

Mechatronische Simulation eines EHB- Hydraulikventils

Christian Meise¹, Peter Oehler¹, Stefan Breitschuh²
Wolfgang Fey¹, Günter Schmitz²

¹Continental Teves AG & Co. oHG,

²Fachhochschule Aachen

Fachhochschule Aachen
Hohenstaufenallee. 6

52064 Aachen

Tel: 0241 6009 2319

Fax: 0241 6009 2913

Email: breitschuh@FH-Aachen.de

<http://www.mechatronics.fh-aachen.de>

Kurzzusammenfassung

Die Komplexität von Systemen in der Automobilindustrie steigt Tag für Tag. Zusätzlich basiert das moderne Produkt oftmals auf hochintegrierten Systemen wie „Embedded Systems“, welche nicht mehr ohne die Hilfe von Simulationstools *designed* werden können. So entstand die Motivation, ein mechatronisches Ventilmodell zu entwickeln, das in der Lage ist das reale Ventil hinreichend genau nachzubilden und den verschiedenen Entwicklungsteams eine Möglichkeit bietet an ihrer physikalischen Domäne, losgelöst von den anderen Domänen, zu arbeiten. Weiter dient dieses Modell der Unterstützung eines Designprojektes eines Mixed-Signal-ICs zur Steuerung von Analogventilen.

1 Einleitung

Bereits heute sind in modernen Entwicklungs-Abteilungen Simulationsbasierte Entwicklungsansätze sind heute „State of the Art“. Mit Hilfe solcher Systeme kann die Verwendung von realer Hardware im Entwicklungsverlauf eingespart werden. Dies verkürzt die Entwicklungszeit und verringert noch dazu die Entwicklungszyklen. Somit kann auch die Produkteinführungszeit verkürzt werden, welche auch in der Automobilindustrie immer wichtiger wird.

Neue Produkte müssen in kürzeren Entwicklungsperioden entwickelt und auf dem Markt eingeführt werden. Ein weiterer Vorteil bei der Verwendung virtueller Modelle und der Simulationstechnik ist ein einfacherer Kommunikationsfluss zwischen den unterschiedlichen Abteilungen innerhalb einer Firma. Diese Abteilungen können technische Informationen austauschen, indem sie Resultate aus ihren Simulationen verwenden.

Bei einem Vergleich zwischen realer Hardware mit Simulationsergebnissen muss überprüft werden, ob die benutzten Modelle alle relevanten Details berücksichtigen können. Dies ist besonders in den modernen Projekten mit großen Simulationsszenarios ein wichtiger Aspekt, da Ingenieure oftmals dazu neigen ein Modell zu stark zu vereinfachen, um schnellere Simulationszeiten zu erhalten. Aufgrund der zunehmenden Komplexität der benutzten Simulationsszenarios wird dies jedoch immer wichtiger.

Die zuvor benannten Vorteile simulationsbasierter Ansätze waren der Auslöser für die Entwicklung eines Mixed-Signal-IC-Designs auf der Basis dieser Technologie. Modelle des ICs und der zusätzlichen Anwendung, wie Ventile, sollen erstellt werden. Das entwickelte Modell des analogen Ventils ist ein gutes Beispiel eines Kompromisses zwischen den Anforderungen bezüglich Simulationsperformance und physikalischer Genauigkeit. Unsere Entwicklungsmannschaft entschied, das mechatronische Ventilmodell in unterschiedliche Domänen, wie mechanische, hydraulische und magnetische Domänen aufzuteilen. Das Konzept wird in Bild 1 gezeigt. So kön-

nen die weiteren Eigenschaften des Simulationsmodells von den unterschiedlichen Entwicklungsmannschaften leichter verbessert werden. Eine große Hilfe während der Entwicklungsphase dieses Projektes war die Fähigkeit des Saber-Simulators, unterschiedliche physikalische Domänen zu beschreiben.

