

Zuverlässigkeitsanalyse und zuverlässigkeitsbasierte Optimierung mit probabilistischen Methoden am Beispiel eines Magnetantriebes

Dr.-Ing. The-Quan Pham

OptiY e.K.

Aschaffenburg

Dr.-Ing. Alfred Kamusella

Institut für Feinwerktechnik und Elektronik-Design

TU Dresden

24. VDI-Fachtagung Technische Zuverlässigkeit

29-30 April 2009 in Leonberg

Gliederung

- 1. Problemstellungen**
- 2. Überblick über probabilistische Methoden**
 1. Monte-Carlo-Sampling (Stochastische Simulation)
 2. Antwortflächenverfahren (Response Surface Methodology)
 3. Analytische Verfahren (Moment Methoden)
- 3. Probabilistisches Design**
- 4. Anwendungsbeispiel: Magnetantrieb**
 1. Problembeschreibung
 2. Nennwert-Optimierung
 3. Probabilistische Simulation: Zuverlässigkeit und Robustheit
 4. Zuverlässigkeitsbasierte Optimierung
- 5. Zusammenfassung / Diskussion**

Problemstellungen

Eigenschaften technischer Systeme

- Nennwert (exakter Wert)
- Toleranz (Streuungen)
- Stochastische Verteilung

Ursachen

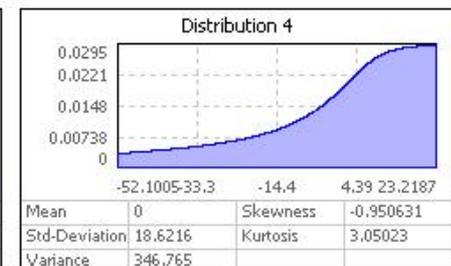
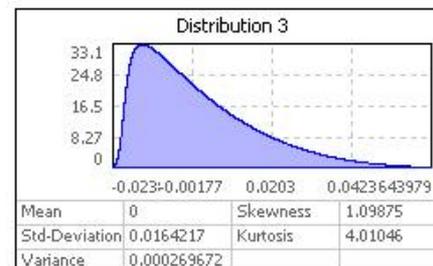
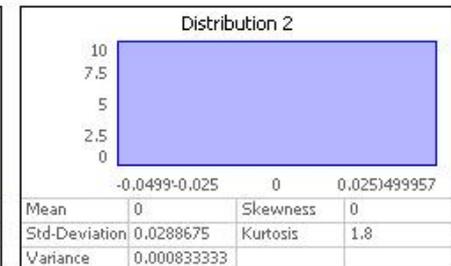
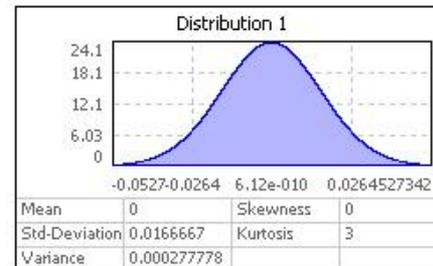
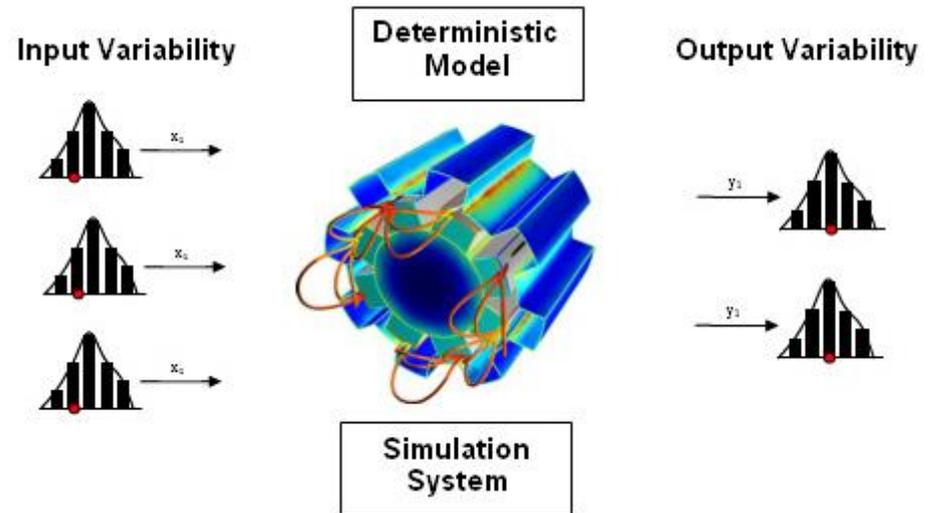
- Fertigungsungenauigkeit
- Umweltbedingungen
- Materialeigenschaften usw.

