

1

ROBUST DESIGN: WIE VIEL TOLERANZ BEI TOLERANZEN?

Variierende Bauteilgeometrien, schwankende Materialeigenschaften oder externe Einflüsse wie unkalkulierbare Temperaturveränderungen in der Fertigungshalle: Die Qualität eines Produktes hängt von wesentlich mehr ab als nur einem guten Design. Experten vom Fraunhofer SCAI entwickeln Computerprogramme, die zeigen, wie robust ein Bauteil gegenüber den unvermeidlichen Material- und Prozessvariationen ist.

In einer perfekten Welt wäre alles so einfach: Die Entwürfe, die Ingenieure am Computer mit ihren CAD-Programmen erzeugen, würden sich mit vollkommener Präzision in Komponenten und Produkte umsetzen lassen. Am Ende der Produktionsstraßen kämen Erzeugnisse an, die sich in allen Eigenschaften gleichen würden und hundertprozentig den Vorgaben ihrer Schöpfer entsprächen.

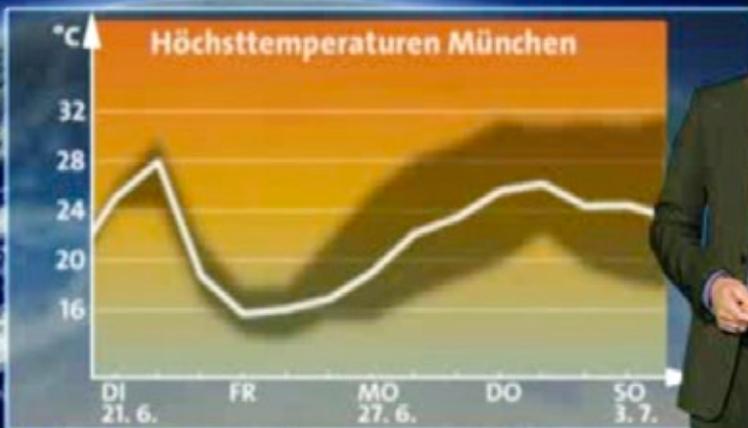
Leider gibt es keine perfekte Welt – auch nicht im Bereich der Produktentwicklung und Produktion. Im Gegenteil: Jeder Entwurf bleibt schöne Theorie, weil Toleranzen und schwankende Materialeigenschaften unvermeidlich zu Abweichungen vom Ideal führen. Die Folge: Die Belastbarkeit und damit auch die Sicherheit von Bauteilen sind – wenn überhaupt – nur innerhalb bestimmter Grenzen vorherzusagen.

Robust Design: Welche Toleranzen sind noch tolerierbar?

Dr. Tanja Clees vom Fraunhofer-Institut für Algorithmen und Wissenschaftliches Rechnen SCAI in Sankt Augustin arbeitet daran, den Einfluss solcher Schwankungen zu analysieren und sie besser zu beherrschen. »Robust Design« nennen Experten den Versuch, mit Hilfe von Computerberechnungen bzw. physikalischen Experimenten herauszufinden, was Toleranzen im Endprodukt bewirken und wie empfindlich dessen Verhalten von Materialeigenschaften, Prozessparametern, Variationen der Geometrie und anderen externen Einflüssen abhängt.

Und diese störenden Einflüsse sind überall vorhanden: »Denken Sie nur an den Guss einer Komponente aus Stahl«, beschreibt Clees ein typisches Beispiel. »Die Qualität des Bauteils schwankt, je nachdem ob die Tür der Halle geöffnet oder geschlossen war – selbst kleine Temperaturdifferenzen spielen hier eine Rolle.« Im schlimmsten Fall könne das dazu führen, dass der Ausschuss in der Produktion steigt oder die Kunden sich über fehlerhafte Produkte beschweren.

