

## **Rechnerische Robustheitsbewertungen von Umformprozessen**

Dr.-Ing. Johannes Will  
dynardo GmbH, Weimar

Dipl.-Ing. Tobias Menke, Dipl.- Ing. Andre Stühmeyer  
CADFEM GmbH, Hannover

### **Abstrakt**

Umformprozesse unterliegen in Natura Streuungen, die sich auf die Umformergebnisse nennenswert auswirken können. Ob der Umformprozess „robust“ ist und damit die Streuung der Umformergebnisse in tolerablen Maßen bleibt, ist ein entscheidendes Qualitätskriterium. Zur Prognose, ob Eingangsstreuungen von Prozessparametern zu signifikanten Streuungen der Umformergebnisse führen, werden zunehmend stochastische Analysen von Umformsimulationen eingesetzt. Diese Prognosemöglichkeit kann sowohl in der virtuellen Produktentwicklung als auch produktionsbegleitend eingesetzt werden. Dabei werden so genannte Robustheitsbewertungen, Sensitivitätsanalysen von Eingangsstreuungen auf wichtige Ergebnisgrößen, durchgeführt.

Ausgehend von einer deterministischen Umformsimulation werden unter Berücksichtigung möglicher Eingangsstreuungen eine geeignete Anzahl möglicher Realisierungen des Umformprozesses berechnet. Die Charakteristik der Eingangsstreuungen ist dabei die entscheidende Grundlage stochastischer Berechnungen und muss mittels geeigneter statistischer Verteilungsfunktionen beschrieben werden. Nach der Durchrechnung einer ausreichenden Anzahl von Realisierungen wird mittels Korrelations- und Variationsanalyse die Robustheit des Umformprozesses untersucht. Dabei liefert die Variationsanalyse Schätzungen über das Maß der Streuung wichtiger

Ergebnisgrößen und die Korrelationsanalyse den Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsstreuungen. Der Bewertung der Robustheit liegen dann in der Regel Grenzwerte für wichtige Ergebnisgrößen zugrunde.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Akzeptanz von Robustheitsbewertungen in der praktischen Anwendung häufig unter fehlenden Validierungsmöglichkeiten und einer gewissen „Fremdheit“ der statistischen Ergebnisgrößen leidet. In deterministischen Berechnungen wird ein vertrauter Satz von Ergebnisgrößen berechnet und bewertet. An deren Stelle treten bei Robustheitsbewertungen statistische Maße wie Mittelwert, Standardabweichung, Korrelationskoeffizient, Variationskoeffizient, deren Schätzung zu allem Überfluss noch mit Fehlern (Vertrauensintervallen) behaftet ist. Der Ingenieur war in der Vergangenheit häufig unsicher, wie diese Maße zur Beurteilung und Lösung seines Ingenieurproblems herangezogen werden sollen. Ein entscheidender Durchbruch in der Akzeptanz rechnerischer Robustheitsbewertungen und damit verbundener statistischer Maße für die Ergebnisgrößen wurde nach Meinung der Autoren durch eine Projektion wichtiger statistischer Maße auf die FE-Strukturen sowie mit der Ausweisung von Bestimmtheitsmaßen erzielt. Die Projektion der Statistik in die gewohnte Bewertungsumgebung hilft dem Ingenieur die „hot spots“ der Streuungen zu ermitteln. Die Bestimmtheitsmaße zeigen dem Ingenieur an, ob die dafür verantwortlichen Eingangsstreuungen sicher identifiziert werden können. Ausgehend von linearen Korrelationshypothesen und deren Bestimmtheitsmaßen sowie von Variationsmaßen, dargestellt auf der FE-Struktur, wird eine erste Bewertung der Robustheit durchgeführt. In der Folge werden in den „hot spots“ auf lokaler Ebene (FE-Diskretisierung) statistische Maße linearer und quadratischer Korrelationshypothese sowie weitergehende statistische Maße der Variation herangezogen.

## 1 Einleitung

Seit einigen Jahren werden zur Simulation des Umformprozesses FE-Methoden in industriellen Anwendungen eingesetzt. Anfangs waren die Berechnungszeiten lang und die Resultate oft unbefriedigend. Heute, durch verbesserte Materialmodelle und neue numerische Methoden, ist die Simulation ein anerkannter Bestandteil zur Bemessung und Bewertung von Umformprozessen geworden.

Reale Umformprozesse sind Schwankungen ihrer Prozessparameter unterworfen. Diese Eingangsstreuungen können zu signifikanten Streuungen der Umformergebnisse führen.

Maßgebende Eingangsstreuungen können dabei z.B. Streuungen von Materialeigenschaften oder Blechdicken, Variationen in den Platinenzuschnitten, den daraus folgenden Lageverschiebungen in der Presse, Streuungen der Prozesskräfte oder auch die Reibung zwischen Umformwerkzeug und Umformgut sein.

