

Der Mehrwert der Systemsimulation in der Entwicklung mechatronischer Systeme aufgezeigt am Beispiel einer dynamischen EMK-Waage

Baumgartl, Hanna

CADFEM GmbH, Grafing bei München

Kurzfassung

In Verpackungs- und Abfüllanlagen im Lebensmittel- und Pharmabereich spielt der Verwiegeprozess eine exponierte Rolle: Er ist unverzichtbar und stellt bezüglich der Taktzeiten häufig den Flaschenhals dar. Gerade im Pharmabereich sind jedoch auch die Anforderungen bezüglich Auflösung und Reproduzierbarkeit so streng, dass als mögliches Wägemodul häufig nur EMK-Waagen (Elektromagnetisch kraftkompensierte Waagen) infrage kommen. Den Anforderungen nach Auflösung und Reproduzierbarkeit werden diese Waagen spielend gerecht, jedoch zu Lasten der Messzeit. Um dieses Spannungsfeld zu überwinden, genügt es im Entwicklungsprozess nicht, die einzelnen Komponenten dieses hochgradig mechatronischen Systems zu optimieren – die Komponenten müssen aufeinander abgestimmt und das Gesamtsystem als solches optimiert werden. Hierzu liefert eine Systemsimulation ein wertvolles Hilfsmittel. Sie erlaubt es, unterschiedliche Modelltypen mit verschiedenen Abstraktionsgraden miteinander zu verknüpfen und so für jede Komponente die Detailtiefe zur Verfügung zu stellen, die für die Optimierung benötigt wird und trotzdem schnell laufende Modelle zu erzeugen. Hier wird die Vorgehensweise zur Modellerstellung und Optimierung anhand des oben skizzierten Beispiels einer EMK-Waage beleuchtet.

1. Was ist Systemsimulation?

„Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Einzelteile“ (Aristoteles). Das gilt für jegliches System: Es wird über seine Bestandteile und deren Eigenschaften definiert, jedoch weist es auch Eigenschaften auf, die nur durch das Zusammenspiel der Bestandteile erklärbar sind.

Die Systemsimulation erlaubt es, komplexe cyberphysikalische Systeme in ihrer Gänze zu modellieren. Hierfür werden in einem Modell physikalische Komponenten ebenso abgebildet wie Regelungselemente und Software-Module – die Interaktion der verschiedenen Systembestandteile und ihr Einfluss auf das Verhalten des Gesamtsystems stehen hier im Fokus. Der Ansatz der bauteilübergreifenden Simulation ermöglicht damit eine Optimierung des Gesamtsystemverhaltens und die Abstimmung der einzelnen Module aufeinander.

Im Gegensatz zur „klassischen Multiphysiksimulation“ erfolgt die Kopplung der physikalischen Domänen nicht auf Feldebene, sondern auf Terminalebene. Hier werden physikalische Größen bzw. Signale an dedizierten Punkten ausgetauscht, nicht über die komplette Geometrie hinweg. Diese Eigenschaft bringt einige enorme Vorteile mit sich. Sie ermöglicht die Wahl unterschiedlicher Modelltypen für verschiedene Komponenten; es kann für jede Komponente der Abstraktionsgrad individuell festgelegt werden, woraus Modelle mit sehr geringen Rechenzeiten resultieren. Durch die hohe

Modularisierung sind ein schneller Austausch von Komponentenmodellen sowie eine sehr gute Wiederverwendbarkeit gegeben.