Probleme

- Verschlechterung der Produktqualität
- Versagen: z.B. 20% funktionieren nicht

Bisherige Lösung

- Sicherheitsfaktoren, Statistische Versuchsmethode
- Viele Versuchsmuster, Hoher Aufwand, Zeit und Kosten



Überblick über probabilistische Methoden

- Monte-Carlo-Sampling (Stochastische Simulation)
- Antwortflächenverfahren (Response Surface Methodology)
- Analytische Verfahren (Moment Methoden)

Berechnung der statistischen Verteilungen der Ausgangsgrößen aus den Verteilungen der Eingangsgrößen auf der Basis des virtuellen deterministischen Produktmodells

Alleinige Werkzeuge zur frühzeitigen Untersuchung der Qualität und Zuverlässigkeit eines Produktes bei Serienfertigung und Einsatz und zwar bereits in der Entwurfsphase

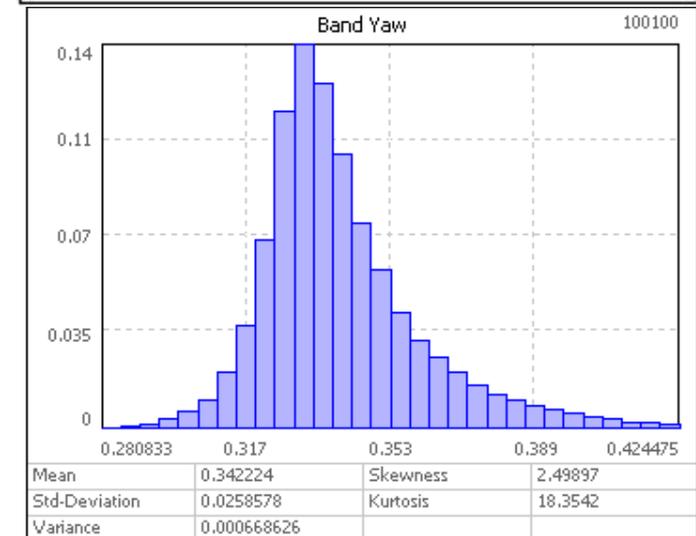
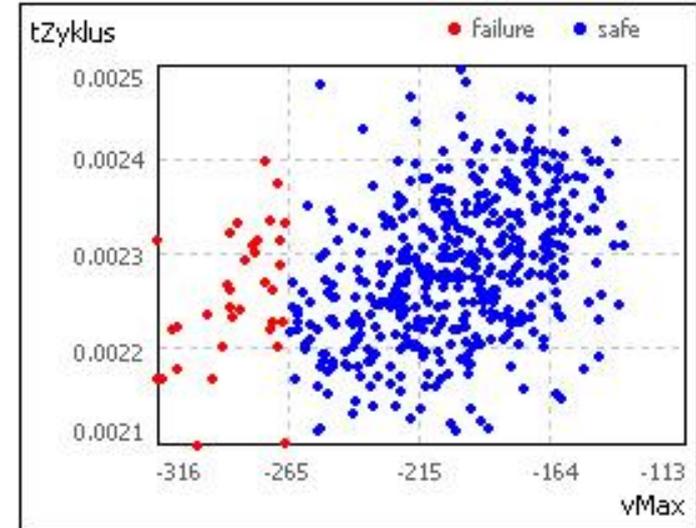
Monte-Carlo-Sampling (Stochastische Simulation)

Prinzip (Stand der Technik)

- Generierung der Streuungen mittels Zufallszahlen
- Verschiedene Prinzipien der Zufallszahlengenerierung: Reine Monte-Carlo, Latin Hypercube und Sobol
- Für jeden zufallsgenerierten Parametersatz wird eine Modellberechnung durchgeführt
- Bewertungsgrößen am Ende statistisch auswerten

Vor- und Nachteile

- Kein Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgrößen nötig
- Einfach zu implementieren
- Konvergenz nur bei einem großen Stichprobenumfang
- Tausende Modelldurchrechnungen nötig (sehr lange Berechnungszeiten!)
- Ergebnisse sind wegen der Zufallszahlen stochastisch und instabil
- Nicht geeignet für eine zuverlässigkeitsbasierte Optimierung



