

# Simulationsgestützte Kompensation der Rückfederung

Karl Roll, Tim Lemke, Klaus Wiegand

DaimlerChrysler AG, Sindelfingen, Deutschland

## Zusammenfassung/Summary:

Die Simulation des Blechumformprozesses wird heute standardisiert eingesetzt, um bereits während der Werkzeugkonstruktion die versagensfreie Herstellbarkeit des Blechformteils zu gewährleisten. Dagegen befindet sich die Simulation der Rückfederung sowie deren rechnergestützte Kompensation erst im Aufbau. Der Stand der Technik bei der Simulation der Rückfederung wird aufgezeigt und an Beispielen demonstriert. Verschiedene Strategien zur Kompensation der Rückfederung werden diskutiert und an Hand von Beispielen erläutert. Erfolgreich durchgeführte Simulationen des kompletten Herstellungsprozesses von Karosserieblechformteilen einschließlich der rechnergestützten Kompensation der Rückfederung werden dargestellt. Die Ergebnisse verdeutlichen die Fähigkeit der Simulation, rückfederungsbedingte Geometrieänderungen qualitativ richtig und quantitativ bis auf eine geringe Bandbreite genau berechnen zu können. Die numerisch ermittelten Formabweichungen liefern wertvolle Hinweise zur Kompensation der Rückfederung durch eine angepasste Werkzeugkonstruktion und und/oder durch eine Veränderung der Umformmethode. Deshalb sollte die Simulation und Kompensation der Rückfederung in den Entstehungsprozess komplexer Karosserieteile integriert und zur Optimierung aller Werkzeuge der umformtechnischen Prozesskette eingesetzt werden. Durch den verstärkten Einsatz der Simulation ist eine weitere Verkürzung der Entwicklungs- und Fertigungszeiten bei Umformwerkzeugen zu erwarten. Voraussetzung ist allerdings, dass die Modellerstellung vereinfacht wird und die Simulation wesentlich früher in der Prozesskette Blechteilefertigung eingesetzt wird.

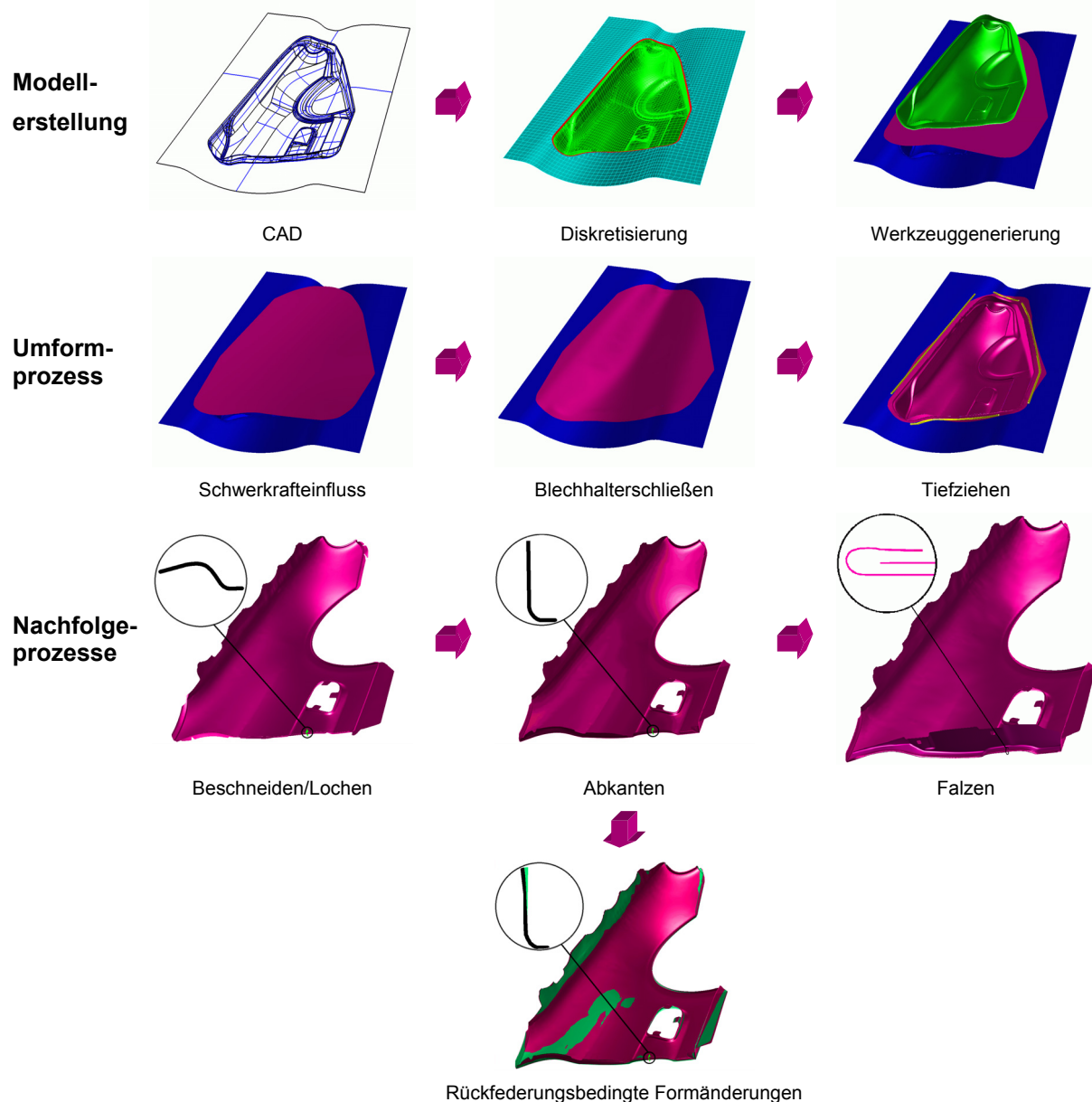
## Keywords:

Umformen, Simulation, rückfederungsbedingte Formänderungen, Kompensation

## 1 Stand der Technik

Eine analytische Berechnung und exakte Voraussage der rückfederungsbedingten Formänderungen ist auf Grund der komplizierten Formänderungs- und Spannungsverhältnisse bei Karosserieblechformteilen nicht möglich. Die Konstruktion der Blechumformwerkzeuge basierte bis vor einigen Jahren meistens auf Erfahrungswissen und die optimale Gestaltung erforderte oft einen langwierigen und kostspieligen Versuchs- und Einarbeitungsprozess. Heutzutage werden bereits in frühen Designphasen Simulationen des Umformprozesses der Blechformteile mit Hilfe der Finiten Elemente Methode durchgeführt. Die wichtigsten Ziele sind die Überprüfung der Herstellbarkeit der Blechformteile und die Gewinnung wichtiger Hinweise bezüglich der optimalen Werkzeuggestaltung.

Die Simulationen in der Automobilindustrie beschränken sich heutzutage auf den Umformprozess, bei dem die größten Formänderungen auftreten. Bei einem typischen Karosserieteil in der Blechbearbeitung ist dies in der Regel die erste Umformstufe, der Tiefziehprozess, siehe /1/. Viele kommerzielle Finite Elemente Programme sind in der Lage, eine mögliche Riss- und Faltenbildung sowie die allgemeine Blechdicken- und Formänderungsverteilung konventioneller Blechwerkstoffe zuverlässig vorzusagen, so dass die Versagensfälle Reißen und Faltenentstehung bei der ersten Umformstufe vermieden werden /2/.

