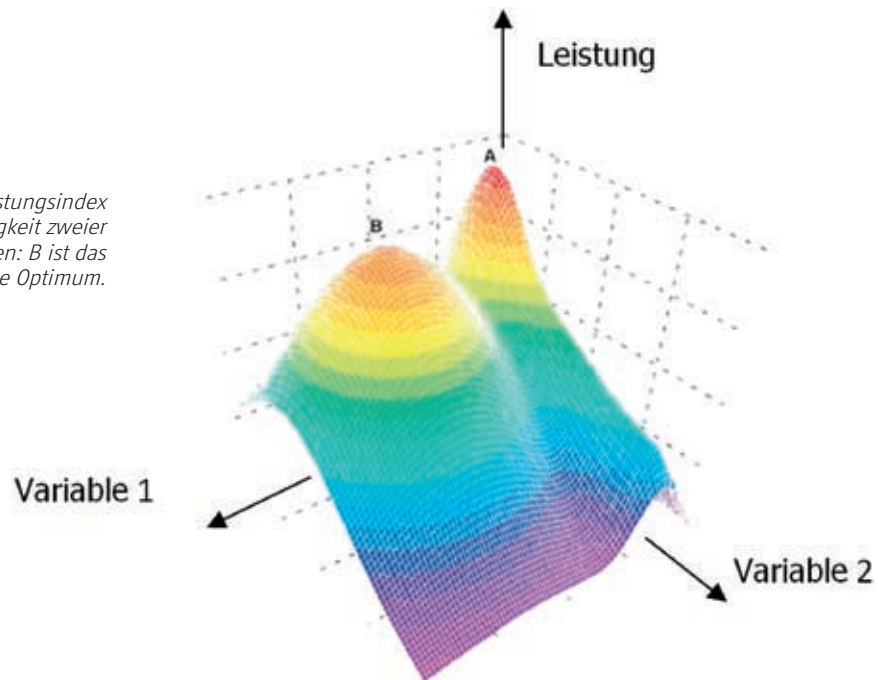


# Optimierung von Leistungsschaltern bei ABB

Dr. Sami Kotilainen<sup>1</sup>, Dr. Ryan Chladny<sup>2</sup>, Dr. Luca Fuligno<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>ABB Schweiz, <sup>2</sup>ABB Corporate Research Deutschland, <sup>3</sup>Enginsoft Italien

Bild 1: Leistungsindex in Abhängigkeit zweier Variablen: B ist das robuste Optimum.



**Z**iel eines jeden ingenieurwissenschaftlichen Entwicklungsprozesses ist es, eine Lösung zu finden, die Leistungsverbesserungen unter der Einhaltung mehrerer Nebenbedingungen garantiert trotz gegebener betrieblichen Unsicherheiten und Fertigungstoleranzen. Da dieses Ziel häufig in extrem kurzen Entwicklungszeiten erreicht werden muss, sind sowohl extensives Prototyping als auch experimentelle Prüfungen eingeschränkt, ganz zu schweigen von hohen Kosten, die durch etwaige Rückrufaktionen verursacht werden könnten. Der hier vorgestellte Lösungsweg setzt auf die intensive Nutzung von Computer Aided Engineering (CAE) Modellen durch deren automatisierte Integration in Simulations- und Optimierungssoftware (Mode Frontier) ermöglicht wird, eine Robustheitsanalyse bereits in den frühen Stadien des Entwicklungsprozesses einzubinden.

Zieht man einen generischen Entwicklungsprozess in Betracht, in dem der Leistungsindex, der hier in stark vereinfachter Form von nur zwei Variablen (Variable 1 und 2) abhängt, maximiert werden soll, kann das physische Verhalten des Produkts durch mehrere CAE Simulationen untersucht werden. Resultate können dann wie in Bild 1 dargestellt werden, wobei A und B als optimale Lösungsmöglichkeiten infrage kommen. Obwohl Lösung A eine Topleistung garantiert, lässt sich erkennen, dass die Lösungsumgebung durch einen steilen Abfall geprägt ist. Demnach führen kleine Variationen in Variable 1 und 2 bereits zu starkem Leistungsabfall. Dieser Fall kann leicht eintreten, wenn die Parameter von Fertigungstoleranzen oder betriebsbedingten Unsicherheiten abhängen. Im Gegensatz dazu ist B ein robustes Optimum, weil die Leistungsfunktion in B viel flacher (stabiler) verläuft und damit wesentlich weniger sensibel auf Parameterschwankungen reagiert. Die Suche nach einer solchen Lösung wird Robust Design Optimization genannt.