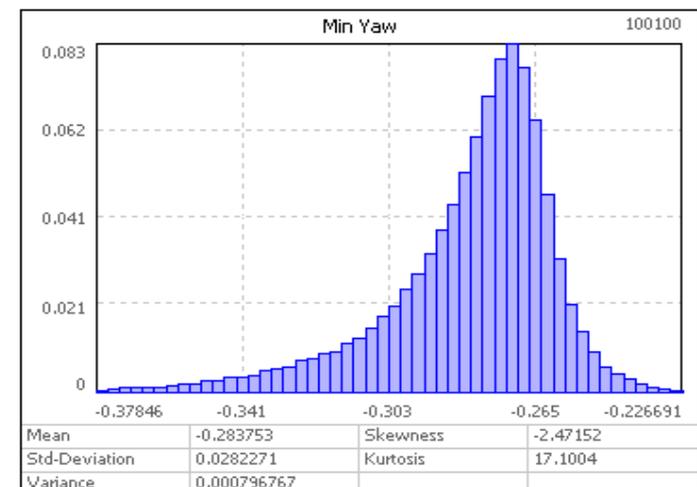
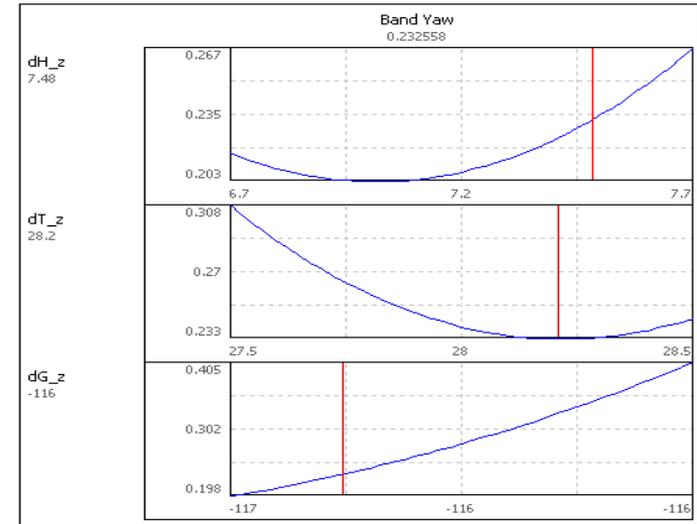
Antwortflächen-Verfahren (Response Surface Methodology)

Prinzip (Stand der Technik)

- Generierung von Stützstellen mittels Zufallszahlen oder statistischer Versuchsplanung
- Modellberechnungen in den Stützstellen
- Funktionsapproximation durch die Stützstellen nach verschiedenen Prinzipien: Polynome, Gauss Prozess, Radial Basis
- Generierung der Streuungen mittels Zufallszahlen
- Für jede Zufallszahl wird eine virtuelle Modellberechnung mit der approximierten Funktion durchgeführt
- Bewertungsgrößen am Ende statistisch auswerten

Vor- und Nachteile

- Sehr hohe Genauigkeit durch Approximation höherer Ordnung
- Sehr schnelle Rechenzeit
- Ergebnisse sind wegen der Zufallszahlen jedoch weiterhin stochastisch und instabil
- Nur bedingt geeignet für eine zuverlässigkeitsbasierte Optimierung



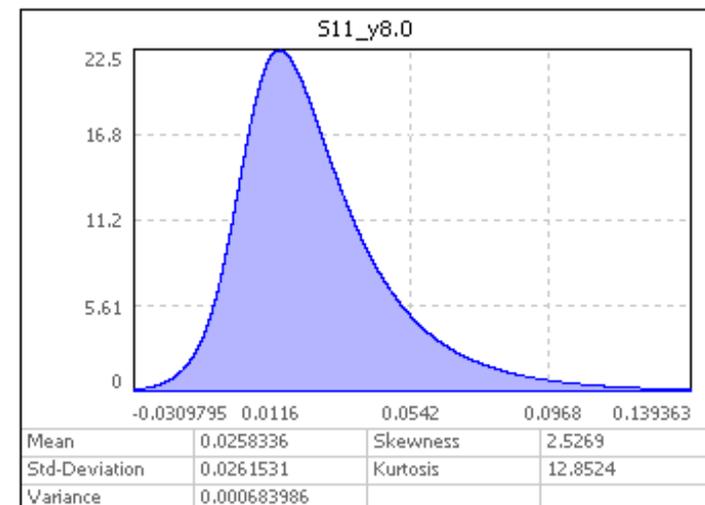
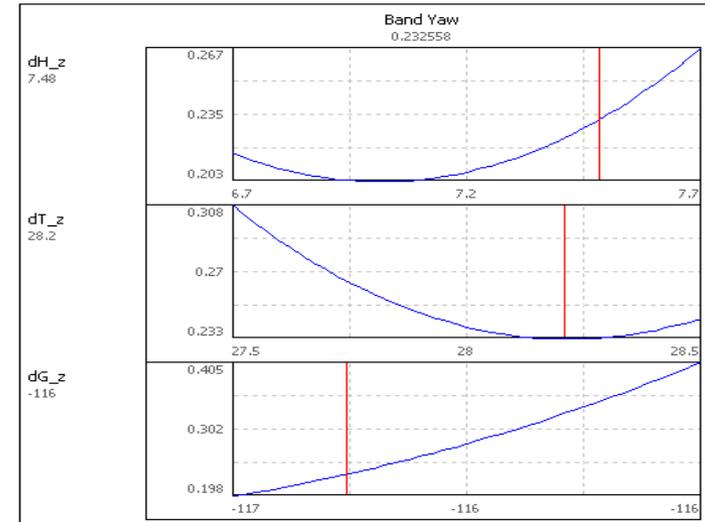
Analytische Verfahren (Moment-Methoden)

