

# Verkürzung der Try-Out-Phase durch Prozessfenster-Ermittlung und Zihsickenoptimierung

Matthias Schneider

Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH, Salzgitter, Deutschland

## **Abstract:**

Die Abschätzung der Herstellbarkeit von Tiefziehbauteilen mittels der Finiten-Elemente-Methode ist schon länger Stand der Technik. Die Genauigkeit und die Zuverlässigkeit der Simulationswerkzeuge werden stetig verbessert und zusätzlich werden neue Technologien, wie das Presshärten [1], abgebildet. Neben dieser Entwicklung kann die Simulation helfen optimale Form- und Verarbeitungsparameter zu finden. Zusätzlich können mit ihr Aussagen über die Robustheit eines Prozesses getroffen werden. Auf diese Weise werden Einarbeitungszeiten der Werkzeuge verkürzt und die Dauer von Änderungsschleifen reduziert.

## **Abstract:**

The estimation of the produceability of deep-drawing parts using the finite-element method has been already state of the art for some time. The accuracy and reliability of simulation tools have been continuously improved and in addition new technologies like hot press forming have been made computable. Besides this development, the simulation is able to find best parameters and geometries for the forming process. Additional statements about the robustness of a process can be made. Thus the simulation can shorten the time needed for adjusting the tool and can reduce expensive tool modifications.

## **Keywords:**

Optimierung, Umformung, Stahl, Dualphasenstahl, Leichtbau, Kotflügel, Automobil

## 1 Einleitung

Die Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH (SZMF) ist die zentrale Forschungs- und Entwicklungseinheit des zweitgrößten deutschen Stahlherstellers, der Salzgitter AG. Hier werden bestehende Stahlgüten optimiert und neue entwickelt um auch den zukünftigen Ansprüchen der Kunden gerecht zu werden.

Am Beispiel eines höherfesten Dualphasenstahles sollte beispielhaft das Leichtbaupotenzial des vermeintlich althergebrachten Werkstoffes Stahl aufgezeigt werden. Ziel war die Umsetzung einer Gewichtersparnis durch Blechdickenreduktion bei gleichzeitiger Gütersubstitution. Hierzu sollte eine Seriengeometrie mit Außenhutanforderungen als Prototyp dargestellt werden. Zusammen mit der Konzernforschung der Volkswagen AG und einem kooperierenden Stahlhersteller wurde so ein Gemeinschaftsprojekt ins Leben gerufen. Die Wahl des Bauteiles fiel auf den Kotflügel des Golf V (Bild1).



*Bild 1: Golf V mit hervorgehobenem Kotflügel*

Ein entsprechender Prototyp sollte bei gleichen oder besseren Bauteileigenschaften ein geringeres Gewicht aufweisen. Ziel war die Einsparung von 0,5kg pro Bauteil, also 1kg pro Fahrzeug. Dies sollte durch Verwendung eines 0,5mm dünnen HCT600XD erreicht werden. Die Prüfung der Herstellbarkeit war somit die erste Aufgabe für die Finite-Elemente-Analyse. Zusätzlich sollten Aussagen über die Robustheit des Prozesses getroffen werden können.

Bei der Betrachtung der Bauteileigenschaften wurde spezielles Augenmerk auf die elastische Beulsteifigkeit und die plastische Beulfestigkeit gelegt. Die elastische Steifigkeit ergibt sich aus dem Zusammenspiel von Geometrie, E-Modul und Blechdicke eines Bauteils. Bei einem großflächigen Bauteil, wie einer Motorhaube, kann eine Blechdickenreduktion zu unerwünschten elastischen Verformungen führen. Hier sind zum Beispiel elastische Verformungen durch Windlasten im Fahrbetrieb zu nennen. Kotflügel hingegen weisen meist wenig ebene Flächen auf. Ihre Steifigkeit resultiert maßgeblich aus den vielen vorhandenen Rundungen und Formelementen. Zusätzlich wird aufgrund der Bauteilposition eine potenzielle Windanfälligkeit weniger stark wahrgenommen. Eine Verringerung der Blechdicke wird aber auch hier zu einer kleineren Steifigkeit führen. Die gleiche, ausgeübte Kraft wird somit eine etwas größere elastische Verformung hervorrufen. Entscheidend für den Gebrauch ist jedoch die Frage, welche plastische Verformung nach einer größeren Krafteinwirkung im Bauteil verbleibt. Beispiele für solche größeren Beanspruchungen sind Hagelkörner [2][3], sowie ein aufprallender Ball oder ein anstoßender Einkaufswagen. Besitzt der Stahl eine höhere Streckgrenze kann mehr Intrusionsenergie durch elastische Verformung aufgenommen werden. Tritt dennoch Plastifizierung auf, bewirkt der gegenüber dem Serienwerkstoff höhere Verfestigungsexponent des HCT600XD trotz geringerer Blechdicke eine gleiche (oder geringere) plastische Deformation. Der hohe Verfestigungsexponent bewirkt zusätzlich, dass bei einer plastischen Dehnung des Materials, die Ausdünnung über den starken Streckgrenzanstieg mehr als kompensiert wird. Dieser Effekt tritt besonders im Bereich kleiner Umformgrade auf. Eine gezielte Optimierung der Ausstreckung des Materials und damit der Fließgrenze am Bauteil wurde somit zum zusätzlichen Ziel für die Finite-Elemente-Analyse. Auf die Umformung konnte über die Bauteil- und somit die Werkzeuggeometrie kein Einfluss genommen werden. Diese waren bereits vorhanden. Lediglich die Niederhalterkraft und die Ziehstücken konnten angepasst werden.

