

# Kostengünstige Entwicklung von Qualitätsprodukten durch probabilistische Simulation und Optimierung

Dr.-Ing. The-Quan Pham

OptiY GmbH

Aschaffenburg

Dr.-Ing. Alfred Kamusella

Institut für Feinwerktechnik und Elektronik-Design

TU Dresden

FVA Kongress zur Simulation im Produktentstehungsprozess

18.-19. Juni 2009 in Veitshöchheim

## Gliederung

1. Problemstellung
2. Probabilistische Simulation
3. Probabilistische Optimierung
4. Beispiel: Magnetantrieb

### Problemstellung

#### Eigenschaften technischer Systeme

- Nennwerte (exakte Werte)
- Toleranzen (Streuungen)

#### Ursachen

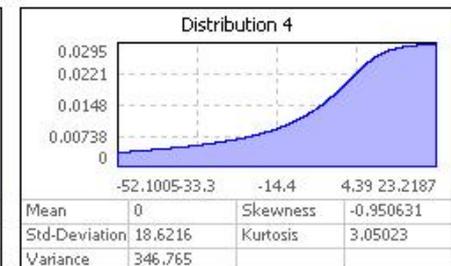
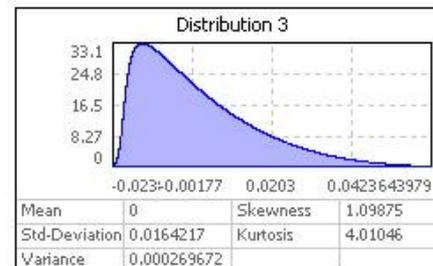
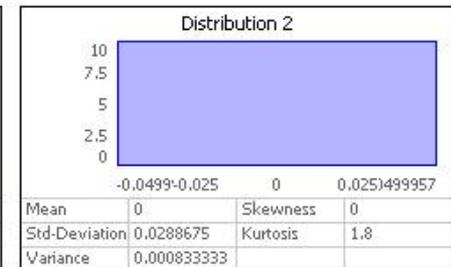
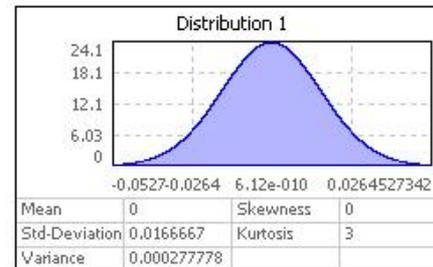
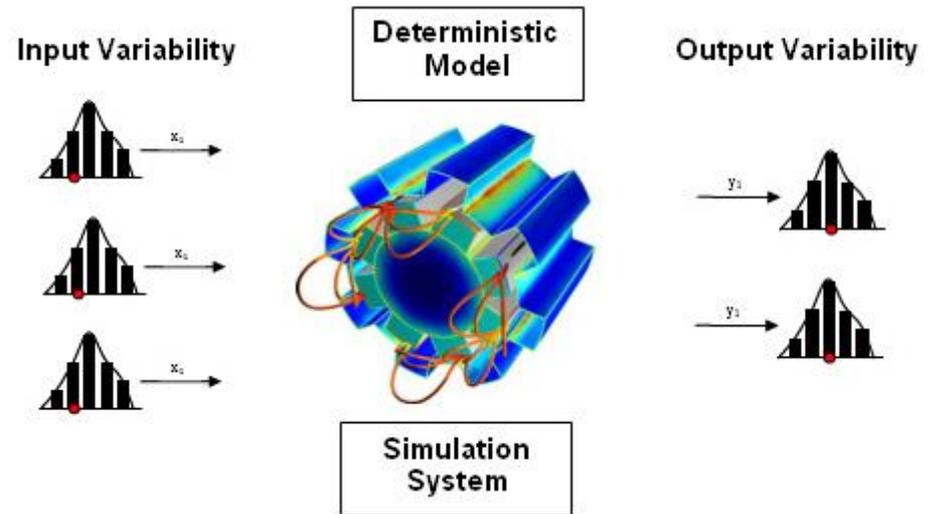
- Fertigungsungenauigkeit
- Umweltbedingungen
- Materialeigenschaften
- Prozessunsicherheit usw.