Prinzip (Neu)

- Generierung der Stützstellen mittels statistischer Versuchsplanung (partielle Ableitungen)
- Modellberechnungen an den Stützstellen
- Übertragungsfunktionen werden auf Basis von Modellabtastungen durch Taylor-Reihen erster oder zweiter Ordnung approximiert
- Berechnung der statistischen Output-Momente aus Input-Momenten
- Anpassung der Verteilungen mit Momenten aus bekannten Tabellen

Vor- und Nachteile

- Approximation nur bis zur 2. Ordnung möglich (Für die meisten Fälle reicht es völlig aus)
- Sehr schnelle Rechenzeit
- Ergebnisse sind analytisch eindeutig und stabil
- Sehr geeignet für eine schnelle zuverlässigkeitsbasierte Optimierung



Probabilistisches Design

Sensitivitätsanalyse

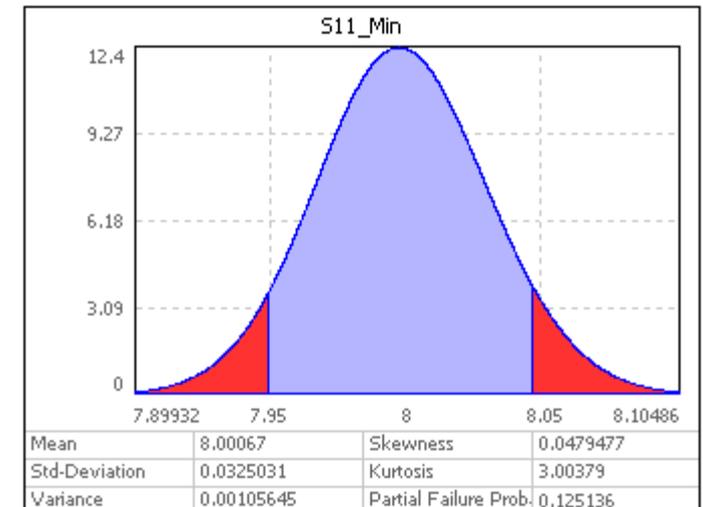
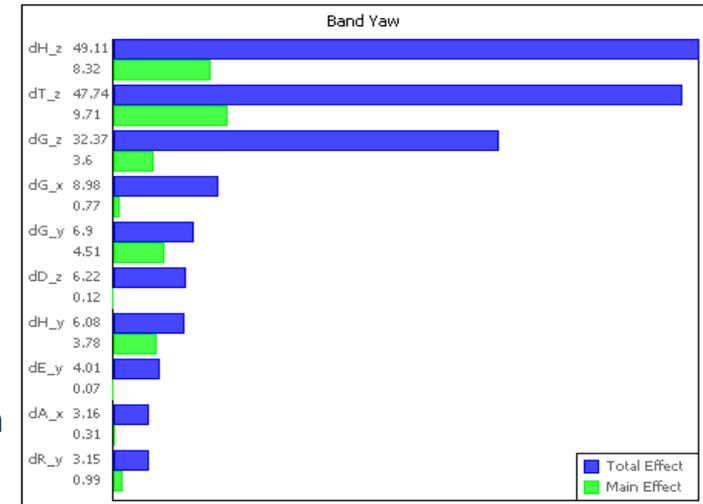
- Identifikation der wesentlichen Einflussgrößen
- Insignifikante Modellparameter vernachlässigen
- Interaktionen zwischen den Eingangsgrößen ermitteln

Zuverlässigkeitsanalyse

- Funktionssicherheit ist durch Restriktionen gekennzeichnet
- Parameterstreuungen führen zu Streuungen der Restriktionen
- Zuverlässigkeitsanalyse untersucht Grenzüberschreitungen der Restriktionen in Folge der Streuungen