Die FE- Analyse unterteilte sich somit in die Bereiche Herstellbarkeit, Prozessfenster und Ziehstückenoptimierung.

## 2 Prüfung der Herstellbarkeit

Für die Herstellbarkeitsbetrachtung des Golf V Kotflügels stellte die Konzernforschung der Volkswagen AG die relevanten Bauteildaten bereit.

Auf Basis dieser Daten wurde ein FE-Netz erstellt. Die entsprechende Simulation gliederte sich in die Schritte des Niederhalterschließens und der eigentlichen Umformung.

Um die spätere Herstellbarkeitsbetrachtung mit einem validierten Modell durchführen zu können, sollte zuerst der Serienprozess abgebildet werden. Hierzu wurde eine Serienplatine mit einem Messraster beätzt und in der entsprechenden Pressenlinie in Wolfsburg umgeformt. Nach der ersten Umformoperation wurde die Platine dem Prozess entnommen und anschließend bei SZMF mit einem optisch-elektronischen Messverfahren ausgewertet. Zusätzlich zu den so gewonnenen Dehnungs- und Ausdünnungsverteilungen konnten aus einer zweiten, unverformten Platine Materialkennwerte ermittelt werden. Eine geometrische Abbildung der im Werkzeug vorhandenen Ziehsicken kam aufgrund der zu hohen resultierenden Rechenzeiten nicht in Betracht. Aus diesem Grund wurden sie im Modell über \*Contact\_Drawbead [4] abgebildet. Im Bauteilmodell wurde die Position der Ziehsicke beschrieben, jedoch nicht die Kontur des Querschnittes. Um dennoch einen möglichst ähnlichen Materialfluss zu erzielen, wurden die Ziehsickengeometrien durch Vermessung der in die umgeformte Serienplatine eingepprägten Sicken abgeschätzt. Mit diesen Geometriedaten wurden Streifenzugmodelle aufgebaut, welche entsprechende Ziehsickengeometrien enthielten. Parallel entstanden entsprechende Modelle mit dem Ersatzmodell \*Contact\_Drawbead. Iterativ konnten so die nötigen Rückhaltekräfte für das letztgenannte Modell bestimmt werden.

Aufgrund von Geometrieunterschieden zwischen Bauteilmodell und Serienwerkzeug war jedoch kein vollständiger Abgleich des LS-Dyna-FE-Modells der ersten Umformstufe möglich. In den Bereichen geometrischer Ähnlichkeit zeigten Dehnungen und Ausdünnungen jedoch hinreichend gute Übereinstimmungen. Der Einzug der Platine stimmte mit Abweichungen im Bereich weniger Millimeter mit dem Realbauteil überein. Ein direkter Abgleich war hier jedoch nicht möglich. Das Blech wurde im Realprozess beim Durchlaufen der Ziehsicke verformt und dadurch zurückgehalten. Durch \*Contact\_Drawbead wurde es lediglich zurückgehalten. Mit einer überschlägig bestimmten abgewickelten Länge des Realteiles konnte dennoch ein Abgleich erzielt werden.

Nach Abschluss der Validierung sollte die Herstellbarkeit des Kotflügels aus HCT600XD mit  $t=0,5\text{mm}$  geprüft werden. Jedoch lag vom mehrstufigen Serienprozess nur die erste Umformstufe vor. Für die Folgeoperationen musste allerdings eine gewisse Umformbarkeit des Stahles erhalten bleiben. Durch die Bestimmung der kleinsten Bauteilradien beziehungsweise durch Ermittlung der hierfür nötigen Dehnung konnte diese grob abgeschätzt werden. Hierzu wurden in einem Streifenmodell Biegeoperationen mit diesen Radien simuliert, wobei ein Nachfließen des Materials verhindert wurde. Auf Basis des validierten Modells und der getroffenen Annahmen ergab die Simulation, dass der Kotflügel aus  $0,5\text{mm}$  dünnem HCT600XD herstellbar sei (Beispiel: Bild 2). Somit konnte mit der Prozessfensterermittlung sowie mit der Ziehsickenoptimierung begonnen werden.

