

4. Numerische Optimierung im Konstruktionsprozess

4.3. Analyse- und Optimierungstools

1. Einführung

- Experimentbasierte Lösungsfindung
- Optimierung als automatisiertes Experimentieren

2. Analyse

- Nennwert-Simulation
- Einfluss-Analyse
- Probabilistische Simulation (Simulation von Stichproben)
 - Numerische Verfahren
 - Monte-Carlo-Simulation
 - Second Order Analyse
 - Reduzierte Second Order Analyse
 - Analyseziele
 - Sensitivitätsanalyse
 - Zuverlässigkeitsanalyse
 - Robustheitsbewertung

3. Optimierung

- "Klassische" Nennwert-Optimierung
 - Mit Nebenbedingungen (Gütekriterien und Restriktionen)
 - Straf-Zielfunktion (auf Basis der Restriktionen)
- Probabilistische Optimierung
 - Kosten-Minimierung
 - Ausschuss-Minimierung
 - Robust-Optimierung
- Mehrkriterielle Optimierung
- Multidisziplinäre Optimierung

4. Ausblick

- Exponentiell wachsende Möglichkeiten



4.3. Analyse- und Optimierungstools

4.3.1. Einführung

----> *Experimentbasierte Lösungsfindung*

- **Konstruktionsprozess** (Aufgabe -> Modelle -> Dokumentation der Lösung):
 - Der Konstrukteur erhält eine Aufgabenstellung.
 - Er soll eine Dokumentation für eine „optimale“ Lösung erstellen.
- **Modelle** (Ersatzobjekte zum Erkenntnisgewinn):
 - Der Konstrukteur bearbeitet nicht direkt das zu konstruierende Produkt.
 - Er nutzt zum Erkenntnisgewinn Modelle unterschiedlichster Art.
- **Simulation** (Nutzung von Modellen als Ersatzobjekt):
 - Der Konstrukteur tastet sich Schritt für Schritt zur Lösung vor.
 - Er nutzt dazu Simulationen unterschiedlichster Art.
- **Experiment** (Reproduzierbare Versuche mit Versuchsobjekten):
 - Der Konstrukteur organisiert Modellversuche in Form von Experimenten.
 - Jedes Experiment dient der Lösung eines Teilproblems innerhalb einer übergeordneten Problemstellung.
- **Versuchsstand** (Experimentier-Umgebung):
 - stellt Schnittstellen zu den Versuchsobjekten (Modellen) zur Verfügung
 - ermöglicht die Durchführung unterschiedlicher Experimente mit den aktuell "eingespannten" Modellen
 - die Archivierung der Experimentkonfigurationen gewährleistet die Reproduzierbarkeit der durchgeführten Experimente.
- **Optimierung** (Ziel des Experimentierprozesses):
 - 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>).



4.3. Analyse- und Optimierungstools

4.3.1. Einführung

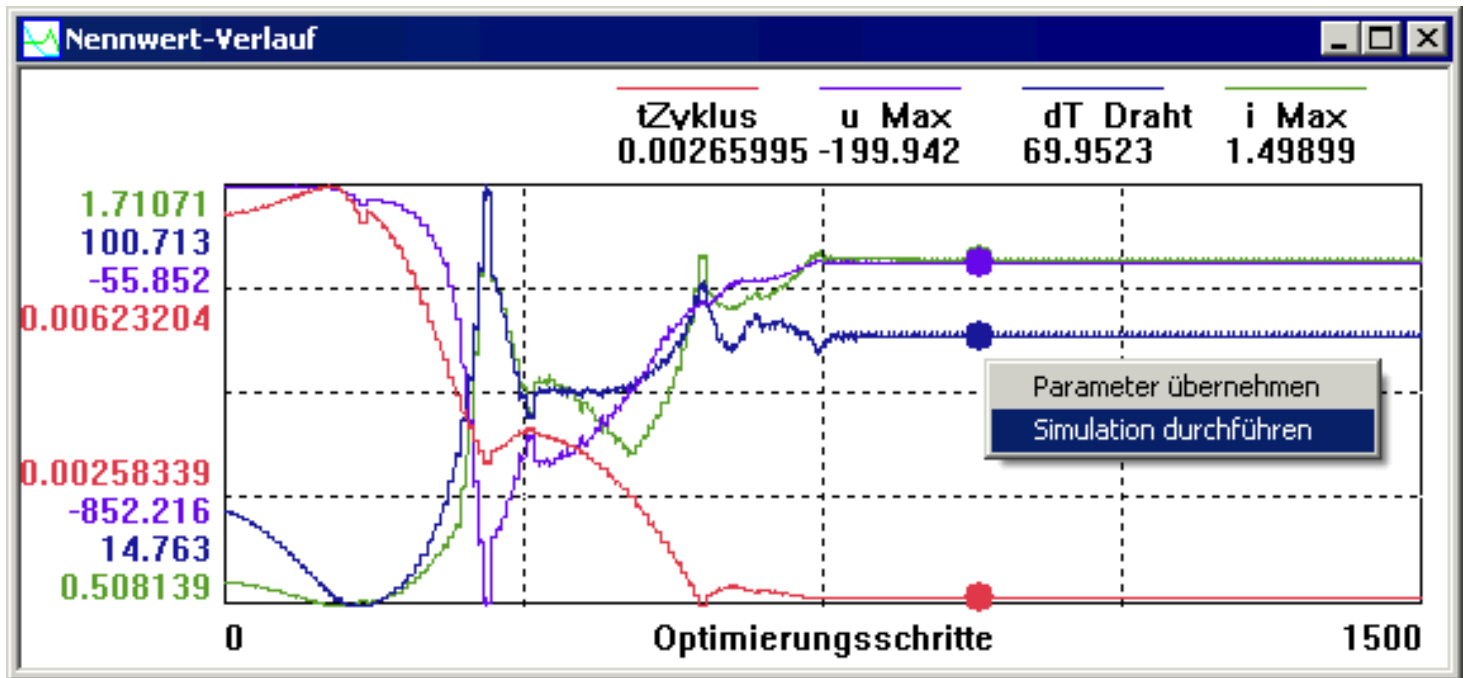
----> *Optimierung als automatisiertes Experimentieren*

- Technische Experimente sind zielgerichtet und zweckorientiert:
 - Der Konstrukteur führt nur **Experimente** durch, von denen er sich Erkenntnisse in Hinblick auf eine optimale Lösung erwartet (*finalorientiert*).
 - Experimente in der Naturwissenschaft dagegen betrachten für Effekte die Beziehung zwischen Ursache und Wirkung (*kausalorientiert*).
- Optimierung ist Extremwertsuche auf einer Zielfunktion:
 - Ein technisches Experiment-Ziel ist als Extremwert-Aufgabe formalisierbar (durch Transformation in eine geeignete Zielfunktion).
 - Verfahren der numerischen Optimierung können damit zielgerichtete Experimente durchführen (Suche optimaler Lösungen)
 - Der Datensatz des Optimums repräsentiert die Antwort auf das mit einem Experiment zu lösende Detailproblem.

4.3. Analyse- und Optimierungstools

4.3.2. Analysen

----> *Nennwertsimulation*



- Analyse des Verhaltens für die Nennwerte einer ausgewählten Lösung:
 - Auswahl einer Lösung (Nennwerte) aus einer archivierten Lösungsmenge
 - Durchführung eines Simulationslaufes unter der Oberfläche des Optimierungstools:
 - Übergabe der Nennwerte an den Workflow
 - Folgerichtige Abarbeitung aller zu den Modellen gehörenden Simulationsprogramme
- Vorteile für den Nutzer:
 - Keine „manuelle“ Überführung von Entwurfsparametern in die Simulationsmodelle
 - Einheitliche Oberfläche für unterschiedlichste Simulatoren (SimX, FEM, CAD, ...)
 - Verkopplung unterschiedliche Simulatoren, z.B.:
 - Übernahme geometrischer und stofflicher Nennwerte aus einem CAD-System.
 - Überprüfung des dynamischen Verhaltens mittels ganzheitlicher Systemsimulation.



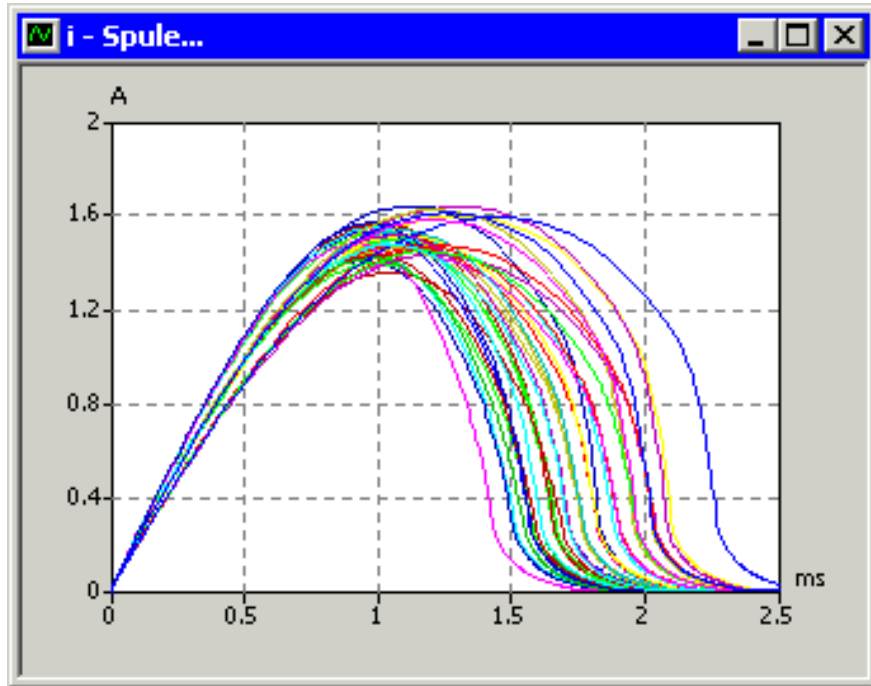
4.3. Analyse- und Optimierungstools

4.3.2. Analysen

----> *Einfluss-Analyse*

Geplante Folge von Nennwert-Simulationen:

