



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN



Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik

Institut für Feinwerktechnik und Elektronik-Design

# Optimierung feinwerktechnischer Systeme

Dr.-Ing. Alfred Kamusella, 06.11.2007

---

## Gliederung

1. Automatisierte Lösungssuche mit num. Optimierung
2. Beispiel: Magnetantrieb (SimulationX und OptiY)
3. Nennwertoptimierung
4. Probleme der Parameter- und Verhaltenssteuerung
  - a) Toleranz-Simulation („Stichprobe“)
  - b) Probabilistische Optimierung
5. Mehrkriterielle Optimierung
6. Zusammenfassung und Ausblick

---

## Automatisierte Lösungssuche mit num. Optimierung

### **Modell:**

Ersatzobjekt für den Erkenntnisgewinn zum eigentlichen Objekt

### **Simulation:**

Nutzung von Modell-Experimenten zum Erkenntnisgewinn

### **Experiment:**

Konfiguration eines Versuchsstands zur Durchführung reproduzierbarer Versuche mit einem Versuchsobjekt

### **Versuch:**

Aktive Veränderung unabhängiger Variablen und Beobachtung der Auswirkung auf das Objektverhalten

### **Optimierung:**

Umgangssprachlich meist eine Verbesserung eines Vorganges oder Zustandes bezüglich eines Gesichtspunktes wie zum Beispiel der Qualität, Kosten, Geschwindigkeit, Effizienz und Effektivität, manchmal auch zu Lasten eines anderen Aspektes (Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Optimierung>)

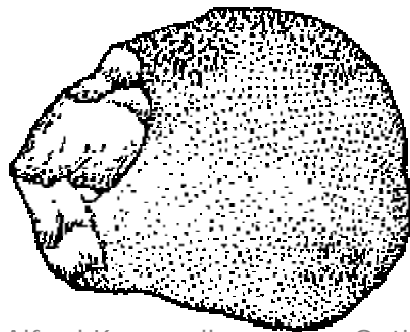
## Automatisierte Lösungssuche mit num. Optimierung

### Experimentbasierte Lösungsfindung

- Konstruktionsprozess (Aufgabe -> Modelle -> Dokumentation der Lösung)
- Modelle (Ersatzobjekte zum Erkenntnisgewinn)
- Simulation (Nutzung von Modellen als Ersatzobjekt)
- Experiment (Reproduzierbare Versuche mit Versuchsobjekt)

### Num. Optimierung zur Experiment-Automatisierung

- Numerische Optimierung ist Extremwertsuche auf einer Zielfunktion
- Technische Experimente sind zielgerichtet und zweckorientiert
- Experiment-Ziel muss als Extremwert-Aufgabe formalisiert werden



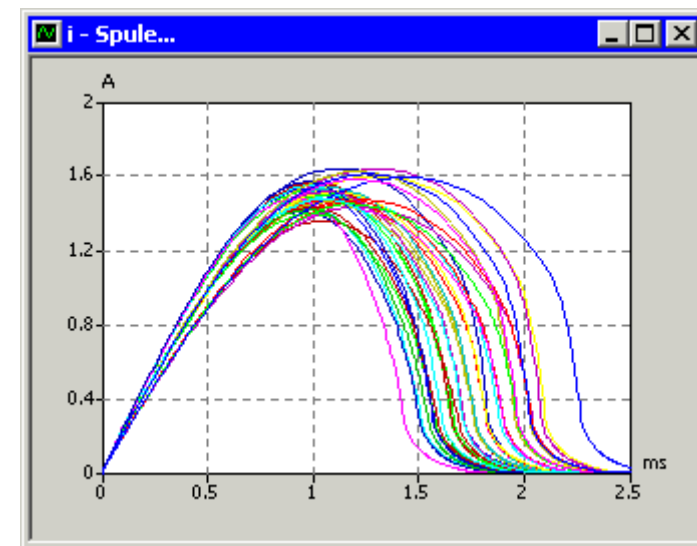
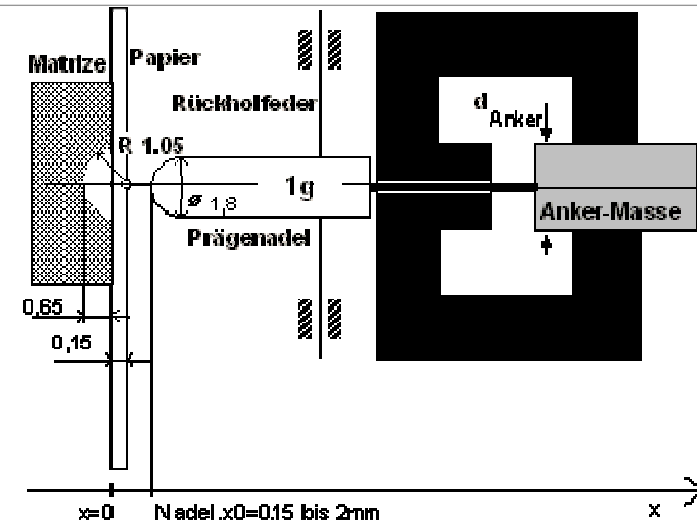
ca. 2 500 000 Jahre