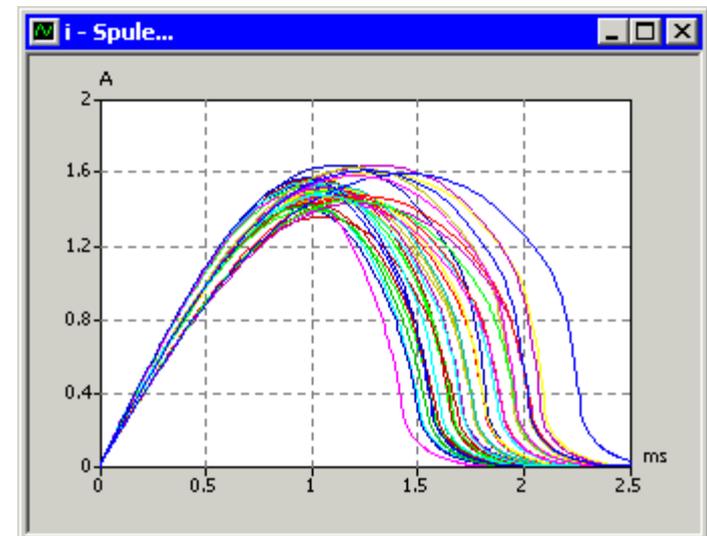
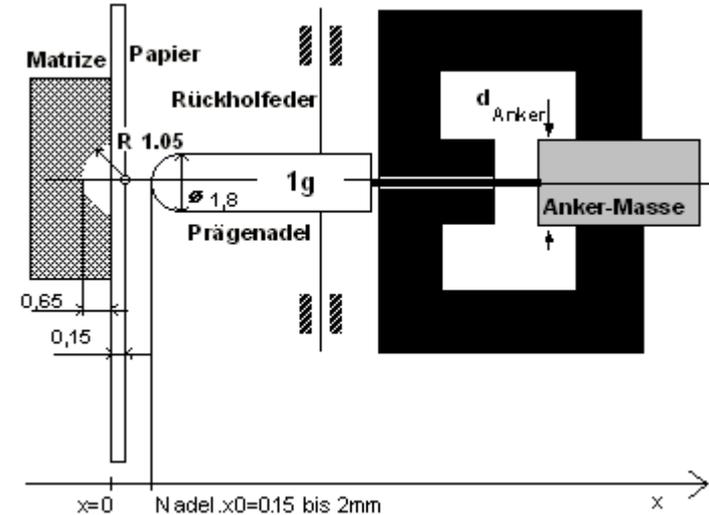
Robustheitsbewertung

- Hohe Produktqualität durch geringe Streuungen der Bewertungsgrößen (Robustes Verhalten)
- Berechnung der Varianzen der Bewertungsgrößen:
 - Kleine Varianz -> Robuste Lösung
 - Große Varianz -> Nicht robuste Lösung



Anwendungsbeispiel: Magnetantrieb

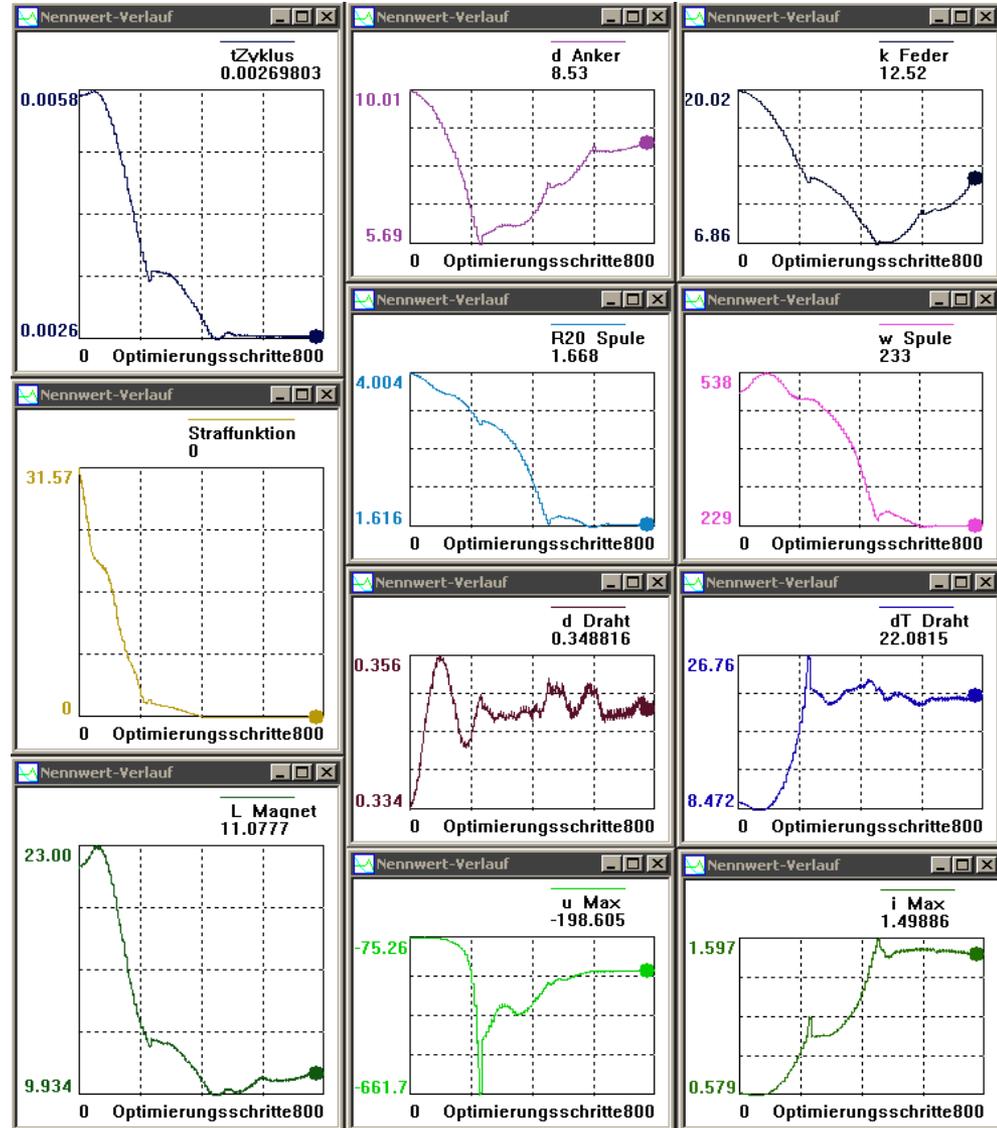
- **Nadelantrieb für Blindenschrift-Präger:**
 - Modell: Mechanik, Elektro-Magnet, Elektronik, Wärme
 - Prägung: 130 Zeichen/Sekunde
- **Anforderungen:**
 - möglichst schnelle Zykluszeit (Zykluszeit < 3,4 ms)
 - Zuverlässige Prägung (immer prägen)
 - Grenzen für Spulenstrom/-spannung (<1.5 A, 200 V)
 - Zulässige Erwärmung (< 50 K)
- **Toleranzen/Streuungen:**
 - Temperatur T der Spule (0°C bis 100°C) - *Gleichverteilung*
 - Betriebsspannung u ($\pm 10\%$) - *Gleichverteilung*
 - Schutzwiderstand R_S ($\pm 5\%$) - *Normalverteilung*
 - Federkonstante k_F der Rückholfeder ($\pm 30\%$) - *Normalverteilung*
 - Papiersteifheit k_P ($\pm 50\%$) - *Normalverteilung*



