

Informationen zu den Referenten:

Dr.-Ing.

The-Quan Pham



Studium und Promotion

Technische Universität Dresden, Deutschland

- Elektrotechnik
Feinwerktechnik

Berufliche Karriere

Robert Bosch GmbH, Bühl, Deutschland

- Kfz-Ausrüstung, Fensterhebermotoren

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Oberpfaffenhofen, Deutschland

- Institut für Robotik und Mechatronik

Siemens AG, Babenhausen, Deutschland

- Siemens VDO Automotive, Information Passenger Cars

Dr.-Ing.

Alfred Kamusella



Studium und Promotion

Technische Universität Dresden, Deutschland

- Elektrotechnik
Feinwerktechnik

Berufliche Karriere

Technische Universität Dresden, Deutschland

- Institut für Feinwerktechnik und Elektronik-Design

Multidisziplinäre Zuverlässigkeits- und Robustheitsanalyse mechatronischer Systeme

Dr.-Ing. The-Quan Pham, Siemens VDO
Dr.-Ing. Alfred Kamusella, IFTE, TU Dresden

1. Einführung

Beim Entwurf komplexer mechatronischer Systeme arbeitet man normaler Weise mit mehreren Simulationstools. Jedes modulare Teilsystem lässt sich am besten mit einer dafür geeigneten Software modellieren, z.B. 3D-Geometrie mit CAD, Festigkeitsuntersuchung mit FEM, Mechanismen-Dynamik mit MKS-Systemen, Regler mit Matlab/Simulink usw. Das Zusammenspiel und die Wechselwirkung der verschiedenen Teilsysteme fordern nicht nur eine Co-Simulation der Simulationssysteme, sondern auch einen multidisziplinären Ansatz für Analyse- und Optimierungstools. Für den alltäglichen Einsatz am normalen Konstruktionsarbeitsplatz steht auf dem Markt ein solcher multidisziplinärer Ansatz noch nicht zur Verfügung. Um diese Lücke zu schließen, wurde das Optimierungswerkzeug OptiY entwickelt. Dieses Analyse- und Optimierungstool stellt Schnittstellen bereit, über welche die Einbindung unterschiedlichster Programmsysteme möglich ist.

Ein grundlegender Aspekt ist die Streuung der Eigenschaften mechatronischer Systeme. 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 oder zur Verschlechterung der Produktqualität 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.

Die Systemzuverlässigkeitsanalyse und Robustheitsbewertung lassen sich mit der Simulation allein nicht beherrschen. Aus den Streuungen der Systemeingangsgrößen und Eigenschaften müssen dabei die Streuungen der Ausgangsgrößen und des Systemverhaltens abgeleitet werden. Stand der Technik ist hierfür die Monte-Carlo-Simulation, bei der die Streuung des Systemverhaltens durch Zufallszahlen abgebildet wird. Der Nachteil dieses statistischen Verfahrens liegt in dem riesigen Rechenaufwand für das Optimierungsmodell. Die Anzahl der Modelldurchrechnungen steigt exponential zu der Anzahl der Toleranzen. Das kann zur Zeit nur mit teuren Hochleistungsrechnern bewältigt werden. Im Vergleich dazu bietet das Programmsystem OptiY ein schnelles und kostengünstiges Toleranzanalyse-Verfahren, das vor kurzem entwickelt wurde und viel weniger Modelldurchrechnungen benötigt. Die Toleranzanalyse und selbst die Optimierung beim Systementwurf sind damit bereits auf einem kostengünstigen Arbeitsplatz-PC möglich.

Am Beispiel eines Elektromagnet-Antriebes für einen Brailleschrift-Präger wird die Anwendung des Optimierungssystems OptiY anschaulich beschrieben. Mit dem Ziel eines möglichst schnellen Prägezyklus werden die Parameter des Antriebmodells optimiert. Mit den optimierten Entwurfparametern wird anschließend eine Toleranzanalyse durchgeführt. Diese zeigt, dass die Versagenswahrscheinlichkeit bei ca. 50% liegt. Das ist erschreckend hoch für den "optimalen" Entwurf mit der klassischen Nennwert-Optimierung. Erst eine zuverlässigkeitsbasierte Optimierung zum Minimieren der Versagenswahrscheinlichkeit führt zu wirklich optimalen Entwurfparametern, bei denen die Funktionssicherheit und Robustheit gewährleistet werden.

2. Analyse- und Optimierungstool OptiY

OptiY ist ein multidisziplinäres Optimierungsprogramm, welches modernste Optimierungsstrategien und state of the art Algorithmen zur Toleranzanalyse, Sensitivitätsanalyse, Robustheitsbewertung, Zuverlässigkeitsanalyse und Approximation bereitstellt [Pham, 2006]. 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 [Pham, 1988] erarbeitet und kontinuierlich weiterentwickelt worden.

2.1 Prozessintegration

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 Softwares mittels eines grafischen Workflow-Editors anbinden und zu einer umfassenden 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).

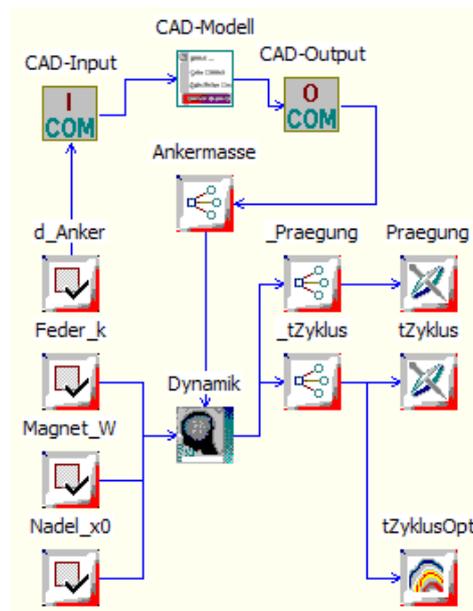


Bild 1: Prozessintegration im Workflow-Editor

2.2 Multidisziplinäre Analyse und Optimierung

Bei der Produktentwicklung mechatronischer Systeme müssen die Produkteigenschaften verschiedene Bedingungen erfüllen, die durch verschiedene 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. ...). Da in verschiedenen Versuchen immer das gleiche Produkt verwendet wird, werden im Simulationsmodell auch die gleichen Entwurfsparameter

verwendet. Da die Versuche unterschiedliche Bewertungskriterien haben, werden in den Modellen auch unterschiedliche Restriktionen und Gütekriterien bewertet.

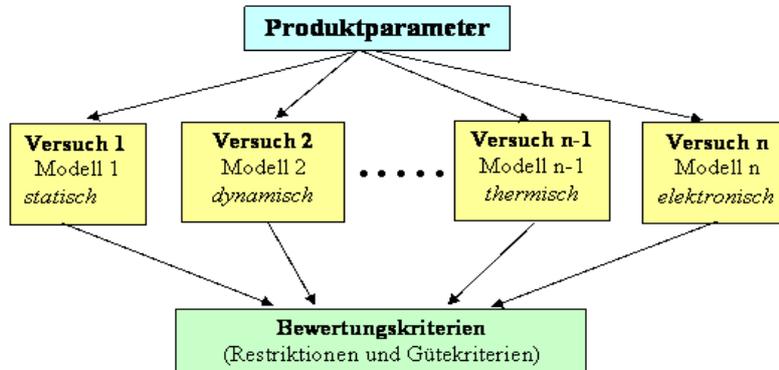


Bild 2: Multidisziplinäre Analyse und Optimierung

3. Toleranzanalyse zum probabilistischen Systementwurf

Die Eigenschaften technischer Systeme (Materialeigenschaften, Betriebszustände, Abmessungen ...) streuen in der Realität. Ursachen sind Umwelteinfluss, Fertigungsungenauigkeit, Prozessunsicherheit, Alterung und Verschleiß usw. Daraus resultieren Streuungen im Systemverhalten, die bei der Beurteilung und bei der Auslegung in Bezug auf Qualität und Kosten zu beachten sind. Mit der klassischen Simulation kann man das Systemverhalten bei solchen Streuungen nicht mehr vorhersagen. Die Simulation ermittelt nur einen Punkt im Streuungsraum des Systemverhaltens, der in der Regel sehr groß sein kann. Somit ist die Aussage der Simulation nur zufällig und kann für die Bewertung des kompletten Systemverhaltens nicht genutzt werden [Reuter, Hoffmann, 2000]. Man muss eine Toleranzanalyse durchführen, um das Systemverhalten systematisch im gesamten Verhaltensraum zu bestimmen. Aus den ermittelten Verteilungen der Eingangsgrößen werden dabei die Verteilungen der Ausgangsgrößen berechnet (Bild 3). Daraus ist das Systemverhalten für verschiedene Situationen ableitbar. Als Bestandteil der Toleranzanalyse kann man damit Sensitivitätsanalyse, Robustheitsbewertung und Zuverlässigkeitsanalyse durchführen.

