

Berücksichtigung von Werkzeug- und Pressenelastizitäten in der Umformsimulation zur verbesserten Vorhersage des Pressenkraftbedarfs

Improving the Press Tonnage Prediction in Sheet Metal Forming Simulation Incorporating the Elastic Tool and Press Deformation

Dipl.-Ing. **Robert Struck**, Dr.-Ing. **Steffen Kulp**, Volkswagen AG, Wolfsburg;
Prof. Dr.-Ing. **Bernd-Arno Behrens**, Dr.-Ing. **Richard Krimm**,
Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen,
Leibniz Universität Hannover, Garbsen

Kurzfassung

Ein entscheidendes Kriterium zur Auswahl der optimalen Pressenstraße in der Presswerksbelegungsplanung ist die benötigte Pressenkraft. Die Kraft zum Ausformen des Bauteils wird maßgeblich durch die Stößellage und den damit verbundenen Werkzeugschluss beeinflusst. Dieser schließt das bei Karosseriestrukturenteilen übliche Hohlprägen von sickenartigen Strukturen ab. Der hohe Kraftbedarf wirkt sich hierbei stark auf die Verformungen von Werkzeug und Presse aus und führt zu pressenspezifischen Kraftbedarfen. In diesem Beitrag wird auf die Genauigkeit der Kraftberechnung in der Umformsimulation, die Ermittlung des Werkzeugschlusses sowie die Berücksichtigung von Werkzeug- und Pressenelastizitäten in der Umformsimulation eingegangen.

Abstract

A decisive criterion for the selection of the optimal press line within the press shop's layout plan is the required press force. The force to form the component is significantly affected by the stroke range and the corresponding tool closure. The latter finalises the embossing process commonly used for reinforced structures on body components. The high forces required hereby strongly impact the deformation of the tool and the press and result in force requirements specific to individual presses. This paper deals with the accuracy of force calculation for forming simulations, the determination of the tool closure and the incorporation of the tool and press elasticity within the forming simulation.

1. Einleitung

Die Automobilindustrie steht vor großen Herausforderungen wie dem globalisierten Wettbewerb, steigenden Materialkosten, Reduzierung des CO₂-Ausstosses und hohe Anforderungen an die Fahrzeugsicherheit. Diese verlangen von den Unternehmen umfassende Maßnahmen, um im internationalen Wettbewerb bestehen zu können. Aktuelle Tendenzen zielen daher u. a. auf eine Effizienzsteigerung im Produktentstehungsprozess bei gleichzeitiger Kostenreduzierung ab, um dem starken Wettbewerb und steigenden Materialkosten zu begegnen. Leichtbau wie auch eine verbesserte Crashesicherheit hingegen erfordern den Einsatz neuer Werkstoffkonzepte und Bauweisen [1].

Für Planung, Fertigung und Betrieb von Umformwerkzeugen zur Herstellung von Karosseriebauteilen ergeben sich somit neue Herausforderungen. Eine Maßnahme zur Effizienzsteigerung im Produktentstehungsprozess ist hierbei die Verlagerung von Arbeitsaufwänden in die frühen Phasen der Entwicklung. Es wird das Ziel verfolgt, so früh wie möglich eine Produktbeeinflussung unter fertigungstechnischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten vornehmen zu können. Bei Karosserieeinzelteilen bestehen diese u. a. in der Erhöhung des Materialnutzungsgrades, der Einsparung von Prozessstufen und der optimalen Belegung geeigneter Pressenstraßen, die durch die Simulation von Fertigungsprozessen abgesichert wird [2]. Der geforderte Einsatz neuer Werkstoffgüten wie bspw. höher- und höchstfester Stähle stellt wiederum die Simulation vor neue Herausforderungen, da nur auf geringes Erfahrungswissen sowie teils unzureichende Material- und Versagensmodelle zurückgegriffen werden kann [3].

Der Einsatz höher- und höchstfester Stähle hat einen deutlich erhöhten Kraftbedarf zur Folge und erfordert eine zunehmend genauere Berechnung der benötigten Pressenkraft, da viele bestehende Pressenanlagen dicht an ihrer Nennkraft betrieben werden müssen. Falsche Berechnungsergebnisse führen bei einer Unterschätzung zu erheblichen Änderungs- und Umplanungskosten während ein überschätzter Kraftbedarf zu beträchtlichen Opportunitätskosten führen kann.

Doch auch eine korrekte Simulation des Kraftbedarfs kann im Betrieb des Werkzeugs zu deutlich erhöhten Belastungen aufgrund einer nicht optimalen Stößellage der Presse führen [4]. Ein bezüglich einer Pressenanlage optimiertes Werkzeug, im Zusammenspiel mit einer optimal eingestellten Stößellage, birgt weiteres Potential auch im Sinne der energieeffizienten Produktion.

