



FVA Kongress zur Simulation im Produktentstehungsprozess

18./19. Juni 2009 in Veitshöchheim

Kostengünstige Entwicklung	von Qualitätsprodukten durch probabilistische
Simulation und Optimierung	

Vortragender	Dr. The-Quan Pham OptiY e.K. 63741 Aschaffenburg	OptiY®
Weitere Autoren	Dr. Alfred Kamusella Institut für Feinwerktechnik und Elektronik-Design TU Dresden	

Kurzfassung

Qualität und Zuverlässigkeit sind entscheidende Erfolgsfaktoren eines kommerziellen Produktes. Diese Probleme treten erst in der Serienfertigung und im Einsatz beim Kunden und werden durch Unsicherheiten, Streuungen, Fehler und Toleranzen hervorgerufen. Dies führt zum teilweisen Versagen oder zur Verschlechterung der Produktqualität. Ursachen hierfür sind schwankende Einsatzbedingungen, Umwelteinflüsse, Fertigungsungenauigkeiten, Prozessunsicherheiten, streuende Materialeigenschaften usw. Um diese Probleme in den Griff zu bekommen, verwendet man bisher in der industriellen Praxis die statistische Versuchsmethode im Feldversuch vor der Serienfertigung. Hunderte bis Tausende Versuchsmuster werden gebaut und getestet. Material-, Personal- und Zeitaufwand dafür sind sehr hoch. Beim Feststellen von Mängeln werden Produktänderungen in einem neuen Design-Zyklus vorgenommen, welche durch Änderungen von Entwürfen und Werkzeugen zu hohen Kosten und zur Verzögerung der Produkteinführung auf dem Markt führen. Weiterhin können wegen geringer Stückzahl von Versuchsmustern und begrenzter Ressourcen nicht vollständig alle Details und Probleme statistisch erfasst werden, die bei der Massenfertigung entstehen werden. Dies führt wiederum zu Produktänderungen während der Serienfertigung und damit zu enormen Kosten.

In diesem Beitrag wird eine neue, modellbasierte Entwurfsmethode zur kostengünstigen Bewältigung der Produktqualität und Zuverlässigkeit aufgezeigt. Basierend auf dem virtuellen Produktmodell Netzwerk-Modelle) (CAD. FEM. werden die Streuungen Produkteigenschaften aus den Parameterstreuungen mit Hilfe von probabilistischen Methoden statistisch berechnet. Die probabilistische Simulation umfasst damit eine Robustheitsbewertung, Zuverlässigkeitsanalyse eine Sensitivitätsstudie. und Robustheitsanalyse bewertet die Bandbreite der Streuungen von Produkteigenschaften. Eine gute Qualität ist dabei durch kleine Streuungen der Produkteigenschaften gekennzeichnet. Die Zuverlässigkeitsanalyse untersucht die Grenzüberschreitung der Produkteigenschaften und ermittelt damit die Ausschussquote bei einer Serienfertigung. Mit einer Sensitivitätsstudie kann man Ursache-Wirkungs-Beziehungen erkennen and analysieren. Hier werden die Einflussgrößen auf die Verschlechterung der Produktqualität Zuverlässigkeit identifiziert und es können damit geeignete Maßnahmen abgeleitet und getroffen werden. Eine abschließende Robustoptimierung führt zu optimalen und robusten Produktparametern.

©FVA www.simpep.de 1/13



1. Einführung

Die letzten Dekaden sind gekennzeichnet durch enorme Fortschritte im virtuellen Produktentwicklungsprozess. Doch viele Probleme wie Zuverlässigkeit und Qualität bleiben immer noch offen. Sie sind die Erfolgsfaktoren eines kommerziellen Produktes auf dem Markt. Dabei sind die Tradition und Erfahrungen noch immer der Entscheidungsweg. Der Ruf nach innovativen Werkzeugen und Strategien wird immer lauter, um die Komplexität in der Produktentwicklung zu beherrschen. Der Begriff "Design for Six Sigma" ist weltweit als Top-Thema etabliert [4]. Darunter versteht man Strategien und Werkzeuge beginnend mit der Produktentwicklung über alle Produktlebensphasen, um Streuungen zur reduzieren, Qualität zu verbessern und Kosten zu senken. Man verfolgt dabei die Ziele:

- Weniger Defekte
- Verbesserte Produktqualität
- Reduktion der Entwicklungszeiten
- Minimierung von Wartung und Service
- Senkung der Gesamtkosten
- Erhöhte Kundenzufriedenheit

Die Probleme für Qualität und Zuverlässigkeit eines Produktes werden durch *Unsicherheiten*, *Streuungen*, *Fehler* und *Toleranzen* hervorgerufen. Diese Ursachen sind vielfältig und schwer zu erfassen. Man unterscheidet folgende wesentliche Kategorien:

- Schwankende Einsatzbedingungen (Temperatur, Verschleiß, Ermüdung usw.)
- Umwelteinflüsse (Luftfeuchtigkeit, Erosion, Wechselwirkungen usw.)
- Fertigungsungenauigkeiten (Toleranzen, Prozesskapazität usw.)
- Prozessunsicherheiten (Bedienungsfehler, Menschliche Unsicherheiten usw.)
- Streuende Materialeigenschaften (Elastizität, elektrischer, thermischer und magnetischer Widerstand usw.)