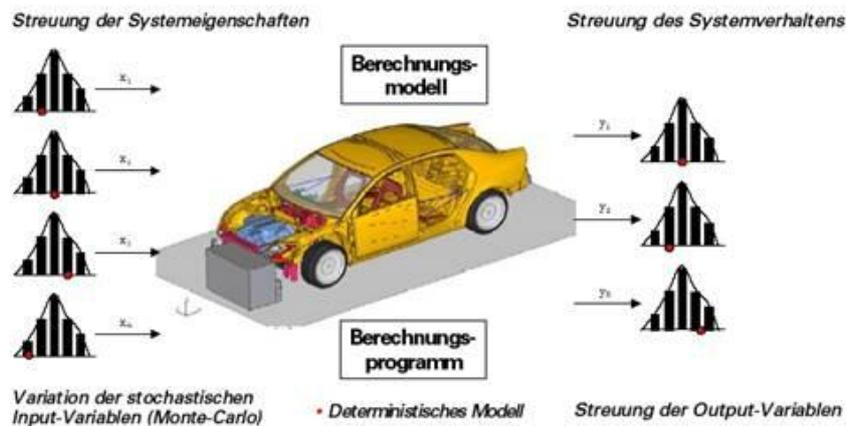


Bild 3: Toleranzanalyse [Streilein, 2002]

3.1 Numerische Verfahren

Stand der Technik für auf dem Markt verfügbare Softwaresysteme ist die Monte-Carlo-Simulation zur Nachbildung einer Stichprobe [Streilein, 2002][Reuter, 2000][Koch, 2000]. Für jede innerhalb der Stichprobe generierte Parameter-Kombination der toleranzbehafteten Parameter und Eingangsgrößen wird eine Modell-Berechnung durchgeführt. Im Ergebnis dieser Stichproben-Behandlung erkennt man, wie sich die Ausgangsgrößen verteilen.

Der Nachteil dieses statistischen Verfahrens liegt in dem riesigen Rechenaufwand zur Berechnung einer repräsentativen Stichprobe. Bei einem Viergelenkgetriebe mit 4 Toleranzen liefert die Monte-Carlo-Simulation erst ab dem Stichprobenumfang von 1000 genaue und stabile Ergebnisse (Bild 4). Die Anzahl der erforderlichen Modelldurchrechnungen steigt aber exponential zu der Anzahl der Toleranzen. Das kann zur Zeit nur mit teuren Hochleistungsrechnern oder Rechner-Clustern bewältigt werden, die aber nicht für jeden Entwurfsarbeitsplatz verfügbar sind.

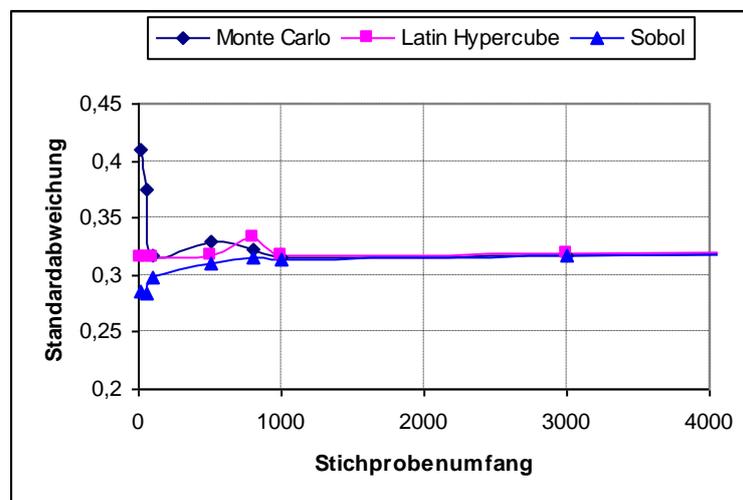


Bild 4: Monte-Carlo-Simulation

Eine wichtige Zielstellung in Hinblick auf die Erhöhung der Produktqualität ist die Nutzbarkeit moderner Optimierungsverfahren an jedem „normalen“ Arbeitsplatz-PC. Einen Ausweg bieten analytische Verfahren, welche im Vergleich zur Monte-Carlo-Simulation die Berechnung einer Stichprobe mit relativ wenigen Modelldurchläufen realisieren.

Ein Beispiel für solch ein Verfahren zur Toleranz-Simulation ist die *Second Order Analysis*. Man nennt dieses Verfahren auch Toleranzanalyse zweiter Ordnung. Das Prinzip basiert auf der Zerlegung einer Funktion $f(x)$ in eine Taylor-Reihe zweiter Ordnung:

$$f = f_0 + \sum_{j=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_j} (x_j - x_0) + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \frac{\partial^2 f}{\partial x_j^2} (x_j - x_0)^2 + \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^n \frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_k} (x_j - x_0)(x_k - x_0)$$

Bei der *Second Order Analysis* handelt sich um ein analytisches Verfahren zur Berechnung der Verteilungsfunktionen von Ausgangsgrößen aus den Verteilungsfunktionen von Eingangsgrößen. Die zentralen Momente der Ausgangsgrößen (Erwartungswert, Varianz, Schiefe und Überhöhung) werden näherungsweise aus den Momenten der Eingangsgrößen berechnet. Aus den ermittelten Momenten werden anschließend die Verteilungen der Ausgangsgrößen approximiert.

Für die Ermittlung dieser Taylorreihen-Ersatzfunktionen ist eine Anzahl von Modelldurchrechnungen im Sinne einer Abtastung des Systems erforderlich. Die Anzahl dieser Abtastsschritte beträgt $2n^2+1$, wobei n die Zahl der Toleranzgrößen ist.

Das Verfahren arbeitet extrem genau, wenn das Systemverhalten im Toleranzbereich annähernd quadratisch ist. Bei allgemeinen nichtlinearen Zusammenhängen liefert es ausreichende Genauigkeit. Am Testbeispiel eines Viergelenkgetriebes (Bild 5) entspricht die Second Order Analysis mit 32-Modelldurchrechnungen (SO32) der Genauigkeit der Monte-Carlo-Simulation mit 100 bis 5000 Modelldurchrechnungen (MC100-MC5000) [Pham, 2006].

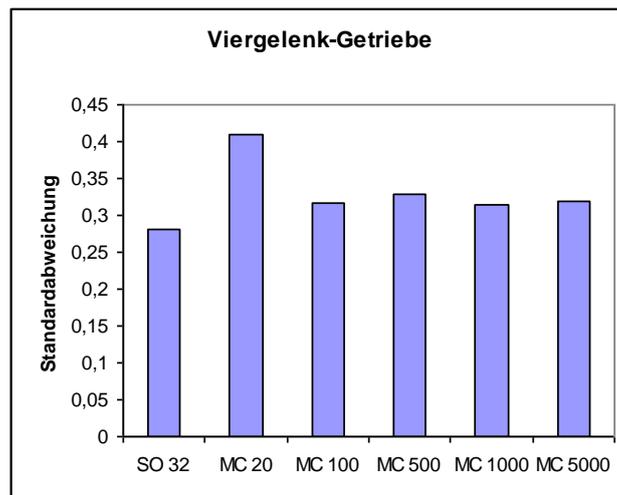


Bild 5: Vergleich zwischen Second-Order-Verfahren und Monte-Carlo-Simulation

3.2 Sensitivitätsanalyse

Mit der Sensitivitätsanalyse beantwortet man folgende Fragen zur Reduzierung der Entwurfskomplexität und Erklärung der Wechselbeziehung "Ursache-Wirkung":

- Welcher Modellparameter hat den größten Einfluss auf das Systemverhalten und muss beim Entwurf besonders berücksichtigt werden?
- Welche Parameter haben keinen Einfluss auf das Systemverhalten und können beim Entwurf vernachlässigt werden?
- Welche Interaktionen zwischen den einzelnen Parametern treten dabei auf?

In der Literatur findet man manchmal auch die Definition einer lokalen Sensitivität als partielle Ableitung gemittelt über das gesamte Toleranzintervall. Diese lokalen Sensitivitäten haben leider nur eine geringe Aussagekraft über den Einfluss eines Modellparameters, da die Abtastungen nur an den Toleranzgrenzen stattfinden.

In der Realität wird der Einfluss eines Modellparameters aber innerhalb des gesamten Toleranzbereiches streuen, so dass eine globale Sensitivität betrachtet werden muss. Hier wird die varianzbasierte Methode mit Sobol-Index angewendet [Saltelli, 2000]. Man unterscheidet dabei zwei Effekte:

- *Haupteffekt*

Er repräsentiert den Haupteinfluss der Toleranz X_i auf die Ausgangsgröße Y . Definiert ist er als Quotient aus der Varianz der durch X_i verursachten Streuung der Ausgangsgröße $\text{Var}(Y|X_i)$ und der Varianz der durch alle Toleranzen \mathbf{X} verursachten Streuung $\text{Var}(Y|\mathbf{X})$

$$S_H = \text{Var}(Y|X_i) / \text{Var}(Y|\mathbf{X})$$

- *Totaleffekt*

Er setzt sich zusammen aus dem Haupteffekt und den Interaktionen zwischen den einzelnen Toleranzen (X_i, X_j)

$$S_T = \text{Var}(Y|X_i) / \text{Var}(Y|\mathbf{X}) + \text{Var}(Y|X_i, X_j) / \text{Var}(Y|\mathbf{X})$$

In OptiY wird die Interaktion durch paarweise Kombination aller Toleranzgrößen berücksichtigt, da die gleichzeitige Berücksichtigung sämtlicher Toleranzstreuungen zu einem nicht beherrschbaren Berechnungsaufwand führt. Jedes Paar (X_i, X_j) wird als ein Glied dieser Summenformel berücksichtigt. Der Wert dieses Gliedes ist jeweils Null, wenn es keine Interaktion innerhalb des Toleranzpaares gibt.