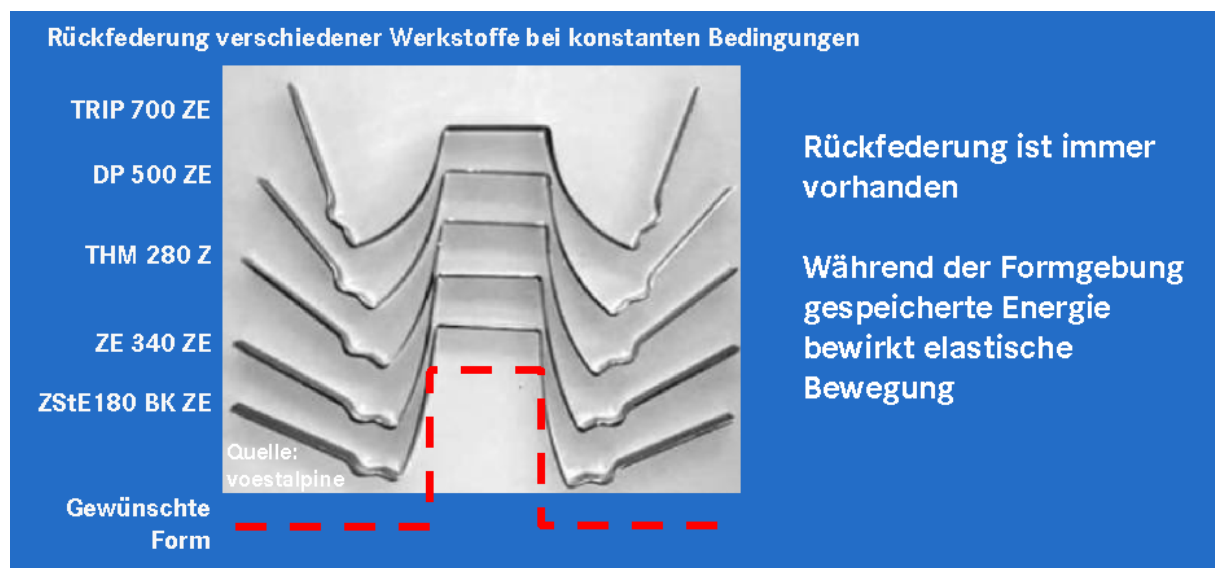


**Bild 1:** Simulation der kompletten umformtechnischen Prozesskette eines komplexen Karosserieblechformteils

Um jedoch Aussagen über alle Fehler und Probleme während der kompletten umformtechnischen Prozesskette zu erhalten, müssen alle Umformprozesse der Herstellungskette simuliert werden, siehe Bild 1. Von zentraler Bedeutung ist die durchgängige Simulation vor allem für die Bestimmung der rückfederungsbedingten Form- und Maßabweichungen am Fertigteil, die zurzeit zu den größten Herausforderungen bei der industriellen Produktion von Blechformteilen zählen und einen entscheidenden Einfluss auf die Weiterverarbeitung haben. Die auf der Finite Elemente Methode basierenden Simulationen ermöglichen sowohl Aussagen über den Umformprozess vor seiner realen Durchführung als auch ein stark verbessertes Verständnis der komplexen Prozesse und Zusammenhänge. Somit wird die Optimierung der Werkzeuggeometrien und Prozessparameter ermöglicht. Mit entsprechender Erfahrung des Anwenders werden auch die Umformkräfte, der Blecheinzug, die Ausgangskontur der Platine, einige dehnungsbedingte Oberflächenfehler sowie rückfederungsbedingte Formänderungen zuverlässig vorhergesagt. Schwierigkeiten bereiten noch die Bestimmung von spannungsbedingten Oberflächenfehlern und die Faltenbildung unter Kontaktbedingungen /2/.

Rückfederung ist kein neues Phänomen. Jedes Blech speichert während der plastischen Formgebung elastische Energie. Dieser Vorgang lässt sich nicht verhindern. Wird das Blech aus den formgebenden Werkzeugen genommen, verursacht die gespeicherte elastische Energie eine Rückfederung des Bleches. Diese Rückfederung bewirkt eine Verringerung des energetischen Niveaus, gleichzeitig jedoch auch eine Abweichung von der angestrebten Form. Wird das Bauteil nach der Formgebung auf die gewünschte Größe und Form beschnitten kann sich das Rückfederungsverhalten und damit dessen Formabweichung noch einmal ändern.

Die Rückfederung hängt wesentlich von E-Modul und der Fließspannung des Materials ab. Bei den zunehmend verwendeten hochfesten Stählen, die eine sehr hohe Fließspannung und einen E-Modul vergleichbar mit anderen Stählen haben, ist die Rückfederung im Vergleich zu den weichen Stählen sehr hoch. Sie ist deshalb deutlicher sichtbar und bereitet größere Probleme (Bild 2).

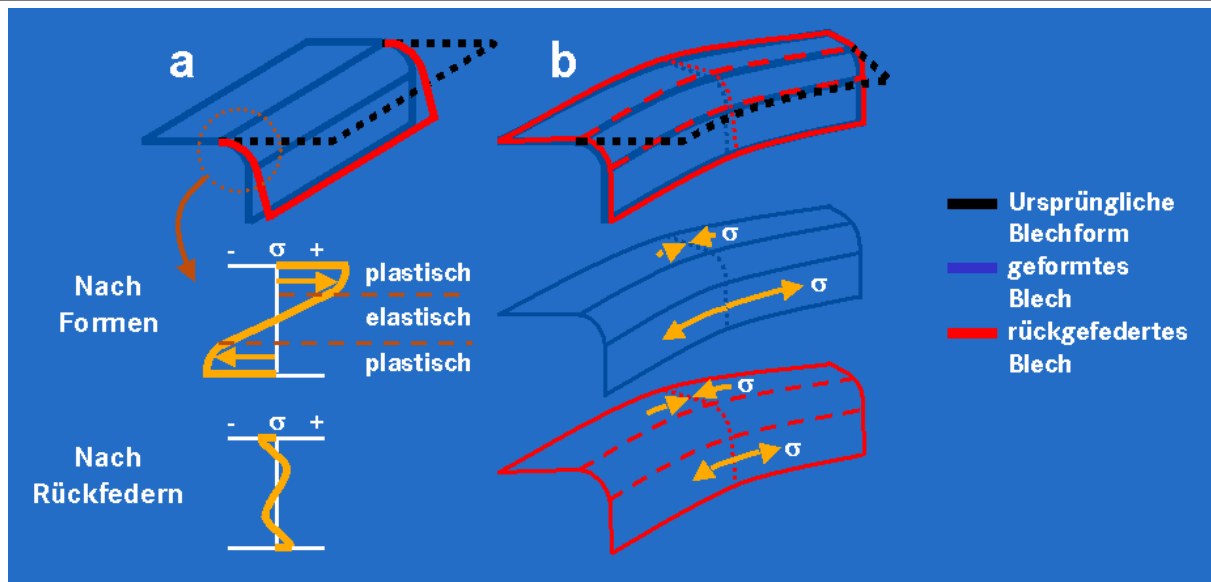


**Bild 2:** Rückfederung aufgrund elastischer Biegespannungsanteile in der Zarge für verschiedene Blechwerkstoffe

Die Formabweichung durch Rückfederung wird durch zwei verschiedene Grundmechanismen hervorgerufen, siehe Bild 3.

- Biegespannung senkrecht zur Blechdicke
- Unterschiedliche Membranspannung in Flanschen

Im ersten Fall wird das Blech durch eine Biegung an einer geradlinigen Kante verformt. Dabei bildet sich eine Biegespannung mit elastischem Anteil quer über die Blechdicke im Biegeradius aus. Diese Spannung bewirkt nach dem Formen bzw. Beschnitt ein Auffedern des Radius und damit des anschließenden Flansches. Im zweiten Fall herrschen in zwei ebenbürtig verlaufenden Flanschen unterschiedliche Membranspannungen. Dies ist zum Beispiel beim Abkanten entlang einer konkaven oder konvexen Biegelinie zu beobachten. Zum Abbau der unterschiedlichen Spannungen in diesen Flanschen muss das Bauteil insgesamt ausweichen. Dies äußert sich meist in einer Verdrehung des Bauteils. In realen Bauteilen kommen diese Grundmechanismen der Rückfederung selten getrennt voneinander vor; in der Regel ist es eine Kombination der beiden.



**Bild 3:** Grundmechanismen der Rückfederung  
 a) Biegespannungen quer durch Blechdicke  
 b) unterschiedliche Membranspannungen in Flanschen

## 2 Simulation der Rückfederung

Trotz der Fortschritte auf dem Gebiet der Rückfederungssimulation, einen guten Überblick gibt /3/, ist noch viel zu tun, bis die Qualität, die heute auf dem Gebiet der Simulation der ersten Ziehstufe Standard ist, erreicht sein wird. Rückfederung ist ein kompliziertes physikalisches Phänomen, dessen Mechanismen bis heute noch nicht vollständig beschrieben werden können. Es gibt ein Zitat von Stuart Keeler, das den momentanen Zustand sehr anschaulich beschreibt: „Springback is like the weather. It happens every day, is highly visible, may be predictable, is rarely understood, and picks the worst time to act up“.

