

# Probabilistische Optimierung am Beispiel eines Magnetantriebes

Dr. The-Quan Pham  
[info@optiy.de](mailto:info@optiy.de)  
OptiY e.K.  
Glattbacher Str. 78 / 63741 Aschaffenburg

Dr. Alfred Kamusella  
[alfred.kamusella@tu-dresden.de](mailto:alfred.kamusella@tu-dresden.de)  
Institut für Feinwerktechnik und Elektro-Design, TU Dresden

## Kurzfassung

Probabilistische Analyse und Optimierung berücksichtigen Unsicherheiten und Streuungen von Eigenschaften technischer Systeme. Stand der Technik ist die Monte Carlo Simulation. Diese ist aber mit solch hohem Rechenaufwand verbunden, dass eine Optimierung damit meist unmöglich wird. Eine vor kurzem entwickelte Methode der Statistischen Versuchsplanung wurde in das Programmsystem OptiY implementiert. Dieses moderne Tool ermöglicht nun eine multidisziplinäre probabilistische Analyse und Optimierung von unterschiedlichsten Simulationsmodellen. Damit können die Systemzuverlässigkeits- und Robustheitsbewertung frühzeitig während der Entwurfsphase durchgeführt werden, was zu besserer Produktqualität und einer Senkung der Entwicklungskosten führt. Am Beispiel eines Magnetantriebes für einen Brailleschrift-Präger wird die Anwendung anschaulich beschrieben.

## 1 Einleitung

Eigenschaften technischer Systeme streuen in der Realität. Durch Prozessunsicherheit, Fertigungsungenauigkeit, Umgebungseinflüsse, Alterung und Verschleiß bleiben die Systemparameter und Eingangsgrößen nicht konstant, sondern sind toleranzbehaftet. Das kann zu starken Schwankungen des Systemverhaltens und damit zum Versagen führen. Diese Problematik ist in ihrer Komplexität in der Entwurfsphase sehr schwierig zu erfassen und tritt oft erst in der Serienfertigung und im Einsatz zu Tage.

Bei der Monte-Carlo-Simulation werden die Streuungen des Systemverhaltens durch Zufallszahlen abgebildet [4][5]. Die Nachteile dieses statistischen Verfahrens liegen in dem riesigen Rechenaufwand und in den verrauschten Gütekriterien des Optimierungsmodells, so dass numerische Optimierungen meist unmöglich sind. Moderne analytische Verfahren können die Toleranzsimulation mit bedeutend weniger Modelldurchrechnungen durchführen und liefern glattere Zielfunktionen. Dies ermöglicht die Toleranz-Analyse und -Optimierung beim Systementwurf bereits auf einem Arbeitsplatz-PC.

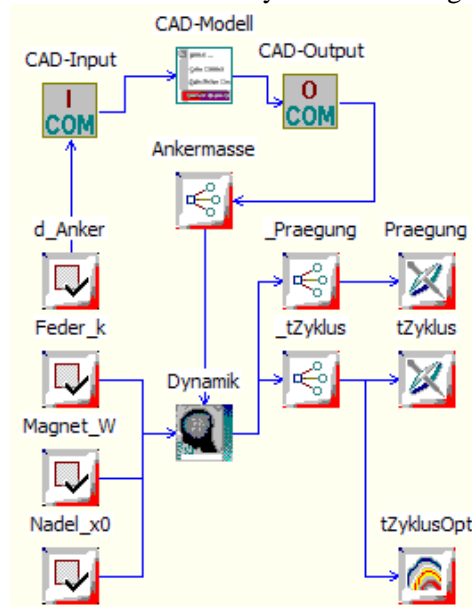
Die Parameter-Nennwerte eines Elektro-Magneten kann man mit dem Ziel eines möglichst schnellen Arbeitstaktes optimieren. Führt man mit den optimierten Nennwerten

jedoch anschließend eine Toleranzanalyse durch, so wird die Versagenswahrscheinlichkeit bei ungefähr 50% liegen. Das zeigt die Grenzen für den "optimalen" Entwurf mit der klassischen Nennwert-Optimierung. Erst durch Einbeziehung der wesentlichen Toleranzgrößen gelangt man zu einer funktionsoptimalen Lösung, die gleichzeitig robust und zuverlässig ist.

