

Robustheits- und Zuverlässigkeitsanalysen zur Optimierung eines Planetengetriebes unter realitätsnahen Randbedingungen

o.Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers, IPEK Institut für Produktentwicklung, Karlsruhe; Helge Weiler, IPEK Institut für Produktentwicklung, Karlsruhe; Dr. Claudia Bangert, FE-DESIGN GmbH, Karlsruhe; Dr. Christoph Puls, PULSGETRIEBE Dipl.-Ing. W. & J. Puls GmbH & Co., Karlsruhe

Kurzfassung

Zunehmender Kostendruck und die Anforderung nach immer kleineren Baugrößen in Verbindung mit komplexeren Lastszenarien und hohen Qualitätsanforderungen erfordern die verstärkte Anwendung von Strukturoptimierungsmethoden. Werden die Möglichkeiten der deterministischen Optimierung konsequent ausgeschöpft, so führt dies zwangsläufig zu einer Reduzierung von Robustheit und Zuverlässigkeit gegenüber Schwankungen in Fertigung und Beanspruchung. Das Risiko, durch kleine Unsicherheiten in Eingangsgrößen die Grenzen der Zuverlässigkeit zu überschreiten, wächst mit der zunehmenden Ausreizung der Bauteileigenschaften in der Optimierung. Ein detaillierter Nachweis von Robustheit und Zuverlässigkeit unter Berücksichtigung von Streuungen ist damit zwingend notwendig.

Genau diese Herausforderungen treten in der Getriebeentwicklung der Firma Pulsgetriebe GmbH & Co., Karlsruhe, auf. Pulsgetriebe fertigt seit 1926 mechanische Getriebe. In der Anfangszeit vor allem auf Fahrzeuggetriebe spezialisiert, stellt das Familienunternehmen heute vor allem Planetengetriebe für die unterschiedlichsten Anwendungsfälle her.

Bei der Entwicklung dieser Getriebe kann das noch vorhandene Potential zur Leistungssteigerung ohne Detailinformationen über die Streuungen von Bauteileigenschaften in kritischen Bereichen nicht mehr ausgeschöpft werden.

Zur besseren Auslegung der Getriebe wird somit eine Identifikation kritischer Bereiche und der in diesen Bereichen relevanten Einflussgrößen vorgenommen.

Ausgangspunkt hierfür bildet ein parametrisches Finite Elemente Modell des untersuchten Planetenträgers.

Aufbauend auf einer Simulationsschleife, die die automatische Variation von Geometrie- und Werkstoffgrößen ermöglicht, werden verschiedene Methoden zur Bestimmung von Robustheit und Zuverlässigkeit angewandt. Die Simulationsschleife integriert verschiedene Simulationswerkzeuge zur Ermittlung relevanter Bauteilgrößen (Lebensdauer, Festigkeit, kritische Spannungen). Gesteuert wird der Ablauf durch das Prozessautomatisierungswerkzeug OPTIMUS.

Ergebnis der Untersuchungen sind die Identifikation der kritischen Parameter des Bauteils und quantitative Aussagen zu Robustheit und Zuverlässigkeit. Diese können in nachfolgenden Optimierungsschritten gezielt berücksichtigt werden.

Die vorgestellten Untersuchungen sind Teil des durch die Stiftung Industrieforschung finanzierten Projektes Queron.

1. Grundlagen

Finite Elemente Simulationen sind heute Stand der Technik und wertvolles Hilfsmittel bei der Vorhersage von Bauteilverhalten und insbesondere der Optimierung von Designentwürfen. Üblicherweise werden Simulations- und Optimierungsaufgaben unter der Annahme deterministischer Eingangsgrößen vorgenommen, dabei außer Acht lassend, dass aufgrund verschiedener Einflüsse diese gar nicht genau eingestellt werden können. Diese Einflüsse, die zu Streuungen in den Eingangsparameter führen, ergeben sich aus Fertigungsprozessen (Material, Geometrie), äußere Einflüsse (Temperatur, Luftfeuchtigkeit) oder auch die Numerik des Modells. Ihre Ermittlung ist bereits keine einfache Fragestellung und basiert meist auf statistischen Auswertungen und grundlegenden Annahmen (z.B. Normalverteilung), die jedoch erheblichen Einfluss haben können ([18]).

Streuungen in Eingangsparametern eines Bauteildesigns führen dazu, dass sich das Bauteilverhalten nicht mehr deterministisch vorhersagen lässt, wichtige Zielgrößen bei der Bewertung des Systems können teilweise erheblich streuen. Halten sich diese Streuungen in gewissen (tolerierbaren) Grenzen, i.e. lässt sich trotz der angenommenen Streuungen in den Eingangsgrößen die Zielgröße einigermaßen genau vorhersagen, spricht man von einem robusten Design. **Robustheit** beschreibt somit die Sensitivität der Zielgrößen gegenüber Variabilität in Eingangsparametern. Optimierung unter Robustheitskriterien bedeutet, den optimalen Punkt bei gleichzeitig minimaler Streuung der Zielgröße zu finden. Eigentlich ein klassisches Mehrzieloptimierungsproblem.