## Beispiel: Magnetantrieb

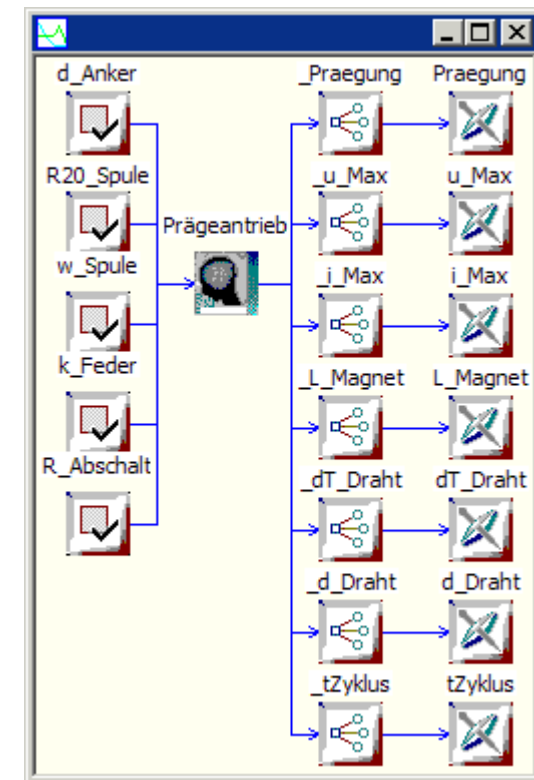
[www.ifte.de/lehre/cae/sim/](http://www.ifte.de/lehre/cae/sim/)

- Antrieb für Präge-Nadel in Blindenschrift-Präger:
  - Dynamik-Modell in SimulationX
  - Mechanik, Elektro-Magnet, Elektronik, Wärme
  - 130 Zeichen/Sekunde (Zykluszeit < 3,4 ms)
  
- Nennwert-Optimierung mit dem Ziel:
  - möglichst schnelle Zykluszeit
  - Erfüllung aller Forderungen der Aufgabenstellung
  
- Toleranzen/Streuungen (z.B.):
  - Schwankungen der Betriebsspannung
  - Fertigungstoleranzen der Rückholfeder
  - Unterschiedliche Papiersorten
  
- Robuste Lösung (minimale Verhaltensstreuung)



## Nennwertoptimierung – der OptiY-Workflow

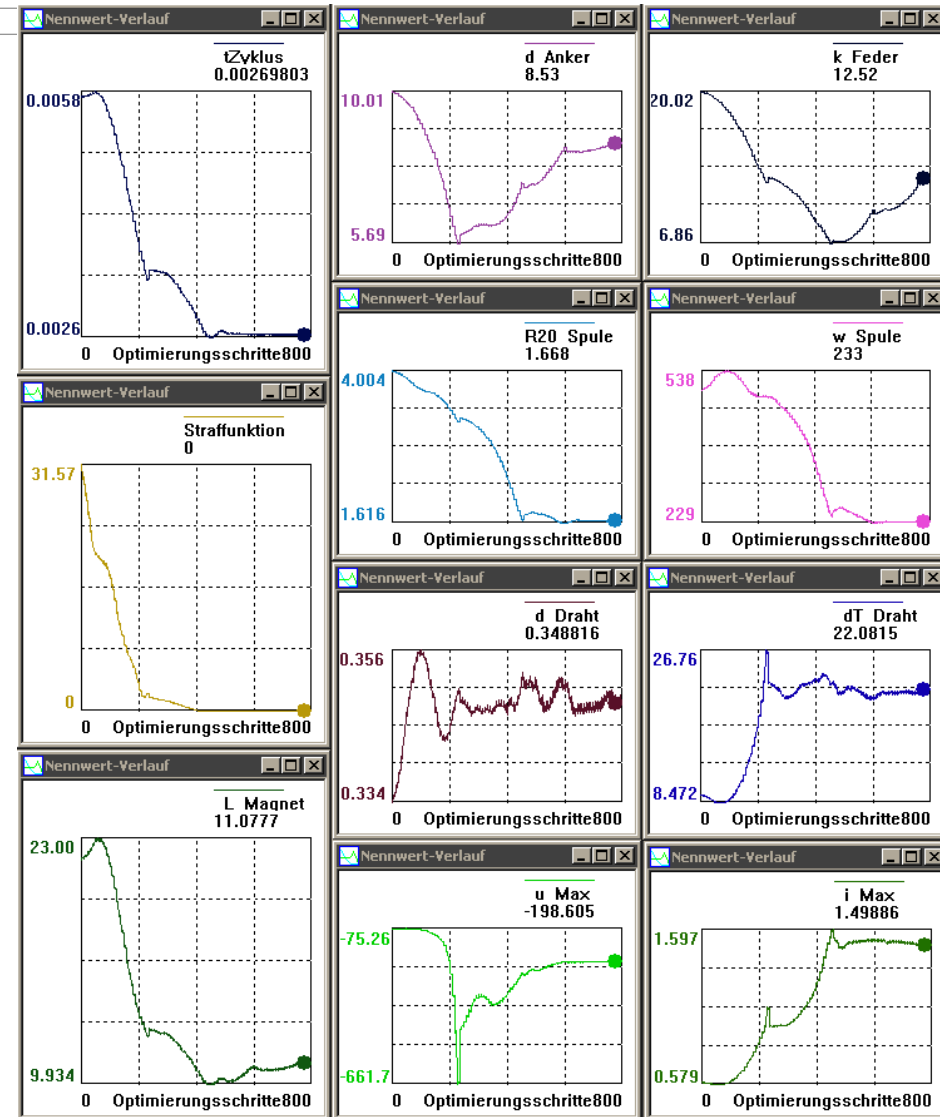
- Prägeantrieb als Dynamik-Gesamtmodell im Simulationssystem *SimulationX* der Firma ITI GmbH Dresden (Magnetkreis, Mechanik, Ansteuerung, Wärme und Grobgeometrie).
- Über die grafische Oberfläche des OptiY-Workflows beschreibt man die Verknüpfung des Modells mit den zu betrachtenden Ein- und Ausgabegrößen (z.B. Nennwerte und Restriktionsgrößen).
- Direkte und allgemeine Schnittstellen (ASCII & COM) ermöglichen die gleichzeitige Einbindung beliebiger CAD/CAE-Systeme (z.B.: Matlab/Simulink, Dymola, ANSYS, COMSOL, Fluent, Pro/E ...).
- Möglich ist die Definition beliebiger Prozessketten unter Einbeziehung unterschiedlichster Software zur automatisierten Analyse und Optimierung komplexer Produkte.



