

Kriterien zur Bewertung des Mappings von Umform- auf Crashsimulation

Mathias Waedt, Michele D'Ottavio, Thomas Wallmersperger, Bernd Kröplin

Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen,
Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 27, D-70569 Stuttgart, Germany

Klaus Wolf, Peter Post, Jörg-Volker Peetz, Uwe Scholl

Institut für Algorithmen und Wissenschaftliches Rechnen,
Schloß Birlinghoven, D-53754 Sankt Augustin, Germany

Abstract:

Crash-simulations play an important role in automotive companies. From the numerical results, the used materials and the design of the car body panels can be verified and evaluated with respect to the capability to absorb deformation energy.

To simulate the whole design process numerically, there is a strong need to use the results from the stamping for the crash simulation.

In this work, we present criteria and algorithms for the mapping and evaluation of scalar variables – e.g. sheet thickness and plastic deformation. These algorithms – used for the in-plane and the thickness direction – assure an efficient handling of the values.

Finally, numerical examples show the quality of the underlying methods.

Keywords:

Umformsimulation, Crashsimulation, Mapping, Bewertungskriterien, Interpolation in der Ebene, Interpolation in Dickenrichtung, Nachbarschaftssuche

1 Kurzfassung

In der Automobilindustrie spielen Crashsimulationen eine wichtige Rolle. Aus den numerischen Ergebnissen können u.a. die eingesetzten Materialien und das Design der Karosserieteile hinsichtlich der Fähigkeit, Deformationsenergie zu absorbieren, überprüft und bewertet werden. Um den gesamten Fahrzeugfertigungsprozess numerisch zu ermitteln, ist die Verwendung der aus der Umformsimulation gewonnenen Resultate ein grundlegender Schritt.

Moderne Klassen von Materialien, die für den Crasheinsatz sehr vielversprechend sind, wie die Mehrphasenstähle, besitzen Eigenschaften, die im Wesentlichen von der Fertigungshistorie abhängig sind. Deshalb ist eine enge Kopplung von Umform- und Crashsimulation von Nöten.

Allerdings existieren auf Grund der Inkompatibilität zwischen Crash- und Umform-Codes sowie verschiedener Diskretisierungsbereiche und unterschiedlich feiner Vernetzung vielfältige Probleme. Hierbei sind ein geeignetes Übertragungs-(Mapping)-tool sowie ein hochwertiges Bewertungsprogramm unabdingbar.

Zu den Aufgaben, die ein Mappingtool haben kann, zählt ein hochentwickelter Suchalgorithmus, der das Finden entsprechender Punkte in den beiden verschiedenen Netzen vornimmt, sowie ein Interpolationsalgorithmus in Dickenrichtung und in der Ebene.

In dieser Arbeit wird ein Vergleich für skalare Größen, wie z.B. der Blechdicke sowie der plastischen Vergleichsformänderung, vorgenommen. Hierbei liegen die Größen in beiden Netzen entweder Element- oder Knoten bezogen vor. Wichtige Kriterien zur Bewertung der Qualität des Mappings sind ein Vergleich der charakteristischen Werte (wie z.B. Dickenverteilung) in den beiden Netzen sowie ein Vergleich der Gradienten der Werte - was sich durch Sprünge der Größen im Knoten bemerkbar macht.

Einzelne Größen, wie die effektiven Werte der plastischen Vergleichsformänderung, sind veränderlich über der Dicke und müssen somit interpoliert werden. Der Algorithmus zur Interpolation und Bewertung in Dickenrichtung enthält Optimierungsverfahren basierend auf der Methode der kleinsten Fehlerquadrate und verspricht somit eine effiziente Übertragung der einzelnen Größen. Auftretende unphysikalische Werte werden durch zusätzliche Algorithmen beseitigt; dies hat eine iterative Korrektur der übrigen Werte über der Dicke zur Folge.

Anhand repräsentativer Testfälle können auftretende Phänomene sehr gut dargestellt und klassifiziert werden. Eine Darstellung der Qualität des Mappings wird für verschiedene Geometrien mit mehreren Tausend Elementen durchgeführt. Somit werden Bereiche der einzelnen Geometrien detektiert, bei denen eine Verfeinerung des Netzes oder z.B. eine andere Art der Übertragung gewählt werden sollte. Desweiteren lassen sich Kriterien bestimmen, die entscheiden, ob ein Mapping anerkannt oder verworfen wird.

