

ASIM-Workshop STS/GMMS 2014

Treffen der ASIM/GI-Fachgruppen:

Simulation technischer Systeme

Grundlagen und Methoden in Modellbildung und Simulation

**20. bis 21. Februar 2014 in
Reutlingen-Rommelsbach**

Tagungsband

Jürgen Scheible (Hrsg.)

Ingrid Bausch-Gall (Hrsg.)

Christina Deatcu (Hrsg.)



Arbeitsgemeinschaft Simulation ASIM in der Gesellschaft für Informatik GI



Hochschule Reutlingen
Reutlingen University



Robert Bosch Zentrum für Leistungselektronik

Hochschule Reutlingen • Universität Stuttgart • Robert Bosch GmbH

ARGESIM Reports

Published by **ARGESIM** and **ASIM**, Arbeitsgemeinschaft Simulation,
Fachausschuss 4.5 der GI

Series Editor:

Felix Breiteneker (ARGESIM / ASIM)
Div. Simulation, Vienna University of Technology
Wiedner Hauptstrasse 8 - 10, A - 1040 Vienna
Tel: +43-1-58801-10115, Fax: +43-1-58801-10199
Email: Felix.Breiteneker@tuwien.ac.at

ARGESIM Report 42 ASIM Mitteilung AM 149

Titel: ASIM-Workshop STS/GMMS 2014
Treffen der ASIM/GI-Fachgruppen:
Simulation technischer Systeme
Grundlagen und Methoden in Modellbildung und Simulation

Herausgeber: Jürgen Scheible
Ingrid Bausch-Gall
Christina Deatcu
Email: christina.deatcu@hs-wismar.de

ISBN 978-3-901608-42-1

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Weg und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten.

© by ARGESIM / ASIM, Wien, 2014 – Hochschule Reutlingen

ARGE Simulation News (ARGESIM)
c/o F. Breiteneker, Div. Simulation, Vienna Univ. of Technology
Wiedner Hauptstrasse 8-10, A-1040 Vienna, Austria
Tel.: +43-1-58801-10115, Fax: +43-1-58801-10199
Email: info@argesim.org; WWW: <http://www.argesim.org>

Druck:

WENZEL GmbH druck . kopie . media
München

Reduzierte Modelle für elektromechanische Bauteile mit Berücksichtigung von Wirbelströmen

Ursula Voß¹, Martin Hanke²

¹Hochschule Reutlingen

²CADFEM GmbH

Ursula.voss@reutlingen-university.de

Die sogenannte Systemsimulation, bei der mehrere physikalische Domänen gemeinsam simuliert werden, erlaubt die Analyse komplexer und damit realitätsnaher Systeme und spielt eine zunehmend größere Rolle bei der Auslegung von Komponenten. Enthält das System Teile, die durch Feldgrößen aus unterschiedlichen physikalischen Domänen beschrieben werden müssen, kann man Co-Simulationen einsetzen, die allerdings zeitaufwändig sind. Für die Auslegung des Systems ist es dagegen notwendig, Systemsimulationen schnell durchzuführen zu können. Hierfür können für ausgewählte Bauteile oder Domänen schnellere reduzierte Ersatzmodelle (ROM) eingesetzt werden. In dieser Arbeit stellen wir ein reduziertes Modell für elektromechanische Bauteile mit Berücksichtigung von Wirbelströmen vor. Wirbelstromeffekte hängen nicht nur vom aktuellen Zustand, sondern auch von der Geschichte der elektromagnetischen Domäne ab. Das vorgestellte Ersatzmodell basiert auf Daten, die mit einer Reihe von stationären Feldsimulationen vorab erzeugt werden. Für die Modellierung der geschichtsabhängigen Wirbelstromeffekte wird ein Konvolutionsansatz (Faltungsansatz) verwendet. Vergleiche mit entsprechenden Co-Simulationen in ANSYS Maxwell und Simplorer zeigen am Beispiel eines Hubankers, dass das Ersatzmodell in der Lage ist, die wesentlichen Eigenschaften des Bauteils physikalisch korrekt abzubilden.

