

Weiterentwicklung der Umformsimulation für Stahlwerkstoffe – Konsequenzen für den Anwender

Jörg Gerlach, Lutz Kessler, Hartwig Rösen

ThyssenKrupp Steel AG, Duisburg, Germany

Abstract:

Sheet material development for automotive applications led to new steel concepts and grades during the last two decades. Especially new high strength steel grades combine the needs of strength, ductility and formability based on a special micro-structure. The often new combination of different hardening mechanism exerts influence on the way of modeling, interpreting and simulating these kinds of steel grades in industrial applications. Furthermore the expectation for simulation prediction accuracy and statements is rising. Driven by these developments the actual questions discussed are the kind of yield locus to use, how the material hardening can be determined, which experiments are needed and a strategy for effectively prediction of material failure not covered by forming limit diagrams. Therefore each company or user has to find a compromise of selecting the necessary modeling options out of a big variety of scientific possibilities and the expense to calibrate or measure the necessary input values to define a robust simulation process. To do this a deeper understanding of material behavior and the interactions in-between the different modeling options is necessary. Some topics for possible next steps in forming simulations are discussed.

Keywords:

FEM, modeling, failure prediction, process robustness, material data

1 Einleitung

Die Umformsimulation mit der FEM hat in den vergangenen Jahren stark an Bedeutung für die Auslegung und Gestaltung von Ziehwerkzeugen und Operationsfolgen gewonnen. Parallel zu dieser Entwicklung hat die Stahlindustrie für die Unterstützung des Leichtbaus in der automobilen Anwendung neue höher- und höchstfeste Güten für die Kaltumformung entwickelt [7]. Obwohl inzwischen mit der Anwendung der FEM sehr häufig zufriedenstellende Ergebnisse bei der Machbarkeitsanalyse erzielt werden, besteht ein ständiger Bedarf, die Methoden der Anwendung weiterzuentwickeln, um optimale Aussagen treffen zu können. Dies wird auch dadurch bedingt, dass die Erwartungen an die Umformsimulation stetig steigen. Es zeichnet sich ab, dass eine reine Verwendung der Materialmodellierung von Hill '48 in Kombination mit Daten aus dem Zugversuch und der Grenzformänderungskurve in naher Zukunft nicht mehr für alle Werkstoffe ausreichend sein wird. Ausgehend von diesen Tendenzen werden sowohl von Universitäten, als auch von Instituten und Firmen neue Systematiken und Methoden angeboten, welche ein optimaleres, robusteres Simulationsergebnis erzielen sollen. Hierbei ist festzustellen, dass die angebotenen Lösungen oftmals Detailverbesserungen bewirken sollen und immer im Zusammenhang mit der gesamten Umgebung für die Simulation gesehen werden müssen. Der Anwender hat demzufolge die Aufgabe und Verantwortung, ausgehend von der aktuellen Fragestellung an das Simulationsergebnis, die notwendigen Softwaremodule zu identifizieren, deren Einsatz zu validieren und die Parameter dafür zu bestimmen. Dieser Prozess wird in der Industrie zwangsweise durch wirtschaftliche Rahmenbedingungen beeinflusst.

2 Ausgewählte aktuelle Entwicklungen

Zahlreiche aktuelle Entwicklungen im Bereich der Software und Werkstoffe stellen den Anwender vor die stetige Herausforderung, seine Prozesse an die notwendigen Gegebenheiten anzupassen. Im Folgenden wird nur kurz auf die Trends eingegangen.

2.1 Werkstoffentwicklung

In den vergangenen Jahren wurden viele neue Werkstoffkonzepte für automobiler Anwendungen eingeführt. In den verschiedenen Werkstoffgruppen wie z.B. den höchfesten IF-Stählen, den Dualphasenstählen, den Restaustenitstählen (TRIP) und Complexphasenstählen wird konsequent an der Verbesserung der Werkstoffeigenschaften gearbeitet. Die Abdeckung der Festigkeiten von 300 MPa bis ca. 1400 MPa ist nur durch die gezielte Nutzung unterschiedlicher Verfestigungsmechanismen möglich (Bild 1). Hierdurch bedingt werden auch im Bereich der Werkstoffmodellierung für die Umformsimulation weitere Anpassungen bei den Modellen notwendig werden.

