

Simulationsbasierte Kompensation der Rückfederung in der Hand des Praktikers

Matthias Schroeder, ESI GmbH

0. Abstract

Eine simulationsbasierte, qualitativ gute Vorhersage der Rückfederung eines Tiefziehteils nach dem Beschnitt ist schon einige Jahre machbar. In den Fokus gerückt wird diese Möglichkeit durch die Forderung nach der Kompensation des Bauteils oder in Zukunft auch der Baugruppe in Richtung Sollgeometrie. Die dazu erforderlichen Simulationswerkzeuge, wie z.B. PAM-STAMP, sind verfügbar, hinreichend gut erprobt und für ein großes Bauteilspektrum einsetzbar. Für Operationsfolgen mit mehreren Umformstufen ist die Frage nach der oder den zu optimierenden Umformstufen interessant. Nicht zuletzt hängt der Erfolg der Methode im Presswerk aber an anderen Dingen: der frühzeitigen und vollständigen Einbindung aller Beteiligten in den Prozess.

1. Einleitung

Das Überleben des mittelständischen Werkzeugbaus in Europa ist im Zeitalter des globalen Wettbewerbs mit globaler Auftragsvergabe nicht ohne ständige Innovation des Einzelunternehmens machbar. Dies ist z.B. im Automobilsektor daran erkennbar, dass schon heute Auftragsvergaben an die Lieferung einer Absicherung der Ziehanlage mittels Simulation gekoppelt sind. Auch wenn in anderen Marktsegmenten noch ein Fertigen nach Zeichnung akzeptiert wird, so wird der immense Innovations- und Rationalisierungsdruck insbesondere aus dem asiatischen Raum zu einem raschen Umdenken zwingen.

Während die Einführung des CAD, die sich gut über ein Jahrzehnt hinzog, inzwischen in der Umsetzung und auch kostenseitig akzeptiert ist, scheint die Nutzung einer virtuellen Presse zur virtuellen Anfertigung von Bauteilen noch als notwendiges Übel angesehen zu werden. Dies ist verständlich, wenn man das Ergebnis der Umformsimulation als eine Art Feigenblatt oder Eintrittskarte zu einer Beauftragung sieht. Nutzt man die Umform Simulation jedoch in der ganzen Bandbreite, nämlich zur Optimierung der Fertigungsmethode, im Vorfeld zu einer Anfertigung von Werkzeugen, so wird der Nutzen, im Vergleich zu den Kosten eindeutig überwiegen. Denn gerade Erprobungsschleifen in Stahl und Eisen resultieren in Kostenblöcken, die Lizenzgebühren überschaubar erscheinen lassen.

Noch wichtiger als der Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit, ist das Mitspielen an der aktuellen Front der Innovation. Diese ist nach Einschätzung des Autors im Moment z.B. in der Kompensation der Rückfederung für anspruchsvolle Tiefziehbauteile zu sehen. Die methodische Vorgehensweise ist jetzt Stand der Technik.

2. Kompensation der Rückfederung

Während der Simulation der Umformung wird ein virtuelles Bauteil durch den Stempel, die Ziehmatrize und z.B. Ziehsicken elastisch / plastisch deformiert. Nach dem Entlasten des Bauteils durch das Entfernen der Werkzeuge und einem eventuellen Beschnitt federt das

Bauteil, elastisch auf. Diese eigenspannungsbedingte Rückfederung lässt sich schon seit einigen Jahren hinreichend gut simulieren (Bild 1). In der jüngeren Vergangenheit stand aber zunächst die Beurteilung der Machbarkeit hinsichtlich des Auftretens von Reißern und Falten im Mittelpunkt des Interesses.