3.3 Zuverlässigkeitsanalyse

Die Streuungen der Systemparameter und Eingangsgrößen führen häufig zum Versagen des Systemverhaltens. Die Zuverlässigkeitsanalyse untersucht dabei die Grenzüberschreitungen der Systemantworten. Die Erfüllung der Systemfunktion ist dadurch definiert, dass keine Restriktionen des Simulationsmodells verletzt werden. Wenn F die Restriktionsgrößen sind, F_u und F_o jeweils die Unter- und Obergrenzen der Restriktionen, dann gelten für alle Restriktionsgrößen:

$$F_u \leq F \leq F_o \quad \text{System ist zuverlässig}$$

$$F < F_u \text{ oder } F > F_o \quad \text{System versagt}$$

Auch wenn die Nennwert-Simulation eine Erfüllung der Funktion zeigt, kann es durch die Toleranzen zur Verletzung von Restriktionen kommen. Die Systemzuverlässigkeit ist dann bei der real existierenden Schwankungsbreite der Ist-Werte nicht gewährleistet. Ein gewisser Anteil der Ist-Werte der Restriktionsgrößen wird also die Grenzen überschritten. Man spricht von einer *Versagenswahrscheinlichkeit*. Im diskreten Fall (z.B. in der Monte-Carlo-Simulation) ist die Versagenswahrscheinlichkeit der Quotient aus der Anzahl der Modelldurchrechnungen mit Restriktionsverletzungen zu der gesamten Anzahl der Modelldurchrechnungen der betrachteten Stichprobe (Bild 6).

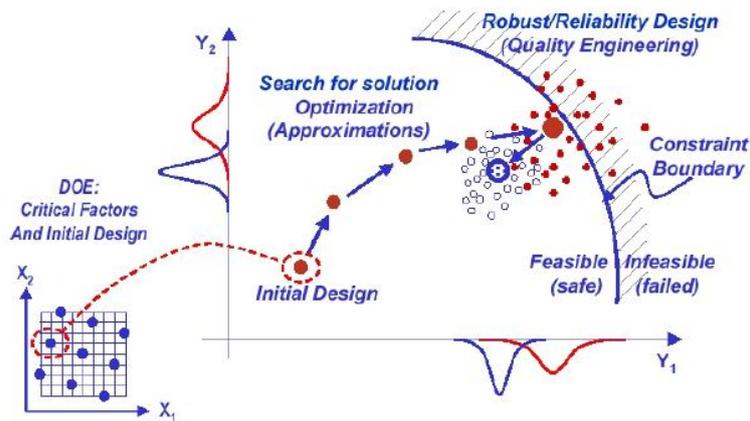


Bild 6: Zuverlässigkeitsbasierter Entwurf [Koch, 2000]

3.4 Robustheitsanalyse

Robustheitsanalyse ist die Analyse des Einflusses der Streuungen der Eingangsgrößen auf die Streuungen der Ausgangsgrößen. Dabei stellt man die Frage: Wie empfindlich reagiert mein System auf kleine Änderungen der Eingangsgrößen? Dazu werden die statistischen Größen wie Varianzen der Ausgangsgrößen berechnet. Ein robustes Verhalten weist eine kleine Varianz der Ausgangsgrößen auf und ein nichtrobustes Verhalten dagegen eine große Varianz der Ausgangsgrößen bei gleichen Streuungen der Eingangsgrößen (Bild 7).

Das Ziel ist die Auslegung der Entwurfsparameter, damit das Systemverhalten wie gewünscht eingestellt und gleichzeitig die Streuungen des Systemverhaltens minimiert werden. Man spricht von einem robusten Entwurfverhalten, wenn die Streuungen der Parameter nur geringfügigen Einfluss auf das Systemverhalten haben [Chen, 1996]. Das widerspiegelt sich in einer gleich bleibenden Produktqualität bei unterschiedlichen Bedingungen.

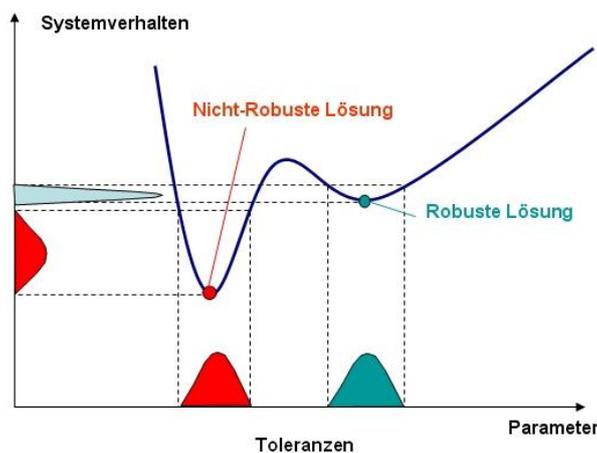


Bild 7: Robustheitsbewertung

4. Anwendungsbeispiel

4.1 Entwurf eines Magnetantriebs

Zielstellung

Möchte man einen Blindenschrift-Drucker realisieren, auf dem die Blindenschrift mechanisch in das Papier geprägt wird, so benötigt man dafür einen geeigneten Präge-Antrieb. Im Rahmen einer Lehrveranstaltung „Konstruktionstechnik“ wird im zugehörigen Praktikum eine optimierte Prinziplösung für einen elektromagnetischen Präge-Antrieb entworfen [Kamusella, 2006].

Der geplante Druckkopf soll eine Spalte mit vier Nadeln enthalten. Um eine Geschwindigkeit von 130 Braille-Zeichen/Sekunde zu erreichen, ist eine Zykluszeit von ca. 3,4 ms für den einzelnen Nadel-Antrieb erforderlich. Für den einzelnen Elektromagneten ist eine Gleichspannung von 12 V bei maximal 1,5 A vorgesehen.

Der Antrieb ist geometrisch-stofflich soweit zu konkretisieren, dass ein Funktionsmuster für die praktische Erprobung konstruiert werden kann. Betrachtet wird dabei eine Variante mit Direktantrieb der Präge-Nadel und vorgespannter Rückhol-Feder (Bild 8).

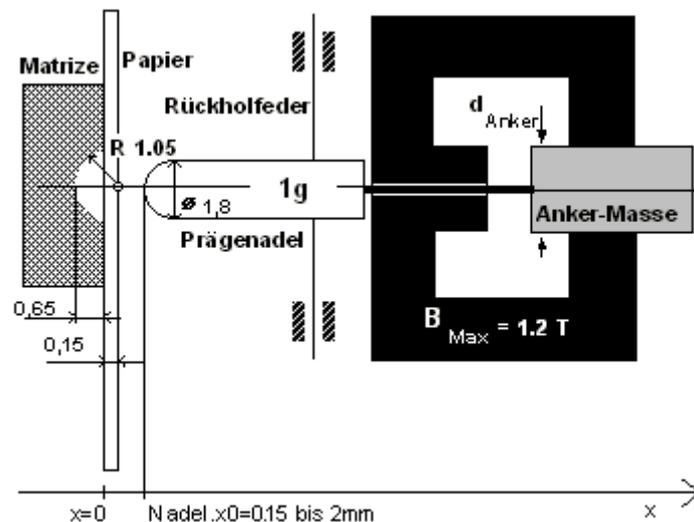


Bild 8: Antriebsprinzip

Zur Simulation der Antriebsdynamik wird das Programm SimulationX der Firma ITI GmbH Dresden genutzt. Das für die Optimierung benötigte Simulationsmodell wird in mehreren Etappen ausgehend von einem sehr einfachen Ansatz entwickelt.

Ist ein Elektro-Magnet für die Antriebsaufgabe geeignet?

Die Idee, als elektro-mechanischen Wandler einen Elektromagneten einzusetzen, ist sicher nahe liegend. Allerdings sind die Anforderungen an die Arbeitsgeschwindigkeit recht hoch! Deshalb es ist fraglich, ob ein E-Magnet überhaupt in der Lage ist, einen Prägezyklus innerhalb von 3,4 ms auszuführen:

- Die Querschnittsfläche des beweglichen Ankers im Luftspalt ist zusammen mit der magnetische Sättigung des Eisens bei hoher Flussdichte verantwortlich für die maximal mögliche Magnetkraft:

$$F_{\max} = \frac{B_{\max}^2 \cdot A_{\text{Anker}}}{2 \cdot \mu_0}$$

- Normales Weicheisen erreicht den Sättigungsbereich für die magnetische Flussdichte ungefähr bei $B_{\max}=1,2$ T. Viel höher sollte man den Magnetkreis nicht aussteuern!