Kriterien zur Beurteilung der Bauteilqualität bezüglich dieser Streuungen der Umformergebnisse können unter anderem die Maßhaltigkeit des Umformgutes, Einhaltung der zulässigen Abstreckung und der vorgegebenen Oberflächenqualität sein. Liegt die Bauteilqualität aufgrund von Prozessschwankungen nicht immer innerhalb der Toleranzgrenzen, spricht man von einem nicht robusten Prozess. Die sich daraus ergebenden Ausschussraten, Nacharbeits- und Kontrollaufwände, stellen einen nicht zu vernachlässigenden Kostenfaktor in der Produktion dar.

Ermöglicht durch wachsende Rechnerkapazitäten können heute zur Prognose von Streuungen wichtiger Ergebnisgrößen stochastische Berechnungsmethoden zum Einsatz kommen. Für eine grundsätzliche Untersuchung, wie vermutete Eingangsstreuungen auf wichtige Ergebnisgrößen wirken, werden so genannten Robustheitsbewertungen oder auch Sensitivitätsanalysen von Eingangsstreuungen auf wichtige Ergebnisgrößen durchgeführt.

In der vorliegenden Veröffentlichung werden kurz die methodischen Grundlagen rechnerischer Robustheitsbewertungen erläutert. Ausführlicher wird auf eine möglichst effiziente Auswertung auf globaler (FE-Netz) und lokaler (Elementebene) Ebene eingegangen. An zwei Beispielen wird die Methodik erläutert.

## **2 Rechnerische Robustheitsbewertungen**

Robustheitsbewertungen werden auch als Sensitivitätsanalysen von Eingangsstreuungen auf wichtige Ergebnisgrößen bezeichnet. Ausgehend von einer Umformsimulation mit einem deterministischen Kennwertsatz, der zum Beispiel den Mittelwerten der unsicheren Kennwerte entspricht, wird mittels eines stochastischen Samplingverfahrens eine Anzahl möglicher Realisierungen des Umformprozesses berechnet. Grundlage der stochastischen Erzeugung der Stützstellen ist die Definition der Streuungen und Unsicherheiten. Typische streuende Eingangsgrößen von Umformsimulationen sind zum Beispiel:

- Materialkennwerte wie Streckgrenze, Zugfestigkeit, n-Wert, R-Werte
- Blechdicke
- Platinenzuschnitt

- Platinenlage im Werkzeug
- Modellwert für Reibung.

Die Charakteristik der Eingangsstreuungen wird mittels statistischer Verteilungsfunktionen beschrieben und definiert den Wahrscheinlichkeitsraum möglicher Realisierungen. In praktischen Anwendungen wird vorhandenes Wissen über Streuungen in Kennwerte geeigneter Verteilungsfunktionen übersetzt. Dabei reicht die Bandbreite von ausführlichen Daten aus Eingangskontrollen von Materialwerten bis zu groben Schätzungen von Streuungen und Unsicherheiten. Die für die Robustheitsuntersuchung verwendete Software sollte dabei in der Lage sein, das vorhandene Wissen über die Eingangsinformationen vollständig berücksichtigen zu können. Dies setzt voraus, dass geeignete Verteilungsfunktionen (Normalverteilung, abgeschnittene Normalverteilung, Lognormalverteilung, Weibullverteilung oder Gleichverteilung) verwendet werden können sowie dass Korrelationen von einzelnen streuenden Eingangsvariablen oder von räumlich korrelierten Zufallsfeldern berücksichtigt werden können. Diese Notwendigkeit sei am Beispiel der Materialformulierung von Stahl illustriert. Gewöhnlicherweise werden die Fließkurven für die Umformsimulationen über Streckgrenze, Zugfestigkeit und Bruchdehnung beschrieben. Streckgrenze, Zugfestigkeit folgen häufig Lognormalverteilungen, die Bruchdehnung einer Normalverteilung. Sie weisen untereinander signifikante Korrelationskoeffizienten auf. Nur eine Berücksichtigung der vollständigen statistischen Informationen führt dann zu realitätsnahen Fließkurvenverläufen aus einer „zufälligen“ Wahl der 3 miteinander verknüpften streuenden Eingangsparameter im Samplingverfahren. Die Wahl einer Normalverteilung für alle 3 streuenden Eingangsgrößen ohne Berücksichtigung der Korrelationen würde dagegen bei einer Vielzahl der Realisierungen zu unrealistischen Fließkurven führen.

An dieser Stelle sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Vertrauenswürdigkeit der statistischen Maße der Ergebnisgrößen von der Qualität der Eingangsinformation über die Streuung der Eingangsgrößen abhängen. Wenn also nur grobe Annahmen über Eingangsstreuungen getroffen werden können, sollten auch die statistischen Maße nur als Trend bewertet werden.