1 *Jeder Entwurf bleibt schöne Theorie: Fertigungstoleranzen und schwankende Materialeigenschaften können die Qualität von Autos erheblich beeinflussen.*



Temp. morgen (min/max): Bremen

Aber wie lässt sich der Einfluss der störenden Schwankungen vorab ermitteln? Hier bieten sich Computersimulationen an – schließlich dienen diese Berechnungen ja auch dazu, das Verhalten von Produkten theoretisch zu untersuchen, lange bevor der erste Prototyp vom Band gelaufen ist. Die naheliegendste Methode wäre es also, einfach alle relevanten Parameter innerhalb bestimmter Grenzen zu variieren und dann für jeden Einzelfall zu überprüfen, was die Simulation ergibt. Bleiben die Bauteileigenschaften in vorgegebenen Grenzen, können die Toleranzen toleriert werden. Wenn nicht, muss das Design des Produktes geändert werden.

Wesentlich weniger Simulationsaufwand dank SCAI-Software »DesParO«

Im Prinzip könnte man tatsächlich so vorgehen – aber eben nur im Prinzip. Denn in der Praxis ergeben sich so viele unterschiedliche Parameter-Kombinationen, dass selbst moderne Computer bei diesem »Brute Force«-Ansatz viel zu viel und viel zu lange rechnen müssten, um vernünftige Ergebnisse zu liefern. »Das ist aber auch gar nicht nötig«, beruhigt Clees. »Es reicht nämlich, nur eine kleine Menge von Parameter-Variationen zu untersuchen und auf Basis dieser Berechnungen ein Modell des Bauteilverhaltens zu erstellen, mit dem sich die Einflüsse von Toleranzen dann ohne großen Aufwand abschätzen lassen.« Genau das tut die SCAI-Software »DesParO«: Über einen Versuchsplan wird eine erste kleine Menge von Parametersätzen bestimmt, für die Simulationen bzw. Experimente durchgeführt werden sollen. Deren Ergebnisse werden genutzt, um über Interpolationsverfahren ein so genanntes Metamodell (»response surface«) zu erstellen. Das so erstellte Modell wird detailliert in seiner Güte bewertet, und bei Bedarf werden gezielt weitere Simulationen angefordert und zum Modell hinzugefügt.

Das Metamodell ersetzt danach die aufwändige Simulation, z.B. für statistische Analysen bzw. Optimierungsaufgaben: Ergebnisse für weitere Parametersätze, die »zwischen« den simulierten liegen, müssen nicht mehr über weitere kostspielige Simulationsläufe berechnet werden – man erhält sie durch die wesentlich schnellere Auswertung des Metamodells. »Der Nutzer kann über DesParOs grafische Benutzeroberfläche außerdem alle Parameter interaktiv erforschen«, sagt Clees. »Dazu verschiebt er einfach verschiedene Schieberegler am Bildschirm und kann sofort sehen, welchen Einfluss die Veränderung auf die Produkteigenschaften hat.«

DesParO kann dabei nicht nur einfache Ausgabewerte wie Gesamtmasse, Kraftstoffverbrauch oder summarische Sicherheitskriterien interpolieren, sondern auch hoch aufgelöste Simulationsergebnisse. Je nach Größe sieht der Anwender dann fast in Echtzeit auf seinem Monitor, wie sich die Komponente beispielsweise aufgrund von Fertigungstoleranzen verändern würde. DesParO ist seit etwa zehn Jahren im Einsatz und wird von Clees' Team ständig weiterentwickelt.

2 Temperaturkorridore sind mittlerweile im Wetterbericht selbstverständlich. Ähnlich zu diesen Korridoren werden für neue Designs (neue Parameterkonstellation) Bereiche für die betrachteten Kriterien (Outputs, Ausgangsgrößen) mittels Robust-Design-Methoden berechnet.



Dazu will auch Dr. Silke Sommer vom Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM in Freiburg einen Beitrag leisten. Sie beschäftigt sich mit den Schweißpunkten, die die Einzelteile einer Karosserie zusammenhalten und von denen die Robustheit eines Autos ganz wesentlich abhängt. Heute übernehmen meist Roboter die Aufgabe, die zahlreichen Schweißpunkte an der Karosserie anzubringen – aber auch die Maschinen arbeiten nicht ohne Schwankungen: »Je nach Dicke der Bleche haben die Schweißpunkte einen Soll-Durchmesser von vier bis acht Millimetern«, sagt Sommer. »Da die Elektrodenkappen der Schweißzangen während des Schweißprozesses hochbelastet sind und verschleiben, kann die Größe der Schweißpunkte vom vorgegebenen Wert abweichen, was natürlich Auswirkungen auf die Tragfähigkeit der Bauteile hat.«