2 Einleitung

In der Automobilindustrie ersetzen und ergänzen heutzutage viele numerische Simulationen die bisher durchgeführten experimentellen Untersuchungen. Im Rahmen des Entwicklungsprozesses von Fahrzeugen spielen Crashsimulationen eine sehr wichtige Rolle. Aus den numerischen Ergebnissen können zum Beispiel die eingesetzten Materialien und das Design der Karosserieteile hinsichtlich der Fähigkeit, Deformationsenergie zu absorbieren, überprüft und bewertet werden. Da großes Bestreben darin besteht, den Einfluss der Fahrzeugeigenschaften numerisch zu ermitteln, ist hierfür die Verwendung der aus der Umformsimulation gewonnenen Resultate ein grundlegender Punkt. Allerdings existieren auf Grund der Inkompatibilität zwischen Crash- und Umform-Codes sowie verschiedener Diskretisierungsbereiche und unterschiedlich feiner Vernetzung vielfältige Probleme. Hierbei sind ein geeignetes Übertragungs-(Mapping)-tool sowie ein hochwertiges Bewertungsprogramm unabdingbar.

3 Motivation; Stand der Forschung

Um den Einfluss der Fahrzeugeigenschaften numerisch zu simulieren, ist eine Verwendung der aus der Umformsimulation gewonnenen Resultate für die Crashsimulation sehr wichtig. Hierbei ist besonders darauf zu achten, dass die Daten einfach weitergegeben und direkt verwendet werden können. Hierin liegt allerdings eine grundlegende Schwierigkeit, da zumeist eine Inkompatibilität zwischen den verwendeten Umform- bzw. Crashcodes vorliegt. Oftmals spielt auch die unterschiedliche Feinheit von Umform- und Crashnetz eine erhebliche Rolle (Im allgemeinen sind die Umformnetze wesentlich feiner als die Crashnetze; darüber hinaus sind zumeist unterschiedliche Geometriebereiche partiell verfeinert).

Bis jetzt wurden nur wenige Testrechnungen durchgeführt, bei denen die Ergebnisse der Umformsimulationen jedoch noch manuell als Eingabedaten für die Crashsimulationen übergeben wurden; diese Rechnungen haben bewiesen, dass die Umform-Crash-Kopplung zu einer signifikanten Qualitätserhöhung der Ergebnisse führt, insbesondere im Falle von Materialien, die eine höhere Festigkeit bei gesteigerter Duktilität aufweisen, wie z.B. mehrphasige Stähle. Durch die Berücksichtigung der effektiven Blechdickenverteilung sowie des Arbeitspunktes der Materialpunkte auf der Fließkurve und des tatsächlichen Verformungs- und Spannungszustandes kann das Endergebnis der Crashsimulation stark beeinflusst werden.

Crashberechnungen inkl. Vorhersage des Versagens von Karosserieteilen sowie eine gezielte Optimierung von Umformteilen hinsichtlich der Crasheigenschaften unter Modifizierung des Umformprozesses und der Prozessparameter gewinnen deshalb zunehmend an Bedeutung [7].

4 Interpolation und Bewertung

Beim Vergleich der einzelnen gemappten Größen erfolgt eine Bewertung der Interpolation. In dieser Arbeit beschränkt sich die Bewertung auf die beiden skalaren Größen

1. Blechdicke und
2. plastische Vergleichsformänderung.

Die Interpolation wird hierbei sowohl in der Ebene als auch in Dickenrichtung vorgenommen.

Zuerst werden die Netze von Umform- und Crashsimulation so in Verbindung gesetzt, dass charakteristische Punkte des einen Netzes auf das jeweils andere Netz abgebildet werden. Danach findet sowohl eine Bewertung des Mappings von Umform- auf Crashnetz als auch eine der Rückabbildung (Crash- auf Umformnetz) statt.

4.1 Interpolation

Die Interpolation geht von einem bilinearen Verlauf aller definierten Größen im Element in der Ebene sowie einem – durch ein Polynom beschreibbaren – charakteristischen Verlauf in der Dicke aus.

4.1.1 Interpolation der plastischen Vergleichsformänderung

Die plastische Vergleichsformänderung wird in jedem Gauß-Punkt als eine Reihe diskreter Werte in der Dicke angegeben: Die Lage dieser Werte hängt von der Methode und von der Anzahl der Stützstellen ab. Der Verlauf der plastischen Vergleichsformänderung wird deshalb in einen Anteil in der Ebene (x,y) und einen in Dickenrichtung z aufgeteilt:

$$\varphi_v(x, y, z) = F_1(x, y) \cdot F_2(z) \quad (1)$$

Der Verlauf in jeder Schicht $z=const.$ wird mittels Interpolationsfunktionen und Knotenwerten beschrieben. Besitzt ein Element mehrere Gauß-Punkte, so ergibt sich in einem beliebigen Punkt innerhalb des Elementes in dieser Schicht der Wert, der aus der Interpolation anhand der Interpolationsfunktion ermittelt werden kann.