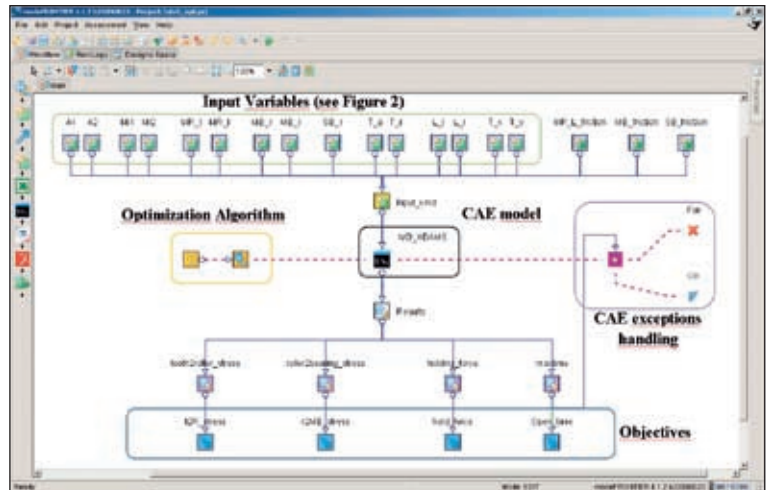
Dieser Artikel präsentiert eine innovative Robust Design Optimization für Leistungsschalterkomponenten. Das numerische Modell solcher Geräte enthält 15 variable Hauptpara-

meter, wobei simultan vier Leistungsindizes unter Berücksichtigung mehrerer Nebenbedingungen untersucht werden. Alleine eine Lösung zu finden, die alle Nebenbedingungen erfüllt und dabei akzeptable Leistungen erzielt, ist ein langwieriger Prozess. Dies hat zur Folge, dass mehrfach wiederholte numerische Simulationen benötigt werden, die häufig einem willkürlichen und ineffizienten Trial-and-error Prozess ähneln. Die Optimierungssoftware Mode Frontier rationalisiert und beschleunigt diesen Prozess einschließlich der Suche nach robusten Lösungen. Der Entwicklungsingenieur kann sich damit auf die Analyse der Resultate konzentrieren und ist dadurch in der Lage, eine fundierte Lösungsentscheidung zu treffen.

Leistungsschalter erfüllen mehrere Funktionen wie beispielsweise die Leitung des Nennstroms im geschlossenen Zustand (im Bereich mehrerer tausend Amperes), das Haltern der Maximalspannung im geöffneten Zustand (bis zum Megavoltbereich), das Öffnen und Schließen bei Betriebs- und kleinen Überlastströmen und vor allem die Unterbrechung des Stromkreises bei Überlastung oder Kurzschlussbedingungen (effektive Stromwerte bis 80kA). CAE-Modellierungs- und Simulationstechniken werden bereits zu Beginn des Designprozesses angewandt. Zum Einen repräsentiert die Schwierigkeit der simultanen Erfüllung aller Anforderungen bei der Vielfalt der Parameter ein Nadelöhr. Zum Anderen ist die Entwicklung einer robusten Konfiguration hinsichtlich geringer Anfälligkeit bezüglich der externen Parameter sowie Fertigungstoleranzen zwingend. Die hier verwendete Lösung integriert die CAE Modelle in einer Optimierungssoftware mit dem Vorteil der Prozessautomatisierung und den Fähigkeiten der Robust Design Optimization. Ein entscheidender Faktor in einem Leistungsschalter ist das Antriebssystem, das die Energie für den Betrieb des Leistungsschalters speichert, einschließlich der mechanischen Bewegungen, die durch ein externes Regelungssystem ausgelöst werden. Essenziell für die Antriebseinheit eines jeden Leistungsschalters ist die Möglichkeit, die gespeicherte Energie in einer kontrollierten, wiederholbaren und robusten Weise freizusetzen. Dies wird typischerweise durch einen spezialisierten mechanischen Schalt- beziehungsweise Klinkmechanismus erreicht, der als Schnittstelle zwischen einem elektromagnetischen Hochgeschwindigkeitsaktuator und einem Element des Leistungsschalters dient.