Um diese Probleme in den Griff zu bekommen, verwendet man bisher in der industriellen Praxis die statistische Versuchsmethode im Feldversuch vor der Serienfertigung. Hunderte bis Tausende Versuchsmuster werden gebaut und auf Herz und Nieren getestet. Material-, Personal- und Zeitaufwand dafür sind sehr hoch. Beim Feststellen von Mängeln werden Produktänderungen in einem neuen Design-Zyklus vorgenommen, welche durch Änderungen von Konstruktionen und Werkzeugen zu hohen Kosten und zur Verzögerung der Produkteinführung auf dem Markt führen. Weiterhin können wegen geringer Stückzahl von Versuchsmustern und begrenzter Ressourcen nicht vollständig alle Details und Probleme statistisch erfasst werden, die bei der Massenfertigung von Millionen Stück entstehen werden. Dies führt wiederum zu Produktänderungen während der Serienfertigung und damit zu enormen Kosten [4,5].

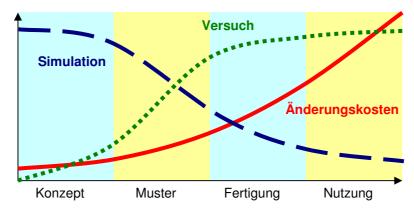


Bild1: Simulation und Versuch in Produktlebensphasen

©FVA www.simpep.de 2/13



Ein anderer Lösungsansatz ist die Verwendung von Simulationstechnik anstatt von Mustern. Das Bild 1 verdeutlicht die Vorteile dieser Technologie. Bereits in der Konzeptphase, noch bevor das Produkt überhaupt existiert, kann man mit virtuellen Modellen schon Erkenntnisse gewinnen. Damit kann man die Produkteigenschaften frühzeitig durch Änderungen der Produktparameter ohne großen Aufwand verbessern und perfektionieren. Die enorm hohen Änderungskosten im Versuch können erspart werden, Außerdem wird die Entwicklungszeit deutlich reduziert. Bis jetzt werden die Modelle jedoch hauptsächlich zur Analyse genutzt, um Fallstudien durchzuführen. In diesem Beitrag wird aufgezeigt, wie man die Modelle zur Verbesserung der Qualität und Zuverlässigkeit mittels probabilistischer Simulation und Optimierung nutzen kann.

2. Probabilistische Simulation

Die Streuungen und Unsicherheiten kann man als stochastische Zufallsvariable beschreiben, die durch einen Mittelwert oder Nennwert und eine statistische Verteilung gekennzeichnet sind. In der Probabilistik betrachtet man die Produkt- bzw. Modellparameter nicht mehr als feste Werte wie bisher, sondern als stochastische Verteilungen. Wenn in einem Massenfertigungsprozess ein Bauteil vermessen wird, stellt man fest, dass die Maße trotz vordefinierter Abmessungen nicht gleich, sondern unterschiedlich sind. Wenn diese Maße statistisch ausgewertet werden, bekommt man eine statistische Verteilung, die beliebig sein könnte. Statt eines festen Wertes für die Abmessung verwendet man nun eine stochastische Verteilung zur Beschreibung dieser Maße. Diese realistischen Aspekte werden in der probabilistischen Simulation verallgemeinert und umgesetzt. Grundlage deterministische Produktmodell, welches die Beziehungen zwischen Eingangsgrößen (Produktparameter) und Ausgangsgrößen (Produkteigenschaften) beschreibt. Es existieren verschiedene Simulationssysteme wie CAD, FEM, CFD, MKS, Netzwerksimulatoren usw., die komplexes Produktverhalten sehr genau beschreiben können. Die Streuungen und Unsicherheiten der Produktparameter werden als stochastische Verteilungen der Eingangsgrößen für das deterministische Modell erfassen. Probabilistische Simulation berechnet aus den stochastischen Verteilungen der Eingangsgrößen die Verteilungen der Ausgangsgrößen (Bild 2). Aus diesen Verteilungen der Produkteigenschaften werden die Leistung, Qualität und Zuverlässigkeit des Produktes abgeleitet und bewertet.