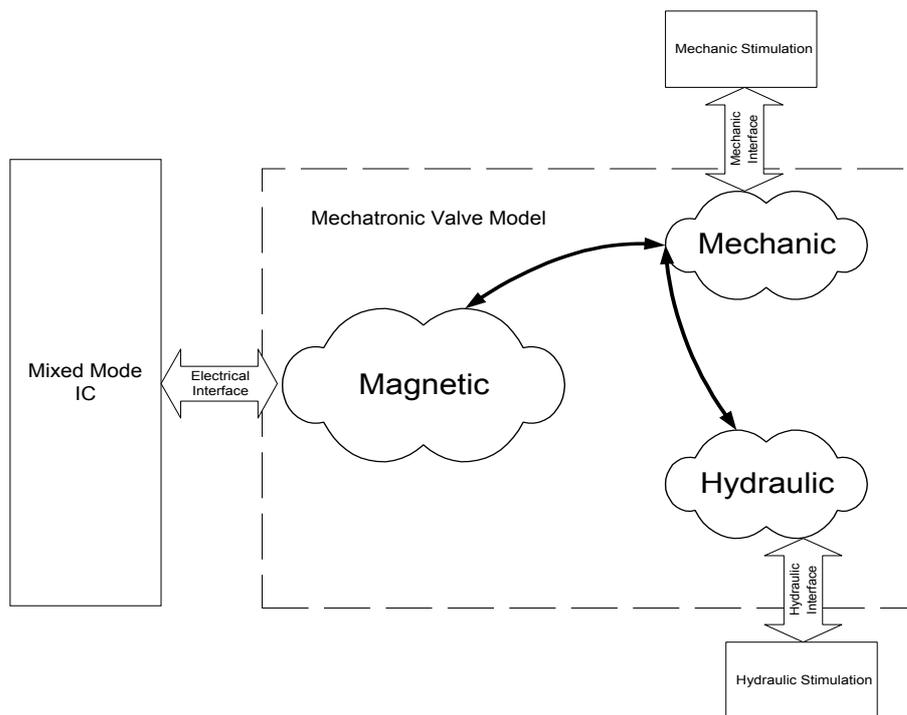


Bild 1. Multi Domain Simulation des mechatronischen Ventilmodells

2 PWM Stromregelung für analoge Ventile

Ein wichtiger Block der entwickelten ICs ist die Steuereinheit für die Ventilposition. Die Position wird über den Ventilstrom reguliert. Das verwendete Konzept für die Stromregelung basiert auf einem Pulsweitenmodulationsregler (PWM-Regler). Dieser Regler generiert einen spezifischen Strom, indem er Stromimpulse unterschiedlicher Breite erzeugt. Der resultierende Strom durch das Ventil ist von der Impulsbreite abhängig. Über den Spannungsabfall an einem Messwiderstand, welcher sich im Strompfad befindet, wird indirekt der Strom gemessen. Dieser gemessene Wert wird an den Regler übergeben, und dieser kann den Strom über die Impulsbreite beeinflussen. Das Konzept dieses Reglers wird in Bild 2 gezeigt. Wir realisierten den Regler mit einem digitalen PID Filter in Verbindung mit einem A/D-Wandler. Ein interessanter Punkt ist die fast abgeschlossene digitale Implementierung des Regelkreises. Die einzigen Mixed-Signal-Blöcke sind der A/D-Wandler und die Energieversorgung des PWM-Ventilausgangs. Alle weiteren Teile, einschließlich des PID-Reglers, wurden als digitale Blöcke entworfen. Die Verwendung von Simulationen beschleunigen die Designphasen drastisch. Beispielsweise wurden alle Koeffizienten für den digitalen Filter durch Anwendung der Simulationstechniken gefunden. Dies verringerte die Entwicklungsiterationen mit realen ICs und macht deutlich, dass besonders für „Embedded Systems“ die Simulation eine wichtige Technologie darstellt. Der Aufwand vergrößert sich ständig, wenn bei immer komplexeren Systemen für jedes Einzelteil ein entsprechendes Äquivalent erstellt werden muss. Folglich ist eine virtuelle Darstellung während der Entwicklungsphase unerlässlich.