Der ebene Mechanismus ist aus fünf Hauptelementen zusammengesetzt, dem Antriebszahn (drive tooth), zweier zentral befestigter Lager (Main- und Second Bearing), einem

Rollkörper (Main Roller), der sich mit dem Antriebszahn und dem Hauptlager in Kontakt befindet, sowie einem Verbindungshebel, der mit einem Drehgelenk an der Hauptrolle befestigt ist und über seine Oberfläche mit dem zweiten Lager Kontakt hat. Der Mechanismus wird einzig von dem Antriebszahn betrieben und durch Entfernung der Haltekraft (Holding Force) gelöst. Die kritischen Leistungskriterien des Mechanismus sind die Auslösezeit, die Wiederholbarkeit, der Kraft-Reduktionsquotient (driving



force / holding force) und die minimalen Auslöseparameter (Kraft und Verschiebung), wovon die Auslösezeit und der Kraft-Reduktionsquotient die wichtigsten Parameter sind. Um die Auslösezeit (und Kontaktspannung) zu minimieren, ist ein Antriebszahn mit einem unmittelbar variablen Kontaktradius wünschenswert. Zum Zwecke der Optimierung wurde das Profil mit einer elliptischen Form parametrisiert. Ein numerisches Mehrkörpermodell des Klinkmechanismus wurde in der Simulationssoftware MD Adams zur Berechnung der mechanischen Leistung erstellt unter Berücksichtigung aller 13 Winkel- und Längenvariablen, wie in dargestellt, sowie zweier zusätzlicher Parameter zur Beschreibung der Größe der Hauptrolle und des Hauptlagers. Das Modell beinhaltet außerdem Einschränkungen durch Kerben (slot constraints), Herz'sche Linien-Kontaktspannungen, kinematische Kollisionsberechnungen sowie die Extrahierung der Leistungsgrößen. Um die Parametrisierung zu vereinfachen und die Lösungszeit zu beschleunigen wurde die Wechselwirkung zwischen Körpern und Kerben mit curve-to-curve Kontakten modelliert. Zusätzlich wurde jegliche Wechselwirkung des Antriebs (z. B. downstream transmission dynamics) vernach-

*Bild 2: Der Arbeitsfluss der Software Mode Frontier repräsentiert den automatisierten Optimierungsprozess, in dem der Klinkmechanismus mittels eines numerischen Mehrkörpermodells in MD Adams integriert ist.*

## Optimierungssoftware verbindet Prozessautomatisierung mit Robust Design Optimization

lässigt. Unter diesen Bedingungen betrug die Zeit für eine einzelne Simulation knapp unter sieben Sekunden auf einem Standard PC.

Das entwickelte dynamische, parametrische MD Adams Simulationsmodell wurde mit dem Softwarepaket Mode Frontier gekoppelt, um die Parameterstudie zu automatisieren und die robuste Optimierung der Leistung der Haltekraft und des Klinkmechanismus durchzuführen. Die erste Phase dieses Prozesses ist die Erstellung des Arbeitsflusses (»workflow«). Der Arbeitsfluss repräsentiert den Ablauf der zu automatisierenden Berechnungsschritte um realisierbare Parameterkombinationen zu finden. Die unabhängigen Parameter (Input Variablen) definieren einen 15-dimensionalen Lösungsraum (Haftungs- und Kontaktparameter wurden zunächst als konstant angenommen). Sechs unabhängige Zielfunktionen, die jeweils simultan minimiert werden sollen, beinhalten die Öffnungszeit des Klinkmechanismus, die Haltekraft und die Kontaktspannungen zwi-

ebenfalls wertvolle Informationen über die Signifikanz und den Einfluss einzelner Parameter auf die Leistungslösung lieferten. Dieses Abtasten des Lösungsraumes (»Design Of Experiments«, DOE) wurde in Mode Frontier mit einem »Sobol«-Algorithmus (quasi-random Algorithmus) durchgeführt. Die Resultate wurden von Mode Frontier in einer einfachen Tabelle zusammengefasst und ausgewertet: Nur 1.700 der ursprünglich 10.000 Designs waren kinematisch plausibel. In diesem Unterraum erfüllten nur 15 Lösungen die relativ strikt gewählte Öffnungszeit, Haltekraft und Kontaktspannungsbedingungen. Dieses Ergebnis allein bestätigt die Schwierigkeit der Findung praktikabler Designlösungen mittels einfacher Techniken, wie beispielsweise DOE, sowie die im Grunde komplette Unmöglichkeit der Lösung solcher Probleme mit traditionellen »trial-and-error« Methoden. Anstatt solcher Methoden ist ein Konstrukteur auf anspruchsvolle Lösungsansätze wie etwa