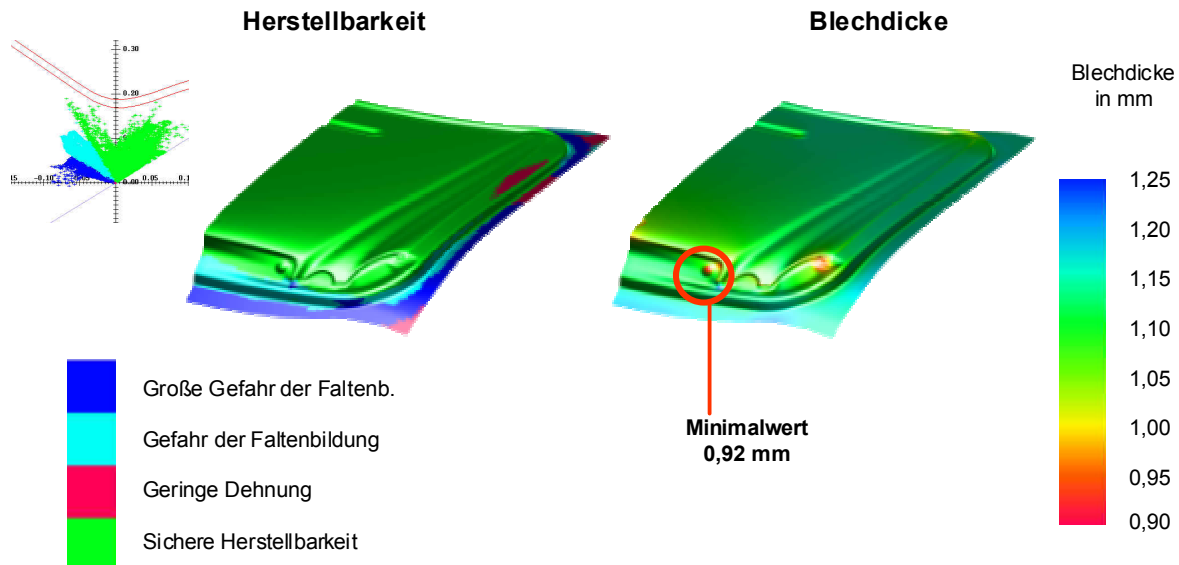
In den vergangenen Jahren hat sich die Vorhersagegenauigkeit rückfederungsbedingter Formänderungen mit Hilfe der Prozesssimulation basierend auf der Finite Elemente Methode enorm verbessert. Dies zeigt sich zum einen in der zunehmenden Schwierigkeit der Benchmark-Bauteile, die für die NUMISHEET Konferenzen ausgewählt werden /4, 5, 6, 7/. Zum anderen haben inzwischen veröffentlichte Ergebnisse zur Berechnung der Formabweichungen unter Anwendung der Blechumformsimulation das Potenzial des Einsatzes der Simulation im Entstehungsprozess von Karosserieblechformteilen aufgezeigt /1, 8, 9/. Vor allem die guten Simulationsergebnisse der dem Tiefziehen nachfolgenden Umformstufen, einschließlich der Rückfederung, demonstrieren, dass eine nutzbringende Anwendung der Umformsimulation zur Vermeidung von Formabweichungen an komplexen Karosserieblechformteilen möglich ist.

Als Beispiel für die Simulation rückfederungsbedingter Formabweichungen werden im Folgenden die Ergebnisse an einer Motorhaube diskutiert. Zur Berechnung der Formänderungen am fertigen Bauteil wurden jeweils die kompletten Herstellungsprozesse numerisch abgebildet. Die Motorhaube wird aus AlMg0,4Si1,2 hergestellt. Die Ausgangsblechdicke der Platine beträgt 1,15 mm. Die Prozesskette besteht in der Praxis aus sechs Umformstufen.

Um die Vergleichbarkeit mit den Messwerten zu gewährleisten, wurden in der Simulation für alle Berechnungen der rückfederungsbedingten Formänderungen die bei der praktischen Vermessung gewählten Lagerpunkte fixiert. Neun Lagerpunkte fixieren das Blechformteil in die z-Richtung, verhindern somit eine Bewegung infolge des Eigengewichts, ein Lagerpunkt positioniert das Karosserieteil in y-Richtung und zwei in x-Richtung.

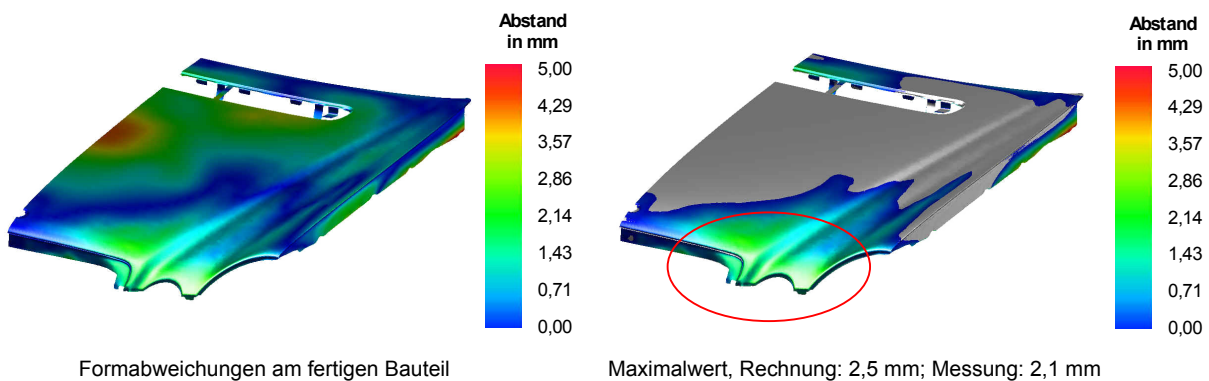
Bild 4 zeigt, dass es keine Probleme bei der Herstellung des Teiles geben wird. Im Bild 5 sind die berechneten Formabweichungen in z-Richtung an der Motorhaube dargestellt. Verwendet wurde das Simulationsprogramm LS-DYNA. Das Tiefziehen wurde explizit, die Rückfederung implizit simuliert. Die Elementanzahl nach dem Abkanten betrug ca. 450.000. Mit dem bei diesem Programm möglichen „Mesh-Coarsening“ konnte die Elementanzahl für die implizite Rückfederungssimulation ohne Qualitätsverlust auf ca. 90.000 Elemente reduziert werden und so benötigte die Berechnung der rückfederungsbedingten Formabweichungen nur eine CPU-Zeit von 25 min. Der Aufsprung im Bereich der

Scheinwerfer und der Senke in der Bauteilmittle wurde richtig berechnet. Die Flanschwelligkeit wurde richtig abgebildet. In vielen Bereichen gab es eine gute Übereinstimmung zu den Messergebnissen.



**Bild 4:** Simulation einer Motorhaube - Ergebnisse nach der 1. Ziehstufe

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Rückfederung heute von der Tendenz her mit akzeptabler Genauigkeit berechnet werden. Sie kann dabei sowohl mit expliziten Verfahren als auch mit Kombinationen von expliziten und impliziten Verfahren bestimmt werden. Allerdings beträgt die Rechenzeit bei Anwendung von expliziten Verfahren zur Berechnung der Rückfederung das 3 bis 4-fache der Rechenzeit wie für eine Tiefziehsimulation [8]. Die Rechenzeit für eine implizite Rückfederungsberechnung liegt bei Anwendung von Netzvergrößerung im Allgemeinen unter einer Stunde. Für die Simulation der Rückfederung ist es notwendig, die ganze Prozesskette sehr sorgfältig darzustellen. Der Aufwand ist mithin erheblich größer als bei einer reinen Simulation des Tiefziehvorganges. Während die Umformsimulation der ersten Ziehstufe heute fester Bestandteil im Produktentstehungsprozess ist, ist dies bei der Simulation der Rückfederung zurzeit noch nicht der Fall. Beim derzeitigen Stand der Rückfederungssimulation ist ein erfahrener Anwender erforderlich, um gute Ergebnisse erzielen zu können. So genannte Black-Box-Lösungen gibt es auf diesem Gebiet noch nicht.



**Bild 5:** Simulation einer Motorhaube - Rückfederung nach Beschnitt und Abkanten

### 3 Reduzierung und Kompensation der Rückfederung

#### 3.1 Maßnahmen zur Reduzierung der Rückfederung

Die Speicherung elastischer Energie während der Formgebung lässt sich nicht verhindern, der Effekt auf die Formabweichung lässt sich jedoch minimieren. Grundsätzlich lassen sich die dafür verwendeten Maßnahmen in zwei Grundtypen unterteilen:

1. Das Bauteil wird durch
  - kleinere Radien und
  - zusätzliche Verprägungen

versteift.