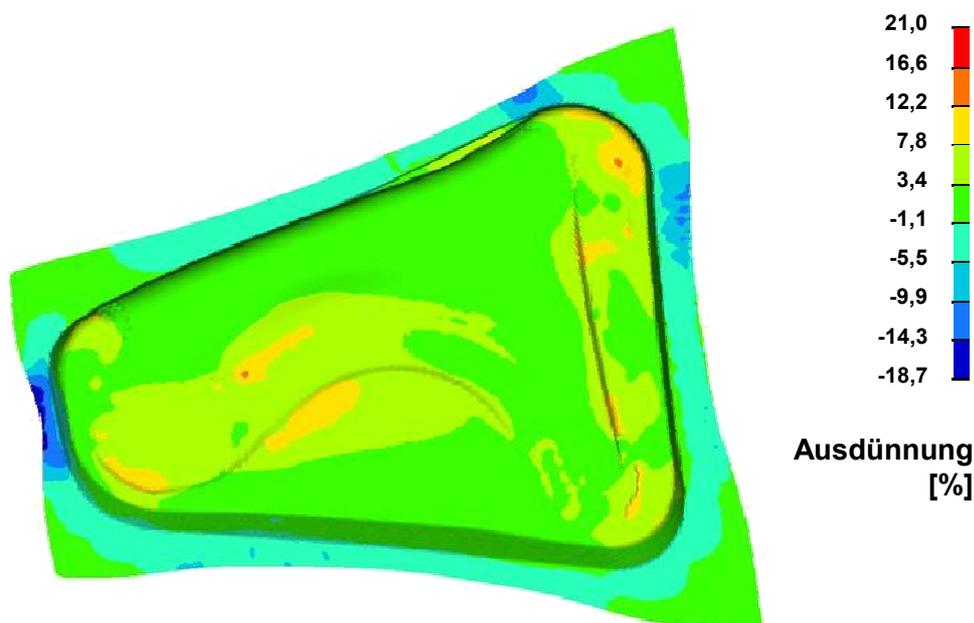


Bild 2: Ausdünnung des HCT600XD nach der ersten Umformstufe

### 3 Bestimmung des Prozessfensters

Der Wunsch nach einem leichteren Kotflügel mit gleichen Bauteileigenschaften ist nur mit einem hierauf abgestimmten Werkstoff zu realisieren. Davon unabhängig werden mit steigenden Anforderungen an die Bauteile die Reserven der Werkstoffe immer kleiner und die Prozesse immer grenzwertiger. Es besteht die Gefahr, dass bei gewissen Kombinationen der variierenden Prozessgrößen und Materialkennwerten ein Riss oder eine Falte auftritt. Diese können entsprechend der Realität auch in der Simulation mit Streuungen versehen werden [5]. Anschließend werden für eine Vielzahl der möglichen Parameterkombinationen Simulationen durchgeführt. Dies bedingt einen großen rechnerischen Aufwand.

Ein Eindruck von der Empfindlichkeit des Prozesses wird bei einer Werkzeugeinarbeitung durch die Ermittlung des Prozessfensters bezogen auf die Niederhalterkraft erzielt. Hier wird solange die Niederhalterkraft gesenkt bis Falten in den Bauteilbereich hineinlaufen.

Generell werden Falten in Falten erster und zweiter Art unterschieden. Falten erster Art treten unter dem Niederhalter auf. Laufen diese Falten in die Matrize ein, werden sie zu Falten zweiter Art. Erstrecken sie sich bis in den Bauteilbereich, kann das Bauteil nicht weiterverarbeitet werden. Im zweiten Schritt wird die Niederhalterkraft so hoch wie möglich eingestellt. Zeigen sich erste Risse, ist die obere Grenze des Prozessfensters bestimmt. Dieses Vorgehen ist im Bereich der Simulation automatisierbar, denn es kann durch zwei Optimierungen mit entgegengesetzten Zielen abgebildet werden. Im Folgenden wird beschrieben, wie dies mit LS-Dyna und HyperStudy umgesetzt wurde.