#### Probleme

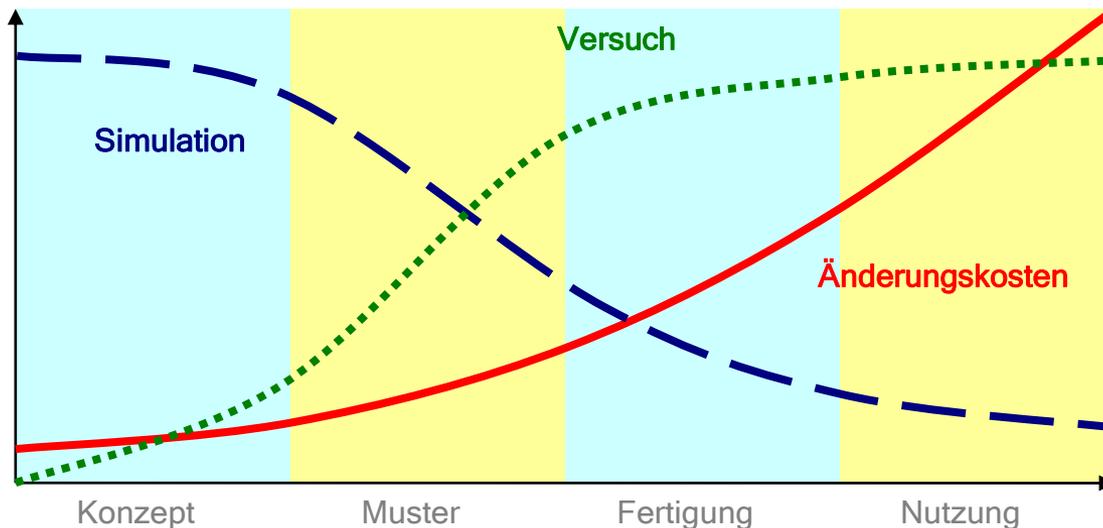
- Verschlechterung der Produktqualität
- Versagen: z.B. 20% funktionieren nicht

#### Bisherige Lösung in Industrie

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



### Simulation im Produktentstehungsprozess



#### Simulation versus Versuch

- Erkenntnisgewinnung in der Konzeptphase vor dem Prototype
- Schnelle Änderungen der Produkteigenschaften ohne großen Aufwand möglich
- Ersatz von teureren Versuchsmustern

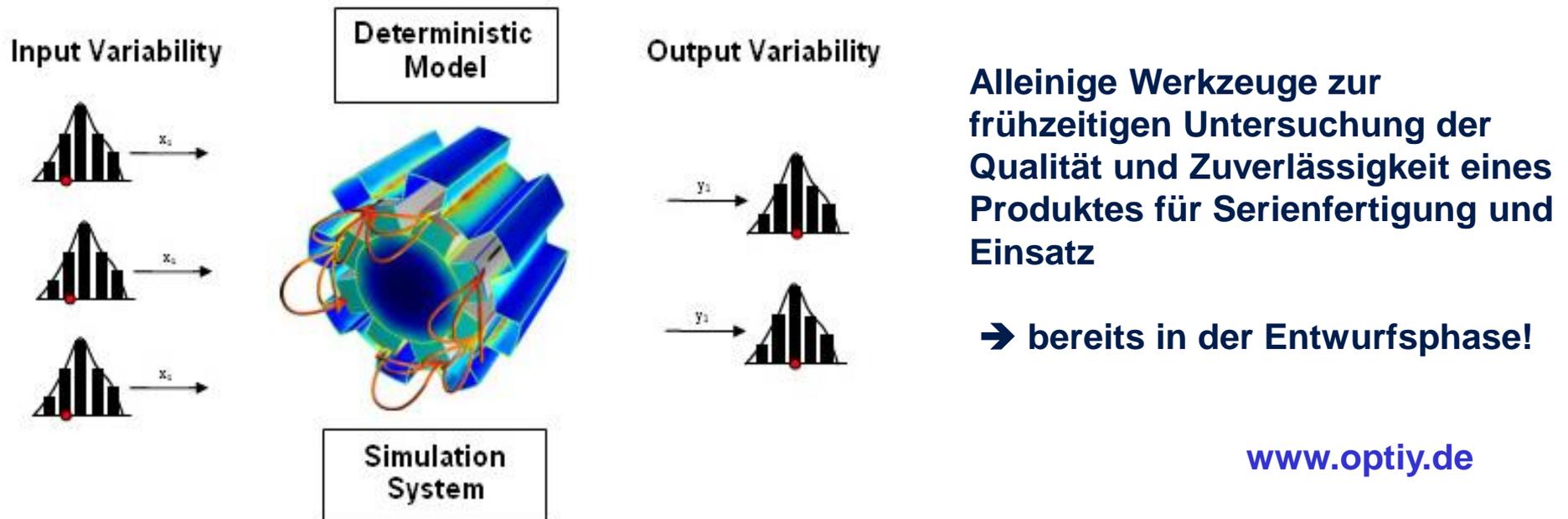
#### Einsatz von Simulationen

- Fallstudien: Ändern der Produktparameter -> Änderung der Produkteigenschaften in Form von deterministischen Modellen
- Probleme der funktionellen Prototype-Entwicklung behandeln
- Probleme bei der Serienfertigung und Nutzung zur Sicherung von **Qualität** und **Zuverlässigkeit** ---> **noch nicht möglich!**