Durch eine Wiederholung der obigen Prozedur für alle Schichten in der Dicke kann man die Verteilung in Dickenrichtung der jeweiligen Größe erhalten. In Kapitel 5.2 wird ein alternativer Algorithmus vorgestellt, der ein verbessertes Verhalten aufweisen soll.

4.1.2 Interpolation der Blechdicke

Die Blechdicke wird auf einer definierten Referenzebene angegeben (und ist logischerweise nicht von der Position in Dickenrichtung abhängig). Je nach Wahl der für Umform- bzw. Crashnetz verwendeten Elementformulierung kann sie konstant über das gesamte Element sein oder auch – analog zu den anderen Größen – bilinear über das Element interpoliert werden.

Die Übertragung einer nicht-konstanten Blechdicke von Umform- auf Crashnetz kann nur dann konsistent erfolgen, wenn sie für die Knoten bzw. Integrationspunkte angegeben wird. Bei einer konstanten Elementdicke wird allen Knoten oder Gaußpunkten eine einheitliche Dicke zugewiesen. Hier besteht allerdings die Gefahr, dass ein Knoten von jedem Element, zu dem er gehört, verschiedene Dicken zugewiesen bekommt.

4.2 Bewertung

Bei der Bewertung ist ein grundsätzliches Problem das Finden der korrespondierenden Knoten bzw. Punkte von Umform- und Crashnetz. Hierbei gibt es zwei Realisierungsmöglichkeiten:

1. Das Bewertungstool übernimmt die Nachbarschaftsbeziehungen des Mappingtools und überprüft diese im allgemeinen nicht mehr.
2. oder das Bewertungstool besitzt einen eigenen (vom Mappingtool) unabhängigen Suchalgorithmus.

In dem hier dargestellten Bewertungstool ist bisher noch kein eigenständiger Suchalgorithmus enthalten.

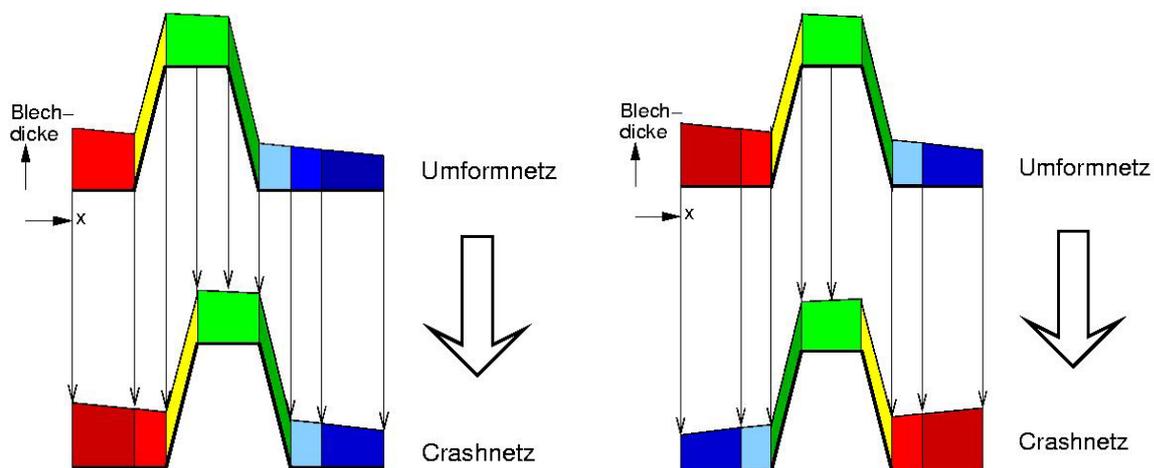


Bild 1: Mögliche Probleme bei der Nachbarschaftssuche

In Bild 1 sind mögliche Probleme bei der Nachbarschaftssuche bei einer einfachen Probe mit Abkantungen dargestellt. Weitere problematische Fälle können auftreten, falls die Netze unterschiedliche Größen haben, unterschiedliche Bereiche darstellen, nur kleine Überlappungen aufweisen oder sogar Löcher haben. In Bild 2 ist die korrekte Zuordnung der Knoten dargestellt.