## Nennwertoptimierung

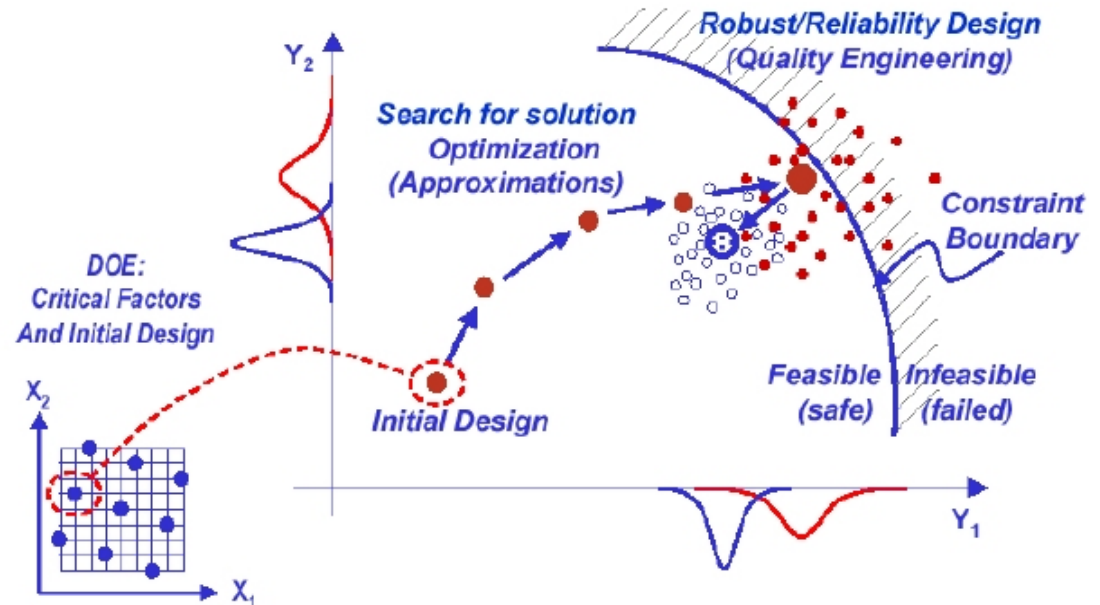
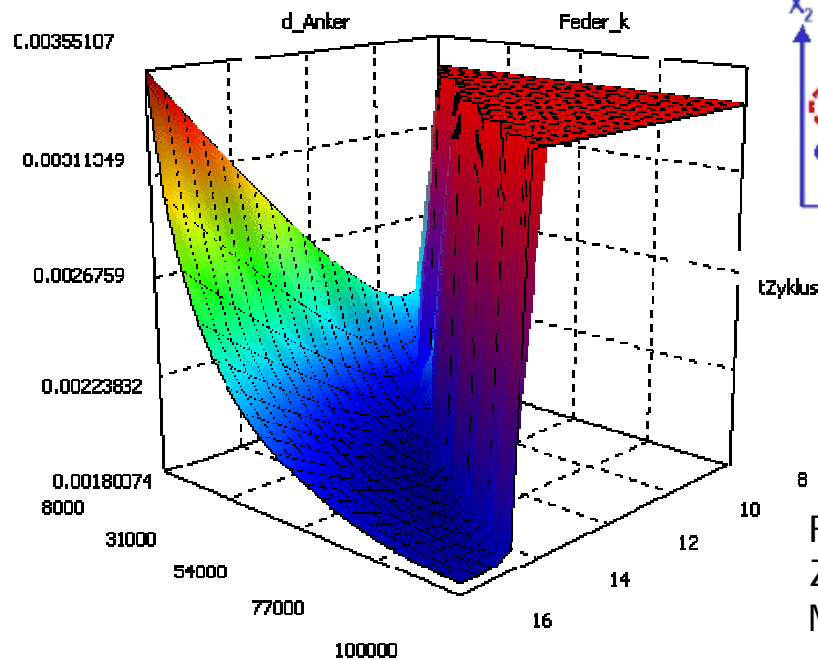
**Ergebnis sind „optimale“  
Nennwerte für die  
Entwurfsparameter unter  
idealen Betriebsbedingungen:**