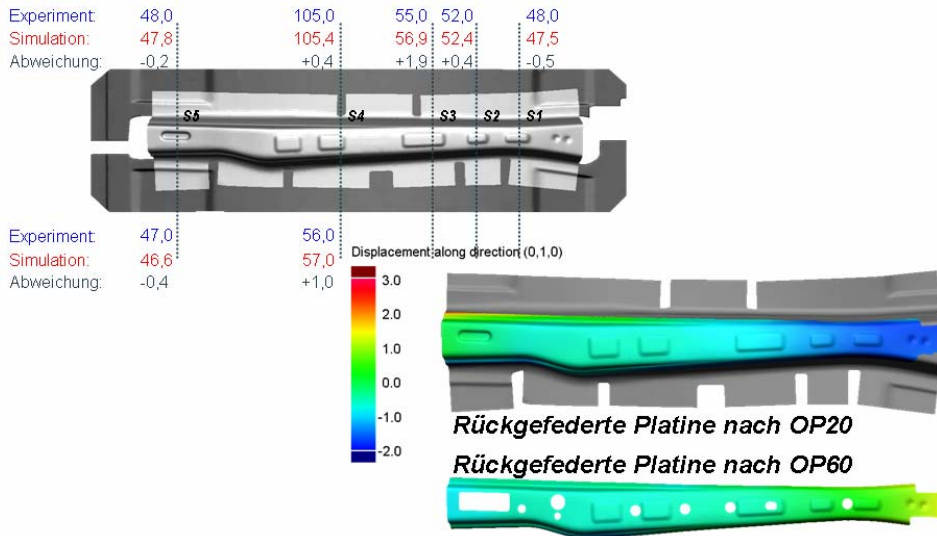


Bild 1: Rückfederungsverhalten eines Längsträgers

Impulsgeber für den Trend zur Kompensation der Rückfederung von Blechumformteilen ist die Automobilindustrie. Dort befindet sich die praktische Umsetzung der Methode gerade in der Hochlaufphase. Betrachtet werden aktuell großflächige Bauteile, bei denen über die Optimierung der Ziehstufe eine Verbesserung der Maßhaltigkeit erreicht werden kann. Davon ausgehend ist zu erwarten, dass Strukturbauteile, die über mehrstufige Umformoperationen hergestellt werden, zukünftig in den Fokus rücken werden.

2.1 Methoden der Rückfederungskompensation

Die klassische Methode der Wahl zur Verringerung der Formweichungen war in der Vergangenheit oft prozessbezogen. Ziel war die Erhöhung des Auszugs im Bauteil durch das Einbringen von Ziehstufen oder das Erhöhen des Niederhalterdrucks. Mit dieser Vorgehensweise können allerdings nur Bauteilbereiche beeinflusst werden, die im Bereich der Stempeldurchgangsöffnung liegen. Stufen sind als Stellhebel nur bedingt geeignet, da beim Durchlaufen derselben Hin- und Herbiegungen auftreten, die zu einer weiteren Erhöhung der Formabweichung beitragen. Will man dies vermeiden, so ist der Bereich des Ziehstückerdurchlaufs komplett abzuschneiden. Das bedingt aber einen unerwünscht erhöhten Materialeinsatz. Die iterative Änderung der Werkzeuggeometrie mit einem gezielten Bombieren von Teilbereichen ermöglichte die Verbesserung auch von Bereichen fern des Stempeldurchgangs. Es liegt auf der Hand, dass die genannten klassischen Methoden Zeit und kostenintensiv sind.

Mit der aktuellen CAD- und Simulationstechnik stehen dem Anwender Methoden zur Verfügung, die deutlich effizientere Problemlösungen ermöglichen. Im Bereich der Umformsimulation hat sich die virtuelle Bombierung der Werkzeugoberflächen etabliert. Dazu wird das

virtuell umgeformte und zurückgefederte Bauteil mit der vernetzten Referenzgeometrie verglichen und ein Verschiebungsfeld aus den Distanzen der zurückgefederten Knoten und der Referenzknoten gebildet. Um die virtuelle Werkzeugoberfläche zu bombieren bzw zu überbiegen, wird dieses invertiert und auf dieselbe aufgebracht. Es ist weiter möglich, das Verschiebungsfeld mit einem so genannten Kompensationsfaktor zu beaufschlagen, um dem Ziel eines maßhaltigen Bauteils näher zu kommen (Bild 2). Ähnlich der Realerprobung lebt auch die virtuelle Kompensation von Iterationsschleifen. Durch eine bzw. weitere Umformsimulationen und Rückfederungen werden weitere Verschiebungsfelder ermittelt, über die normalerweise nach drei bis vier Iterationen das Bauteil in den geforderten Toleranzbereich gebracht wird.