Zur Berechnung der Streuung von Zielgrößen gibt es heute zahlreiche numerische Verfahren, die teilweise auch bereits in Optimierungspaketen (wie z.B. OPTIMUS, [2]) implementiert sind. Ein klassisches und sehr weit verbreitetes Standardverfahren bildet die **Monte Carlo Analyse** ([6]), bei der eine Reihe von Versuchen durchgeführt wird, die entsprechend der angenommenen Verteilung um den Designpunkt streuen. Diese Methode erfordert keinerlei Zusatzwissen über die betrachtete Zielfunktion und kann auf beliebige Verteilungen von Eingangsgrößen angewendet werden, erfordert aber abhängig von der Genauigkeit ggfs. sehr viele Berechnungen. Effizientere Methoden basieren auf Approximationstechniken (z.B. Monte Carlo auf linearem Modell oder **FOSM** = First order reliability method), sind jedoch nur eingeschränkt – bei zugrundegelegten Normalverteilungen oder bestimmten Voraussetzungen an das Glattheitsverhalten der Zielfunktion – einsetzbar und deutlich ungenauer. Werden Robustheitskriterien in der Optimierung berücksichtigt, können jedoch nur Näherungsverfahren zum Einsatz kommen, da jeder Optimierungsschritt eine Varianzberechnung erfordert (siehe auch [1]).

Ein weiterer Aspekt bei der Betrachtung von Streuungen in Eingangsparametern kommt bei restringierter Optimierung hinzu. Nebenbedingungen an das Optimierungsziel führen in der Regel zu Designvorschlägen auf dem Rand des zulässigen Bereichs. Streut die Zielgröße aufgrund nicht deterministischer Eingangsgrößen, kann es zu Ausfällen, nicht zulässigen Designs kommen. Liegt die Ausfallwahrscheinlichkeit (i.e. die Wahrscheinlichkeit für ein nicht zulässiges Design) unter einer gewissen Schranke, spricht man von einem zuverlässigen Design. **Zuverlässigkeit** beschreibt somit ein Maß für die Wahrscheinlichkeit unzulässiger Designs. Zuverlässige Designentwürfe verlangen in der Optimierung weitere Randbedingungen, die die Versagenswahrscheinlichkeit beschränken.

Verfahren zur Zuverlässigkeitsanalyse basieren auf Samplingmethoden, wie z.B. **Monte Carlo**, oder Approximationen der Grenzzustandsfunktion (Limit State function, der Grenzfläche zwischen zulässigem und unzulässigem Designraum), wie **FORM** (first order reliability method) oder **SORM** (second order reliability method) ([6],[9][10]). Im Fall geringer Versagenswahrscheinlichkeiten, hochgradig nichtlinearer Aufgabenstellungen oder sehr großer Anzahl von Designvariablen erweisen sich beide Verfahrensklassen als unzureichend aufgrund einer großen Anzahl erforderlicher Systemauswertungen bei dennoch geringer Genauigkeit.

Hybride Methoden, die z.B. geschicktes Sampling und Berechnung des nächstgelegenen Versagenspunkts (Importance Sampling Monte Carlo, [6],[7]) kombinieren, und weitere fortgeschrittene Methoden ([11],[12]) mit deutlich besserer Konvergenzrate gegenüber Monte Carlo wurden zur Lösung hochdimensionaler Zuverlässigkeitsprobleme entwickelt ([4]).

Weitere Effizienzsteigerungen – gerade auch in Verbindung mit Optimierung – lassen sich dadurch erzielen, dass im gesamten Workflow nur die wichtigsten Faktoren als Designfaktoren verwendet werden. Dies erfordert eine Ermittlung der einflussreichsten Eingangsgrößen. Über geschicktes Sampling des verbleibenden Designraums mit Hilfe von DOE-Methoden ([15]) lassen sich Response Surface Modelle aufbauen ([3],[16]). Gute Modelle können dann anstelle der rechenaufwändigen Analysesequenzen zur näherungsweise Berechnung von Zielgrößen herangezogen werden. Hierdurch wird erheblich Rechenzeit gespart und werden komplexere Robustheits- und Zuverlässigkeitsanalysen erst überhaupt praktisch einsetzbar.

Praktische Beispiele für den Einsatz von Robustheits- und Zuverlässigkeitsbetrachtungen finden sich u.a. in [5],[12],[13],[14],[17],[19].

2. Der betrachtete Planetenträger

Bei dem untersuchten Planetenträger handelt es sich um die zentrale Komponente einer modular aufgebauten Getriebebaureihe. Das Bauteil mit einem Nenndrehmoment von ca. 90.000 Nm wird alternativ aus den Werkstoffen GGG40 und ADI800 gegossen. Anwendung finden diese Getriebe z.B. in den Antrieben von Zerkleinerern oder Bohrgeräten. Es handelt sich um ein bewährtes Bauteil, dessen Masse ohne Verschlechterung relevanter Eigenschaften reduziert werden soll.

Der Planetenträger nimmt in diesem Fall fünf Planetenräder auf. Die die Lager der Planeten tragenden „Scheiben“ sind über dreieckige Stege miteinander verbunden (siehe Bild 1).