Nennwert-Optimierung

Ergebnis sind „optimale“ Nennwerte für die Entwurfsparameter unter idealen Betriebsbedingungen ohne Streuungen

- Die Gütekriterien werden möglichst gut erfüllt (Zykluszeit ist minimal).
- Alle Forderungen (Restriktionen) werden erfüllt (z.B. maximaler Strom bzw. zulässige Abschaltspannung nicht überschritten).
- Für technische Systeme liegt das Nennwert-Optimum meist an den Grenzen der zulässigen Belastbarkeit von System-Komponenten bzw. der Umgebung. (z.B. i_{Max} und u_{Max})



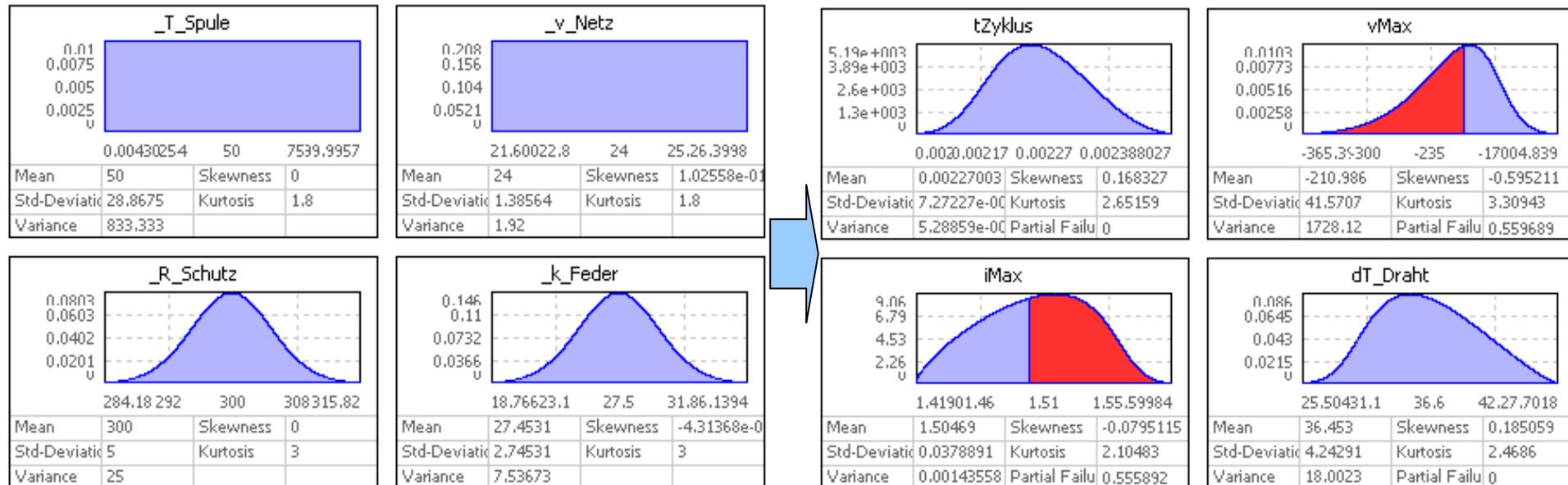
Probabilistische Simulation: Zuverlässigkeit und Robustheit

