

**Vorträge**

**CAE-basierte Robust Design  
Optimierung in der virtuellen  
Produktentwicklung**

Johannes Will

# CAE-basierte Robust Design Optimierung in der virtuellen Produktentwicklung

Dr.-Ing. Johannes Will  
DYNARDO GmbH, Luthergasse 1d, 99423 Weimar

Tel.: 03643 494980, [johannes.will@dynardo.de](mailto:johannes.will@dynardo.de)

## 1 Einführung

Die Geschwindigkeit der Entwicklung und Einführung technischer Innovationen sowie die Anforderungen an die Optimierung von Produkten verlangt heute mehr denn je nach virtueller Produktentwicklung. Dabei unterscheidet man zwischen der Konstruktion von Designs (Computer Added Design-CAD) und der Berechnung bzw. des Nachweises von Funktionsfähigkeit mittels Simulationsverfahren (Computer Added Engineering-CAE). CAE-basierte Optimierung und stochastische Analyse sind dabei Schlüsseltechnologien, um die Produktperformance zu optimieren und gleichzeitig die Qualitätsanforderungen an Zuverlässigkeit und Robustheit nachzuweisen. Die parallele virtuelle Absicherung der Optimierung und des Robustheitsnachweises erfordert effiziente Strategien der Robust Design Optimierung (RDO).

### 1.1 Variantenstudien, Parametrik und Prozessautomation

CAE-basierte Optimierungsstrategien, angefangen von manuell erzeugten Variantenstudien, über DOE-Techniken, Topologie und Formoptimierung bis hin zu multidisziplinären Parameteroptimierungen, werden seit 20 Jahren schrittweise in der Produktentwicklung und -produktion integriert. Neben Insellösungen zur Optimierung einzelner Disziplinen und Produkthanforderungen gibt es heute einen Trend zu parametrischen Modellierungsumgebungen, die das Potential erschließen, CAD und CAE Parametrik über mehrere Berechnungsdisziplinen und Produkthanforderungen miteinander zu verbinden. Damit können Produkte mittels intelligenter Variantenrechnungen über mehrere Simulationsdisziplinen und unter Berücksichtigung von CAD und CAE Randbedingungen automatisiert optimiert werden. Durchgängige Parametrik, Integration und Automation von Simulationsprozessen sind damit eine Notwendigkeit moderner parametrischer RDO-Prozesse und führen gleichzeitig zu einer Erhöhung der Anzahl der zu berücksichtigenden Parameter. Aufgabenstellungen mit einem Dutzend oder einigen hundert Parametern, welche sowohl zu optimierende Größen als auch zu berücksichtigende Streuungen repräsentieren, werden jetzt Normalität.

### 1.2 Optimierung und Robustheit im Konflikt?

Optimierungsziele wie Gewichtseinsparung oder Performanceoptimierung stehen dabei häufig im Konflikt mit Robustheit und Zuverlässigkeit der Produkte. Das ist keine neue Erkenntnis. Natürlich haben Ingenieure sich zu allen Zeiten um die Balance zwischen Optimierung und Zuverlässigkeit Gedanken machen müssen. Dies sei am Beispiel der Dombauhütten des Mittelalters illustriert. In der Zeit der Romanik waren Fensteröffnungen schmal und mit Halbkreisen überdeckt. Aus statischen Gesichtspunkten war das sehr sicher. Die Fassaden wurden jedoch immer filigraner, die Öffnungen und Spannweiten immer gewagter. Dabei gingen die Dombaumeister Schritt für Schritt an die Grenzen statisch machbarer Konstruktionen und so mancher Kirchenbau blieb unvollendet oder stürzte ein. Aus diesen Erfahrungen wurden Konstruktionsregeln für Mauerwerksbauten abgeleitet, die teilweise bis heute Gültigkeit haben. Damit wurden Sicherheitsabstände etabliert, die möglichst filigrane Kirchenbauten ermöglichen und gleichzeitig einen ausreichenden Abstand gegenüber Unsicherheiten des Baugrundes, geometrischer Abweichungen der Kirchenbauwerke oder Materialstreuungen enthalten.