1 Einleitung

Die Systemsimulation, bei der mehrere physikalische Domänen gemeinsam simuliert werden, erlaubt die Analyse komplexer und damit realitätsnaher Systeme und spielt eine zunehmend größere Rolle bei der Auslegung von Komponenten. Dafür ist es notwendig, Systemsimulationen schnell durchzuführen zu können. Hierfür können für ausgewählte Bauteile oder Domänen schnellere reduzierte Ersatzmodelle (ROM) eingesetzt werden [1].

1.1 Wirbelströme in elektromechanischen Systemen

Das Ziel dieser Arbeit ist die Berücksichtigung von Wirbelstromeffekten in der Systemsimulation elektromechanischer Komponenten. Eine solche Komponente könnte beispielsweise der in einem Magnetventil verbaute Hubanker sein, siehe Abb. 1. Typisch für solche Komponenten ist, dass die mechanische Bewegung eine Rückwirkung auf den elektrischen Kreis hat. Die Pulsweite der elektrischen Ansteuerung und die charakteristischen Bewegungszeiten des Ankers haben dieselbe Größenordnung im Bereich einer Zehntelmillisekunde, siehe Abb. 2 oben. Daher ist es wichtig, die Zusammenhänge genau abbilden zu können, um z.B. ein „Klebenbleiben“ des Ankers im gepulsten Betrieb vermeiden zu können oder ein solches Kleben gerade sicherzustellen. Wirbel-

stromeffekte können das Verhalten dabei deutlich ändern.

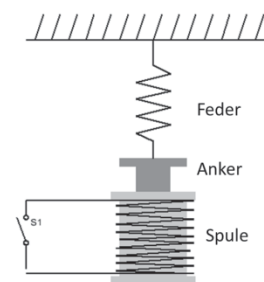


Abbildung 1. Schematische Darstellung eines Hubankers. Wird der Schalter geschlossen, wird der Anker in die Spule hineingezogen. Wird der Schalter geöffnet, bringt die Feder den Anker in die Ausgangslage zurück.

Wirbelströme treten auf, wenn sich ein Leiter in einem zeitlich konstanten Magnetfeld bewegt, oder wenn ein Leiter sich in einem zeitlich veränderlichen Magnetfeld befindet. Sie erzeugen ein Magnetfeld, das dem ursprünglichen Feld entgegenwirkt und damit seine Wirkung schwächt. Hat das Material einen elektrischen Widerstand, erwärmt es sich [2]. Am Beispiel des Hubankers kann man die Auswirkung von Wirbelströmen deutlich erkennen: Der Maximalstrom wird deutlich höher, aber die auf den Anker

wirkende Kraft wird kleiner, dadurch wird der Anker später und in manchen Fällen, wie hier dargestellt, nicht vollständig angezogen, siehe Abb. 2. unten. Trotz der geringeren mechanischen Bewegung ist die aufzuwendende elektrische Energie höher.

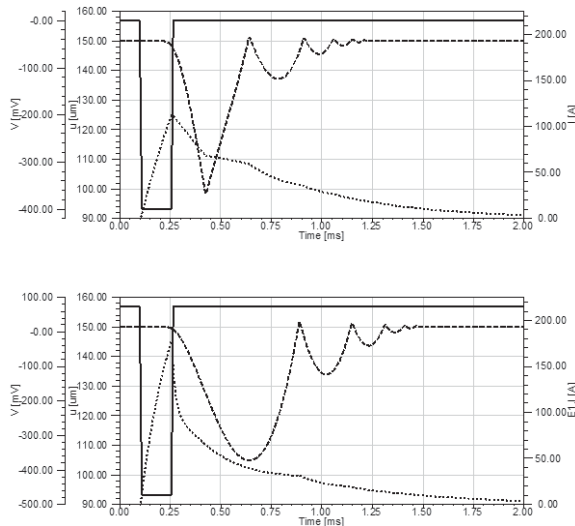


Abbildung 2. Typische Verläufe von Spannung (durchgezogene Linie), Strom (gepunktet) und Verschiebung des Ankers (gestrichelt) ohne Berücksichtigung von Wirbelstromeffekten (oben) und mit Wirbelstromeffekten (unten).