Die Schätzung der statistischen Maße aus einer Stichprobe möglicher Realisierungen ist naturgemäß mit einem Fehler behaftet. Um diesen Fehler bei einer relativ geringen

Anzahl von Berechnungen möglichst klein zu halten, sind zur Erstellung der Stichproben Latin Hypercube Sampling Methoden zu bevorzugen. Untersuchungen zur Schätzung linearer Korrelationskoeffizienten /3/ zeigen, dass bei gleichem erwarteten Vertrauensintervall Latin Hypercube Samplings mehr als zehnmal effizienter als Monte Carlo Samplings sind. Dabei hängt allerdings zur Absicherung eines bestimmten Fehlermaßes die Anzahl der notwendigen Durchrechnungen von der Gesamtzahl der streuenden Eingangsgrößen zuzüglich der zu schätzenden Ergebnisgrößen ab. Oder mit anderen Worten, bei zunehmender Anzahl von Ergebnisgrößen steigt die Wahrscheinlichkeit, dass der maximale Fehler einzelner Korrelationskoeffizienten zunimmt. Typischerweise wird deshalb in vielen Ingenieurdisziplinen nur eine kleine Anzahl von aussagekräftigen Ergebnisgrößen bei Robustheitsbewertungen betrachtet /2/. Bei Robustheitsbewertungen von Umformsimulationen ergibt sich jedoch die Notwendigkeit, die räumlich stark korrelierten statistischen Maße auf der FE-Struktur zu visualisieren und damit eine sehr große Anzahl zu schätzender Korrelationskoeffizienten. Deshalb werden Projektionsverfahren /1/ verwendet, um das „Rauschen“ der Fehler der Schätzung von Korrelationskoeffizienten zu unterdrücken und wichtige Korrelationen zu identifizieren.

Die vorgeschlagene Methodik zur Erstellung der zu berechnenden Stützstellen und der Berechnung der statistischen Maße /1/ sichert dabei eine möglichst gute Schätzung der statistischen Maße bei möglichst wenigen Berechnungen.

## **2.1 Robustheitsbewertungen mittels statistischer Maße**

Statistische Maße aus den Histogrammen der Ergebnisgrößen ergeben die Grundlage der Schätzung der Streuung der Ergebnisgrößen /3/. Wichtige Variationsmaße sind dabei Variationskoeffizienten, Standardabweichung, Min/Max Werte oder 3-Sigma-Werte. In praktischen Anwendungen wird die Robustheit von Ergebnisgrößen häufig daran festgemacht, ob gewisse Grenzen überschritten werden. Die Grenzwerte werden dabei mit den Min/Max- Werten oder den 3-Sigma-Werten verglichen. Ein so genannter 3-Sigma-Werte ist eigentlich ein Wert mit einer Überschreitenswahrscheinlichkeit von 0.0013). Sigma-Werte können bei rechnerischen Robustheitsbewertungen grundsätzlich aus der Stichprobe geschätzt oder unter Annahme von Verteilungshypothesen aus Mittelwert und Standardabweichung berechnet werden. Weil davon ausgegangen werden kann, dass bei Robustheitsbewertungen für eine seriöse Schätzung aus Stichproben zu

wenig Stützstellen vorhanden sind, ist eine Ermittlung der Fraktilwerte über Verteilungsfunktionen unbedingt zu bevorzugen /1/.

Ist die Streuung von Ergebnisgrößen nicht tolerabel, werden über Korrelationsanalysen auffälliger Zusammenhänge zwischen der Variation einzelner Eingangsgrößen und der Variation einzelner Ergebnisgrößen gesucht. Korrelationskoeffizienten, bestimmt aus linearer und quadratischer Korrelationshypothese, beschreiben dabei ein Maß der Verknüpfung von Parametern. Die Korrelationskoeffizienten sind wiederum Grundlage von Bestimmtheitsmaßen. Bestimmtheitsmaße sind prozentuale Abschätzungen, welcher Anteil der Variation einer Ergebnisgröße aus der Korrelationshypothese zu einzelnen Eingangsstreuungen erklärt werden kann.

Ausgehend von linearen Korrelationshypthesen und deren Bestimmtheitsmaßen sowie von Variationsmaßen, dargestellt auf der FE-Struktur, wird eine erste Bewertung der Robustheit durchgeführt. Die gefundenen „hot“ spots werden dann auf lokaler Ebene (Elementebene) statistisch abgesichert. Sollten in Lokalitäten maßgebender Streuungen auf der FE-Struktur kleine Bestimmtheitsmaße angetroffen werden, sind weiterführende statistische Maße (quadratische Korrelationshypothese bzw. Anthill-Darstellungen für Nichtlinearitäten im Übertragungsverhalten) auf Elementebene zur Beurteilung der Robustheit unbedingt notwendig.

### **3 Anwendungsbeispiele**

Die Methodik soll an zwei Anwendungsbeispielen verdeutlicht werden.