Optimierungsalgorithmen angewiesen. Aufgrund dieser Überlegungen wurden im Folgeschritt die 15 besten Lösungskonfigurationen als erste Population in einem Genetischen Algorithmus in Mode Frontier (Moga II) weiterverwendet, wobei dieser Schritt automatisch durch die Wahl einer Option im Arbeitsfluss (Bild 2) erreicht werden konnte. Moga II imitiert den Vorgang der biologischen Evolution und ermöglicht die Konzentration der Lösungssuche auf die vielversprechendste Art (Lösung), die sich am Besten den Umgebungsanforderungen (Zielfunktion und Nebenbedingungen) anpassen kann. Das Ergebnis dieser Optimierungslösung ist in Bild 3 illustriert, in

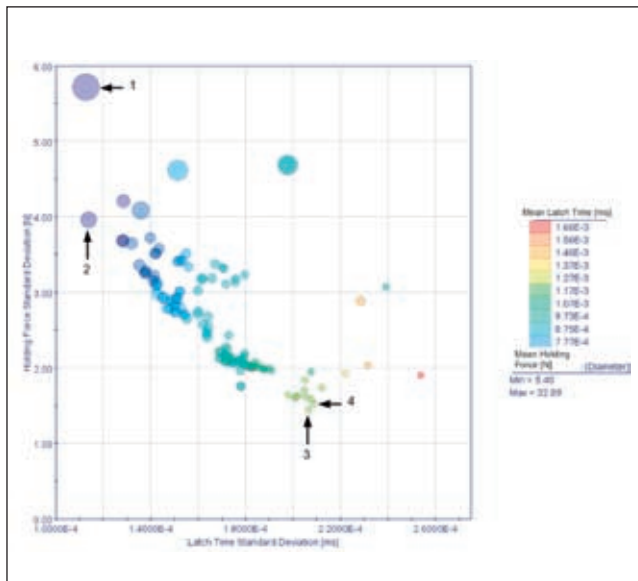


Bild 3: Resultate der Moga-II Minimierung für die Standardabweichung der Haltekraft und Schaltzeit unter Einfluss der jeweiligen Bedingungen für Mittelwerte und Spannungen.

schon dem Antriebszahn und der Hauptrolle, zwischen Hauptrolle und Hauptlager sowie zwischen Sekundärer Rolle und Hauptlager. Drei Nebenbedingungen wurden eingearbeitet einschließlich einer maximalen Haltekraft, einer maximalen Ansprechzeit und einem maximalen Kontaktdruck.

Aufgrund der relativ schnellen Simulationszeit und der durch Mode Frontier komplett automatisierten MD Adams Simulationen, einschließlich der Berechnung des Leistungsindex, konnte eine Studie zur Berechnung von 10.000 Lösungen innerhalb eines halben Tages erstellt werden. Um den gültigen Lösungsraum zu untersuchen wurden zunächst große Parameterspannen berücksichtigt, die

dem die Achsen die beiden zu minimierenden Hauptzielfunktionen darstellen. Jeder Punkt in dieser Grafik entspricht einer CAE Lösung. Diese Optimierungsrechnung hat erfolgreich mehrere vielversprechende Lösungen produziert, die die Designbedingungen erfüllen (schwarze Punkte) und die verschiedenen Zielkonflikte zwischen den vier Zielfunktionen simultan darstellen. Alle diese Punkte gehören zu der sogenannten »Pareto Frontier«, die eine Lösungsmenge von Optima in Abhängigkeit mehrerer Zielfunktionen enthält. An diesem Punkt kommt das Konzept der Robust Design Optimization zum Zuge. Die Standardoptimierung bei multiplen Zielfunktionen hat eine Vielzahl an Lösungsmöglich-

keiten produziert, was an sich bereits ein sehr gutes Resultat ist, wenn man die Komplexität der Lösungsfindung berücksichtigt. Aus dieser Menge an Optima kann ein Entwickler dank der Möglichkeiten des Daten Clusterings (unter Berücksichtigung der Zielkonflikte) leicht die diverseste Lösung hinsichtlich der Input Parameter wählen. Die grün hervorgehobenen Lösungen repräsentieren die optimalen Designlösungen der Aufgabe, allerdings noch ohne Informationen zu deren Leistungs-Stabilität.