### Überblick über probabilistische Methoden

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

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



## Probabilistische Simulation

### Zuverlässigkeitsanalyse

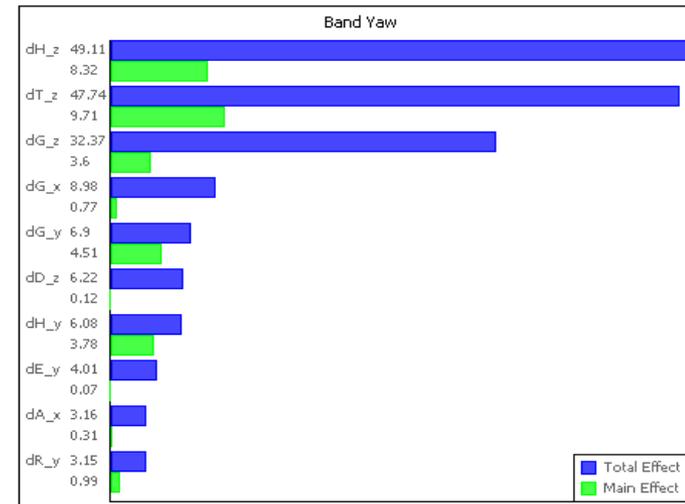
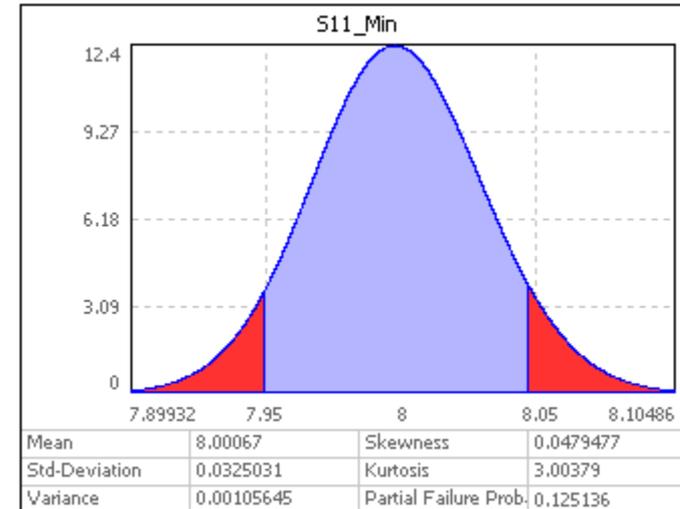
- Funktionssicherheit wird über Grenzwerte von Restriktionsgrößen definiert
- Parameterstreuungen führen zu Streuungen der Restriktionsgrößen
- Zuverlässigkeitsanalyse untersucht Grenzüberschreitungen der Restriktionsgrößen in Folge der Streuungen

### Robustheitsbewertung

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

### Sensitivitätsanalyse

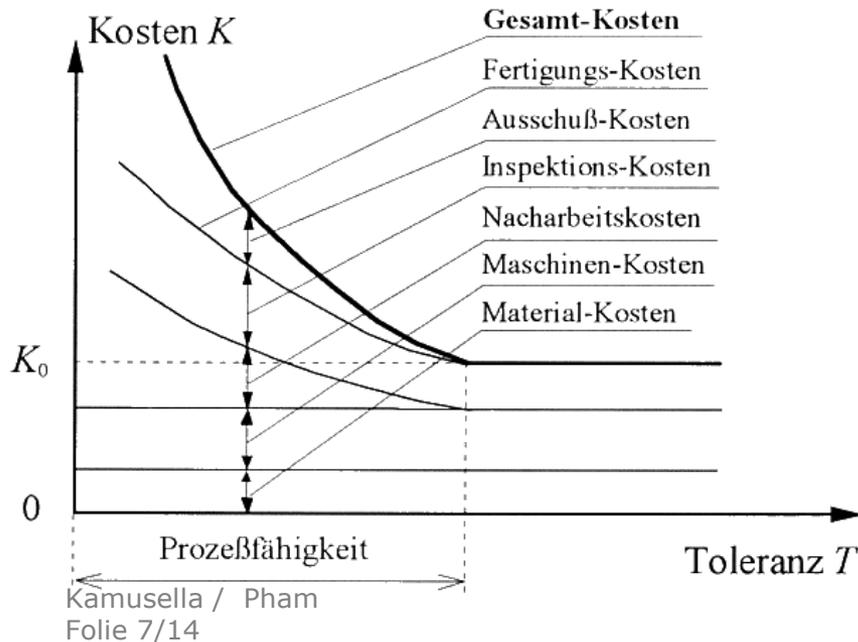
- Identifikation der wesentlichen Einflussgrößen
- Insignifikante Modellparameter vernachlässigen
- Interaktionen zwischen den Eingangsgrößen ermitteln