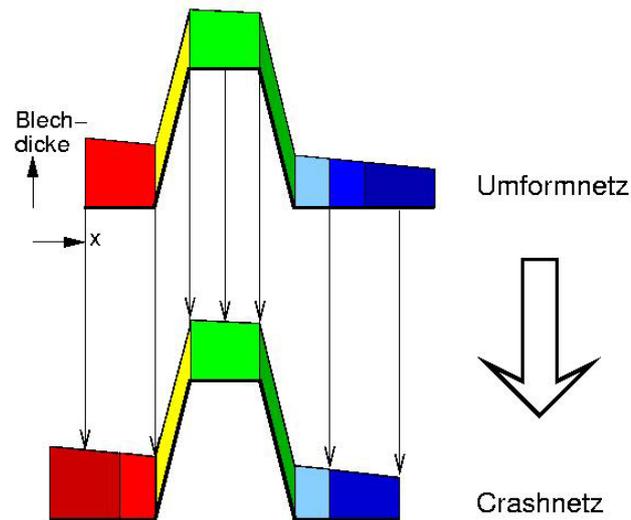


Bild 2: Korrekte Zuordnung der korrespondierenden Knoten

5 Verwendete Algorithmen

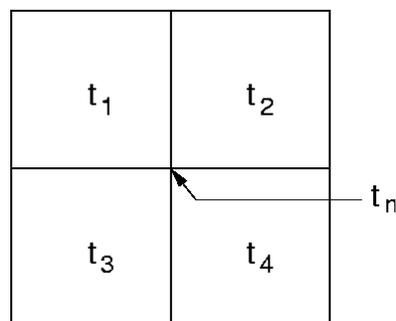
Die Datenübertragung gliedert sich in eine Interpolation in der xy -Ebene sowie in Dicken(z)-Richtung.

5.1 Interpolation in der Ebene

Bei der Interpolation in der Ebene kann im allgemeinen auf Nachbarschaftsbeziehungen zurückgegriffen werden, die das verwendete Mappingtool liefert. Auftretende Schwierigkeiten sind in Kapitel 4.2 und 5.3 dargestellt.

Bei dem Finden zugehöriger Punkte in der Ebene werden oft mittels Normalenvektoren die Durchstoßpunkte durch die Ebene berechnet und dann die zugehörigen Elemente ermittelt. Bei gekrümmten Geometrien werden dann die zugehörigen Größen durch eine bilineare Interpolation ermittelt. Hierbei werden die Diagonalen des Elements und daraus folgend der Normalenvektor als Referenz verwendet.

Das in Kapitel 4 beschriebene Problem, dass ein Knoten von jedem Element, zu dem er gehört, verschiedene Dicken zugewiesen bekommt, kann folgendermaßen angegangen werden:

Bild 3: Mittelung der Blechdicken t_i

Die tatsächliche Dicke kann sich aus einer Mittelung aller Dickenwerte ergeben, vgl. Bild 3:

$$t_n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i \quad (2)$$

Wenn die Blechdicke t_i eines Elementes mit N Knoten immer konstant für ein Finites Element sein soll, kann sie entweder direkt aus dem Mappingalgorithmus kommen oder aus der oben angegebenen Mittelung stammen.

Es ist zu beachten, dass eine einfache Mittelung im Falle eines bilinearen Elements exakt den Wert im Elementmittelpunkt wiedergibt. Falls das Element – mit einem Integrationspunkt - reduziert integriert ist, entspricht dieser Wert der tatsächlichen Dicke im Gauß-Punkt und somit auch der für das gesamte Element.

5.2 Interpolation in Dickenrichtung

Bei der Interpolation in Dickenrichtung soll eine eindimensionale Funktion, die nur an diskreten Stützstellen des Gültigkeitsintervalls bekannt ist, vom Quellnetz auf ein unterschiedlich diskretisiertes Intervall im Zielnetz übertragen werden. Hierbei werden die Funktionswerte der gegebenen Stützstellen auf die neuen Stützstellen interpoliert. Dies läuft folgendermaßen ab:

Die Summe der Funktionswerte multipliziert mit der gegebenen Wichtung, die abhängig vom verwendeten numerischen Integrationsverfahren ist, ergibt eine Fläche F des Quellnetzes. Diese Fläche soll anschließend identisch der zu ermittelnden des Zielnetzes G sein. Bei der Übertragung der plastischen Dehnung bedeutet diese Flächengleichheit, dass eine äquivalente Umformarbeit geleistet wird.

Anschließend wird ein Polynom $(m-1)$ -ten Grades durch die m Stützstellen des Zielnetzes aufgestellt. Durch eine Abstandminimierung der ursprünglichen Funktion mit einem Polynom im Zielnetz auf Basis der Methode der kleinsten Fehlerquadrate werden $m-1$ Gleichungen aufgestellt. Die m -te Gleichung ergibt sich aus der Flächengleichheit. Aus diesem Gleichungssystem lassen sich die m Koeffizienten des Polynoms und somit auch die daraus folgenden Größen auf dem Zielnetz ermitteln.

Anmerkung: Je nach Quadratur-Methode können auch Polygone anstatt Polynome zur Interpolation gewählt werden.