1.2 Systemsimulation

Wegen der Komplexität der Geometrie und der vielfältigen Ursachen für Wirbelströme kann der gesamte Effekt nur mithilfe der numerischen Simulation quantitativ dargestellt werden. Hier verwendete Werkzeuge dafür sind ANSYS Maxwell, ein auf der Finite-Elementmethode basierendes Programm für die Simulation elektromagnetischer Felder und ANSYS Simplorer, ein Simulationswerkzeug zur Systemsimulation von Leistungselektronik und elektrisch kontrollierten Systemen.

Bisher gibt es mit diesen Werkzeugen zwei Methoden, die geometrische Komplexität in der Systemsimulation abzubilden: Zum einen die sogenannte Co-Simulation, bei der eine Maxwell – und eine Simplorer-Simulation in jedem Zeitschritt im Wechsel durchgeführt werden. In der Maxwellrechnung wird die tatsächliche detaillierte Geometrie verwendet und so die geometrische Komplexität, Nichtlinearitäten und Wirbelströme abgebildet. Simplorer dagegen bildet Leistungselektronik und das mechanische Verhalten konzentrierter Elemente ab [3]. Mit der Co-Simulation kann man Wirbelstromeffekte abbilden, aber die Berechnungen sind zeitaufwändig und damit ungeeignet ist für die Auslegung von Parametern wie

zum Beispiel Pulsweite, maximale Spannung und Vorspannung der Feder.

Eine schnelle Alternative ist die Verwendung des Equivalent Circuit Extractor (ECE), der reduzierte Modelle direkt aus Maxwell für Simplorer erzeugt. Hierbei wird aus einer Serie stationärer, d.h. nicht zeitabhängiger Maxwell-Rechnungen ein Kennfeld erzeugt, aus dem während der Systemsimulation der verkettete magnetische Fluss und die erzeugte Kraft gelesen werden. Dieses Verfahren ist nicht in der Lage Wirbelstromeffekte abzubilden.

2 Optislang MOP als Kennfeld

Um später auch ein Modell der Wirbelstromeffekte in das Ersatzmodell integrieren zu können, wird der Ansatz des Equivalent Circuit Extractor mit einem flexiblen Kennfeld in Simplorer implementiert. Zugrunde gelegt werden wie im ECE-Modell die mechanische Bewegungsgleichung

$$m \ddot{u} + \gamma \dot{u} + \kappa u = F \quad (1)$$

und die elektrische Bewegungsgleichung

$$U = RI + n \frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

Diese sind über die Kraft

$$F = F(u, I) \quad (3)$$

und den magnetischen Fluss

$$\Phi = \Phi(u, I) \quad (4)$$

gekoppelt. Diese beiden Größen werden für verschiedene Werte der mechanischen Verschiebung u und des elektrischen Stromes I tabelliert.

Als erweiterbare Tabelle wird ein sogenanntes Meta-model of Optimal Prognosis (MOP) aus der Software OptiSlang verwendet. OptiSlang ist eine Software für Sensitivitätsanalyse, Optimierung und Robustheitsanalyse, die in ANSYS Workbench integriert ist. Ein MOP ist eine Response-Surface, die Funktionswerte für eine Anzahl von Design Points optimal interpoliert. MOPs sind insbesondere für Sensitivitätsanalysen und Optimierung bei einer großen Anzahl von Parametern entwickelt worden [4]. Solche MOPs können innerhalb der ANSYS Workbench aus beliebigen Analysen erzeugt werden. In der vorliegenden Anwendung werden sie aus magnetostatischen Maxwellrechnungen bedatet und mit einer geringen Anzahl von Parametern als Kennfeld verwendet. Eine C-Bibliothek, die es erlaubt, für beliebige Eingangsparameter den Wert der Antwortfläche zu ermitteln, steht als dynamic link library (dll) zur Verfügung

[5]. Diese Programm-bibliothek kann in Simplerer integriert werden. Für aktuelle Werte von u und I werden so $\Phi(u, I)$ als rechte Seite der elektrischen Bewegungsgleichung und $F(u, I)$ als äußere Kraft des mechanischen Teilmodells ermittelt. Die Auswertung des MOP muss in C erfolgen, während die Bewegungsgleichungen dann sowohl in C oder in VHDL-Block gelöst werden können, siehe Abb. 3 und 4.