2. Der Auszug des Bleches wird auf ein hohes Niveau gehoben und gleichmäßig verteilt durch optimale
  - Variation der Rückhalterkräfte von Ziehstäben,
  - Variation der Ankonstruktion des Werkzeuges und
  - Steuerung der Niederhalterkraft in Abhängigkeit vom Stempelweg

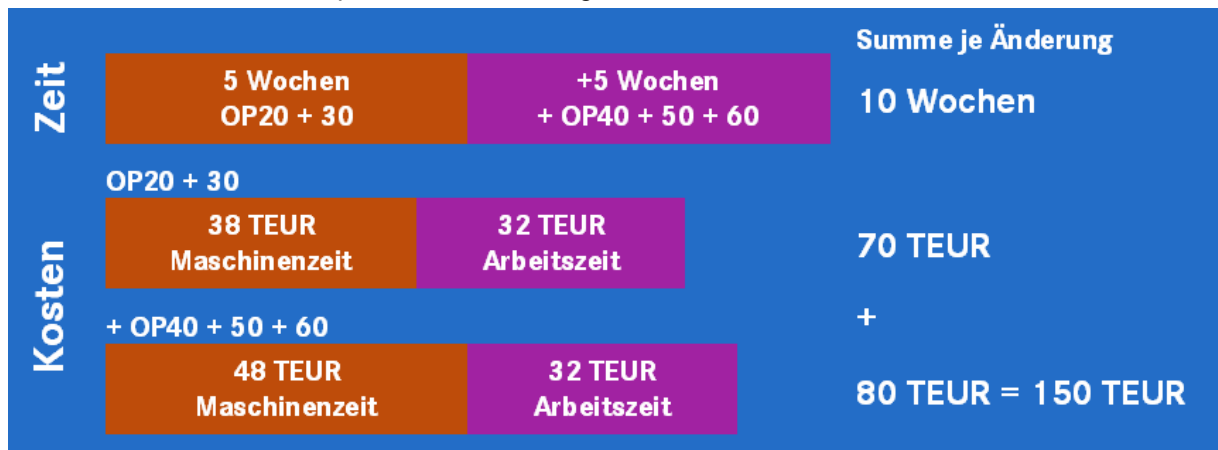
Dabei gelten die Einschränkungen, dass die Bauteilform nur verändert werden darf, wenn die Bauteilfunktion nicht beeinträchtigt wird, und der Auszug darf nur soweit erhöht werden, solange ein robuster Herstellungsprozess gewährleistet werden kann. Das heißt, dass keine Risse, Einschnürungen oder Falten entstehen.

Die komplexen Bauteilformen aktueller Fahrzeuge und das Bestreben möglichst kleine Blechplatten einzusetzen schränken diese Möglichkeiten zur Verringerung der Rückfederung weitgehend ein. Sind alle Möglichkeiten ausgeschöpft, besteht häufig noch eine Abweichung von der gewünschten Form. Diese Abweichungen lassen sich eventuell beim Fügen mit anderen Bauteilen noch verringern bzw. eliminieren. Limitierend ist dabei oft, dass der durch die Formabweichung entstehende Fügespalt durch die Kräfte der Punktschweißzangen nicht mit einem für eine gute Schweißzonenausbildung ausreichenden Anpressdruck geschlossen werden kann. Oder, dass das hinzugefügte Bauteil in sich selber zu labil ist, um das Gesamtbauteil in Form zu halten.

Kann durch Fügen das Bauteil nicht in Form gebracht werden - gerade bei den aktuellen hochfesten Werkstoffen ist dies oft nicht möglich - muss eine Anpassung der Werkzeugwirkflächen erfolgen. Dieses Vorgehen wird Kompensation der Rückfederung genannt. D. h. das Bauteil wird in einem Werkzeug geformt, das nicht der gewünschten Form entspricht. Das Bauteil bewegt sich (federt) nach dem Beschnitt aber in die gewünschte Form.

### 3.2 Kosten der Kompensation

In der Vergangenheit wurden die Werkzeuge zuerst mit der angestrebten Bauteilform gefertigt, Bleche abgepresst und zum Fertigteil beschnitten. Nach Messung und Bewertung der Rückfederung wurden Kompensationsmaßnahmen unter Zuhilfenahme von Erfahrungen beschlossen und in die Werkzeuge eingearbeitet. Dieser iterative Prozess wurde solange durchlaufen, bis die Bauteile eine ausreichende Qualität erreichten. Diese konventionelle Vorgehensweise ist langwierig und belegt viele Ressourcen in den Werkstätten. Eine Korrekturschleife zur Kompensation der Formabweichung z. B. an einem Tiefzieh- und Beschnittwerkzeug eines Motorhauben-Innenteils dauert heutzutage ca. 5 Wochen und kostet ca. 70.000 €, siehe Bild 6. Sind die Maßnahmen in die folgenden Operationen ebenfalls einzuarbeiten, kann dies insgesamt 10 Wochen dauern und 150.000 € kosten. Gelegentlich sind mehrere Korrekturschleifen pro Bauteil notwendig.



**Bild 6:** Geschätzter Zeitbedarf und Kostenaufwand für eine Werkzeugüberarbeitung.

Ein Abschätzen der Formabweichungen und damit eine Kompensation der Wirkflächen durch Erfahrungen bevor das Werkzeug gefertigt wird, ist bei den heute typischen komplexen Bauteilformen und neuen Werkstoffen schwierig bzw. nicht möglich. Daher ist eine frühzeitige Berechnung der Formabweichung hilfreich bzw. notwendig.

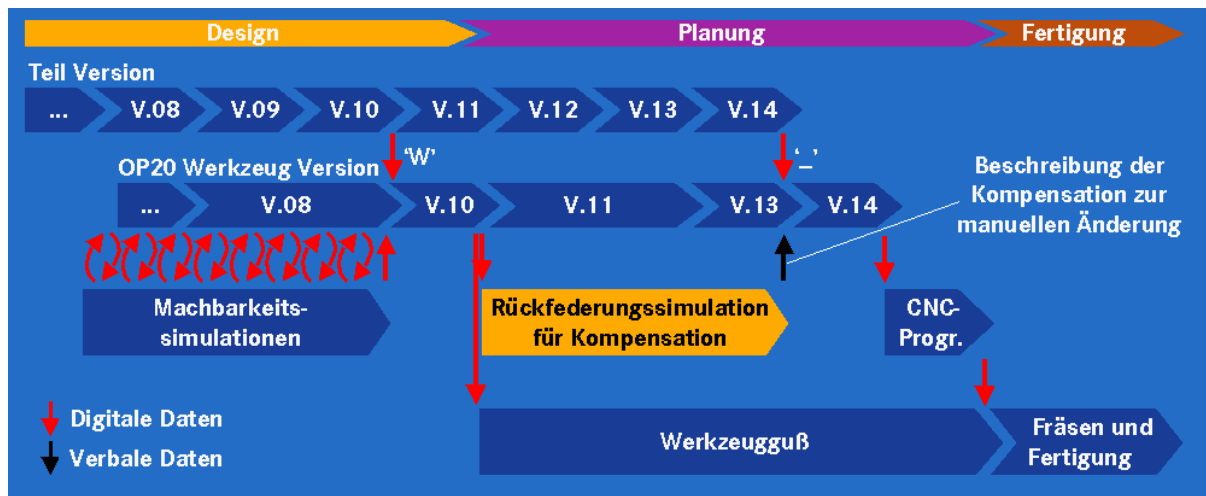
### 3.3 Numerisch gestützte manuell durchgeführte Kompensation

Weltweit arbeiten alle Automobil- und Blechteilehersteller an Verfahren, die diesen iterativen praktischen Optimierungsprozess verkürzen sollen, indem die Formabweichung vor dem realen Werkzeugbau abgeschätzt wird. Meist wird dazu die Blechumformsimulation durch die Finite-Elemente-Methode (FEM) eingesetzt. Bevor die Formabweichungen im Voraus abgeschätzt werden können, sind folgende Aufgaben zu bewältigen /2/, /8/, /10/:

- Durchführung reproduzierbarer Experimente für ein großes Bauteil- und Werkstoffspektrum
- Exakte und reproduzierbare Messung der realen Formabweichungen nach Beschnitt
- Simulation des gesamten Herstellungsprozesses
- Berechnung der Rückfederung quantitativ und qualitativ
- Vergleich der simulierten und gemessenen Formabweichung

Jeder dieser Schritte ist nicht trivial zu lösen und bedarf großer Erfahrung. Meist können durch unterschiedliche Membranspannungen hervorgerufene Formabweichungen im Bauteil gut berechnet werden. Formabweichungen verursacht durch Biegespannungen über der Blechdicke sind schwieriger zu bestimmen. Führen diese Schritte jedoch dazu, dass die Formabweichung ausreichend genau simuliert werden konnte, kann die Formabweichung während des Werkzeugdesigns berücksichtigt und geeignete Maßnahmen zu deren Minimierung und Kompensation vor der Fertigung der realen Werkzeuge eingeplant werden.