- Die Gütekriterien werden möglichst gut erfüllt (z.B. Zykluszeit ist minimal).
- Alle Forderungen (Restriktionen) werden erfüllt (z.B. maximaler Strom bzw. zulässige Abschaltspannung nicht überschritten).
- Ein Optimum wird im Beispiel nach 800 Simulationsläufen gefunden. Dabei bewegt sich die Lösung auf der Straf-Funktion zum Wert Null. Ihr Wert repräsentiert den Abstand zur Menge der zulässigen Lösungen.



## Nennwertoptimierung

Für technische Systeme liegt das Nennwert-Optimum meist an den Grenzen der zulässigen Belastbarkeit von System-Komponenten bzw. der Umgebung. (z.B. iMax und uMax)



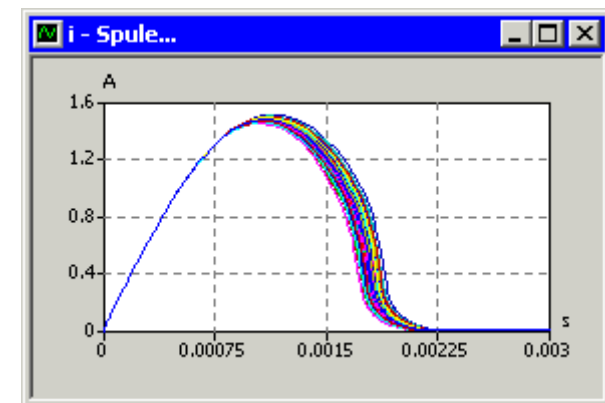
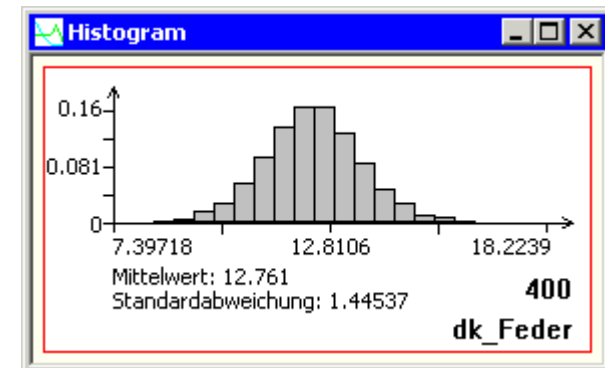
Bildquelle: Koch,N.P.; Wujek,B.; Golovidov,O.:  
A Multi-stage, parallel Implementation of  
Probabilistic Design Optimization in an MDO  
Framework; 8th Symposium on Multidisciplinary  
Analysis and Optimization, September 2000, CA

Für das Beispiel „Prägeantrieb“ zeigt die vereinfachte Zielfunktion  $t_{\text{Zyklus}} = f(d_{\text{Anker}}, k_{\text{Feder}})$  ein globales Minimum an der Grenze zum „Nichtprägen“



## Probleme der Parameter- und Verhaltensstreuung

- **Eigenschaften technischer Systeme**
  - Nennwert (exakter Wert)
  - Toleranz (Streuung um den Nennwert)
  - Statistische Verteilung (Abhängig von Ursache)
- **Ursachen**
  - Fertigungsungenauigkeit, Verschleiß
  - Umwelteinflüsse (Temperatur, Feuchtigkeit...)
  - Prozessunsicherheit, menschliche Faktoren ...
  - Nicht perfekte Simulationsmodelle
- **Probleme**
  - Verschlechterung der Produktqualität
  - Versagen: z.B. 50% Ausschuss nach „Optimierung“
- **Bisherige Lösung in der Praxis**
  - Statistische Versuchsmethode im Feldversuch
  - Hohe Stückzahl der Muster (Hunderte bis Tausende)
  - Hoher Aufwand, Kosten- und Zeitintensiv