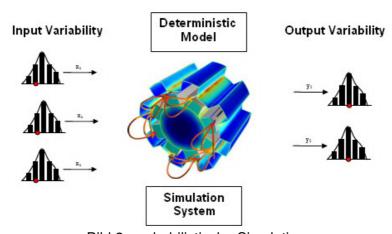


Bild 2: probabilistische Simulation

Dieser Ansatz ist allerdings nicht neu. Man versucht schon seit langer Zeit, dieses Problem software-technisch mit Monte-Carlo-Simulation oder statistischer Versuchsplanung zu lösen [4,5]. Dabei stößt man jedoch an der Grenze der Machbarkeit. Solche Verfahren benötigen enorme Ressourcen und hohen Aufwand. Tausende Modellberechnungen müssen für eine Monte-Carlo-Simulation durchgeführt werden, um statistisch brauchbare Ergebnisse zu erlangen. Für rechenintensive Produktmodelle ist dies praktisch unmöglich. Erst durch

©FVA www.simpep.de 3/13



intensive Forschungen wurden neue Verfahren wie Antwortflächenverfahren oder Moment-Methoden entwickelt. Diese basieren auf einem Ersatzmodell oder Metamodell, welches die wahren Beziehungen zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen durch eine mathematische Funktion y(x) ersetzt. Es gibt verschiedene Ansätze zur Beschreibung der mathematischen Ersatzfunktion: Polynome, Kriging, Gauss Prozess, Radial Basis Funktion, Neuronale Netze usw. Für den Polynom-Ansatz 2. Ordnung z.B. lautet die Ersatzfunktion y(x):

$$y = \beta_0 y_0 + \sum \beta_{1i} x_i + \sum \beta_{2i} x_i^2 + \sum \beta_{ij} x_i x_j$$

Dabei sind die Koeffizienten β die zu ermittelnden Unbekannten des Metamodells. Dafür werden Stützstellen mit dem echten rechenintensiven Modell durch die statistische Versuchsplanung berechnet. Für jeden Stützpunkt wird eine Modellberechnung durchgeführt. Für den Polynomansatz 2. Ordnung sind dafür (n²-n)/2+2n+1 Stützstellen erforderlich, wobei n die Anzahl der Entwurfsparameter ist. Für z.B. 4 Parameter benötigt man also nur 15 Modellberechnungen. Das ist viel schneller als tausende Modellberechnungen mit der Monte-Carlo-Simulation. Die statistischen Verteilungen der Ausgangsgrößen werden abschließend basiert auf dem Metamodell berechnet. Diese Verfahren liefern daher genaue statistische Ergebnisse [2,3,4,6]. Der Machbarkeit der probabilistischen Simulation steht nun mit der Bereitstellung solcher modernen, multidisziplinären Analyse- und Optimierungssoftware-Plattformen wie OptiY [1], nichts mehr im Wege.

2.1. Robustheitsbewertung

Die Frage lautet: "wie empfindlich reagiert mein System auf kleine Änderung der Eingangsgrößen?". Dieser Aspekt bezieht sich auf die Systemreaktion gegenüber kleinen Änderungen der Umwelt- und Einsatzbedingungen eines Produktes. Eine robuste Lösung weist keine relevante Änderung des Systemverhaltens gegenüber Streuungen der Produktparameter auf. Dies widerspiegelt sich in einer hohen und gleichbleibenden Produktqualität. Ein Sensor soll z.B. bei unterschiedlichen Temperaturen zwischen -40 ℃ bis 100 ℃ die temperaturabhängige Messgröße immer richtig erfassen.

Als Bestandteil der probabilistischen Simulation kann mach auch eine Robustheitsbewertung durchführen. Dabei werden die Verteilungen der Ausgangsgrößen und damit auch die Varianzen/Streuungen berechnet, welche die Bandbreite einer statistischen Verteilung darstellen. Wenn die Varianzen klein sind, ist das Systemverhalten robust und unempfindlich. Umgekehrt ist das Systemverhalten empfindlich, wenn die Varianzen groß sind. In diesem Fall müssen die Produkteigenschaften mittels einer Robustoptimierung verbessert werden.

2.2. Zuverlässigkeitsanalyse

Die Zuverlässigkeitsanalyse untersucht die Grenzüberschreitungen der Produkteigenschaften infolge der unvermeidbaren Streuungen der Produktparameter. Für eine Produkteigenschaft, repräsentiert durch eine Ausgangsgröße y(x) des Produktmodells, muss man zulässige untere und obere Grenzen definieren. Wenn die Produkteigenschaft y innerhalb der zulässigen Grenzen liegt:

$Untergrenze \le y \le Obergrenze$

soll das Produkt zuverlässig funktionieren. Andernfalls wird es funktionell versagen. Diese Definition ist problemspezifisch und muss für konkrete Aufgabenstellungen aus Lasten- und Pflichtenheft, Messungen, Vorserien, Erfahrungen usw. abgeleitet werden. Obwohl die Nennwerte der Produktparameter zuverlässige Werte der Produkteigenschaften liefern, können die Streuungen jedoch zu unzulässigen Werte der Produkteigenschaften und damit zum Versagen führen. Die Zuverlässigkeitsanalyse kann aufgrund der berechneten

©FVA www.simpep.de 4/13



statistischen Verteilungen der Produkteigenschaften die Versagenswahrscheinlichkeit oder Ausschussquote eines Entwurfs in prozentual eindeutig und genau ermitteln.