#### **3.1 Prognose der Robustheit im Produktionsprozess /1/**

Ein Bauteil wird in mehreren Arbeitsfolgen hergestellt, d.h. mit einer Tiefziehoperation und mehreren Nachformoperationen. In der letzten Nachformoperation wird unter anderem ein Flansch aufgestellt. Gelegentlich ist es während der Werkzeugerprobung an dieser Stelle zu Problemen gekommen, so dass der Prozess als nicht robust bezeichnet wurde. Nur durch aufwendige Geometrieänderungen konnte der Prozess stabilisiert werden. Es war eine Vermutung aus der Produktion, die Größe des Platinenzuschnittes und die davon abhängige Variation der Lage zwischen den Platineneinweisern der Grund für den nicht robusten Prozess ist. Durch eine Robustheitsbetrachtung mit optiSLang

sollte diese Vermutung überprüft werden. Betrachtet wurde hierzu die Ziehsimulation, da aus Realuntersuchungen bekannt war, dass die Abstreckung der kritischen Stelle (Bild 2) in diesem Prozessschritt messbaren Schwankungen unterliegt. In den Nachformoperationen ergibt sich dann eine deutliche Verstärkung der Abstreckung, was letztlich zum Materialversagen führen kann. Damit ist die „Vorschädigung“ des Materials durch den Ziehprozess die Ursache für das risskritische Verhalten im Fertigungsprozess.



Bild 1: Bauteil Seitenrahmen Fahrzeugkarosse

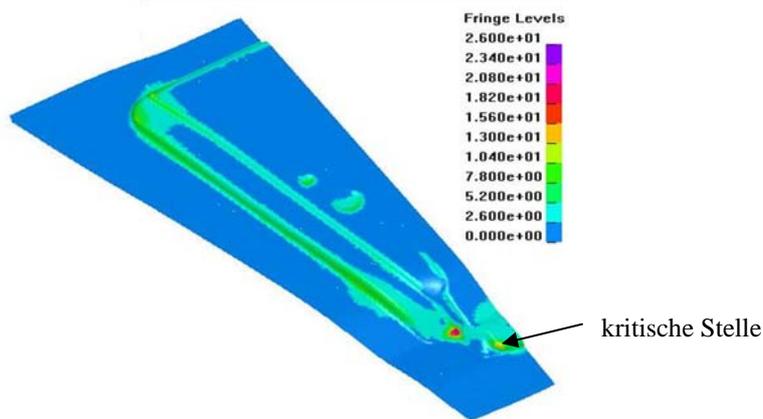


Bild 2: Ziehsimulation mit „hot spot“

Als Eingangsstreuungen wurden neben der Platinenlage auch die Streuung der Blechdicke sowie die Materialkennwerte Streckgrenze und R-Wert berücksichtigt. Da

keine Verteilungsfunktionen der Parameter bekannt waren, wurde jeweils Gleichverteilung der Werte mit unterer und oberer Grenze vermuteter Streuungen angenommen. Weil die Annahme der Eingangsstreuungen relativ grob ist, werden in der Folge hauptsächlich Korrelationen bewertet und damit sozusagen eine Sensitivitätsstudie gegenüber vermuteten Ursachen der Rissproblematik durchgeführt.

Insgesamt wurden 100 Rechnungen (optiSLang Latin Hypercube Sampling) mit dem Solver LS-Dyna durchgeführt. Die Ergebnisse der adaptiven Umformberechnung wurden jeweils auf ein standardisiertes Netz gemappt. Mittels optiSLang Postprocessing wurden dann statistische Maße auf der FE-Struktur ermittelt und visualisiert.