2. Einflussgrößen auf den Pressenkraftbedarf der Ziehstufe von Karosseriebauteilen

Die Identifikation der Einflussgrößen auf die Pressenkraft erfordert eine klare begriffliche Trennung der Kraftbedarfe (Bild 1). Die Pressenkraft ist die von der Presse aufzubringende Kraft, welche für die Pressenbelegungsplanung herangezogen wird. Diese ist aufgrund von Verformungen des Gesamtsystems größer als die Werkzeugkraft, welche vom Stößel auf das Oberwerkzeug wirkt. Diese wiederum ist aufgrund von weiteren Werkzeugverformungen größer als die Umformkraft, die auf das eigentliche Blechwerkstück wirkt und dieses umformt [5].

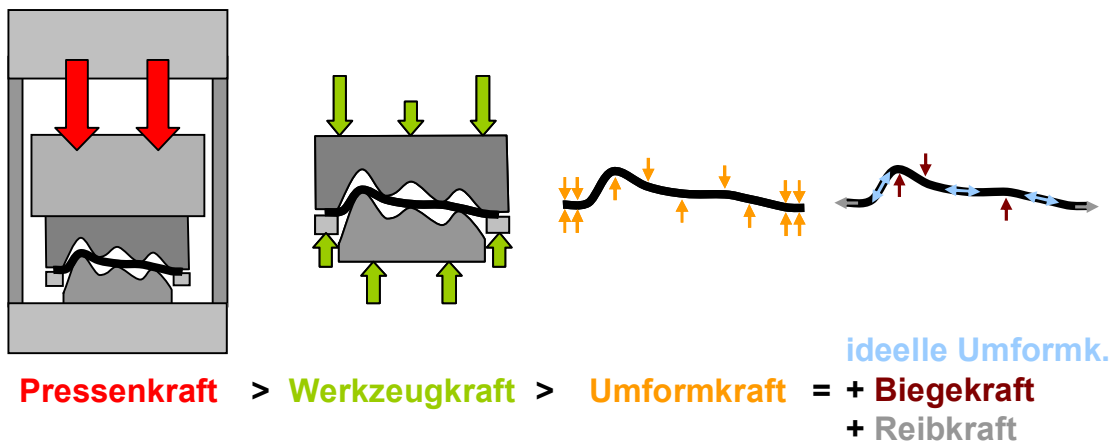


Bild 1: Kraftbedarfe zum Ausformen eines Karosseriebauteils

Die Umformkraft setzt sich bei Tiefziehteilen aus der ideellen Umformkraft, der Biegekraft und der Reibkraft zusammen. Über den Ziehprozess hat die Reibkraft bei großflächigen Bauteilen einen maßgeblichen Einfluss auf den Umformkraftbedarf [6]. Die zur Pressenauswahl benötigte Maximalkraft tritt jedoch zum Abschluss des Ziehvorgangs mit dem Hohlprägen der bei Karosseriestrukturen üblichen Versteifungssicken auf [4]. Der aufgrund von Reibung auftretende Kraftbedarf kann bei im Automobilbau üblichen Blechdicken von größer 0,5 mm vernachlässigt werden [7,8].

Den größten Einfluss auf die minimal notwendige Kraft zum Ausformen eines Karosseriebauteils und den damit maximalen Kraftbedarf pro Hub hat die Ermittlung des Werkzeugschlusses, da ab diesem Punkt jede zusätzliche Kraft nur zu einer weiteren elastischen Verformung des Gesamtsystems ohne weitere geforderte plastische Umformung des Werkstücks führt.

Pressen- und Werkzeugelastizität

Der Einfluss der Pressen- und Werkzeugelastizität auf die zum Ausformen eines Karosseriebauteils notwendige Kraft ist aus Erfahrungswissen bekannt. Diese werden besonders bei großflächigen und stark verprägten Bauteilen deutlich, wenn das Werkzeug auf einer im Gegensatz zur Produktionspresse steifen Einarbeitspresse endtuschiert wurde. Maßnahmen bei notwendiger Verringerung des Kraftbedarfs in der Produktionspresse sind hierbei meist ein Abschleifen der Enddistanzen wie ein u. U. erneut notwendiges Einarbeiten der Werkzeugwirkflächen zur Kompensation der globalen Deformationen der Werkzeuge. Ziel der nachfolgend dargestellten Untersuchungen ist die Einflüsse der Pressen- sowie der Werkzeugsteifigkeit auf den Kraftbedarf bzw. das Deformationsverhalten entkoppelt zu untersuchen.