Ziel der ersten Optimierung war die Minimierung der Niederhalterkraft. Hierbei sollte solange die über den Tiefziehprozess konstante Niederhalterkraft verringert werden, bis Falten erster Art auftraten. Ihre Entstehung wurde über die Veränderung der Niederhalterposition erfasst und als „Constrain“ definiert. Um große Falten zweiter Art mit entsprechenden Materialdopplungen zu erkennen, wurden zusätzlich die plastische Vergleichsformänderung und der Abstand zur Grenzformänderungskurve überwacht. Dieses Vorgehen verhinderte, dass völlig deformierte Elemente nicht verwertbare Ergebnisse erzeugten.

Als Optimierungsansatz diente die Adaptive-Response-Surface-Methode. Diese lieferte schon nach ca. 30 Rechenläufen das Minimum. Hierbei muss beachtet werden, dass es sich zwar um eine Optimierung mit nur einer Variablen handelte, die Antwort des Systems aber extrem nichtlinear war. Der Bereich zwischen einem leicht welligen Blech und einer entsprechend großen Falte war relativ klein.

Für die Bestimmung der maximalen Niederhalterkraft konnte die eben beschriebene Optimierung als Grundlage genutzt werden. Das Ziel war entgegengesetzt und bestand jetzt aus der Bestimmung des Maximums der Niederhalterkraft. Neben der bereits vorhandenen Überwachung der plastischen Vergleichsformänderung und des Abstandes zur Grenzformänderungskurve wurde noch die Ausdünnung erfasst.

Die Antwortfunktion war hier auch nichtlinear, jedoch weniger sprunghaft als die vorhergehende. Somit konnte das Maximum nach 20 -30 Runs bestimmt werden.

Bei der Überwachung der Daten aus den LS-Dyna d3plots oder aus entsprechenden ASCII-Dateien lässt sich HyperStudy komfortabel mit LS-Dyna koppeln. Sollen jedoch sehr viele Werte, wie zum Beispiel die Ausdünnung aller Elemente, ausgewertet werden, kann dies über ein Skript für HyperView erfolgen. Auf diese Weise können ASCII-Dateien erzeugt werden, welche HyperStudy einliest. Grundsätzlich müssen die vielen Einzelwerte auf einen repräsentativen Wert zusammengeführt werden. Hier bietet sich an, von allen Werten die zwanzig minimalen bzw. maximalen Werte zu ermitteln und aus ihnen einen Mittelwert zu bilden. Auf diese Weise werden Einflüsse von deformierten Elementen gedämpft, aber trotzdem ein Versagen erkannt.

Neben der zu untersuchenden Güte HCT600XD wurden noch für drei weitere Dualphasenstähle die Prozessfenster ermittelt. Somit konnte der Güteinfluss auf das Prozessfenster gezeigt werden. Die entsprechende Betrachtung für die Dualphasenstähle HCT450XD, HCT500XD, HCT600XD und CR590 (Güte des kooperierenden Stahlherstellers, ähnlich dem HCT600XD) lieferte das unten abgebildete Diagramm (Bild 3).

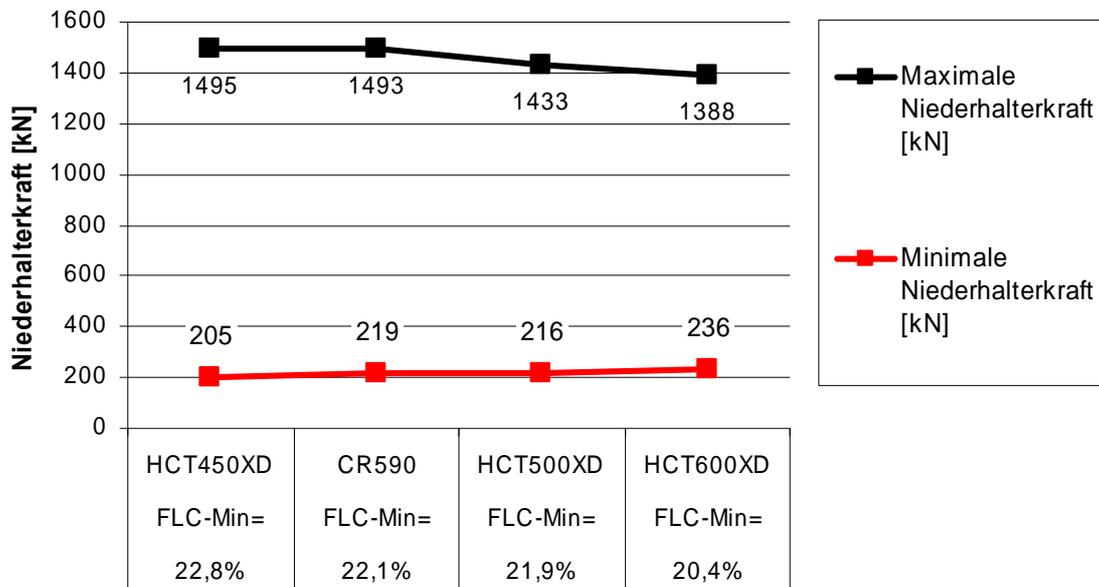


Bild 3: Ergebnis der automatisierten Prozessfensterermittlung in Bezug auf die Niederhalterkraft

