

Zuverlässigkeitsbewertung mechatronischer Systeme durch multidisziplinäre und probabilistische Simulation

The-Quan Pham ¹, Holger Neubert ², Alfred Kamusella ²

¹ OptiY GmbH Aschaffenburg

² Institut für Feinwerktechnik und Elektronik-Design, TU Dresden

3. Tagung: DVM-Arbeitskreis

„Zuverlässigkeit mechatronischer und adaptronischer Systeme“

14. + 15. April 2010 in Darmstadt

Überblick

1. Problemstellung
2. Multidisziplinäre Ersatzmodellierung
3. Probabilistische Simulation
4. Bipolarer Magnetischer Aktor

Problemstellung

Zuverlässigkeitsaspekte

- Streuungen, Unsicherheiten, Fehler, Toleranzen -> Ausfall der Systemkomponenten
- Auftreten in Serienfertigung und im Einsatz bei Kunden
- Ursachen: Umwelteinflüsse, Einsatzbedingungen, Menschliche Fehler usw..
- Entscheidender Erfolgsfaktor für kommerzielle Produkte auf dem Markt

Mechatronische Systeme

- Unterschiedliche Komponenten: Mechanik, Wärme, Elektronik usw.
- Wechselwirkungen sind komplex und sehr schwer überschaubar

Stand der Technik

- Verschiedene Simulationstools zur Auslegung in der Entwurfsphase
- Behandeln in einer Entwurfsumgebung ist wegen der erforderlichen Fachkenntnisse und des Aufwandes unmöglich
- Überlagern der Zuverlässigkeitsaspekte erschwert den Entwurfsprozess
- Statistische Versuchsplanung mit vielen Prototypen zur Beherrschung solcher Probleme ist sehr aufwändig und teuer

Multidisziplinäre Simulation

<p>CAD</p> <p>Pro/Engineer Catia Unigraphics etc.</p>	<p>FEM</p> <p>Ansys Abaqus Nastran etc.</p>	<p>CFD</p> <p>CFX Fluent Star-CD etc.</p>	<p>MKS</p> <p>MSC Adams Simpack RecurDyn etc.</p>
<p>Dynamik</p> <p>SimulationX AMESim Dymola etc.</p>	<p>Elektronik</p> <p>PSpice LTspice Saber etc.</p>	<p>Multi-Physik</p> <p>Matlab/Simulink Comsol Maple etc.</p>	<p>Elektromagnetik</p> <p>CST Studio Suite Maxwell FEMM etc.</p>

Spezialisierte CAE-Systeme:

- Einfache und schnelle Handhabung
- Detailliertes Komponenten-Verhalten

Probleme bei der Co-Simulation:

- Lange Berechnungszeit eines Komponentenmodells
- Systemsimulation beeinträchtigt oder unmöglich

Ersatzmodellierung mit Gauss-Prozess

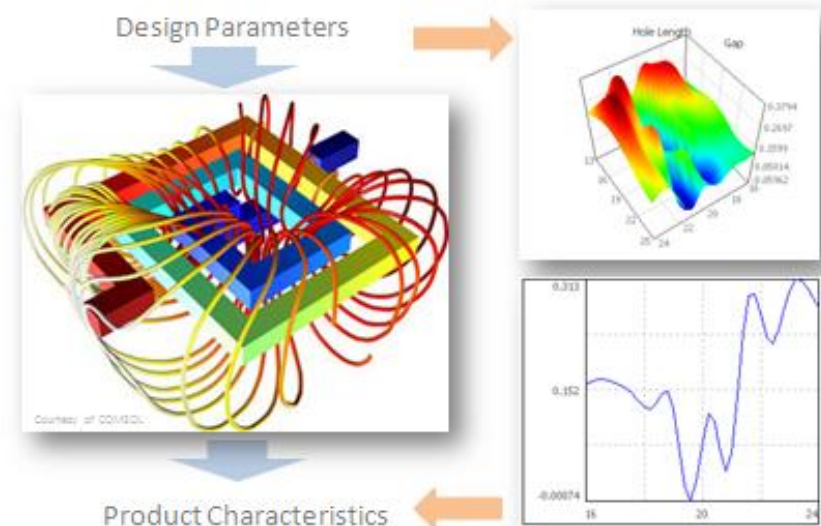
Mathematischer Ansatz: Polynom $f(\mathbf{x})$ mit p -ter Ordnung als globale Anpassung und der stochastische Prozess $Z(\mathbf{x})$ als lokale Anpassung für einen n -dimensionalen Parametervektor \mathbf{x}

$$Y(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^p \beta_i \cdot f_i(\mathbf{x}) + Z(\mathbf{x})$$