Bild 2: Messaufbau zur Ermittlung der notwendigen Kraftbedarfe mittels Kraftmesskoppelplatte sowie der Tischdurchbiegung und Verfahrswege

Der Einfluss der Pressensteifigkeit und insbesondere der dabei auftretenden Stößel- und Tischdurchbiegungen wurde mittels der Ziehstufe eines Längsträgerwerkzeugs ermittelt. Es handelte sich hierbei um eine 1000-to-Hydraulikpresse A sowie eine mechanische 600-to-Presse B. Neben der Aufnahme der Presseneigenschaften in Anlehnung an DIN 55189 wurde auch die Messung der Tisch- und Stößeldurchbiegung unter definierter Last aufgenommen. Hierbei wurden bereits deutliche Unterschiede in der Durchbiegung der Pressentische deutlich. Der Einsatz einer Kraftmesskoppelplatte (Bild 2), welche zwischen Stößel und Oberwerkzeug montiert wird, ermöglichte eine detaillierte Messung der Gesamtkraft sowie deren Lastverteilung (Bild 3). Mittels Wirbelstromsensoren unter dem Werkzeug konnte der kontinuierliche Tisch-Werkzeug-Kontakt nachgewiesen werden. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die globalen Durchbiegungen von Werkzeug und Tisch zu einer Klaffung im Ziehspalt führen, welcher durch einen zusätzlichen Kraftbedarf geschlossen werden muss.

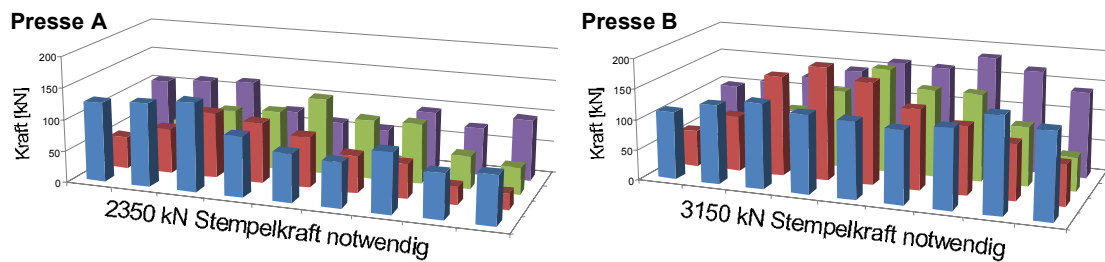


Bild 3: Lastverteilung am Oberwerkzeug bei Erreichen des Werkzeugschlusses auf zwei unterschiedlichen Pressen (ein Balken entspricht einer Kraftmessdose)

Der Einfluss der Werkzeugsteifigkeit auf die Durchbiegung und damit einhergehend auf den Kraftbedarf wurde mittels zweier Versuchswerkzeuge nachgewiesen. Ein vorhandenes Vollstahlwerkzeug wurde zu diesem Zweck digitalisiert, die Wirkflächen durch Flächenrückführung aufbereitet und ein identisches Werkzeug aus einer Zink-Aluminium (ZnAl) Legierung mit entsprechend deutlich niedrigerem E-Modul angefertigt. Zum Ausprägen des Bauteils waren bei dem ZnAl-Werkzeug 10 % weniger Kraft notwendig, was auf nicht ausgeprägte Radien aufgrund des weichen Grundmaterials zurückgeführt werden konnte. Dennoch konnte mittels Kraftmesskoppelplatte eine deutlich andere Lastverteilung festgestellt werden, die bei gleichem Lasthorizont zu einer um bis zu 30 % unterschiedlichen Tischdurchbiegung führte (Bild 4).

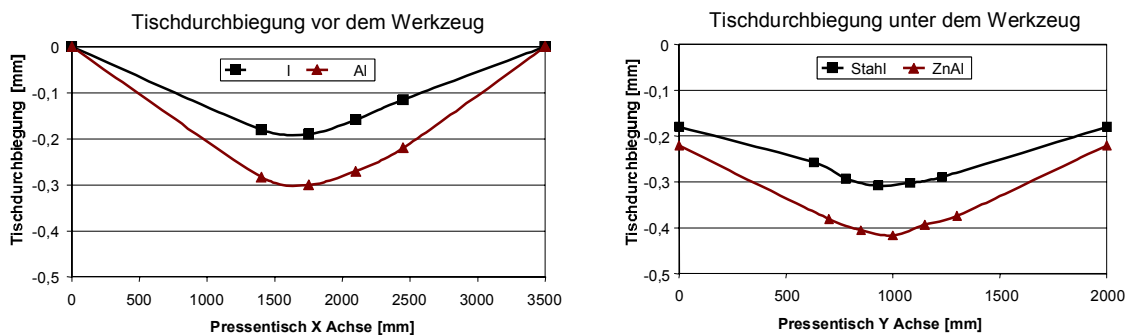


Bild 4: Durchbiegung des Stahl- im Vergleich zum ZnAl-Werkzeug bei gleicher Stößelkraft

Die größere Durchbiegung des ZnAl-Werkzeugs begründet sich auf einer homogeneren und damit zentraleren Krafteinleitung, die aufgrund des nur am Rand gelagerten Pressenschiebetischs zu einem größeren Hebelarm führt [9].

Die beschriebenen Untersuchungen unterstreichen die Notwendigkeit der Berücksichtigung der elastischen Eigenschaften von Werkzeug und Presse in der Umformsimulation zur verbesserten Berechnung der Pressenkraft.