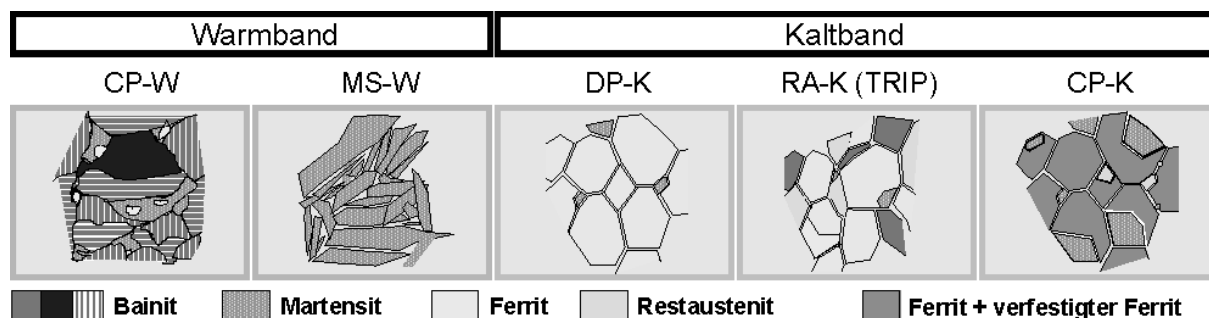


Bild 1: Gefügestrukturen von Stahlwerkstoffen

2.2 Modellbausteine für die Umformsimulation

Zur Beschreibung der oben genannten Werkstoffe reichen die konventionellen Methoden oftmals nicht mehr aus, um gesicherte Aussagen treffen zu können. Dies speziell auch vor dem Hintergrund der Kopplung von Umform- und Crashsimulation für die ganzheitliche Bewertung des Bauteilverhaltens in der Gebrauchskette. Deshalb werden zahlreiche neue Ansätze in den Themengebieten:

- Verfestigungsverhalten,
- Versagensprognose und
- Robustheitsbewertung

wissenschaftlich untersucht, modelliert und publiziert. Da diese Entwicklungen zumeist einen universitären Ursprung haben und anschließend stichprobenartig von der Industrie untersucht und adaptiert werden, gibt es derzeit keine Komplettlösungen für die zukünftige Simulation von Stahlwerkstoffen. Vielmehr steht der Anwender für die Lösung einer Fragestellung oftmals drei bis vier möglichen Lösungswegen gegenüber. Unter Berücksichtigung der notwendigen Eingabeparameter, des erhöhten Aufwands für die Simulationsdurchführung und -auswertung sowie der Kenntnis der modelltheoretischen Hintergründe ist die Auswahl des besten Kompromisses oftmals schwierig und verlangt sehr aufwändige Detailarbeiten.

2.3 Materialdatenermittlung

Nahezu kein neues Modell im Bereich der Verfestigungsbeschreibung oder der Versagensprognose kann mit den herkömmlichen (standardisierten) Werkstoffkennwerten für die Umformsimulation genutzt werden. Die Steigerung der Modellflexibilität durch neue Parameter und Freiheitsgrade bewirkt auch einen stark ansteigenden Bedarf an Messmethoden, um diese Parameter kostengünstig, sicher und zuverlässig bestimmen zu können. Dabei ist festzustellen, dass durch die veränderte Mikrostruktur der neuen Stahlwerkstoffe auch Konsequenzen für die Durchführung von Werkstoffprüfungen entstehen. Ein Beispiel hierfür ist unter anderem in [3] anhand der Kalibrierung von Fließortmodellen über unterschiedliche Experimente gegeben. Zusätzlich ist speziell im Bereich der Versagensmodellierung, z.B. des Scherbruches, zu beobachten, dass die existierenden Modelle und deren optimaler Abgleich nicht mehr die gleichen Eingangsdaten erfordern und jeweils gezielt entwickelte Sonderprüfungen benötigten. Diese Sonderprüfungen sind jedoch nicht weltweit verfügbar und entbehren jeder Standardisierung.

3 Anpassung der Modelle an die Problemstellungen

Als Konsequenz aus den oben angeführten Punkten ergibt sich für den Simulationsanwender, die für ihn zielführenden Modelle und Methoden zu identifizieren, qualitativ und wirtschaftlich zu bewerten und anschließend im jeweiligen Bedarfsfall anzuwenden. Durch die zahlreichen ineinander greifenden und miteinander verknüpften Bausteine ist dies jedoch ein sehr komplexer Prozess, der auch im Hinblick auf möglicherweise auftretende Fehler bewertet werden muss. Die folgenden Beispiele sollen die Einflussfaktoren auf eine erfolgreiche Modellierung beleuchten.

3.1 Rückfederungssimulation

Die Maßhaltigkeit von Bauteilen bei der Fügeoperation zu Modulen ist ein wesentlicher Punkt bei der Auslegung von Ziehanlagen und Umformoperationsfolgen. Der Prozess muss so robust sein, dass er die prozessseitig und werkstoffseitig auftretenden Schwankungen kompensieren kann. Durch die unterschiedlichen Festigkeiten der Werkstoffe und die damit einhergehenden verschiedenen Verfestigungsmechanismen kann ein werkstoffspezifisches Rücksprungverhalten festgestellt werden. Ziel der Simulation ist es deshalb, Ziehanlagen so zu gestalten, dass der Rücksprung in die vorgesehene Bauteilgeometrie erfolgt und zudem robust auf die auftretenden Prozessschwankungen reagiert.