Existierende n -Punkt wolke \mathbf{Y}^n gilt als eine multivariate Gauss-Verteilung mit der Korrelationsfunktion $\mathbf{R}(\mathbf{x})$. Y^0 ist der neu zu berechnende $(n+1)$ -Punkt

$$\begin{pmatrix} Y_0 \\ \mathbf{Y}^n \end{pmatrix} \approx N_{n+1} \left[\begin{pmatrix} \mathbf{f}_0^T \\ \mathbf{F} \end{pmatrix} \boldsymbol{\beta}, \sigma_z^2 \begin{pmatrix} 1 & \mathbf{r}_0^T \\ \mathbf{r}_0 & \mathbf{R} \end{pmatrix} \right]$$

Die beste Vorhersage für den neu zu berechnenden Punkt Y^0 ist der Erwartungswert dieser multivariaten Gauss-Verteilung.



Korrelationsfunktion des Gauss-Prozesses

- Die Korrelationsfunktion $R(x)$ stellt die Interpolation zwischen den berechneten Punkten dar.
- Der Funktionsverlauf ist eine Annahme und gilt als kritischer Faktor des Gauss-Prozesses.
- Deshalb werden verschiedene erprobte Funktionen zur Verfügung gestellt:

Exponential $R(x_1 - x_2) = \exp(-w^\gamma \cdot (x_1 - x_2)^\gamma)$

Matern Class $R(x_1 - x_2) = (1 + w \cdot (x_1 - x_2)) \exp(-w \cdot (x_1 - x_2))$

Rational Quadratic $R(x_1 - x_2) = \left(1 + \frac{w^2 \cdot (x_1 - x_2)^2}{\alpha}\right)^{-\alpha}$

Unbekannte der Korrelationsfunktion sind die Hyperparameter w , γ , α . Ermittlung durch Maximierung der Likelihood-Funktion der multivariaten Gauss-Verteilung, d.h. Minimierung des folgenden negativen Ausdrucks der Likelihood-Funktion:

$$(n - p) \log \hat{\sigma}_z^2 + \log(\det(\mathbf{R}))$$

$$\hat{\sigma}_z^2 = \frac{1}{n - p} (\mathbf{Y}^n - \mathbf{F}\boldsymbol{\beta})^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{Y}^n - \mathbf{F}\boldsymbol{\beta})$$

Adaptiver Gauss Prozess

- Neben der Erwartung (Vorhersagewert) liefert der Gauss-Prozess auch Varianz/Streuung der Vorhersage
- Damit sind auch Vertrauensintervalle der Vorhersage über den gesamten Entwurfsraum verfügbar
- Wo die größte Unsicherheit ist, wird ein zusätzlicher Punkt mit dem originalen Modell berechnet

$$\sigma^2 = \sigma_x^2 \left\{ \mathbf{1} - \mathbf{r}_0^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{r}_0 + (\mathbf{f}_0 - \mathbf{F}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{r}_0)^T (\mathbf{F}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{F})^{-1} (\mathbf{f}_0 - \mathbf{F}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{r}_0) \right\}$$

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{n-p} \mathbf{Y}^{nT} \left\{ \mathbf{R}^{-1} - \mathbf{R}^{-1} \mathbf{F} (\mathbf{F}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T \mathbf{R}^{-1} \right\} \mathbf{Y}^n$$

- Erwartete Verbesserung **EI** zur Validierung des lokalen Optimums und der Unsicherheit
- Ermittlung eines weiteren zu berechnenden Punktes im Entwurfsraum
- **EI** gilt als Approximationsgüte und Stop-Kriterium des adaptiven Gauss-Prozesses

$$EI = \sigma \left\{ \frac{y_{\min} - \hat{Y}}{\sigma} \Phi \left(\frac{y_{\min} - \hat{Y}}{\sigma} \right) + \Psi \left(\frac{y_{\min} - \hat{Y}}{\sigma} \right) \right\}$$