2.3. Sensitivitätsstudie

Mit der Sensitivitätsanalyse kann man folgende Fragen zur Reduzierung der Entwurfskomplexität und zur Erklärung von Ursache-Wirkungs-Beziehungen beantworten:

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

Lokale Sensitivitäten, wie partielle Ableitungen und Korrelationskoeffizienten, haben nur geringe Aussagekraft, weil die Produkteigenschaften nur linearisiert durch Abtastung an den Grenzen betrachtet werden. Die Eigenschaften streuen jedoch im gesamten Entwurfsraum unterschiedlich und können nichtlinear sein. Die globalen varianzbasierten Sensitivitäten wie der Sobol Index betrachten dagegen den Parametereinfluss im gesamten Entwurfsraum und berücksichtigen auch Nichtlinearitäten. Der Haupteffekt ist der Quotient aus der durch einen einzelnen Parameter verursachten Varianz (Streuung) zu der durch alle Parameter verursachten Varianz (Streuung) der Ausgangsgröße:

$$SH = Var(y|xi) / Var(y|X)$$

Der Totaleffekt summiert sich aus dem Haupteffekt und der Interaktionen zwischen den einzelnen Parametern:

$$ST = Var(y|xi) / Var(y|X) + Var(y|xi,xj)/Var(y|X)$$

3. Probabilistische Optimierung

Mit der probabilistischen Simulation kann man einen Entwurf untersuchen und bewerten. Häufig muss jedoch ein anderer Entwurfspunkt gesucht werden, weil der Ausgangsentwurf die Anforderungen nicht vollständig erfüllen konnte. Die automatische Suche nach alternativen Entwürfen unter Einbeziehungen der Parameterstreuungen nennt man probabilistische Optimierung [2,6]. Dabei werden günstigere Nennwerte und Toleranzen für die Produktparameter gesucht. Abhängig von der Zielfunktion der Optimierung unterscheidet man zwei wesentliche Optimierungsarten:

Kostenoptimierung

Neben unvermeidbaren Störgrößen, wie z.B. Einsatzbedingungen oder Umweltfaktoren, existieren auch kontrollierbare Streuungen und Unsicherheiten, wie z.B. Geometrietoleranzen und Materialeigenschaften. Diese Parameterstreuungen werden durch die Planung und Realisierung der Fertigungsprozesse beeinflusst. Sie sind.eng verbunden mit dem erforderlichen Aufwand und den daraus resultierenden Kosten.

Am Beispiel einer Maßtoleranz eines Bauteils wird dies verdeutlicht (Bild 3). Die Gesamtkosten bestehen aus verschiedenen variablen und Fix-Kostenanteile. Wenn die Toleranzen größer als die Prozessfähigkeit sind, entstehen nur Fixkosten wie Maschinen und Material. Die Prozessfähigkeit wird mit einem Prozessfähigkeitsindex beschrieben, der die Kennzahl zur statistischen Bewertung eines Prozesses in der Produktionstechnik darstellt. Bei engeren Toleranzen entstehen außerdem noch zusätzliche Kosten wie Nacharbeit, Justieraufwand, Inspektion usw. Diese Zusatzkosten steigen exponential zu den enger werdenden Toleranzen. Bei der Auswahl der Entwürfe wird der Zusammenhang zwischen der Funktionssicherheit und den damit verbundenen Kosten intensiv untersucht. Auf der einen Seite fordert die Erfüllung aller Anorderungen enge Toleranzen und führt damit zu hohen Kosten. Auf der anderen Seite verursachen grobe Toleranzen geringe Fertigungskosten, führen aber zu Ausschuss während der Serienfertigung oder zu

©FVA www.simpep.de 5/13

Funktionsausfällen beim Einsatz. Dies ist ein komplexes Problem, das eine Kompromisslösung zwischen Ausschussquote und Fertigungskosten erfordert. Es handelt sich um eine Kostenoptimierungsaufgabe, welche die festgelegten Toleranzen so lange maximiert, bis die zulässige Ausschussquote bei einer Serienfertigung erreicht wird.