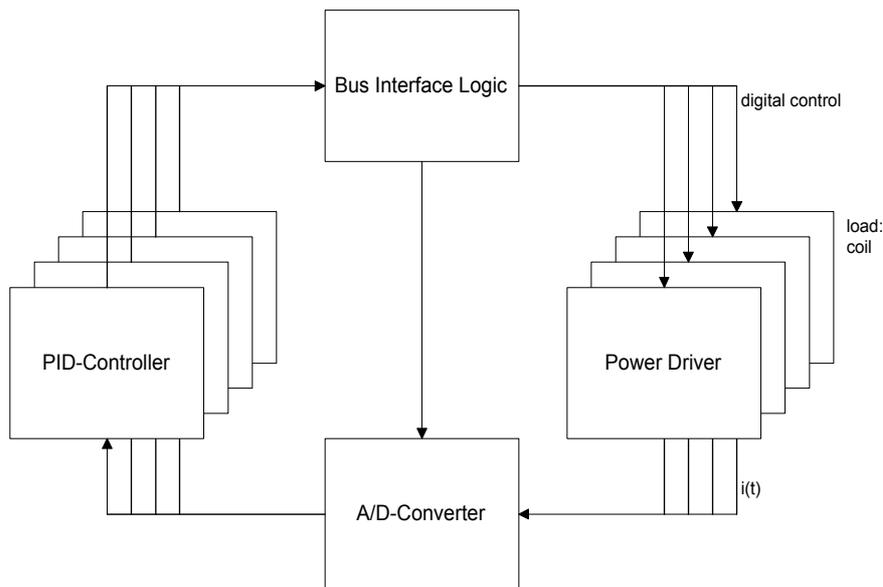


Bild 2. Struktur der Stromregelung

3 PWM Stromregelung für analoge Ventile

Eine vereinfachte Darstellung eines Ventils ist die Kombination einer Spule in Reihe mit einem Widerstand. Dieses Modell ist hinreichend für das Erhalten von Resultaten bei Überprüfung des Grundmodells. Es müssen aber physikalische Effekte in Erwägung gezogen werden, wenn Informationen für Designentscheidungen benötigt werden. Eine einfache Spule-Widerstandskombination verhält sich bei einem Schaltvorgang anders als ein echtes Ventil. Während eines Schaltvorganges verändern sich die magnetischen Eigenschaften eines Eisenkernes und die geometrischen Eigenschaften des Kernes durch mechanische Bewegungen innerhalb des Ventils. Somit verändert sich die Induktivität nichtlinear. Auch die hydraulischen und thermischen Effekte sind systemrelevant und für Designentscheidungen eines kompletten steuernden System wichtig. Um den Ingenieuren zu helfen, welche aus den unterschiedlichen Disziplinen kommen und zusammen an einem Projekt arbeiten, entschied die Projektleitung, das Ventil in seine unterschiedlichen physikalischen Domänen aufzuspalten. So wurde das Ventil, in Bezug auf die unterschiedlichen Sichtweisen der Ingenieure, in die mechanische, hydraulische und magnetische Domäne aufgeteilt. Folglich werden physikalische Attribute wie die Induktivität nicht explizit durch einen Parameter vorgegeben, sondern resultiert aus der Kombination der geometrischen Parameter, welche direkt dem Entwurf entnommen werden. Jeder Parameter in einer Domäne wird in der Überschrift des Modells erklärt, und kann per Text-Editor oder SaberSketch eingesehen und verändert werden. Zu diesem Zeitpunkt gibt es mindestens 80 Parameter. Dies war ein weiterer Grund für das Aufspalten des Ventil-Modells in drei Domänen (Bild 3).