Probabilistische Simulation

Aufgabe:

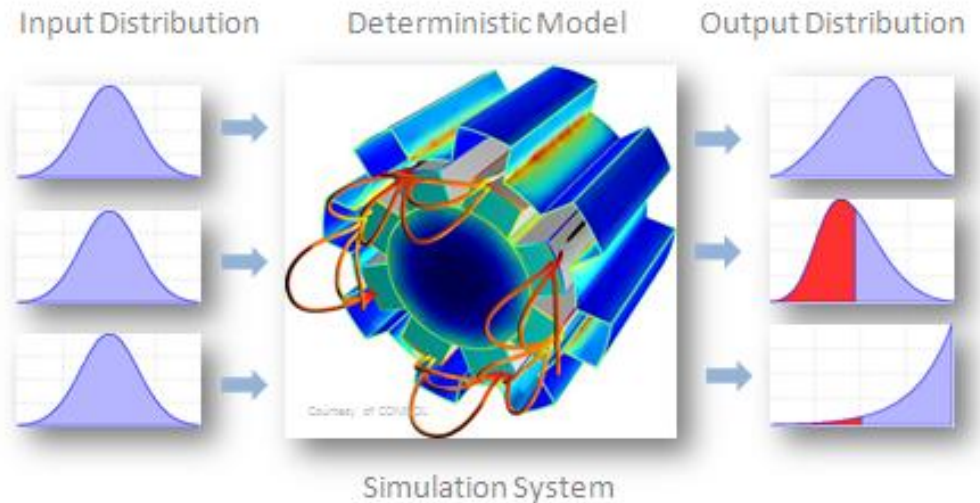
Berechnung der statistischen Verteilungen der Ausgangsgrößen aus den Verteilungen der Eingangsgrößen auf der Basis des virtuellen deterministischen Produktmodells

Numerische Verfahren:

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

Zuverlässigkeit:

Ausfallraten des Gesamtsystems und der einzelnen Komponenten aus den statistischen Verteilungen berechenbar



Charakteristik

- Schleifen von deterministischen Modellberechnungen erforderlich
- Vielzahl der Umgebungs- und Entwurfparameter
- Genauigkeit: statistisch brauchbare Ergebnisse
- Lange Rechenzeit einer probabilistischen Simulation
- Effiziente Ersatzmodelle erforderlich !

Globale Sensitivitätsanalyse

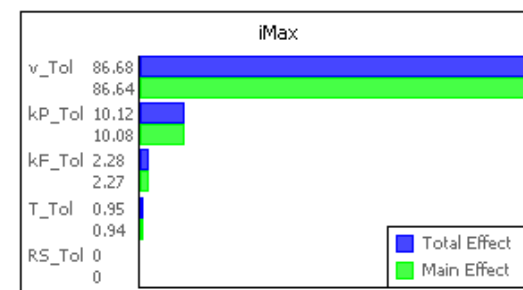
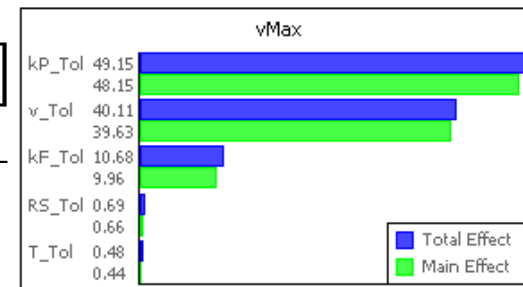
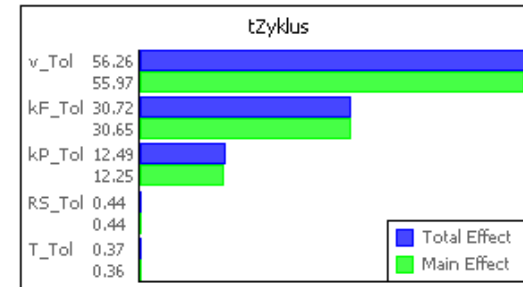
- Nichtlineare Zusammenhänge
- Reduzierung des komplexen Entwurfsproblems
- Aufzeigen von Ursache-Wirkungs-Beziehungen