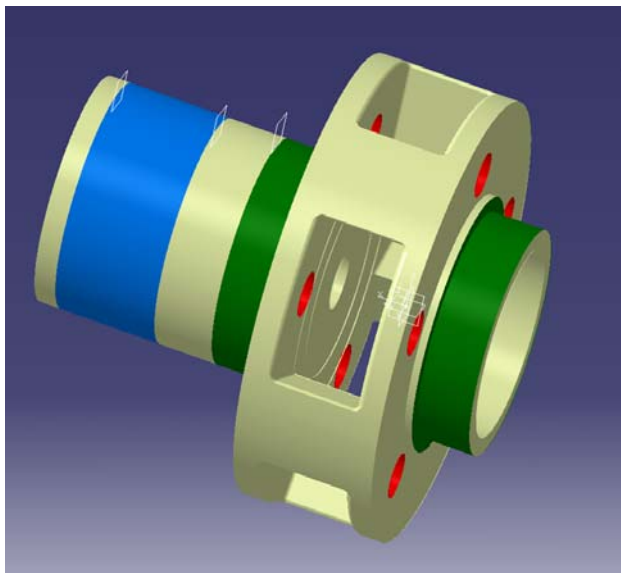


Bild 1: CAD-Modell des Planetenträgers. Blau die Einspannungen, grün Lagestellen, rot Krafteinleitungsstellen.

Maximal beanspruchte Bereiche finden sich im Bauteil in den Radien der Übergänge zwischen Scheiben und Stegen (siehe Bild 2) aufgrund des Abkippens der Planetenachsen unter Last und den im Kerbgrund der Übergänge auftretenden Biegespannungen. Parametrisiert wurden deshalb die Dicken der Scheiben sowie die Radien der Übergänge zwischen Stegen und Planetentaschen bzw. zwischen den Scheiben und den Planetentaschen (insgesamt fünf Parameter).

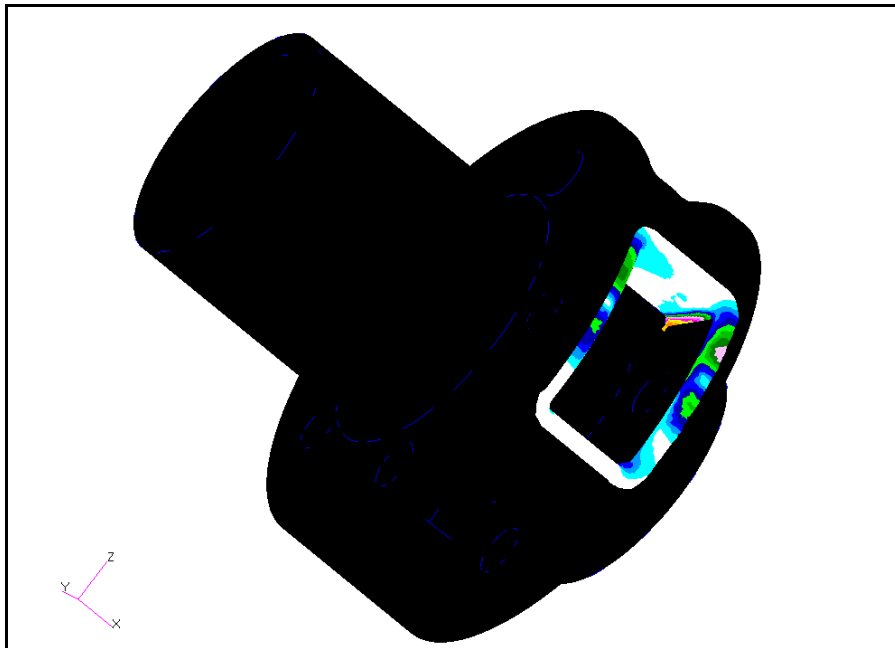


Bild 2: Spannungsspitzen im Bereich der Übergänge von Steg und Scheiben

Die durchzuführende Robustheitsanalyse stellt zwei besondere Anforderungen an das Finite Elemente (FE) Modell: Einerseits müssen die interessierenden Geometrie Größen des Modells parametrisiert sein, damit Streuungen der Geometrie berücksichtigt werden können. Andererseits werden für stochastische Untersuchungen sehr viele Experimente, also FE-Rechnungen, benötigt. Das Modell muss also sehr schnell rechnen.

Die notwendige Geometrieparametrisierung erfolgte durch eine Modellierung mit den sog. Advanced Meshing Tools innerhalb des CAD-Programms Catia V5. Bei Änderungen des parametrischen CAD-Modells erfolgt in Catia eine automatische Neuvernetzung. Im Gegensatz zu den in FE-Preprozessoren teilweise verfügbaren Werkzeugen zum Mesh-Morphing (d.h. zur Verformung eines vorhandenen Oberflächenetzes mit anschließender Netzglättung) bleibt das FE-Netz bei einer Geometrieänderung nicht vorhanden, sondern wird vollständig neu erstellt. Die Ähnlichkeit der Netze in den Bereichen, in denen eine Spannungsauswertung erfolgt, wird durch die Vorgabe von Mesh-Seeds, also Randbedingungen für die Vernetzung, gewährleistet. Ähnliche Prozesse können auch mit

anderen CAD-Umgebungen, z.B. ProEngineer, umgesetzt werden. Die unterschiedlichen Systeme bieten unterschiedliche Vor- und Nachteile. So bietet die sog. J-link Schnittstelle von ProEngineer weitergehende Möglichkeiten zur Steuerung des Aktualisierungs- und Vernetzungsprozesses, als dies mit der VB-Schnittstelle von Catia V5 der Fall ist - hier waren Eigenentwicklungen notwendig (siehe Kap. 3). Dafür bietet Catia mit den Advanced Meshing Tools einen deutlich leistungsfähigeren Mesher.