## 2 RDO in der virtuellen Produktentwicklung

Produktrobustheit und Produktzuverlässigkeit wurden in der Vergangenheit entweder mit realen Versuchsreihen oder mit konservativen globalen Sicherheitsabständen in der Auslegung abgesichert. Weil reale Bauteilversuche unter Kosten- und Zeitdruck heutiger Produktentwicklungszyklen minimiert werden sollen und konservative Sicherheitsabstände zu unwirtschaftlichen Produkten führen, ist es ein folgerichtiger Trend den Nachweis von Robustheit und Zuverlässigkeit in die virtuelle Produktentwicklung zu verlagern und Bauteilversuche auf ein Minimum zu reduzieren. Der Nachweis von Robustheit und Zuverlässigkeit in der Robust Design Optimierung kann entweder mittels globaler oder lokaler Sicherheitsfaktoren sowie mit stochastischen Analyseverfahren erfolgen. In den RDO-Strategien, welche die Optimierungsziele und den Nachweis der Robustheit und Zuverlässigkeit miteinander verbinden, werden wir beide Methoden wiederfinden.

Dabei bezieht sich der Terminus Robustheit auf zum Nachweis herangezogene Standardabweichungen oder davon abgeleitete Sigma-Werte. Der Terminus Zuverlässigkeitsanalyse wird verwendet, wenn kleine Wahrscheinlichkeiten ( $<1$  aus 1000) zum Nachweis herangezogen werden.

### 2.1 Was sind die Herausforderungen bei der Integration von RDO in die virtuelle Produktentwicklung?

Die Einführung CAE-basierter Optimierung folgt in vielen Aspekten der bisherigen Arbeitsweise der Ingenieure, einzelne Designvarianten miteinander zu vergleichen. Natürlich wird mit der Definition der Optimierungsaufgabenstellung (Übersetzung von Designanforderungen in Zielfunktion und Nebenbedingungen), des Variationsraumes (Parametrisierung des Designraumes) und der Optimierungsstrategie (welches Optimierungsverfahren) das Optimierungspotential sehr stark beeinflusst. Aber eine Verbesserung um 0.5% oder um 10% ist in beiden Fällen ein valides Ergebnis. Diese von der Definition des Variationsraumes einer Optimierungsaufgabenstellung und vom Optimierungsalgorithmus unabhängige Verwertbarkeit und Validität der Optimierungsergebnisse ist bei der stochastischen Analyse **nicht** mehr gegeben.

Die Einführung CAE-basierter stochastischer Optimierungsverfahren verlangt **wesentliche** Erweiterungen bisheriger „deterministischer“ Berechnungsprozesse sowie die Wahrung einer Balance zwischen der Definition der Eingangsstreuungen, der Methodik der stochastischen Analyse und der Schätzung von Variations- und Korrelationsmaßen zur Bewertung von Robustheit und Zuverlässigkeit.

Um belastbare Schätzungen von Ergebnisvariationen zu erzielen, welche die Grundlage jeder Beurteilung von Robustheit und Zuverlässigkeit sind, müssen alle wichtigen Eingangsstreuungen in geeigneter Form berücksichtigt werden. Dies ist ein manchmal kontrovers diskutierter Punkt bei der Einführung von RDO-Strategien. Zu Recht wird darauf hingewiesen, dass eine detaillierte Kenntnis und eine adäquate parametrische Einführung aller Eingangsstreuungen eine schier unüberwindliche Hürde der stochastischen Analyse darzustellen scheinen. Würde man auf einen perfekten Wissensstand warten, wird man vermutlich nie beginnen. Deshalb ist ein pragmatischer Ansatz, mit konservativen Annahmen aller potentiell wichtigen streuenden Eingangsgrößen zu beginnen. Dabei werden für wichtige streuende Eingangsgrößen der Wissensstand und die Diskretisierung der Definition streuender Eingangsgrößen schrittweise erhöht.

Eine weitere Hürde bei der Einführung stochastischer Analyse ist die Tatsache, dass eine Standardabweichung oder eine Wahrscheinlichkeit nicht (deterministisch) ausgerechnet werden kann, sondern geschätzt wird. Der Anwender bekommt also keine eindeutige Zahl sondern eine Schätzung. Zu einer vertrauenswürdigen und damit belastbaren Schätzung, die für den Nachweis von Produkteigenschaften herangezogen werden kann, wird man deshalb häufig mehr als eine stochastische Rechnung durchführen müssen.