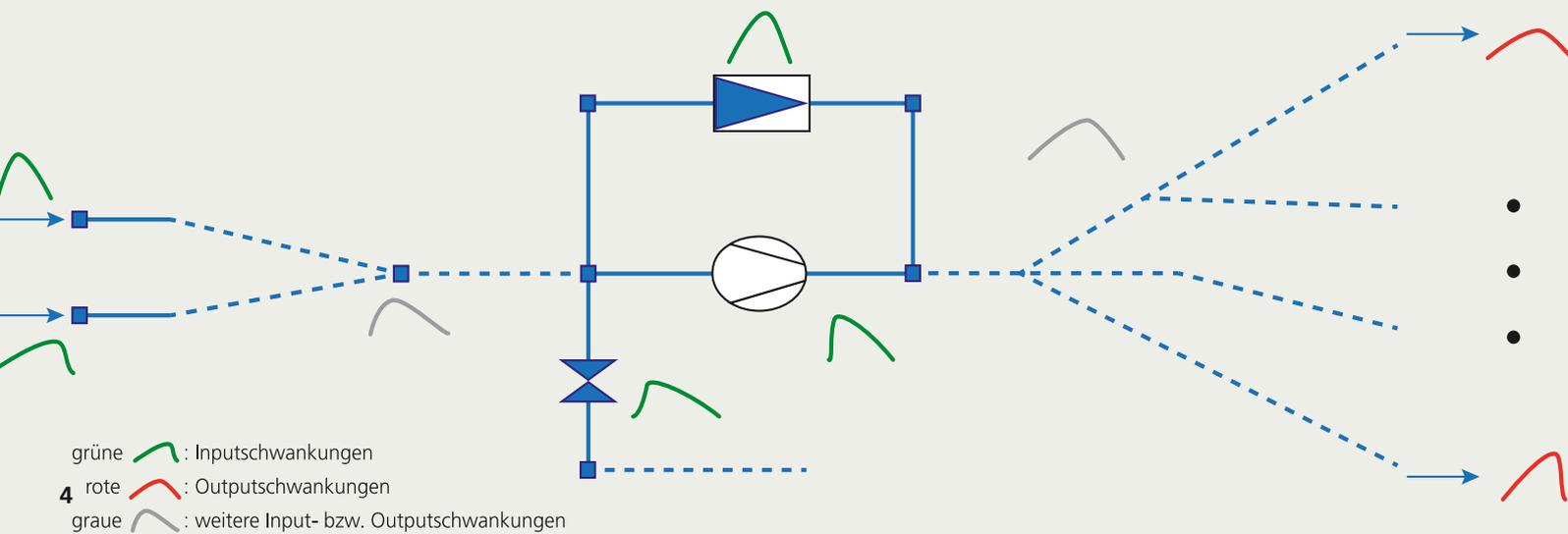
Das darf aber auf keinen Fall auf Kosten der Sicherheit gehen – auch wenn die Größe der Schweißpunkte schwankt, muss das Fahrzeug bei einem Zusammenstoß den Insassen so viel Sicherheit wie möglich bieten. In einem gemeinsamen Forschungsprojekt untersuchen Clees und Sommer seit Herbst letzten Jahres, welchen Einfluss variierende Schweißpunktdurchmesser auf die Stabilität einer Karosserie haben. »Mit Hilfe von DesParO kommen wir mit viel weniger Rechnungen aus als bei herkömmlichen Simulationen, um den Einfluss von variierenden Schweißpunktdurchmessern zu untersuchen«, berichtet Sommer. »Trotzdem liefert uns das Programm sehr gute Analysen.«

An dem öffentlich geförderten Projekt beteiligt sich auch die Forschungsvereinigung Automobiltechnik (FAT), ein Zusammenschluss von deutschen PKW- und Nutzfahrzeugherstellern und Automobilzulieferern. Ziel von Clees und Sommer ist es, bis Anfang 2013 auf der Basis von DesParO eine Software zu entwickeln, die die Auswirkungen schwankender Schweißpunktdurchmesser auf die Stabilität von Karosserien berechnen kann und die die Automobilhersteller für eigene Optimierungen nutzen können.