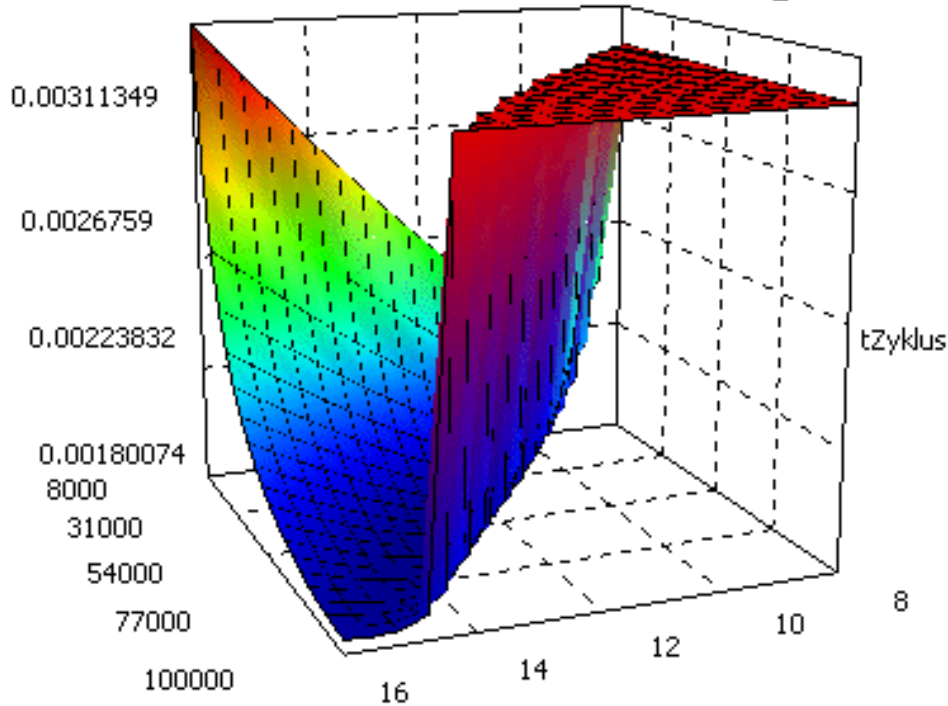
Welche Abhängigkeit existieren zwischen den variierten Parametern und ausgewählten Verhaltensgrößen des Modells?



0.00355107

d_Anker

Feder_k





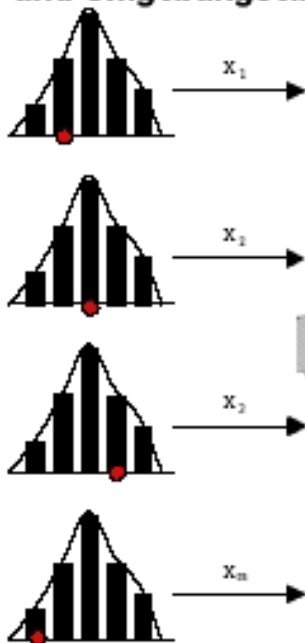
4.3. Analyse- und Optimierungstools

4.3.2. Analysen

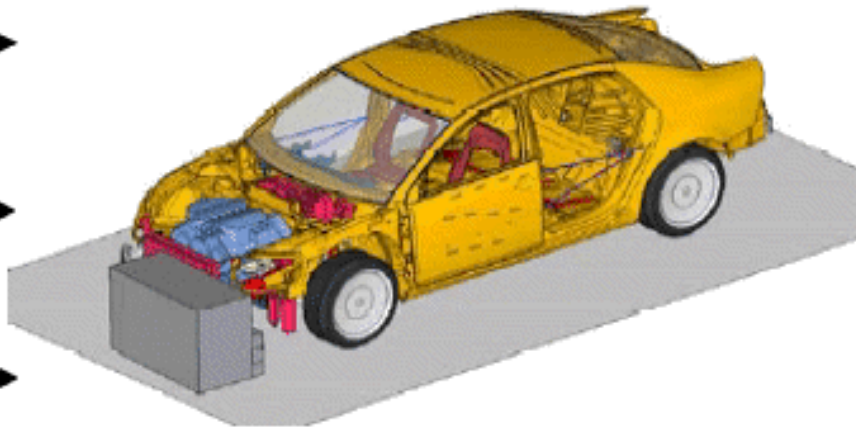
----> *Probabilistische Simulation (Simulation von Stichproben)*

- Eigenschaften technischer Systeme streuen (Eingangsgrößen & Verhalten). In der Konstruktion benutzt man dafür den Begriff der **Toleranz**. Die **Wahrscheinlichkeitstheorie** behandelt diese Streuungen in verallgemeinerter Form für beliebige Systeme.
- Probabilistische Simulation bildet das Verhalten einer realen **Stichprobe** numerisch nach und ist Bestandteil der **Statistischen Versuchsplanung (DOE=design of experiments)**.
- Es wird nicht das einzelne Exemplars des modellierten Objekts mit seinen konkreten Istwerten berechnet (=Nennwert-Simulation).
- Ermittelt werden die **Wahrscheinlichkeitsfunktionen** für Kenngrößen des Systemverhaltens (=Streuung des Systemverhaltens):
 - Vorgabe von Wahrscheinlichkeitsfunktionen für Parameter, welche die Systemkomponenten und die Wechselwirkung mit der Umgebung beschreiben.
 - Nutzung der Übertragungsfunktion des numerischen Modells, welches auch für die Nennwert-Simulation genutzt werden kann:

Streuung von Systemkomponenten und Umgebungseinfluss

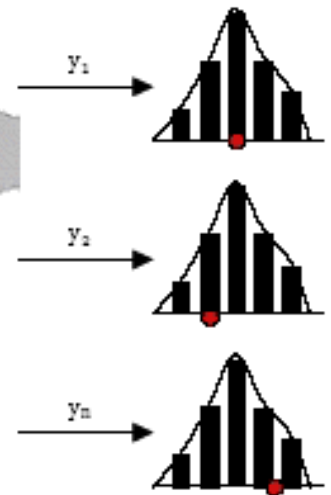


Variation von Input-Variablen (z.B. Monte-Carlo)



Numerisches Modell + **Simulationssystem**

Streuung des Systemverhaltens



Streuung von Output-Variablen

= **Nennwert-Simulation**



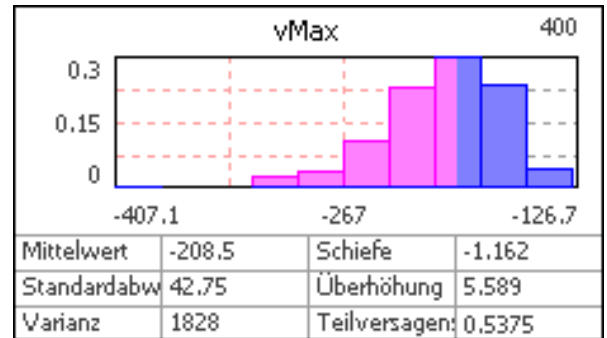
4.3. Analyse- und Optimierungstools

4.3.2. Analysen

----> *Probabilistische Simulation (Numerische Verfahren)*

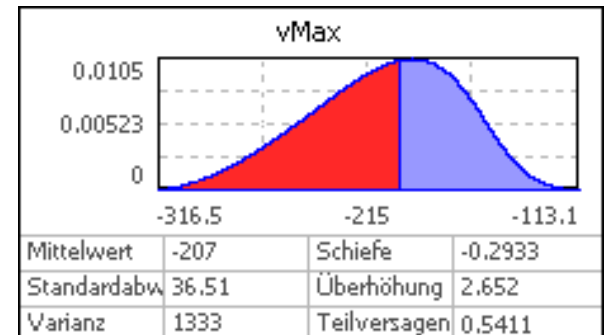
Monte-Carlo-Simulation:

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



Analytische Verfahren (z.B. Second-Order-Analyse):

- Analytisches Verfahren zur Berechnung der Verteilungsfunktionen von Ausgangsgrößen aus den Verteilungsfunktionen von Eingangsgrößen.
- Übertragungsfunktionen werden auf Basis von Modellabtastungen durch Taylor-Reihen 2.Ordnung approximiert.
- Für viele Einsatzfälle hinreichende Genauigkeit mit relativ wenigen Modelldurchrechnungen.