### Probabilistische Optimierung

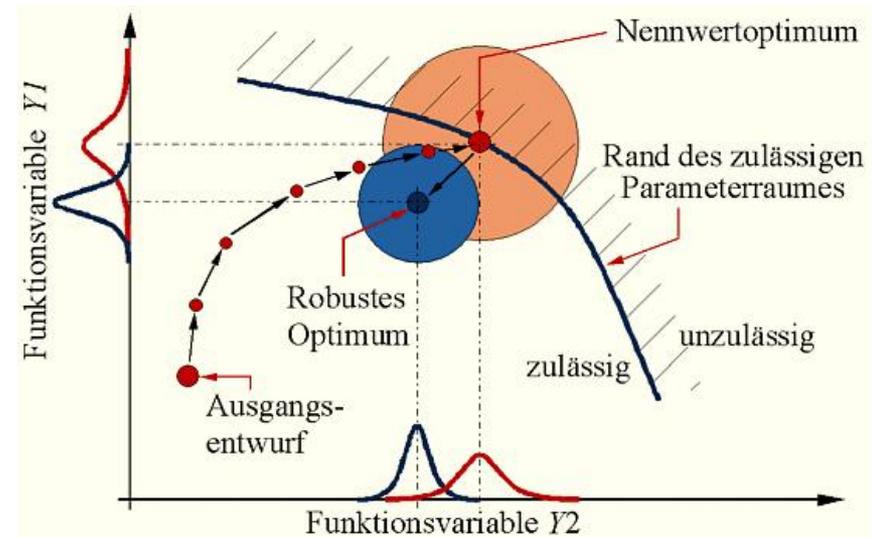
#### Kosten-Optimierung

- Toleranz-Kosten-Modell: Realisierungskosten der kontrollierbaren Streuungen.
- Kostenreduzierung bei Erfüllung aller Funktionalitäten mit zulässiger Ausschussquote



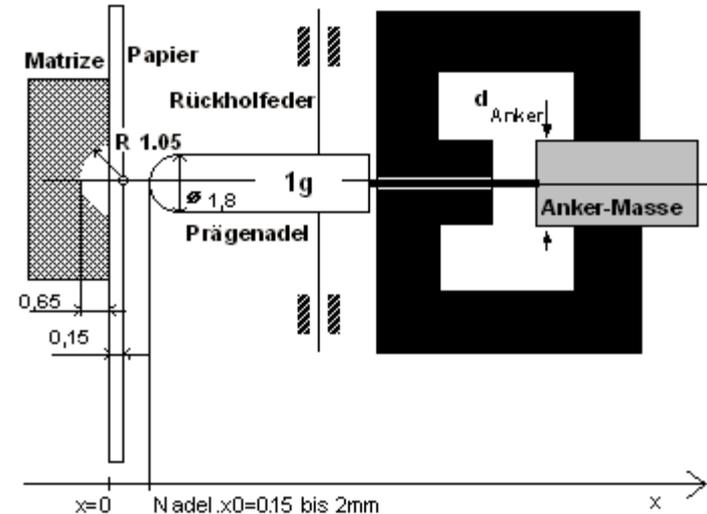
#### Robust-Optimierung

- Unkontrollierbare und unvermeidbare Streuungen.
- Minimierung der Streuungen der Produkteigenschaften → Robustes Verhalten trotz unvermeidbarer Umweltschwankungen