Eine möglichst kurze Rechenzeit wurde durch folgende Maßnahmen erzielt: Gezielte Netzverfeinerung in nur einer der „Planetentaschen“ (Zwischenraum zwischen zwei Stegen), wodurch Modelle mit ca. 215.000 Elementen (Tetraeder) möglich wurden (Bild 3 links), Vereinfachung der Belastung auf einen statischen Lastfall und Verzicht auf Kontaktmodellierungen, Auswertung lediglich im Bereich der „Planetentaschen“ (Bild 3 rechts). Auf diese Art und Weise lassen sich Rechenzeiten im Bereich von 90 s realisieren.

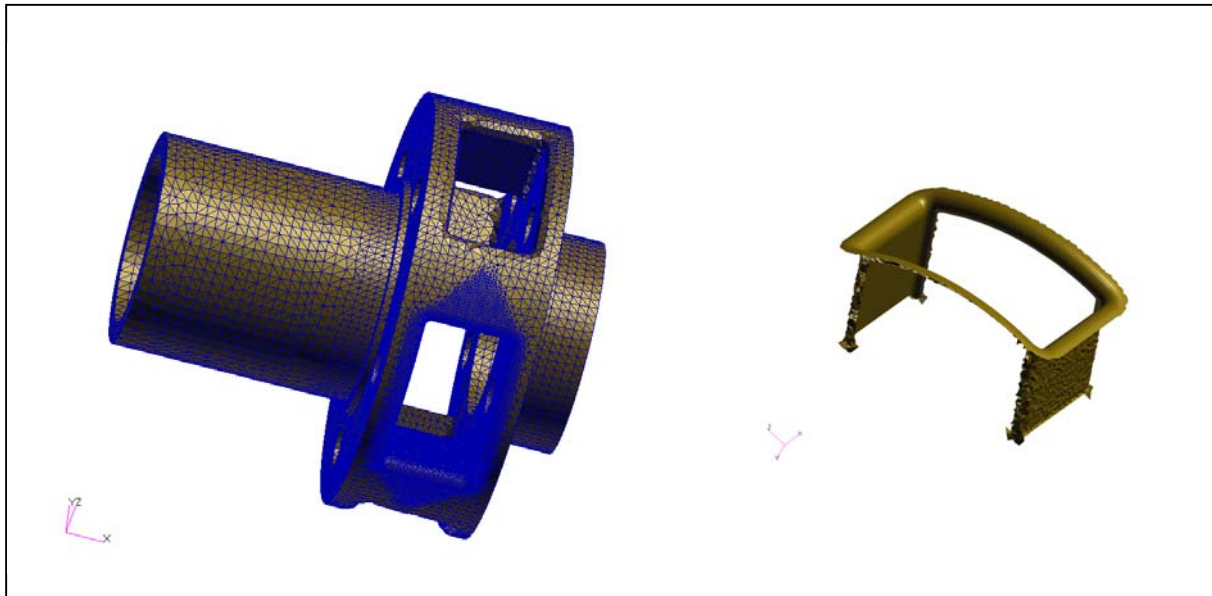


Bild 3: Feinvernetzte „Planetentasche“ im grob vernetzten Gesamtmodell (links), zur Spannungsauswertung genutzter Bereich der „Planetentasche“ (rechts)

3. Aufbau der Simulationsumgebung

Die Umgebung für die stochastische Analyse setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen: Der Steuersoftware Noesis OPTIMUS, die die zu berechnenden Parametersätze vorgibt und den Ablauf kontrolliert, dem CAD-Programm Catia, in dem das parametrische Modell wie in Kapitel 2 beschrieben vorliegt, modifiziert und neu vernetzt wird, dem FE-Solver Nastran, der das aus Catia exportierte Finite-Elemente-Problem löst, und einer Perl-Bibliothek, über die notwendige Anpassungen des von Catia exportierten Finite-Elemente-

Netzes erfolgen sowie die von Nastran berechneten Werte zusammengefasst werden. Den Ablauf im Einzelnen stellt Bild 4 dar.