Besteht der Wunsch, das Rücksprungverhalten eines Bauteiles im Vorhinein über die Simulation zu bewerten und eventuell dieses Verhalten schon in der Werkzeugkonstruktion zu berücksichtigen, so bedarf es einer exakten Abbildung der realen Welt. Üblicherweise werden an den Messstellen Formtoleranzen von ca. 0,5 mm vorgegeben. Theoretisch müsste die Simulation deshalb die folgenden Punkte für die Prognose der Rückfederung optimal berücksichtigen:

- Reibung und Prozesskräfte (Rückhalterkräfte)
- Werkzeuggeometrie (Radien, Kontaktbereiche)
- Materialverhalten (E-Modul, Lastwechselverhalten)

Da viele Bereiche eines Ziehteils entweder über den Matrizenradius einlaufen oder aber über den Stempelradius abgestreckt werden erfährt das Material lokal eine Wechselbeanspruchung, die je nach

Orientierung zum Radius eine Zug-Druck oder eine Druck-Zug-Kombination sein kann. Üblicherweise zeigen Stahlwerkstoffe bei einer solchen Belastung den so genannten Bauschinger Effekt (Bild 2). Nach einer Vorbelastung plastifiziert der Werkstoff zu einem früheren Zeitpunkt, als dies bei einer isotropen Modellierung prognostiziert würde. Eine Auswertung der Druckfließgrenze $R_{p0,2}$ nach einer Vorbelastung von ca. 10% Dehnung für unterschiedliche Werkstoffe verdeutlicht, dass es sich hierbei um einen werkstoffspezifischen Wert handelt. Insbesondere die neuen, höherfesten Mehrphasenstähle zeigen einen stärker ausgeprägten Bauschinger Effekt. Die einfachste Methode dieses Verhalten in der Simulation zu berücksichtigen, wäre die Nutzung der isotropen – linear kinematischen Verfestigung nach Prager [8]. Seit seinem Vorschlag ist eine Vielzahl von Ansätzen zur Modellierung der kinematischen Verfestigung veröffentlicht worden. Ein Beispiel für die erzielbare Güte der Approximation des realen Werkstoffverhaltens ist die Verwendung des Modells nach Yoshida [9]. Durch diese komplizierteren Modelle kann das Verhalten physikalisch besser abgebildet werden, allerdings sind auch wesentlich aufwändigere Versuche für die Bestimmung der werkstoffspezifischen Modellparameter und komplexere Datenaufbereitungen notwendig. Diese liegen heute nur sporadisch vor und sind in keiner Weise statistisch abgesichert.

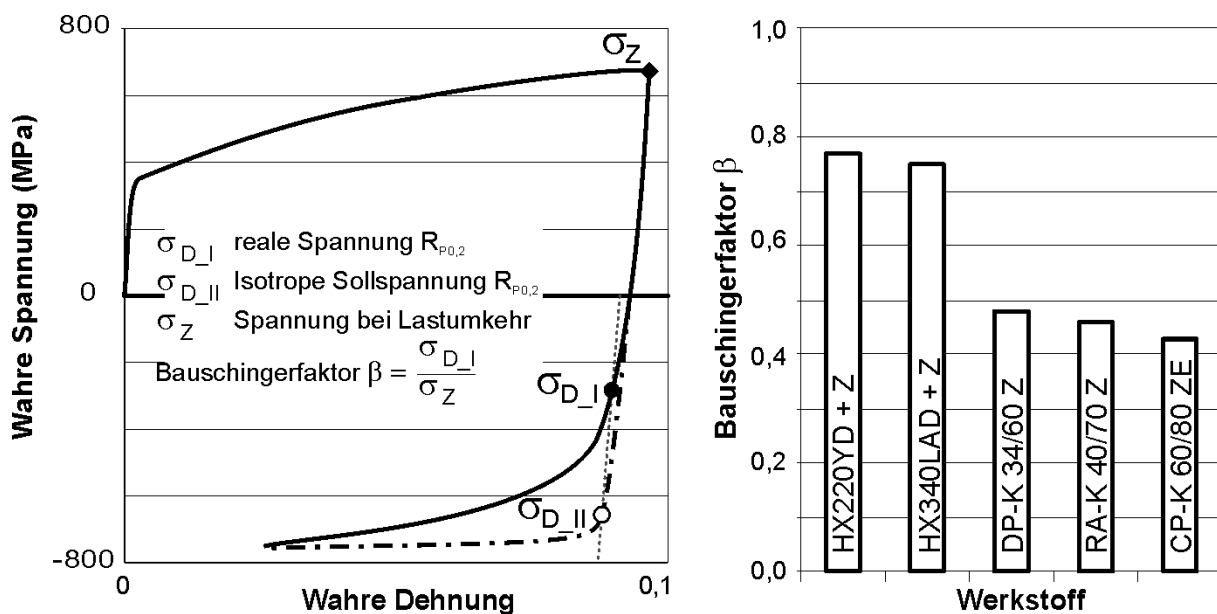


Bild 2: Bauschingerfaktor mit Prüfdehnung $R_{p0,2}$ für unterschiedliche Werkstoffe bei 10% Vordehnung (CP-K 60/80 nur 7% Vordehnung)

Neben den oben beschriebenen physikalisch geometrischen Größen muss jedoch auch bedacht werden, dass jede verwendete Simulationssoftware mit anderen numerischen Methoden und Implementierungen (Elemente, Kontakte, Stoffgesetz) arbeitet. In Bild 3 a) ist das Rücksprungverhalten eines DP-K 34/60 am Beispiel eines Hutprofils unter Annahme einer isotropen Verfestigungsbeschreibung gezeigt. Alle drei angewendeten Programme wurden im Hinblick auf die anzusetzende Reibung anhand von drei aufgenommenen Messgrößen kalibriert:

- Flanscheinzug
- Formänderung in der Zarge (Ausstreckung)
- Stempelkraft

Für jedes der Programme konnte ein zufriedenstellender Abgleich gefunden werden, der zumindest zwei der genannten Kriterien erfüllte. Die Auswertung des Rücksprungverhaltens für den Radius 4 mm zeigt jedoch, dass mit der einfachen Modellierung drei unterschiedliche Ergebnisse erzielt werden. Zwei Programme prognostizieren das Rücksprungverhalten mit dem einfachen Modell gut und ein Programm zeigt eine größere Abweichung. Wird nun das physikalisch „korrektere“ Verfestigungsmodell nach Yoshida auf den Fall mit Programm A angewendet (Bild 4), so tritt auch hier eine Verbesserung der Rücksprungprognose auf (Bild 3 b)). Als Ergebnis kann das Experiment mit zwei Programmen unter einfachen Annahmen und mit einem Programm mit komplexeren Modellen

prognostiziert werden. Somit ergibt sich die aus der Sicht eines Werkstoffherstellers unbefriedigende Interpretation, dass das Umformergebnis (Rückfederung) für einen identischen Werkstoff in unterschiedlicher Software erst mit unterschiedlichen Materialmodellen optimal beschrieben werden kann. Dies führt zu der Frage: Ist eine optimale Werkstoffmodellierung unabhängig von der angewendeten Software überhaupt möglich?

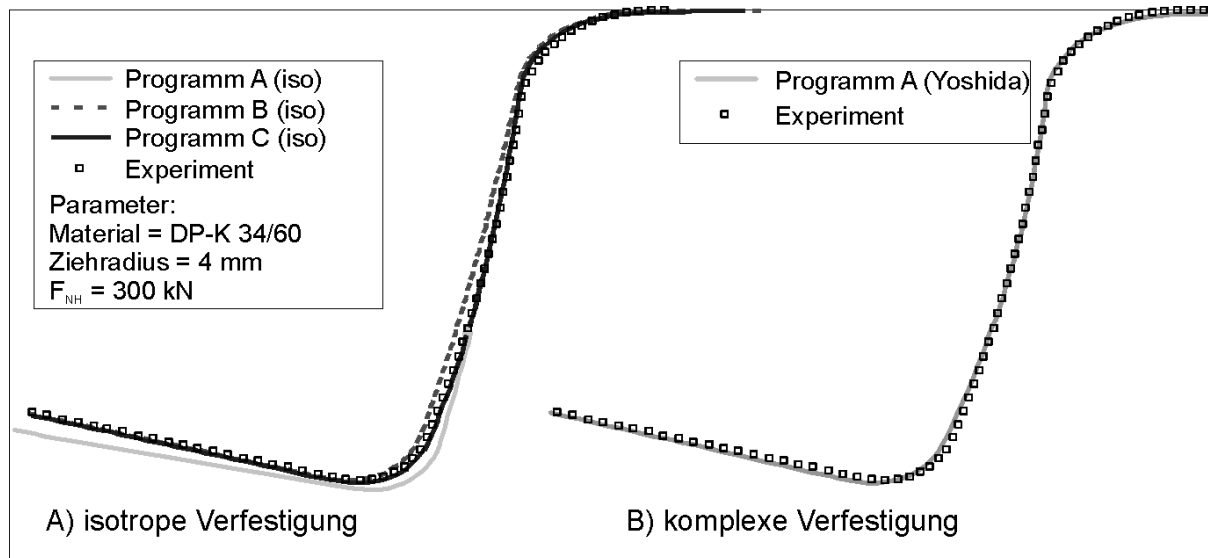


Bild 3: Simulation der Rückfederung für ein Hutprofil a) isotrope Modellierung, b) Yoshida-Modell

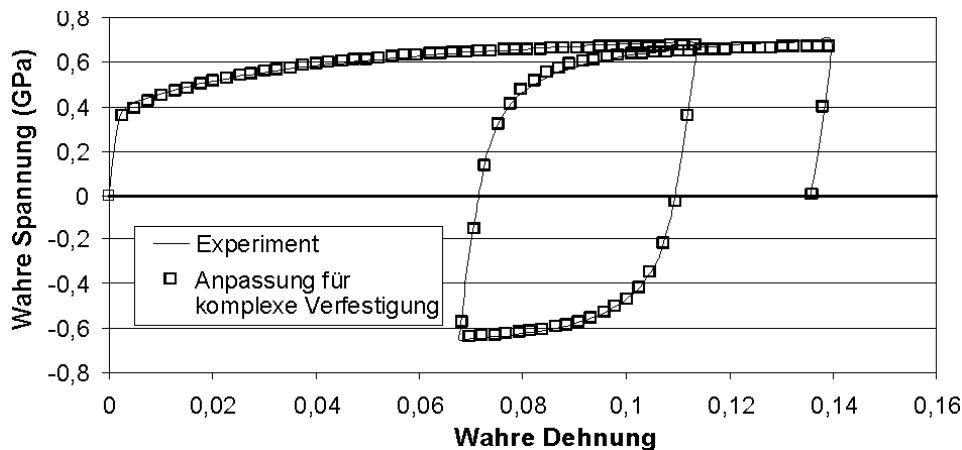


Bild 4: Werkstoffabgleich für die Rückfederungssimulation anhand von Zug-Druck-Versuchen für das Yoshida-Modell