Durch die Forderung nach kurzen Entwicklungszeiten laufen in der Praxis viele Prozesse simultan zueinander ab. Daher verbleibt für die Simulation mit den endgültig geplanten Werkzeugwirkflächen



nicht ausreichend Zeit. In Bild 7 ist der typische Entwicklungsverlauf eines Tiefziehwerkzeuges dargestellt. Die Entwicklung gliedert sich in 3 Phasen: Design, Planung und Fertigung.

**Bild 7:** Typischer Entwicklungsverlauf eines Tiefziehwerkzeuges in einer Simultaneous-Engineering Umgebung

Während der Designphase kann sich das Bauteil stark verändern, trotzdem werden parallel die Wirkflächen des Tiefziehwerkzeugs entwickelt, da aufgrund der geforderten kurzen Entwicklungszeiten in einem späteren Stadium dazu keine Zeit verbleibt. Dieses Werkzeugdesign wird durch Simulationen zur versagensfreien Herstellbarkeit und damit zu einem robusten Prozess abgesichert. Dazu wird meist ein schneller Simulationscode verwendet, wie z. B. AutoForm. In dieser Phase lassen sich viele Prozess- und Werkzeugdesignvarianten untersuchen, um z. B. einen hohen gleichmäßigen Auszug zu erreichen. Dabei können statistische FEM-Softwarepakete, wie z. B. AutoForm-Optimizer, bei der Bestimmung optimaler Prozess- bzw. Werkzeugdesignparameter unterstützen. Diese berechnen dazu automatisch mehrere Variationen des Werkzeugentwurfes bzw. des Fertigungsprozesses und werten deren Einfluss auf das Tiefziehergebnis statistisch aus. Gleichzeitig wird ein Volumenmodell der

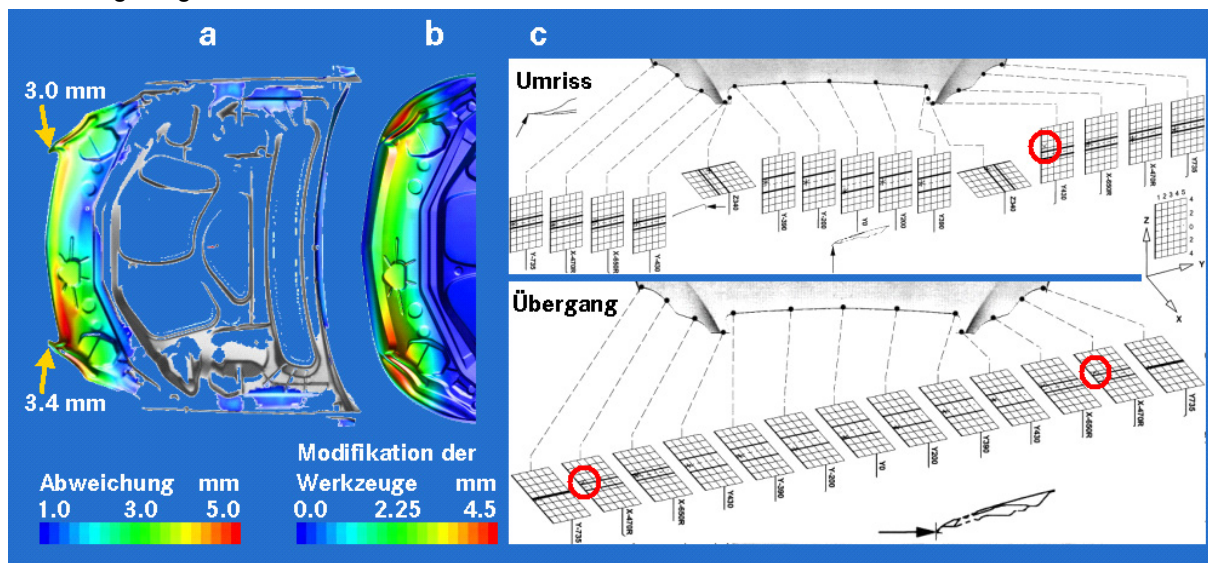
Werkzeuge erstellt, in das die Wirkflächen und -richtungen aus der Methoden- und Werkzeugwirkflächenplanung einfließen.

In der Planungsphase ändert sich das Bauteil meist nur noch gering. Da das Werkzeugdesign (Wirkflächen) und das 3D-Werkzeugmodell parallel entwickelt werden, kann mit einem Aufmass auf die Wirkflächen der Guss für die Werkzeuge bestellt werden. Das Aufmass stellt sicher, dass Kompensationsmaßnahmen später berücksichtigt werden können.

Wird der Guss geliefert, beginnt die Fertigungsphase der Werkzeuge. Der letzte Stand des Bauteils wird eingefroren und an die Werkzeugplanung übergeben. Diese lässt die letzten Änderungen in die Wirkflächen einfließen und erstellt die CNC-Daten zum Fräsen der Gussteile, aus denen dann nach der Bearbeitung das Werkzeug zusammengebaut wird.

Es ist schwierig in diesen engen und verzahnten Ablauf nach der Planungsphase eine größere Zeitperiode zur Berechnung und Kompensation der Rückfederung einzuplanen. Um diesen Prozess parallel ablaufen lassen zu können, ist es notwendig, folgende Annahme zu treffen: Die der Bestellung des Gussmodells zugrunde liegende Werkzeuggeometrie unterscheidet sich nicht mehr wesentlich von der endgültigen Form. Noch anfallende Änderungen haben deshalb nur noch einen geringen bzw. gar keinen Einfluss mehr auf das Rückfederungsverhalten des Bauteils.

Auf der Basis dieser Annahme ist es möglich, die Simulation des gesamten Herstellungsprozesses von der Ziehoperation bis zum Beschnitt und zur Rückfederung parallel zur Entwicklung des Werkzeuges zu berechnen. Dazu werden Simulationsprogramme verwendet, die eine genauere Prozessabbildung ermöglichen, als die für Machbarkeitsuntersuchungen verwendeten Simulationscodes. Diese Programme, wie z. B. LS-DYNA, benötigen allerdings eine wesentlich längere Zeit zur Berechnung der Modelle, so dass die Ergebnisse erst kurz vor Ende der Planungsphase vorliegen. Mit Berücksichtigung der getroffenen Annahme ist in der verbleibenden Zeit die Ableitung von Maßnahmen zur Kompensation der Rückfederung möglich. Diese Maßnahmen können dann in das endgültige Werkzeugdesign einfließen.



**Bild 8:** Simulationsgestützte Kompensation eines Motorhauben-Innenteils  
 a) Berechnete Formabweichung ohne Kompensation,  
 b) Beschlossene Modifikation der Werkzeuge,  
 c) Messbericht des realen Zusammenbaus für Umriss und Übergang