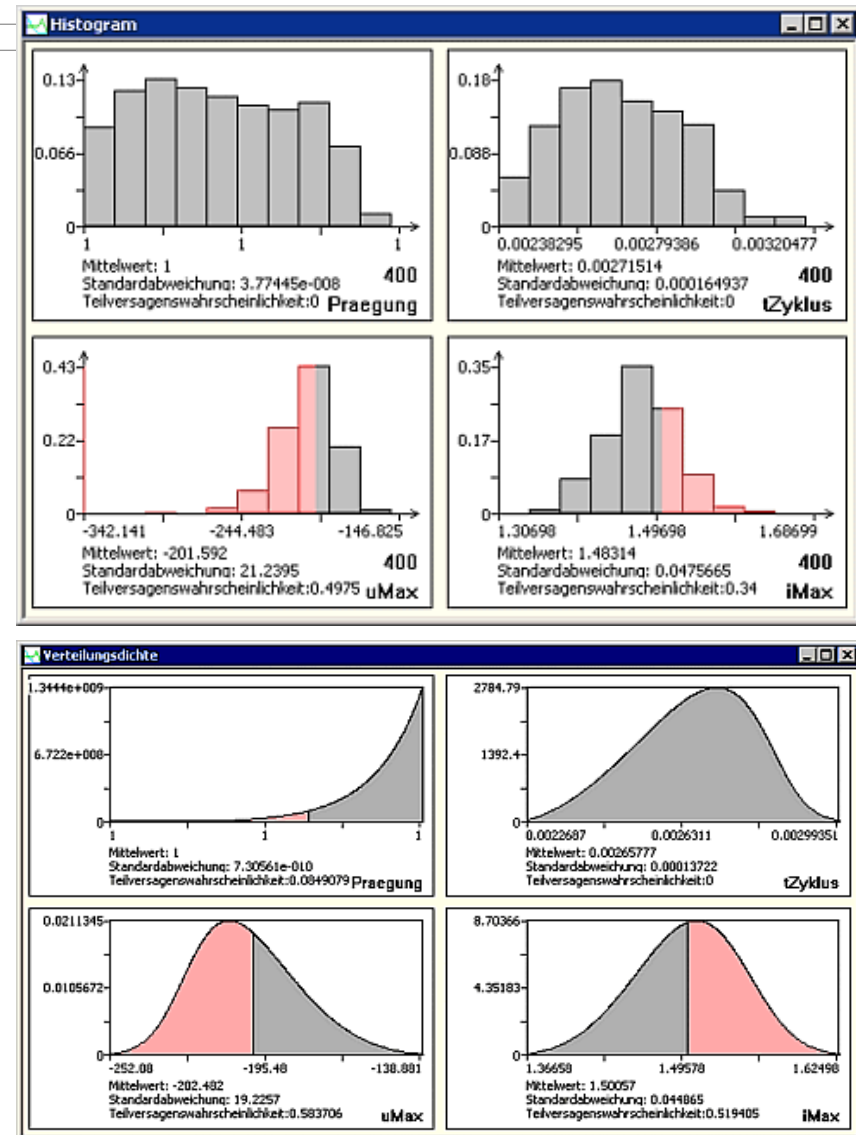
## Toleranz-Simulation („Stichprobe“)

### Monte-Carlo-Simulation (Stand der Technik)

- Toleranz-Generierung mittels Zufallszahlen
- Kein „stetiger“ Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgrößen nötig
- Hohe Genauigkeit bei großen Stichproben
- Tausende Modelldurchrechnungen nötig (sehr lange Berechnungszeiten!)

### Second-Order-Analyse (Neu)

- Analytisches Verfahren zur Berechnung der Verteilungsfunktionen von Ausgangsgrößen aus den Verteilungsfunktionen von Eingangsgrößen.
- Übertragungsfunktionen werden auf Basis von Modellabtastungen (**s**) durch Taylor-Reihen 2.Ordnung approximiert (Toleranzen=**n**):  
 $s=2n^2+1$  (z.B. 51 Abtastungen bei  $n=5$ )  
 $s=2n+1$  (Reduzierte Second-Order-Analyse)
- Toleranz-Simulation damit auch für aufwändige Simulationsmodelle möglich!