Als Konsequenz dieser einfachen Untersuchung zur Rückfederung zeigt sich, dass nicht zwangswise eine komplexe Modellierung für realitätsnahe Aussagen genutzt werden muss, es jedoch Programme gibt, in denen die Verwendung der physikalischen Modellierung für die korrekte Vorhersage des Rückfederungsverhaltens bei gewissen Geometrien notwendig erscheint. Der Anwender steht deshalb vor der Herausforderung, die Modellierung in Abhängigkeit des Programms und der gewünschten Aussage zu gestalten. Dabei ist zu beachten, dass immer komplexere Modelle die Ergebnisse nicht zwingend verbessern müssen (den Aufwand aber beträchtlich steigern) und dass eine einfache Übertragung der Werkstoffkarten aus einem Programm in eine andere Softwareumgebung auch die Ergebnisse beeinflussen kann. Dementsprechend hat die optimale Modellierung des Werkstoffes unter Berücksichtigung des verwendeten Programms zu erfolgen.

3.2 Versagensprognose

Die veränderten Mikrostrukturen der Werkstoffe und das gezielt eingestellte Verfestigungsverhalten führt konsequenterweise auch dazu, dass die Art der lokalen Werkstoffüberbeanspruchung interpretiert werden muss. Reichte in den vergangenen Jahren oftmals die Bewertung der Ausdünnung oder der Vergleich zur Grenzformänderungskurve aus, so erscheint heute die Nutzung weiterer Versagenskriterien für höherfeste Werkstoffe sinnvoll zu sein. Festgestellte Verarbeitungsfehler in Folge einer unangepassten Prozessauslegung sind exemplarisch in Bild 5 dargestellt und können sowohl über die gesamte Blechdicke als auch nur in Oberflächenbereichen auftreten. In jedem Fall sind diese Fehler jedoch nicht durch die Anwendung der Grenzformänderungskurve alleine erklärbar, da sie in Bereichen auftreten, in denen dieses Versagenskriterium keine Gültigkeit besitzt. Dementsprechend bedarf es Ansätzen, diese Gefahrenstellen frühzeitig in der virtuellen Prozessauslegung zu erkennen. Die gängigen Vorschläge zur Ermittlung des Versagensverhaltens für die Blechumformung in Kombination mit der Grenzformänderungskurve sind:

- Modelle mit Porenbildungsentwicklung (z.B. Gurson)
- Modelle/Methoden mit Berücksichtigung der Umformhistorie
- Grenzspannungskonzepte analog zur FLC
- Scherbruchkriterien
- Duktile Trennbruchkriterien

Beim Auftreten von nichtlinearen Formänderungspfaden kann das Versagen des Werkstoffes in Abhängigkeit ganz bestimmter Pfade sowohl unterhalb wie auch oberhalb der ursprünglichen FLC auftreten. Mit schnellen Methoden kann eine erste Abschätzung der kritischen Bereiche erkannt bzw. das Auftreten des Versagens analysiert werden. Weitere gekoppelte Berechnungen können mit aufwendigeren Methoden diese Aussagen detaillieren. Eine dieser Methode basiert auf den so genannten Grenzspannungskurven (FLSC). Hierbei ist jedoch vom Anwender zu beachten, dass die Grenzspannungskurve direkt an die verwendete Werkstoffbeschreibung (Extrapolation und Fließort) gekoppelt ist (Bild 5). Dementsprechend müssen die Daten Werkstoffbeschreibung und Versagensbewertungskriterium immer konsistent verwendet werden.

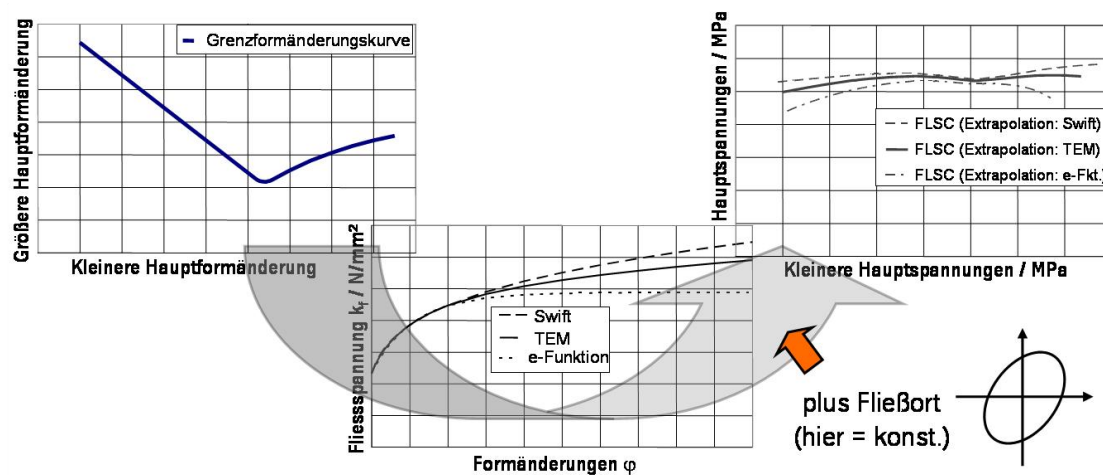


Bild 5: Einfluss der Fließkurvenextrapolation auf die Konvertierung der Grenzformänderungskurve in eine Grenzspannungskurve