4.3. Analyse- und Optimierungstools

4.3.2. Analysen

----> *Probabilistische Simulation (Monte-Carlo-Simulation)*

- **"Klassisches" Monte-Carlo-Sampling:**

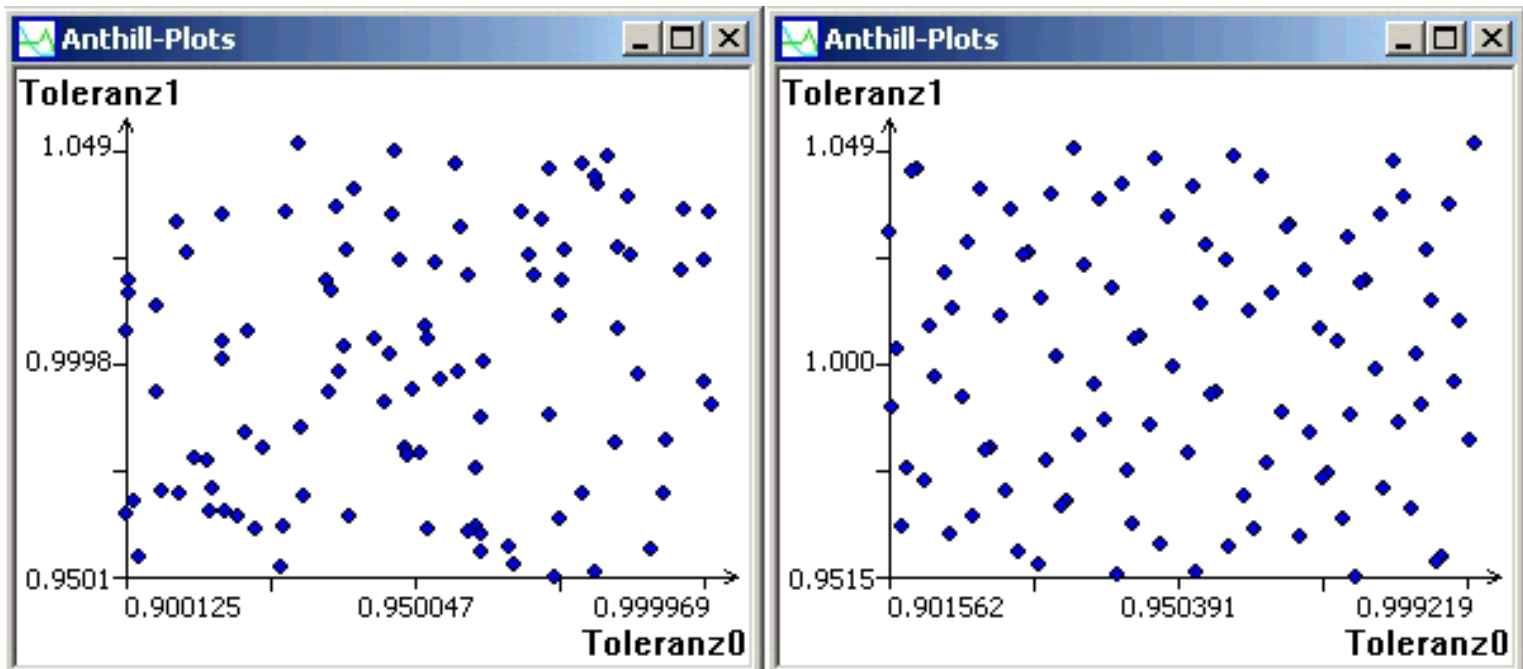
- Gewürfelt wird über die gesamte Toleranzbreite
- Stichprobenumfang N für eine hinreichend genaue Nachbildung der Verteilungsfunktionen ist sehr groß.
- Erst bei ungefähr $N=1\,000\,000$ konvergiert der Fehler der Toleranzsimulation gegen Null.

- **Latin Hypercube Sampling:**

- Die gesamte Toleranzbreite wird in Teilintervalle zerlegt.
- Jedes Teilintervall wird je nach angestrebter Verteilungsfunktion mit Zufallszahlen gefüllt.
- Das ergibt eine hinreichend genaue Nachbildung der Verteilungsfunktionen bereits mit relativ kleinem Stichprobenumfang (z.B. $N=500$).

- **Sobol Sampling:**

- Das Verfahren benutzt eine Quasi-Zufallszahlen-Sequenz. Damit verteilen sich die Punktwolken im Parameterraum gleichmäßiger als Monte Carlo und der benötigte Stichprobenumfang reduziert sich auf ca. 10%.
- Betrachtet man die erzeugten Punktwolken, erkennt man, dass beim Sobol-Verfahren (rechter Plot) Symmetrie-Beziehungen für die Zufallszahlen-Generierung genutzt werden:



- **Subset Simulation:**

- Es werden nur die Teilbereiche der Toleranzen näher untersucht, die unzulässige Lösungen bewirken.
- Man erhält nur Aussagen zur Versagenswahrscheinlichkeit, aber keine Informationen zur Verhaltensstreuung im zulässigen Bereich.
- Diese Methode eignet sich gut, wenn sehr viele Toleranzgrößen zu berücksichtigen sind

(>1000).

- Vorteile des Verfahrens liegt bei einer großen Anzahl der Toleranzen (ca. 1000) und geforderter hoher Genauigkeit der Versagenswahrscheinlichkeit des Systems.



4.3. Analyse- und Optimierungstools

4.3.2. Analysen

----> *Probabilistische Simulation (Second Order Analyse)*

- Es handelt sich um ein numerisches Verfahren zur Berechnung der Verteilungsfunktionen von Ausgangsgrößen aus den Verteilungsfunktionen der Eingangsgrößen.
- Das Prinzip basiert auf der Zerlegung der Funktion in eine Taylor-Reihe zweiter Ordnung. Wenn im Modell f eine Funktion von einem Variablenvektor \mathbf{x} mit der Anzahl n ist, lautet die Taylor-Reihe zweiter Ordnung :

$$f = f_0 + \sum_{j=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_j} (x_j - x_0) + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \frac{\partial^2 f}{\partial x_j^2} (x_j - x_0)^2 + \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^n \frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_k} (x_j - x_0)(x_k - x_0)$$

- Für jede Ausgangsgröße wird eine Ersatzfunktion f gebildet.
- Während der Simulationsrechnung werden Stützstellen für diese Ersatzfunktionen berechnet:
 - Pro Toleranzgröße T_n werden nur drei Stützstellen genutzt (Grenzwerte und Mittelwert).
 - Bedingt durch die kombinatorische Abtastung des Modells steigt die benötigte Anzahl der Modell-Läufe quadratisch mit der Anzahl n der Toleranzgrößen auf $2n^2+1$.
 - Die verwendeten Verteilungsfunktionen der Input-Toleranzen entsprechen exakt den Vorgaben, da hierfür die entsprechenden Funktionsgleichungen verwendet werden.
 - Die Momente der Ausgangsgrößen werden näherungsweise aus den Momenten der Eingangsgrößen berechnet. Aus den ermittelten Momenten werden anschließend die Verteilungen der Ausgangsgrößen approximiert.
- Das Verfahren arbeitet sehr genau, wenn das Verhalten der Ausgangsgrößen im Toleranzraum annähernd quadratische Abhängigkeiten zu den Toleranzgrößen aufweist:
 - Die Ergebnisse mit 4 Toleranzen sind dann vergleichbar mit einer Monte-Carlo-Simulation bei einer Stichprobengröße von 100 000.
 - Da das Verfahren ohne Zufallszahlen arbeitet, ist es numerisch sehr stabil und erlaubt auch eine schnelle Optimierung von Toleranzgrößen.
 - Der Nachteil des Verfahren liegt in dem hohen Rechenaufwand bei einer großer Anzahl von Toleranzgrößen.



4.3. Analyse- und Optimierungstools

4.3.2. Analysen

----> *Probabilistische Simulation (Reduzierte Second Order Analyse)*

- Die Berücksichtigung der Interaktionen zwischen den einzelnen Variablen x_j und x_k bewirkt den größten Anteil an der Zahl der Modelldurchrechnungen bei der Second Order Analyse.
- Diese Abhängigkeiten zwischen den Toleranzgrößen werden durch den letzten Summanden der Formel berücksichtigt:

$$f = f_0 + \sum_{j=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_j} (x_j - x_0) + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \frac{\partial^2 f}{\partial x_j^2} (x_j - x_0)^2 + \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^n \frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_k} (x_j - x_0)(x_k - x_0)$$

- Praktisch äußern sich Abhängigkeiten zwischen den Toleranzgrößen darin, dass der Einfluss der einzelnen Toleranzgrößen auf die Ausgangsgrößen abhängig ist vom aktuellen Ist-Wert der anderen Toleranzgrößen.
- Häufig kann man die Wechselwirkungen zwischen den Toleranzen vernachlässigen:
 - Der letzte Summand der Taylorreihe kann für die erforderliche Ersatzfunktion gestrichen werden.
 - Man spricht dann von "Reduzierter Second Order Analyse".
 - Die Anzahl der erforderlichen Modelldurchrechnungen beträgt danach nur $2n+1$ und steigt somit nur noch proportional zur Anzahl n der Toleranzgrößen!



4.3. Analyse- und Optimierungstools

4.3.2. Analysen

----> *Probabilistische Simulation (Sensitivitätsanalyse)*

Reduzierung des Toleranz-Problems:

1. Welche Streuungen können vernachlässigt werden?

- Das Pareto-Chart zeigt, in welchem Maße ein bestimmtes Ergebnis (Effekt) durch eine bestimmte Ursache (Streuung) hervorgerufen wurde.
- Bei Vernachlässigung z.B. der Widerstandstoleranz dR reduziert sich die Berechnung einer Stichprobe ($2n^2+1$) von 51 auf 32 Simulationsläufe!