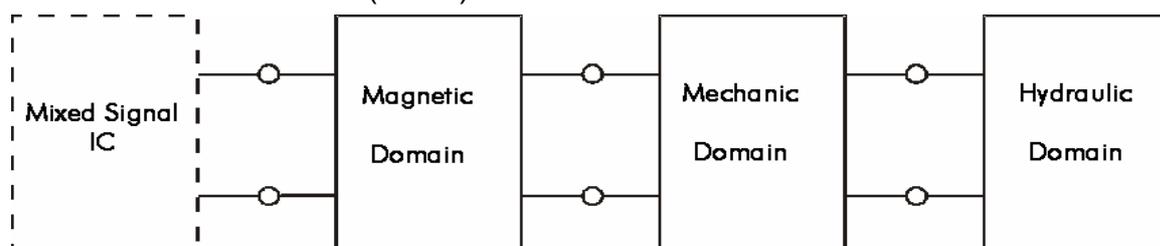


Bild 3. Übersicht des Modells

3.1 Die magnetische Domäne

Die magnetische Domäne (Bild 4) wird in vier Bestandteile unterteilt: Eine Spule, zwei magnetische Widerstände und ein Luftspalt. Die Aufgabe der magnetischen Domäne ist es, den Steuerstrom in die magnetische Kraft umzuwandeln. Dieses wird über ein Spulenmodell erreicht, welches den Strom in eine magnetomotorische Kraft umwandelt. Mithilfe von induktiven/realen Widerständen in dem Spulenmodell ist es möglich Wirbelströme zu simulieren. Sollten Wirbelströme im Magnetkreis betrachtet werden müssen, muss der interne Widerstand des Spulenmodells auf null gestellt und ein externer Widerstand statt dessen verwendet werden. Der Magnetkreis besteht aus vielen unterschiedlichen Bereichen, die in diesem Modell mit zwei magnetischen Widerständen dargestellt werden. Der magnetische Fluss verteilt sich in Teilbereichen des magnetischen Aktuators auf verhältnismäßig große Querschnittsflächen. Im normalen Betriebsbereich werden diese Bereiche weniger gesättigt. Andere Abschnitte des magnetischen Weges weisen jedoch Sättigungseffekte in Abhängigkeit von Luftspalt, der magnetischen Kraft und dem resultierenden magnetischen Fluss auf. Eine Aufteilung in einen gesättigten und ungesättigten Abschnitt entspricht nicht genau der Realität, ist aber für die Simulation hinreichend genau. Zusätzlich bietet diese Lösung eine große Flexibilität bei der Parametrisierung des Modells an.

Das Modell des Luftspaltes wandelt die magnetischen Größen in die mechanischen Größen und errechnet die Kraft an dem Anker aus der magnetischen Induktion und dem Abstand im Luftspalt. Auch eine Änderung des Luftspaltes wirkt sich auf den magnetischen Widerstand aus und folglich wird eine Reaktion auf den magnetischen Stromkreis erreicht. Die Ankerbewegung hat somit einen Effekt auf den elektrischen Bereich, welcher durch den magnetischen Kreis übertragen wird. Das heißt: Der magnetische Bereich ist in der Lage, den magnetischen Kreis, die Ankerrückwirkung und die möglichen Wirbelströme zu simulieren.