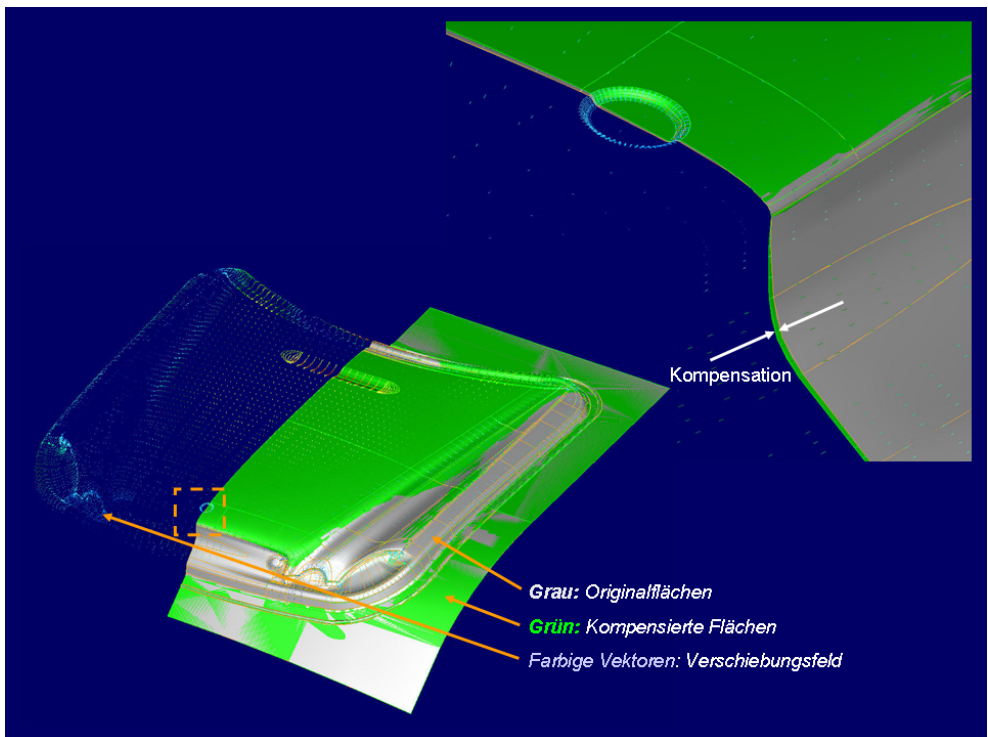


Bild 2: Gegenüberstellung der Werkzeugflächen vor und nach der Kompensation, sowie des Verschiebungsfeldes
Quelle: iCapp

Das virtuell kompensierte Werkzeug und die Ziehwerkzeugausgangsgeometrie bilden gemeinsam wiederum ein Verschiebungsfeld, mit dessen Hilfe nun die CAD-Daten des Werkzeugs modifiziert werden. Über diese Vorgehensweise lassen sich Wirkflächen generieren, die qualitativ der CAD-Ausgangsgeometrie gleichwertig sind.

2.2 Prozess der Kompensation mit PAM-STAMP 2G

Um das Ziel zu erreichen, fräsfähige Werkzeugoberflächen herzustellen, bedarf es einer sorgfältigen Vorgehensweise, wobei hier zunächst der simulationsseitige Teil prinzipiell beschrieben werden soll. Die Einzelheiten aller numerischen und Prozessrandbedingungen zu nennen würde den Rahmen der Veröffentlichung sprengen. Erwähnenswert ist aber die Tatsache dass abweichend von den üblichen Darstellungen ebener Flächen durch grobe Netze für das Überbiegen der Werkzeuge eine hinreichend gute Abbildung auch der ebenen

Flächen erforderlich ist. Denn diese Flächen werden während des Kompensationsprozesses teilweise mit einer Krümmung versehen (Bild 3).

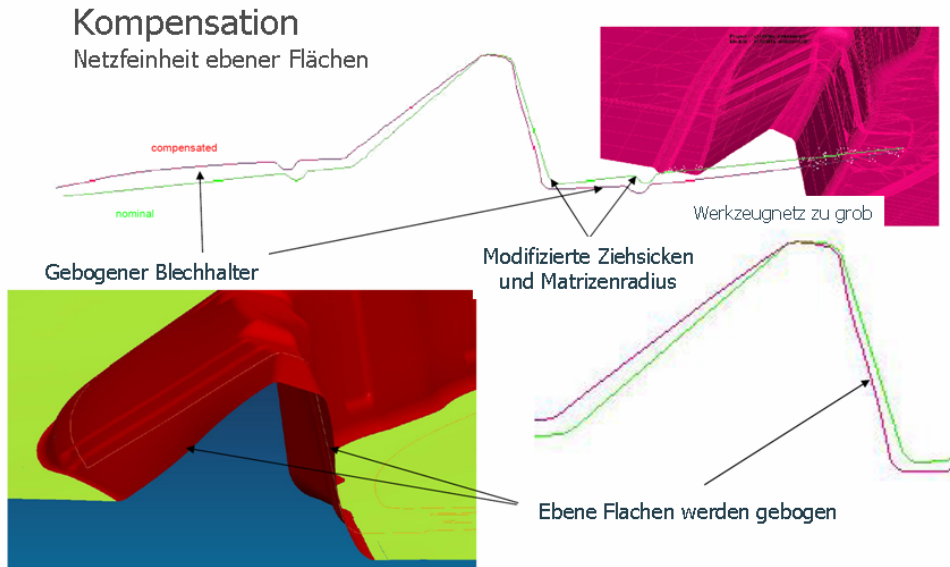


Bild 3: Überbiegung ebener Flächen

Quelle: Adam Opel GmbH

Während in der Vergangenheit Programme zum Erstellen der Ankonstruktion wie z.B. PAM-DIEMAKER die Bauteilgeometrie unangetastet ließen, ist es für die Kompensation der Rückfederung erforderlich, auch für Außenhautteile, das Bauteil zu modifizieren, um das eigentliche Ziel der „CAD-Nulllage“ zu erreichen. Dies geschieht jedoch in PS2G automatisch und ohne Benutzereingriff.