## 2. Analyse- und Optimierungstool OptiY

OptiY ist ein multidisziplinäres Analyse- und Optimierungsprogramm, welches modernste Optimierungsstrategien und state of the art Algorithmen zur Toleranzanalyse, Sensitivitätsanalyse, Robustheitsbewertung, Zuverlässigkeitsanalyse und Approximation bereitstellt [1]. Die Modelle, auf deren Basis die Optimierung erfolgen soll, werden dabei als Blackbox mit Ein- und Ausgangsgrößen betrachtet. Damit ist es ein offenes System für unterschiedlichste Modellklassen. Die theoretischen Grundlagen für das Programm sind in einer Dissertationsarbeit [2] erarbeitet und kontinuierlich weiterentwickelt worden.

OptiY stellt universelle und direkte Schnittstellen bereit. Damit lassen sich verschiedene CAD/CAE-Systeme (z.B. Pro/E, ANSYS, Matlab/Simulink, Fluent, Excel, SimulationX, ITI-SIM, Dymola ...), aber auch hausinterne Software mittels eines grafischen Workflow-Editors anbinden und in eine umfassende Systemanalyse integrieren. OptiY bietet dafür eine einheitliche grafische Oberfläche. Man arbeitet dabei mit einer Prozess-Kette zur Simulation und Optimierung von komplexen Systemen, wobei die Verkettung zwischen den einzelnen Systemen beliebig ist (Bild 1).



**Bild 1:** Prozess-Integration von OptiY

Bei der Produktentwicklung komplexer Systeme müssen die Produkteigenschaften verschiedene Bedingungen erfüllen, die durch unterschiedliche Versuche auf Funktionserfüllung geprüft werden. Um diese Entwicklungsprozesse virtuell zu

realisieren, bietet OptiY die multidisziplinäre Simulation und Optimierung von verschiedenen Simulationsmodellen an. Ein Simulationsmodell im Bild 2 entspricht einem Versuch (z.B. statische Festigkeit, Schwingungsfrequenz, Wärmeproblem usw.).

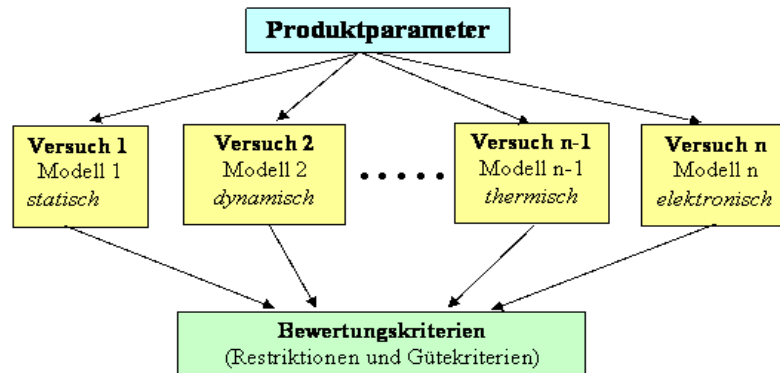


Bild 2: multidisziplinäre Analyse und Optimierung

### 3. Nennwert-Optimierung und Toleranzanalyse

Zur Simulation der Antriebsdynamik wird das Programm SimulationX der Firma ITI GmbH Dresden genutzt. In seiner detailliertesten Ausbaustufe enthält das Simulationsmodell neben der Mechanik und dem Magnetkreis auch die Ansteuer-Elektronik und berücksichtigt die Erwärmung der Spule. Für die Geometrie- und Stoff-Parameter wird die abstrahierte Struktur in Bild 3 zugrunde gelegt.