Umformkraftbedarf

Die durchgeführten Untersuchungen des Umformkraftbedarfs fokussieren sich auf das Hohlprägen, da diese Phase das Ziehen eines Karosseriebauteils üblicherweise abschließt und maximalkraftbestimmend ist. Hierbei ist eine kombinierte Streckzieh-Biegebeanspruchung kennzeichnend [10].

Zur genaueren Untersuchung der Kraftbedarfe wurden Hohlprägeversuche unter Variation von Sickengeometrie und -anzahl durchgeführt. Eine noch genauere Aufteilung der Kraftbedarfe wurde für die ideale Umformkraft (Streckziehen) mittels hydraulischer Tiefung und für die Biegekraft mittels Gesenkbiegen mit distanzierendem Niederhalter erreicht. Alle Versuche wurden unter Variation von Materialgüte und Blechdicke durchgeführt. Die Materialkennwerte der Versuchswerkstoffe wurden nach dem Stand der Technik aufgenommen. Die Vergleichsexperimente dienten anschließend der Überprüfung der Berechnungsgenauigkeit unterschiedlicher Softwareprogramme sowie zur Durchführung von Sensitivitätsanalysen mit der Antwortflächenmethode (RSM).

Die ideale Umformkraft konnte durch Simulation der hydraulischen Tiefung mittels Schalenelementen bis kurz vor dem Einschnüren sehr gut wiedergegeben werden (Bild 5).

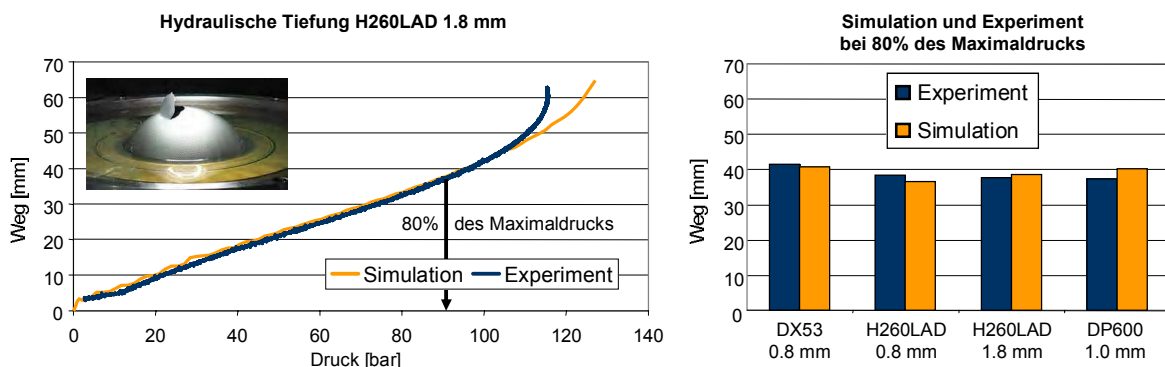


Bild 5: Gemessener und mit LS-Dyna berechneter Weg-Druck-Verlauf einer hydraulischen Tiefung eines H260LAD in 1,8 mm Blechdicke und Abgleich von Experiment und Simulation bei 80% des jeweiligen Maximaldrucks

Die Simulation der Biegekräfte mittels der in der Umformsimulation üblichen Schalenelemente zeigt eine zu erwartende Diskrepanz im Kraftverlauf mit abnehmendem Verhältnis von Elementkantenlänge zu Blechdicke. Der Einsatz dicker Schalenelemente ergibt hierbei eine deutliche Verbesserung. Die besten Ergebnisse werden unter äußerst rechenintensivem Einsatz von Volumenelementen erzielt.

Die Experimente zum Hohlprägen ermöglichten in einem ersten Schritt den Nachweis, dass die Reibung keinen messbaren Einfluss auf den Kraftbedarf hat [9]. Beste Berechnungsergebnisse werden auch hierbei mit einem Massivumformprogramm und

Volumenmodellierung erzielt (Bild 6). In diesem Zusammenhang erfolgte die Erprobung einer Schnittstelle zum Mapping von Schalen- auf Volumenelemente als produktiv einsetzbare Lösung [8]. Auch die von [11] vorgeschlagene Methodik erscheint hierbei vielversprechend.