Die Werte als solche sind vor dem Hintergrund zu sehen, dass genaue Fließ- und Grenzformänderungskurven für eine Blechdicke von 0,5mm zur Zeit der Finiten-Elemente-Analyse für diese Güten nicht vorlagen und somit abgeschätzt werden mussten. Zusätzlich kann die Bezeichnung des Prozessfensters nur eingeschränkt gelten, da die Optimierung keine Falten zweiter Art oder Welligkeiten im Bauteil erkennen konnte. Dies ließe sich jedoch beispielsweise durch Überwachung der Pressenkräfte kurz vor der vollständigen Ausformung realisieren. Die Glättung der Welligkeiten sollte in der Simulation zu Kraftanstiegen führen.

Neben der Ermittlung des Prozessfensters wurde zusätzlich eine Möglichkeit zur Erweiterung des Prozessfensters angedacht, da die Umformung des HCT600XD mit  $t=0,5\text{mm}$  zu einem Golf V Kotflügel aufgrund der anspruchsvollen Geometrie als Risiko eingeschätzt wurde. Ist das Prozessfenster zu klein, kann es durch Nutzung einer zeitlich veränderlichen Niederhalterkraft [6] vergrößert werden. In der Simulation wurden in die „Loadcurve“ weitere Variablen integriert, so dass sie zeitlich veränderlich war. Die Optimierung hatte somit mehr Veränderliche als die oben beschriebenen Prozessfensterermittlungen. Bis zu ihrer Lösung waren ca. 80 Runs nötig. Das Ergebnis ist in Bild 4 dargestellt.

Die meisten modernen Pressen unterstützt die Steuerung der Niederhalterkraft abhängig vom Werkzeugverfahrweg, so dass die Umsetzung der ermittelten unten dargestellten Vorgaben für die Niederhalterkraft möglich gewesen wäre.

Dies war jedoch nicht nötig. Vielmehr zeigten sich beim realen Prototyping Risse bei den vorhergesagten maximalen Niederhalterkräften. In Anbetracht der vielen im Vorfeld zu treffenden Annahmen wurde dies als befriedigendes Ergebnis eingestuft.