Der Modellaufbau in der Systemsimulation stützt sich auf drei Modellierungsansätze:

1. Die Verwendung von Modellbibliotheken: Die enthaltenen Modelle können analytischer oder empirischer Natur sein, üblicherweise sind sie parametrisch aufgebaut und ermöglichen die automatisierte Durchführung von Variantenstudien. Häufig ist hier der Grad der Abstraktion recht hoch, damit eignen sich Bibliotheksmodelle unter anderem sehr gut für Vorauslegungen.
2. Die Co-Simulation verschiedener Simulationen: Hier werden die Ergebnisse an dedizierten Punkten transienter (FE)-Simulationen zu jedem Zeitschritt zwischen verschiedenen Solvern ausgetauscht, die Berechnung der einzelnen Komponenten erfolgt von einem Master gesteuert parallel zueinander. Dieser Ansatz ist numerisch äußerst aufwendig, liefert jedoch die meisten Details. Insbesondere wenn verteilte Größen relevant (Temperaturgradienten, mechanische Spannungen,...) und hochgradig nichtlineare Effekte nicht vernachlässigbar sind, bzw. diverse Tools zum Einsatz kommen, ist dieser Ansatz hilfreich.
3. Die Modellordnungsreduktion von Feldmodellen: Es existiert eine Vielzahl mathematischer Ansätze zur Reduktion der Modellordnung. Die resultierenden Modelle bilden das Komponentenverhalten bei stark reduzierter Simulationszeit über große Bereiche sehr gut ab. Bereits bestehendes Know-how aus vorangegangenen Simulationen wird elegant in die Systemsimulation integriert; der Ansatz liefert die beste Balance zwischen Detailtreue und Simulationsperformance.

Je nach Simulationsstrategie kommen verschiedene Modelltypen zum Einsatz. „Bottom-up“ startet man mit stark abstrahierten Verhaltensmodellen (aus Bibliotheken), um Eigenschaften der Komponenten zu definieren und darauf basierend das Detaildesign nutzenoptimiert zu gestalten. Durch Ableitung reduzierter Modelle oder Co-Simulationen der entwickelten Baugruppenmodelle und Ersatz der Verhaltensmodelle erfolgt im nächsten Schritt die Verifikation der Funktion. Bei der „Top-Down“-Strategie existieren bereits weit auskonstruierte / entwickelte Subsysteme, deren zugeschnittene, abstrahierte Modellrepräsentation in ein übergeordnetes Systemmodell mündet und zur Überprüfung der Integration dient. Darauf basierend erfolgt die Anpassung der Komponenten zur Optimierung des Gesamtverhaltens. Der reale Entwicklungsalltag bewegt sich zwischen beiden Konzepten, da üblicherweise eine Kombination existierender (oder zugekaufter) und neuer Subsysteme vorliegt. Der kombinierte Ansatz findet sich auch im hier präsentierten Modell wieder.

2. Funktionsweise und Modellbildung einer EMK-Waage

Die schematische Darstellung der Funktionsweise einer EMK-Waage findet sich in Abb. 1: Wird die Waagschale mit einer Masse beaufschlagt, senkt sie sich mit dem Schalenträger auf einer von den Parallelenkern vorgegebenen Kreisbahn ab. Diese Bewegung überträgt sich über das Koppelband auf den Waagenhebel, der sich um ein Festlager dreht. Die resultierende vertikale Auslenkung detektiert ein Lageindikator am Ende des Hebels. Ebenfalls am Hebel befindet sich eine Kupferspule, die sich im Magnetfeld eines Permanentmagneten bewegt. Die detektierte Abweichung des Hebels ist Eingangssignal für einen Regler, dessen Ausgangssignal in einen Strom durch die Kompensationsspule gewandelt wird. Damit ändert sich die geregelte, re-

sultierende Lorentzkraft so lange, bis der Waagenhebel wieder in der Gleichgewichtslage ankommt; die Lorentzkraft also die Gewichtskraft kompensiert.