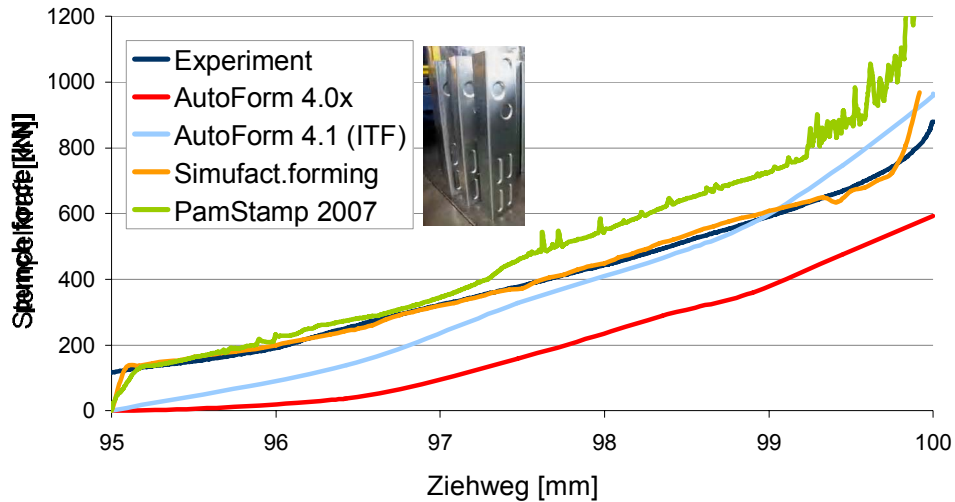


Bild 6: Gemessener und berechneter Stempelkraft-Weg-Verlauf zum Ausprägen von 7 Sicken mit einem H260LAD in 2,0 mm Blechdicke

Werkzeugschluss

Eine genaue Abbildung des Hohlprägevorgangs ist dennoch kein Garant für eine genaue Berechnung der Maximalkraft, da der Werkzeugschluss als eindeutiges Abbruchkriterium im Bereich eines sehr hohen Kraft-Weg-Gradienten liegt.

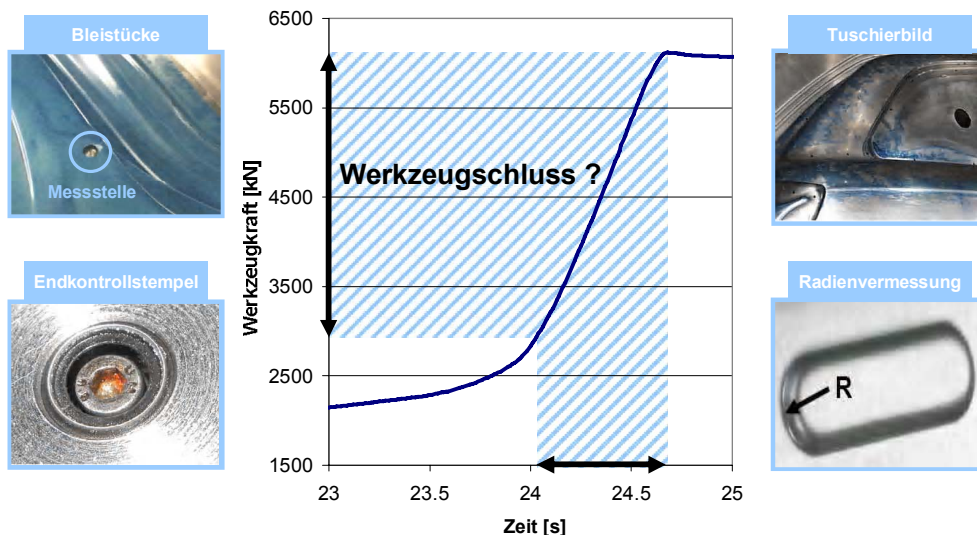


Bild 7: Vier Methoden zur Bestimmung des Werkzeugschlusses

Der Werkzeugschluss stellt nicht nur in der Simulation das wichtigste Kriterium zur exakten und reproduzierbaren Bestimmung der Maximalkraft dar. Heute übliche Methoden in der Einarbeit sind in Bild 7 dargestellt. All diesen mangelt es jedoch an Reproduzierbarkeit aufgrund von Subjektivität sowie des Fehlens eines zeit- und wegdiskreten Signals, so dass viele Iterationen zur Ermittlung der minimal notwendigen Kraft erforderlich sind.

Zur Behebung oben genannter Mängel sowie der messtechnischen online Überwachung des Werkzeugschlusses wurde der elektronische Endkontrollstempel (eEKS) entwickelt [8,9]. Dieser besteht aus einem Endkontrollstempel mit integrierter Kraftmessdose. Der Aufbau ermöglicht den direkten Einbau in bereits vorhandene Norm-Einbauräume in Serienwerkzeugen. Die Funktionsweise ist so, dass durch die Änderung des Kraftflusses bei umgebenem Matrize-Blech-Stempel-Kontakt eine genaue und reproduzierbare Bestimmung des Werkzeugschlusses möglich ist (Bild 8).