Auf der numerischen Seite ist die erzielte Genauigkeit in der Vorhersage der verbleibenden Eigenspannungen dem so genannten Accurate Contact zuzuschreiben. Dieser nichtlineare Kontakt vermeidet in der Simulation eine Durchdringung von Platine und Werkzeug und bildet gleichzeitig vereinfacht die Elastizität der Werkzeuge ab. Er ermöglicht so adäquate Annäherung an die realen Prozessbedingungen. Spannungen und Dehnungen werden so gut abgebildet, dass eine zuverlässige Rückfederungsvorhersage möglich ist. Diese ist die notwendige Grundlage der Kompensation.

Wesentliches Detail ist weiterhin die Berücksichtigung geometrisch modellierter Ziehsicken an Stelle von Ersatzmodellen, die die mit dem Durchlauf der Sicke verbundenen Biege- und Formänderungsanteile nicht oder nur vereinfacht abbilden (Bild 4). Denn nach dem Beschnitt im Bauteil verbleibende Bereiche, die eine Ziehsicke durchlaufen haben, erzeugen in angrenzenden Flächen Biegemomente.

Notwendige Voraussetzung für die Kompensation von Bauteilen ist die Erreichung eines entsprechenden Reifegrades. Sie sollten grün, d.h. reißen- und faltenfrei herstellbar sein. Vor der automatisch ablaufenden Kompensation sind durch den Anwender nur wenige Angaben notwendig: das geforderte Toleranzfeld, der Anteil der Bauteilfläche im Zielkorridor und die maximale Anzahl der zu rechnenden Iterationen (Bild 5). Beispielsweise sind dies +/- 0,5 mm, 90% der Bauteilfläche und 6 Iterationsschleifen.

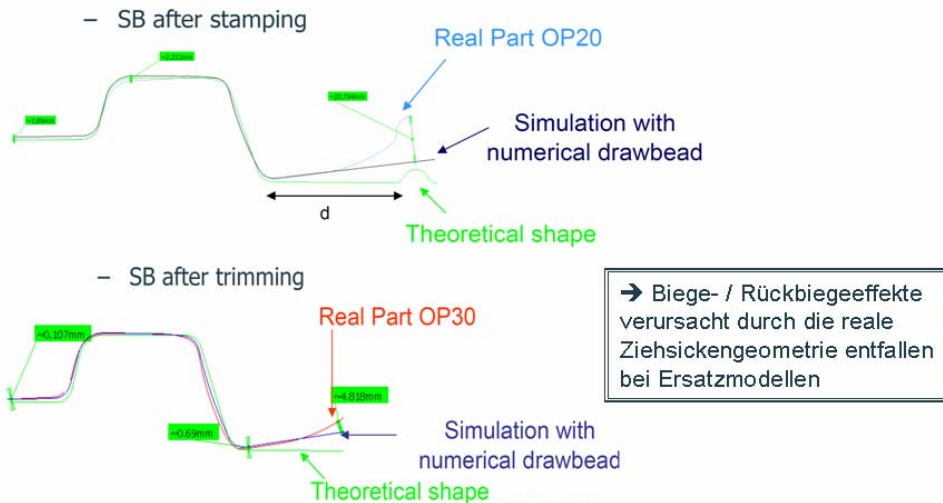


Bild 4: Vergleich der Simulation mit Ziehsickenersatzmodell zum Realbauteil

Quelle: PSA

Nach erfolgreicher Beendigung des Kompensationsvorgangs kann der Anwender mit dem nun vorhandenen kompensierten Werkzeugnetz, dem Ausgangsnetz und der CAD- Geometrie des Werkzeugs die neuen CAD-Wirkflächen erstellen. Dies kann z.B. sehr benutzerfreundlich mit dem Programm panelshop der Firma iCapp geschehen.