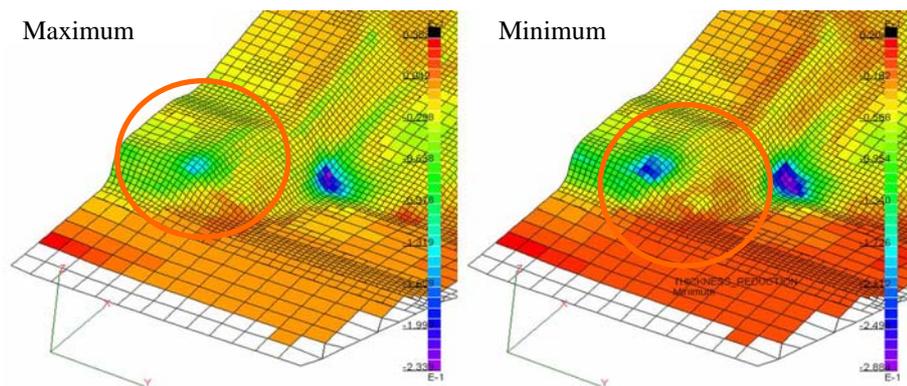


Bild 3: Min/Max-Wert Ausdünnung

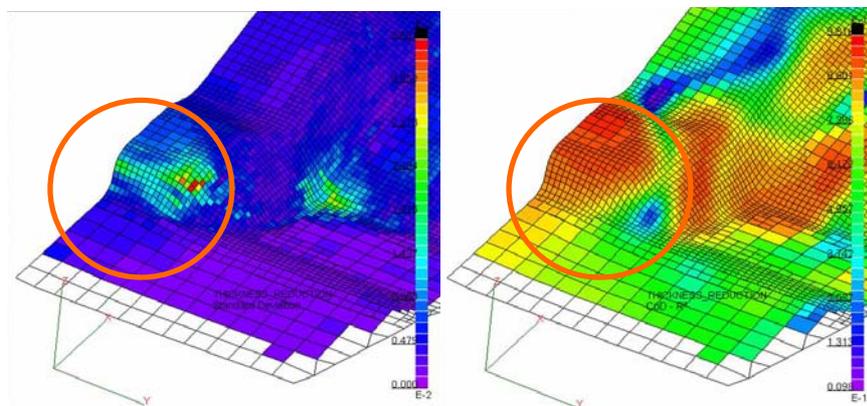


Bild 4: Standardabweichung, Bestimmtheitsmaß Ausdünnung

Im Bild 4 wird die Standardabweichung der Ergebnisgröße Ausdünnung dargestellt. Man kann erkennen, dass an der als kritisch betrachteten Stelle die Ausdünnung am stärksten variiert. Das Bestimmtheitsmaß der betrachteten Einflussgrößen (Bild 4) gibt Aufschluss, wie viel der Variation dieser Ergebnisgröße über alle linearen Korrelationen zu den Eingangsgrößen erklärt werden kann. Ein großes Bestimmtheitsmaß zeigt an, dass lineare Korrelationsanalyse zur Identifikation der wichtigen Eingangsparameter ausreichend ist. Ein kleines Bestimmtheitsmaß zeigt an, dass nichtlineare Korrelationen wichtig sind oder numerisches Rauschen der CAE-Berechnung die Ergebnisgröße signifikant beeinflusst. Damit ist das Bestimmtheitsmaß auch ein Qualitätsmaß des numerischen CAE-Prozesses. Im vorliegenden Fall ist das Bestimmtheitsmaß linearer Korrelationen im interessierenden Blechbereich hoch (>80%). Damit lassen sich die wichtigsten Zusammenhänge mit linearen Korrelationskoeffizienten erklären.

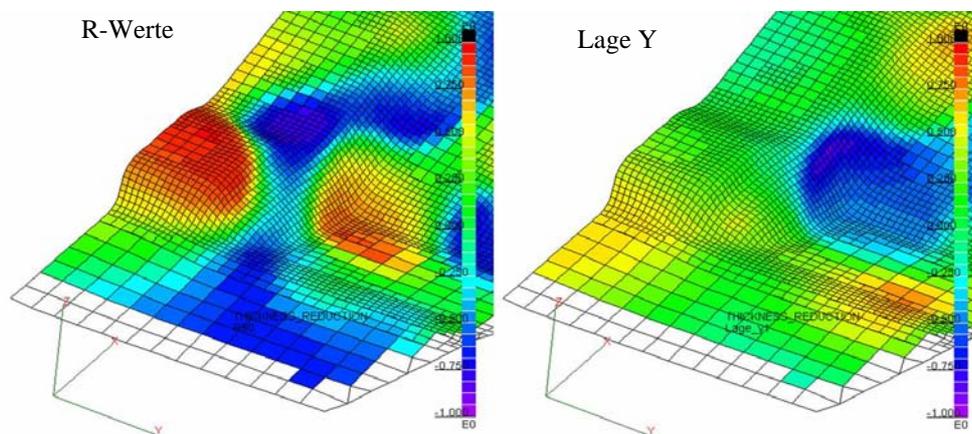


Bild 5: lineare Korrelationen zwischen Streuung R-Wert und Lageabweichung Y zur Ausdünnung