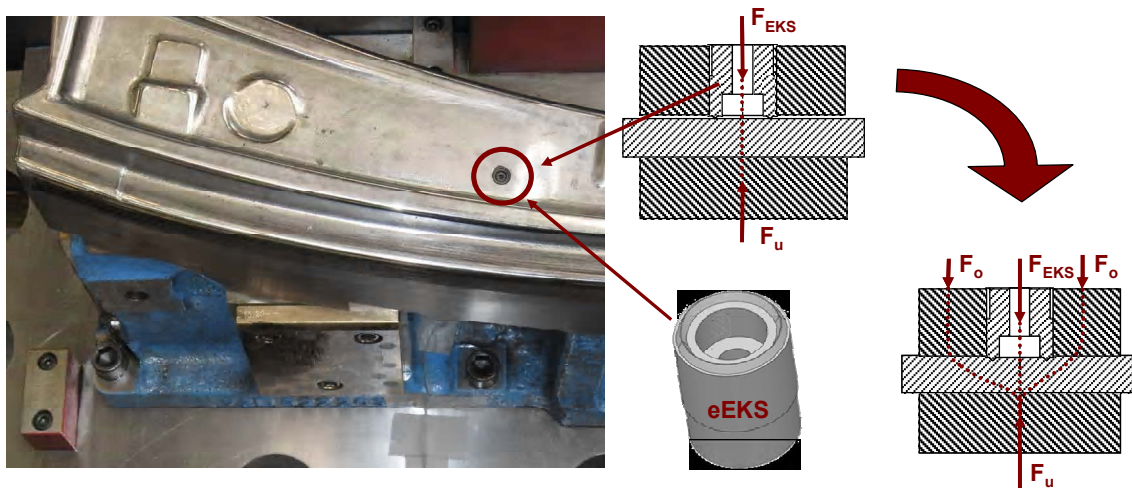


Bild 8: Einbauort des elektronischen Endkontrollstempels (eEKS) im Serienwerkzeug und Darstellung der Kraftflussänderung bei geschlossenem Werkzeug

In der Umformsimulation werden je nach eingesetzter Software unterschiedliche Abbruchkriterien zur Definition des Werkzeugschlusses herangezogen. Neben Kriterien eines beidseitigen Knotenkontaktes, sich nicht weiter ändernden Bauteilspannungen oder lokalen Distanzmessungen mit Verfeinerung kommen üblicherweise globale Wegkriterien zum Einsatz. Diese führen aufgrund ungenauer Wegmessungen oder Wegvergrößerungen durch Blechdickenänderungen zu mehr oder weniger großen Abweichungen. Die größte Schwierigkeit stellt jedoch der Einsatz elastischer Werkzeugstrukturen dar, da hierbei in lokalen Bereichen unterschiedlich große Verschiebungen auftreten können. Aus diesem Grund wurde der eEKS in ein Ersatzmodell überführt und stellt ein zur Realität direkt vergleichbares Kriterium dar [8].

3. Berücksichtigung der Pressen- und Werkzeugelastizität in der Umformsimulation

Die vorangegangenen Untersuchungen verdeutlichen den notwendigen Einsatz elastischer Werkzeugstrukturen sowie eines Pressenmodells zur verbesserten Pressenkraftberechnung. Ziel ist es neben dem Aufbau geeigneter Ersatzmodelle insbesondere verschiedene Methoden zur Berücksichtigung der Modelle in einer produktiv einsetzbaren Berechnung zu überprüfen.

Pressenersatzmodell

Eine der größten Schwierigkeiten bezüglich der Integration vollständiger Pressenmodelle in der Prozesssimulation stellt neben der Berechnungsdauer die Verfügbarkeit dieser Modelle insbesondere bei älteren Pressen dar. Die oben genannte Presse A wird zu Vergleichsrechnungen nachkonstruiert (Bild 9, links) und mit unterschiedlichen Lastfällen beaufschlagt. Der Vergleich mit den gemessenen Werten zur Durchbiegung von Pressentisch und Stößel zeigt deutliche Diskrepanzen auf und würde eine weitere Optimierung des durchaus komplexen Modells erfordern.

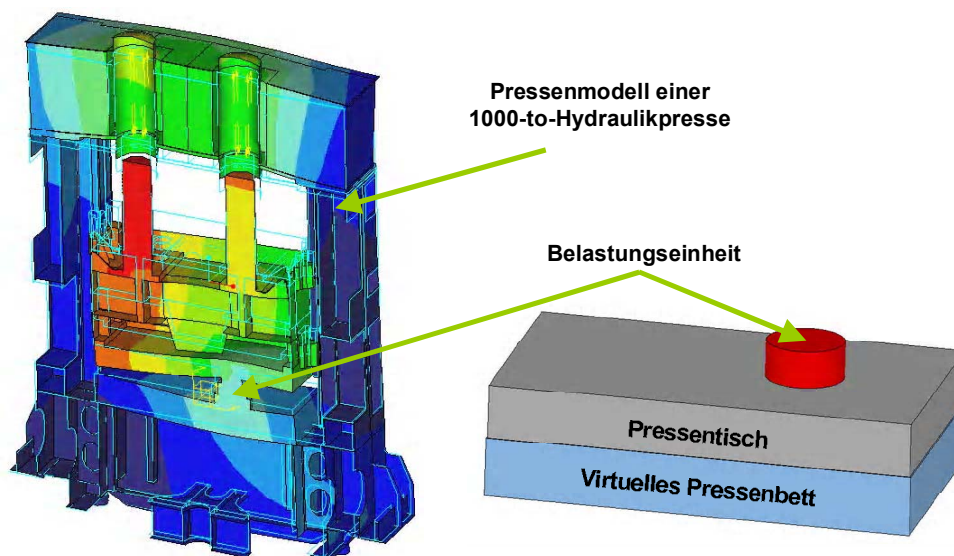


Bild 9: Halbes Pressenmodell der 1000-to-Hydraulikpresse (links), phänomenologisches Pressentisch-Ersatzmodell (rechts) bei außermittiger Belastung