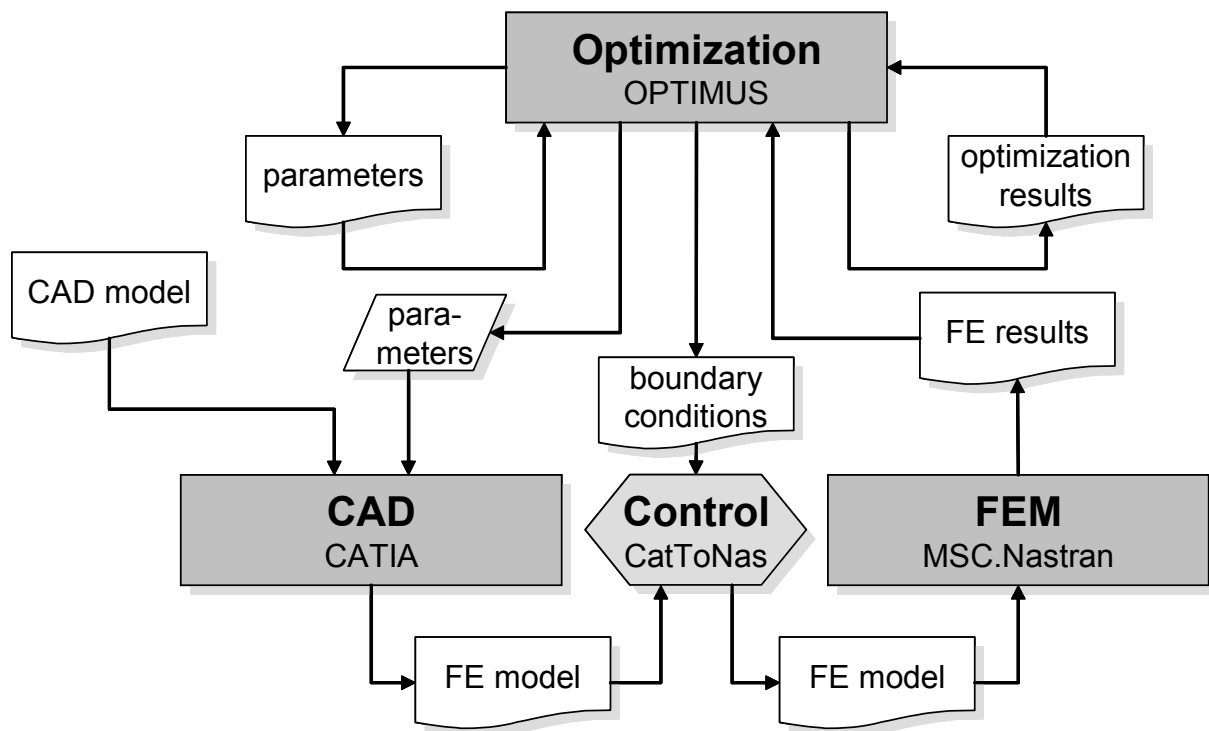


Bild 4: Simulationsschleife

Eine Besonderheit, z.B. auch im Vergleich mit der Umsetzung mit ProEngineer, stellt die Tatsache dar, dass Catia zwar FE-Netze exportiert, nicht aber Randbedingungen und Lastfälle. Das bedeutet, dass diese nachträglich aufgebracht werden müssen. Aufgrund der Neuvernetzung nach Parameteränderung ergibt sich das Problem, die korrekten Knotengruppen für Randbedingungen zu identifizieren. In unserem Fall wird dies gelöst, indem über das Tetraedernetz hinaus Flächennetze exportiert werden, die den Flächen der Randbedingungen zugeordnet sind. Über diese Flächennetze, die bei der eigentlichen Berechnung ignoriert werden, aber mit dem Tetraedernetz gemeinsame Knoten besitzen, kann eine Zuordnung zwischen Randbedingungen und zugehörigen Knoten erfolgen.

Die Erstellung eines vollständigen Inputdecks für die FE-Analyse erfolgt dann durch das Skript „CatToNas“ (Bild 5).