Haupteffekt / Sobol Index

$$S_{H(x_i)} = \frac{Var(y | x_i)}{Var(y | \mathbf{x})} = \frac{\int \left[y(\mathbf{x}) - \int y(\mathbf{x}) \prod_{j \neq i} g(x_j) dx_j \right]^2 \prod_i [g(x_i) dx_i]}{\int \left[y(\mathbf{x}) - \int y(\mathbf{x}) g(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \right]^2 g(\mathbf{x}) d\mathbf{x}}$$

Totaleffekt $S_{T(x_i)} = 1 - S_{H(x_{-i})}$

Interaktion $S_{I(x_{i,j})} = S_{T(x_i)} + S_{T(x_j)} - S_{T(x_{i,j})}$



Bipolarer Magnetischer Aktor

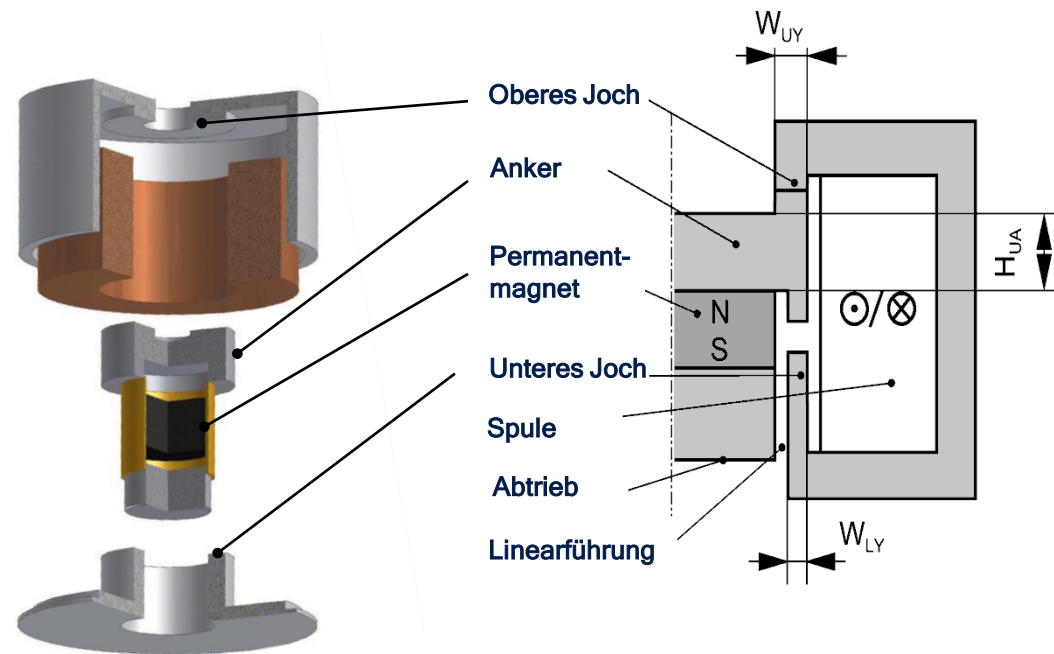
Wirkprinzip

■ Bauelemente:

- Anker mit Permanentmagnet
- Gleitführung
- Spule
- Oberes und unteres Joch
- Rückschluss

■ Funktion:

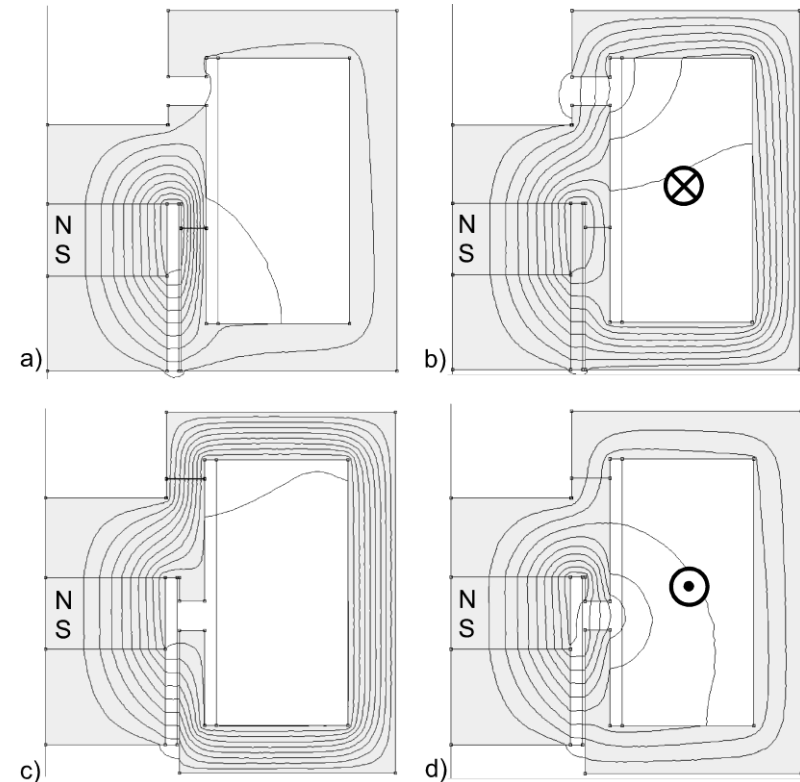
- Bistabil in beiden Endlagen
- Umgeschaltet durch +/- Strompulse



Elektromagnetische Feldsimulation

Finite-Elemente-Modell

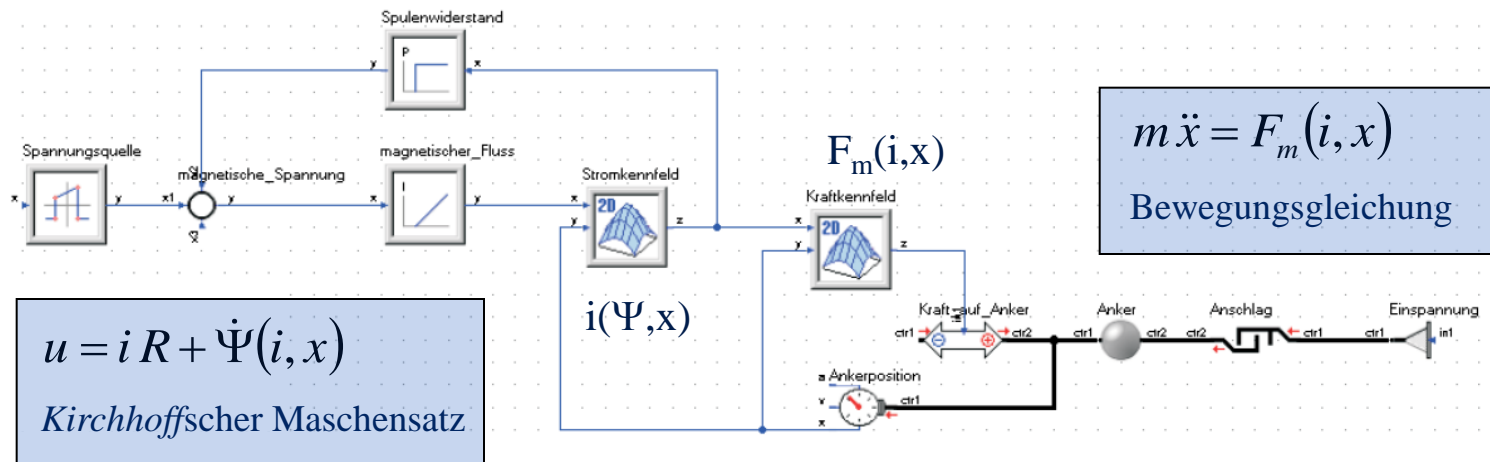
- Magnetostatisches axialsymmetrisches 2D-Modell
- Magnetisches Vektorpotential
- Implementiert in FEMM 4.2
- Berechnung von Kennfeldern für Koppelfluss $Y(i,x)$ und Magnetkraft $F_m(i,x)$
- Invertierung des Kennfeldes des Koppelflusses $Y(i,x) \rightarrow i(Y,x)$ mit Matlab