Bei einer Bewertung nach dieser Methode können unter Umständen programmspezifische Besonderheiten den Aufwand der Analyse erhöhen bzw. bei vergleichenden Analysen mit anderen Methoden nicht in jedem Fall übereinstimmende Ergebnisse erzielt werden. Ein Beispiel hierfür ist in Bild 6 dargestellt. Hier wurden die Bewertungskriterien FLC und FLSC parallel auf die Umformsimulation eines Napfes angewendet. Es wird deutlich, dass die FLSC auch die Zarge des Napfes als kritisch bewertet. Bei der Anwendung auf komplexere Bauteile muss deshalb derzeit noch festgestellt werden, dass die Analyse der Grenzspannungen durch numerische Schwankungen einem fehlenden Gefühl für Abstände zu dieser Kurve und die Prognose von mitunter auch unkritischen Bauteilstellen als gefährdete Bereiche die zielführende Auswertung und Interpretation noch stark einschränken.

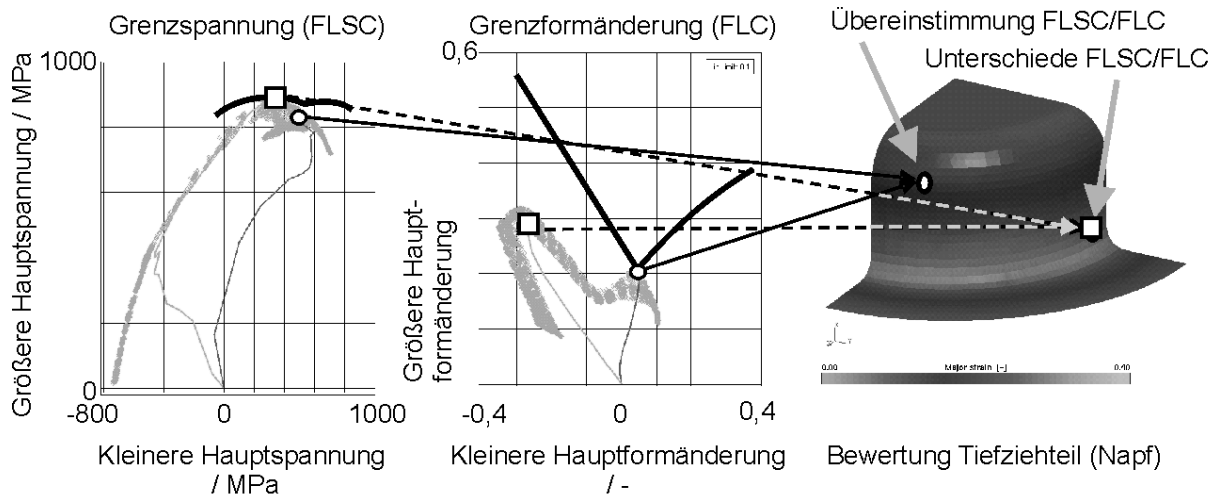


Bild 6: Parallele Anwendung von Grenzspannungs- und Grenzformänderungskurve

Bis auf die Grenzspannungskurve, die aus der Grenzformänderungskurve berechnet werden kann, bedürfen alle weiteren Modelle zusätzlicher Versuche, um die notwendigen Parameter zu ermitteln. Die anschließende Interpretation der Berechnungsergebnisse verlangt wiederum vom Anwender, dass er mit einem theoretischen Modell gezielt Aussagen über z.B. spannungsinduzierte Versagensfehler macht. Hierbei fehlt heute oftmals noch die Erfahrung, wann diese Modelle eingesetzt werden müssen und wie gut die Prognose mit der Realität übereinstimmt. In Bild 7 ist das Simulationsergebnis für ein Referenzbauteil dargestellt, bei dem es in Folge großer Kompressionen zu einem Anriss im Bereich der Ausklinkung kommt. Die Vorhersage wurde nach der Verwendung eines Scherbruchkriteriums möglich und zeigte gute Übereinstimmungen mit den experimentell ermittelten Werten für diesen Werkstoff. Aus der Vielzahl der angesprochenen Möglichkeiten wird deutlich, dass sich ein Anwender auf möglichst wenige theoretische Ansätze festlegen sollte, um diese dann effektiv und über ein großes Werkstoffspektrum hinaus anwenden zu können. Darüber hinaus wird ein möglichst standardisierter Weg für die Datenermittlung benötigt, um mehr Erfahrung in der Ergebnisdiskussion / -interpretation zu erhalten.