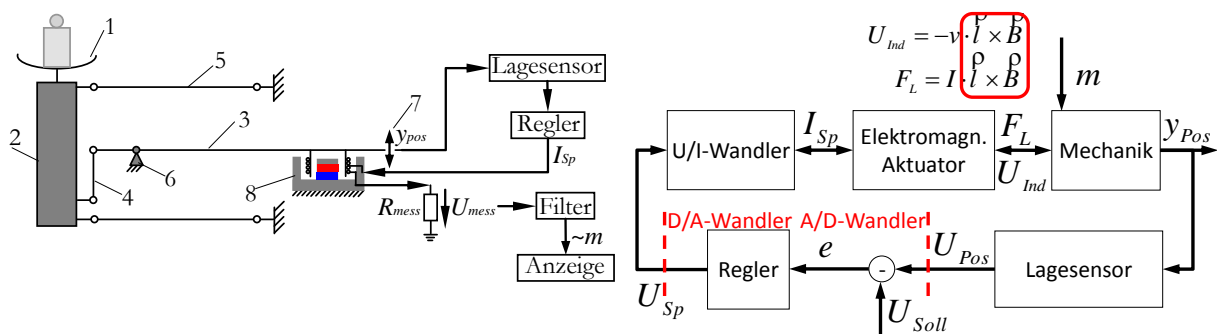


Abb. 1: Links: Schematische Darstellung einer EMK-Waage. 1 – Waagschale, 2 – Schalenträger, 3 – Waagenhebel, 4 – Koppelband, 5 – Parallelenker, 6 – Hebellager mit Einkörpergelenk, 7 – Lageindikator, 8 – Elektromagnetischer Aktuator. Rechts: Modellaufbau der Waage

Der Spulenstrom ist über einen Kalibrierfaktor aus Erdbeschleunigung, Hebelübersetzung, Länge des Spulendrahtes und magnetischer Flussdichte mit der zu bestimmenden Masse verknüpft und stellt ein exakt zu bestimmendes Maß dar. Die Massebestimmung erfolgt über die Messung des Spulenstroms durch einen Referenzwiderstand in Reihe zur Spule, Filterung und Umrechnung mit der Kalibrierkonstanten.

Zwischen Waagenmechanik, Aktuator und U/I-Wandler liegt eine starke Wechselwirkung vor (siehe Abb. 1, rechts): Das induktive Verhalten des Aktuators wirkt zusammen mit der begrenzten Spannungsreserve auf den U/I-Wandler zurück. Über den Koeffizienten $l \times B$ wirkt stromproportional die Lorentzkraft auf die Mechanik, deren Schwingung wiederum geschwindigkeitsproportional mit dem gleichen Faktor zur Induktion einer Spannung in der Spule führt.

Eine besonders elegante und exakte Repräsentation der Interaktion der Waagenkomponenten lässt sich mit Hilfe konservativer Modellansätze realisieren. Diese energieerhaltende Formulierung der Modelle enthält intrinsisch eine bidirektionale Interaktion der Modelle untereinander, analog zum Kirchhoffschen Netzwerktheorem: Es fließt so viel in einen Knoten hinein wie heraus und die Potentialdifferenzen in einem geschlossenen Kreis summieren sich zu Null.

Eine rückwirkungsfreie Modellierung mit gerichteten Signalen wie sie beispielsweise Regelungsalgorithmen oder Software benötigen, kann man durch die Implementierung kausaler Modelle erzielen. Die Verknüpfung kausaler und konservativer Modelle ist über ein Paar aus Sensor und Quelle realisierbar.

In den folgenden Abschnitten werden die Modelle der in Abb. 1 aufgelisteten Komponenten und ihre Interaktion untereinander vorgestellt.

2.1. Waagenmechanik

Für die Abbildung der Waagenmechanik kommen verschiedene Ansätze infrage: Unter der Annahme, dass die Hebel sehr steif sind und die Dynamik der Waage maßgeblich durch die Steifigkeit der Einkörpergelenke dominiert wird, ist die Abbildung über ein Starrkörpermodell möglich.