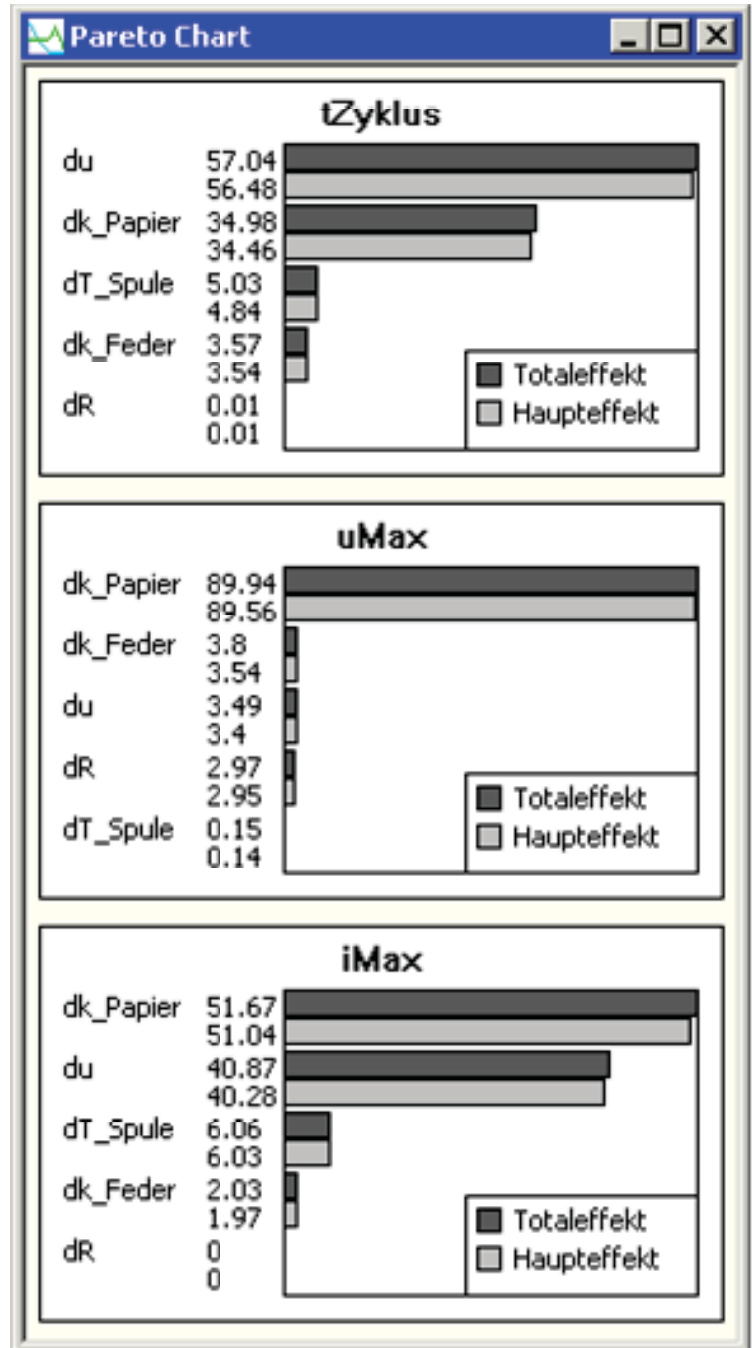
2. Existieren Wechselwirkungen zwischen den toleranzbehafteten Größen?

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

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

- Gibt es keine Interaktionen zwischen den toleranzbehafteten Größen, so sind die Werte beider Effekte gleich.
- Dann kann man den größten Teil der Modellrechnungen einsparen und das Verfahren der *Reduzierten Second Order Analyse* nutzen.

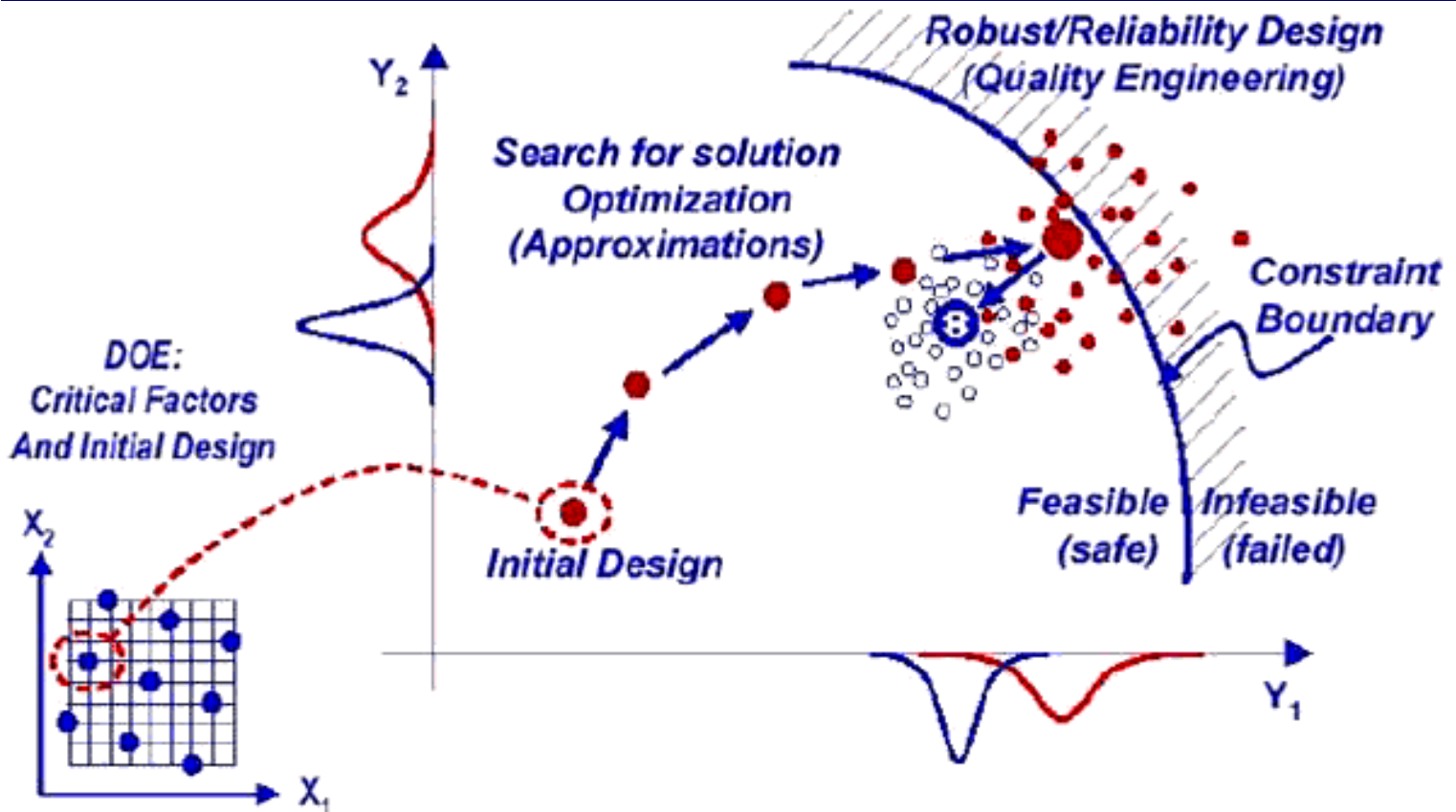
Mit 9 Simulationsläufen ($2n+1$) erhält man im Beispiel die gleichen Ergebnisse wie vor der Reduktion mit 51 Läufen!



4.3. Analyse- und Optimierungstools

4.3.2. Analysen

----> *Probabilistische Simulation (Zuverlässigkeitsanalyse)*



Zuverlässigkeitsanalyse untersucht die Grenzüberschreitung der Restriktionsgrößen:

- Wie groß ist die Ausfallwahrscheinlichkeit bei Wirkung der aktuellen Nennwerte und ihrer Streuungen?
- Nach der Nennwert-Optimierung technischer Systeme liegt das Nennwert-Optimum z.B. meist an Restriktionsgrenzen. Die Ausfallwahrscheinlichkeit beträgt deshalb ca. 50% **(rote Streuung)**.