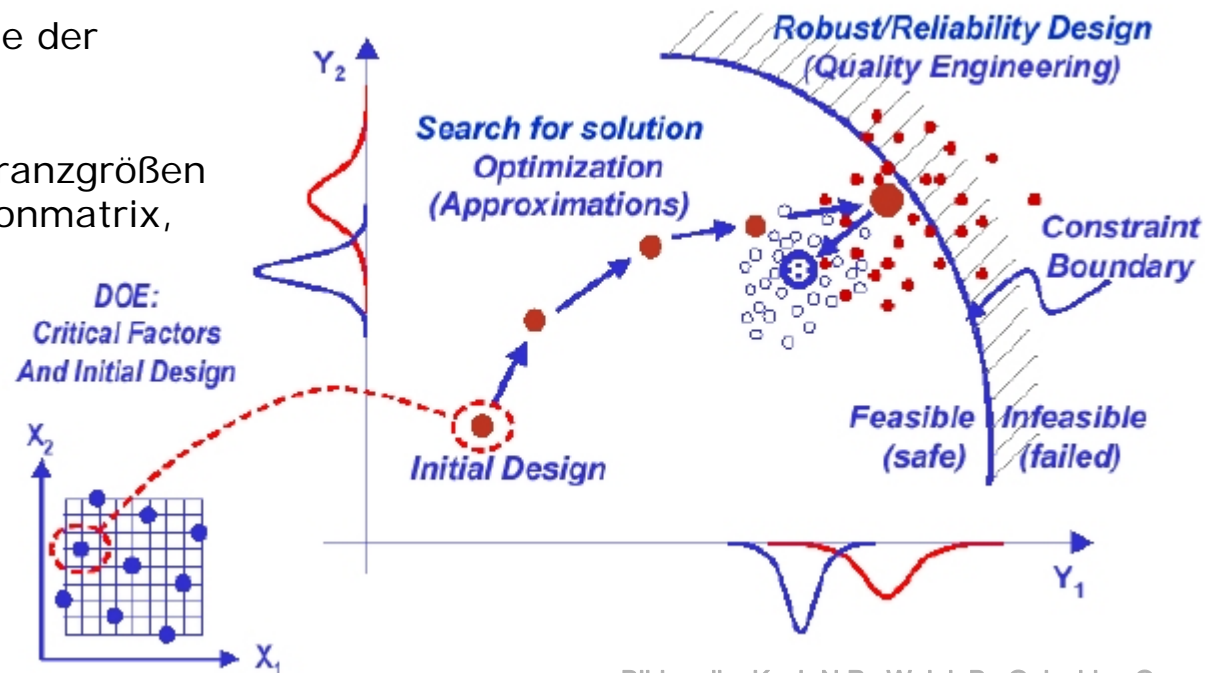
## Probabilistische Optimierung

### Vorbereitende Toleranz-Analyse :

- Ausfallwahrscheinlichkeit infolge der Verhaltensstreuung ermitteln
- Auswahl der wesentlichen Toleranzgrößen (Sensitivitätsanalyse, Korrelationmatrix, Pareto-Charts)
- Bewertung der Modell-Eigenschaften in Hinblick auf die Wechselwirkung zwischen Toleranzgrößen

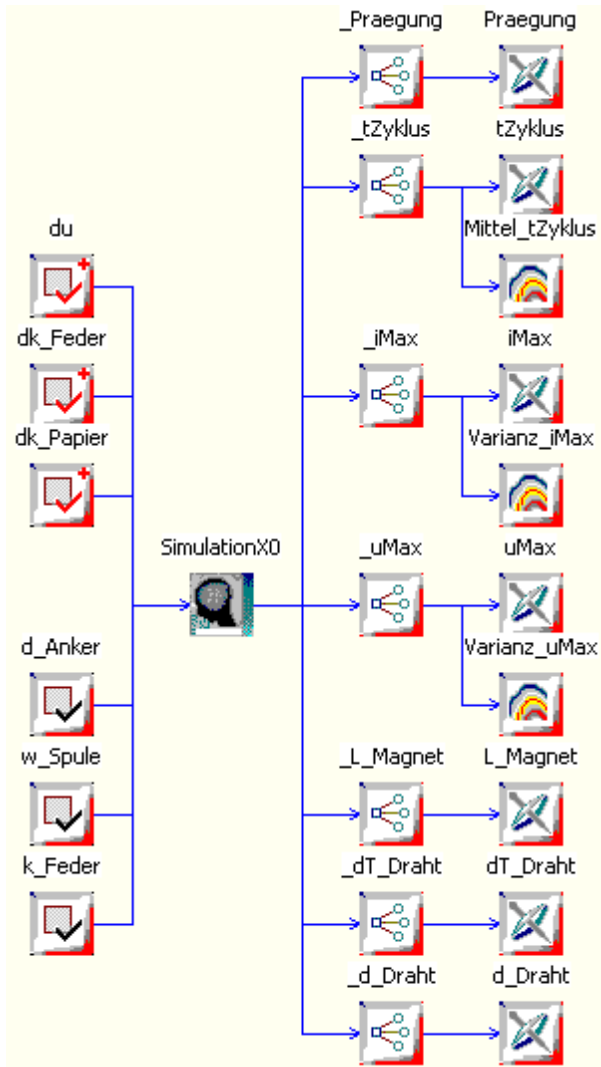
### Entwurfsziele z.B.:

- Ausschussminimierung
- Robust-Optimierung
- Fertigungskosten minimieren



Bildquelle: 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

## Probabilistische Optimierung



Grundlage ist die Simulation einer Stichprobe in jedem Optimierungsschritt.