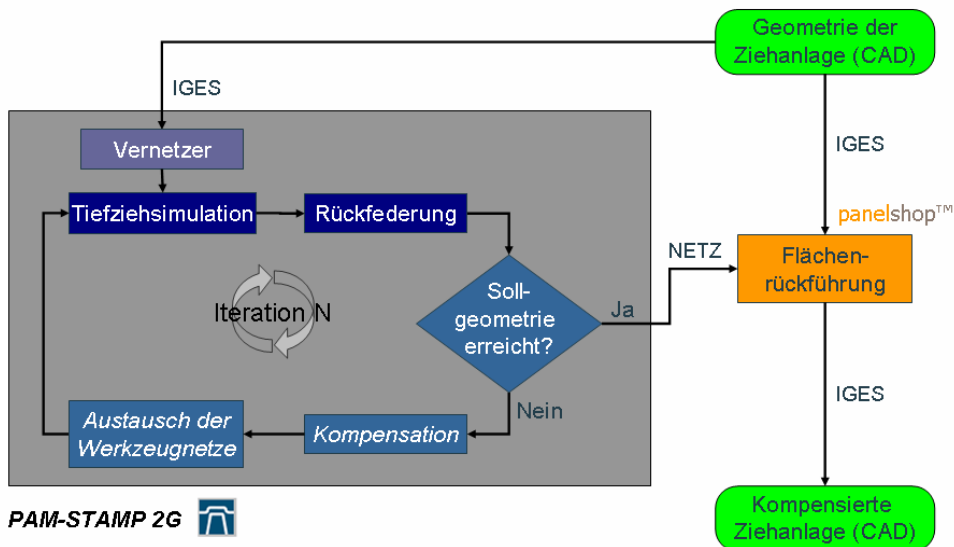


Bild 5: Prozessablauf der Rückfederungskompensation mit PAM-STAMP 2G

2.3 Wesentliche Voraussetzung: robuste Prozesse

Übereinstimmende Rückmeldungen aus der Praxis ergeben die Forderung, erst einen robusten Prozess anzustreben und dann mit der Kompensation der Rückfederung zu beginnen. Dies lässt sich für Strukturbauteile in vielen Fällen durch das Einbringen von Verprägungen erreichen (Bild 6). Für Bauteile im Sichtbereich sind eher eine homogenere Verteilung der Ausstreckung und wenn möglich kleinere Radien anzustreben. Das Ziel ist in beiden Fällen möglichst alle Bauteilbereiche plastisch umzuformen und über die resultierende Kaltverfestigung zu stabilisieren.



Reduzierung der Rückfederung durch Einbringen von Verprägungen. Die Kompensation hoher Rückfederungswerte ist aufgrund der Streuung der Material- und Prozessparameter nicht zielführend.

Bild 6: Versteifung eines flächigen Bauteils durch Sicken

Quelle: Adam Opel GmbH

Genau genommen wird nach der bisher beschriebenen Methode aber nur ein Prozesspfad einer Ziehoperation oder Operationsfolge untersucht. Denn Materialschwankungen, der Einfluss variierender Reibung, Verschleiß der Werkzeuge usw. bleiben dabei unberücksichtigt. Diese sind gegebenenfalls im Anschluss z.B. mittels Grenzmusterbetrachtungen oder stochastischer Analysen z.B. mit PAM-OPT zu vertiefen.

Stochastische Untersuchungen zur Robustheit des Tiefziehprozesses gegenüber Streuungen in der Materialqualität kombiniert mit unterschiedlichen Stoffflusssteuerungen durch Ziehsicken, zeigen einen überwiegenden Einfluss der Ziehsicken hinsichtlich der Rückfederungsbandbreite auf. Da sich stochastische Untersuchungen und Grenzmusterrechnungen aufgrund des erhöhten Zeit- und Kostenaufwandes noch nicht flächendeckend durchgesetzt haben, sind hier weitere Untersuchungen zu diesem Thema zu erwarten.

Außerdem ist die Materialflusssteuerung über Distanzen für bestimmte Bauteilklassen deutlich anders gelagert, so dass hier Schwankungen der Materialparameter und auch die Elastizität der Werkzeuge stärker zum Tragen kommen. Letztere wird in PS2G bisher nur ansatzweise über den Accurate Contact berücksichtigt. Werkzeugdurchbiegungen lassen sich aktuell nur über rechenintensive Volumenmodelle darstellen. Künftige Weiterentwicklungen befassen sich mit der Berücksichtigung der Werkzeugelastizität über die Methode der statischen Kondensation.