Neue Herausforderungen durch Aluminiumlegierungen

Auch Professor Margot Ruschitzka von der Fakultät für Fahrzeugsysteme und Produktion an der Fachhochschule Köln will das Einsatzgebiet von DesParO erweitern helfen. Die Expertin für virtuelle Produktentwicklung kooperiert mit SCAI bei der Grundlagenforschung, und die Ergebnisse der Kooperation mit Clees fließen in DesParO ein. Ruschitzka interessiert sich beispielsweise für neue Materialien in der Automobilproduktion: »Aluminiumlegierungen versprechen eine große Gewichtsersparnis«, erklärt sie. »Ihre Eigenschaften hängen aber sehr stark von der Beimischung verschiedener Spurenelemente ab.«

3 *Bei Transportnetzen wie etwa Gaspipelines können Variationen eingespeister Mengen, aber auch Rohren, Reglern und anderen Elementen den Korridor der Mengen im Netz und an den Ausgängen stark ändern*



Das hat natürlich Auswirkungen auf die Produktion: Schon Abweichungen von einigen ppm (parts per million) entscheiden darüber, ob ein Bauteil den Belastungen standhält. »Wir untersuchen den Einfluss und die Wechselwirkungen verschiedener Spurenelemente auf die Eigenschaften der Aluminiumlegierung. Dabei erstellen wir mathematische Modelle aus physikalischen Experimenten. Ziel ist es, vorhersagen zu können, aus welchen Beimischungen eine Aluminiumlegierung hergestellt werden muss, damit sie den Anforderungen entspricht«, so Ruschitzka. »Das ist derzeit ein sehr aktives Forschungsgebiet, und wir versuchen das Problem mit ähnlichen Methoden zu lösen, wie sie bereits heute in DesParO verwendet werden.« Dabei entwickeln die Kölner Experten zusammen mit dem Team vom SCAI grundlegende mathematische Verfahren, die vom SCAI in die DesParO-Software integriert werden.

4 *Illustration eines Gastransport-Netzwerks (Wasser, Öl, Energie analog): Variationen eingespeister Gasmengen sowie Parametern von Netzwerkelementen wie Verdichtern oder Reglern können eine große Auswirkung auf die Gasmengen im Netz und an seinen Ausgängen haben.*

Wie sicher ist ein Auto bei einem Unfall?

Seit Ende der 1990er Jahre gibt es bereits »DiffCrash«, ein Programm, mit dem sich die Stabilität von Crash-Simulationen analysieren lässt. Denn auch die virtuellen Zusammenstöße im Computer hängen sehr empfindlich von Toleranzen ab – in diesem Fall nicht nur von den Schwankungen realer Bauteile, sondern auch von Rundungsfehlern, die unvermeidlich sind und zu Ungenauigkeiten führen, die mit jedem Rechenschritt immer größer werden.

»Crash-Simulationen sind extrem instabile Prozesse, die selbst unter den winzigsten Störungen leiden können«, erklärt Clemens-August Thole vom Fraunhofer SCAI. »Mit DiffCrash fahren wir das Auto quasi mehrfach gegen die Wand und nehmen dabei kleinste Änderungen vor, etwa bei der Massenverteilung.« Zeigen sich dabei große Unterschiede selbst bei solchen geringfügigen Variationen, machen sich die Experten auf die Suche nach den Ursachen dieser kritischen Instabilitäten. »Das kann der Längsträger oder die Radaufhängung des Fahrzeugs sein«, berichtet Clemens-August Thole. »Wir besprechen dann mit den Ingenieuren, ob man betroffene Komponenten so umbauen kann, dass das Auto robuster gegen Schwankungen wird.« Denn im wahren Leben könnten minimale Variationen darüber entscheiden, ob die Insassen bei einem Unfall schwer verletzt werden oder mit leichten Blessuren davon kommen.