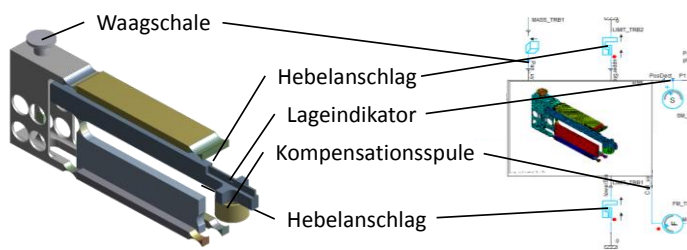


Abb. 2: Exemplarische Darstellung der Waagenmechanik (links) und der Modellierung als Zustandsraummodell im Systemmodell mit Terminalen (rechts)

Liegt noch keine CAD-Geometrie vor kann innerhalb des ANSYS Simplorer ein Starrkörpermodell mit der Modelica-RBD-Bibliothek aufgebaut werden [1]1)a)[1]. Durch die sehr geringe Simulationsdauer und vollständige Parametrierbarkeit ohne CAD-Update ist dieser Ansatz prädestiniert für Studien zu einem frühen Entwicklungsstand. Ist auf Basis dieser Simulationen eine Geometrie bezüglich Hebellängen und Steifigkeit der Einkörpergelenke voroptimiert, bietet sich der Übergang zu einer Co-Simulation [2] zwischen Simplorer und dem ANSYS RBD-Modul an: Die Nachgiebigkeit von Hebeln und Lenkern ist über Superelemente integrierbar, diese werden per CMS (Component Mode Synthesis) erzeugt [3]. Durch eine nachfolgende Expansion der Superelemente ist die Visualisierung von Deformationen und Spannungen unter realistischen Lastszenarien möglich. Darüber hinaus lassen sich mit dem Ansatz der CMS große Rotationen / Translationen der Bauteile abbilden.

Ist die dreidimensionale Visualisierung von Spannungen und oder Verformungen nicht notwendig und ist – wie im Falle einer EMK-Waage – lediglich mit kleinen Deformationen und linearem Verhalten zu rechnen, bietet der Ansatz der modalen Reduktion das beste Verhältnis zwischen Abbildungstreue und Simulationsdauer. In ANSYS Mechanical wird durch Superposition der ersten (relevanten) Eigenformen ein Ersatzmodell für das dynamische Verhalten erzeugt [4]. Ist das resultierende Zustandsraummodell in Simplorer eingebunden, erfolgt die Anbindung an den elektromagnetischen Aktuator über die Definition geeigneter Terminale (siehe Abb. 2, rechts).

2.2. Lageindikator

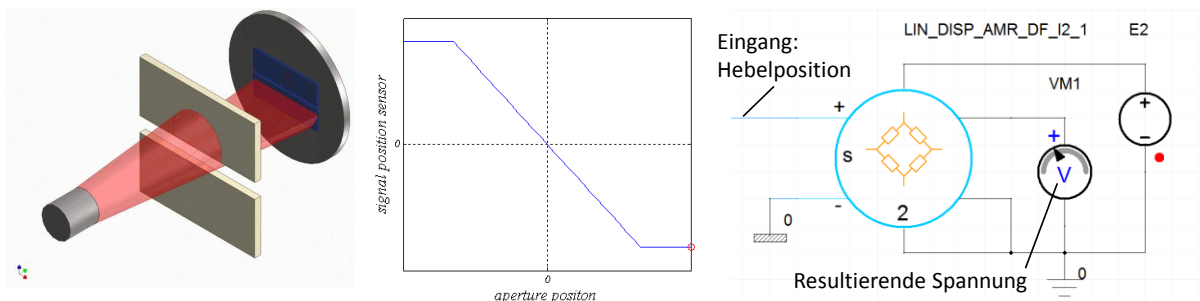


Abb. 3: Links: Schematischer Aufbau eines optischen Lageindikators, Mitte: Idealierte Kennlinie, Rechts: rückwirkungsfreies Ersatzmodell