2.4 Kompensation mehrstufiger Prozesse

Die Simulation mehrstufiger Umformungsoperationen ist schon seit einiger Zeit technisch möglich und auch anwenderfreundlich durchführbar. Wesentliche Voraussetzung ist die Verfügbarkeit der Wirkgeometrie für die zu betrachtenden Umformstufen. In Anbetracht der heute vielfältig vorhandenen Streifenauslegungsprogramme sollte dies zumindest für im Folgeverbund gefertigte Stanzteile ohne Probleme machbar sein. Wirtschaftlich sinnvoll ist diese Vorgehensweise für komplexe Bauteile mit hohen Umformanteilen. Interessant ist auch die Optimierung von Bauteilen, deren Hauptumformung z.B. durch einen oder mehrere Tubenziehprozesse beeinflusst wird.

In der industriellen Anwendung der Rückfederungskompensation ist bisher die Betrachtung der Hauptumformstufe kombiniert mit den Beschnittstufen Stand der Technik. Die aktuelle Simulationstechnik würde zwar die Betrachtung der gesamten Operationsfolge erlauben, dies scheint aber aus verschiedenen Gründen noch nicht praktisch umsetzbar. Zum einen sind die Zeitfenster für den Einsatz der Rückfederungskompensation eng bemessen und zum anderen ist noch keine allgemein anwendbare Strategie für die Kompensation bestimmter Teilefamilien bekannt. Trotzdem wäre eine auf den zu Teilefamilien vorhandenen Erfahrungen des Werkzeugbauers basierende Vorgehensweise denkbar.

3. Herausforderungen in der praktischen Umsetzung

Nehmen wir einmal an, die in Kapitel 2. beschriebenen Voraussetzungen zur simulationsseitigen Kompensation der Rückfederung sind erfüllt, so liegt die Überführung dieser Ergebnisse in reale Bauteile in der Hand des Praktikers. Diese Aussage mag etwas provokativ klingen, trifft jedoch die betriebliche Praxis. Die Kompensation der Rückfederung ist eine Führungsaufgabe. Nur die kooperative Zusammenarbeit der Bereiche Konstruktion / Methodenplanung mit dem Werkzeugbau / Erprobung kann hier zum Ziel führen. Sinnvollerweise sollte der für die spätere Erprobung des Werkzeugs verantwortliche Mitarbeiter schon während der virtuellen Gestaltung / Evaluierung der Methode und der Kompensation der Rückfederung in einem konstruktiven Dialog mit dem für die Simulation zuständigen Mitarbeiter stehen.

Hier könnte das wieder Aufgreifen des in der Vergangenheit verwendeten Begriffs „virtuelle Presse“ hilfreich sein. Denn die Umformsimulation ist weitaus mehr als die Erzeugung eines bunten Bildes und einer entsprechenden Ampelfarbe. Sie ist vielmehr eine virtuelle Werkzeugmaschine zur Gestaltung eines optimalen Herstellprozesses. Die Umformsimulation hat also qualitätsgestaltenden Charakter. Vergleichbar mit der Einführung des CAD-Systems ist hier betriebliche Überzeugungsarbeit erforderlich. Wenn es gelingt die Mitarbeiter aus der Erprobung in den Prozess der Wertschöpfung bis hin zur Kompensation der Rückfederung einzubeziehen, sollte die Einführung derselben erfolgreich sein.

Praktisch kann die Erfahrung des Werkzeugmachers für das Einstellen der lokal erforderlichen Rückhaltekräfte der Ziehsticken für die Simulation genutzt werden. Ebenso können gemeinsam mit der Methodenplanung Vorschläge zur Optimierung des Stoffflusses in kritischen Bereichen z.B. über Variation der Platinenkontur diskutiert werden. Wenn dieser Weg effizient zum gewünschten Resultat führt, sind auch eventuelle Mehrkosten für die Mitwirkung des Werkzeugbaus am Bildschirm unerheblich.

Erfahrungen aus der automobilen Praxis zeigen schon jetzt, dass über die Berücksichtigung der Vorgaben des virtuellen Umformprozesses in der Einarbeitung, sich die prognostizierten Resultate hinsichtlich der Kompensation nachvollziehen lassen. Für die bisher betrachteten Bauteile war hier insbesondere der Abgleich des Einzugs in der Erprobung wesentlich für den Erfolg.