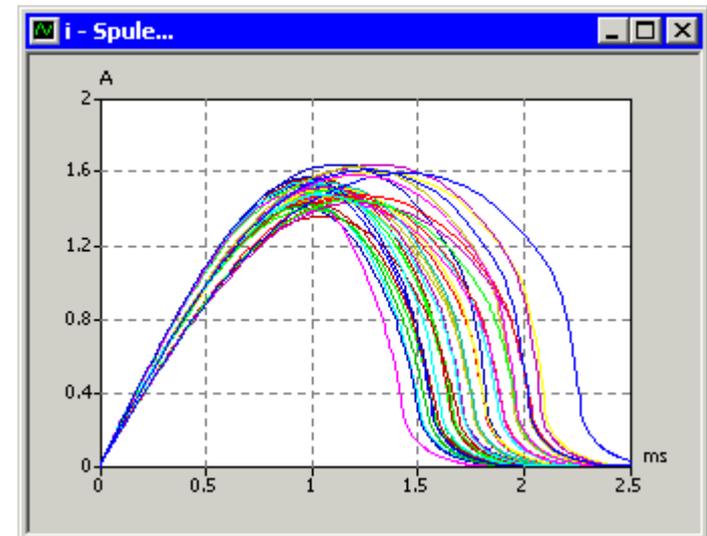


### Beispiel: Magnetantrieb

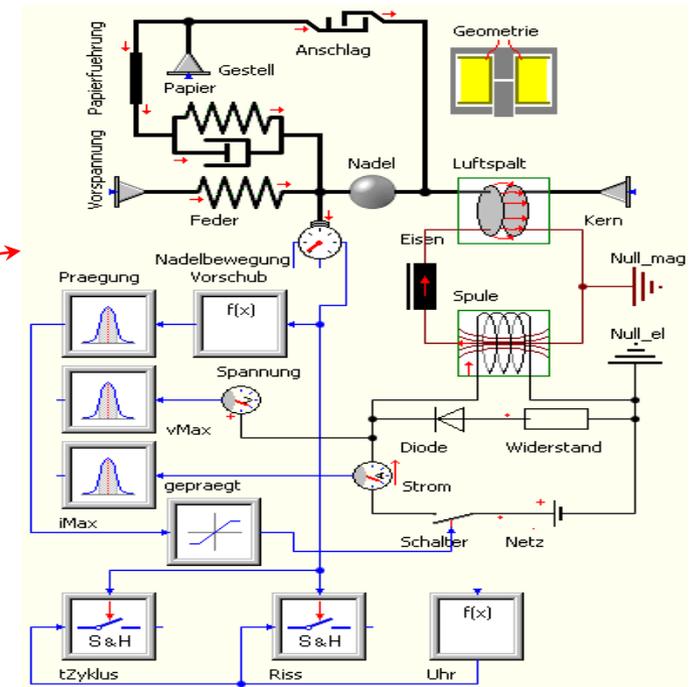
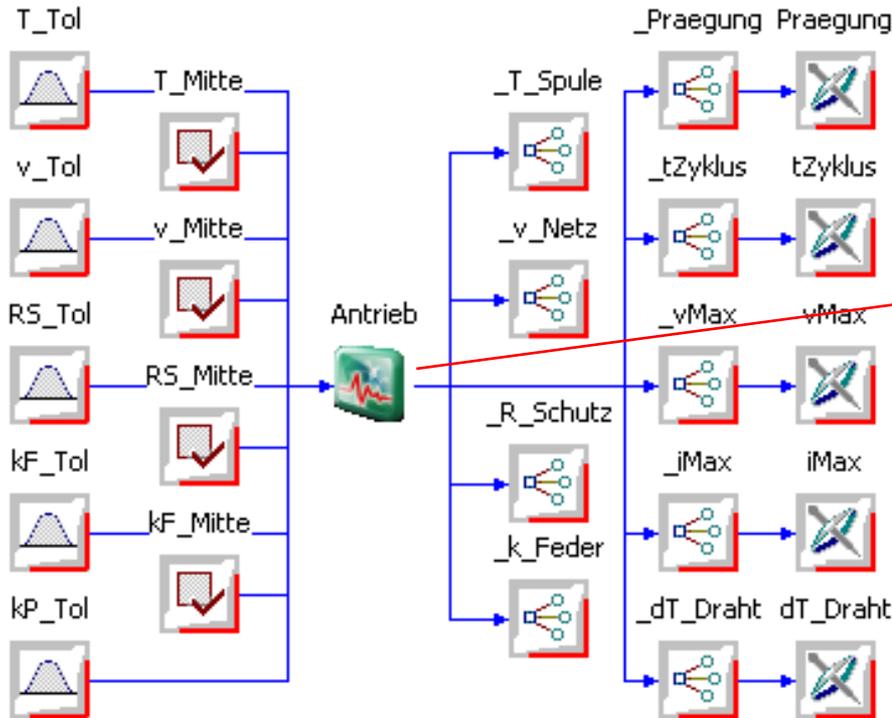
- **Nadelantrieb für Blindenschrift-Präger:**
  - Modell: Mechanik, Elektro-Magnet, Elektronik, Wärme
  - Prägung: 130 Zeichen/Sekunde
- **Anforderungen:**
  - möglichst schnelle Zykluszeit (Zykluszeit < 3,4 ms)
  - Zuverlässige Prägung des Papiers
  - Grenzen für Spulenstrom/-spannung (<1.5 A, 200 V)
  - Zulässige Erwärmung (< 50 K)



Parameter-Streuungen	Toleranz	Verteilung
Temperatur T der Spule	0 bis 100°C	Gleichverteilung
Betriebsspannung u	± 10%	Gleichverteilung
Schutzwiderstand RS	± 5%	Normalverteilung
Federkonstante kF der Rückholfeder	± 30%	Normalverteilung
Papiersteifheit kP	± 50%	Normalverteilung