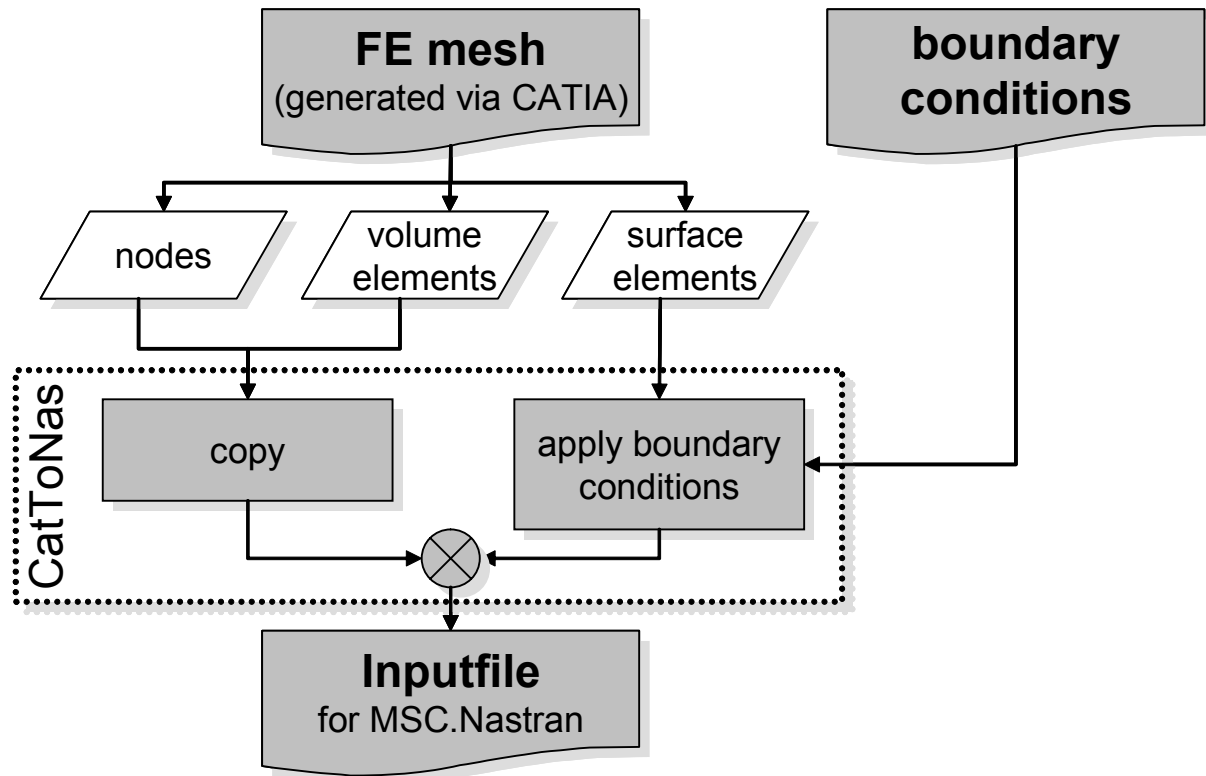


Bild 5: Die Datenübergabe und -aufbereitung mittels Skript

4. Robustheitsanalyse und Robuste Optimierung

Grundlage einer Robustheitsanalyse ist die möglichst genaue Kenntnis der Eingangstreuungen. Falls diese nicht gemessen werden können, können Toleranzangaben und Informationen über den Fertigungsprozess zur Ermittlung der Streuungen herangezogen werden. Eine Überprüfung mit möglichst vielen Stichproben erscheint dennoch sehr ratsam.

Um den Aufwand für die Messungen zu reduzieren, sollte im Vorfeld eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden, die eine Reduktion des Parameterraumes auf Werte mit besonders großem Einfluss auf die Zielfunktion ermöglicht.

Im Falle des Getriebes wurden im Vorfeld die fünf betrachteten Geometriegrößen als entscheidend für die maximalen von-Mises-Spannungen ermittelt. Die Streuungen können als normalverteilt angenommen werden, mit einer Streuungsbreite von ± 3 Sigma innerhalb der vorgegebenen Toleranzfelder.

Der Parameterraum wurde zunächst mittels einer systematischen DOE (Latin-Hypercube, gleichverteilt über den Parameterraum) gescannt. Die DOE wurde um Monte Carlo Analysen ergänzt, die zusätzliche Aussagen über die Verteilung der Zielgröße ermöglichen.

In der Folge wurden, aufbauend auf den gewonnenen Daten, sowohl Kriging- als auch Least-Squares-Modelle erstellt. Diese dienen zunächst zur Verifikation des Analyseloops; die Plausibilität der Ergebnisse konnte mit Hilfe der Antwortflächen effektiv überprüft und noch vorhandene Fehler im Aufbau behoben werden.

Eine Verfeinerung der Least-Squares-Modelle mit der O-RSM führte zu qualitativ guten Modellen. Dies wurde anhand der Regressionswerte, mit Scatterplots (siehe Bild 6 links) und durch den Vergleich mit Samples, die nicht zur Erstellung der Antwortflächen verwendet wurden, verifiziert.

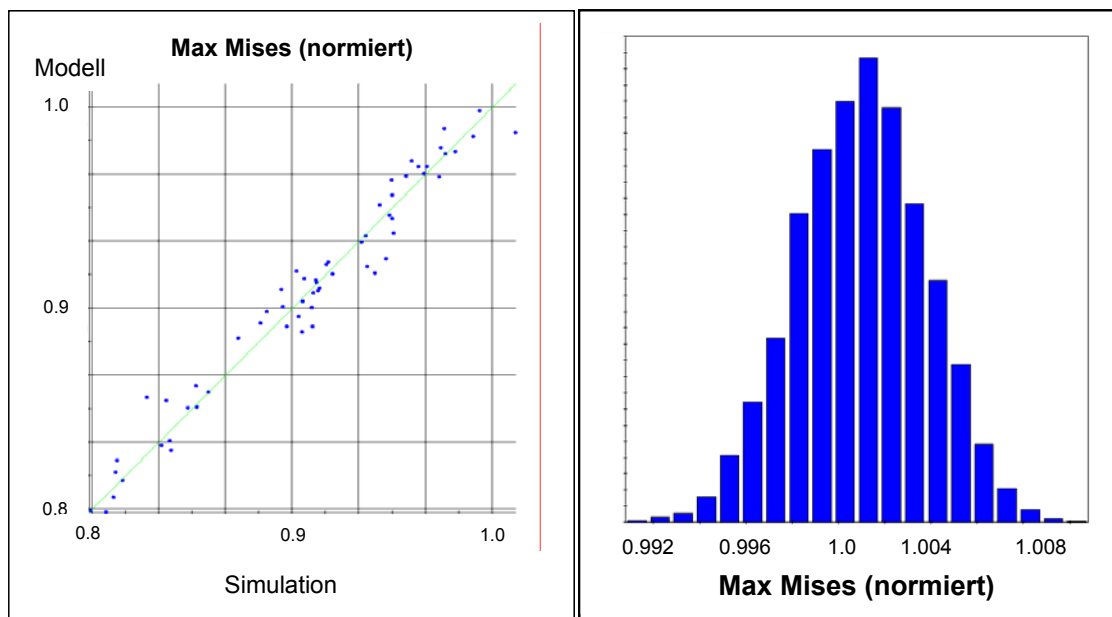


Bild 6: Gegenüberstellung von Modell und Simulationsergebnissen im Scatterplot (links) und Verteilung der von-Mises-Spannung (rechts)

Eine Varianzanalyse der Zielgröße von-Mises-Spannung wurde anschließend auf der Antwortfläche mit einer Monte-Carlo-Simulation und mit der FOSM-Methode durchgeführt. Es ergab sich die in Bild 6 rechts gezeigte Verteilung für die Spannungswerte.