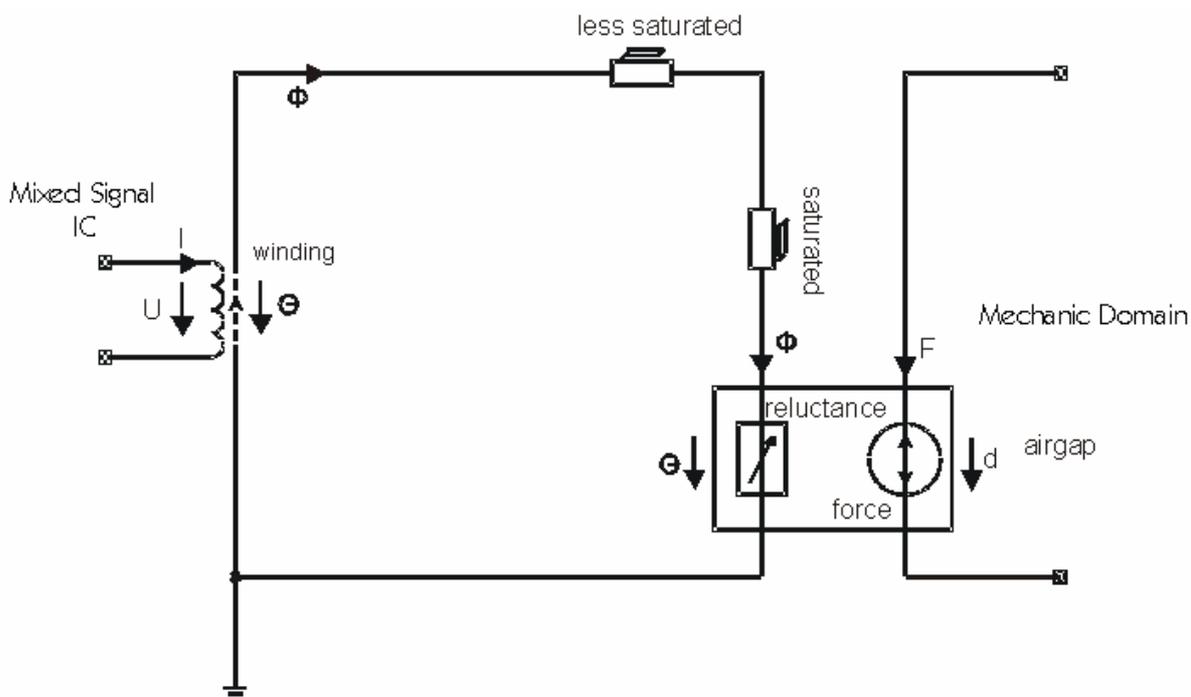


Bild 4. Magnetische Domäne

3.2 Die mechanische Domäne

Die mechanische Domäne realisiert die Verbindung zwischen der magnetischen Domäne (Bild 4) und der hydraulischen Domäne (Bild 6). Der Anker ist mit dem Ventilstößel verbunden, welcher den Fluss des Mediums (Hydrauliköl) an der Steueröffnung beeinflusst. Über eine Dämpfung wird simuliert das der Anker von dem Medium umgeben ist. Die Reibung des Ankers an den Führungsflächen steht auch in Abhängigkeit zu dem Medium. Es werden somit Dämpfung und Reibung betrachtet und eine Temperaturabhängigkeit kann über diese nachgeahmt werden. Im Bereich der Reibung hat es nicht unerhebliche Schwierigkeiten gegeben da dieses Modell gegenüber numerischen Instabilitäten aufgrund seines nichtlinearen Verhaltens sehr empfindlich ist. Das größte Problem entsteht, wenn mehr als ein Reibungselement im mechanischen Modell verwendet werden soll. Bis die Losbrechkraft erreicht ist, kann der Simulator nicht entscheiden, welche Reibung mehr Energie aufnimmt. Indem man den mechanischen Bereich optimierte, konnten einige Reibungen vernachlässigt werden. Im Übergang von Haftung nach Gleitreibung treten häufig numerische Instabilitäten auf, weil der Übergang nichtlinear ist. Eine numerische Formel, die diesen Übergang beschreibt, verringert die numerische Instabilität und es wichtig ist, ein Modell zu verwenden, welches mit diesem Übergang arbeitet.

Da der Anker in seiner Bewegung begrenzt ist, werden die unterschiedlichen Kontaktpunkte durch „Hardstops“ simuliert. In der Nullposition wird der Anker von einer Feder auf die Steueröffnung gepresst. Aus Stabilitätsgründen werden die verringerte Masse der Feder und die Masse des Ankers im Modell kombiniert. Über diese Federscheibe werden die magnetische Kraft und der Abstand zwischen Anker und Joch beeinflusst. Die Bewegung dieser Scheibe ist begrenzt und der Federkoeffizient ist nicht konstant, folglich musste das Modell dieser Feder erweitert werden. Um eine Mindestlänge zu erhalten wird das Modell mit einem „Spacer“ und einem „Hardstop“ erweitert. Mit einer Kennlinie der realen Federscheibe wird eine Gleichung dritten Grades für den Koeffizienten definiert. Wenn keine magnetische Kraft über den magnetischen Bereich geliefert wird, liegt das Ventil auf der Steueröffnung auf. Wie schon beschrieben wird dies durch einen „Hardstop“ erreicht. Einflüsse des Mediums auf den Anker werden in dem hydraulischen Bereich betrachtet und wirken sich so auf den mechanischen Bereich aus. Der magnetische Bereich liefert die Länge des Luftspaltes und der Kraft, welche über den Luftspalt erzeugt wird. Das Verhalten ist rekursiv, weil der mechanische Bereich an den hydraulischen Bereich gekoppelt ist und somit eine Auswirkung auf den Luftspalt hat. Das heißt: Eine Reaktion von jedem dieser Bereiche eine Auswirkung auf den elektrischen Teil des magnetischen Bereiches.