### Prozesskette



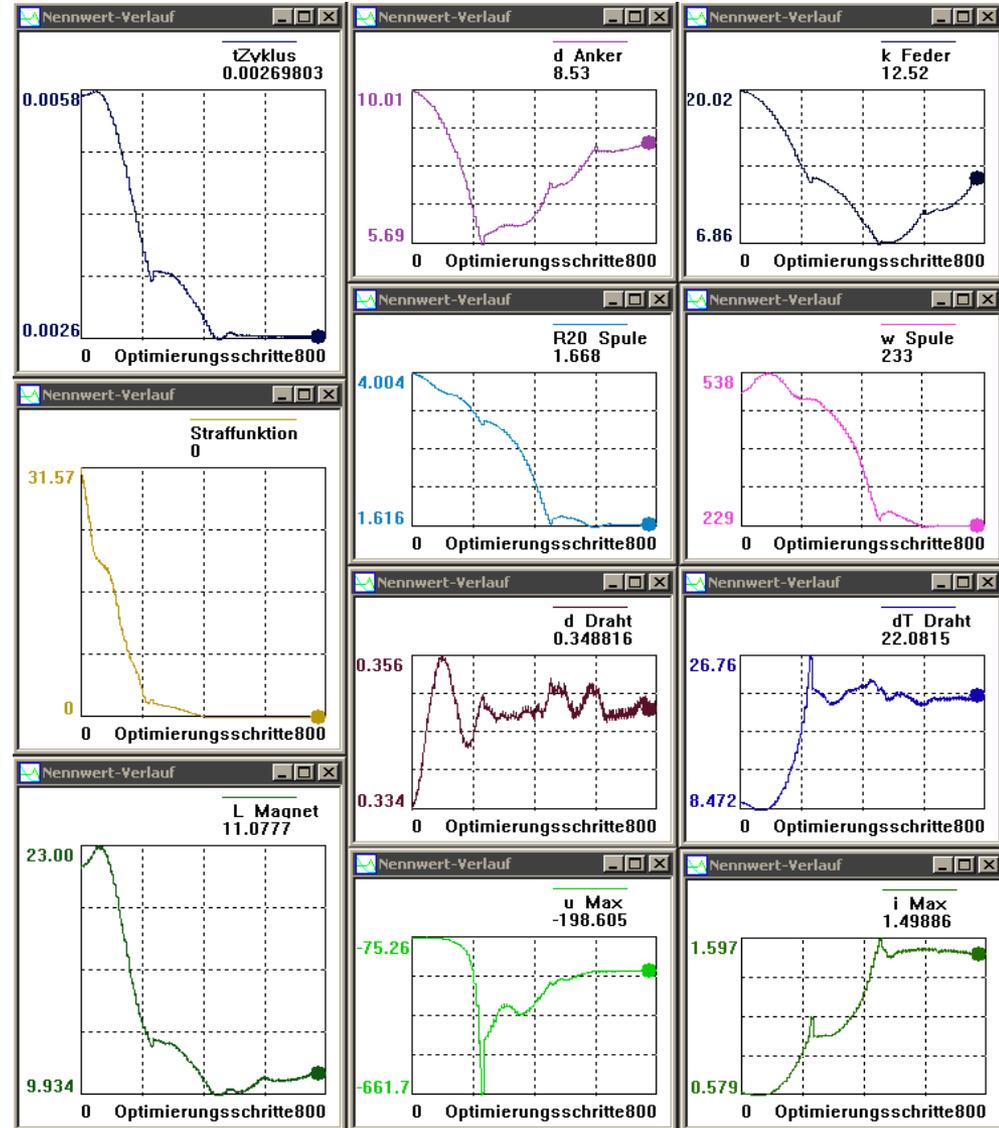
OptiY-Workflow für probabilistische Simulation und Optimierung