Für die Lagedetektion kommen in Waagen häufig optische Sensoren zum Einsatz. Eine LED beleuchtet durch einen Schlitz im Waagenhebel eine Differenzphotodiode. In Abhängigkeit der Hebelposition werden unterschiedliche Bereiche der Photodio-

den abgeschattet, der Ausgangsstrom ist proportional zur beleuchteten Fläche (siehe Abb. 3, links),[5]. Die Differenzbildung sorgt für eine Linearisierung der Kennlinie sowie die Richtungsinformation (siehe Abb. 3, Mitte). Ein solches optisches Bibliothekselement existiert nicht in ANSYS Simplorer. Ein Ansatz wäre es mit VHDL-AMS zu erzeugen, damit wäre es physikalisch korrekt abbildbar. Da hier von Rückwirkungsfreiheit auszugehen ist, kommt das Modell eines anisotropen magnetoresistiven Sensors (AMR) zum Einsatz (siehe Abb. 3, rechts). Durch gezielte Manipulation der Parameter emuliert dieser sehr gut das Verhalten des optischen Sensors ohne die Simulationsgüte zu beeinflussen.

2.3. Regler

Die Aufgabe des Reglers in EMK-Waagen ist es, das Kräftegleichgewicht zwischen der Gewichtskraft der zu bestimmenden Masse und der erzeugten Lorentzkraft möglichst dynamisch zu wahren. Das regelungstechnische Kriterium hierzu ist die Lageabweichung des Hebels zu minimieren, messtechnisch ist allerdings der Spulenstrom die auszuwertende Größe. Es gilt also den Regler so zu dimensionieren, dass die Stellgröße (der Spulenstrom) nach einer Filterung möglichst schnell und stabil in ein Toleranzband eingeschwungen ist. Häufig kommen hier PID oder PIDT1-Regler zum Einsatz. Durch den Übergang zu Digitalreglern ist der Regelalgorithmus frei wählbar und, sein Verhalten besser an die dynamischen Gegebenheiten des zu regelnden Systems anpassbar. In diesem Modell kommt ein digitalisierter PID-Regler zum Einsatz. Die Abbildung erfolgt mit kausalen, zeitdiskreten Elementen.

2.4. A/D- und D/A-Wandler



Abb. 4: Modellierung von A/D-Wandlern, links mit einzelnen Bibliothekselementen, rechts mit modifizierten VHDL-AMS-Komponenten

Da, wie in Abschnitt 2.3 erläutert, ein Digitalregler zum Einsatz kommen soll, muss sowohl das Regelsignal digitalisiert werden, als auch das Stellsignal wieder von einer digitalen in eine analoge Größe gewandelt werden. In Abb. 1, rechts, sind die Wandlungspunkte markiert: Diskretisiert wird das Signal des Lageindikators, die digitale Regelstellgröße wird in eine Spannung gewandelt. Für die Modellierung kommen hier zwei verschiedene Ansätze infrage: Die Kombination eines Limiters um die Eingangsgröße beschränken zu können, eines Diskretisierers, mit dem die Auflösung eingestellt wird (bspw. hier 18bit) und eines Sample-and-Hold-Blocks, mit dem die zeitliche Diskretisierung erreicht wird (bspw. 10kSamples/s) (siehe Abb. 4, links). Alternativ kann ein VHDL-AMS-Block zum Einsatz kommen (siehe Abb. 4, rechts). Hier wird die zeitliche Diskretisierung durch ein Clock-Signal erreicht, die Auflösung wird auf Quellcode-Ebene modifiziert.

2.5. Spannungsgesteuerte Stromquelle

Zur Regelung der Waage werden Ströme benötigt, die größer sind als die, die der D/A-Wandler zu treiben vermag. Ein reiner Verstärker mit genügend Stromreserve würde die Dynamik des Systems massiv beschneiden, da der sich einstellende Strom durch die Induktivität verzögert würde. Da der Strom jedoch direkt die erzeugte Lorentzkraft vorgibt, ist hier eine hohe Dynamik erforderlich. Diese Forderung ist mit einer spannungsgesteuerten Stromquelle erfüllbar.