Grundsätzlich muss akzeptiert werden, dass die Einführung von stochastischer Analyse für belastbare Nachweise von Robustheit und Zuverlässigkeit innerhalb eines RDO-Prozesses eine signifikant große Anzahl von Stützstellen (Samples einer stochastischen Analyse) in der Größenordnung von mehreren Hundert oder mehreren Tausend mit sich bringt. Wenn eine einzelne Designbewertung hohe CPU-Anforderungen hat, stellt das eine nennenswerte Herausforderung an die Hardware und gegebenenfalls an die Lizenzen zur parallelen Berechnung von Designs. Deshalb ist die Herausforderung bei der Wahl der Methodik einer Robust Design Optimierung, eine Balance zwischen der Anzahl notwendiger Designaufrufe und der Vertrauenswürdigkeit der Robustheits- und Zuverlässigkeitsmaße zu halten.

Bei allen RDO-Methoden wird man deshalb versuchen, mit einem Minimum an realen Designstützstellen zur Schätzung der Robustheitsmaße auszukommen. Eine finale Überprüfung des mutmaßlichen optimalen und robusten Design nach einer Robust Design Optimierung ist mit geeigneten Methoden der Zuverlässigkeitsanalyse zwingend erforderlich.

Auf Grund der großen Stützstellenzahlen einer stochastischen Analyse werden in RDO Algorithmen Variationsmaße vorzugsweise mit Hilfe von Meta-Modellen (Response Surface Modelle) geschätzt. Die Eignung von Meta-Modellen für Robustheits- und Zuverlässigkeitsanalyse wird in der Fachliteratur kontrovers diskutiert. Der Aufwand geeignete Meta-Modelle zu generieren, hängt sehr stark von der Anzahl wichtiger streuender Eingangsgrößen, der Nichtlinearität der Ergebnisräume und vom Wahrscheinlichkeitsniveau eines robusten Designs ab. In jedem Fall muss ein durch Meta-Modelle ermitteltes robustes Design mittels einer finalen Zuverlässigkeitsanalyse mit realen Designstützstellen nachgewiesen werden.

### 3 Stand der Integration von Robust Design Optimierung (RDO)

Ein erster wichtiger Schritt ist die Etablierung einer vertrauenswürdigen Robustheitsbewertung der wichtigen Ergebnisgrößen gegenüber dem Einfluss von Unsicherheiten und Streuungen. Durch diese Sensitivitätsuntersuchung der potentiell Einfluss nehmenden Streuungen auf alle für den Nachweis wichtigen Ergebnisgrößen, kann eine erste Schätzung von Variation und Variablenwichtigkeit erfolgen. Um die Anzahl der streuenden Variablen auf die für die Ergebnisstreuung wichtigen zu reduzieren und die Vertrauenswürdigkeit der Schätzung von Variationsmaßen nachzuweisen, ist hier häufig ein schrittweises Vorgehen notwendig.