Diese zehn Lösungen sollen demnach nun mit einem weiteren Durchlauf des Moga II Optimierungsalgorithmus untersucht werden, wobei die Stabilität (Robustheit) als zusätzlich als Ziel formuliert wird. In der Robust Design Optimization werden die deterministischen Leistungswerte durch deren Mittelwerte mit Standardabweichung ersetzt und können dann separat optimiert werden. Das Verhalten der Input Parameter  $A1$ ,  $MR_r$ ,  $L_l$ ,  $L_r$ ,  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  (siehe Bild2) wird dabei als stochastisch normal verteilt angenommen und verursachen somit die gewünschten Leistungsunsicherheiten. Zusätzlich wurde angenommen, dass die drei Drehgelenke mit gleich verteilten Reibungswerten variieren. Alle übrigen Variablen wurden weiterhin als deterministisch angenommen. Die Größe der stochastischen Abtastmenge sollte groß genug sein, um die statistische Aussagekraft der Resultate garantieren zu können, muss diese Aufgabe aber innerhalb zeitlicher Grenzen berechnen können.

Tatsächlich benötigt Robust Design Optimization im Allgemeinen eine nicht-triviale Berechnungszeit, auch wenn die einzelnen Simulationszeiten kurz sind, da jede einzelne Lösung mehrfach berechnet werden muss, um statistisch signifikante Abschätzungen der Outputparameter zu erzielen. Aus diesem Grund wurde in Mode Frontier ein relativ kleiner »Latin Hyper-cube« mit 50 Designs für die stochastischen Inputs gewählt. Mit diesem ist es bereits mit wenigen Stichproben möglich, die Multi-dimensionale Normalverteilung recht genau anzunähern. Auf der anderen Seite ist ein fortgeschrittenes »Polynomial Chaos« Expansionschema verfügbar, um die Genauigkeit hinsichtlich der Mittelwerte und Standardabweichung der Outputverteilungen zu verbessern. Nach 150 deterministischen Optimierungsschritten sind mehrere Lösungen mit reduzierten Schaltzeiten sowie kleineren Standardabweichungen für die Haltekraft gefunden worden, die dennoch alle Ziel- und Nebenbedingungen erfüllen. Bild 3

illustriert mittels einer Blasengrafik alle Ziel-Standardabweichungen und Mittelwerte.

Die Designlösungen eins bis vier sind aufgrund ihrer jeweiligen Position mit minimalen Standardabweichung und Mittelwert in Schaltzeit beziehungsweise Haltekraft hervorgehoben. Design zwei war bereits in der ersten Population des Moga II Algorithmus als Resultat der vorhergehenden rein deterministischen Optimierung enthalten. Lösungen wie diese vier Konfigurationen des Klinkmechanismus sind robuste Lösungen die signifikant zur Weiterentwicklung des Leistungsschalters beitragen. Dieser Artikel illustriert den Prozess und die Vorteile der Integration der Optimierungsrechnung mit mehreren Zielfunktionen mittels Verlinkung der Berechnungsmodelle in die frühen Stadien der Produktentwicklung einschließlich der Robustheitsanalyse. In dem hier behandelten Fall stellte bereits das Finden einer Lösung, die alle Ziel und Nebenbedingungen bei akzeptabler Leistung erzielt, eine Herausforderung dar. Mode Frontier erreichte diese anspruchsvollen Ziele innerhalb einer angemessenen Zeitspanne und ermöglichte den ABB-Entwicklungsingenieuren damit die Konzentration auf die Ergebnisanalyse und damit die Möglichkeit objektiver Entscheidungen bezüglich der Zielkonflikte. Außerdem ist die Suche nach robusten Designlösungen eingeschlossen, ein Konzept, das besonders in der Entwicklung von Systemen im Bereich der öffentlichen Sicherheit oder für kritische Fragestellungen in der Infrastruktur zum tragen kommt, beispielsweise beim Antrieb eines Hochspannungs-Leistungsschalter.

Eine letzte Bemerkung sollte im Falle von Entwicklungsprozessen bezüglich der Robust Design Optimization gemacht werden, die längere Simulationszeiten der numerischen Modelle erfordern: Mode Frontier besitzt ebenfalls die Möglichkeit, Response Surface Models durch genaue Interpolation vorhandener Simulationsdaten zu berechnen und damit langwierige Simulationen durch beinahe unmittelbare Lösungsvorhersagen zu ersetzen. Das ermöglicht damit die Robustheitsanalyse ebenfalls für Simulationsmodelle mit langer Rechenzeit.

–sg–

*Weitere Informationen*

*EnginSoft GmbH: [www.enginsoft.com](http://www.enginsoft.com), ABB: [www.abb.com](http://www.abb.com)*

*MD Adams ist ein Product der MSC Software Corporation, [www.mscsoftware.com](http://www.mscsoftware.com)*

*EnginSoft GmbH, Frankfurt/Main*

*Tel. 069/6640883-0, <http://germany.enginsoft.com>*

**Die Konzentration auf die Ergebnisanalyse erlaubt objektivere Entscheidungen**