Eine Auswertung der Beiträge zum Modell dient zur Identifikation besonders signifikanter Einflüsse sowohl auf die von-Mises-Spannung, als auch auf ihre Streubreite (Bild 7).

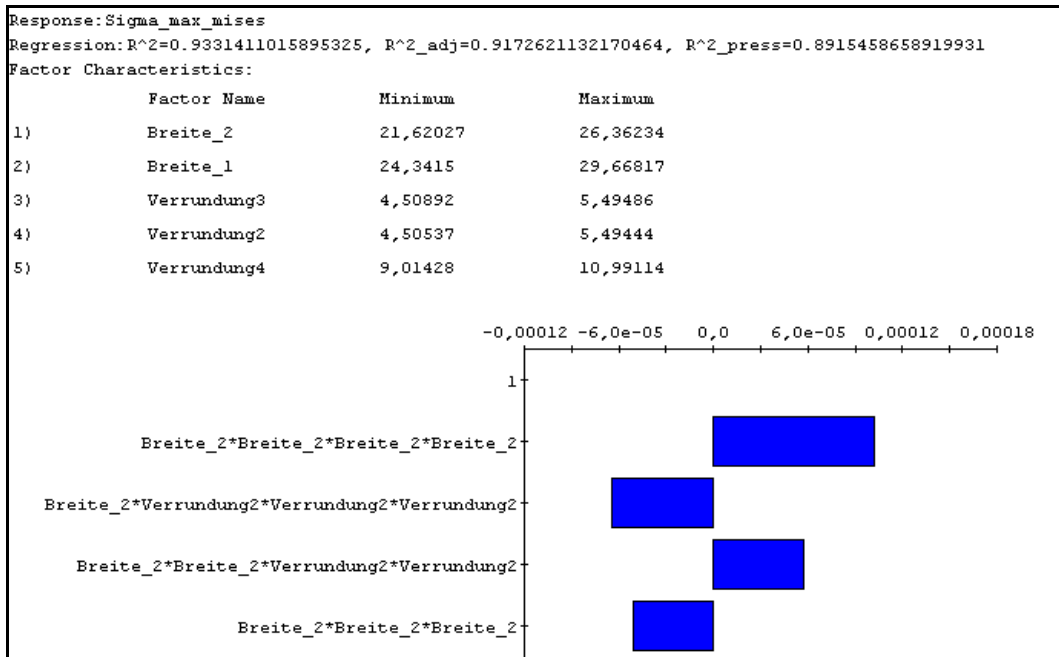


Bild 7: Beiträge verschiedener Terme zur Streuung

Mittels eines globalen Mehrziel-Optimierungsverfahrens (NSEA+) wurde der Verlauf der Paretofront bei gleichzeitiger Minimierung der Zielgrößen von-Mises-Spannung und Streuungsbreite bestimmt (Bild 8). Dieser wurde abschließend mit einer systematischen DOE auf der Antwortfläche verifiziert. Es ergab sich im wesentlichen ein gegenläufiges Verhalten von Streuung und maximaler von Mises-Spannung. Dem Anwender bleibt anhand dieser Ergebnisse die Gewichtung von Robustheit (i.e. wie viel Streuung er tolerieren kann) gegenüber dem maximalen von Mises Spannungswert überlassen.

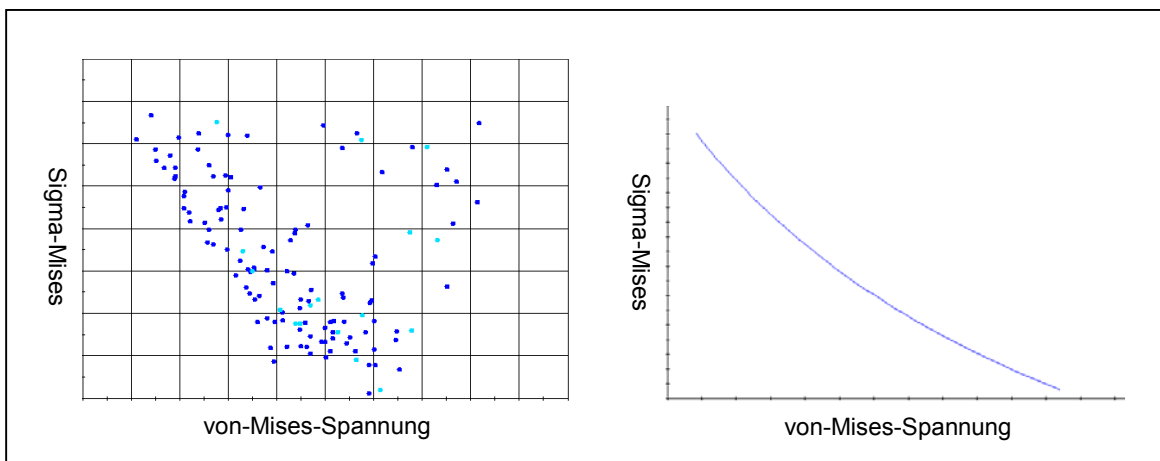


Bild 8: Paretofront der Zielgrößen Spannung und Streuung

5. Ausblick und Fazit

Im Anschluss an die vorgestellten Arbeiten sollten die ermittelten Streuungen durch weitergehende Analysen untermauert werden, insbesondere durch Monte Carlo Analysen basierend auf der Analysesequenz in einigen interessanten Punkten. Durch Einbezug weiterer Streuparameter wie Werkstoff und Lasten lassen sich realistischere Modelle gewinnen – für eine Absicherung der Robustheitsaussagen sicherlich empfehlenswert. Weiteres Optimierungspotential kann durch Ausweitung des Parameterraumes erschlossen werden.