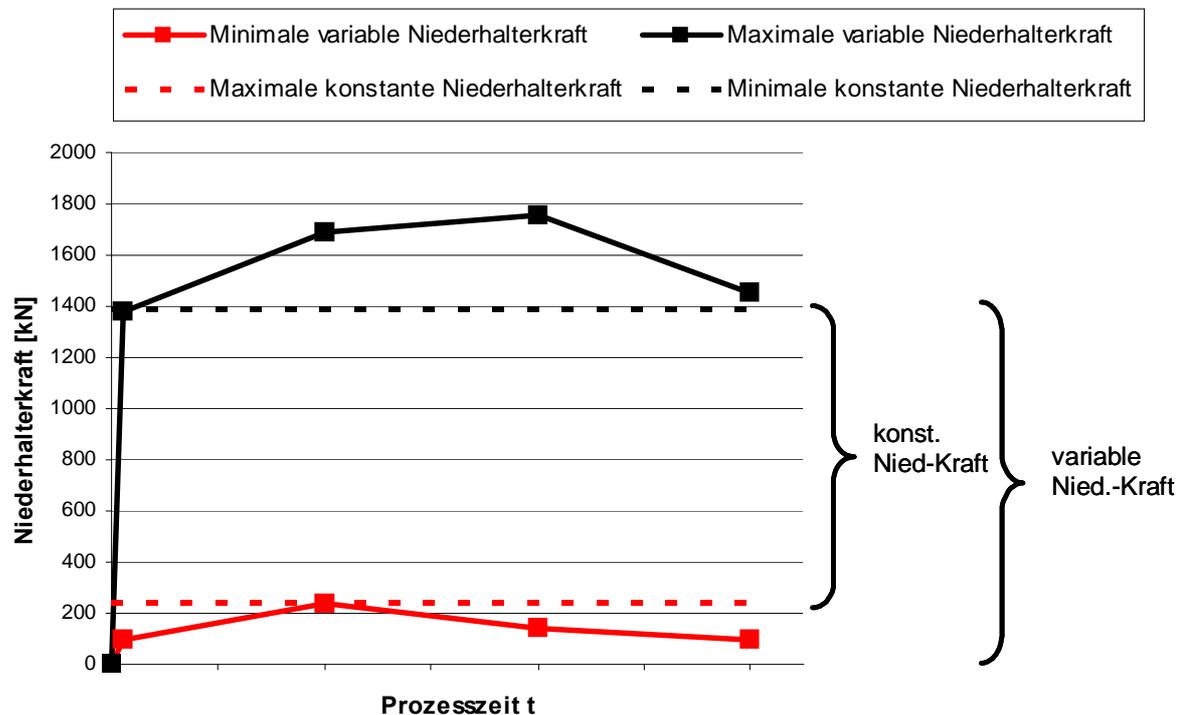


Bild 4: Prozessfenstervergrößerung durch variable Niederhalterkraft

#### 4 Optimierung der Ziehsicken

Eine globale Steuermöglichkeit, um das Nachfließen des Werkstoffs während des Tiefziehens zu beeinflussen, besteht in der Wahl der Niederhalterkraft. Sie wird so gewählt, dass ein möglichst gutes Umformergebnis erzielt wird. Reicht diese Abstimmungsmöglichkeit nicht für den jeweiligen Prozess aus, müssen lokale Optimierungen erfolgen. Dies kann im Prototyping oder Kleinserienbereich auch durch Anpassung der Platinengeometrie erfolgen. In Großserienprozessen ist der Mehraufwand für zusätzlichen Schneidoperation sowie die schlechtere Materialausnutzung unerwünscht. Ziehsicken bieten hier eine weitere Möglichkeit der lokalen Anpassung des Materialflusses. Sie werden in der Herstellbarkeitsprüfung mittels der FE-Methoden meist nur grob in ihrer Wirkung ausgelegt. Ihre genaue Position und Geometrie und damit ihre Wirkung wird im Einarbeitungsprozess vom Werkzeugbauer ermittelt. Die im Gussmodell absichtlich zu stark ausgeprägten Sicken werden bis zum gewünschten Umformergebnis nach und nach abgetragen. Ein erneutes Verstärken kann dann nur noch aufwendig per Auftragsschweißung erfolgen. Somit hängt beim Einarbeitungsprozess sehr viel von der Erfahrung des Werkzeugbauers ab. Mit zunehmender Bauteilkomplexität können die Wirkungen der einzelnen Sicken verschwimmen. Eine wie oben beschriebene gezielte Ausstreckung aller Bauteilbereiche würde einen sehr großen Einarbeitungsaufwand bedingen. Eine vorherige FE-Optimierung der Ziehsicken könnte den Aufwand verringern, jedoch nicht die Einarbeitung überflüssig machen. Zusätzlich könnte sie das Ergebnis der Einarbeitung etwas unabhängiger von der Erfahrung des Werkzeugbauers machen oder Varianten aufzeigen, die sonst unerkannt geblieben wären.

Als Grundlage für die Optimierung diene wie bei der Prozessfensterermittlung die Auswertung der Ausdünnung, der plastischen Vergleichsdehnung und des Abstandes zur Grenzformänderungskurve. Die Niederhalterkraft wurde mit ihrem maximalen Wert angenommen (wie vorher ermittelt). Das Werkzeug erhielt eine mit \*Contact\_Drawbead modellierte, umlaufende Ziehsicke aus 11 Segmenten. Die Rückhaltekräfte jedes Segmentes konnte angesteuert werden (Bild 5). Um die Realisierbarkeit der Optimierungsidee prüfen zu können, wurde im Vorfeld ein Rechtecknapf-Werkzeug mit Viertelsymmetrie mit zwei variablen Ziehsicken aufgebaut. Hier zeigte sich schon nach wenigen Runs eine gute Tendenz. Die genutzte Adaptive-Response-Surface-Methode wurde deshalb auch auf das