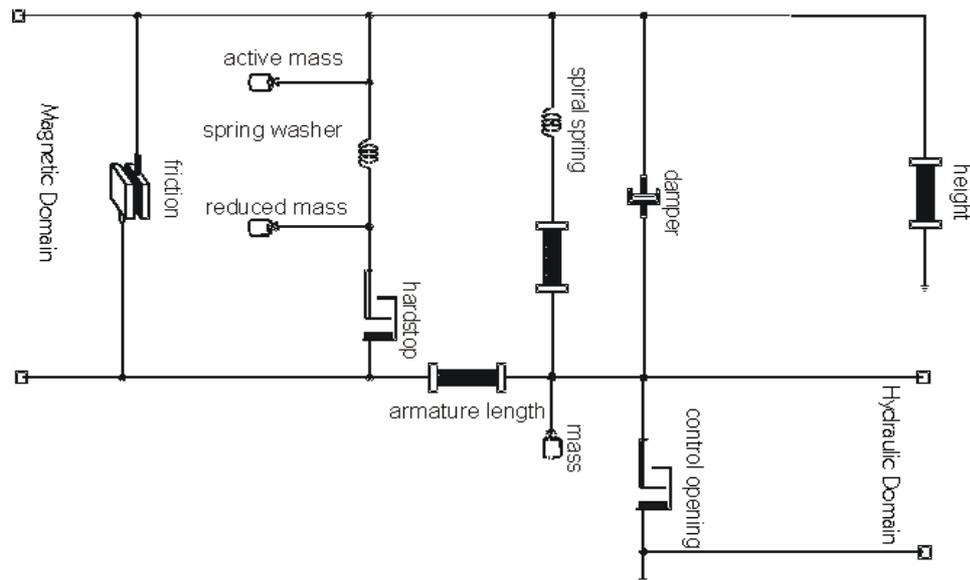


Bild 5. Mechanische Domäne

3.3 Die hydraulische Domäne

Alle Bestandteile des Systems, die einen Einfluss auf die Strömung des Mediums haben, sind in der hydraulischen Domäne enthalten. Die Reibung und die Dämpfung, welche durch das Medium in der Mechanik verursacht werden, sind in der mechanischen Domäne implementiert.

Um ein leicht verwendbares Modell zu erhalten, wurden drei Abschnitte definiert: Den Abschnitt mit einer Hydraulikpumpe, der Abschnitt mit dem Ventil und der Abschnitt mit einem Verbraucher. Verschiedene Versionen des Ventils können verwirklicht werden, indem die Hydraulikpumpe und der Verbraucher in drei Teile aufgeteilt werden. Totvolumen und die Kompressibilität des Mediums werden mit Akkumulatoren nachgebildet. Konstante Druckquellen simulieren den Druck der Hydraulikpumpe und den Gegendruck des Verbrauchers. Mit Hilfe von Hydraulikleitungen werden die Eingänge, sowie verschiedene Querschnittsänderungen realisiert.

Prinzipiell bietet das Modell einer Hydraulikleitung Parameter für die Länge, den Durchmesser und die Koeffizienten, welche das Verhalten bei laminarem und turbulentem Fluss beschreiben. Das Modell der Hydraulikleitung beeinflusst folglich den hydraulischen Fluss und die Druckdifferenz über eine Hydraulikleitung. Eine flexible Einstellung für unterschiedliche Designs und unterschiedliche Arten der Ventile ist somit mit der oben beschriebenen Struktur möglich. Unterschiedliche Geometrien der Strömungsöffnung werden über ein Kennfeld des realen Ventilmodells nachgebildet.

Die hydraulische Domäne ist mit dem mechanischen Bereich gekoppelt. Jedoch wird nur die mechanische Position des Ventils (genauer Stößels) in dem Standardventilmodell verwendet. In dem anzugebenden Kennfeld ist keine Information über die Kräfte an der Steueröffnung enthalten. Zwei zusätzliche Modelle werden benötigt um ausreichende Informationen über die Kräfte, welche das Modell beeinflussen, an der Steueröffnung wiederzugeben. Die Kraft durch den Druck an der Ventilloberfläche wird durch einen einfachen Druck-Kraftkonverter berechnet. Ein neues Modell wurde erzeugt, um die Kraft zu errechnen, welche durch den Fluss des Mediums durch die Steueröffnung an der Ventilloberfläche entsteht. Dieses Modell wurde über unterschiedliche Kennfelder, welche in Relation gestellt wurden, aufgebaut. Eine Messung der Kräfte in den Prototypen war bisher nicht möglich. Die komplexen Kräfte an der

Ventil-Oberfläche, welche einen Einfluss auf das Modell haben, müssen somit mit Hilfe dieser zwei Modelle simuliert werden.

Mit diesen Elementen ermöglicht der hydraulische Bereich die Änderung der notwendigen Parameter, eine Anpassung an das realen Ventil und es kann an unterschiedlichen Konfigurationen des Ventils leicht angepasst werden.