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

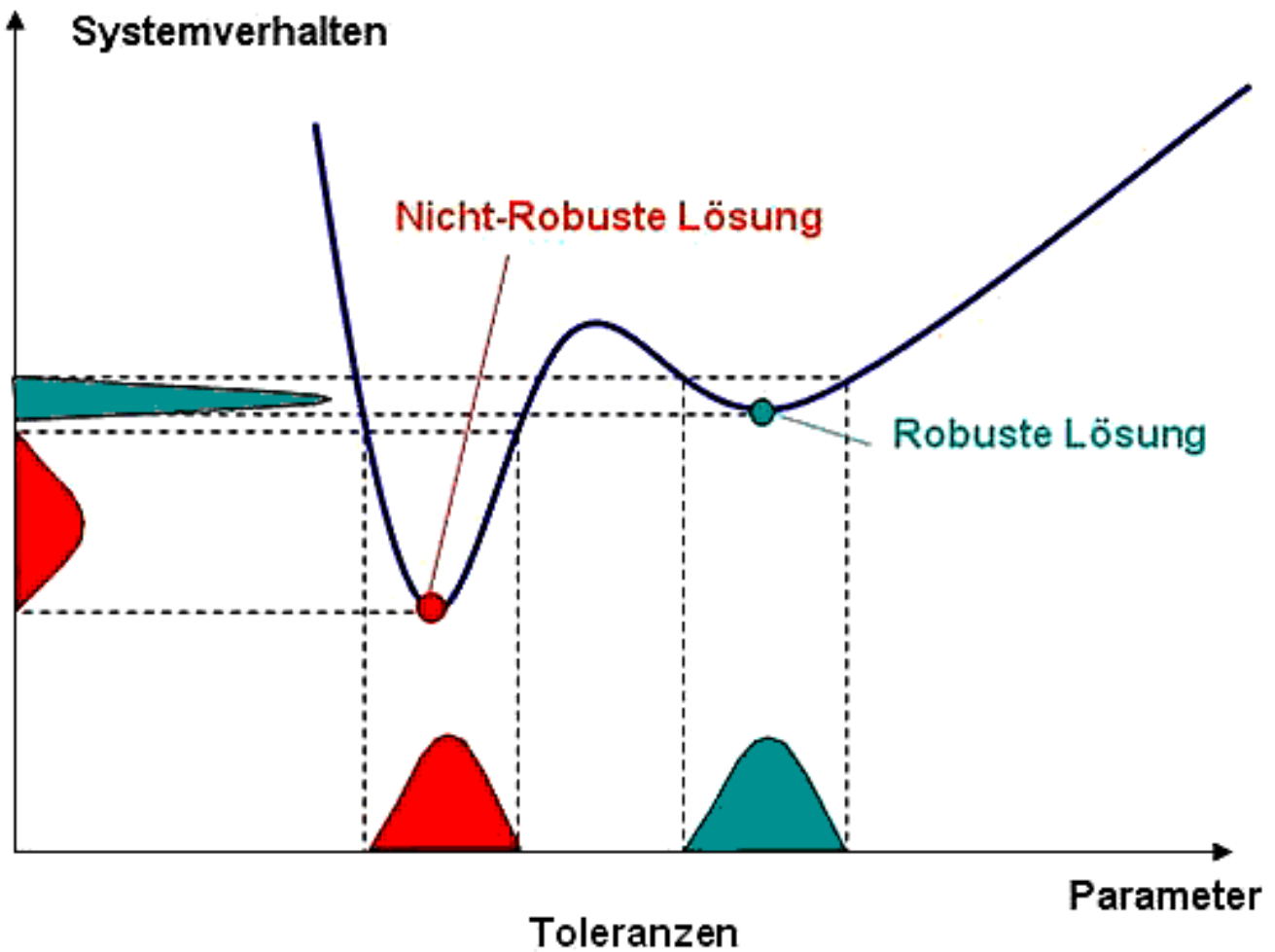
4.3. Analyse- und Optimierungstools

4.3.2. Analysen

----> *Probabilistische Simulation (Robustheitsbewertung)*

Frage:

„Wie empfindlich reagiert mein System auf kleine Änderungen der Umgebungsbedingungen?“



- Berechnung der Varianzen der Ausgangsgrößen im Streubereich der Parameter:
 - Robustes Verhalten -> kleine Varianzen
 - Nichtrobustes Verhalten -> große Varianzen



4.3. Analyse- und Optimierungstools

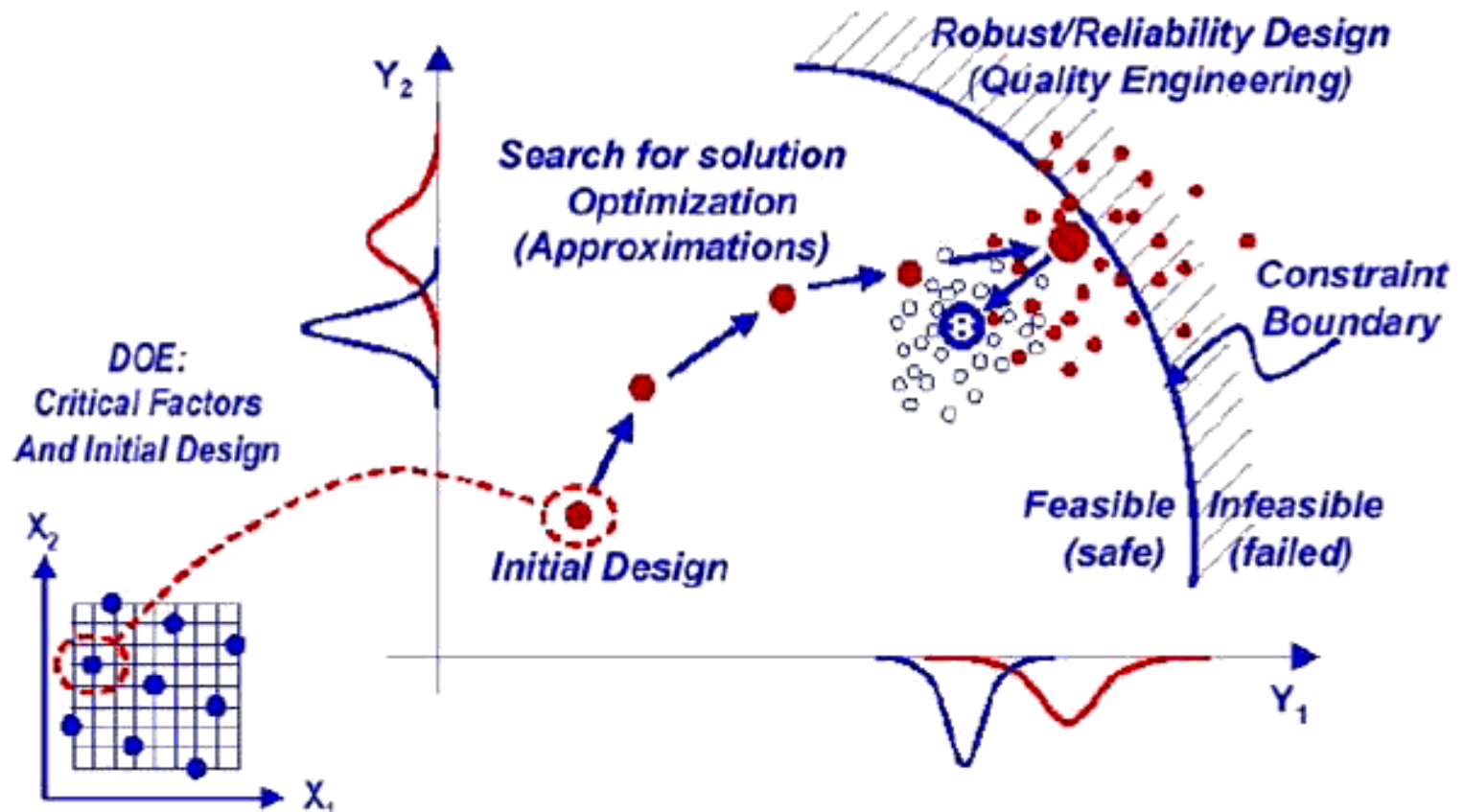
4.3.2. Optimierung

----> "Klassische" Nennwert-Optimierung

Gesucht werden die "exakten" Parameter für die bestmögliche "konkrete" Lösung:

- Die Lösung soll möglichst gut alle Forderungen der Aufgabenstellung erfüllen (möglichst keine Restriktionen verletzen).
- Sind alle Forderungen erfüllbar, so soll die Lösung möglichst weit reichend die Wünsche der Aufgabenstellung erfüllen.
- Streuungen der System-Parameter und der Umgebungsbedingungen werden vernachlässigt.
- Das zu optimierende System wird meist als deterministisch und autonom betrachtet.

Ausgehend von einer oder mehreren Anfangslösungen führt die Nennwert-Optimierung bei technischen Systemen meist zu Optima, welche direkt an der Grenze zu unzulässigen Lösungen liegt:





4.3. Analyse- und Optimierungstools

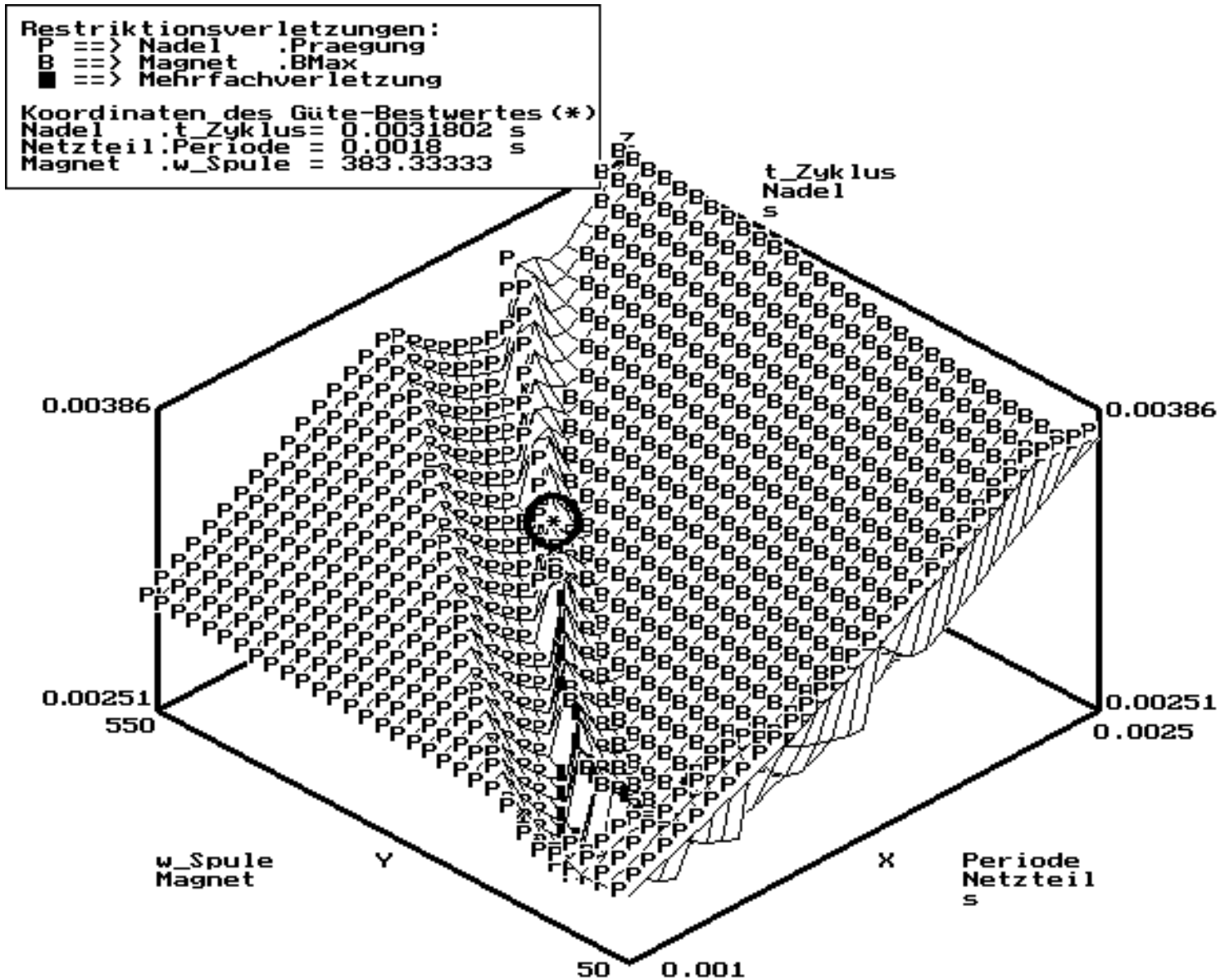
4.3.3. Optimierung (Nennwert-Optimierung)