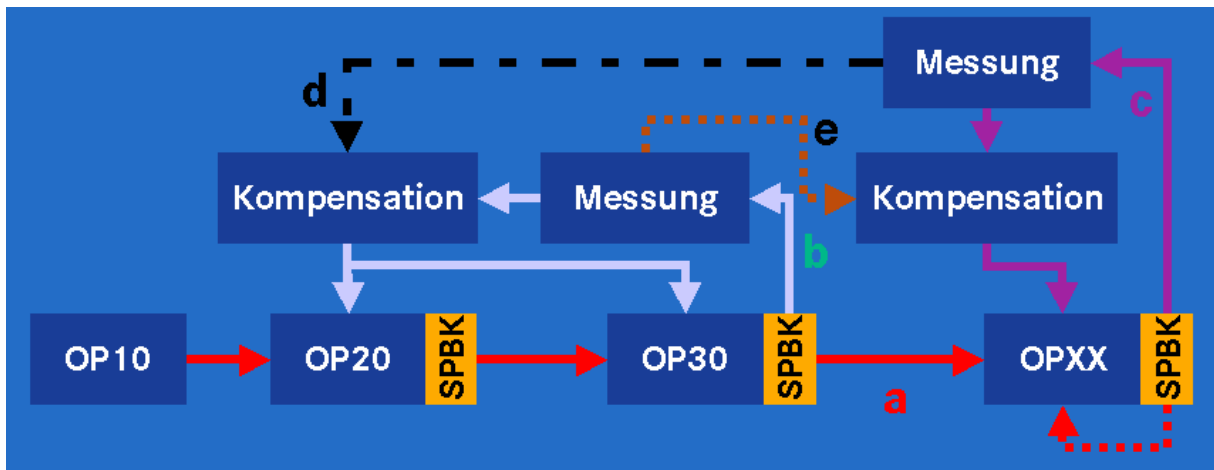
Als Beispiel für ein solches Vorgehen wurde ein Motorhauben-Innenteil untersucht /11/. Für den Zusammenbau der Motorhaube wurde erwartet, dass der vordere Bereich in der Nähe des Kühlergrills eine Formabweichung in Fahrzeuglage nach vorne aufweisen würde. Um welchen Betrag und in welchem Bereich war nicht bekannt. Da die Form des Zusammenbaus stark durch das steifere Innenteil bestimmt wird, beschränkte sich die Untersuchung der Rückfederung auf das Motorhauben-Innenteil. Die Simulation des Herstellungsprozesses mit Beschnitt und Rückfederung dieses Bauteils ergab, dass der gesamte vordere Bereich ab einer querverlaufenden Verprägung nach oben auffedert, siehe Bild 8a. Da die Formabweichung durch eine Rotation entlang der Verprägung hervorgerufen wird, wurde genau diese Winkeländerung im Werkzeug in entgegengesetzter Richtung eingebracht. Das Maß der Änderung gegenüber den ursprünglich geplanten Wirkflächen des Stempels ist in Bild 8a dargestellt. Mit diesen kompensierten Wirkflächen wurden die Werkzeuge angefertigt. Nach dem Ab-



pressen des Motorhauben-Innenteils und der Beplankung wurden diese gefügt. Eine Vermessung dieses Zusammenbaus bezüglich des Umrisses und Überganges ergab, dass die Formabweichungen im vorderen Bereich an allen bis auf drei Messpunkten innerhalb der Toleranz liegen (Bild 8c).

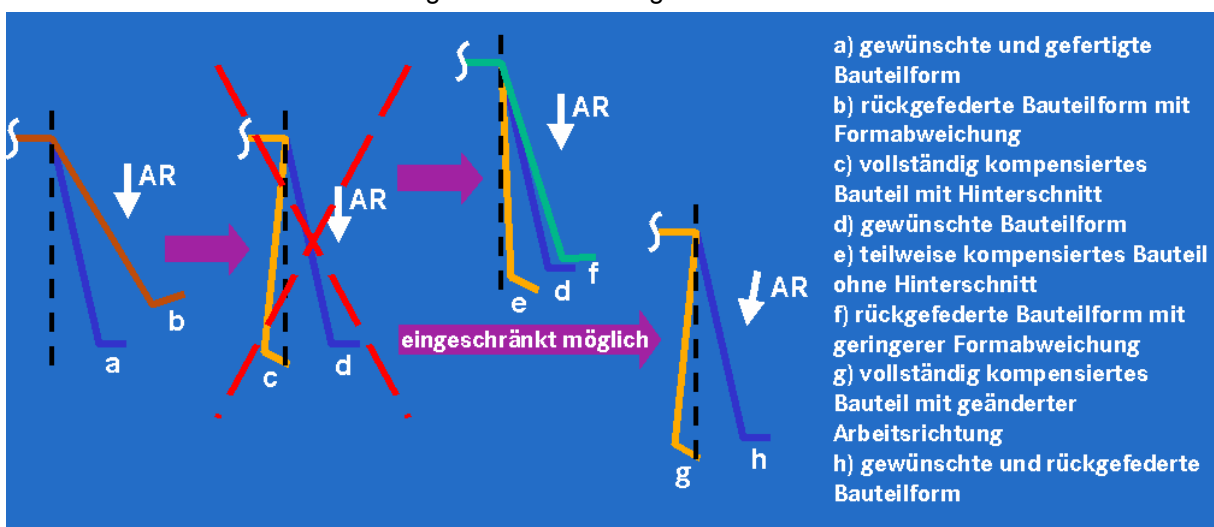
### 3.4 Kompensationsmethodik

Eine Ermittlung und Übertragung der Maßnahmen zur Kompensation der Formabweichung aus einem realen oder simulierten Rückfederungsergebnis ist jedoch generell schwierig. Dazu muss zuerst festgestellt werden, welches der Grundprinzipien die Formabweichung bewirkt und wie die Formabweichung kompensiert werden kann. Komplizierter wird es, wenn der komplette Herstellungsprozess aus mehr als nur den Schritten Tiefziehen und Beschnitt (OP20 und OP30) besteht, siehe Bild 9(a). Es ist festzustellen, welche Herstelloperation die Formabweichung hervorruft, um geeignete Maßnahmen zu ergreifen. Grundsätzlich wird versucht die Formabweichungen in der Operation zu kompensieren, in der sie auftreten (Bild 9(b) und 9(c)). Erst wenn dies nicht ausreicht, nicht möglich ist oder zu teuer wird, müssen Maßnahmen in vorherigen oder nachgeschalteten Operationen ergriffen werden (Bild 9(d) und 9(e)).



**Bild 9:** Kompensationen von Formabweichungen möglichst im verursachenden Fertigungswerkzeug (SPBK= Springback)

Wird eine Formabweichung mit einem bestimmten Betrag an einer Stelle des Bauteils ermittelt, erhebt sich die Frage, wie diese im Werkzeug zu kompensieren ist. In der Regel wird der entsprechende Bereich im Werkzeug um den Betrag der Formabweichung mit einem Faktor zwischen -0.75 und -2.5 verformt. Die jeweilige Größe des Faktors hängt davon ab, ob die Überbiegung der Umformwirkflächen im Bauteil eine plastische oder elastische Verformung bewirkt. Entsteht durch das Biegen im Bauteil ein hoher elastischer Anteil, ist der Faktor so groß zu wählen, dass der plastische Anteil ausreicht, das Bauteil nach Rückfederung in der gewünschten Form zu halten. Für die richtige Wahl des Faktors ist heute noch viel Erfahrungswissen notwendig.

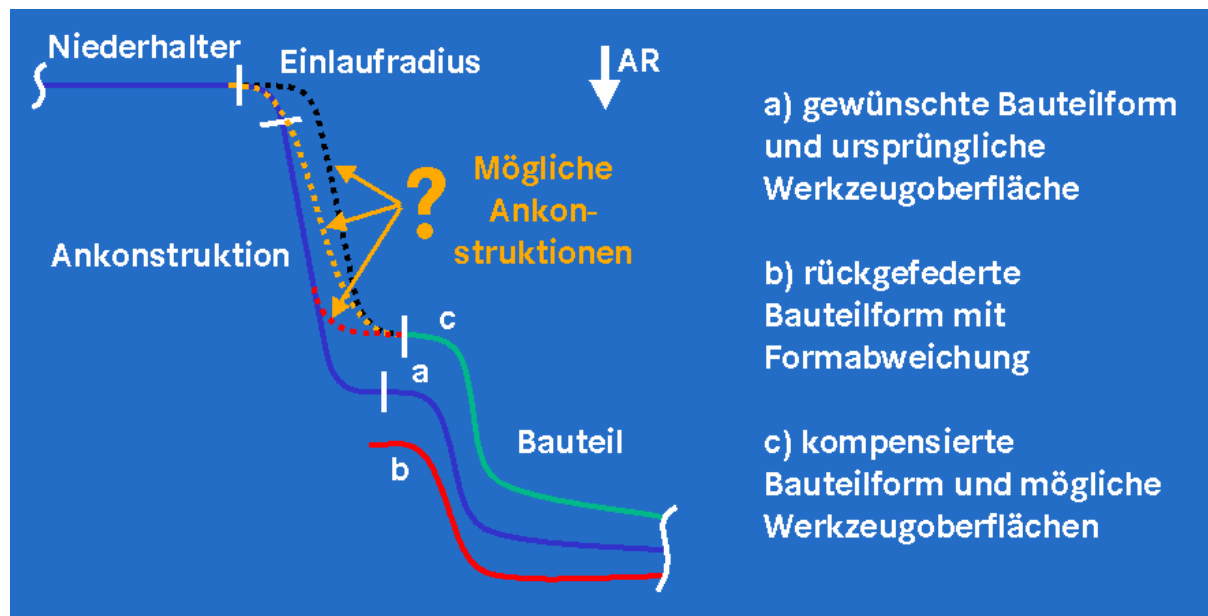


**Bild 10:** Vermeidung von Hinterschnitt verursacht durch Kompensation

Eine andere Möglichkeit, die zu fertige Form zu bestimmen, ist ein Verfahren das "Springforward" genannt wird. Hierbei wird nicht die Formabweichung nach der Berechnung der Rückfederung sondern der Spannungstensor des Bauteils, der mit dem FE-Verfahren berechnet wurde, vor der Rückfederungssimulation mit einem negativen Faktor multipliziert. Die Form, die sich nach der Rückfederungssimulation einstellt, ist dann bereits die kompensierte Bauteilform. Dieses Verfahren hat sich bei DaimlerChrysler jedoch nicht durchgesetzt, da ein Vergleich mit realen Messberichten z. B. von Prototypenbauteilen nicht möglich ist. Ebenso ist ein Verifizieren des Rückfederungsverhaltens durch Übertragung praktischer Erfahrungen mit anderen ähnlichen Bauteilen nicht anwendbar.