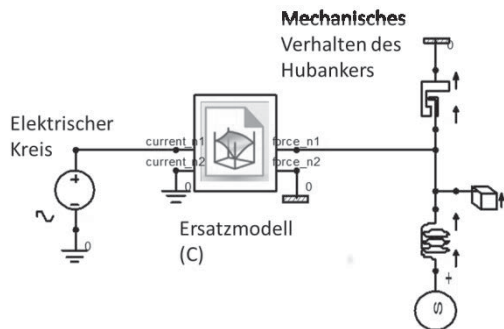


Abbildung 3. Simplerermodell, in dem die Auswertung des MOPs in das Ersatzmodell integriert ist.

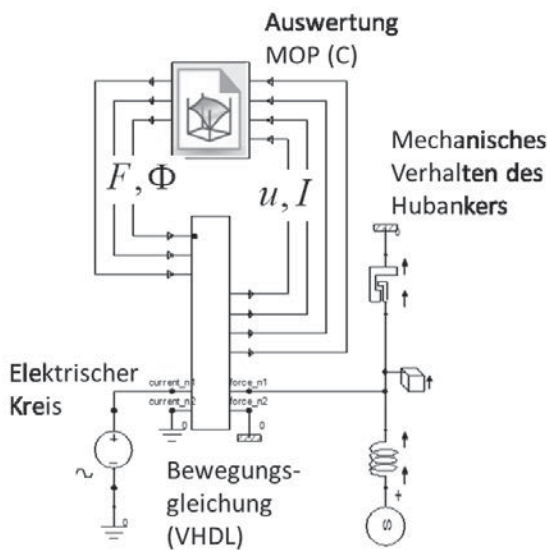


Abbildung 4. Simplerermodell, in dem die Bewegungsgleichungen in einem VHDL-Block und gelöst werden, während die Auswertung des MOPs davon getrennt stattfindet.

3 Modellierung von Wirbelstromeffekten

Wirbelstromeffekte sind nicht nur von aktuellen Werten von Verschiebung und Strom bzw. Erregung abhängig, sondern auch von der Stromanstiegsgeschwindigkeit und der Vorgeschichte der Systems.

In Abb. 5 sind verketteter Fluss und Kraft für verschiedene Stromanstiegsgeschwindigkeiten i bei konstanter Spaltöffnung aufgetragen. Der Strom wurde dabei linear bis 200 A erhöht und wieder auf 0 reduziert. Für Werte von $i = 1e^{-3} A/s$ und kleiner erhält man dasselbe Verhalten wie ohne Berücksichtigung von Wirbelstromeffekten. In diesem Fall ist der Kurvenverlauf symmetrisch, es gibt keine Abhängigkeit von der Vorgeschichte. Je größer die Stromanstiegsgeschwindigkeit ist, desto kleiner sind die Maximalwerte. Das Maximum wird verzögert angenommen und der Verlauf ist nicht mehr symmetrisch.

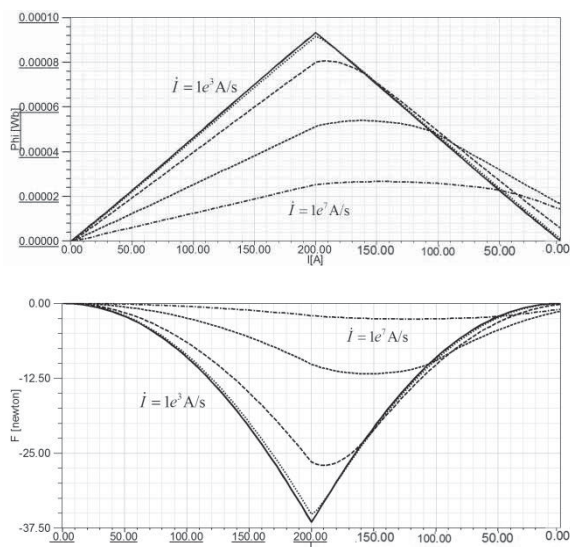


Abbildung 5. Verketteter Fluss Φ (oben) und Anzugskraft F im Hubanker (unten) für feste Ankerpositionen und verschiedene Stromanstiegsgeschwindigkeiten. $i = 1e^{-3} A/s$ ist dabei ein Wert, bei dem keine Wirbelstromeffekte mehr sichtbar werden.