Kotflügel Modell angewandt. Allerdings zeichneten sich nach 100 Runs noch keine Tendenzen ab. Falls ein Optimum gefunden wurde, war es ein lokales und nicht das absolute Optimum der Antwortfunktion. Besserung versprach hier eine Änderung der Zieldefinition. Zu Beginn wurde eine möglichst hohe, über die Elemente gemittelte, plastische Vergleichsdehnung angestrebt. Ein über die Elemente gemittelter möglichst kleiner Abstand zur FLC war ebenso wenig zielführend. Der Approximationalgorithmus konnte die Zusammenhänge des Problems nicht entsprechend gut abbilden. Das eigentliche Ziel der Optimierung war zwar dem Betrachter der Simulation klar und er erkannte auch den Zusammenhang aus Riss und zu starker Ziehsickenkraft, doch für die Optimierung wurde dieser Zusammenhang aus 11 Variablen und nur einer unabhängigen Antwort nicht erkennbar. Hinzu kam, dass die Information über die Rissposition bei der Ergebnisreduzierung für HyperStudy verloren ging. Eine Verbesserung des Optimierungsprozesses konnte durch eine vereinfachte Zieldefinition erreicht werden. Es sollte die Summe der Ziehsickenrückhaltekräfte maximiert werden. Die Adaptive-Response-Surface-Methode zeigte nach 100 Runs keine zielführende Tendenz. Eine deutlich höhere Anzahl an Runs wurde für ein großes Modell wie den Kotflügel als unpraktikabel angesehen. Eine Berechnungszeit von ca. 14 Tagen sollte nicht überschritten werden. Das Problem der nur lokalen Suche nach dem Optimum konnte nicht behoben werden. Andere Verfahren wie zum Beispiel das der Feasible-Directions erzielten ähnlich schlechte Ergebnisse. Generische Optimierungsansätze konnten bei der Vielzahl der nötigen Runs im Vorfeld ausgeschlossen werden.

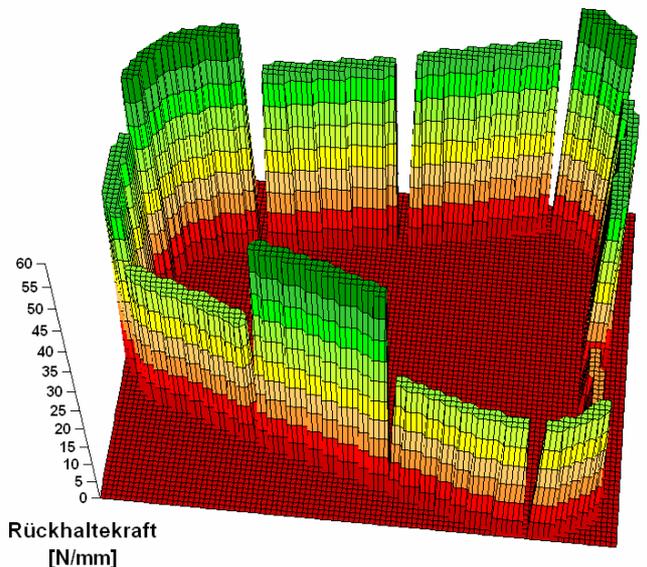


Bild 5: Beispiel für die Verteilung der Rückhaltekräfte

Eine auf das Problem angepasste Trial-and-Error-Strategie sollte dennoch eine automatisierte Ziehsickenoptimierung ermöglichen. Ein Fortran-Programm übernahm die nötige Kommunikation mit HyperStudy. Die Randbedingungen wurden wie oben beschrieben belassen und zusammen mit den Ergebnissen des jeweiligen Runs dem Fortran-Programm übergeben. Die Startkonfiguration der Ziehsicken sollte ein rissfreies Bauteil ermöglichen. Aufbauend auf dieser Information erhöhten sich die Rückhaltekräfte, bis ein Riss auftrat. Anschließend begannen zwei weitere Varianten der automatisierten Erhöhung. Die Art des Vorgehens bedingte zwar ca. 100 Runs, führte aber immer zum Optimum. Durch die dreistufige Vorgehensweise war das am Ende bestehende Optimum auch immer das absolute Optimum des Prozesses.

Bild 6 zeigt links das Ergebnis einer Umformung ohne Ziehsicken. Im oberen Bereich waren einige Bereiche nur minimal verformt (Bild 6, Bereich 1). In Türnähe zeigte der Kotflügel große Bereiche geringer Ausstreckung (Bild 6, Bereich 2). Bei der Umformung mit Ziehsickenparametern ähnlich dem Serienstand zeigten sich Risse im Bereich der Ankonstruktion (Bild 6, Bereich 3). Mit Hilfe der Optimierung wurden Gutteile möglich und der Bereich geringster Umformung konnte weiter reduziert werden (Bild 6, Bereich 4).

Die Umformung des Kotflügels war insgesamt sehr stark durch die Ankonstruktion beeinflusst und somit der Prozess auch weitestgehend vorgegeben. Mit Hilfe des dreistufigen Trial-and-Error-Verfahrens konnten dennoch rissensible Stellen entschärft und wenig verformte Bereiche stärker gestreckt werden. Eine reale Umsetzung des Ergebnisses ist für die Zukunft geplant.