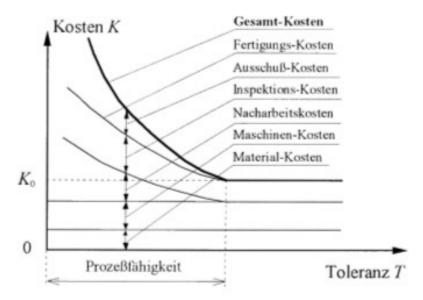


Bild 3: Toleranz-Kosten-Modell

Robustoptimierung

Es geht um das Finden günstigerer Nennwerte für die Entwurfsparameter, damit das Systemverhalten trotz der unvermeidbaren Streuungen von Eingangsgrößen robust wird. Das bedeutet, dass gleichbleibende Streuungen der Eingangsparameter keine Ausfälle beim Einsatz oder Ausschuss bei der Fertigung verursachen und zu einer kleineren Streuung der Ausgangsgrößen führen. Man spricht dann vom robusten und unempfindlichen Produktverhalten gegenüber Umweltänderungen. Es ist die Aufgabe der Robustoptimierung, die Versagenswahrscheinlichkeit des Systems zu reduzieren und gleichzeitig die Varianzen/Streuungen der Ausgangsgrößen zu minimieren. Ein idealer Entwurf hat eine Versagenswahrscheinlichkeit von Null und die minimal mögliche Streuung der Produkteigenschaften (Bild 4).

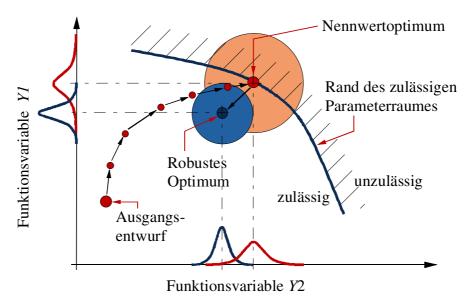


Bild 4: Robust-Optimierung

©FVA www.simpep.de 6/13



4. Beispiel "Magnetantrieb"

Die Vorgehensweise bei der probabilistischen Simulation und Optimierung kann am Beispiel des Entwurfs von schnellen elektromagnetischen Miniaturantrieben sehr gut illustriert werden. Hierbei wird der Entwickler mit fast allen Formen von Toleranzen/Streuungen konfrontiert. z.B.:

- Fertigungstoleranzen (insbesondere für Federn und für Maße von Luftspalten)
- Ungenaue magnetische Kennwerte für das verwendete Eisenmaterial
- Unzureichende Berücksichtigung von Wirbelstrom und magnetischer Hysterese in den Simulationsmodellen
- Schwankende Einsatzbedingungen (insbesondere Temperatur, Lastkräfte und Betriebsspannung)

Gewählt wird hier das Beispiel eines Magnet-Antriebes für eine Blindenschrift-Prägenadel. Dieses Beispiel wurde im Rahmen einer Lehrveranstaltung "Konstruktionstechnik" am Institut für Feinwerktechnik und Elektronik-Design der TU Dresden in Form einer ausführlichen Übungsanleitung didaktisch aufbereitet [7].

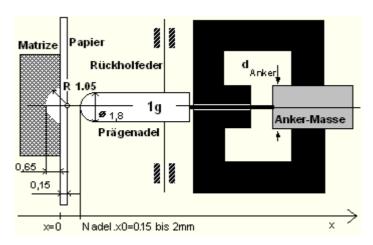


Bild 5: Prinzipskizze für den Blindenschrift-Nadelantrieb

Mit einer Präge-Nadel sollen möglichst schnell die Punkte von Blindenschrift in Papier geprägt werden. Für ein Funktionsmuster wird eine optimale Lösung gesucht, die trotz aller Toleranzen/Streuungen stabil funktioniert. Die dynamische Simulation erfolgt mit einem Netzwerk-Modell im Programmsystem SimulationX der Firma ITI GmbH aus Dresden.

Das Modell berücksichtigt die Antriebsmechanik, den Wandler, die elektrische Ansteuerung, die Spulen-Erwärmung sowie eine vereinfachte Magnet-Geometrie einschließlich der Wicklungsparameter.

Aus den simulierten Signalverläufen erfolgt im Modell die Berechnung der für die Bewertung des Antriebsverhaltens erforderlichen Bewertungsgrößen (Bild 6):

- tZyklus (Zeit für einen Bewegungszyklus der Nadel)
- **Praegung** (ein Maß für die erfolgreiche Prägung des Papiers)
- **iMax** (Maximalstrom während eines Präge-Zyklus)
- vMax (Abschaltspannung an der Spule)
- **dT Draht** (Erwärmung des Spulen-Drahtes im Dauerbetrieb)