Diese Wirbelstromeffekte werden in erster Näherung mit Hilfe der gewöhnlichen Differentialgleichung

$$\tau \frac{d\Phi(t)}{dt} + \Phi(t) = \Phi_{MOP}(t), \quad \Phi(0) = 0 \quad (5)$$

modelliert. Φ_{MOP} bezeichnet dabei den verketteten Fluss, der sich ohne Berücksichtigung von Wirbelstromeffekten ergibt. Die Lösung der Differentialgleichung ist

$$\Phi(t) = e^{-\frac{t}{\tau}} \int_0^t \frac{\Phi_{MOP}(t')}{\tau} e^{\frac{t'}{\tau}} dt'. \quad (6)$$

Mittels partieller Integration erhält man daraus

$$\Phi(t) = \Phi_{MOP}(t) - \int_0^t \Phi_{MOP}(t') e^{-\frac{t-t'}{\tau}} dt'. \quad (7)$$

Der letzte Term beschreibt eine Faltung der rechten Seite der Differentialgleichung mit einer abklingenden Exponentialfunktion. Für

$$\Delta \Phi(t) = \int_0^t \Phi_{MOP}(t') e^{-\frac{t-t'}{\tau}} dt' \quad (8)$$

erhält man mit $t = n \Delta t$ und mit der zusammengesetzten Rechteckregel

$$\Delta \Phi(n \Delta t) \approx \left[\sum_{k=1}^n \Phi_{MOP}(k \Delta t) e^{-\frac{k \Delta t - n \Delta t}{\tau}} \right] \Delta t. \quad (9)$$

Damit erhält man

$$\begin{aligned} \Delta \Phi(n \Delta t) &= \Delta t \Phi_{MOP}(n \Delta t) e^{-\frac{n \Delta t - n \Delta t}{\tau}} \\ &\quad + \Delta t \sum_{k=1}^{n-1} \Phi_{MOP}(k \Delta t) e^{-\frac{k \Delta t - n \Delta t}{\tau}} \\ &= \Delta t \Phi_{MOP}(n \Delta t) \\ &\quad + \Delta t e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \sum_{k=1}^{n-1} \Phi_{MOP}(k \Delta t) e^{-\frac{k \Delta t - (n-1) \Delta t}{\tau}} \\ &= \Delta t \Phi_{MOP}(n \Delta t) + e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \Delta \Phi((n-1) \Delta t). \end{aligned}$$

Φ_{MOP} wird im Vorfeld für gegebene Werte von u und t erzeugt und als Kennfeld zur Verfügung gestellt. Mit einer numerischen Berechnung der Zeitableitung $\dot{\Phi}_{MOP}$ zum jeweils aktuellen Zeitpunkt erhält man so eine rekursive Formel zur Berechnung der Korrektur, die gut implementiert werden kann. Eine entsprechende Gleichung gilt für die Korrektur der Kraft F . Die korrigierten Werte werden in Gleichung (1) und (2) verwendet.

4 Ergebnisse

Das entwickelte Ersatzmodell ist Wirbelstromeffekten wurde auf zwei verschiedene Bauarten eines Hubankers angewendet, wobei die zweite Variante konstruktive Elemente zur Verringerung der Auftreffgeschwindigkeit und des Gesamtenergiebedarfs enthält. Das Ersatzmodell liefert für Vergleichsprobleme dieselben Bewegungsabläufe, Stromanstiegszeiten und Maximalströme wie die Cosimulation, die als Referenz herangezogen wird, siehe Abb. 6. Dabei liegen die Rechenzeiten im Bereich der Rechenzeiten des ECE-Modells, während die Cosimulation wesentlich zeitaufwändiger ist.

Vergleiche der aufgewendeten elektrischen Energie (siehe Tabelle 1) zeigen wie erwartet, dass Wirbelstromeffekte dazu führen, dass mehr Energie aufgewendet werden muss. Die Fehler des neuen Verfahrens sind deutlich kleiner als die durch Wirbelströme hervorgerufenen Effekte. Der etwas größere Unterschied bei Geometrie 2 erklärt sich dadurch, dass in diesem Fall der Anker die untere Position nur kurz

erreicht und sofort in die Ausgangsposition zurückkehrt.