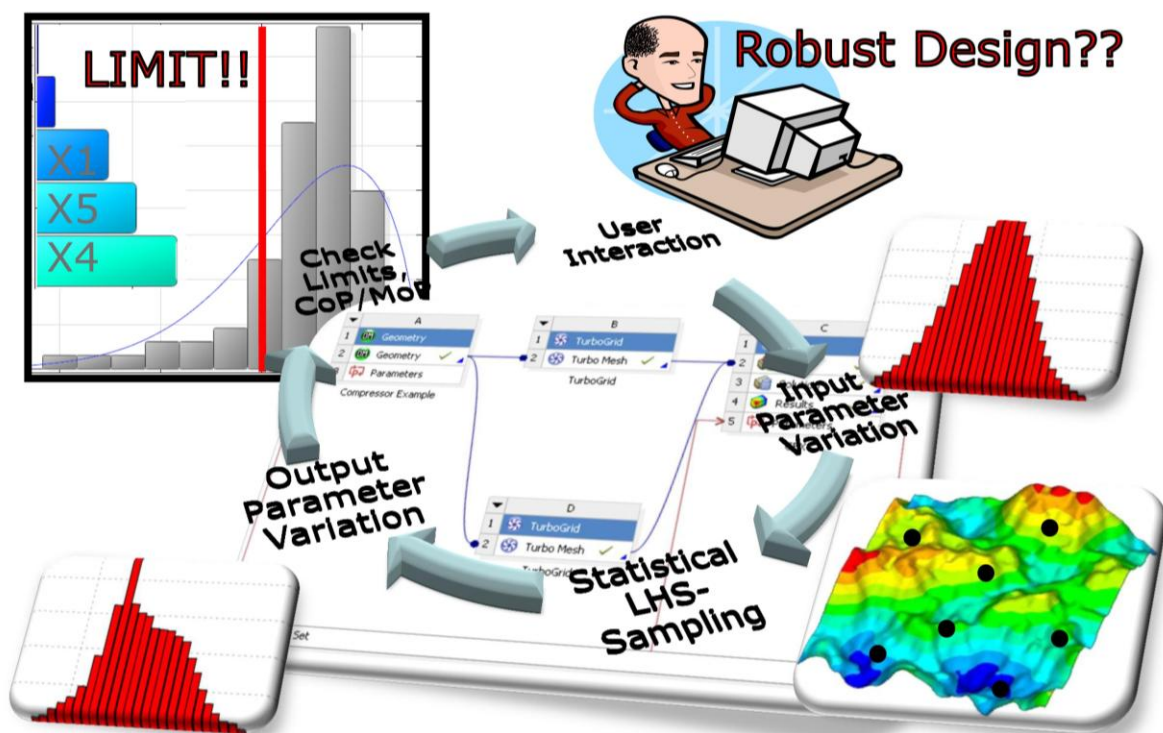


Figure 1 Flussdiagramm Robustheitsbewertung

Im Anschluss können notwendige Sicherheitsabstände geschätzt werden, um diese bei der Durchführung einer deterministischen Optimierung zu berücksichtigen. Für das unter Sicherheitsabständen optimierte Design wird dann im Anschluss mittels stochastischer Analyse die Robustheit oder Zuverlässigkeit nachgewiesen. Waren die Sicherheitsabstände nicht ausreichend, müssen Optimierungs- und Robustheitsschritt wiederholt werden. Diese Vorgehensweise (iterative RDO) ist effizient, wenn die notwendigen Sicherheitsabstände im Optimierungsraum weitgehend konstant sind.

Sind die Sicherheitsabstände zum Nachweis eines robusten Designs in verschiedenen Bereichen des Optimierungsraumes stark unterschiedlich, kann es notwendig werden, für jedes Design im Optimierungsraum die Variation zu bestimmen. Diese Variationsmaße werden zur Formulierung von Nebenbedingungen und Zielfunktionen einer Robust Design Optimierung verwendet. Danach können Methoden der Optimierung und der stochastischen Analyse automatisiert und miteinander verknüpft (automatische RDO) werden. Der Aufwand einer automatischen RDO steigt dann im Vergleich zu einer iterativen RDO in der Regel weiter signifikant an.