©FVA www.simpep.de 7/13



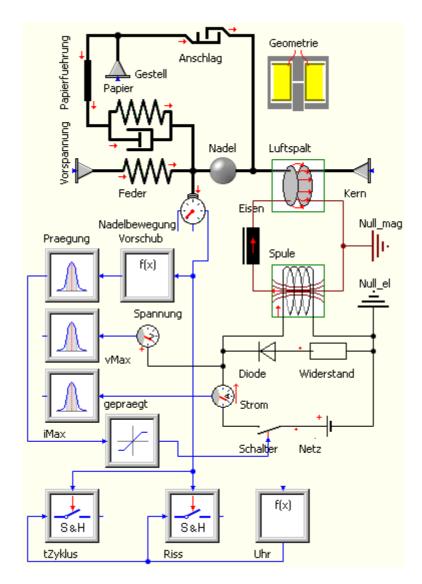


Bild 6: Struktur des Netzwerk-Modells im SimulationX

In dieser sehr frühen Entwurfsphase wurde eine Nennwert-Optimierung auf der Grundlage nur weniger konstruktiver Basis-Parameter vorgenommen. Dabei handelt es sich um die Kenngrößen des Elektromagneten und um die Nennwerte elektrischer bzw. mechanischer Bauelemente:

- **d_Anker** (Durchmesser des beweglichen Magnet-Ankers)
- w_Spule (Windungszahl der Magnetspule)
- R20_Spule (Widerstand des Spulendrahtes bei 20 ℃)
- k_Feder (Elastizitätskonstante der Rückholfeder für die Präge-Nadel)
- R_Abschalt (Widerstand als Überspannungsschutz beim Abschalten der Spule)

Für die Nennwert-Optimierung wurde im Programm OptiY ein Experiment in Form eines Workflows definiert (Bild 7). Dieser Workflow beschreibt, wie die zu verändernden Entwurfsparameter in vorhandene deterministische Modelle einzuspeisen sind und wie aus den Modellen die erforderlichen Bewertungsgrößen gewonnen werden. Im Beispiel wird nur das obige SimulationX-Modell **Prägeantrieb** in den Workflow eingebunden. Die Verwendung unterschiedlicher Modelle ist jedoch problemlos möglich (z.B. FEM, CAD, ...).

©FVA www.simpep.de 8/13



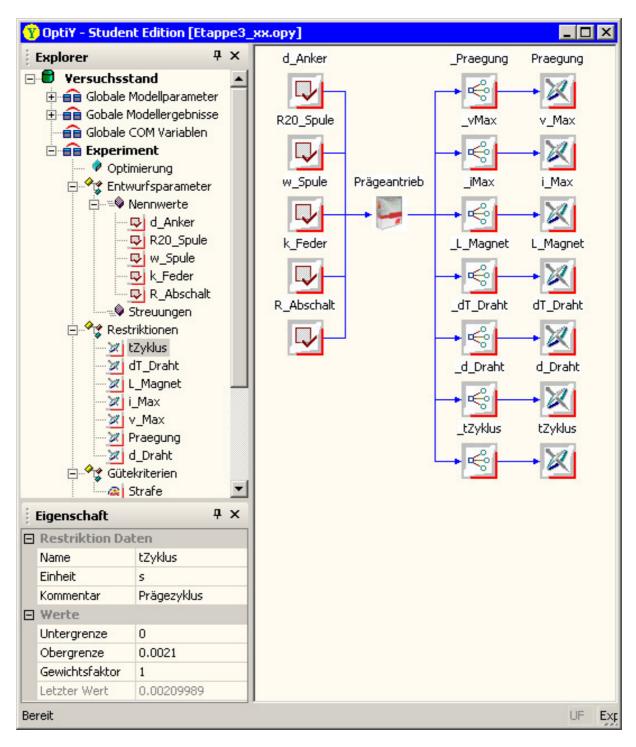


Bild 7: Experiment-Workflow für die Nennwert-Optimierung

Die Nennwert-Optimierung reizt zulässige Grenzwerte der Restriktionsgrößen meist aus, um ein "Maximum" an Funktionalität zu erreichen. Damit liegt ein Nennwert-Optimum praktisch immer an der Grenze zum unzulässigen Verhalten. Im Beispiel werden für die Spule sowohl die zulässigen elektrischen Grenzwerte (Strom und Spannung), als auch die thermischen Grenzwerte (Erwärmung) voll ausgeschöpft (Bild 8).