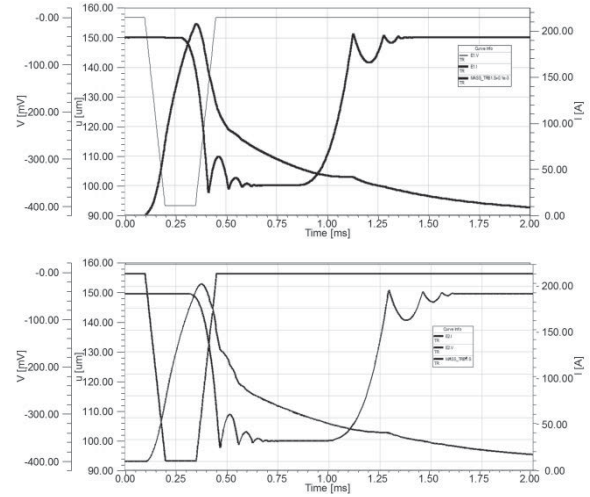


Abbildung 6. Vergleich des zeitlichen Ablaufs zwischen Cosimulation (oben) und der Simulation mit dem Ersatzmodell (unten) für Geometrie 1. Dargestellt sind der vorgegebene Spannungsverlauf, der Stromverlauf und die Bewegung des Ankers.

Geometrie 1	Verfahren	E_in [mJ]
Ohne Wirbelstromeffekte	Cosimulation	8,41
	Ersatzmodell	8,31
Mit Wirbelstromeffekten	Cosimulation	13,60
	Ersatzmodell	13,06

Geometrie 2	Verfahren	E_in [mJ]
Ohne Wirbelstromeffekte	Cosimulation	5,99
	Ersatzmodell	5,77
Mit Wirbelstromeffekten	Cosimulation	12,70
	Ersatzmodell	9,50

Tabelle 1. Vergleich der aufgewendeten elektrischen Energie für zwei verschiedene Ankergeometrien.

5 Zusammenfassung

Insgesamt wurde ein schnelles Ersatzmodell entwickelt, mit dem elektromechanische Bauteile auch unter Berücksichtigung von Wirbelstromeffekten in einer Systemsimulation simuliert werden können. Damit steht ein Werkzeug für Parameterauslegung und Optimierung in Simplerer zur Verfügung. Dieses Verfahren verwendet das Metamodell of Optimal Prognosis (MOP) aus Optislang als Kennfeld. Dieses wird in einem Simplererblock ausgewertet und die Werte als Eingangsdaten für das Lösen der Bewegungsgleichungen in Simplerer verwendet. Wirbelstromeffekte werden über eine mit Hilfe eines Faltungsintegrals beschriebene Korrektur von Kraft und Fluss berücksichtigt. Damit werden Simulationser-

gebnisse erzielt, die hinsichtlich Maximalstrom, Anzugszeit und Energiebilanz mit der entsprechenden Cosimulation vergleichbar sind.

6 References

- [1] W.H. Schilders. *Introduction to Reduced Order Modelling*. In: Model Order reduction: Theory, Research Aspects and Applications, Herausgeber: W.H. Schilders, H.A. Forst und J. Rommes, Springer, S. 1-31, 2008.
- [2] E. Kallenbach et al. *Elektromagnete: Grundlagen, Berechnung, Entwurf und Anwendung*, Springer 2012.
- [3] P. Zhou, D. Lin, W.N. Fu, B. Ionescu und Z.J. Cendes. *A general cosimulation approach for coupled field-circuit problems*, IEEE Transactions on Magnetics, 42, 4, S. 1051-1054, 2006.
- [4] R. Schirrmacher, Ch. Kubala, S. Kandaswamy und H. Ulmer. *Use of Metamodels for the Interdisciplinary Multi-Objective-Optimization (MOO)*, 8. Weimarer Optimierungs- und Stochastiktag, Weimar, 2011.
- [5] O. Siegemund. *Multiscale System Simulation*. Master-Thesis, Landshut University of Applied Science, Ingolstadt University of Applied Science, Deutschland, 2013.