- Man kann zwar durch Vergrößern des Ankerdurchmessers d "beliebig" große Kräfte ($F \sim d^2$) erzeugen, aber gleichzeitig erhöht sich auch die zu beschleunigende Ankermasse ($m \sim d^3$), wenn man von einer Konstanz der Ankerproportionen ausgeht ($Länge \sim d$).
- Durch Miniaturisierung wird ein E-Magnet schneller, allerdings reduzieren sich damit auch die möglichen Kräfte an der Wirkstelle.
- Um das Papier zu Prägen, ist eine Mindestkraft (bzw. minimale Umform-Energie) erforderlich.
- Für eine vorgegebene Wirkstelle existiert jeweils eine Grenze für die minimal mögliche Zykluszeit, die prinzipiell mit einem Elektro-Magneten nicht unterschritten werden kann.

Um eine Entscheidung zu treffen, ob ein E-Magnet überhaupt als Aktor für den zu konstruierenden Antrieb geeignet ist, kann man mit einem relativ einfachen Modellansatz für das mechanische Teilsystem beginnen. Dieses enthält bereits das zu prägende Papier, die bewegte Aktor-Masse aus Anker und Nadel sowie die vorgespannte Rückholfeder. Die Magnetkraft wird als Kraftimpuls ohne Berücksichtigung der dynamischen Wechselwirkungen innerhalb des Magnetkreises nachgebildet (Bilder 9 und 10):

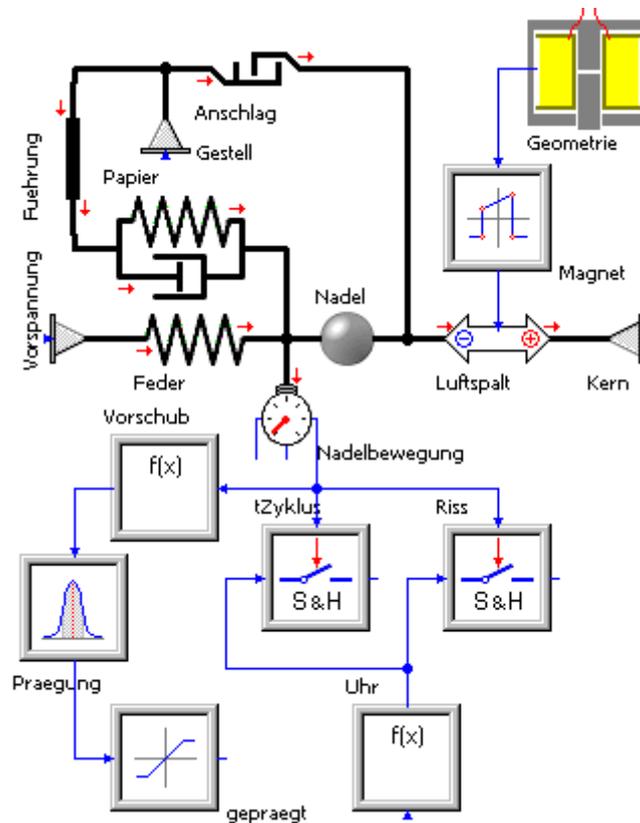


Bild 9: Struktur des Antriebsmodells in SimulationX

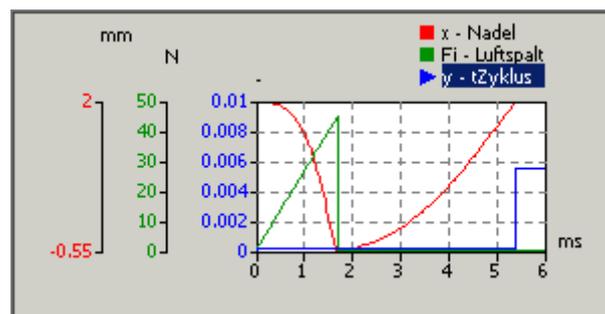


Bild 10: Verhalten einer Anfangslösung

In Abhängigkeit vom Zustand des Papiers (Riss), wird die Kennlinie der zur Nachbildung benutzten Feder-Dämpfer-Elemente umgeschaltet. Die mögliche Amplitude des Kraftimpulses wird aus den Geometrie-Parametern des Magnetkreises berechnet.

Mittels Signalverarbeitender Elemente werden aus dem Simulationslauf Bewertungsgrößen für die Optimierung abgeleitet. So kann man ausgehend von einer Anfangslösung zielgerichtet die schnellstmögliche Zykluszeit für den Präge-Antrieb mittels Nennwert-Optimierung ermitteln (Bild 11).

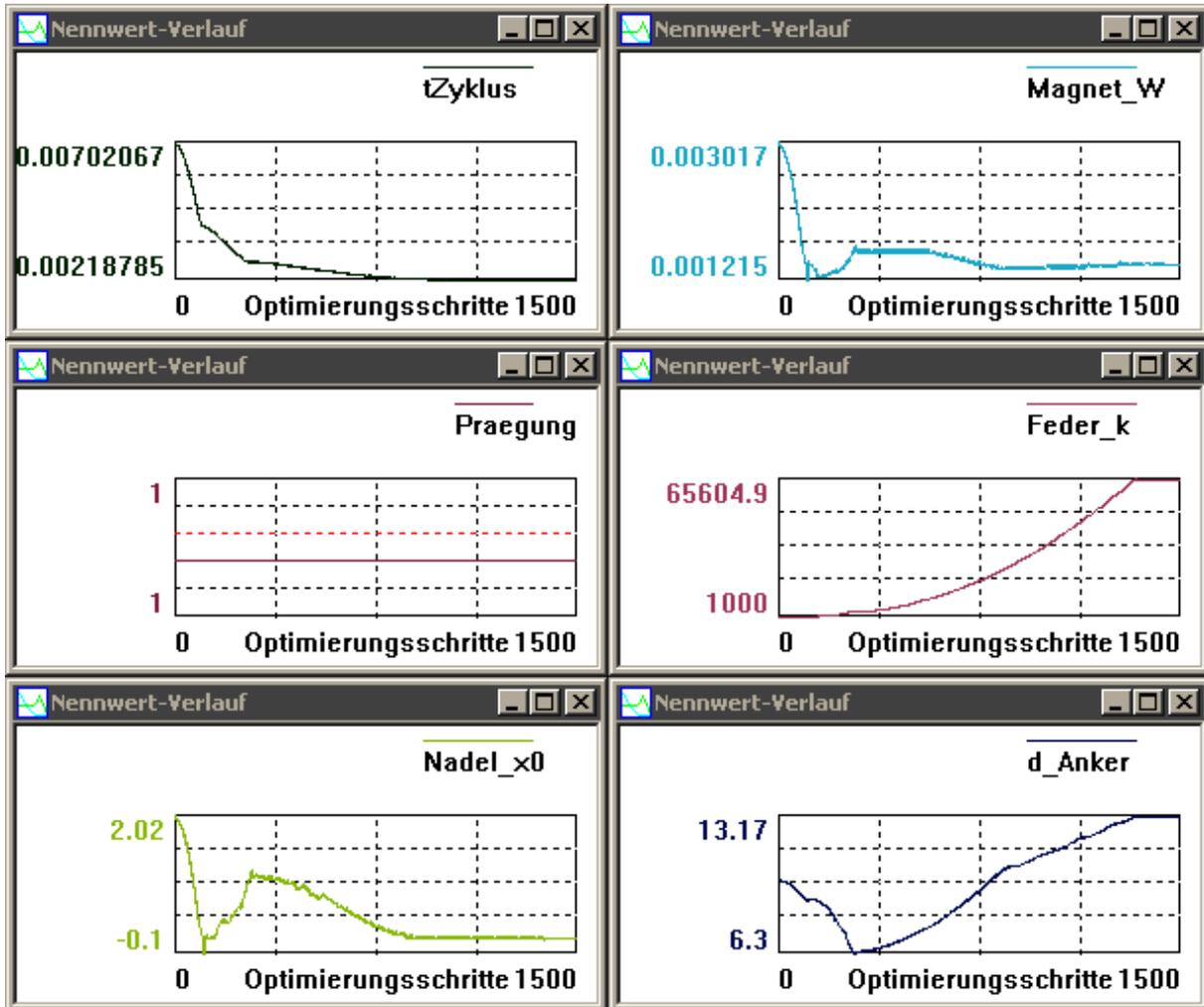


Bild 11: Suche nach der kürzesten Zykluszeit

Die resultierende minimal mögliche Zykluszeit von ca. 2 ms spricht nicht gegen die Eignung eines Elektro-Magneten für diesen Präge-Antrieb. Die Optimierung zeigt, dass es am günstigsten ist, die Präge-Nadel in der Ruhelage möglichst dicht an die Papier-Oberfläche zu platzieren.

Die grundlegenden Entwurfparameter dieses Optimierungsproblems sind der Ankerdurchmesser des Magneten und die Steife der Rückhol-Feder. Die anderen Entwurfparameter lassen sich aus diesen Größen oder anderweitig ableiten. Damit bietet sich mit der Rastersuche von OptiY die Möglichkeit, einen Blick auf die Gütefunktion zu werfen:

$$t_{\text{Zyklus}} = f(d_{\text{Anker}}, \text{Feder}_k)$$

Das Plateau auf der rechten Seite des Bildes kennzeichnet das Gebiet des „Nichtprägens“ (Bild 12).