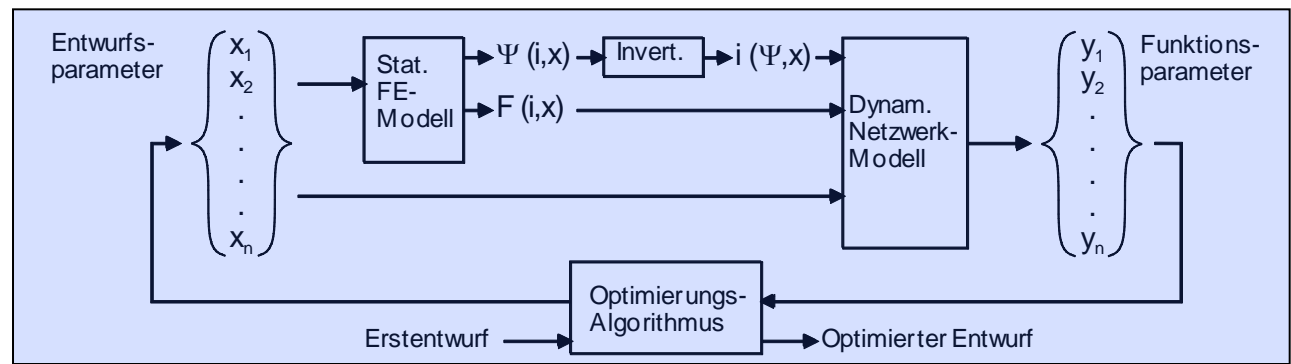
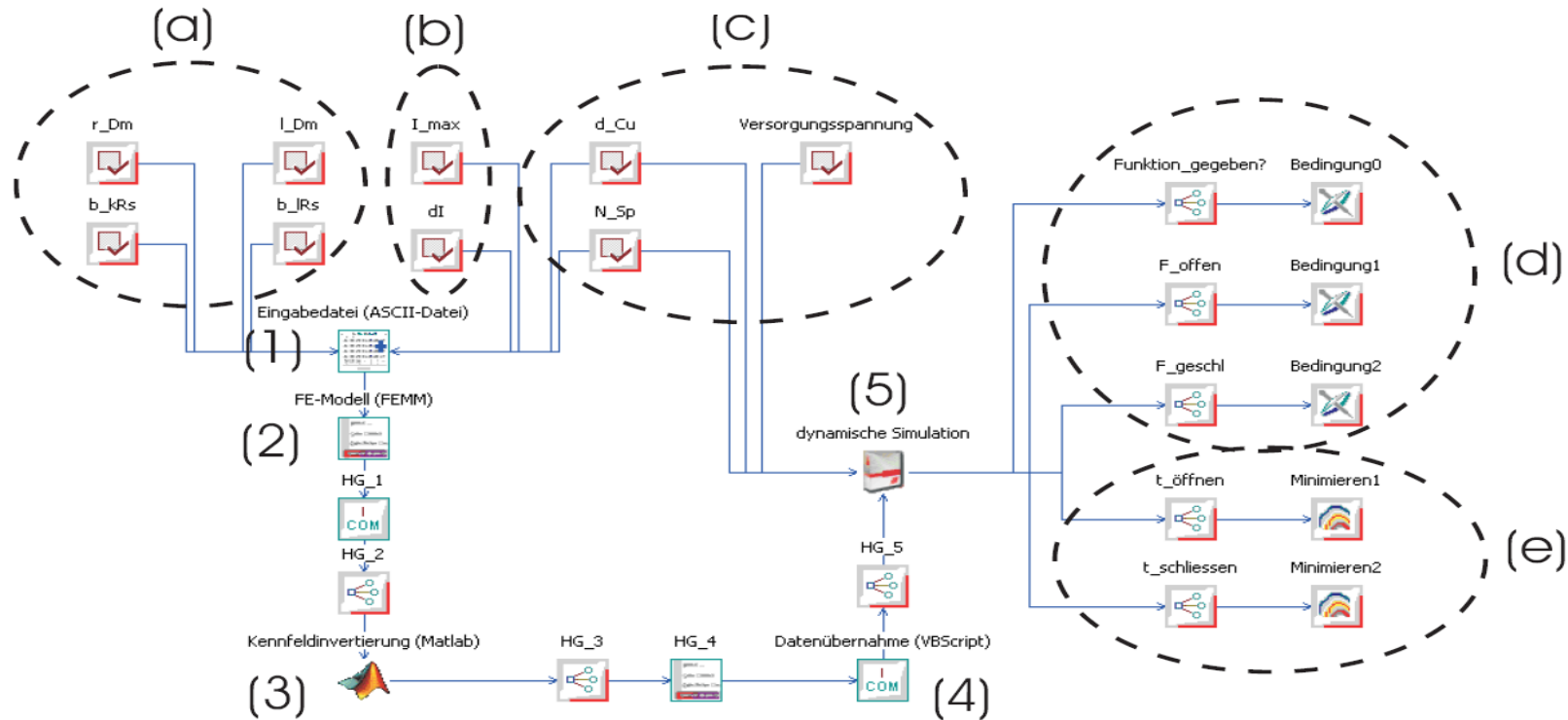
Dynamik-Simulation