Schwierig zu kompensierende Bereiche sind Flächen, die annähernd parallel zur Wirkrichtung des Werkzeuges liegen (Bild 10(a)). In solchen Flächen können durch Kompensation Hinterschnitte entstehen, siehe Bild 10(c). Dies kann verhindert werden, indem sich diese Flächen nur maximal so ausrichten können, dass sie parallel zur Wirkrichtung verlaufen (Bild 10(e)). Daraus ergibt sich zwangsläufig eine unzureichende Kompensation. Eventuell lassen sich die Hinterschnitte durch eine andere Ausrichtung der Werkzeugwirkrichtung beseitigen, siehe Bild 10(g).

Ein weiteres Problem bei der Kompensation von Werkzeugwirkflächen ist die Anpassung der Ankonstruktion, die Niederhalterfläche und Bauteil verbindet. Innerhalb des Bauteils lässt sich aus den Formabweichungen schließen, wie die dazugehörigen Werkzeugwirkflächen geändert werden müssen (Bild 11(b)). Für die Flächen außerhalb der Bauteilform fehlen diese Informationen. Durch eine Kompensation der „inneren“ Werkzeugflächen können Sprünge zur ursprünglichen Konstruktion der Niederhalterflächen entstehen, siehe Bild 11(c). Hier ist ein geeigneter Übergang zwischen den kompensierten Werkzeugflächen und der Ankonstruktion zu finden. Dieser Übergang sollte den Materialfluss während der Umformung nicht beeinflussen, da sich ansonsten das Rückfederungsverhalten des Bauteils verändern könnte.



**Bild 11:** Ausgleich von Sprüngen zwischen Bauteil und Ankonstruktion verursacht durch Kompensation

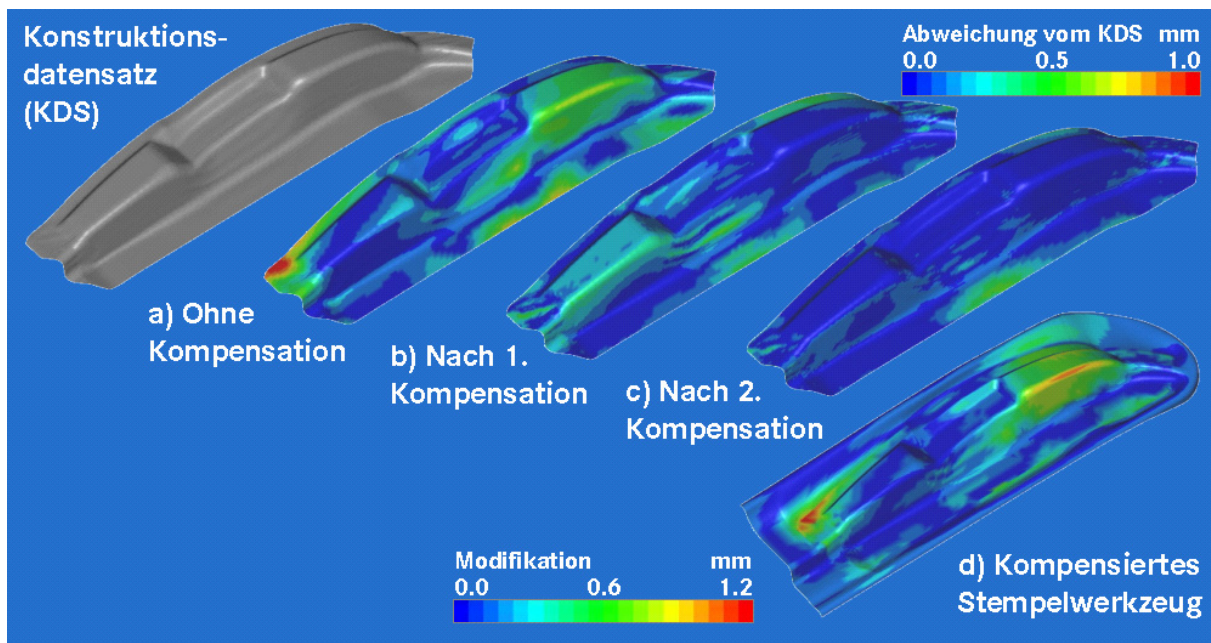
Bei der Kompensation sollte möglichst darauf geachtet werden, dass die Niederhalterfläche nicht verändert wird, da diese in der Regel so ausgelegt wird, dass sie abwickelbar ist. Dadurch wirft das Blech nach dem Schließen des Niederhalters keine Falten. Wird diese Fläche beim Kompensieren verändert, kann die Faltenfreiheit nicht mehr gegeben sein.

### 3.5 Rechnergestützte Kompensation

Die rechnergestützte Kompensation von FEM-Werkzeugnetzen wird zurzeit unter anderem in zwei Projekten untersucht. In USA wird im SCP-Projekt (Springback Compensation Program) ein Programm entwickelt, das die Kompensation der Werkzeugnetze aufgrund der Rückfederungssimulation unter Angabe eines Faktors automatisch modifiziert [12]. Die Modifikation kann dabei auf den Stempel begrenzt und somit eine Änderung der Niederhalterfläche unterdrückt werden. Sprunghafte Übergänge zwischen den Flächen, die innerhalb und außerhalb des Bauteils liegen, werden durch weiche Glättungen vermieden. Das Programm berücksichtigt ebenfalls Symmetrieebenen und wird bald auch verschiedene Werkzeugwirkrichtungen berücksichtigen können. Mit den mit dem Programm generier-

ten „neuen“ Werkzeugnetzen lässt sich die Simulation des Herstellungsprozesses sofort wiederholen, so dass die Kompensation überprüft werden kann. Durch mehrfache Simulation konvergiert in der Regel die Lösung, so dass das Bauteil nach jeder iterativen Kompensation mit anschließender FE-Netzkorrektur geringere Formabweichungen hat. Auf das Konvergenzverhalten dieses iterativen Ansatzes hat die ursprüngliche Wahl des Überbiegungsfaktors nur einen geringen Einfluss. Als Ergebnis erhält man ein FEM-Netz der Werkzeugwirkflächen mit einer durch Simulation abgesicherten Kompensation der Formabweichung.

Die Firma INPRO bearbeitet ebenfalls ein entsprechendes Projekt /13/, /14/. Ziel ist es dabei, aus den Formabweichungen eines Bauteils eine globale und im Raum definierte Funktion abzuleiten, die eine Kompensation dieser Abweichung beschreibt. Diese abgeleitete stetige Funktion kann dann zur Berechnung der Kompensation auf FEM-Netze und theoretisch auch auf CAD-Flächen angewendet werden. Die Anwendung dieser Software ist jedoch nicht auf simulierte Formabweichungen beschränkt. Sie kann auch Formabweichungen verarbeiten, die durch optische Messverfahren ermittelt wurden. Diese Vorgehensweise erspart zwar nicht ein Überarbeiten der Wirkflächen, da das Werkzeug zur Herstellung des Bauteils vor der optischen Messung natürlich angefertigt werden muss. Der Vorteil liegt hier in einer schnellen rechnergestützten Kompensation ohne vorher eine aufwendige Simulation durchführen zu müssen. Ein Verifizieren der berechneten Kompensation durch numerische Iterationen ist dabei leider nicht möglich, es ist vielmehr immer eine reale Werkzeuganpassung erforderlich. Ein möglicher Einsatzbereich dieser Vorgehensweise ist der Prototypenbau, da hier das Überarbeiten der Werkzeuge verhältnismäßig günstig und schnell erfolgen kann.