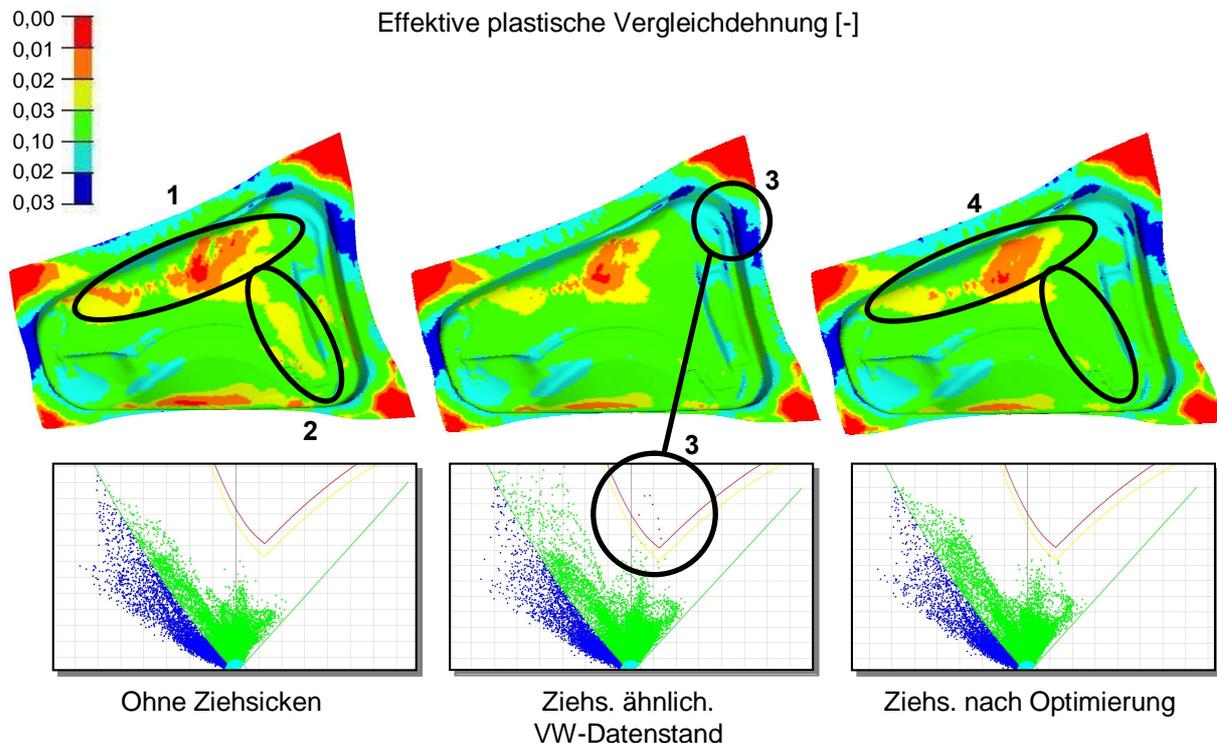


Bild 6: Plastische Vergleichsdehnung des HCT600XD nach der Umformung mit unterschiedlichen Ziehsicken-Rückhaltekräften

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die FE-Analyse kann die Herstellbarkeit eines komplizierten Tiefziehbauteils absichern. Darüber hinaus können mit angemessenem Berechnungsaufwand Aussagen zur Robustheit des Prozesses gegeben werden. Mit Hilfe der vorhandenen Optimierer lassen sich vielerlei Problemstellungen bewältigen. Jedoch kann die Universalität der Algorithmen im Einzelfall zu nicht zufriedenstellenden Ergebnissen führen. Hier lassen sich mit angemessenem Aufwand eigene, maßgeschneiderte Lösungen finden.

Die vorgestellten Verfahren können die Try-Out Phase verkürzen und somit den Bauteilrealisierungsprozess weiter verkürzen bzw. dessen Kosten reduzieren.

Es wurden Prototypen des Golf V Kotflügels aus 0,5mm dünnem HCT600XD realisiert. Sie können das Fahrzeuggewicht um ca. 1kg reduzieren.

## 6 Literatur

- [1] Lorenz, D., Roll, K.: "Thermisch-mechanisch gekoppelte Blechumformsimulation mit LS-Dyna", LS-Dyna Anwenderforum, Ulm, 2006
- [2] Donhauser, C.: "Dynamisches Beulen", Hieronymus-Verlag, 1999
- [3] Heun, S.: "Konventionelle und neuartige Tiefziehstähle im dynamischen Beulversuch", Dissertation, München, 1994
- [4] Hallquist, J.O.: LS-Dyna User's manual, Version 971 LSTC, 2007
- [5] Gerlach, J.: "Sensitivity and robustness analysis for quantification of the influence of material scattering", Forming Technology Forum 2007, Zürich, 2007
- [6] Kösters, R.: "Simulationsgestützte Ermittlung von Prozessparametern für die Blechumformung", Dissertation, Hannover, 1999