Modellierungsansatz

- Simulation der Dynamik mit einem Netzwerkmodell unter Verwendung der Kennfelder für Koppelfluss $i(\Psi, x)$ und Magnetkraft $F_m(i, x)$
- Berechnung der Kennfelder im FE-Modell
- Netzwerkmodell zur Entwurfsoptimierung

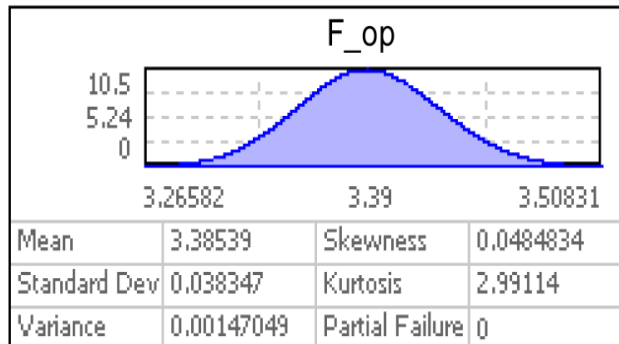
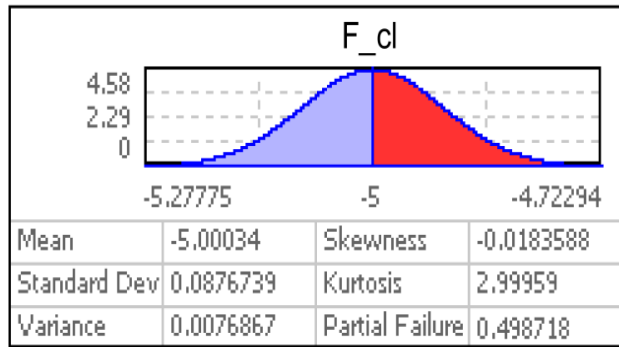


Prozess-Workflow



Probabilistische Simulation

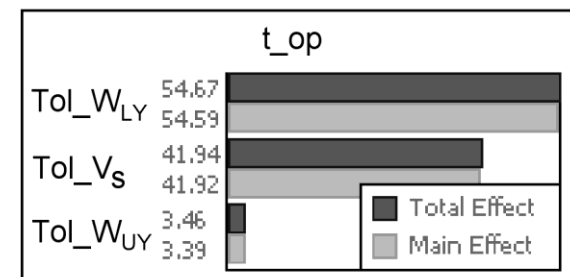
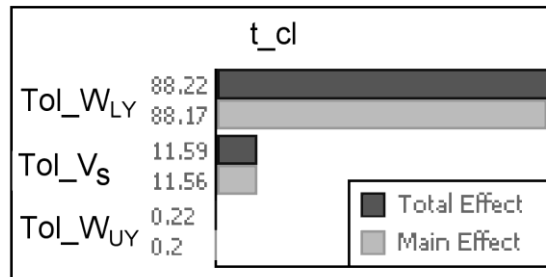
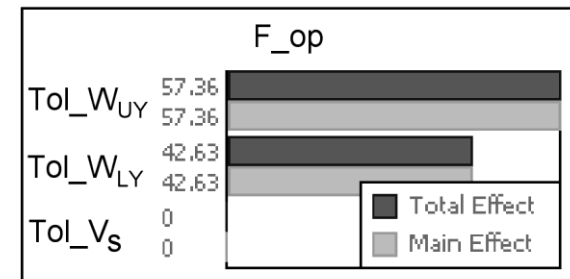
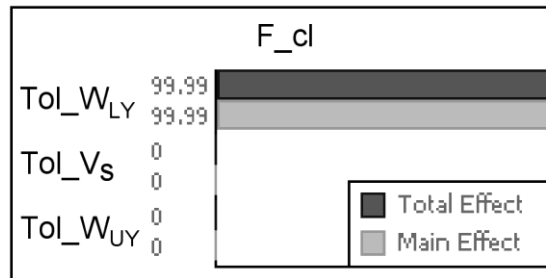
Verteilung der Haltekräfte
mit Ausfallrate: 50%