4. Entwicklungen zur Optimierung des Rohbaus

Standen in der Vergangenheit die Optimierung von Fertigungsprozessen, wie Gießen, Schmieden oder Tiefziehen im Vordergrund des betrieblichen Einsatzes der Simulation, so rückt heute das virtuelle Prototyping, wie z.B. die Crashsimulation, dichter an diese Prozesse heran. Während die Übertragung der virtuellen Gebrauchseigenschaften von Tiefziehteilen in die Crashsimulation langsam tägliche Praxis wird, sind durchgängige Prozessketten noch im Entstehen. Diese können zum Beispiel das Tiefziehen mit nachfolgenden thermischen oder mechanischen Fügeoperationen umfassen. Jede weitere Fertigungs- / Fügeoperation bedingt Qualitätsveränderungen, die zu optimieren sind und eine Änderung der Gebrauchseigenschaften des Zusammenbaus, die in das nachfolgende Prototyping einzubringen sind. Fernziel ist der Übergang vom Digital Mockup, d.h. den assemblierten CAD-Daten zum digitalen Prototyp mit hinreichend genauer Abbildung aller relevanten Gebrauchseigenschaften. Diese sind dann im virtuellen Prototyping, d.h. dem Crash, der Betriebsfestigkeit und dem Akustikverhalten (NVH) zu testen.

4.1 Mechanisches Fügen

Der ungebrochene Trend zu Fahrzeugvarianten mit geringeren Stückzahlen erfordert kostengünstige Fertigungsverfahren und entsprechende Rohbaukonzepte. Alternativ zum mechanischen Falzen kann hier z.B. das Rollfalzen zur Anwendung kommen. Dieses Verfahren ist sehr flexibel und mit geringen Investitionskosten verbunden. Ziel der Simulation dieses Fertigungsverfahrens ist die Vermeidung aufwendiger Vorrichtungen, Programmierarbeiten und Erprobungen während der Prototypenentwicklung und der Nullserie.

Das Augenmerk liegt neben der optimalen, fehlerfreien Gestaltung des Falzvorganges auf der resultierenden Formabweichung des Zusammenbaus durch die Summe der Rückfederungen der Einzelbauteile überlagert durch die umlaufende Falzung (Bild 7).

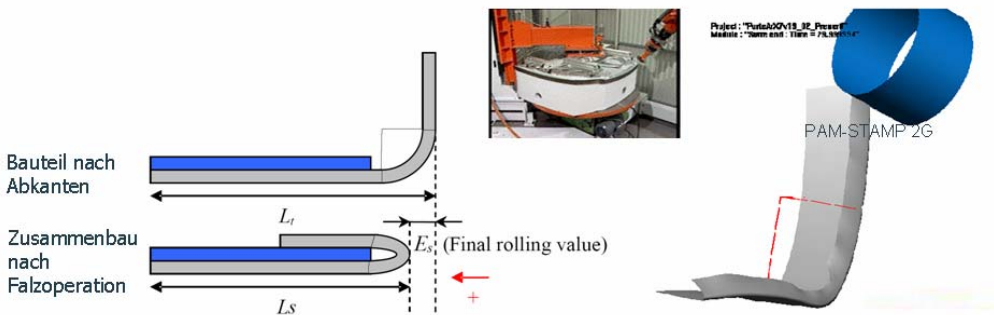


Bild 7: Rollfalzen als Methode zum Fügen kleinerer Stückzahlen

Quelle: PSA

Während erste Ansätze zur Simulation des Rollfalzens bekannt sind, befindet sich die Umsetzung einer anwenderfreundlichen Bedienoberfläche dieses Verfahrens für PS2G aktuell in der Entwicklung. Dabei liegt die Herausforderung weniger in der Umsetzung der Mechanik und der Kontaktformulierung, als in der Reduzierung der erforderlichen Rechenzeit durch eine lokale Betrachtungsweise der eigentlichen Umformzone. Die Abbildung des physikalischen Prozesses wird analog zur Programmierung der üblicherweise von einer Roboterhand geführten Falzrolle erfolgen.

Ähnliches gilt auch für das konventionelle Falzen, wo mittels der Simulation schon im Vorwege die Falzqualität und die entstehenden Falzverluste ermittelt werden könnten. Vorhandene Erfahrungen und Strategien zur Beherrschung resultierender Formabweichungen könnten dann nach der Bereitstellung von Simulationswerkzeugen systematisch optimiert werden. Insbesondere ließe sich dann auch die für das Falzen notwendige Beschnittlage der Einzelteile in der vorgelagerten Umformoperationsfolge optimieren.

Die industrielle Umsetzung der Thematik Falzen befindet sich auf dem Stand, den die Kompensation der Rückfederung vor fünf Jahren hatte. Die erforderlichen softwaretechnischen Voraussetzungen für mechanische Falzvorgänge sind prinzipiell vorhanden. Entwicklungsbedarf besteht auf jeden Fall z.B. noch im Bereich der Simulation der Klebverbindungen.