In Bild 5 ist exemplarisch die Übertragung von einer Queldiskretisierung mit fünf Stützwerten auf eine Zieldiskretisierung mit drei diskreten Werten dargestellt.

5.3 Bewertung der Interpolation in der Ebene

In diesem Abschnitt werden zwei grundlegende Kriterien zur Bewertung des Mappings sowie der Netzgüte vorgestellt:

1. Vergleich der Blechdicken in korrespondierenden Elementen
2. Auswertung der Dickensprünge

5.3.1 Bewertung der Sprünge an den Knoten

Die Bewertung der Sprünge an den Knoten beschreibt die Verteilung der Dicken in einem Netz; dies liefert ähnlich dem Kriterium der Spannungssprünge an den Knoten eine Aussage über die Qualität der Diskretisierung. Weist z.B. das Crashnetz wesentlich größere Unstetigkeiten in der Dickenverteilung auf, als das Umformnetz, so sind eventuell bei der Crashrechnung Probleme zu erwarten.

5.3.2 Vergleich der Dickenverteilungen in beiden Netzen

Eine Bewertung des Mappings - d.h. die Aussage über die Qualität der Datenübertragung - erfolgt, wenn die Blechdicken der (charakteristischen) Punkte eines Netzes mit den Werten der korrespondierenden Punkte auf dem anderen Netz verglichen werden. Hierfür ist es somit notwendig den zugehörigen Punkt jeweils von Umform- auf Crashnetz und umgekehrt zu finden, vgl. Bild 4.

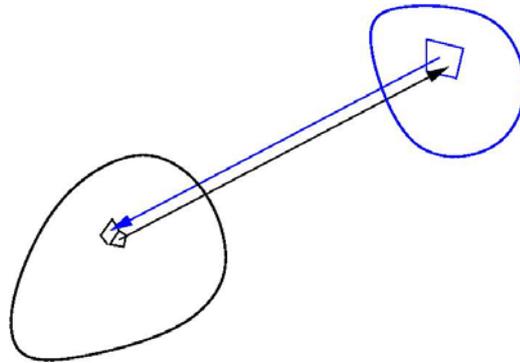


Bild 4: Bestimmung der zugehörigen Elemente von Umform- und Crashnetz

Es ist somit eine ausgeklügelte Strategie zum Finden des jeweiligen Nachbarschaftspunktes erforderlich. Dies kann z.B. durch mehrere charakteristische Punkte und anschließend durch Interpolation erfolgen oder durch einen Referenzpunkt mit zugehöriger Verschiebungs-/Drehmatrix zwischen Umform- und Crashnetz zur Bestimmung aller weiteren Nachbarschaftsbeziehungen (vgl. auch Bild 1 und 2).

5.4 Bewertung der Interpolation in der Dicke

Basierend auf dem vorgestellten Interpolationsverfahren werden zwei Kriterien verwendet, die die Datenübertragung der plastischen Vergleichsformänderung bewerten sollen: Das erste Kriterium quantifiziert die relative Abweichung zwischen den übertragenen Werten; das zweite Kriterium bewertet die Fläche, die von den resultierenden Verteilungen in der Dicke der plastischen Vergleichsformänderung der beiden Netze eingeschlossen ist.

Bei einer optimalen Interpolation sind beide Kriterien erfüllt. Im Normalfall sollte bei unterschiedlich feinen Netzen der Fehler bezogen auf die Stützstellen des groben Netzes praktisch Null sein, wenn dessen Stützstellen alle im feinen Netz enthalten sind.

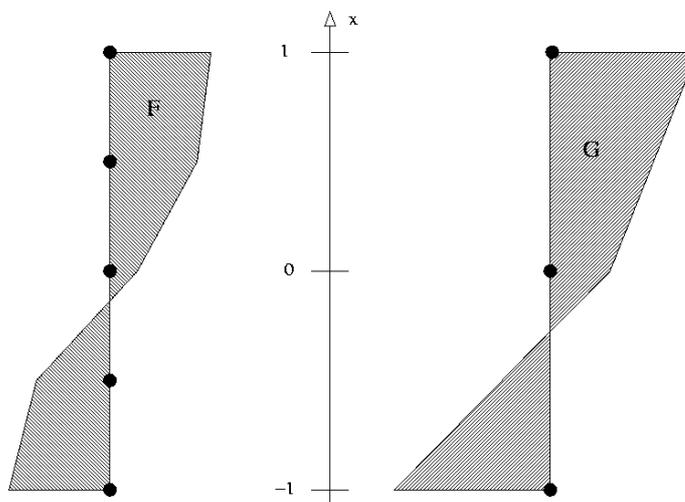


Bild 5: Interpolation von einer Quaddediskretisierung (links) mit 5 Stützwerten auf eine Zieldiskretisierung mit 3 diskreten Werten; die numerische Integration erfolgt jeweils über die Trapezregel.