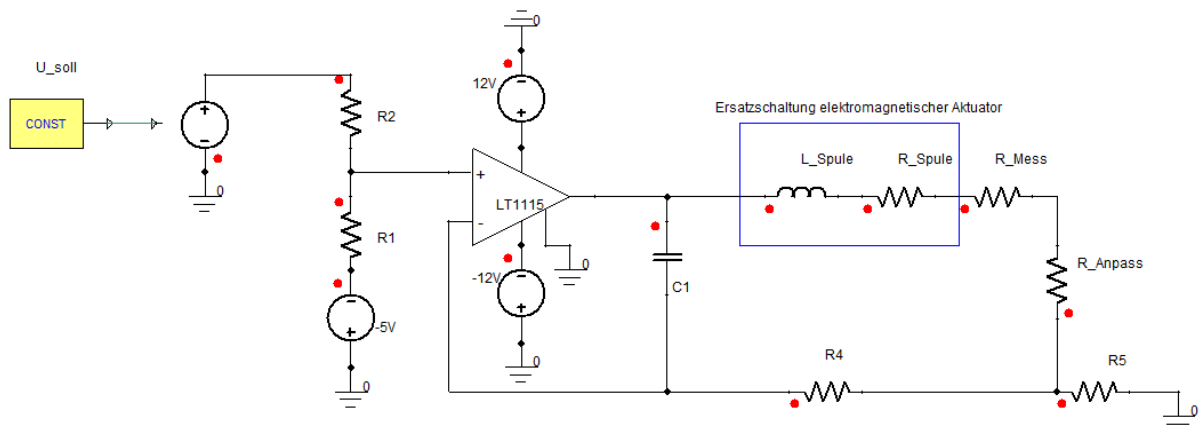


Abb. 5: Schaltplan der spannungsgesteuerten Stromquelle, blau umrandet: Ersatzschaltung für den elektrischen Teil des elektromagnetischen Aktuators

In ANSYS Simplorer ist es möglich, die vollständige Schaltung zu integrieren (siehe Abb. 5). Für Schaltungselemente wie den hier verwendeten Operationsverstärker existiert eine umfassende Bibliothek mit komplexeren und stärker abstrahierten Modellen, je nach Verfügbarkeit von Datenblattwerten/Messwerten und Simulationsziel.

2.6. Elektromagnetischer Aktuator

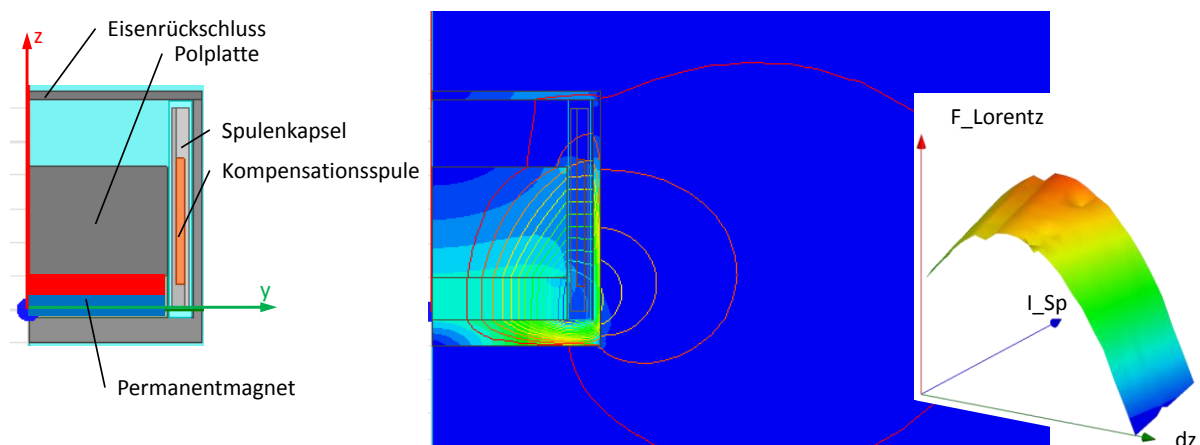


Abb. 6: Aufbau des Elektromagnetischen Aktuators (links), Verteilung der magnetischen Flussdichte B und der Feldlinien (Mitte), Lorentzkraft in Abhängigkeit des Spulenstroms und der Spulenposition (rechts)