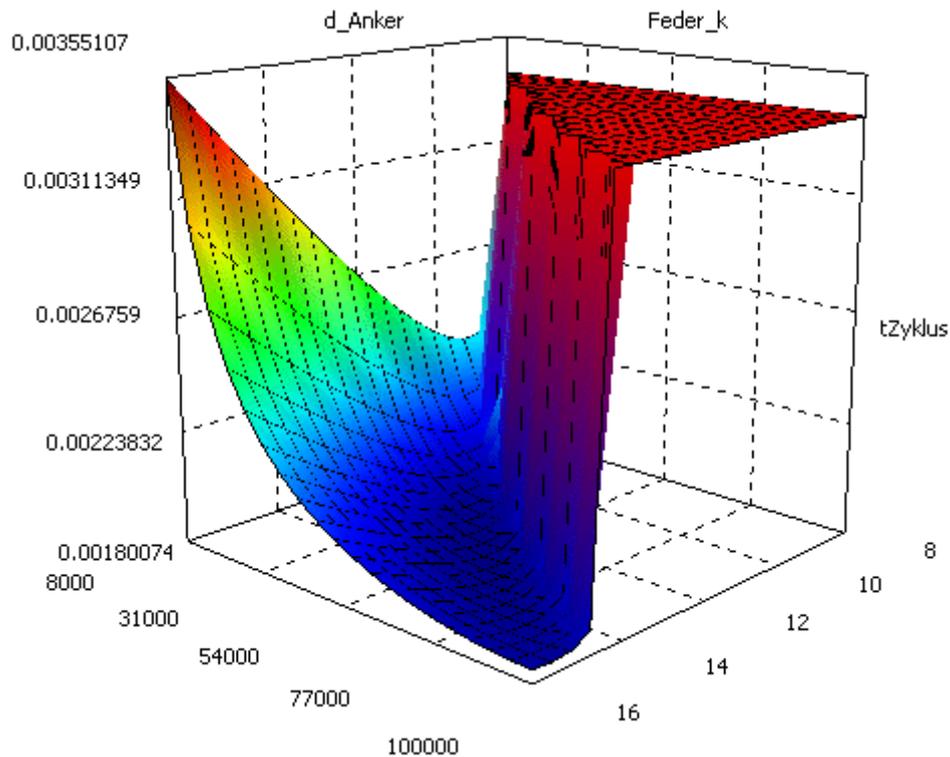


Bild 12: Gütefunktion

Das globale Optimum liegt in einer flachen Mulde unweit der Grenze zum "Nichtprägen". Daraus kann man folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Die Federkonstante der Rückholfeder kann in einem weiten Bereich verändert werden, ohne dass sich die Zykluszeit in relevanten Größenordnungen ändert. Man kann sich bei der Wahl eines konkreten Wertes an der technischen Realisierbarkeit orientieren.
- Zur gewählten Federkonstante kann man einen geeigneten Ankerdurchmesser wählen, der einen hinreichend schnellen Prägezyklus ermöglicht.
- Die Kombination der gewählten Entwurfparameter sollte möglichst weit entfernt von der Restriktionsgrenze zum „Nichtprägen“ liegen, um trotz aller Toleranzen einen sicheren Betrieb des Antriebs zu gewährleisten.

Nennwert-Optimierung unter Berücksichtigung von Norm-Reihen

Nachdem zuvor die prinzipielle Eignung eines Elektromagneten für die Antriebsaufgabe nachgewiesen wurde, lohnt sich die Investition in ein detailliertes Modell des Antriebssystems.

Dieses Dynamik-Modell soll in ihrer Wechselwirkung die physikalischen Domänen der Mechanik, des Magnetkreises, der elektrischen Schaltung und der Wärme berücksichtigen. Die „konzentrierten“ Parameter für die verwendeten idealisierten Netzwerk-Elemente werden auf Basis der erforderlichen geometrischen und stofflichen Entwurfparameter ermittelt. Die resultierende Modellstruktur ist noch gut überschaubar (Bild 13).

Ein Großteil des Simulationsmodells besteht aus Signalgliedern für die Gewinnung von Bewertungsgrößen zur Optimierung und dem automatischen Abschalten der Spule nach dem Prägen des Papiers.

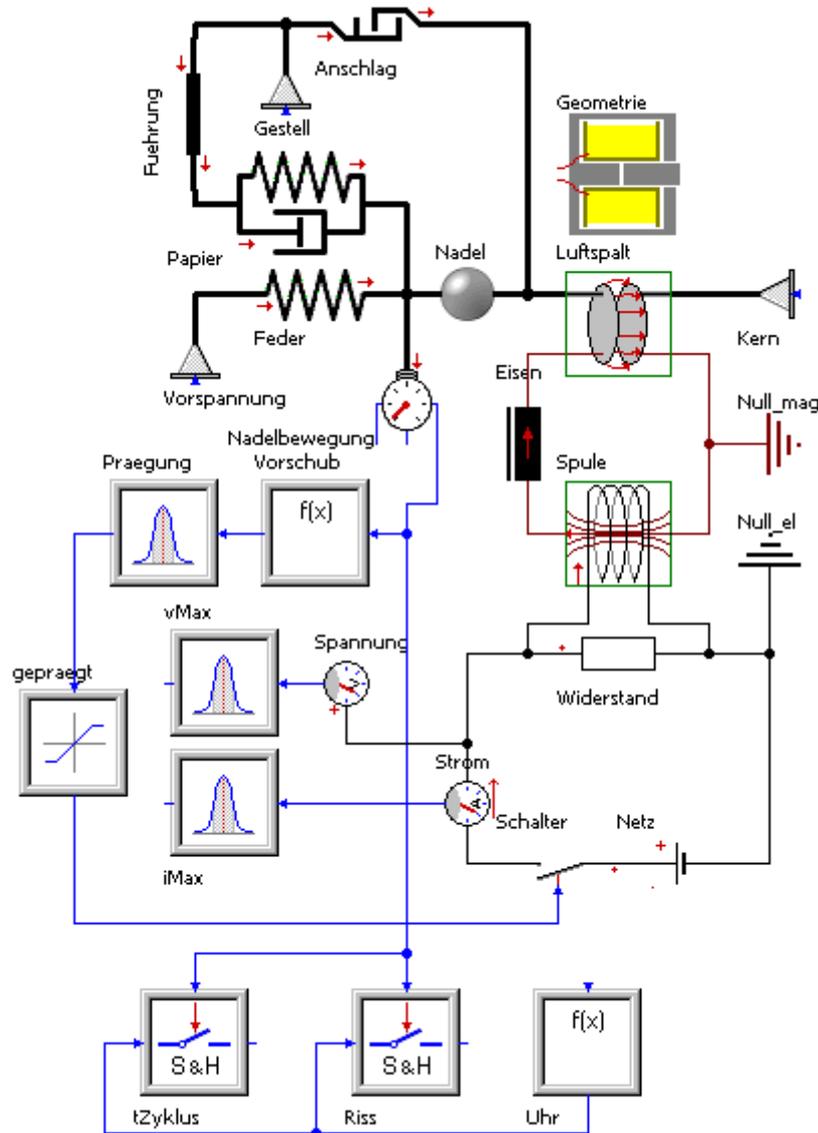


Bild 13: Vollständiges Modell

Bei der Bewertung des Antriehsverhaltens werden folgende Größen berücksichtigt:

- *tZyklus* – Zeit für einen Prägezyklus
- *Praegung* – Maß für den maximalen Nadel-Vorschub (0 bis 1)
- *iMax* – Maximalwert des Spulenstroms
- *vMax* – Maximalwert der Spulenspannung (beim Abschalten)
- *dT_Spule* – Erwärmung der Spule im Dauerbetrieb
- *L_Magnet* – Einbaulänge des Magneten

Insbesondere die Berücksichtigung der Normreihen für den Spulendraht und den elektrischen Schutzwiderstand machen einige Iterationen bei der Suche nach optimalen Nennwerten für die Entwurfparameter erforderlich.

Doch nach einigen Tausend Simulationsläufen und vielen Minuten Rechenzeit erhält man für die Dimensionierung eines möglichst schnellen Funktionsmusters die Nennwerte der grundlegenden Entwurfparameter des Antriebssystems. Das folgende Diagramm (Bild 14) zeigt den „Zieleinlauf“ der Optimierung, nachdem man bereits in vorhergehenden Experimenten die Werte des Abschaltwiderstandes (680 Ohm) und des Spulendrahtes (0,35 mm) präzisiert hatte.