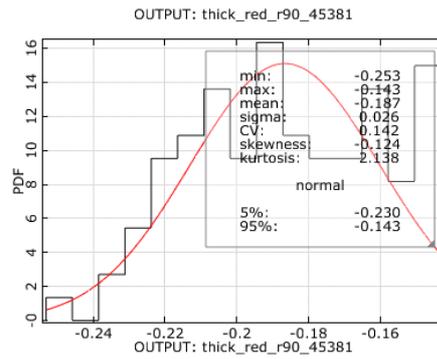


Bild 6: Histogramm vom Element der maximalen Ausdünnung im „hot spot“

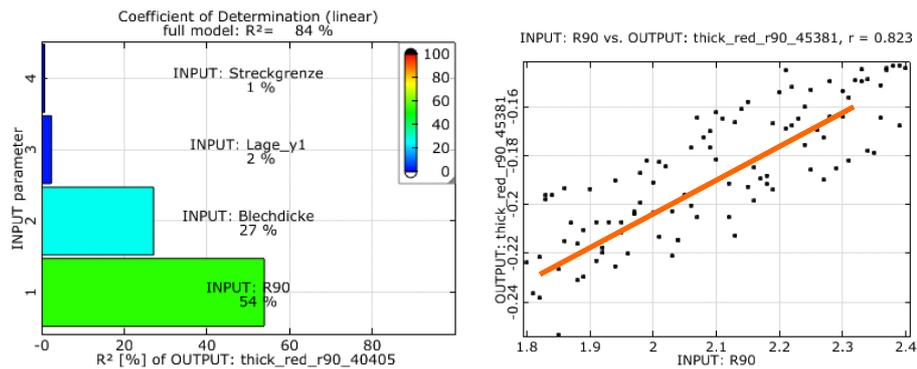


Bild 7: Bestimmtheitsmaß und Anthill-plot zwischen R90-Wert und Ausdünnung im „hot spot“

Mittels der Darstellung der Korrelationswerte der einzelnen Einflussparameter, kann ermittelt werden, welche Eingangsstreuung die Ergebnisgröße am meisten bestimmt. In Abbildung 5 werden die Korrelationswerte der R-Werte und der Lage Y zur Ausdünnung visualisiert. Deutlich ist zu sehen, dass die Variation der Blechdickenänderung von der Variation der R-Werte dominiert wird. Die Lage Y zeigt in diesem Bereich keine nennenswerte Korrelation.

Zur weiteren Detaillierung der statistischen Maße können nun elementweise Histogramm (Bild 6), Bestimmtheitsmaße und Anthill-Plots (Bild 7) dargestellt werden. Ausgewählt wird hierfür das Element mit der größten Ausdünnung im interessierenden Bereich. Das lokale Bestimmtheitsmaß linearer Korrelationen (siehe Bild 7  $\Rightarrow 84\%$ ) bestätigt die Ergebnisse auf dem FE-Netz. Die Dominanz des Materialwertes R90 zeigt sich auch im

Anthill-Plot zur Ausdünnung (Bild 7), der lineare Korrelationsanteil, der laut Bild 7 54 % der Variation der Ausdünnung ausmacht, ist deutlich zu erkennen (orange Linie). Die Streuung aller anderen Prozessparameter verursacht darüber hinaus die Streuung um diesen linearen Zusammenhang.

Aus den Visualisierungen wird ersichtlich, dass der als kritisch betrachtete Bereich des Bauteiles eine große Streuung der Ergebnisgröße Ausdünnung aufweist. Der vermutete Einfluss der Platinengröße hat in diesem Bereich jedoch sehr kleine Korrelationskoeffizienten und Bestimmtheitsmaße und kann somit nicht als Hauptursache identifiziert werden. Der größte Einfluss auf die Streuung der Ausdünnung resultiert aus der angenommenen Streuung des R-Wertes, gefolgt von der Streuung der Blechdicke. Streuung der Streckgrenze und der Platinenlage wirken sich dagegen nicht nennenswert auf die Ausdünnung im interessierenden Bereich aus.

### **3.2 Prognose der Robustheit in der virtuellen Produktentwicklung**

In der virtuellen Produktentwicklung einer Fussraumverkleidung wurde der Einfluss zu erwartender Eingangsstreuungen auf wichtige Ergebnisgrößen untersucht.

Streuende Eingangsparameter waren die Dicke, die Dichte, der Elastizitätsmodul, die Fließgrenze und die Verfestigung des Grundmaterials, die Reibung zwischen Grundmaterial und Werkzeug sowie die Prozesskräfte beim Umformen.

Zur Bewertung der Robustheit wurden die Ausdünnung und die maximalen Vergleichsdehnungen herangezogen.

Die Umformsimulation wurde mit FASTFORM Advanced und die Robustheitsbewertung mit optiSLang durchgeführt. Insgesamt wurden 100 Simulationen (optiSLang Latin Hypercube Sampling) durchgeführt. Weil zum frühen Zeitpunkt der virtuellen Produktentwicklung kein auskonstruiertes Design vorlag und damit auch keine absoluten Differenzwerte oder Grenzwerte von Ergebnisgrößen bekannt waren, wurde zur Bewertung der Robustheit des Umformprozesses der Variationskoeffizient herangezogen. Der Variationskoeffizient ist ein dimensionsloses Maß der Streuung, das sich in zu erwartende prozentuale Abweichungen für ein Wahrscheinlichkeitsniveau umrechnen lässt. Es sollte untersucht werden, ob signifikante Ausgangsstreuungen zu erwarten sind und damit die Robustheit des Umformprozesses zu einem wichtigen Designkriterium werden kann.