- Das analytische Verfahren der *Second Order Moment Methode* ermittelt mit $2n^2+1$ Modellrechnungen die Verteilungen aller Bewertungsgrößen als Funktion der Parameterstreuungen. Bei 5 Streuungen benötigt man 51 Modellberechnungen.
- Die **Versagenswahrscheinlichkeit** beträgt ca. **50%** für den optimalen Nennwert-Entwurf. Überschreitung der zulässigen Grenzwerte des Spulenstroms i_{Max} und der Abschaltspannung v_{Max} . Die Zykluszeit ist robust und die Prägung immer zuverlässig.

Parameter-Streuungen



Streuungen der Eigenschaften



Varianzbasierte Sensitivitätsanalyse

Reduzierung der Komplexität Erklärung der Ursache-Wirkungs-Beziehung

Welche Streuungen vernachlässigbar?

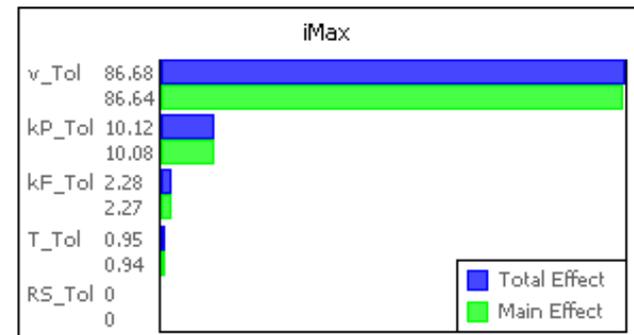
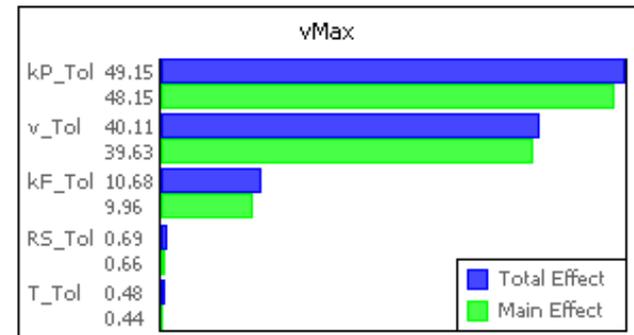
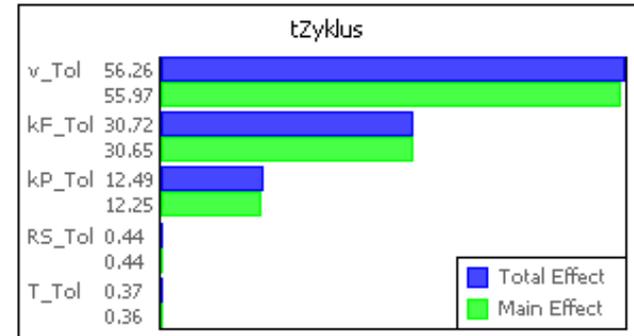
- Das Pareto-Chart zeigt, in welchem Maße ein bestimmtes Ergebnis (Effekt) durch eine bestimmte Ursache (Streuung) hervorgerufen wurde.
- Bei Vernachlässigung des Abschaltwiderstands und der Spulentemperatur reduziert sich die Berechnung einer Stichprobe ($2n^2+1$) von 51 auf 19 Simulationsläufe!

Interaktionen zwischen Streuungen vernachlässigbar?