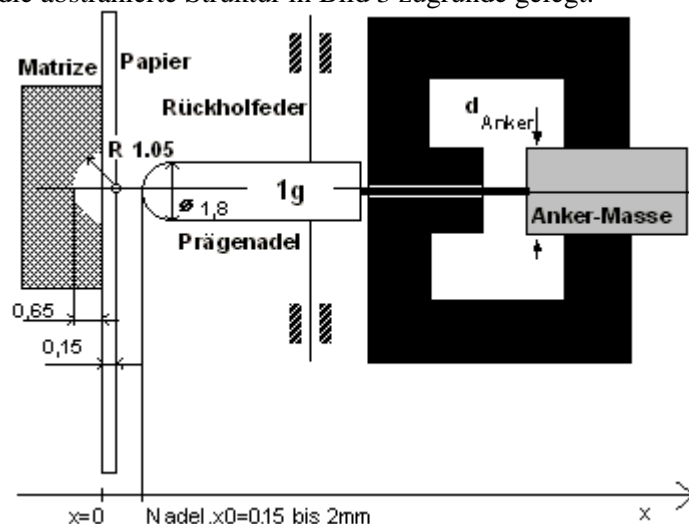


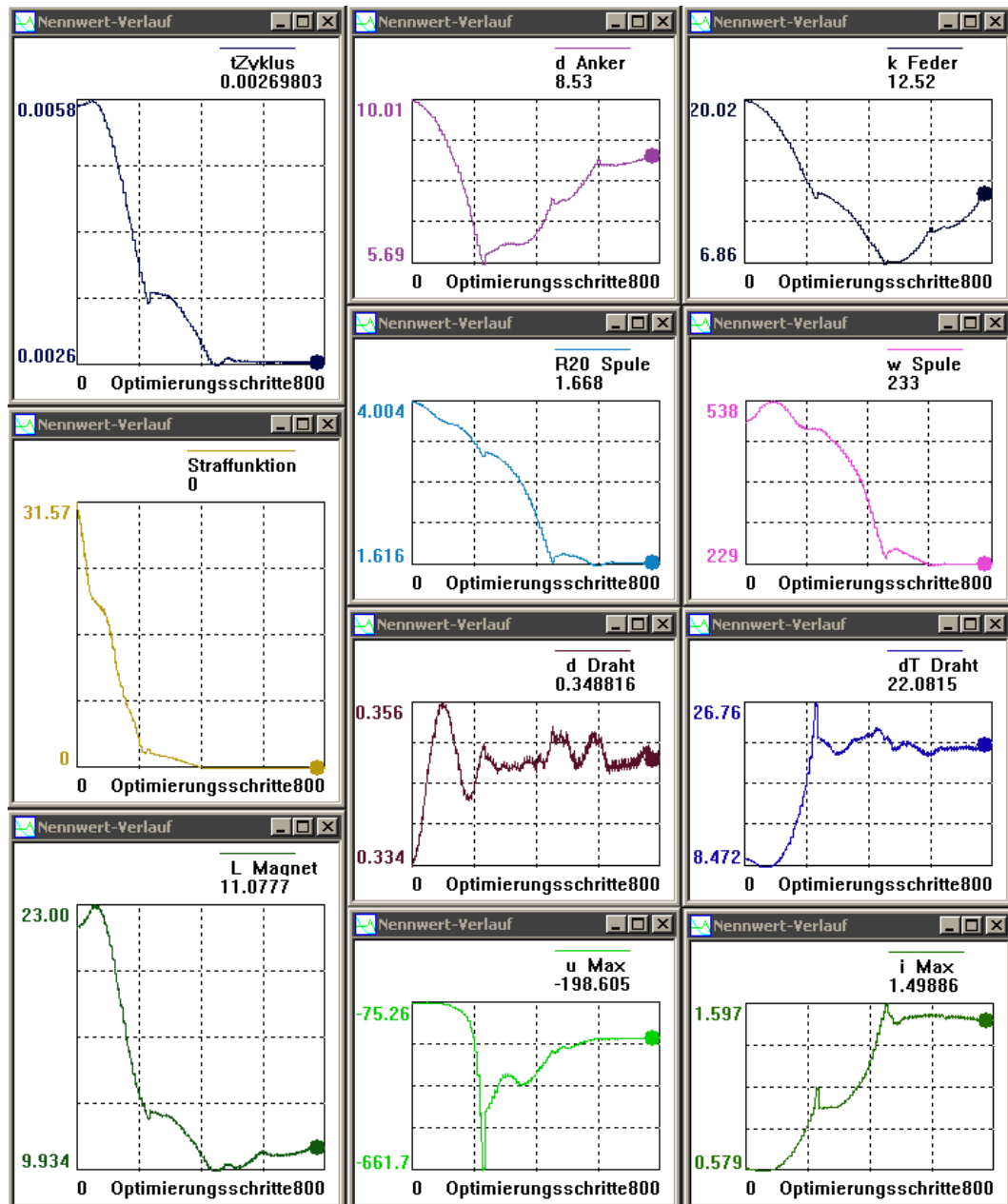
Bild 3: Abstrahierte Struktur des Magnet-Antriebs