6 Numerische Beispiele

Im folgenden Beispiel, das im Rahmen des FAT Arbeitskreises 27 „Crashsimulation von umgeformten Bauteilen“ zur Verfügung gestellt wurde, soll die Bewertung der Blechdicke jeweils im Umform- und Crashnetz vorgenommen werden.

In Bild 6 ist die Dickenverteilung auf der gegebenen Geometrie im Umformnetz dargestellt. Um den Verlauf der Blechdicke im relevanten Bereich zwischen 0.7 und 0.8 genauer zu verdeutlichen, ist das Umformnetz noch einmal in Bild 7 (links) dargestellt.

In Bild 7 (rechts) ist die gemappte Dickenverteilung auf der Crashgeometrie dargestellt. Man erkennt die Geometrieabweichungen, die durch Nachbearbeiten des Bauteils entstanden sind (Entfernung der Haltungsflansche (in Bild 7 (links) rot dargestellt), Ausstanzung der Löcher).

LS-DYNA keyword deck by LS-PRE
Contours of shell thickness
min=0.27100, at elem= 103515
max=1.20000, at elem= 100027



Bild 6: Blechdicke im Umformnetz
(der Ausschnitt für die Detailuntersuchung ist durch einen Kreis dargestellt)

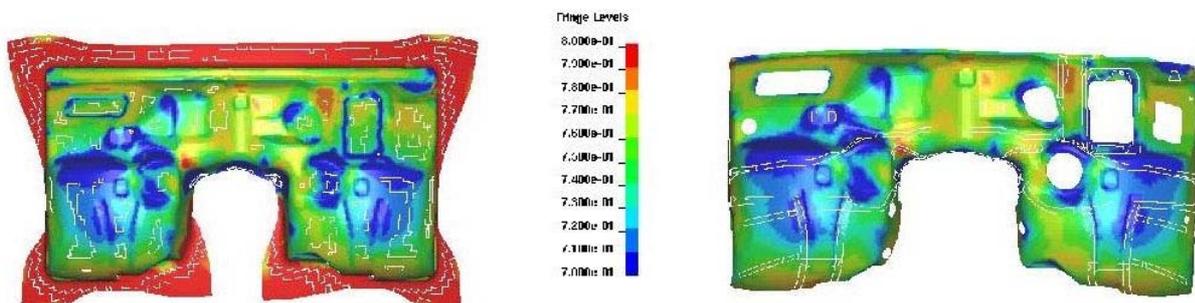
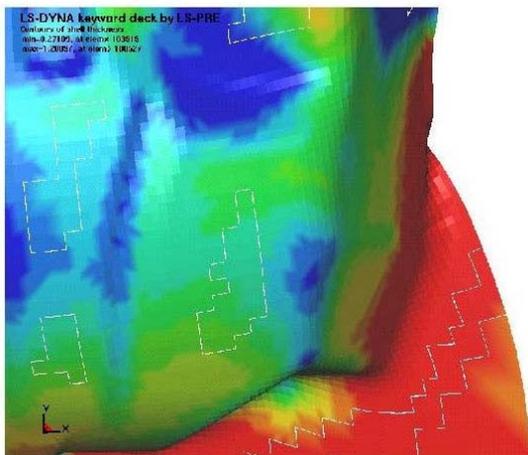


Bild 7: Blechdicke im Umformnetz (links); im Crashnetz (rechts)
[Skala 0.7 bis 0.8]

LS-DYNA keyword deck by LS-PRE
 Contours of y-stress
 max (pt. value)
 min=0, at elam2 351129
 max=1.085e-06, at elam2 424818



Bild 8: Dickendifferenz von Crash- auf Umformnetz



LS-DYNA keyword deck by LS-PRE

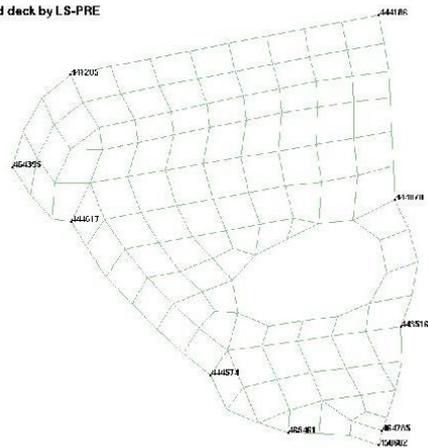


Bild 9: Bauteilausschnitt im Umformnetz (links) und Diskretisierung im Crashnetz (rechts; gedreht dargestellt)