Mit Hilfe des Prozessautomatisierungstools OPTIMUS und einiger einfacher, mächtiger Skript-Anpassungen gelang der Aufbau eines spezifischen Analyseworkflows, der verschiedene Analysewerkzeuge ohne direkte Verbindungen miteinander koppelt. Über geschickte Modellanpassungen und Prozessoptimierungen gelang es, Rechenzeiten auf ein Maß zu reduzieren, die die Berechnung und Einbeziehungen von Streuungen überhaupt ermöglichte. Die vorliegenden Ergebnisse bestätigen die aus der Praxis bekannte hohe Robustheit des Planetenträgers. Damit stellt das Bauteil eine hervorragende Grundlage für eine Topologieoptimierung dar, deren Ergebnisse dann durch erneute Robustheits- und zusätzliche Zuverlässigkeitsanalysen überprüft werden sollten.

6. Literatur

- [1] Egorov, I.N., Kretinin, G.V. and Leshchenko, I.A. "How to Execute Robust Design Optimization", 9th AIAA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, 04 - 06 Sep. 2002, Atlanta, Georgia.
- [2] Noesis Solutions, OPTIMUS, Rev. 5.2, September 2006
- [3] Noesis Solutions, OPTIMUS Theory manual, Rev. 5.2, September 2006
- [4] Donders, S., D'Ippolito, R., Van der Auweraer, H.D., Hack, M., Tzannetakis, N., Desmet, W.: "Uncertainty-Based Design in Automotive and Aerospace Engineering", to be presented at: SAE World Congress & Exhibition, April 2007, Detroit, MI, USA
- [5] Donders, S., Van der Auweraer, H.: "Engineering approach for robust vibro-acoustic design optimization". In Proceedings of the 16th ISAAC Seminar (International Seminar on Advanced Techniques in Applied and Numerical Acoustics), 2004.
- [6] Melchers, R.B. : "Structural Reliability Analysis and Prediction", 2nd Edition, 1999.
- [7] Olsson, A., Sandberg, G., Dahlblom, O.: "On Latin hypercube sampling for structural reliability analysis", Structural Safety 25 (1), 2003, pp. 47-68.
- [8] Rackwitz , R.: "Reliability analysis—a review and some perspectives", Structural Safety 23 (2001) 365–395

- [9] M. Kitagawa, A. Der Kiureghian, Safety Index by First-Order Second Moment Reliability Method, Structural Engineering and Structural Mechanics UCB/SESM-80/09, 1980.
- [10] A.M. Hasofer, N.C. Lind, Exact and Invariant Second-Moment Code Format, Journal of Engineering Mechanics Division, 100 (1), pp. 111-121, 1974.
- [11] J. Tu, K.K. Choi, A New Study on Reliability-Based Design Optimization, Journal of Mechanical Design, ASME 121 (4), pp. 557-564, 1999.
- [12] B.D. Youn, K.K. Choi, Y.H. Park, Hybrid Analysis Method for Reliability-Based Design Optimization, Journal of Mechanical Design, ASME 125, pp 221-232, June 2003.
- [13] D'Ippolito, R., Hack, M., Donders, S., Hermans, L.: "A reliability analysis approach to improve the fatigue life of a vehicle knuckle". Proc. RASD 2006, Southampton, UK, July 17-19, 2006.
- [14] D'Ippolito, R., Donders, S., Hack, M., Tzannetakis, N., Van der Linden, G., Vandepitte, D.: "Reliability based design optimization of composite and steel aerospace structures", Proc. 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Material Conference, May 1-4, 2006, Newport, Rhode Island, USA.
- [15] Lorenzen, T.J., Anderson, V.L., Design of Experiments, a no-name approach, Marcel Dekker, Inc., New York, USA, 1993.
- [16] Khuri, A.I., Cornell, J.A., Response Surfaces, Design and Analysis, Marcel Dekker, Inc., New York, USA, second edition, 1996.
- [17] Bangert, C., Jiang, J.: "Optimization and robustness analysis with deep drawing simulation", INPRO Workshop "Robust Processes with Modern Steels", 08.-09.06.2006, Berlin
- [18] Albers, A., Weiler, H.: „Impact of Distribution Functions of Input Parameters on the Quality of Robustness Analysis in Simulation“. Nafems Seminar: VIRTUAL TESTING, Simulationsverfahren als integrierter Baustein einer effizienten Produktentwicklung, 10-11.05.06, Wiesbaden, ISBN 1-874376-14-X
- [19] Albers, A., Weiler, H.: „Robust Design zylindrischer Schraubenfedern“. VDI-Tagung „Federn - Unverzichtbare Bauteile der Technik“, 7.-8.11.06, Fulda