©FVA www.simpep.de 9/13



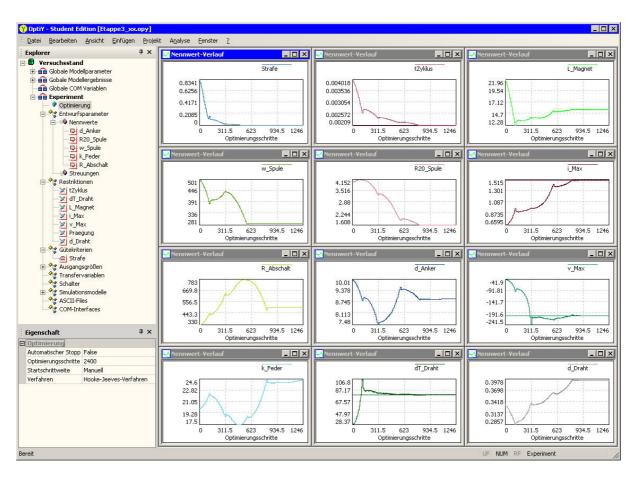


Bild 8: Verlauf der Nennwert-Optimierung

Je besser man mit einer Nennwert-Optimierung die zulässigen Grenzwerte ausreizt, desto sicherer erreicht man eine Versagenswahrscheinlichkeit der optimierten Lösung von 50%, wenn die realen Toleranzen/Streuungen in der probabilistischen Simulation ihre Wirkung entfalten können.

Auch wenn sämtliche Parameter eines realen Antriebs mit Streuungen behaftet sind, muss man aus Aufwandsgründen eine Reduktion auf die relevante Streuungen vornehmen, z.B.:

- Temperatur T der Spule (0 °C bis 100 °C) Gleich verteilt
- Betriebspannung u (±10%) Gleich verteilt
- Schutzwiderstand RS (±5%) Normal verteilt
- Federkonstante kF der Rückholfeder (±30%) Normal verteilt
- Papiersteifheit kP (±50%) Normal verteilt

Ausgehend von einer unakzeptablen Versagenswahrscheinlichkeit (markierte Ausgangslösung in Bild 9), führt eine probabilistische Optimierung unter Berücksichtigung der Verhaltensstreuungen zu einer Minimierung der Ausschussquote (Versagen=0 in Bild 9). Das entspricht dem Verschieben der gesamten Verhaltensstreuung in den zulässigen Bereich (Siehe Bild 4), allerdings ohne dabei die Streubreite des Verhaltens selbst zu Minimieren.

Hinweis: Das "Versagen" in Bild 9 ist nur eine Hilfsgröße für die Optimierung (Summe der Teilversagenswahrscheinlichkeiten) und darf nicht verwechselt werden mit der realen Versagenswahrscheinlichkeit des Antriebs.

©FVA www.simpep.de 10/13



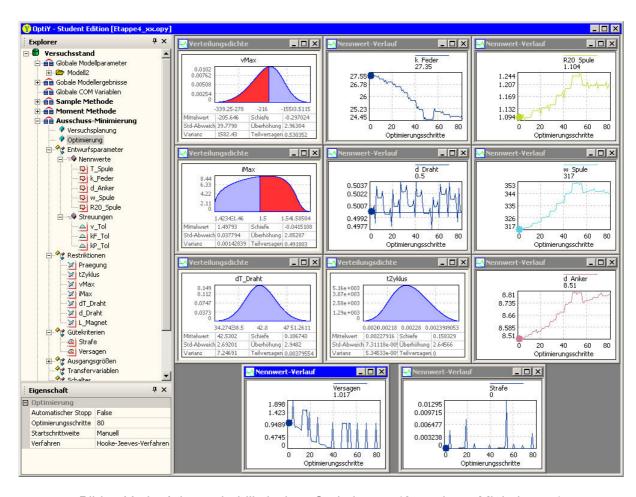


Bild 9: Verlauf der probabilistischen Optimierung (Ausschuss-Minimierung)

Derartige Optimierungen sind praktisch nur durchführbar, wenn man zuvor probabilistische Analysen nutzt, um den erforderlichen Berechnungsaufwand soweit wie möglich zu reduzieren. Eine unverzichtbare Entscheidungshilfe bieten hierfür die Sensitivität-Charts:

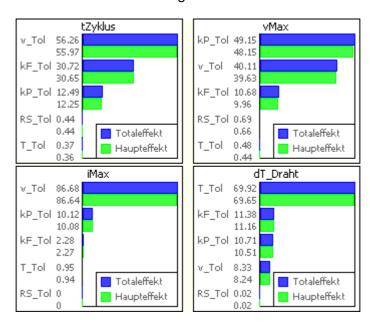


Bild 10: Sensitivität-Charts

©FVA www.simpep.de 11/13



Den Sensitivität-Charts kann man in Hinblick auf die gewünschte Reduktion der Anzahl der Modellberechnungen für eine probabilistische Simulation zwei wesentliche Informationen entnehmen (Bild 10):

- 1. Es existieren keine merklichen Interaktionen zwischen den betrachteten Streuungen. Deshalb genügt für die probabilistische Simulation ein reduziertes Verfahren mit wesentlich weniger Modellberechnungen.
- 2. Von den anfänglich in Betracht gezogenen fünf Streuungen erweisen sich im Beispiel nur drei Streuungen als relevant (Betriebsspannung, Federkonstante und Papiersteifheit).