Deterministisches Antriebsmodell in SimulationX mit Netzwerk-Elementen

## 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  $u_{Max}$ )



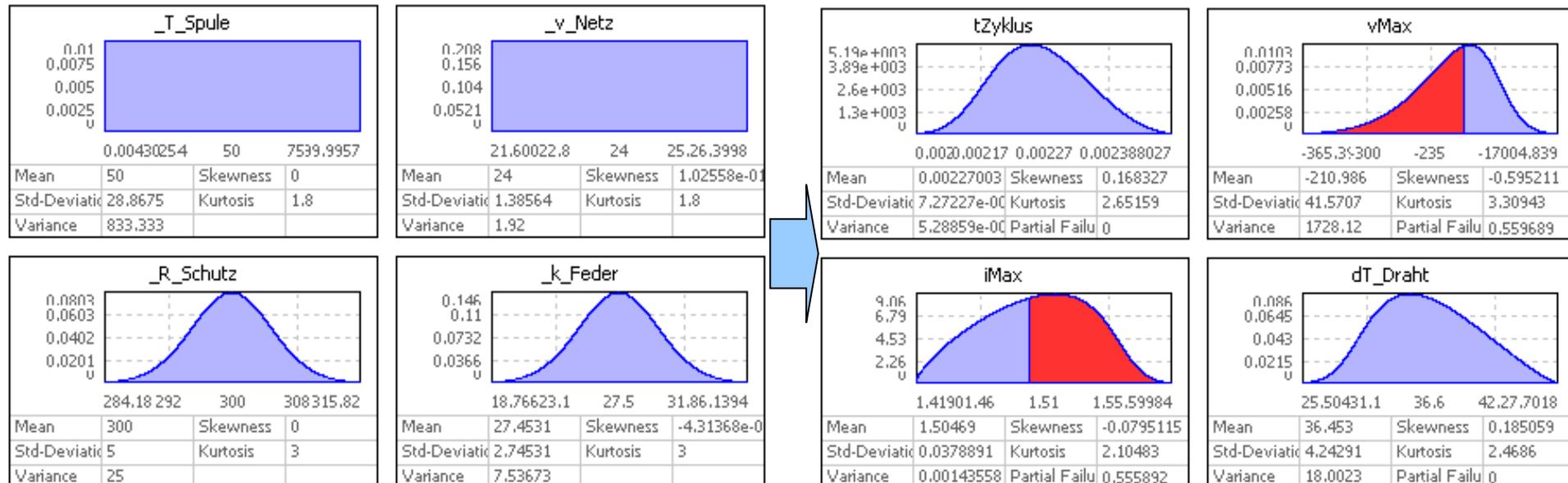
## Probabilistische Simulation: Zuverlässigkeit und Robustheit

- 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 **Ausschussquote** 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



## Globale Sensitivitätsanalyse

### Reduzierung der Komplexität Erklärung der Ursache-Wirkungs-Beziehung

#### Welche Streuungen vernachlässigbar?

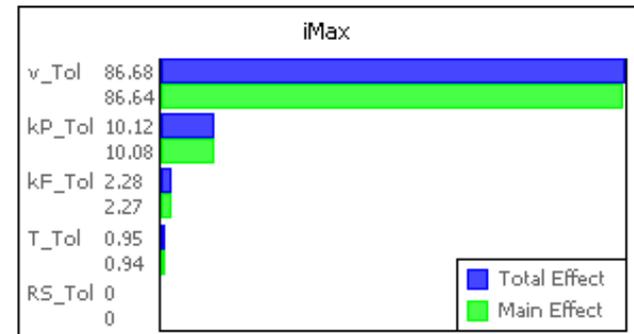
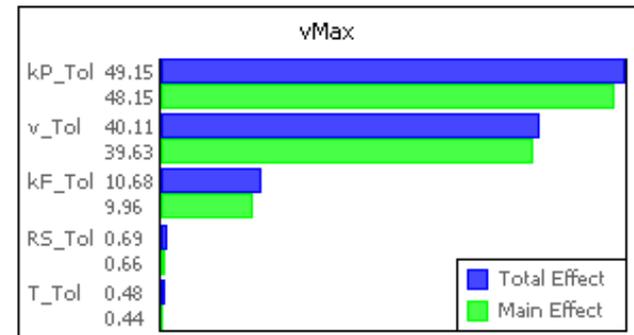
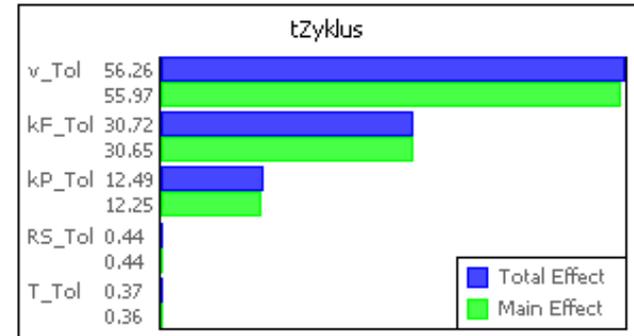
- Das Pareto-Chart zeigt, in welchem Maße ein bestimmtes Ergebnis (Effekt) durch eine bestimmte Ursache (Streuung) hervorgerufen wurde.
- Bei Vernachlässigung der Streuungen des Abschaltwiderstands und der Spulentemperatur reduziert sich die Berechnung einer Stichprobe ( $2n^2+1$ ) von 51 auf 19 Simulationsläufe!