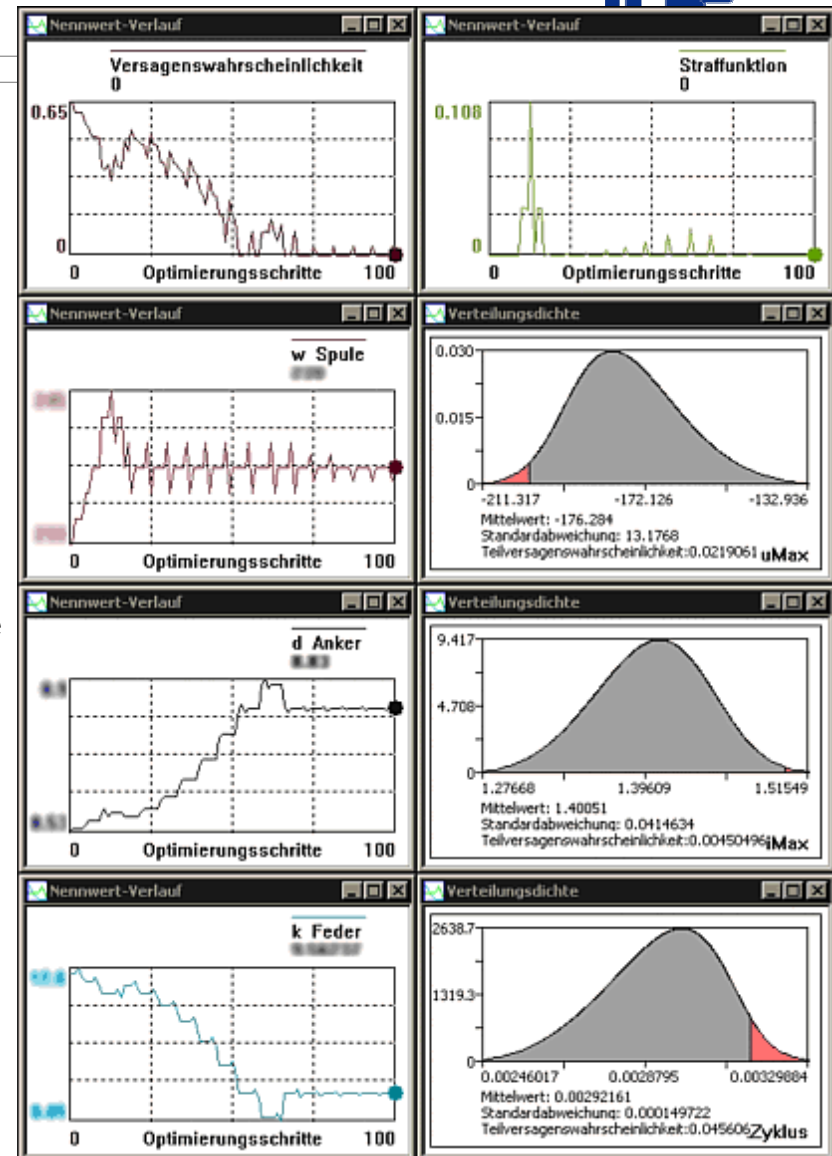
Es wird immer die Versagenswahrscheinlichkeit minimiert.

Statistische Ergebnisse der Stichprobe stehen als Bewertungsgrößen zur Verfügung:

- Mittelwert
- Standardabweichung
- Varianz

Es können sowohl optimale Nennwerte, als auch optimale Toleranzen ermittelt werden.

Optimierung feinwerktechnischer Systeme



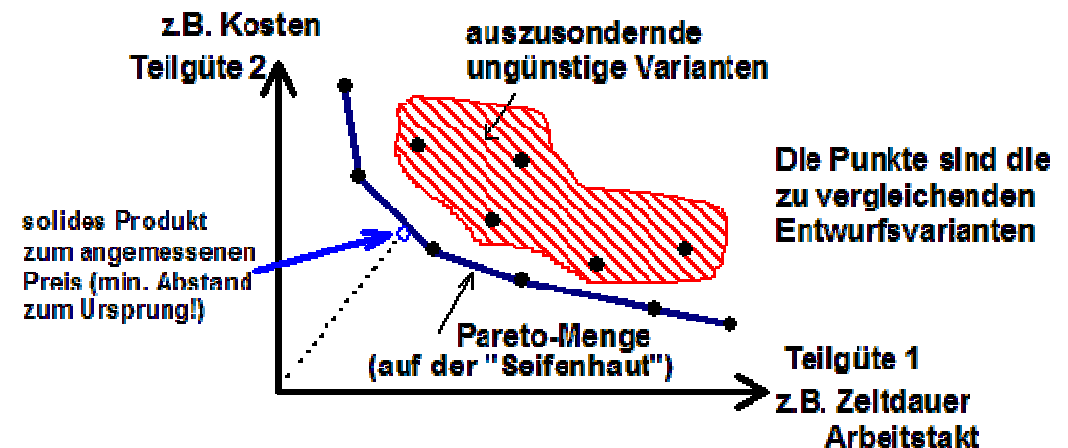
## Mehrkriterielle Optimierung (Kompromisslösung)

### Normalfall technischer Probleme - widersprüchliche Gütekriterien

- Beim Versuch, die Werte einiger Kriterien zu verbessern, können sich die Werte anderer Kriterien verschlechtern.
- Es gibt keine eindeutige optimale Lösung, sondern eine Pareto-optimale Lösungsmenge.
- Der Anwender muss anhand seiner Wichtungen seine optimale Lösung auswählen.

### Pareto-optimale Lösungsmenge

- Automatische Ermittlung mittels Co-evolutionärer Verfahren und deshalb nur mit evolutionären Algorithmen verfügbar.
- Für nichtevolutionäre Optimierungsverfahren wird die Zielfunktion durch einfaches Addieren der gewichteten Gütekriterien gebildet. Je nach Wichtung ergibt sich eine andere optimale Lösung.