Die erzeugte Lorentzkraft hängt von der geometrischen Konfiguration von Permanentmagnet, Polplatte und Eisenrückschluss ebenso wie von Materialparametern,

der Windungszahl und dem Durchmesser der Spule, dem aktuellen Spulenstrom und der Position der Spule im Luftspalt ab (siehe Abb. 6). Designziel ist es, alle Einflussparameter im Betrieb klein gegenüber dem Einfluss des Spulenstroms zu machen und eine möglichst lineare Kraft-Strom-Kennlinie zu erzeugen. Die Integration des mit ANSYS Maxwell gefundenen Designs in die Systemsimulation kann über zwei verschiedene Ansätze erfolgen: Per transienter Co-Simulation zwischen Simplorer und Maxwell oder durch Erzeugung eines ECE-Modells. ECE-Modelle stellen eine statische Kondensation in Form einer Lookup-Tabelle dar: In einem Versuchsplan werden Ströme und Positionen variiert sowie die resultierenden Kräfte und verketteten Flüsse mit aufgezeichnet. Das sich ergebende Modell beinhaltet Nichtlinearitäten (bspw. durch Sättigungseffekte), nicht jedoch transiente Effekte wie Wirbelströme. Einmal erzeugt, liefern ECE-Modelle in sehr kurzer Simulationszeit sehr gute Ergebnisse [6].

Besteht die Spulenkapsel aus einem leitfähigen Material, führt die Schwingung des Hebels zur Induktion eines Wirbelstroms in der Kapsel. Die resultierende Lorentzkraft wirkt der Bewegung entgegen und stellt eine erhebliche Dämpfung dar. In diesem Fall liefert ausschließlich die Co-Simulation korrekte Ergebnisse. Ist die Kapsel aus nicht leitfähigem Material bzw. geschlitzt, so dass sich keine Wirbelströme ausbilden können, ist das numerisch wesentlich günstigere ECE-Modell zu bevorzugen.

3. Systemmodell und Optimierung

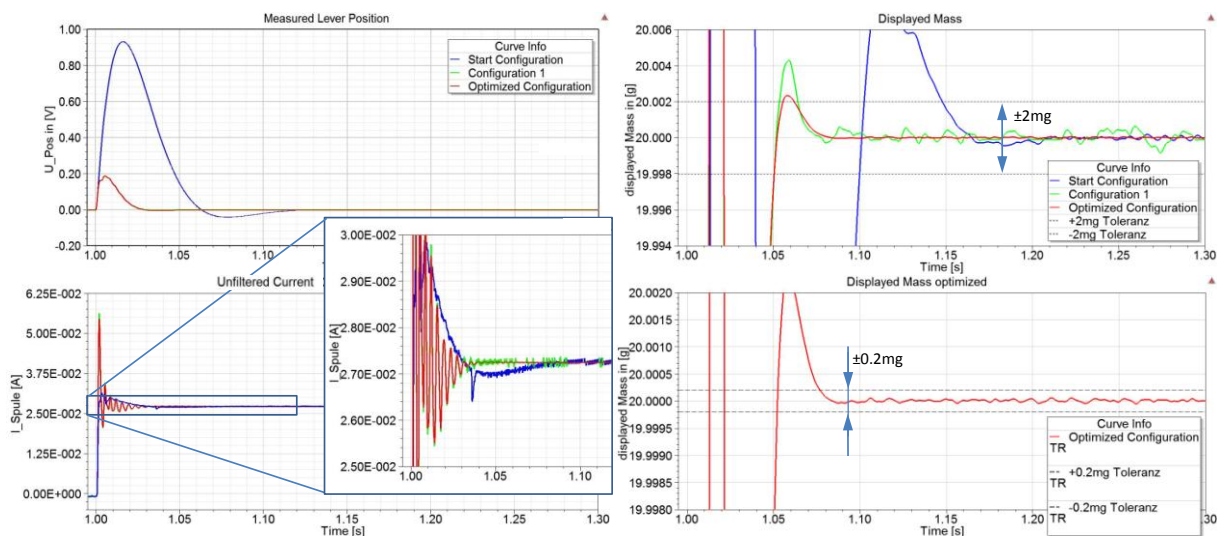


Abb. 7: Sprungartiger Lastwechsel von 20g. Oben links: Signal des Lageindicators, unten links: ungefilterter Spulenstrom, rechts: gefilterter Spulenstrom