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

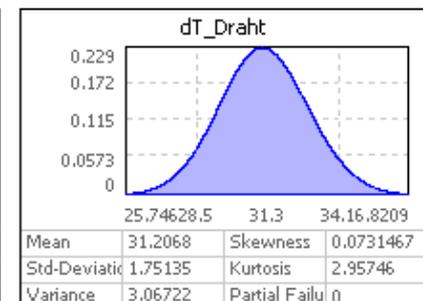
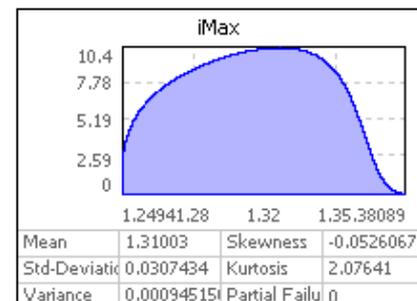
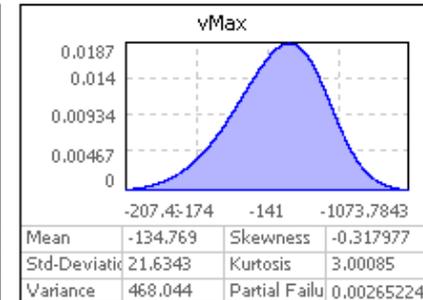
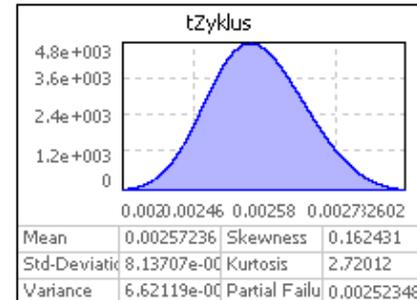
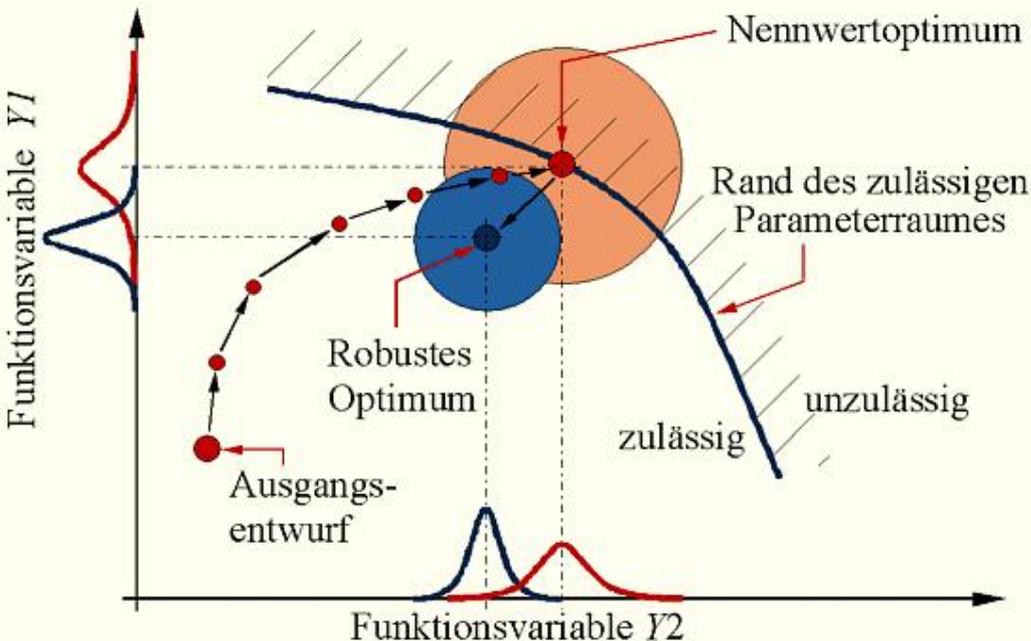
$$\text{Totaleffekt} = \text{Var}(Y|X_i) / \text{Var}(Y|X) + \text{Interaktionen}$$

- Gibt es keine Interaktionen zwischen den Streuungen, so sind die Werte beider Effekte gleich. Dann kann man den größten Teil der Modellrechnungen einsparen und das Verfahren der *Moment Methode ohne Interaktionen* nutzen.
- Mit 7 Simulationsläufen ($2n+1$) erhält man im Beispiel die gleichen Ergebnisse wie vor der Reduktion mit 51 Läufen!



Zuverlässigkeitsbasierte Optimierung

- Ziel ist die Minimierung der Versagenswahrscheinlichkeit (Zielfunktion der Optimierung). Verschiebung der gesamten Streuungen in zulässige Gebiete mittels numerischer Optimierung (Hooke-Jeeves-Methode). Nur unter Anwendung der *Moment-Methode* möglich.
- Nach ca. 40 Optimierungsschritte (280 Modellberechnungen) konvergiert die Optimierung. Die erreichten optimalen Entwurfparameter zeigen keine Überschreitung der zulässigen Grenzwerte trotz der Streuungen. Man spricht vom zuverlässigen Entwurf.



Zusammenfassung

- Parameterstreuungen wegen der Fertigungstoleranzen, Materialeigenschaften, Prozessunsicherheit usw. führen zur Verschlechterung der Produktqualität und Zuverlässigkeit.
- Probabilistische Methoden sind alleinige und effektive Werkzeuge, um diese Problematik basierend auf deterministischen Produktmodellen in der Entwurfsphase zu bewältigen.
- Neben klassischen Verfahren entstehen zur Zeit neue robuste und schnelle analytische Verfahren. Diese ermöglichen eine schnelle Robustoptimierung von rechenintensiven Modellen.
- Die Anwendung am Magnetantrieb veranschaulicht Nutzen und Vorteile. Ausgehend von einer Nennwert-Optimierung wird eine Versagenswahrscheinlichkeit von ca. 50% berechnet. Erst eine zuverlässigkeitsbasierte Optimierung führt zu wirklich optimalen Produktparametern, die trotz der unvermeidbaren Streuungen die erforderliche Funktionssicherheit und Robustheit gewährleisten.