Bei der Bewertung des Antriebsverhaltens werden folgende Größen berücksichtigt:

- *t*Zyklus – Zeit für einen Prägezyklus
- *Praegung* – Maß für den maximalen Nadel-Vorschub (0 bis 1)
- *i*Max – Maximalwert des Spulenstroms

- $v_{Max}$  – Maximalwert der Spulenspannung (beim Abschalten!)
- $dT_{Spule}$  – Erwärmung der Spule im Dauerbetrieb
- $L_{Magnet}$  – Einbaulänge des Magneten

Die Nennwert-Optimierung mit dem Ziel einer möglichst kurzen Zeit pro Prägezyklus spezifiziert die grundlegenden Abmessungen und Bauteil-Parameter des Magneten in Hinblick auf ihre Nennwerte (Bild 4).



**Bild 4:** Verlauf der Nennwert-Optimierung

Eine Toleranzanalyse mit dem Verfahren der Second Order Analysis verdeutlicht die Schwäche derartiger Nennwert-Optimierung, indem sie eine Versagenswahrscheinlichkeit von ungefähr 50% zeigt (Bild 5).

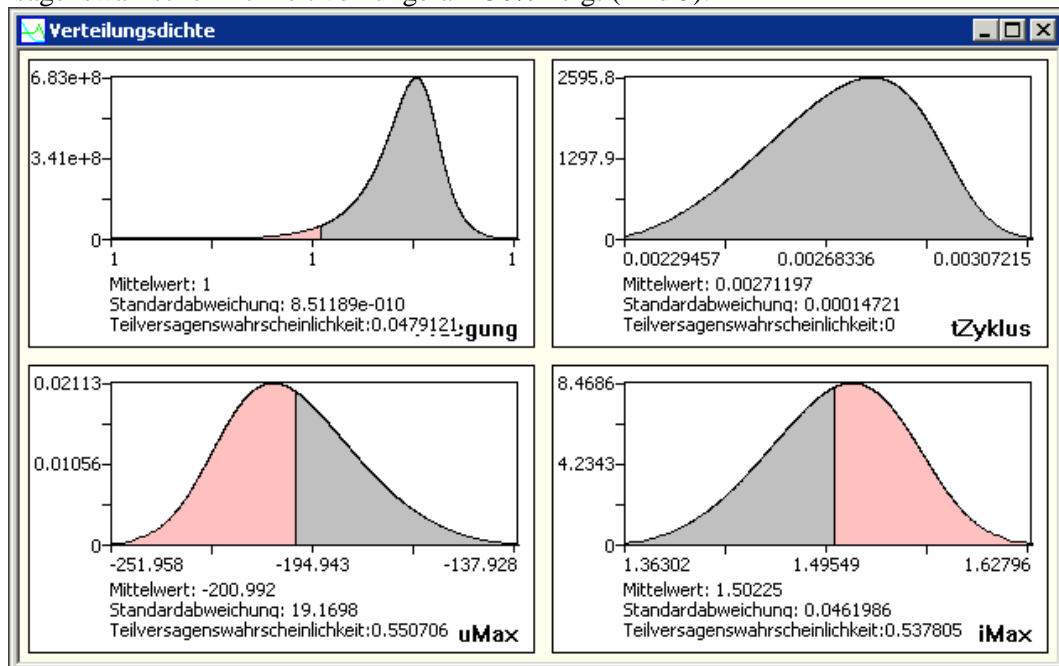


Bild 5: Toleranz-Analyse mit Versagenswahrscheinlichkeit

#### 4. Probabilistische Optimierung

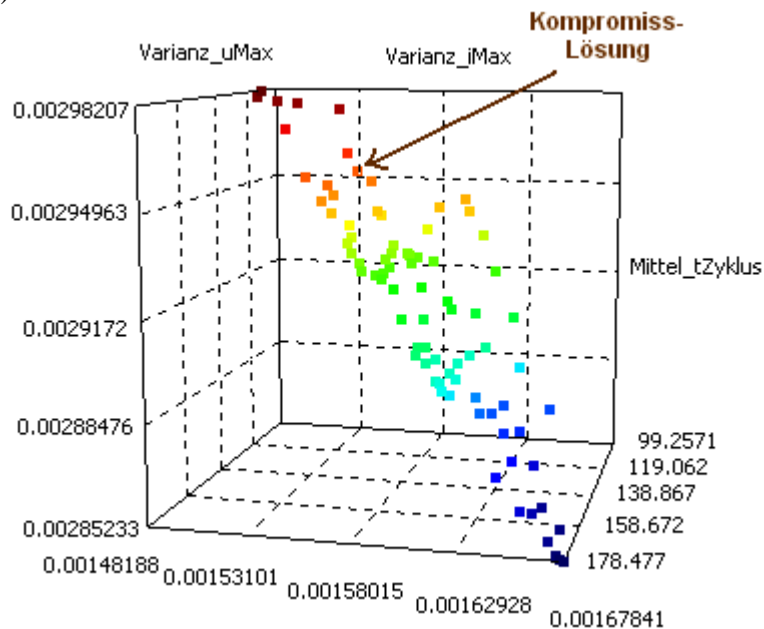
Einen Ansatz für eine zuverlässige Lösung bietet die Robust-Optimierung:

- Streuungen der Modellparameter sollten nur zu einer kleinen Streuung der Ergebnisgrößen führen. D.h. zum Beispiel, die Streubreiten von Abschaltspannung und Maximalstrom sind zu minimieren.
- Alle anderen, bereits definierten Forderungen (Restriktionen) sollen innerhalb des Streubereichs der berücksichtigten Toleranzgrößen eingehalten werden.
- Ein Prägezyklus soll trotzdem möglichst schnell erfolgen (Mittelwert über eine Stichprobe!).
- Die Toleranzen sind durch die Herstellung und die Einsatzbedingungen meist vorgegeben. Durch vorherige Analysen beschränkt man sich auf die wesentlichen Toleranzgrößen, z.B.:
  - Schwankungen der Betriebsspannung
  - Fertigungstoleranzen der Rückholfeder
  - Unterschiedliche Papiersorten

Gesucht werden verbesserte Nennwerte für die Modell-Parameter, welche obige Kriterien möglichst gut erfüllen. Es handelt sich hierbei um ein typisches Problem der

Mehrkriterienoptimierung, da die einzelnen Gütekriterien sich zumindest teilweise widersprechen.

Als Ergebnis der probabilistischen Optimierung kann man auf Grundlage der berechneten Pareto-optimalen Lösungsmenge eine geeignete Kompromisslösung wählen. Im Beispiel wurde besonderer Wert auf eine geringe Streubreite der Abschaltspannung gelegt (Bild 6).



**Bild 6:** Pareto-Menge der „Robusten Magnet-Antriebe“

Der Gesamtprozess dieser Antrieboptimierung ist [3] detailliert beschrieben.

## 5. Literatur

- [1] *Pham, T-Q.*: OptiY- Demo und Dokumentation; Software Version 2.2, OptiY e.K. 2006, [www.optiy.de](http://www.optiy.de)
- [2] *Pham T-Q.*: Modellierung, Simulation und Optimierung toleranzbehafteter Mechanismen in der Feinwerktechnik. Verlag Mainz, Wissenschaftsverlag, Aachen 1998.
- [3] *Kamusella, A.*: Simulation und Optimierung eines Magnetantriebes; Institut für Feinwerktechnik und Elektronik-Design, TU Dresden 2006, [www.ifte.de](http://www.ifte.de)
- [4] *Streilein, T; Hillmann, J.*: Stochastische Simulation und Optimierung am Beispiel VW Phaeton; VDI-Tagung "Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau", Würzburg 2002
- [5] *Koch, N.P.; Wujek, B.; Golovidov, O.*: A Multi-stage, parallel Implementation of Probabilistic Design Optimization in an MDO Framework; 8th Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, September 2000, CA