----> Mit Nebenbedingungen (Gütekriterien und Restriktionen)

Hierarchische Optimierung auf zwei Zielfunktionen:

$$\text{Zielfunktion} = \text{Gütefunktion} / \text{Straffunktion}$$

- Der zulässige Bereich der "Güte-Funktion" ist meist bedeutend kleiner als der unzulässige Bereich der "Straf-Funktion".
- Nichtevolutionäre, lokale Suchverfahren finden entlang des "Knicks" zwischen Güte- und Straf-Funktion meist nicht das Randoptimum technischer Systeme:



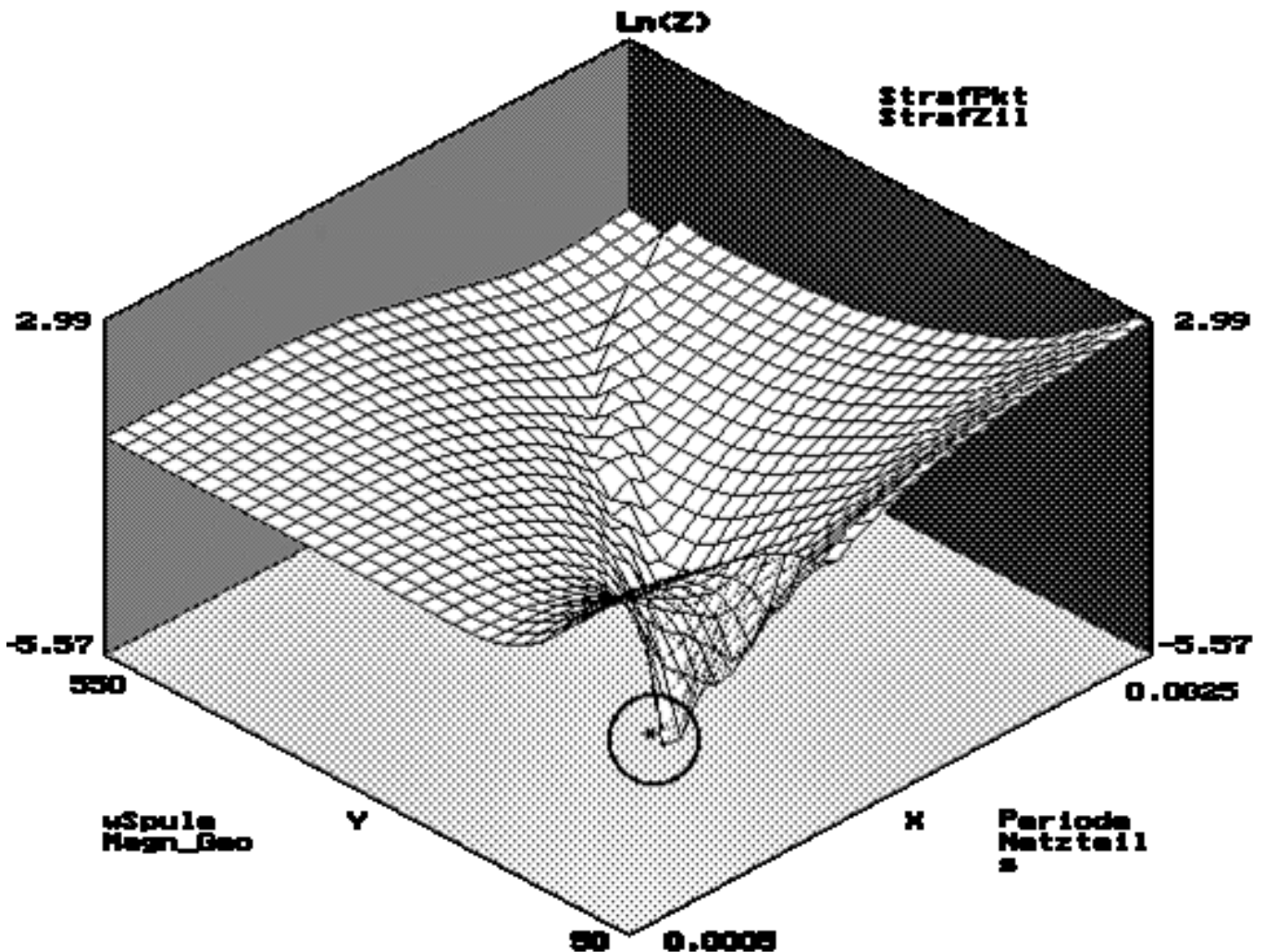
4.3. Analyse- und Optimierungstools

4.3.2. Optimierung (Nennwert-Optimierung)

----> *Straf-Zielfunktion (auf Basis der Restriktionen)*

Die Probleme der Verfahrens-Konvergenz an Restriktionsgrenzen umgeht man am einfachsten, indem man solche Grenzen vermeidet:

- Alle Gütekriterien werden als Restriktionsgrößen definiert.
- Aus Vorüberlegungen kann man meist abschätzen, welchen Wert die Gütekriterien überhaupt erreichen können.
- Im Optimierungsprozess kann man die Forderungen an die Gütekriterien in Form der zugehörigen Restriktionen solange verschärfen, wie noch zulässige Lösungen gefunden werden (Straf-Funktion=0).
- Die Straf-Funktion ist als Zielfunktion meist "gutmütiger" als die Gütefunktion der Gütekriterien:





4.3. Analyse- und Optimierungstools

4.3.3. Optimierung

----> *Probabilistische Optimierung*

Gesucht wird eine optimale Lösung unter Berücksichtigung der Streuungen um die Nennwerte:

- Ausgangspunkt für die probabilistischen Optimierung ist eine Lösung, welche in Hinblick auf die Nennwerte alle Forderungen der Aufgabenstellung erfüllt.
- Die einflussreichsten Streuungen der System-Parameter und der Umgebungsbedingungen werden berücksichtigt.
- Statt einer Nennwert-Simulation wird für jeden Optimierungsschritt die Simulation einer Stichprobe durchgeführt. Dazu nutzt man ein geeignetes Verfahren der statistischen Versuchsplanung.
- Das zu optimierende System wird weiterhin meist als deterministisch und autonom betrachtet. Es ist aber auch möglich, die Streuungen der System-Übergangsfunktion zu berücksichtigen.

Die probabilistische Optimierung kann mit unterschiedlichen Zielen durchgeführt werden:

- Kosten-Minimierung für die Realisierung der zulässigen Toleranzwerte.
- Ausschuss-Minimierung durch Minimierung der Versagenswahrscheinlichkeit.
- Robust-Optimierung durch Minimierung der Varianzen wesentlicher Funktionsgrößen.

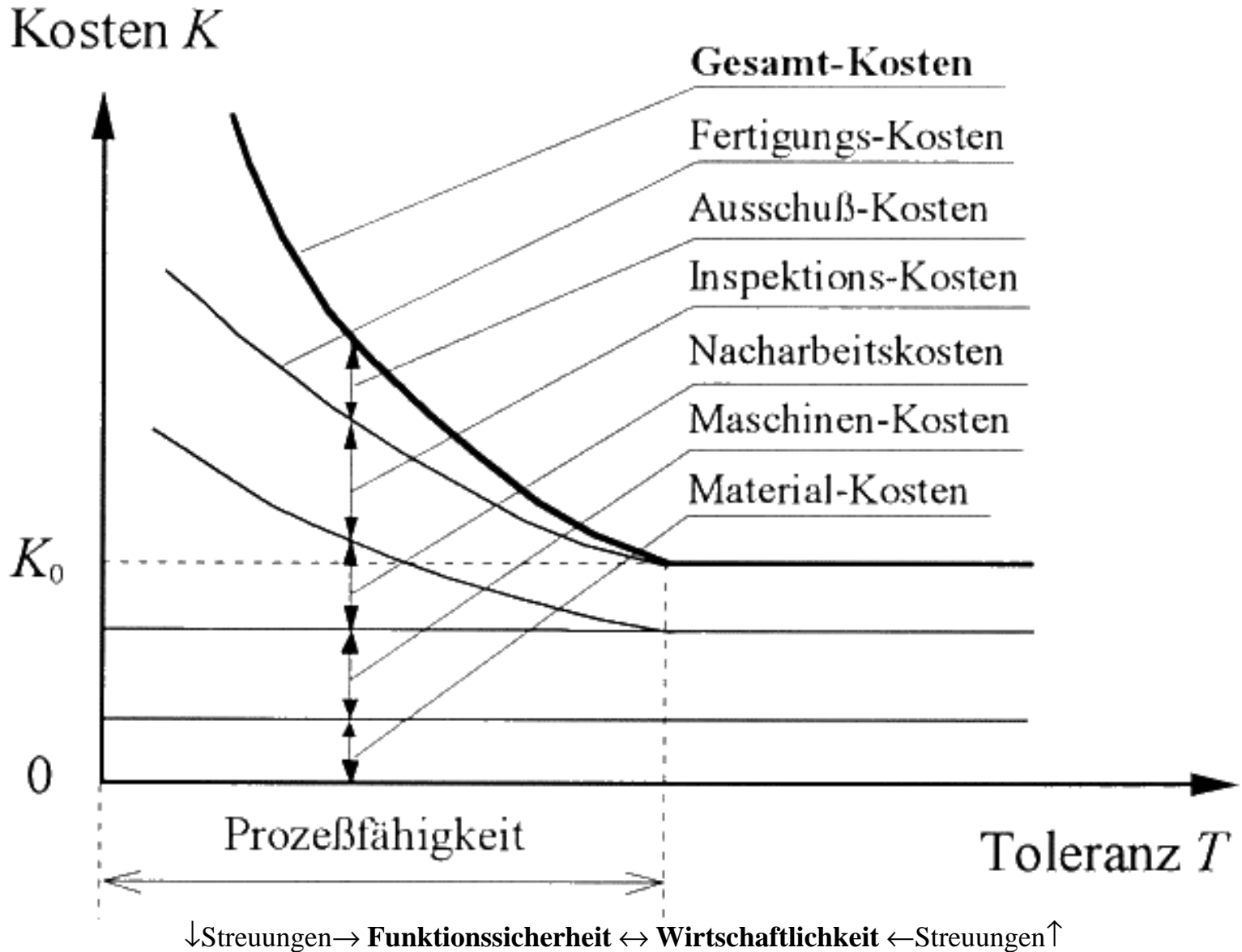
Eine Kombination und Modifikation dieser Zielstellungen ist möglich.