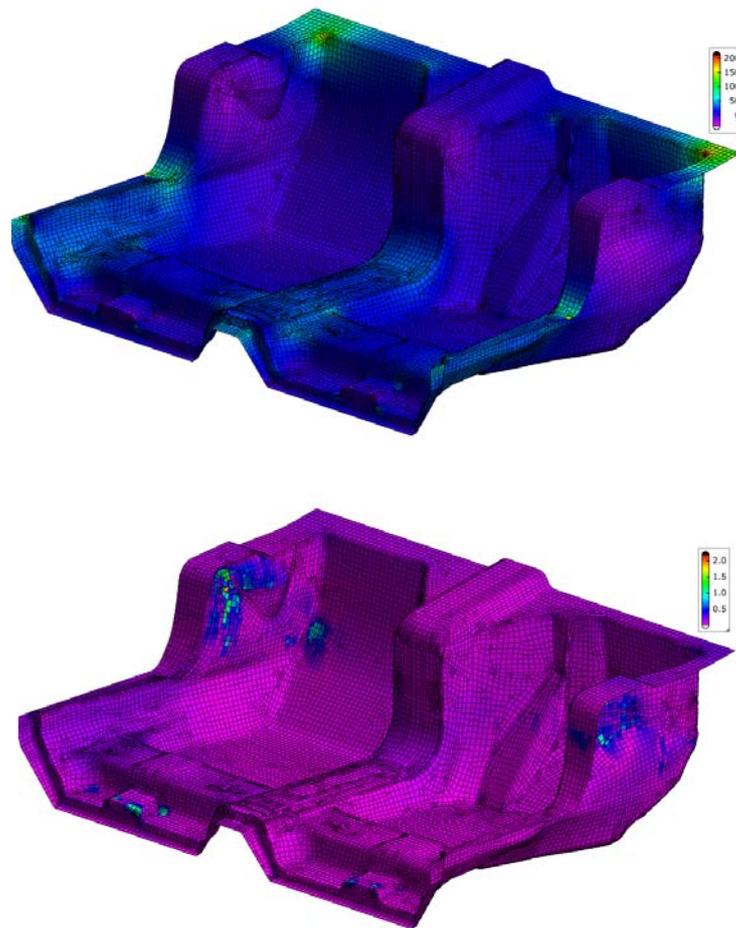


Bild 8: oben Mittelwert der Dickenänderung, unten Standardabweichung der Dickenänderung

Aus den Robustheitsbewertungen konnten maximale Variationskoeffizienten von ungefähr 0.01 für die Ausdünnung und von 0.04 für die maximalen Hauptspannungen ermittelt werden. Das ist mindestens ein Faktor 3 kleiner als die zu erwartenden Eingangsstreuungen, die Variationskoeffizienten von 0.12 bis 0.15 aufwiesen. Damit konnte gezeigt werden, dass der Prozess bezüglich des Übertragungsverhaltens der

Streuungen dämpfend wirkt und zum jetzigen Zeitpunkt kein Robustheitsproblem erkennbar ist.

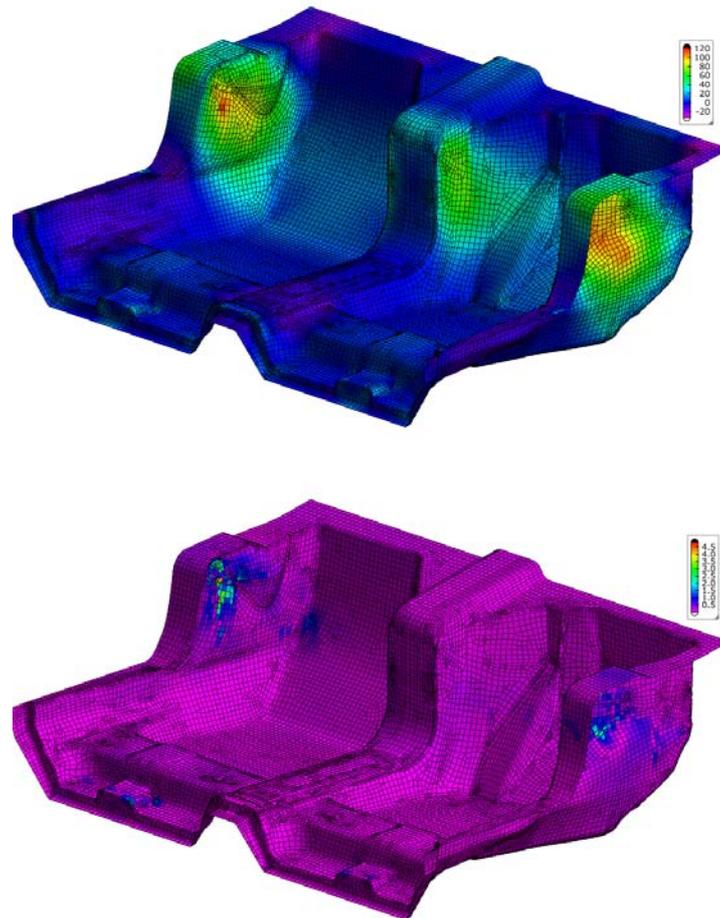


Bild 9: oben Mittelwert maximalen Hauptdehnung, unten Standardabweichung der maximalen Hauptdehnung