Als beste Alternative bei nicht vorhandenen oder ungenauen Pressenmodellen zeigt sich ein phänomenologisches Ersatzmodell. Dieses besteht aus Pressentisch und einem virtuellen Pressenbett, welches die Lagerungsbedingungen nachbildet. (Bild 9, rechts) Ein mit Optimus und LS-Dyna aufgebautes Modell wurde mittels Geometrie- und E-Modul-Anpassung auf die Messwerte unterschiedlicher Lastfälle automatisch optimiert. Die mittlere Abweichung zu den Messwerten liegt für alle Lastfälle bei 0,035 mm, was als hinreichend genau bewertet wird.

Werkzeuersatzmodell

Die Überprüfung geeigneter Ersatzmodelle für die Werkzeugstruktur erfolgt in drei Schritten wobei ein besonderes Augenmerk auf den Rechenzeiten sowie der Dauer zum Aufbau des Modells liegt (Bild 10). Im ersten Schritt werden die bei [12], [13] und [14] beschriebenen Methoden zur Erhöhung der Berechnungsgeschwindigkeit (Speed Up) mittels eines einfachen Hutprofilwerkzeugs in LS-Dyna auf ihre Anwendbarkeit sowie eine erste Bewertung der Berechnungsdauer erprobt [15]. Neben der vollständigen Volumenmodellierung (FM = fully meshed) kommen drei „Speed up“ Methoden zum Einsatz:

- Anbindung feiner Wirkflächen an eine grobe Werkzeugstruktur (TC = tied contact)
- Modale Methoden (DRB = deformable rigid bodies) unter Verwendung einer reduzierten Anzahl an Eigenmoden
- Statische Kondensation (SC = static condensation) zur Reduzierung der Freiheitsgrade auf im Kontakt befindliche Knoten

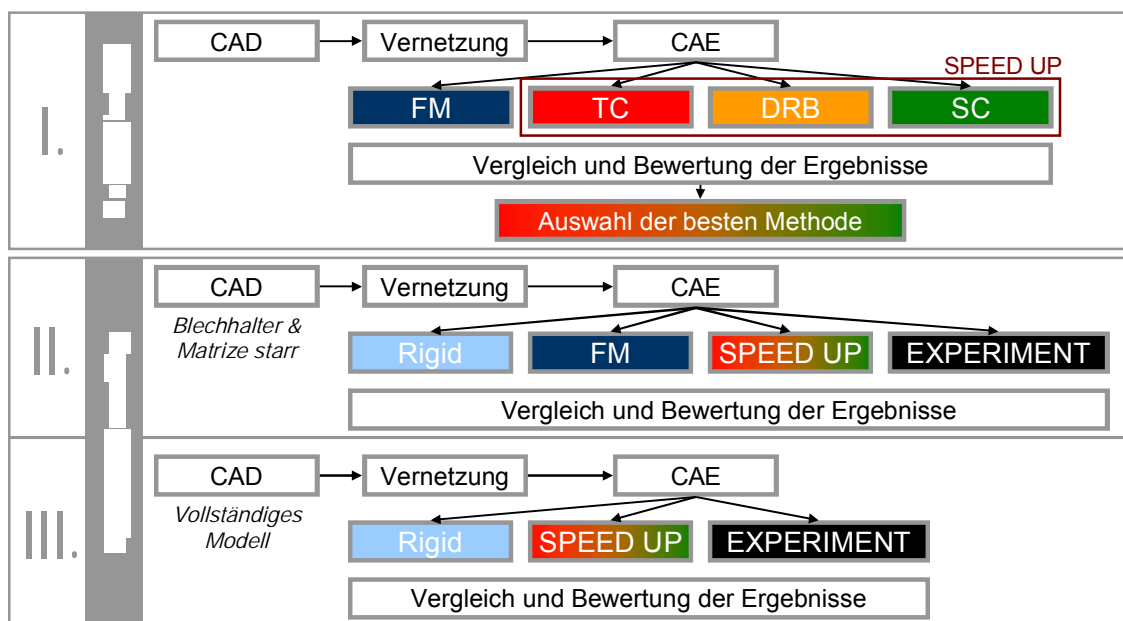


Bild 10: Vorgehensweise zur Ermittlung der besten Methode zur Erhöhung der Berechnungs- und Modellaufbaugeschwindigkeit (Speed up)

In einem zweiten Schritt wird das Werkzeugmodell der Ziehstufe eines Längsträgers herangezogen. Hierbei werden vorerst nur Stempel, Stempelplatte, Pressentisch und oben beschriebenes virtuelles Pressenbett elastisch modelliert um den Aufwand zum Modellaufbau zu begrenzen. Anschließend werden die Simulationen mit starren Wirkflächen (Rigid), vollständig modelliertem Unterwerkzeug (FM), sowie der im ersten Schritt ermittelten besten „Speed up“ Methode dem Experiment gegenübergestellt. Dies ist bereits mit diesem immer noch vereinfachten Modell möglich, da die Durchbiegungsmessung an Presse A

stößelseitig maximale Verschiebungen von 10 µm zeigte. Im abschließenden dritten Schritt soll der vollständige Aufbau inklusive Kraftmesskoppelplatte unter Verwendung der besten „Speed up“ Methode sowie der Berechnung mit starren Wirkflächen dem Experiment gegenübergestellt werden.