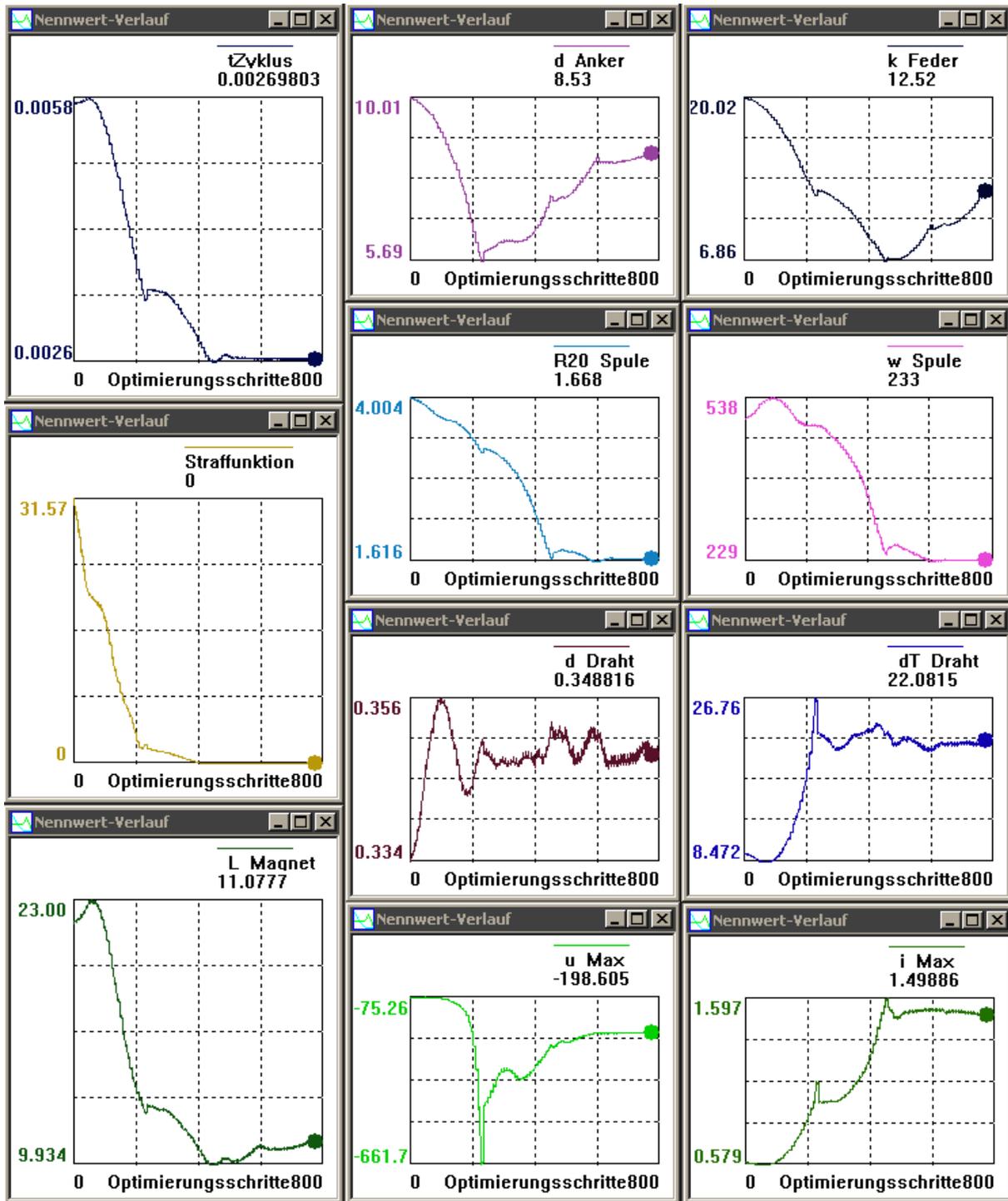


Bild 14: Finden eines Nennwert-Optimums

4.2 Probabilistische Entwurfsanalyse

Bereits bei der Suche nach optimalen Nennwerten für einen möglichst schnellen Prägeantrieb haben wir erkannt, dass dieses Optimum direkt an Restriktionsgrenzen in Hinblick auf die zulässige Spulenspannung und den zulässigen Spulenstrom liegt.

Damit werden wahrscheinlich bereits kleine Abweichungen von den ermittelten Nennwerten zu unzulässigem Antriebsverhalten führen. In welchem Maße dies der Fall ist, soll im Folgenden durch Methoden der probabilistischen Entwurfsanalyse untersucht werden.

Zielstellung ist dabei das Finden einer robusten Optimal-Lösung, welche im Bereich der zulässigen Streuungen von Fertigung, Alterung und Betriebsbedingungen einen möglichst kurzen Prägezyklus aufweist.

Dafür kann in den numerischen Versuchsständen von OptiY das gleiche Simulationsmodell benutzt werden wie für die Nennwert-Optimierung. Erforderlich ist nur die Definition neuer Experimente auf Basis eines angepassten Workflows – anstatt der Nennwerte werden nun Toleranzen als Entwurfsparameter benutzt. Berücksichtigt werden im Beispiel nur die Verhaltensrelevanten Restriktionsgrößen (Bild 15).

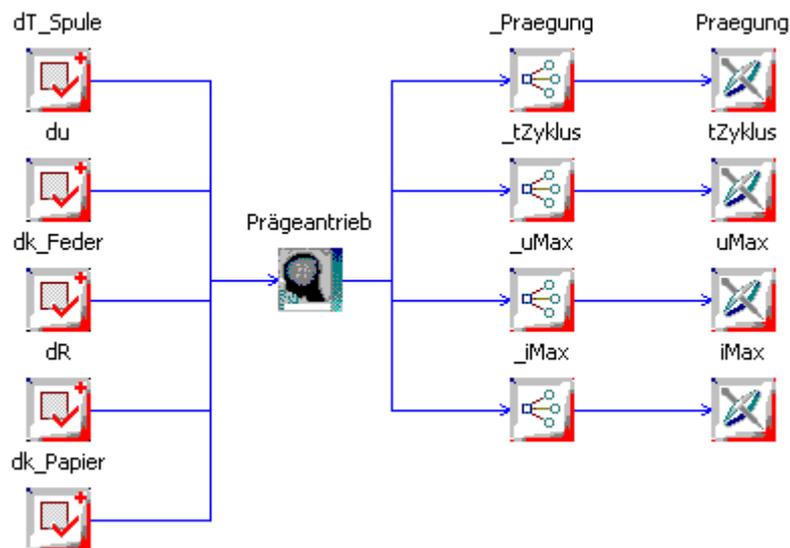


Bild 15: Workflow für Toleranz-Analysen

Aufbauend auf den Erfahrungen mit den Modell-Experimenten beschränken wir uns bei den Untersuchungen zu den Auswirkungen von Parameter-Streuungen auf die Toleranzgrößen, für die wir den größten Einfluss auf das Antriebsverhalten vermuten:

- Temperatur der Spule ($dT_Spule = 0^{\circ}C$ bis $120^{\circ}C$)
- Steifheit des Papiers ($dk_Papier = \pm 50\%$)
- Betriebsspannung ($du = \pm 10\%$)
- Federkonstante der Rückholfeder ($dk_Feder = \pm 30\%$)
- Widerstand der Schutzbeschaltung ($dR = \pm 5\%$)

Als Ergebnis der Toleranz-Analyse interessiert den Anwender vor allem die Zuverlässigkeit der aktuellen Antriebskonfiguration. Das Simulationsmodell für das vorgestellte Beispiel rechnet sehr schnell (ca. 1 Sekunde / Simulationslauf). Deshalb kann man für die Simulation der erforderlichen Stichprobe auch stochastische Methoden verwenden (Bild 16).