## Mehrkriterielle Robustoptimierung (z.B. Magnetantrieb)

### Parameter + Toleranzen

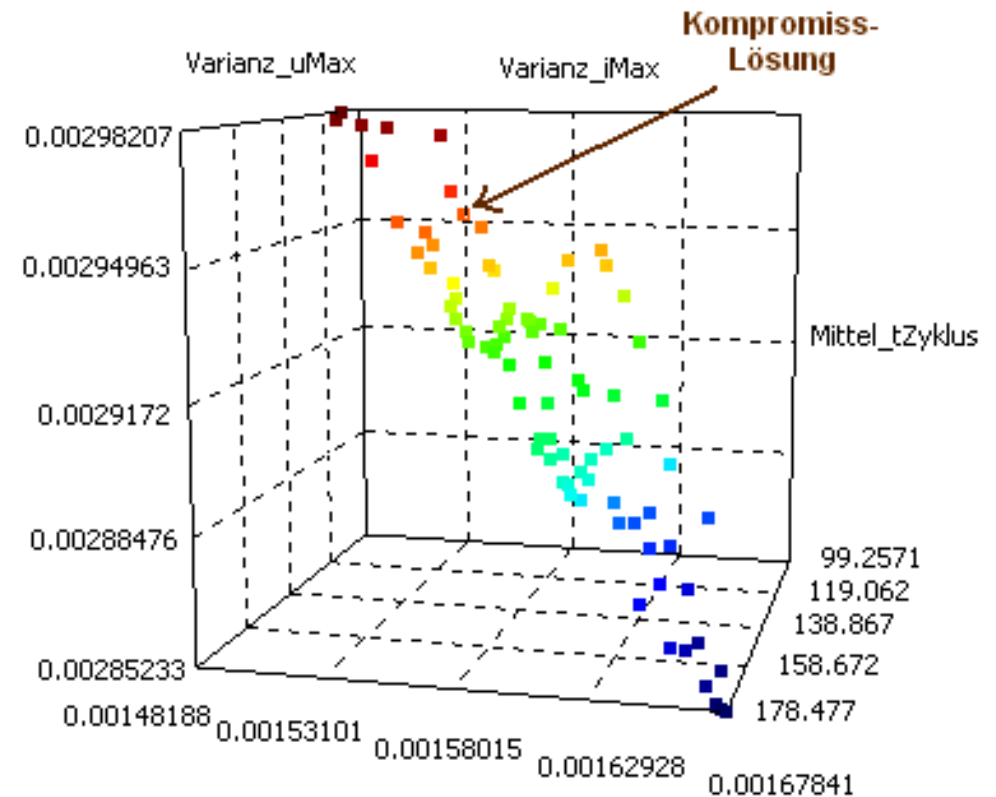
- Zu optimierende Nennwerte (Ankerdurchmesser, Windungszahl, Federsteife)
- Vorgegebene Toleranzgrößen (Betriebsspannung, Federsteife, Papiersteife)

### Güte-Kriterien

- Kurze Zykluszeit (Mittelwert)
- Kleine Streuung der Abschaltspannung (Varianz)
- Kleine Streuung des Maximalstroms (Varianz)

### Lösungen

- Automatische Ermittlung der Pareto-optimalen Lösungsmenge
- 3D Darstellung der Lösungspunkte
- Auswahl der Lösung durch Anwender



---

## Zusammenfassung und Ausblick

- Numerische Optimierung ist eine Methode zur (teil-)automatisierten Lösungssuche für abgegrenzte Problemstellungen im Konstruktionsprozess.
- Eigenschaften technischer System sind immer toleranzbehaftet. Die Streuungen des Verhaltens mindern die Funktionsqualität und können zum Versagen des Systems führen:
  - Die Analyse von System-Zuverlässigkeit und -Robustheit zum Erkennen von Qualitätsproblemen sollte möglichst früh im Konstruktionsprozess erfolgen.
  - Bei der Suche optimaler Lösungen müssen die real existierenden Unsicherheiten und Streuungen berücksichtigt werden.
  - Notwendig für komplexere Problemstellungen ist die Einbeziehung unterschiedlichster CAD/CAE-Systeme.
- Moderne Optimierungstools (z.B. OptiY) ermöglichen, den Konstruktionsprozess in Hinblick auf diese Anforderungen zukunftsorientiert zu erweitern.

---

## Zusammenfassung und Ausblick

# Lösbare Problemstellungen im Konstruktionsprozess

### Aufgabenpräzisierung (Forderungen und Wünsche)

#### Konzeptphase

- Wahl der physikalischen Effekte -> Parameteridentifikation
- Entscheidung zum Wirkprinzip -> Forderungen erfüllbar?
- Prinziplösung -> Forderungen erfüllen und Wünsche hinreichend befriedigen

#### Entwurfsphase

- Geometrische Eigenschaften (Form, Struktur, Abmessungen, Toleranzen)
  - Stoffliche Eigenschaften (physikalische, chemische, ...)
  - Zustandseigenschaften (Vorspannung, Temperatur, Magnetisierung, ...)
- > optimale Dimensionierung der Teile und Baugruppen hinsichtlich Funktionalität, Fertigung und „Finanzen“

### Ausarbeitungsphase (Produktdokumentation)



---

## Ende des Vortrags

### Weiterführende Informationen:

- [www.optiy.de](http://www.optiy.de) : Mit einer leicht eingeschränkten OptiY-Demoversion
- [www.ifte.de](http://www.ifte.de) : Optimierung eines Magnetantriebs - Komplexbeispiel (Übung zur Lehrveranstaltung Konstruktionstechnik)
- [www.opti-yummy.de](http://www.opti-yummy.de) : Optimieren darf Spaß machen!

(Im Aufbau befindliches Internet-Portal, welches den Optimierungspraktiker mit vielen Beispielen unterstützen soll.)