verfügbar am 09.02.2009
- [5] Neubert, H. / Kamusella, A. / Pham, T-Q.: Robust Design and Optimization of Thick Film Accelerometers in COMSOL Multiphysics with OptiY. European COMSOL Conference, 23.-24.10.2007, Grenoble
- [6] Neubert, H. / Partsch, U. / Fleischer, D. / Gruchow, M. / Kamusella, A. / Pham, T-Q.: Thick Film Accelerometers in LTCC-Technology – Design Optimization, Fabrication and Characterization. 4<sup>th</sup> International Conference and Exhibition on Ceramic Interconnect and Ceramic Microsystems Technologies, 21.-24.04.2008, München
- [7] Pham, T-Q. / Kamusella, A.: Probabilistische Optimierung am Beispiel eines Magnetantriebes. 19. Symposium Simulationstechnik, 12.-14.09.2006, Hannover
- [8] Pham, T-Q. / Kamusella, A.: Multidisziplinäre Zuverlässigkeits- und Robustheitsanalyse mechatronischer Systeme. Internationales Forum Mechatronik, 16.-17.10.2006, Linz