■ Entwurfparameter:

- $W_{LY}, W_{UY} \pm 0.1\text{mm}$ (6s)
- Speisespannung $\pm 0.25\text{V}$ (6s)
- Normalverteilungen

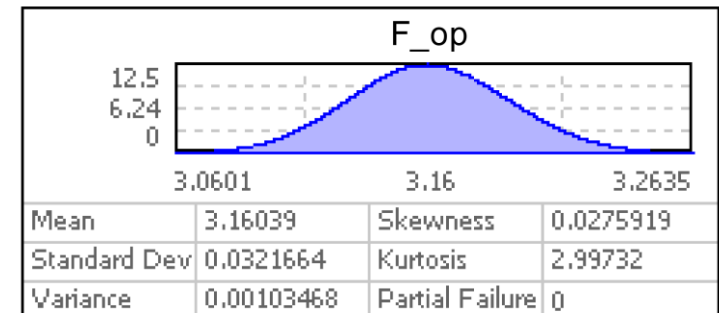
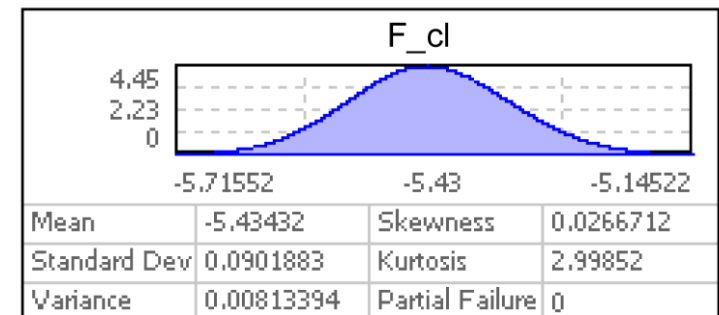
Globale Sensitivitäten



Robustoptimierung

- Minimieren der Versagenswahrscheinlichkeit und Funktionsstreuung
- Robustoptimierung erfordert die Berechnung der Verteilungsdichten der Funktionsvariablen nach jedem Optimierungsschritt
- Ergebnis ist ein für definierte Anforderungen optimierter Entwurf mit vernachlässigbarer Versagens-, d.h. Ausschusswahrscheinlichkeit

	Forderung	Startwert	Optimaler Wert	Robuster Wert
F_{op}	[2N;5N]	4.7N	3.4N	3.2N
F_{cl}	[-10N;-5N]	-5.6N	-5.0N	-5.4N
t_{op}	Min.	4.1ms	3.6ms	3.5ms
t_{cl}	Min.	4.9ms	4.0ms	4.3ms



Zusammenfassung

- ❖ Streuungen, Unsicherheiten und Zufall führen zur Verschlechterung der Produktqualität und Zuverlässigkeit. Mechatronische und adaptionsische Systeme sind komplex und die Wechselwirkungen der einzelnen Komponenten sind schwer überschaubar
- ❖ Multidisziplinäre Simulation mit spezialisierten CAE-Systemen ist der beste Ansatz zur Bewältigung solcher Probleme. Wegen des großen Rechenaufwandes ist eine effiziente Ersatzmodellierung erforderlich.
- ❖ Im Vergleich zur Fehlerbaumanalyse liefert die probabilistische Simulation quantitative detaillierte Zusammenhänge über die Ursachen-Wirkungs-Beziehungen der System- und Komponentenzuverlässigkeit
- ❖ Die Algorithmen wurden in der Software-Plattform **OptiY®** implementiert, welche eine nutzerfreundliche Oberfläche, einfache und schnelle Handhabung anbietet. Das ist eine neue und innovative Technologie, um in der Entwicklung komplexer Systeme auch die Zuverlässigkeitsprobleme zu beherrschen.