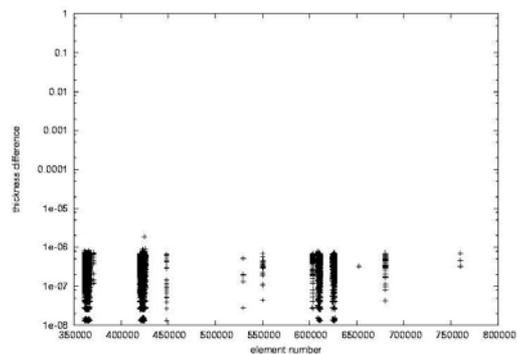
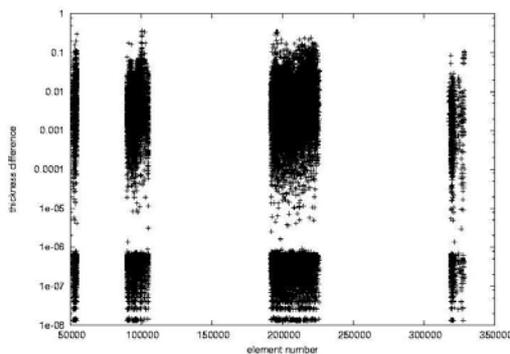


Bild 10: links: Vergleich der Dickendifferenz Umformnetz nach Crashnetz
 rechts: Vergleich der Dickendifferenz Crashnetz nach Umformnetz über Elementnummer aufgetragen

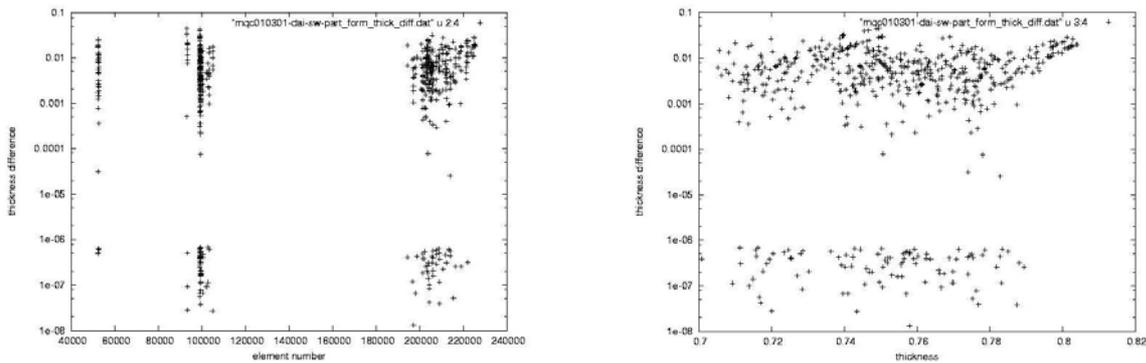


Bild 11: Vergleich der Dickendifferenz des Bauteilausschnitts; Vergleich von Umformnetz nach Crashnetz; links: aufgetragen über Elementnummer; rechts aufgetragen über Dicke

Stellt man die Dickendifferenz zwischen Umform- und Crashnetz ausgehend vom Crashnetz dar, ergibt sich das in Bild 8 dargestellte Verhalten. Die Dickendifferenz liegt zwischen 0 und $2 \cdot 10^{-6}$; in den Bereichen der Löcher ist die Dickendifferenz nicht aufgetragen, da hier keine Nachbarschaftsbeziehungen gefunden wurden.

Ein Vergleich der Dickendifferenz von Umformnetz nach Crashnetz und von Crashnetz nach Umformnetz (über die Elementnummer) ist in Bild 10 aufgetragen. Man erkennt, dass der Fehler von Umform auf Crash wesentlich größer ist als in die umgekehrte Richtung. Dies rührt daher, dass das ursprüngliche Mapping von Umform- auf Crashnetz durchgeführt wurde und somit bei der Nachbarschaftssuche der Punkt im Umformnetz gefunden wird, von dem praktisch eine exakte Abbildung erfolgt ist.

Zur Verdeutlichung dieses Phänomens wurde ein Bauteilausschnitt (vgl. Bild 9) der obigen Geometrie für die detailliertere Untersuchung verwendet. Die Lage des Ausschnitts im Umformnetz ist durch einen Kreis in Bild 6 dargestellt. Die Diskretisierung im Crashnetz ist in Bild 9 (rechts) dargestellt. Der Ausschnitt wurde gewählt, da im Crashnetz ein Loch auftritt und somit die Nachbarschaftsfindung und Randeefekte eine Rolle spielen können.