4.3. Analyse- und Optimierungstools

4.3.3. Optimierung

----> *Probabilistische Optimierung (Kosten-Minimierung)*



- **Kosten-Minimierung (Fertigungskosten - allgemein "Realisierungskosten"):**

- Bei der "Maximierung der Streuungen" muss ein Kompromiss gefunden werden zwischen möglichst kleinen Fertigungskosten und Erfüllbarkeit aller Forderungen der Aufgabenstellung.
- Minimiert wird hierbei die Summe der Fertigungskosten für die Einzeltoleranzen:
 - Voraussetzung ist die Kenntnis um die Kostenfunktion für jede einzelne streuungsbehaftete Größe.
 - Durch Nutzung eines einheitlichen Funktionsansatzes genügt meist eine Gewichtung der Fertigungskosten zueinander (Kostenfaktoren).
 - Im Spezialfall kann es günstig sein, auch einzelne Streubereiche trotz höherer Teilkosten zu verkleinern, wenn dabei die Gesamtkosten sinken!



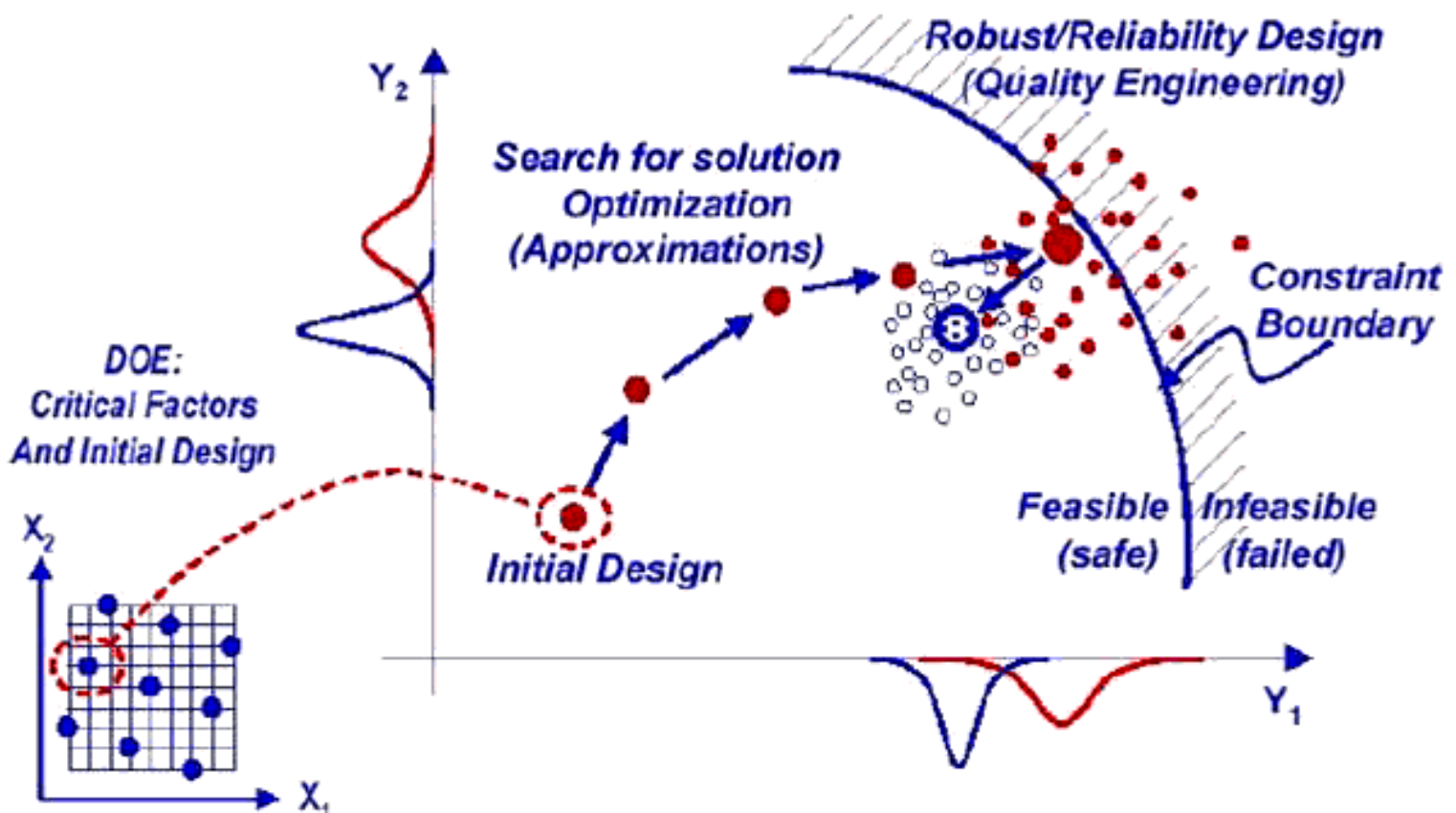
4.3. Analyse- und Optimierungstools

4.3.3. Optimierung

----> *Probabilistische Optimierung (Ausschuss-Minimierung)*

Minimierung der Versagenswahrscheinlichkeit:

- Voraussetzung ist eine zuvor durchgeführte Nennwert-Optimierung.
- Unter Beibehaltung der ermittelten Streubereiche werden die Nennwerte soweit von den Restriktionsgrenzen weg geschoben, dass die Versagenswahrscheinlichkeit unter Berücksichtigung der Streuungen minimal wird (möglichst = Null).
- Dabei erfolgt keine zielgerichtete Beeinflussung der Verhaltensstreuung, die rote Lösungstreuung würde in der Skizze nur hinreichend weit in den zulässigen Bereich verschoben:



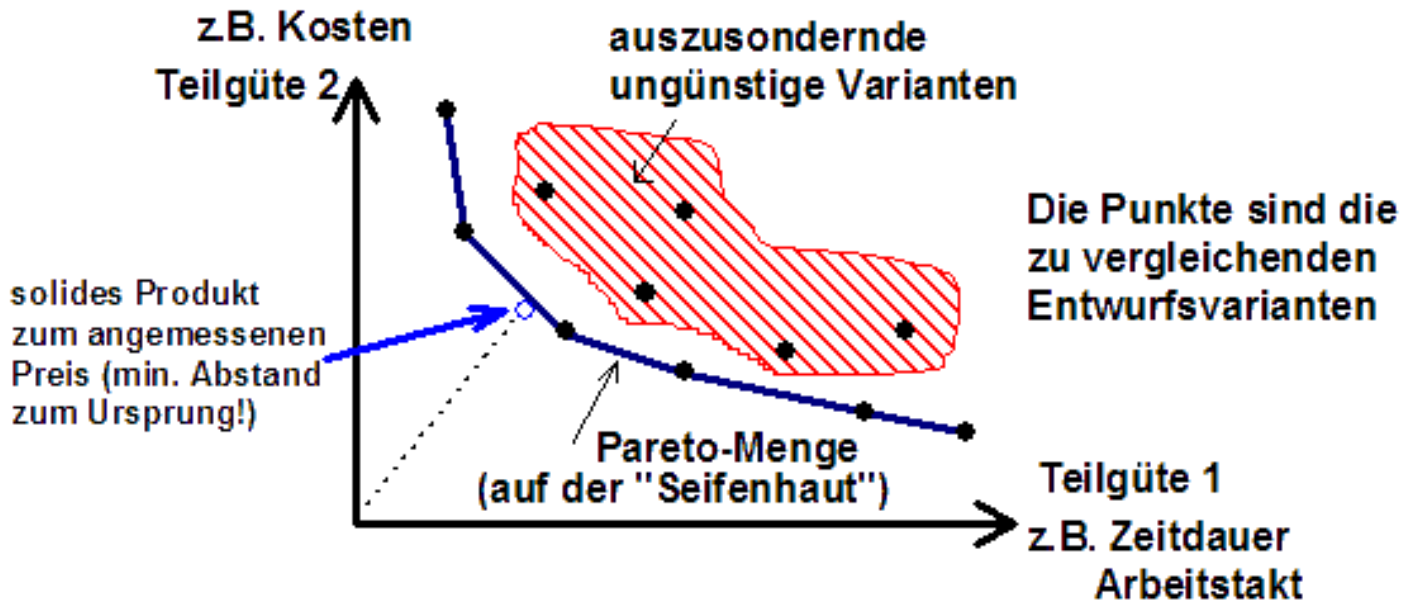


4.3. Analyse- und Optimierungstools

4.3.3. Optimierung

----> *Mehrkriterielle Optimierung*

Einleitend zu den Co-Evolutionären Verfahren wurde bereits das Prinzip der mehrkriteriellen Optimierung beschrieben, welche auch **Pareto-Optimierung** genannt wird:



Das Pareto-Optimum (nach **Vilfredo Pareto**) ist dadurch gekennzeichnet, dass es nicht mehr möglich ist, eine Teilgüte zu verbessern ohne gleichzeitig mindestens eine andere Teilgüte zu verschlechtern:

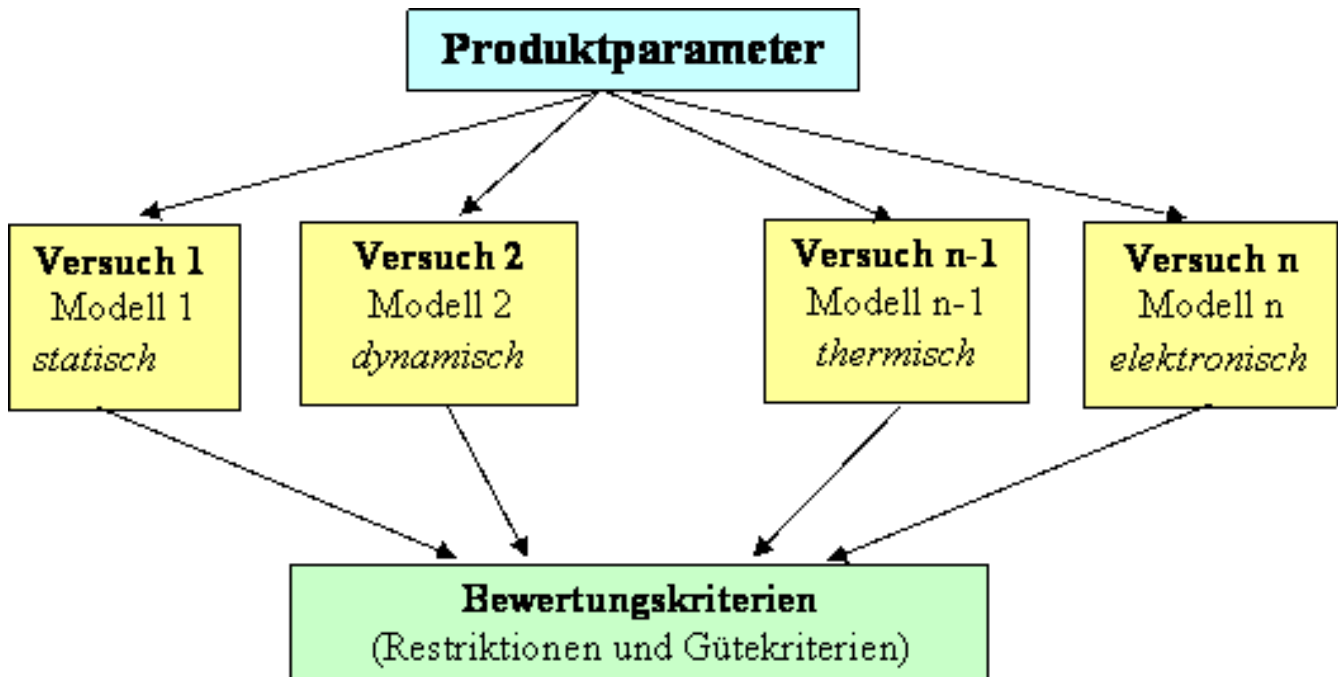
- Automatische Ermittlung der Pareto-Menge mittels Co-evolutionärer Verfahren und deshalb nur mit evolutionären Algorithmen verfügbar. Der Nutzer wählt seine optimale Kompromisslösung in Abhängigkeit von den konkreten Verwertungsbedingungen.
- Für nichtevolutionäre Optimierungsverfahren wird die Zielfunktion durch einfaches Addieren der gewichteten Gütekriterien gebildet. Je nach Gewichtung ergibt sich eine andere optimale Lösung.



4.3. Analyse- und Optimierungstools

4.3.3. Optimierung

----> *Multidisziplinäre Optimierung*



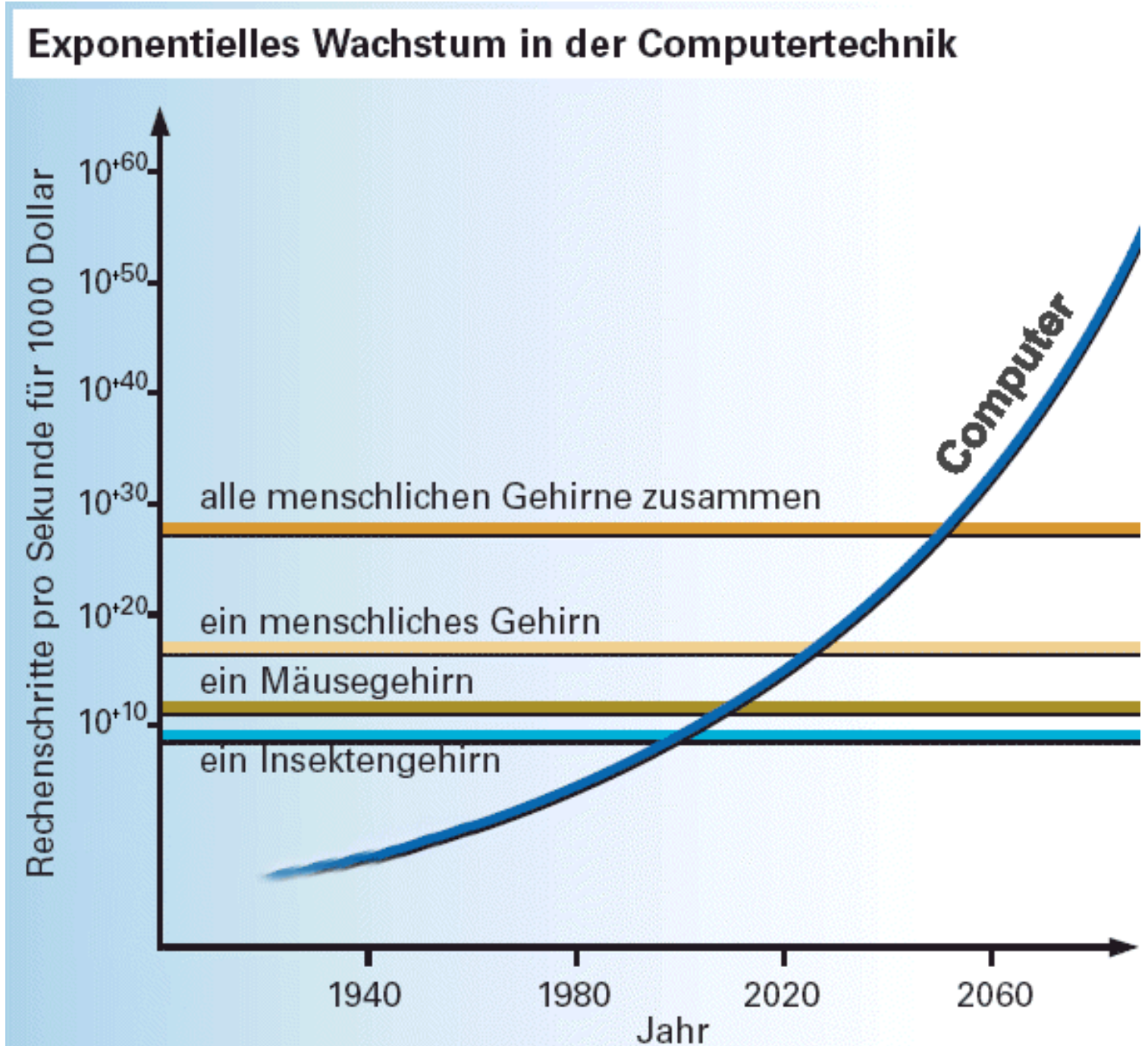
- Die Bewertung der Funktionalität umfasst oft Kriterien unterschiedlicher Domänen:
 - Kollisionsfreiheit
 - statische Festigkeit
 - Bewegungsdynamik
 - Erwärmung
 - ...
- Bewertung der Kriterien über eine Abfolge von Modell-Versuchen (Workflow):
 - Für unterschiedliche physikalisch-technische Domänen meist spezielle Modelle.
 - Alle Versuche mit den gleichen Entwurfparametern (Nennwerte + Streuungen).
 - Jeder einzelne Versuch mit einem speziell konfigurierten Modell.
 - Da die Versuche unterschiedliche Bewertungskriterien haben, werden in den Modellen auch unterschiedliche Restriktionen und Gütekriterien bewertet.



4.3. Analyse- und Optimierungstools

4.3.4. Ausblick

----> *Exponentiell wachsende Möglichkeiten*



Nach Ray Kurzweil: Der Mensch Version 2.0 - Spektrum der Wissenschaft 01/2006 S.101