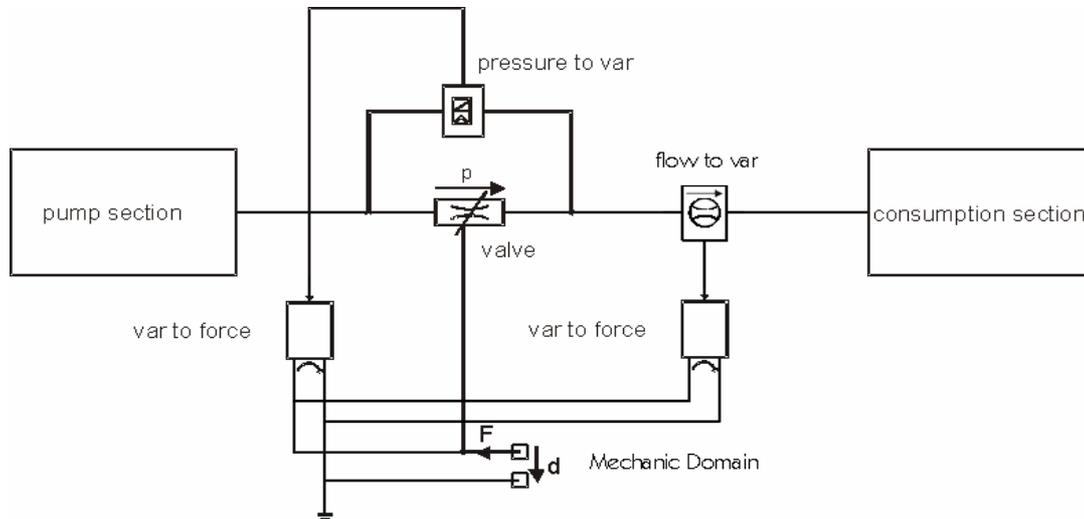


Bild 6. Hydraulische Domäne

4 Simulationsergebnisse eines Vergleichs zwischen einem einfachen Ventilmodell und dem mechatronischen Ventilmodell

Es wurden Mixed-Mode Simulationen mit Verilog/Saber vorgenommen, die einen Unterschied aufzeigen zwischen einer einfachen Spule/Widerstand-Kombination und dem Ventilmodell (siehe Bild 3). In beiden Fällen wurde mit dem Regler nach Bild 2 simuliert. Die Filterkoeffizienten für den digitalen PID Regler wurden für eine ideale Spule ($L=17.5\text{mH}$, $R_L=4.1\ \Omega$) optimiert. Aus diesem Grund zeigt das dynamische Verhalten eines Sprunges von 0 auf 1A kaum Überschwingen auf ($I(\text{coil})$ in Bild 7).

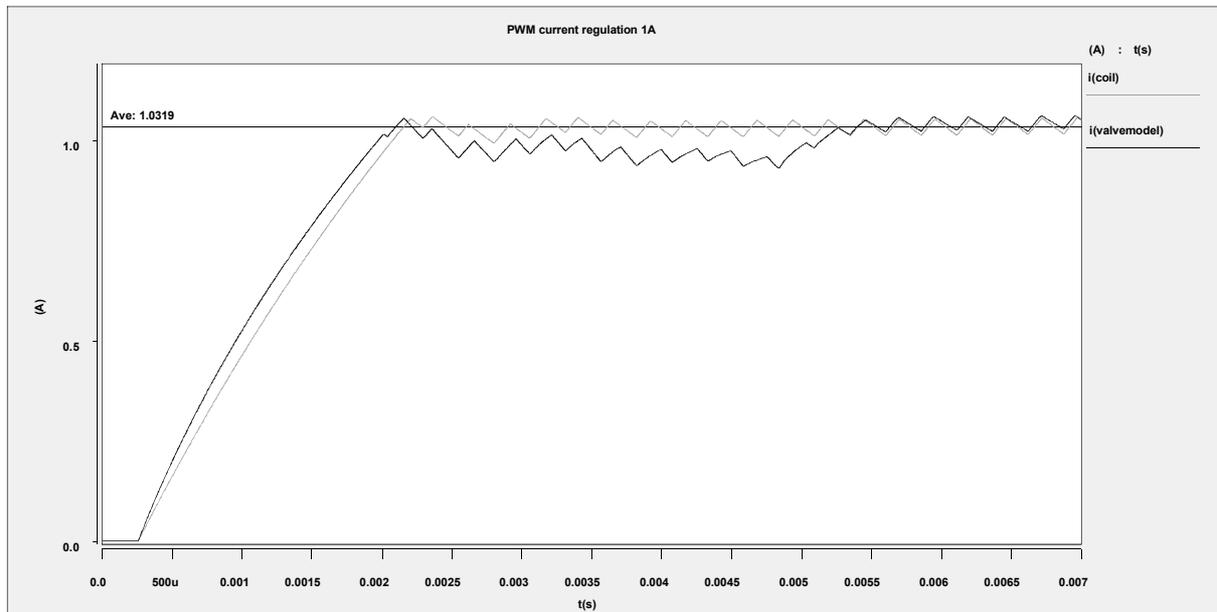


Bild 7. Simulationsergebnisse

Wie zu sehen ist, ist die Zeitkonstante $\tau = L/R_L$ des Ventilmodells beim Einschalten der idealen Spule recht ähnlich: Die Steigung des Stromes ist in beiden Kurven ähnlich groß. Das mechatronische Ventilmodell weist jedoch keine ideale e-Funktion auf (resultierend aus dem Eisenkern, welcher Sättigungseffekte aufweist). Für eine ideale Spule ist die Zeitkonstante beim Einschalten oder Ausschalten identisch. Wegen des Eisenkerns gilt dies nicht für das Ventilmodell bzw. einem realen Ventil.