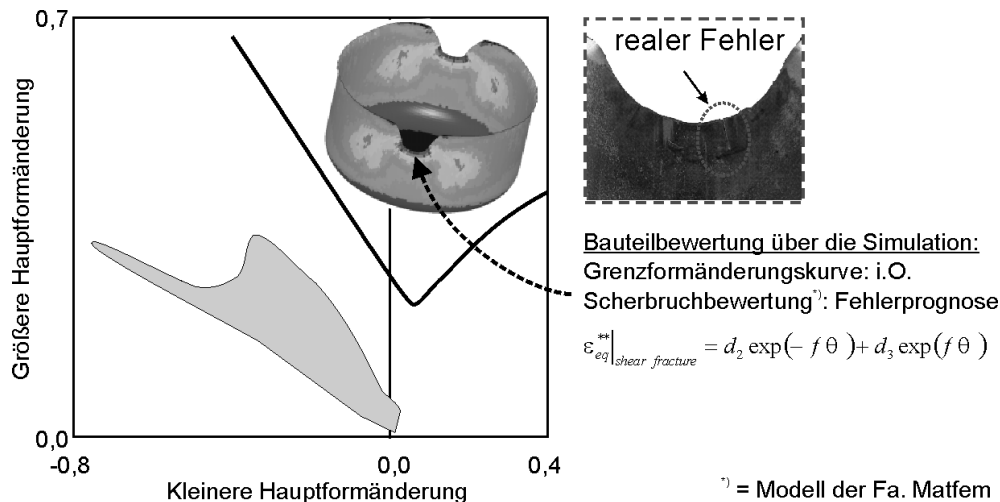


Bild 7: Bewertung von Simulationsprozessen für hochfeste Werkstoffen mit erweiterten Kriterien

3.3 Robuste Prozesse

Mit der Entwicklung der Rechentechnik wird es auch zunehmend praktisch möglich, im Vorfeld die Robustheit von Umformprozessen zu untersuchen, bevor die Werkzeuge in Hardware erzeugt wurden. Es ist leicht einzusehen, dass ein für gegebene Randbedingungen optimaler technischer Prozess nicht notwendigerweise auch kostengünstig (stabil) ist, wenn sich die Eingangsparameter in typischen Grenzen bewegen. Werden die Schwankungen der Parameter ausschließlich auf den Werkstoff übertragen, was oft getan wird, dieser aber nur einen Teil der Realität widerspiegelt, sind z.B. folgende Fragestellungen von Interesse:

- Welcher Werkstoffkennwert ist für welche definierte Umformgröße (Rissgefahr, Ausdünnung, usw.) besonders ausgeprägt.
- Wie kann der Einfluss dieses Wertes minimiert werden? (Neben der Forderung nach Einschränkung von Streuungen in den Werkstoffeigenschaften kann oftmals durch Veränderung der Prozessbedingungen, wie der Vergrößerung von Radien oder der Anpassung des Platinenlayouts ein stabiler Prozess erreicht werden).
- Welche Ausschussraten sind zu erwarten (Hierbei spielt neben dem Materialmehrerverbrauch vor allem auch der logistische Aufwand zur Qualitätssicherung bei instabilen Prozessen eine entscheidende Rolle).

Die erste Fragestellung lässt sich leicht mit der Methode der Sensitivitätsanalyse beantworten. Hierbei wird über eine gezielte Variation des Werkstoff-Inputs mittels einer Ausgleichsrechnung (linear oder auch quadratisch) das Umformergebnis approximiert. Bei dann bekannter „Ersatzfunktion“ ist eine Bewertung des Werkstoffeinflusses auf den Umformprozess einfach und gut interpretierbar. Komplizierter wird die Aufgabe, den Prozess hinsichtlich seiner Robustheit zu bewerten. Für eine Beantwortung der Fragestellung, wie oft ein Umformergebnis im Hinblick auf die Grundgesamtheit der Werkstoffeigenschaften eintreten wird, stellt die korrekte statistische Beschreibung des Werkstoffparameterraums eine Grundvoraussetzung dar. Um mittels Sampling-Prozeduren effizient typische Werkstoffeingangssätze aus dem Parameterraum zu erzeugen, ist die Kenntnis möglicher auftretender Korrelationen in den Werkstoffeigenschaften zwingend erforderlich. Wird dies nicht beachtet, kann das zu völlig unzutreffenden Schlussfolgerungen bei der Bewertung der zu erwartenden Prozesssicherheit führen [4] (Bilder 8 und 9).

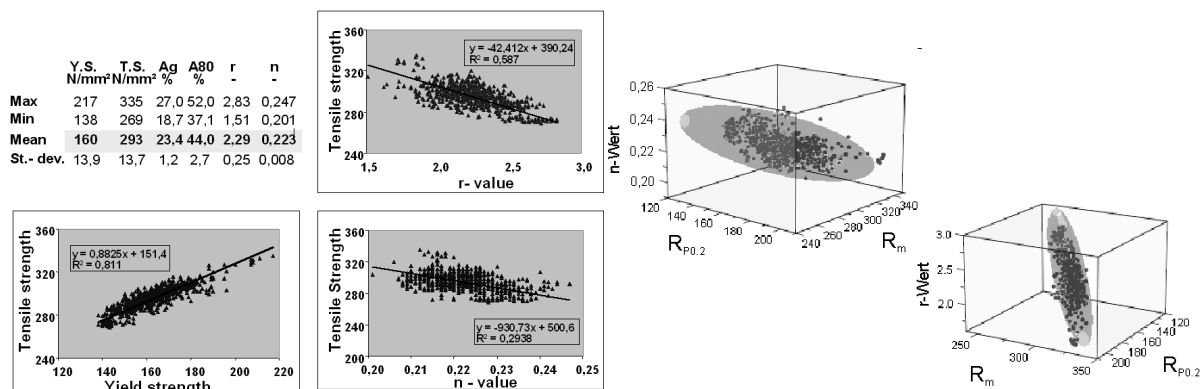


Bild 8: Korrelation von Werkstoffkennwerten und die resultierende Umhüllende im Mehrparameterraum [4]