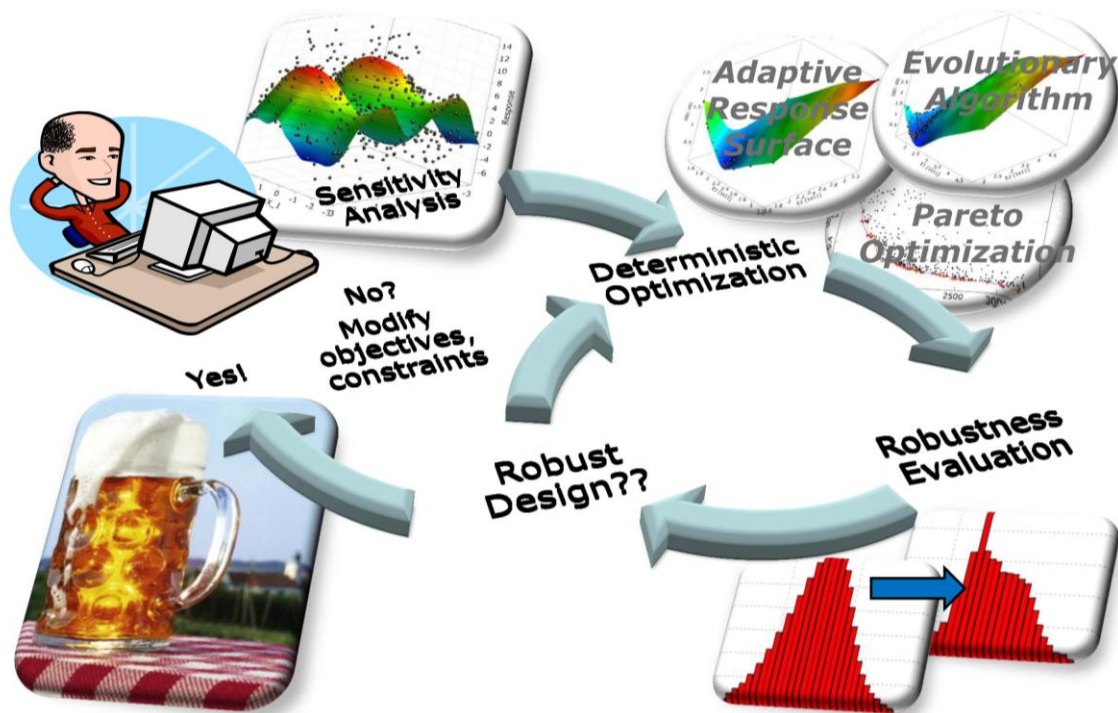


Figure 2 Flussdiagramm iterative Robust Design Optimierung

### 3.1 Anforderungen an Softwarelösungen für RDO

Aus obiger Diskussion der Herausforderungen an eine Integration von RDO-Methoden in der virtuellen Produktentwicklung möchten wir folgende Anforderungen an Softwarelösungen definieren:

- Es müssen alle potentiell wichtigen streuenden Eingangsgrößen unter Heranziehen des bestmöglichen Wissens über die Streuungen (im Zweifelsfall mit konservativen Annahmen zu den Streuungen) mindestens am Beginn einer Robustheitsbewertung berücksichtigt werden. Das führt zu realitätsnahen Aufgabenstellungen mit vielen stochastischen Parametern. Softwarelösungen müssen damit umgehen können und Technologien anbieten, die Wichtigkeit und Unwichtigkeit streuender Variablen zuverlässig ermitteln. Das ist die Grundlage, die Anzahl der stochastischen Variablen auf die für den Nachweis wichtigen zu reduzieren, eine geeignete Methode der stochastischen Analyse zu wählen sowie Nebenbedingungen und geeignete Sicherheitsabstände und Zielfunktionen einer RDO- Aufgabenstellung zu definieren.
- Für die bestmögliche Übersetzung von Wissen über Streuungen, muss die Softwarelösung geeignete Verteilungsfunktionen in Versuchsdaten finden, Korrelationen zwischen einzelnen streuenden Größen identifizieren sowie räumliche Korrelationen streuender Größen berücksichtigen können.
- Für den finalen Nachweis von Robustheit und Zuverlässigkeit müssen effiziente Methoden der Zuverlässigkeitsanalyse verfügbar sein.



- Bei einer Integration von RDO in Regelprozesse der virtuellen Produktentwicklung kann man nicht voraussetzen, dass die Bearbeiter Spezialwissen in Methoden der Optimierung, der stochastischen Analyse und der statistischen Auswertung besitzen. Deshalb muss die notwendige Nutzereingabe minimiert und vordefinierte einfach zu bedienende Bausteine von Sensitivitätsanalyse, Optimierung, Robustheitsbewertung und Robust Design Optimierung angeboten werden.
- Die Vertrauenswürdigkeit von Variations- und Korrelationsmaßen sollte mit einfach zu verstehenden Maßzahlen dem Nutzer angezeigt werden. Statistisch insignifikante Informationen werden automatisch herausgefiltert und das Post Processing sollte die Vielzahl der Ergebnisse einer statistischen Bewertung der stochastischen Analyse auf wichtige, belastbare Größen minimieren.