#### Interaktionen zwischen Streuungen vernachlässigbar?

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

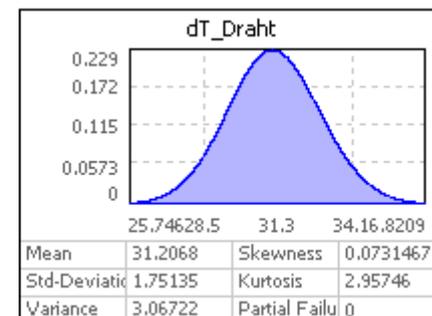
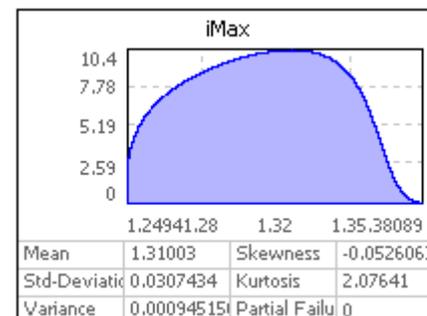
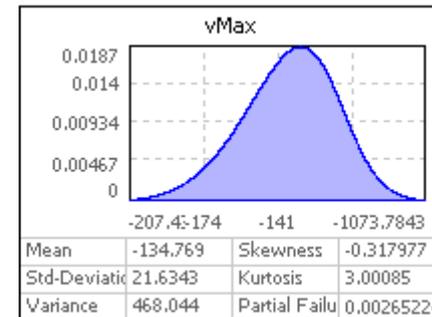
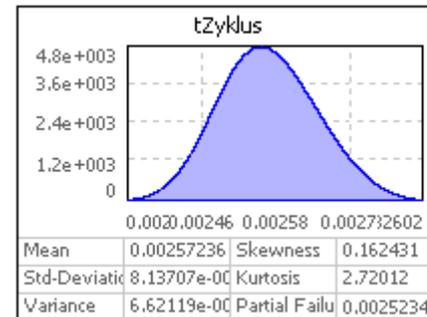
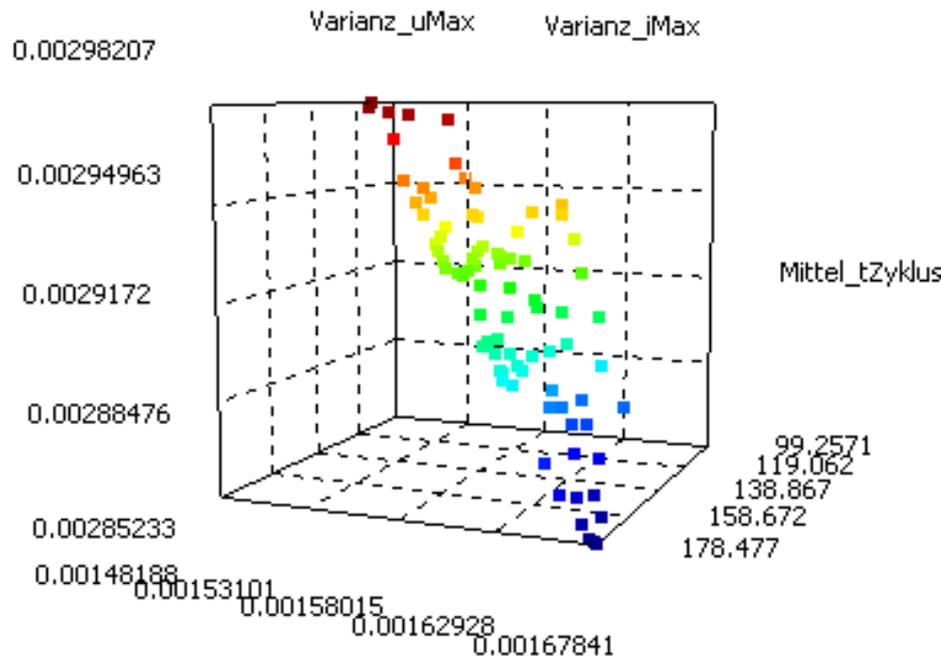
$$\text{Totaleffekt} = \text{Var}(Y|X_i) / \text{Var}(Y|X) + \text{Interaktionen}$$

- 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!**



## Probabilistische Optimierung

- 1. Ziel ist die Minimierung der Ausschussquote (Zielfunktion der Optimierung). Verschiebung der gesamten Verhaltensstreuungen in zulässige Gebiete mittels numerischer Optimierung.
- 2. Ziel ist Minimierung dieser Streuungen, z.B. der max. Abschaltspannung, Spulenstrom und Zykluszeit. Die erreichten optimalen Entwurfparameter zeigen keine Überschreitung der zulässigen Grenzwerte trotz der Streuungen. Man spricht vom zuverlässigen und robusten Entwurf.



## Zusammenfassung

- Parameterstreuungen, Unsicherheiten und Zufall führen zur Verschlechterung der Produktqualität und Zuverlässigkeit.
- Probabilistische Methoden sind alleinige und effektive Werkzeuge, um diese Problematik in der Entwurfsphase zu bewältigen.
- Die Anwendung am Magnetantrieb veranschaulicht Nutzen und Vorteile. Ausgehend von einer klassischen Nennwert-Optimierung wird eine Ausschussquote von ca. 50% mittels probabilistischer Simulation berechnet.
- Erst eine probabilistische Optimierung führt zu optimalen Produktparametern, die trotz der unvermeidbaren Streuungen die erforderliche Funktionssicherheit und Robustheit gewährleisten.