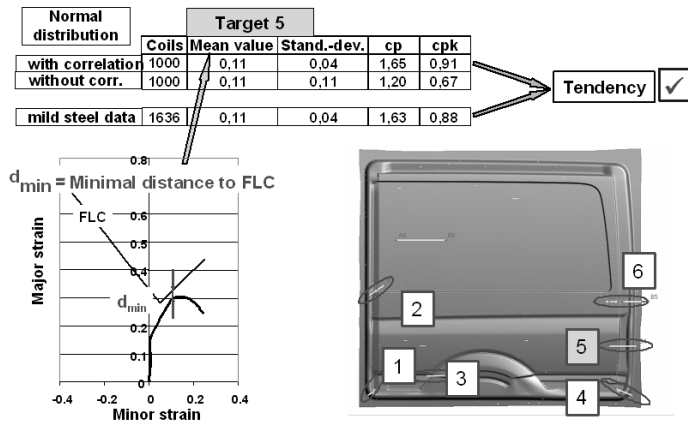


Bild 9: Berechnung der Prozessfähigkeit mit und ohne Nutzung einer Kennwertkorrelation [4]

4 Zusammenfassung

Die zunehmende Erwartungshaltung gegenüber der Umformsimulation im Hinblick auf die Prognosefähigkeit für z.B. die Themenfelder Versagen, Robustheit, Maßhaltigkeit wird eine steigende Anpassung der Simulationsumgebung für die einzelnen Prozessschritte verlangen. Dabei deutet sich an, dass für die Aussagen in den einzelnen Entwicklungsstufen von Bauteilen in Kombination mit den unterschiedlichen, zum Einsatz kommenden Stahlwerkstoffen, werkstoffspezifische Simulationslösungen gefunden werden müssen. Diese verlangen neben den erweiterten Materialdaten für die Kalibrierung der Werkstoffmodelle auch die Bestimmung von z.B. Versagensparametern. Im Gegensatz zu der heute oftmals als Standard eingesetzten Werkstoffbeschreibung nach Hill '48 zeichnet sich für deren Weiterentwicklung im Moment jedoch noch kein klarer Trend ab. Die dargestellten Untersuchungen mit vielen der neuen Ansätze lassen zwar einzelfallbezogen eine deutliche Verbesserung der Simulationsprognose erwarten, sie sind jedoch oftmals alleine nicht ausreichend, alle notwendigen Ergebnisse zu erzeugen. Zudem beinhalten viele der Modelle im Moment noch eine zu große Komplexität in der Datenbestimmung für die Kalibrierung, der Anwendung und auch in der Interpretation durch den Anwender. Infolgedessen erwarten wir, dass für manche Werkstoffgruppen die Simulationsanwendung zwischenzeitlich erneut aus der vereinfachten Welt wieder in eine komplexere Struktur übergeht, um die gewünschten Aussagen zu erzeugen. Die eingeschränkte Nutzung der für einen Anwendungsfall bestimmten Parameter in anderen Modellen macht bei dem Anwender die frühzeitige Auswahl und Spezialisierung auf das Modell notwendig, welches für die Fragestellungen der Firma den größtmöglichen Nutzen bringt. Zur Begleitung dieses Prozesses bedarf es jedoch beim Anwender einer breiteren Wissensbasis für die Auswahl, die Anwendung und speziell auch die Deutung und Interpretation der Simulationsergebnisse.

5 Literatur

- [1] Gerlach, J.; Kessler, L; Rösen, H: "Possibilities And Influencing Parameters For The Early Detection Of Sheet Metal Failure In Press Shop Operations", NumiForm 2007 Porto, 2007, 99-105
- [2] Faust, A; Kessler, L; Richter, H; Roll, K: "A contribution on yield loci modelling compared to the application of variable hardening curves in forming simulations", IDDRG Conference Győr, 2007, 101-108
- [3] Gerlach, J.; Kessler, L: "The impact of material testing strategies on the determination and calibration of different material models", IDDRG Conference 2006 Porto, 2006, 113-120
- [4] Gerlach, J.: "Sensitivity and robustness analysis for quantification of the influence of material scattering", FTF Conference, Zürich, 2007, 113-120
- [5] Kessler, L et. al.: "Material selection for an ultra high strength steel component based on the failure criteria of CrachFEM", Numisheet 2005 Conference Detroit, 2005, 492-499
- [6] Gerlach, J.; Kessler, L: "New generation of high strength steels- How accurate is their virtual modeling?", FLC-Conference, Zürich, 2006, 95-97.
- [7] Ehrhardt, B.; Gerber, T.; Schaumann, T.W.: "Approaches to micromechanical design of Trip and TRIP aided cold rolled high strength steels", Proc. Intern. Conf. on Advanced High Strength Steels for Automotive Applications, Winter Park, Colorado, USA, June 6-9, 2004, 39-50
- [8] Prager W.: "The theory of plasticity. A survey of recent achievements", Proc. Inst. Mech., Engl. 169 (1955), 41-57
- [9] Yoshida, Uemori, .: "A model of large-strain cyclic plasticity describing the Bauschinger effect and workhardening stagnation", IJOP, 2002, 661-686