Für einen Vergleich des Mappings von Umform- auf Crashnetz – d.h. bei der Bewertung, bei der die größeren Fehler auftreten – ist in Bild 11 ein Vergleich der Dickendifferenz aufgetragen. Ein großer Anteil der Punkte befindet sich wiederum im Bereich kleiner als 10^{-6} . Hier hat also eine sehr gute Rückübertragung stattgefunden. Für eine sehr große Anzahl der Punkte liegt jedoch ein wesentlich größerer Fehler vor. Dies beruht darauf, dass bei der Rückabbildung der Punkt aus dem Umformnetz einem anderen Element im Crashnetz zugeordnet wird als bei der Übertragung; und somit die Dicke dort geringfügig anders ist. Dieses Problem ist noch einmal in Bild 4 verdeutlicht.

7 Zusammenfassung, Ausblick

Crashsimulationen spielen in der Automobilindustrie eine nicht mehr wegzudenkende Rolle. Um die Größendaten der Umformung möglichst genau auf das Crashnetz zu mappen sind ausgeklügelte Algorithmen von Nöten. Allerdings existieren auf Grund der Inkompatibilität zwischen Crash- und Umform-Codes und unterschiedlich feiner Vernetzung vielfältige Probleme.

In dieser Arbeit wurden Kriterien zur Bewertung des Mappings von Umform- auf Crashsimulation sowie geeignete Interpolationsalgorithmen dargestellt. Die Übertragung wurde getrennt für die Ebene als auch in Dickenrichtung dargestellt. Der Algorithmus zur Interpolation und Bewertung in Dickenrichtung basiert auf der Methode der kleinsten Fehlerquadrate, was eine hohe Genauigkeit und Stabilität ermöglicht.

Repräsentative Testfälle haben die auftretenden Phänomene sehr gut dargestellt und klassifiziert. Eine Darstellung der Qualität des Mappings wurde für verschiedene Geometrien mit mehreren

Tausend Elementen durchgeführt. Somit konnten Bereiche der einzelnen Geometrien detektiert werden, bei denen eine Verfeinerung des Netzes oder z.B. eine andere Art der Übertragung gewählt werden sollte.

8 Literatur

- [1] Lanzerath, H., Schilling, R., Ghouati, O.: „Crashsimulation von Umformdaten.“ CADFEM User`s Meeting, Friedrichshafen, September 2000.
- [2] Giebeler, W.R., Pohler, H., Schilling, R., Schriever, T.: „Passive Sicherheit des Ford Focus“, Der neue Ford Focus, Sonderausgabe ATZ/MTZ, Januar 1999.
- [3] D'Ottavio, M., Waedt, M., Wallmersperger, T., Kröplin, B.: „Theoretische Grundlagen für die Bewertungskriterien“, ISD-Bericht, Dezember 2003
- [4] Lübbling, C.: „Zur Stabilität von gestaffelten Finite-Elemente-Berechnungen“, Dissertation, Universität Stuttgart, 1997
- [5] Peetz, J.V., Post, P., Scholl, U., Wang, Y., Wolf, K., D'Ottavio, M., Kröplin, B., Waedt, M., Mitglieder des VDA/FAT AK27 AG „Crashsimulation von umgeformten Karosserieteilen“: „Verbesserung der Crashvorhersage von Karosseriebauteilen durch Einbeziehung von Ergebnissen aus der Umformsimulation“, Symposium „Simulation in der Produkt- und Prozessentwicklung“, Bremen, 5-7 November 2003, Fraunhofer IRB Verlag, ISBN 3-8167-6454-1
- [6] Schilling, R., Paas, M., Lanzerath, H., Wesemann, J.: „Numerische Analysen zum Einsatz neuer Werkstoffe in der passiven Sicherheit - Numerical Analysis of New Material Applications for Passive Safety“, VDI Berichte Nr. 1559, 299-324, 2000
- [7] Forschungsantrag von Pallas, FhG-SCAI und ISD an VDA, AIF, FAT „Verbesserung der Prognosefähigkeit der Crashsimulation für Karosseriekomponenten aus höherfesten Mehrphasenstählen durch Berücksichtigung von Ergebnissen vorangestellter Umformsimulationen“, 2001

9 Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen der Untersuchungen des Projektes „Verbesserung der Prognosefähigkeit der Crashsimulation für Karosseriekomponenten aus höherfesten Mehrphasenstählen durch Berücksichtigung von Ergebnissen vorangestellter Umformsimulationen“ des FAT Arbeitskreises 27. Die Veröffentlichung erfolgt unter Mithilfe und freundlicher Genehmigung der Mitglieder des FAT AK 27.

Im Rahmen dieses Projektes wird noch ein ausführlicher Bericht in der FAT Schriftenreihe publiziert.