4.2 Thermisches Fügen

Für die Verzugsproblematik zweier thermisch gefügter Bauteile wurde eine Prozessstrategie von der ESI GmbH entworfen (Bild 8). Unabhängig von der Entscheidung, ob im Entwicklungsprozess zuerst die Umformtechnik oder das thermische Fügen geplant werden, kann der Einstieg in das Prozessmodell über den Schritt: Umformen/Kompensieren oder eine schnelle Einschrittlösung erfolgen. Mittels der Einschrittssimulation lassen sich die aus dem Umformprozess erwarteten Spannungen und Dehnungen zumindest in erster Näherung in die Fügesimulation einbringen.

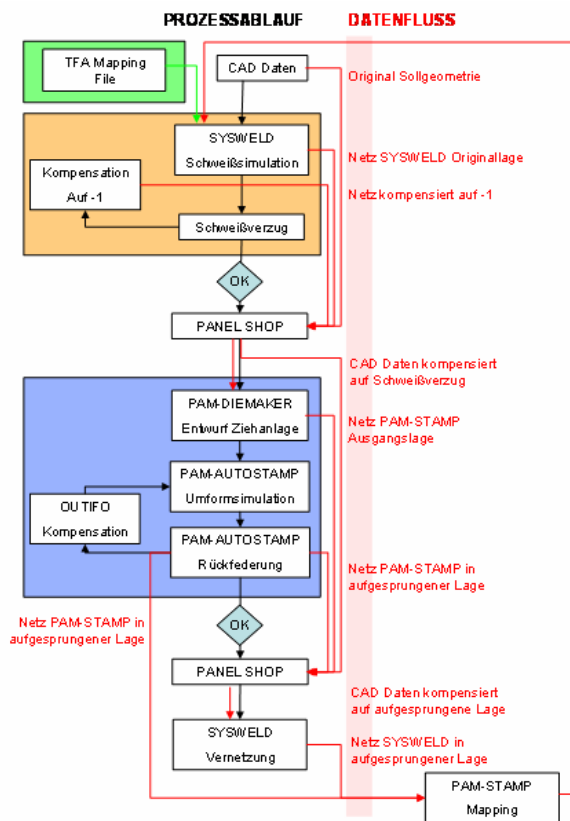


Bild 8: Prozessschema zur Kompensation in der Prozesskette: Tiefziehen - Schweißen

Während eine rein mechanische Fügeoperation, wie das Falzen sich in der gleichen Domäne, wie das Tiefziehen simulieren lässt, ist hier ein Domänenwechsel, z.B. von PAM-STAMP zu SYSWELD, erforderlich. Dies ist machbar über den Vorgang des so genannten Mappings. Dazu werden die notwendigen Parameter, wie Spannungen, Dehnungen, Blechdicken und Anisotropievektoren, von einem Netz auf das andere übertragen. Ziel des aufgezeigten Prozessschemas (Bild 9) ist, die möglichst genaue Abbildung der Rückfederung aus der Umformung im Schweißprozess. Dies geschieht durch die wiederholte Referenzierung von Flächen als Grundlage für die in den jeweiligen Simulationsblöcken verwendeten Netze. Die Durchgängigkeit der Prozesskette wurde nachgewiesen und wird aktuell vom Kunden praktisch evaluiert.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Aktueller Trend der Innovation im Werkzeugbau ist die Einführung der simulationsbasierten Rückfederungskompensation. Der Nutzen der Methode ist im automobilen Umfeld eindeutig nachgewiesen. Eine erfolgreiche Umsetzung in der Praxis bedeutet neben der Verfügbarkeit der Methode insbesondere die Einbindung der Mitarbeiter aus dem Werkzeugbau und der Erprobung in den Methodenentwicklungsprozess. Verbesserungspotenzial liegt heute in der automatisierten Untersuchung von Material- und Prozessschwankungen, z.B. in Form von Grenzrechenungen. Ähnliches gilt für die Berücksichtigung der Werkzeugelastizität und des Presseneinflusses, die zukünftig auch in die Simulation einfließen werden.

Zunehmend rückt auch das Thema des mechanischen oder thermischen Fügens von Einzelteilen zu Komponenten in den Blickpunkt des Interesses. Die Simulation jener Prozessketten ist prinzipiell schon heute möglich. Die benutzerfreundliche Ablaufgestaltung wird aktuell entwickelt. PAM-STAMP 2G wird zukünftig auch die Simulation des Sonderverfahrens Rollfalzen unterstützen.

Automobilseitig geht der Trend hin zur Erstellung eines digitalen Prototyp-Fahrzeugs für die virtuelle Erprobung. In diesem Prototyp werden u. a. die Gebrauchseigenschaften der Blechzusammenbauten unter Berücksichtigung aller relevanten fertigungs- und fúgetechnischen Einflüsse eingebracht. Die Simulation von Prozessketten wird daher auch zukünftig Thema bleiben und noch an Gewicht zunehmen.