Auf den Punkt gebracht, müssen die Methoden der Robust Design Optimierung ohne Spezialwissen **einfach** und **sicher** zu bedienen sein. Gleichzeitig sollte der Anwender sensibilisiert werden, dass die Definition der Streuungen die essentielle Basis einer stochastischen Analyse ist. In der Verifikation und Weiterentwicklung der Definition und Diskretisierung der Eingangsstreuungen liegt ein wesentlicher Schlüssel für den Erfolg der Robust Design Optimierung.

### 3.2 Dynardo's optiSLang

In Dynardo's Software optiSLang sind seit einiger Zeit die effizientesten Methoden der Optimierung und der stochastischen Analyse zur Lösung von RDO-Aufgabenstellungen integriert. Kunden haben RDO erfolgreich in ihre virtuelle Produktentwicklung implementiert. Das belegen auch die Vorträge auf der Dynardo RDO Konferenz – den Weimarer Optimierungs- und Stochastiktagen. Um RDO-Anwendungen noch mehr als festen Bestandteil der Produktentwicklung zu etablieren und Anwender ohne Expertenwissen in Optimierung und stochastischer Analyse zu gewinnen, haben wir in den letzten Jahren unsere „Best Practise“ Bausteine weiterentwickelt. In den neuen Softwareversionen „optiSLang inside ANSYS Workbench“ und „optiSLang v4.0“ wurde der zur Verwendung der Bausteine notwendige Nutzerinput minimiert und automatische Prozeduren zur Variablenreduktion und zur automatischen Generierung des bestmöglichen Meta-Modells weiterentwickelt.

### 3.3 Anwendungsbarrieren minimieren

Eine erfolgreiche Integration von RDO Methoden in die virtuelle Produktentwicklung stellt hohe Anforderungen an den Nutzer. Ein Teil dieser Anwendungsbarrieren kann durch **einfach** und **sicher** zu benutzende RDO-Bausteine in kommerziellen Softwareumgebungen minimiert werden. Sind allerdings die Annahmen zu den Eingangsstreuungen für die gewählte stochastische Analysemethode und die Zuverlässigkeit der Schätzung von Variation nicht in Balance, können die Ergebnisse der RDO unbrauchbar werden. Deshalb ist es empfehlenswert, bei der Einführung von CAE-basierten RDO-Methoden in die virtuelle Produktentwicklung schrittweise vorzugehen und die Verifikation einer vertrauenswürdigen Robustheitsbewertung als Grundlage einer verlässlichen Schätzung der Variation wichtiger Ergebnisgrößen zu etablieren. Der Abgleich der Variationsfenster mit Messungen und Erfahrungswerten sowie die Verifizierung von Annahmen der Streuungen sollten regelmäßig überprüft, verifiziert und weiterentwickelt werden.

## 4 References

[1] Will, J.: Variation Analysis as Contribution to the Assurance of Reliable Prognoses in Virtual Product Development, Proceeding NAFEMS Seminar "Reliable Use of Numerical Methods in Upfront Simulations" March 2007, Wiesbaden, [www.dynardo.de](http://www.dynardo.de)

[2] Will, J: Introduction of robustness evaluation in CAE-based virtual prototyping processes of automotive applications; Proceedings EUROMECH colloquium Efficient Methods of Robust Design and Optimization, September 2007, London, [www.dynardo.de](http://www.dynardo.de)

[3] Bucher, C.: Basic Concepts for Robustness Evaluation using Stochastic Analysis Proceedings EUROMECH colloquium Efficient Methods of Robust Design and Optimization, September 2007, London, [www.dynardo.de](http://www.dynardo.de)

[4] Most, T.; Will, J.: Sensitivity Analysis using the Metamodel of Optimal Prognosis (MOP); Proceedings Weimarer Optimierungs- und Stochastiktag 8.0, 2011, Weimar, Germany ([www.dynardo.de](http://www.dynardo.de))

[5] optiSLang - the Optimizing Structural Language Version 3.1, DYNARDO, Weimar, 2012,  
[www.dynardo.de](http://www.dynardo.de)