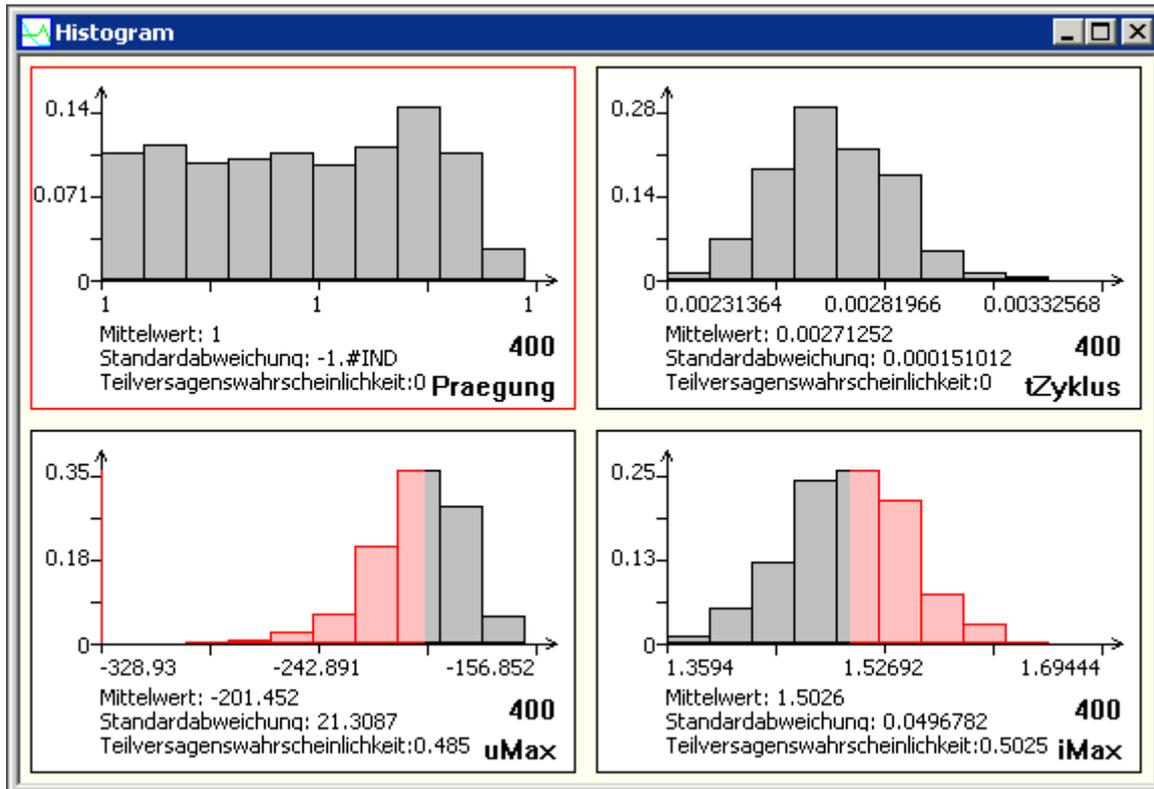


Bild 16: Histogramme der Toleranzen und Restriktionsgrößen

Für komplexere Modelle mit Rechenzeiten im Minuten- bis Stunden-Bereich sind praktisch nur analytische Methoden nutzbar, welche mit einer geringeren Anzahl von Modellberechnungen auskommen (Bild 17). Die Ergebnisse sind vergleichbar, außer bei der unstetigen Bewertungsgröße (*Praegung*).

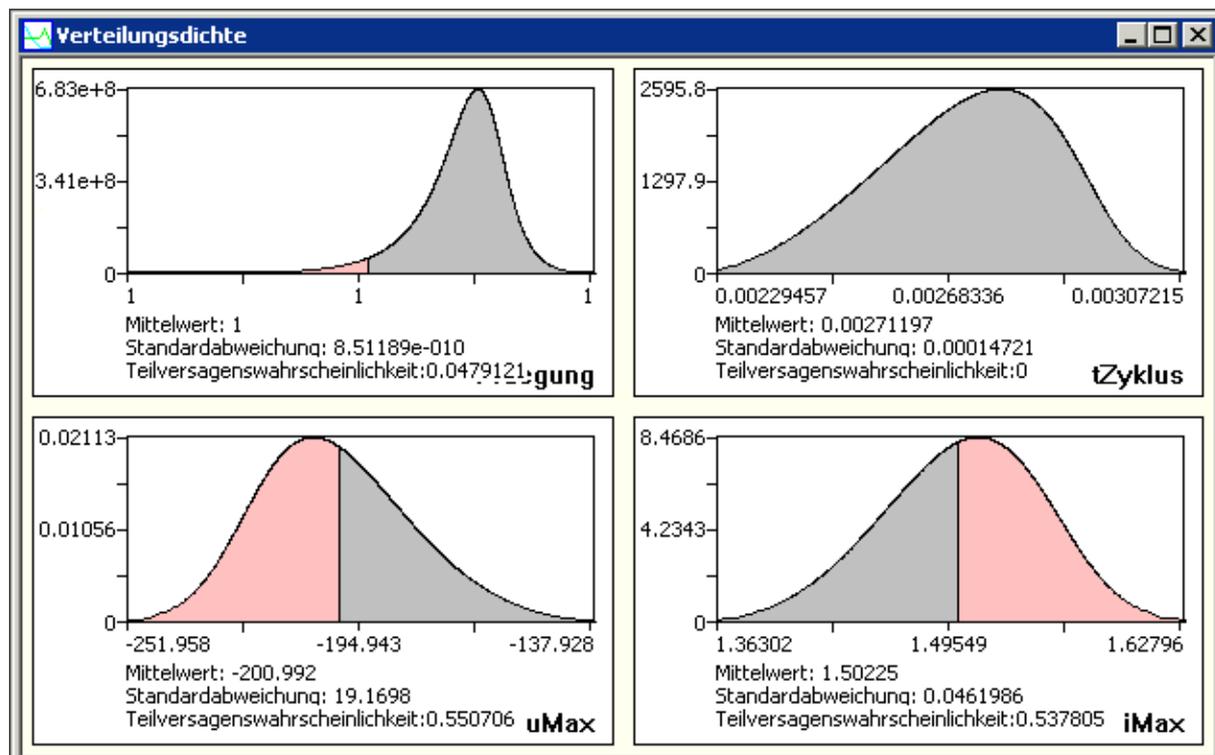


Bild 17: Verteilungen der Restriktionsgrößen (Second Order Analysis)

Im Beispiel führen die in der Stichprobe berücksichtigten Toleranzen zu einer Gesamtversagenswahrscheinlichkeit im Sinne von Restriktionsverletzungen von etwas über 50%. Ursachen sind vor allem die Überschreitung der zulässigen Grenzwerte für Spulenstrom und Spulenspannung. Das Papier wird jedoch innerhalb des Toleranzbereiches immer geprägt!

Zielstellung ist eine erneute Optimierung unter Einbeziehung der Streuungen. Um diese Optimierung mit einem akzeptierbaren Berechnungsaufwand vornehmen zu können, sollten dabei nur die Toleranzgrößen berücksichtigt werden, welche einen relevanten Einfluss auf das Antriebsverhalten besitzen. Dafür ist das Wissen über den Einfluss der einzelnen Toleranzgrößen erforderlich. Zusätzlich ist es günstig, Informationen über die Wechselwirkung zwischen den Toleranzgrößen zu besitzen. Existieren solche Wechselwirkungen praktisch nicht, so kann man für die Toleranzsimulation vereinfachte Verfahren benutzen und kommt damit wesentlich schneller zum Ziel.

Die gewünschten Erkenntnisse werden bereits während der Toleranzsimulation erzeugt und können im so genannten Pareto Chart angezeigt werden (Bild 18).

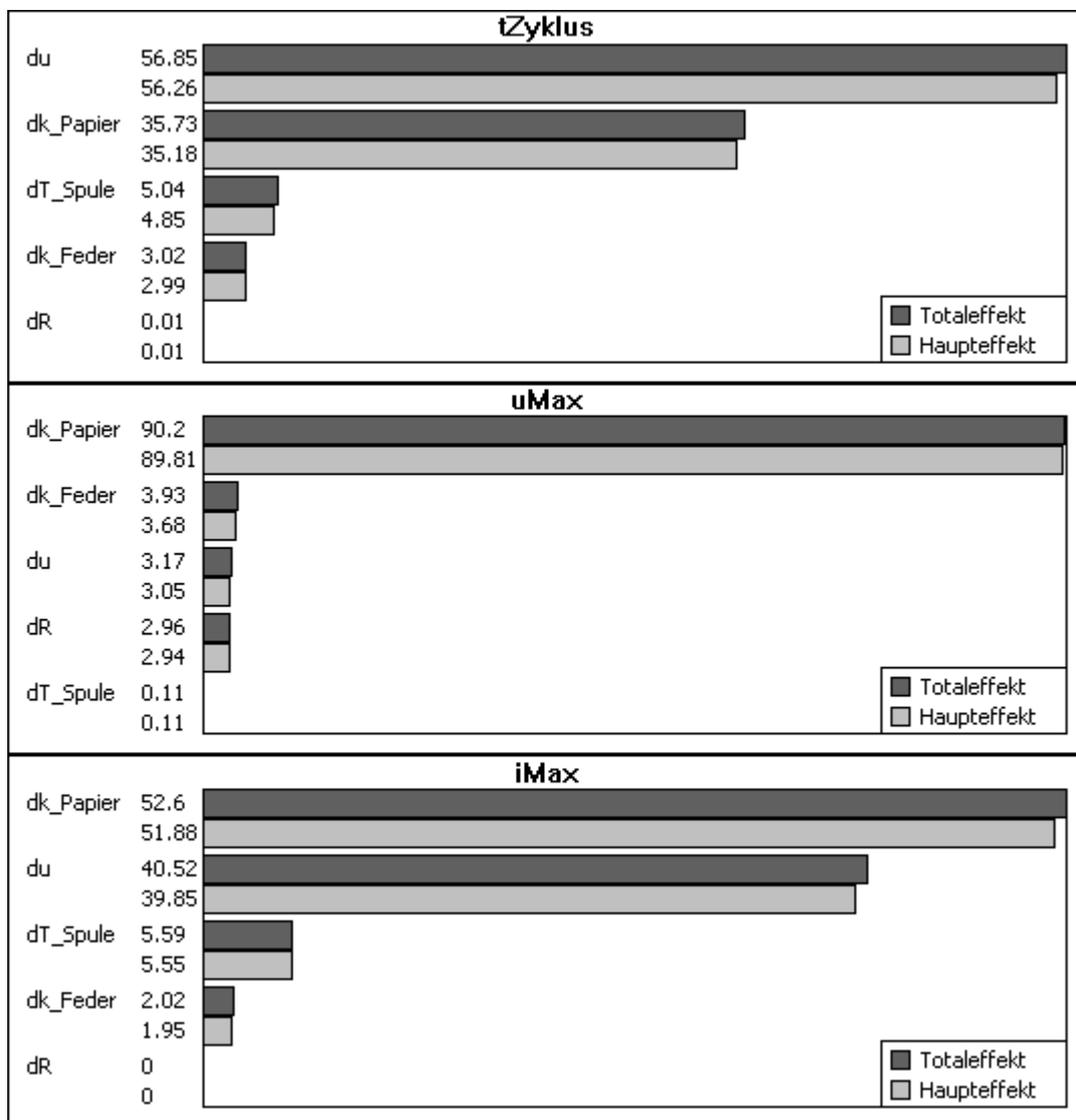


Bild 18: Pareto-Chart der Sensitivitäten-Analyse

Die Toleranz dR des Abschaltwiderstands besitzt praktisch keinen Einfluss auf das betrachtete Verhalten und kann deshalb im Weiteren vernachlässigt werden. Zwischen den Toleranzgrößen