Das mechatronische Ventilmodell ist bis jetzt in der Form nur so weit parametrisiert, dass kaum ein Einbruch des Stromes beim Einschalten oder Ausschalten vom Ventil zu sehen ist, welcher durch das Bewegen des Ventilankers verursacht wird. Die Bewegung des Ankers verändert jedoch die Induktivität des Magnetmodells, und stört somit den Regelkreis: Die gegenwärtige Regelung für das Ventilmodell ist bis $t=5.5\text{ms}$ nicht stabil (Bild 7). Anschließend ist die Stabilität des Regelkreises mit Ventilmodell mit der bei Verwendung der idealen Spule vergleichbar. Nichtlinearitäten im Eisenkern und Anker-Bewegungen sind der Grund, warum wir einen großen Einfluss auf das Verhalten der Regelung sehen können. Diese Ergebnisse zeigen, daß es nicht möglich ist, Filterkoeffizienten für einen digitalen PID-Regler mit nur einem einfachen Spulen-Modell zu optimieren. Im schlimmsten Fall ist es sogar möglich, dass auf diesem Weg bestimmte Filterkoeffizienten bei der Regelung eines realen Ventils zu einem instabilen Verhalten führen.

5 Zusammenfassung

Wir sind in der Lage zu zeigen, dass die Abstraktion eines Systems nicht immer der Schlüssel zum Erfolg für realistische Resultate ist. Häufig sind physikalische Nebeneffekte ein äußerst wichtiger Bestandteil einer technischen Lösung. Wenn sie für die Systemfunktionalität relevant sind, müssen Modelle diese Effekte unbedingt in Betracht ziehen.

6 Literatur

Schmitz, G., Pischinger M.: "Mechatronische Simulation eines EMV- Aktuators", TransMechatronik, Entwicklung und Transfer von Entwicklungssystemen der Mechatronik, Paderborner Workshop Transmechatronik, 24.6.1997, Tagungsband ISBN 3-931466-22-1

Schmitz, G., Altherr, M., Hofmann, O., Pischinger, M., Kather, L. van der Staay, F.: "Anwendung moderner Simulationstools für die Entwicklung eines elektromagnetischen Ventilaktuators", ", 2. Workshop TransMechatronik, Aachen, 26.5.98, Tagungsband ISBN-3-931466-37-X

Schmitz, G., Pischinger M.: "Effiziente Entwicklung von magnetischen Aktuatoren durch den Einsatz mechatronischer Entwicklungstools", 18. Tagung "Elektronik im Kraftfahrzeug", Haus der Technik, 16.-17.06.1998, München

Schmitz, G., van der Staay, F., Kather, L., Boie, C., Kemper, H.: "Entwicklung eines elektromechanischen Ventiltriebs mit Hilfe mechatronischer Entwicklungswerkzeuge", Tagung "Variable Ventilsteuerung", Haus der Technik, 28.-29.03.2000, Essen

Schmitz, G. (Hrsg.): "Mechatronik im Automobil", expert Verlag, ISBN 3-8169-1839-5

Meise, C., Oehler, P., Beitschuh, S., Fey, W., Schmitz, G.: "Study of a Mechatronic Valve Model for the Automotive Industry", Saber User Group Meeting, 14.11.2001, München

D. Gospodaric, Z. Jajtic: "Einsatz moderner Methoden zur dynamischen Simulation von Aktuatoren am Beispiel eines Regelventils für Fahrwerksdynamik", 2. Tagung "Mechatronik im Automobil", Haus der Technik und FH Aachen, 15.-16.11.2000, München

J. Schuller, P. Brangs, R. Rothfuß: "Entwicklungsumgebung für die Fahrdynamikregelung DSC", 2. Tagung "Mechatronik im Automobil", Haus der Technik und FH Aachen, 15.-16.11.2000, München