Ziel der Systemsimulation ist hier die Komponenten der Waage so aufeinander abstimmen zu können, dass unter idealen Bedingungen und einem sprunghaften Lastwechsel von 20g ein Einschwingen des Messwertes in den Toleranzbereich um $\pm 0,2\text{mg}$ in unter 150ms erreicht wird. In der Ausgangskonfiguration schwingt der Massewert binnen 148ms in den Toleranzbereich von $\pm 2\text{mg}$ ein (siehe Abb. 7, oben rechts, blaue Kurve). Durch bloßes Hinzufügen einer weiteren Filterstufe kann das Ziel nicht erreicht werden, da damit die Messzeit zu lang wird. Erhöht man die Kapazität im invertierenden Zweig der spannungsgesteuerten Stromquelle (siehe Abb. 5),

wird deren Schwingungsneigung reduziert. Damit kann der Regler aggressiver dimensioniert werden, ohne dass Instabilitäten auftreten. Darüber hinaus wird der Aussteuerbereich der Stromquelle besser genutzt (siehe Abb. 7 unten links). Das ungefilterte Signal schwingt zunächst stärker, jedoch sind diese hochfrequenten Schwingungen gut filterbar. Durch eine zusätzliche Anpassung der Wandlungsbereiche der A/D- und D/A-Wandler sinkt das Quantisierungsrauschen erheblich. Das Großsignalverhalten von Lageindikator und Spulenstrom ändert sich nicht mehr wesentlich (siehe Abb. 7 oben u. unten links, rote und grüne Kurve) und die gewünschte Auflösung von $\pm 0,2\text{mg}$ wird mit den identischen Filtereinstellungen jedoch bereits nach 76ms erreicht (siehe Abb. 7 unten rechts). Durch Abstimmung der Komponenten aufeinander ist also eine Verzehnfachung der Auflösung bei einer Halbierung der Messzeit möglich.

4. Zusammenfassung

Die Modellierung aller Komponenten mit dem dafür jeweils besten Modellansatz und das Zusammenfügen in einem großen Gesamtmodell führen zu einem besseren Verständnis der komponentenübergreifenden Eigenschaften. Das vorgestellte Beispiel illustriert dies eindrucksvoll: Die bereits einzeln durchoptimierten Komponenten müssen im Gesamtsystem aufeinander abgestimmt werden, um ein ideales Systemverhalten zu erzielen.

Literatur

- [1] OpenModelica, <http://doc.modelica.org/om/Modelica.Mechanics.MultiBody.html>, 5. Februar 2018
- [2] ANSYS Electronics Online Help, Simplorer, Simplorer Online Help, Product Coupling, Simplorer Coupling, ANSYS RBD Components, 01/2018
- [3] ANSYS Help, Mechanical APDL 19.0, Mechanical APDL Theory Reference, 15.6. Substructuring Analysis, 01/2018
- [4] Hatch, Michael R., Vibration Simulation Using MATLAB and ANSYS, Kapitel 7, Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, Kapitel 7, 2001
- [5] Christian Diethold, "High precision optical sensor for electromagnetic force compensated balances" Proceedings IMEKO 2010 TC3, TC5 and TC22, Pattaya, Thailand, <http://www.imeko.org/publications/tc3-2010/IMEKO-TC3-2010-022.pdf>, 2010
- [6] ANSYS Electronics Online Help, Maxwell, Maxwell Online Help, Exporting Equivalent Circuit Data, 01/2018

Kontakt

Dr.-Ing. Hanna Baumgartl
CADFEM GmbH
Am Markt 2
85567 Grafing bei München
hbaumgartl@cadfem.de