**Bild 12:** Formabweichung der Türscharnierverstärkung und erforderliche Modifikationen der Stempelwirkflächen

Für eine Türscharnierverstärkung wurde die rechnergestützte Kompensation durchgeführt /15/. Bild 12(a) zeigt die simulierte Formabweichung nach dem kompletten Herstellungsprozess ohne Kompensation, d. h. mit den ursprünglich geplanten Wirkflächen. Das Bauteil ist aus TRIP800 und wird am linken oberen Flansch mit der Türbeplankung gefügt. Da die Türscharnierverstärkung um ein vielfaches steifer als die Beplankung ist, gibt sie die Form der Tür in diesem Bereich vor. Eine Formabweichung in diesem Flansch ist daher nicht erwünscht. Wird eines der Programme aus den Projekten verwendet, lassen sich die Netze der Wirkflächen zur Kompensation der Formabweichung verändern und die Simulation des Herstellungsprozesses mit diesen neuen Werkzeugen wiederholen und die daraus resultierenden neuen Formabweichungen berechnen. Bild 12(b) und Bild 12(c) zeigen diese Formabweichung nach der ersten und zweiten Iteration. Die Formabweichung konnte in fast allen Bereichen kompensiert werden. Lediglich eine Formabweichung in der Mitte des rechten Flansches von 0,5 mm verbleibt. Diese ist jedoch für die Fertigung des Fahrzeuges unkritisch und darf verbleiben. Die Abweichung der kompensierten Werkzeugwirkflächen des Stempels gegenüber den ursprünglich geplanten ist in Bild 12(d) dargestellt.

"Springforward" eignet sich nicht für die rechnergestützte Kompensation, da mit diesem Verfahren kein iterativer Ablauf möglich ist. Es gibt aber eine erwähnenswerte Anwendungsmöglichkeit. Dazu werden die mit einem negativen Faktor multiplizierten Spannungstensoren des simulierten Bauteils vor der

Rückfederung auf die entsprechenden Werkzeugwirkflächenelemente "gemappt". Den übrigen Netzbereichen des Werkzeuges, z. B. den Ankonstruktionen, wird ein fiktives biegesteifes Material zugewiesen. Wird dieses Werkzeugnetz jetzt "simulativ" zurückgefедert, stellt sich eine Werkzeugwirkfläche ein, die glatte Übergänge am Bauteilrand hat. Da Werkzeugnetze oft gröber als Bauteilnetze sind, gehen durch das "Mappen" der Spannungen einige Informationen verloren, so dass evtl. nicht alle Formabweichungen kompensiert werden. Außerdem können Änderungen an Ankonstruktionen entstehen, die nicht zur Verringerung der Formabweichung beitragen und somit Arbeit beim Transfer in das CAD verursachen ohne Nutzen zu bringen. Aus diesen Gründen wurde dieser Ansatz bei DaimlerChrysler nicht weiter verfolgt.

In beiden hier kurz dargestellten Entwicklungsprojekten wird Software entwickelt, mit der es möglich ist, ein kompensiertes Werkzeugnetz als Ergebnis zu erhalten. Geht man davon aus, dass dieses kompensierte Werkzeugnetz abgesichert durch mehrfache Iterationen zu einer ausreichend kleinen Formabweichung führen wird, bleibt das Problem des Transfers dieser Modifikationen in die CAD-Modelle der Werkzeuge. Dieser Transfer ist für den produktiven Einsatz noch nicht zufrieden stellend gelöst.

#### 4 Zusammenfassung

In der Blechumformung ist heute bei der Berechnung der Rückfederung ein Stand erreicht, der es erlaubt, die Ergebnisse der Rückfederungssimulation als Ausgangsdaten für eine rechnergestützte Kompensation bzw. Modifikation der Werkzeugwirkflächen zu verwenden. Die Verfahren dazu befinden sich gegenwärtig im Auf- bzw. Ausbau.

Am Beispiel eines Motorhauben-Innenteils werden die Schritte aufgezeigt, die für einen Einsatz der rechnergestützten Simulation und Kompensation der Rückfederung erforderlich sind. Es wird gezeigt, wie die Simulation der Rückfederung in den Entwicklungsablauf eines Tiefziehwerkzeuges eingebunden werden kann, um die auf den Rückfederungsergebnissen basierende Kompensation der Wirkflächen vor der Anfertigung der Werkzeuge vornehmen zu können. Das prinzipielle Vorgehen bei der Kompensation der Formabweichung und die dabei heute noch auftretenden Probleme werden erläutert. Möglichkeiten und Grenzen des Kompensationsverfahrens „Springforward“ werden diskutiert. Am Beispiel einer Türscharnierverstärkung wird demonstriert, wie mit Hilfe von spezieller Software sehr schnell aus den rückfederungsbedingten Formabweichungen auf eine Geometrie geschlossen werden kann, mit der es möglich ist, die Rückfederung zu minimieren bzw. zu kompensieren.

Probleme bestehen heute noch beim „Mappen“ der Spannungen des Bauteils vor der Rückfederung auf das Werkzeugnetz. Hier bedarf es noch weiterer Untersuchungen. Weiter ist die Übertragung der kompensierten FE-Netze in die CAD-Modelle zurzeit noch nicht befriedigend gelöst.

#### 5 Literatur

- /1/ Rohleder, M.: Simulation rückfederungsbedingter Formabweichungen im Produktentstehungsprozess von Blechformteilen; Dr.-Ing. Dissertation, Universität Dortmund, 2001.
- /2/ Roll, K.; Rohleder, M.: Einsatz und Potenzial der Blechumformsimulation im Entwicklungsprozess von Karosserieblechformteilen. 17. Umformtechnisches Kolloquium Hannover, 27.2. - 28. 2. 2002
- /3/ Wagoner, Robert, H.: Fundamental Aspects of Springback in Sheet Metal Forming. Proceedings of the Numisheet 2002, Korea, pp. 13 - 24.
- /4/ Makinouchi, A.; Nakamachi, E.; Onate, E.; Wagoner, R. H. (eds): Benchmark 2-D Draw Bending; Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Numerical Simulation of 3-D Sheet Metal Forming Processes - Verification of Simulation with Experiment -, Tokyo, 1993
- /5/ Lee, J. K.; Kinzel, G. L.; Wagoner, R. H. (eds): Benchmark Problems and Results; Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Numerical Simulation of 3-D Sheet Metal Forming Processes - Verification of Simulations with Experiments -, pp. 427-844, Dearborn, 1996
- /6/ Gelin, J. C.; Picart, P. (eds): Numerical Simulation of 3-D Sheet Forming Processes; Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3-D Sheet Metal Forming Processes, Besancon, 1999

- 
- /7/ Yang, D.-Y.; Oh, S. I.; Huh, H.; Kim, Y. H. (eds.): Numerical Simulation of 3-D Sheet Forming Processes. Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3-D Sheet Metal Forming Processes, Korea, 2002
  - /8/ Rohleder, M.; Roll, K.: Numerical Prediction of Springback on a Complex Car Part. Proceedings of the Numisheet 2002, Korea, pp. 367 - 372.
  - /9/ Hu, Y.; An, J.; Zhang, L.: Progress Update on Springback Studies on a Dodge Ram Fender Outer and a Chrysler Aluminum Decklid Inner, Presentation at POST-SPP project offsite meeting, March, 2002
  - /10/ Roll, K.; Bogon, P.: Rückfederung als Genauigkeitshindernis - notwendige Weiterentwicklungen der Simulationstechnik. In: Tagungsband 10. Sächsische Fachtagung Umformtechnik SFU 2003, Chemnitz, S. 89 - 108.
  - /11/ Roll, K.; Lemke, T.: Möglichkeiten und Strategien zur Simulation und Kompensation der Rückfederung. Tagungsband EFB-Kolloquium "Optimierung von Produktionsabläufen in der Blechverarbeitung", Fellbach, 18./19. 3. 2003.
  - /12/ Springback Compensation Project for Advanced Sheet Forming Materials (SCP). DE-FC05\_02OR22910.
  - /13/ Ohnimus, S.: Bewertung: Berechnungsmodelle und Ermittlung der physikalisch-mechanischen Effekte des Rückfederns, November 2003; Inpro - Bericht VIC-03-M2; Berlin.
  - /14/ Weiher, J.; Rietman B.; Kose, K.; Ohnimus S.; Petzoldt, M.: Controlling Springback With Compensation Strategies. Proceedings of the NUMIFORM 2004, Columbus, Ohio. 13. – 17. June 2004, S. 1011- 1015.
  - /15/ Lemke, T.: Results and Requests regarding DFC. Annual Meeting, Die Face Compensation Project for Advanced Sheet Forming Materials (DFC). DE-FC05\_02OR22910. Detroit, 3.12.2003