Die Ausschuss-Minimierung erfolgte durch Freigabe vier wesentlicher Entwurfsparameter des Nadel-Antriebes (Ankerdurchmesser, Windungszahl, Spulenwiderstand, Rückholfeder) bei vorgegebener Maximaltemperatur der Spule.

Eine Ausschuss-Minimierung ist mit der probabilistischen Optimierung relativ problemlos durchführbar. Aufwändiger gestaltet sich jedoch eine zusätzliche Robust-Optimierung zur Verringerung der Verhaltensstreuung:

- Es sind meist mehrere Varianzen (Streuungen) von Verhaltenskenngrößen zu minimieren, zwischen deren Minimierung Konflikte existieren. Man muss sich deshalb für eine Kompromisslösung entscheiden.
- Die Berechnung der erforderlichen Pareto-optimalen Lösungsmenge ist nur mit evolutionären Verfahren der numerischen Optimierung möglich. Solche evolutionären Verfahren bedingen einen zusätzlichen, relativ großen Berechnungsaufwand.

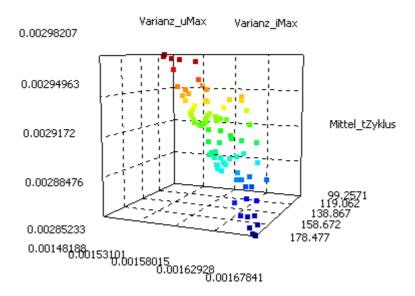


Bild 11: Pareto-optimale Lösungsmenge mit drei Teilgüten

Jeder Punkt der Pareto-optimalen Lösungsmenge repräsentiert im Bild 11 eine konkrete Lösung für das Antriebssystem. Für welche Lösung man sich entscheidet, ist davon abhängig, wie viel Verschlechterung einzelner Gütekriterien man akzeptiert, um anderen Kriterien noch möglichst gut zu genügen. Im Programm OptiY stehen für die einzelnen Lösungspunkte wieder sämtliche probabilistischen Analysen zu Verfügung.

©FVA www.simpep.de 12/13



5. Zusammenfassung

Qualität und Zuverlässigkeit eines Produktes sind durch Streuungen, Unsicherheiten, Fertigungstoleranzen und Fehler gekennzeichnet. Um diese Probleme bereits in der Entwurfsphase in den Griff zu bekommen, verwendet man probabilistische Methoden. Auf der Basis des virtuellen Produktmodells werden die statistischen Verteilungen der Produkteigenschaften aus den Verteilungen der Produktparameter berechnet. Damit lassen sich die Robustheit und Zuverlässigkeit des betrachteten Entwurfs bewerten. Eine Erklärung der Ursache-Wirkungs-Beziehungen und Reduzierung der Entwurfskomplexität kann man mit der Sensitivitätsanalyse realisieren.

Am Beispiel eines Magnet-Antriebes wurden die grundsätzlichen Möglichkeiten der probabilistischen Simulation und Optimierung demonstriert. Die ganze Bandbreite der Möglichkeiten würde den Umfang dieses Artikels sprengen. Interessenten werden hierfür auf die ausführliche Dokumentation dieses Entwurfsprozesses in [7] verwiesen.

6. Literaturhinweise

- [1] OptiY Software und Dokumentation. Version 3.2. OptiY e.K. 2009, www.optiy.de
- [2] T.Q. Pham, A. Kamusella: *Zuverlässigkeitsanalyse und zuverlässigkeitsbasierte*Optimierung mit probabilistischen Methoden am Beispiel eines Magnetantriebes. VDIFachtagung Technische Zuverlässigkeit, 29-30 April 2009 in Leonberg.
- [3] T.Q. Pham, A. Kamusella: *Multidisziplinäre Zuverlässigkeits- und Robustheitsanalyse mechatronischer Systeme*. Internationales Forum Mechatronik, 16-17 Oktober 2006 in Linz
- [4] K. Yang, B. S. El-Haik: *Design for Six Sigma: A Roadmap for Product Development*. McGraw-Hill Professional 2008.
- [5] B. Bertsche, G. Lechner: *Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau*. VDI Springer-Verlag 2004
- [6] A. Vlahinos, K. Kelly, A. Pesaran, T. Penny: *Empowering Engineers to Generate Six-Sigma Quality Design*. American Society for Quality, Technical Paper Series 2003
- [7] A. Kamusellla: Übungsunterlagen zur Lehrveranstaltung Konstruktionstechnik. 2009, www.ifte.de/lehre/konstruktionstechnik/uebung.html

©FVA www.simpep.de 13/13