Die Bestimmtheitsmaße auf der FE-Struktur zeigen an, dass die Variation zu einem überwiegenden Anteil mit linearer Korrelationshypothese erklärt werden kann. Der Plot der linearen Korrelation zwischen Dickenstreuung des Grundmaterials und der Streuung der maximalen Hauptdehnungen zeigt, dass fast in der gesamten Struktur die Streuung

der Dicke auf die Streuung der maximalen Hauptdehnung durchschlägt. Eine lokale Auswertung im „hot Spot“ der größten Streuung der maximalen Hauptdehnung bestätigt das. Es kann 86% der Streuung der maximalen Hauptdehnung aus der Streuung der Dicke des Grundmaterials erklärt werden. Andere Eingangsstreuungen zeigen keinen Einfluss.

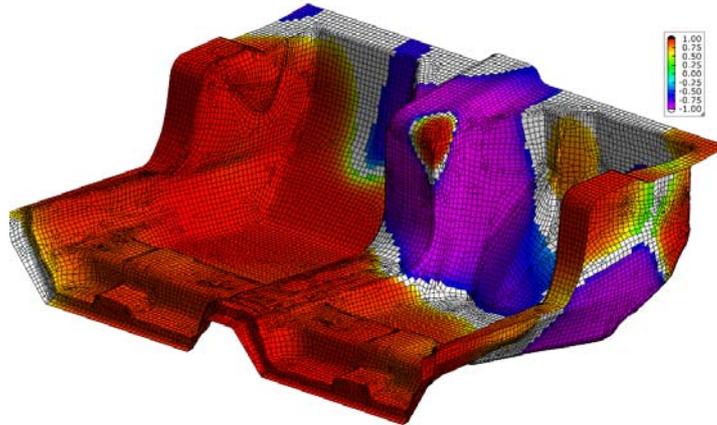


Bild 10: lineare Korrelationskoeffizienten bezüglich der maximalen Vergleichsspannung

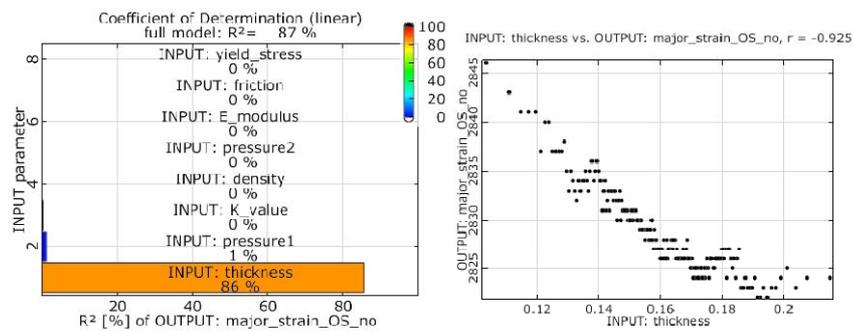


Bild 11: Bestimmtheitsmaß und Anhill-Plot zwischen Eingangsstreuung der Dicke des Grundmaterials und der maximalen Hauptspannung

#### 4 Zusammenfassung

Es wurde eine Methodik rechnerischer Robustheitsbewertungen vorgestellt, die eine Prognose von Streuungen wichtiger Ergebnisgröße ermöglicht. Damit kann die

Robustheit von Umformprozessen gegenüber den in Natura erwarteten Streuungen von Eingangsparametern überprüft werden.

Mittels der Visualisierung der statistischen Maße auf FE-Strukturen können Bereiche kritischer Streuungen und die Einflussbereiche der verschiedenen streuenden Eingangsparameter schnell erkannt werden. Auf lokaler Ebene können diese Erkenntnisse mit weiteren statistischen Maßen überprüft werden. Dies ermöglicht eine zuverlässige Identifikation kritischer Streuungen und eine sichere Identifikation der dafür verantwortlichen Eingangsstreuungen.

## Literatur

- /1/ Will, J.                    Berechnung und Visualisierung statistischer Maße auf FE-  
Bucher, C.;                Strukturen für Umformsimulationen; Proceedings  
Ganser, M.;                Weimarer Optimierung- und Stochastiktage 2.0, 2005,  
Grossenbacher, K        Weimar, Germany
- /2/ Bucher, C. at all        optiSlang – the optimizing structural Language, Version  
2.1, 2006, dynardo GmbH
- /3/ Will, J                     Statistische Maße für rechnerische Robustheitsbewertungen  
Bucher, C.:                CAE-gestützter Berechnungsmodelle, eingereicht bei  
Proceedings Weimarer Optimierung- und Stochastiktage  
3.0, 2006, Weimar, Germany