existieren keine merklichen Interaktionen, da Haupt- und Totaleffekt praktisch gleich sind. Damit kann für die Toleranz-Optimierung das Verfahren der reduzierten Second Order Analysis benutzt werden.

Da im Beispiel die Toleranzbereiche vorgegeben sind, müssen die Nennwerte der Entwurfsparameter so korrigiert werden, dass die gewünschte stabile Lösung entsteht. Eine Optimierung mit dem Kriterium der Ausschuss-Minimierung führt mit relativ wenig Aufwand zu einer brauchbaren Lösung (Bild 19).

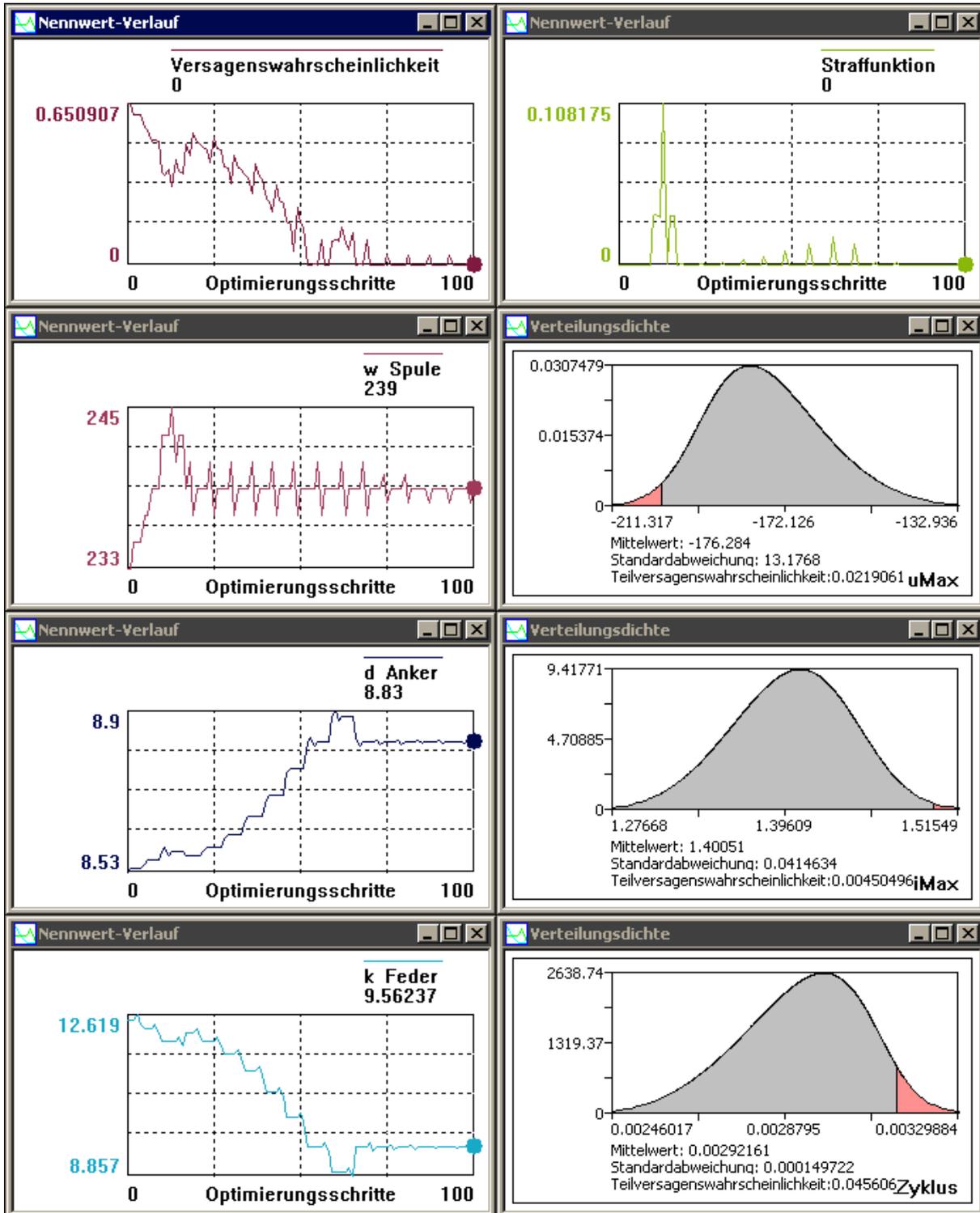


Bild 19: Ausschuss-Minimierung

Durch Erhöhen der Windungszahl, geringfügigem Vergrößern des Ankerdurchmessers und Verringern der Federsteife der Rückholfeder wird im berücksichtigten Streubereich eine Versagenswahrscheinlichkeit von Null erreicht. Dies widerspiegelt sich markant in den Streubereichen der Restriktionsgrößen. Das trotzdem noch Teilversagenswahrscheinlichkeiten von wenigen Prozent angezeigt werden, resultiert aus den Approximationsfehlern für die gebildeten Übertragungsfunktionen. Von dem Gedanken der „Exaktheit“ muss man sich bei der probabilistischen Simulation lösen – hier hantiert man nur mit „hinreichend“ genauen Aussagen zum Systemverhalten!

Weiterführend könnte man in unserem Beispiel eine Robust-Optimierung durchführen. Diese bewirkt eine zusätzliche Minimierung der Verhaltensstreuung im Sinne eines robusten Systemverhaltens bei gleichzeitiger Einhaltung aller Verhaltensanforderungen.

5. Zusammenfassung

Das moderne Analyse- und Optimierungstool OptiY bietet vielfältige Möglichkeiten, den virtuellen Entwicklungsprozess zu qualifizieren.

Je nach Wissensstand des Nutzers und Komplexität des Entwurfsproblems können unterschiedliche numerische Verfahren und Entwurfsstrategien angewandt werden.

OptiY baut auf die in der speziellen Entwurfsumgebung vorhandenen Simulationssoftwares auf, ohne die bereits etablierten Nutzungsprozesse zu behindern. Damit ist eine kontinuierliche und harmonische Einführung dieser neuen Entwurfstechnologie möglich.

Ausgehend vom Lasten- bzw. Pflichtenheft ist man damit in der Lage, die Produkteigenschaften in Hinblick auf die Streuungen von Fertigung und Nutzungsbedingungen zu analysieren und zu verbessern.

In diesem Beitrag konnten nur einige Möglichkeiten von OptiY unter dem Schwerpunkt der multidisziplinären Zuverlässigkeits- und Robustheitsanalyse aufgezeigt werden. Weiterführende Informationen und die zugehörige Software zum Ausprobieren erhält man unter den im Literaturverzeichnis angegebenen Internet-Adressen.

6. Literatur

Pham, T-Q.: OptiY- Demo und Dokumentation; Software Version 2.2, OptiY e.K. 2006, www.optiy.de

Pham, T-Q.: Modellierung, Simulation und Optimierung toleranzbehafteter Mechanismen in der Feinwerktechnik. Verlag Mainz, Wissenschaftsverlag, Aachen 1998.

Kamusella, A.: Simulation und Optimierung eines Magnetantriebes; Institut für Feinwerktechnik und Elektronik-Design, TU Dresden 2006, www.ifte.de

Streilein, T.; Hillmann, J.: Stochastische Simulation und Optimierung am Beispiel VW Phaeton; VDI-Tagung "Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau", Würzburg 2002

Reuter, R.; Hoffmann, R.: Bewertung von Berechnungsergebnisse mittels Stochastischer Simulationsverfahren; VDI-Tagung "Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau", Würzburg 2000

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.

Saltelli, A., Chan, K. and Scott, E.M.: Sensitivity Analysis. John Willey & Sons Chichester, New York 2000.

Chen, W.; Allen, J.K.; Tsui, K.-L.; Mistree, F.: A Procedure for Robust Design: Minimizing Variations Caused by Noise Factors and Control Factors. ASME Journal of Mechanical Design. 118(4) 1996, 478-485.