Methodenerprobung

Die modalen Methoden (DRB) basieren auf der Berechnung der Eigenwerte in einem gesonderten Simulationslauf. Anschließend wird eine gewünschte Anzahl von Eigenmoden in die Simulation eingelesen, woraufhin die Umformsimulation durchgeführt werden kann. Untersuchungen zum Einfluss der Anzahl der Eigenmoden auf die Berechnungszeit und Verschiebung eines Knotens am Matrizenradius sind in Bild 11 dargestellt. Für das einfache Hutprofil zeigt sich das beste Verhältnis von Genauigkeitsverringering zu Rechenzeitverkürzung bei 25 Eigenmoden, welches jedoch keiner Allgemeingültigkeit obliegt.

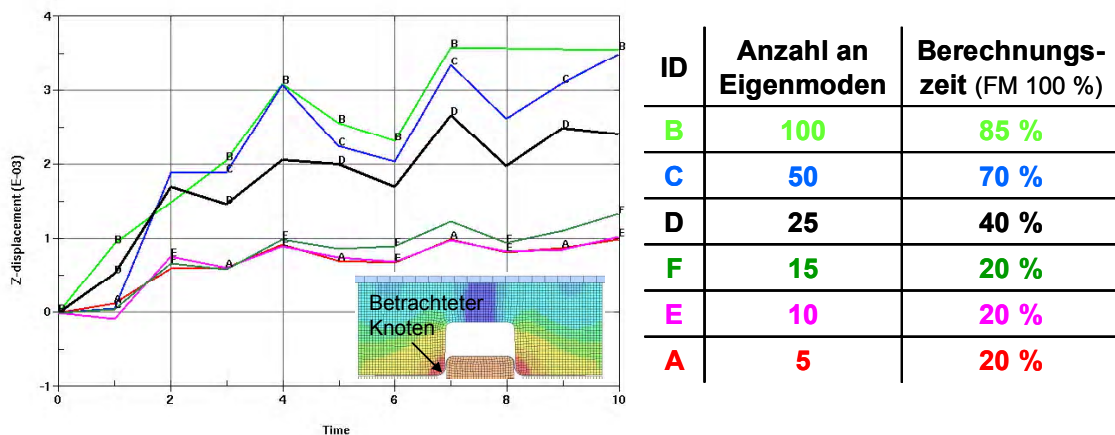


Bild 11: Einfluss der Anzahl von Eigenmoden auf die Berechnungsgenauigkeit und –zeit der modalen Methoden gegenüber des voll modellierten Modells (FM)

Eine weitere Methode ist die Anbindung der feinvernetzten Wirkflächen an die grobvernetzte Werkzeugstruktur mittels des „Tied Contact“ (TC). Neben einer verringerten Gesamtelementanzahl liegt ein großer Vorteil bei der einfachen und schnellen Vernetzung der Werkzeugstruktur, da keine für die Umformsimulation sonst übliche feine Wirkflächenvernetzung notwendig ist.

Die statische Kondensation (SC) ermöglicht die Reduzierung der Element-Freiheitsgrade durch deren Eliminierung innerhalb der Struktur und Übertragung der kondensierten Steifigkeitsinformationen auf die im Kontakt befindlichen Randknoten. Nachteilig sind bei dieser Methode die aktuell sehr großen Datenmengen zur Speicherung der Steifigkeitsinformationen, weshalb für das Hutprofil nur die Freiheitsgrade in Z-Richtung berücksichtigt werden.

Die drei vorgestellten Methoden werden zum Vergleich und zur Bewertung dem vollmodellierten Hutprofil (FM) gegenübergestellt. (Tabelle 1) Die Gesamtsteifigkeit des SC-Modells ist am geringsten, was auf die ausschließliche Berücksichtigung der Freiheitsgrade in Z-Richtung zurückzuführen ist. Beim DRB-Modell ist ebenfalls die reduzierte Anzahl an Eigenmoden für die Steifigkeitserhöhung verantwortlich. Die höheren Deformationen des TC-Modells sind auf den relativ „weichen“ Tied Contact zurückzuführen.

Tabelle 1: Gegenüberstellung und Bewertung der unterschiedlichen Methoden zur Verkürzung der Rechen- und Modellaufbauzeiten

Kriterien	FM	TC	DRB	SC
Maximale Verschiebung der Matrize	100 %	123 %	82 %	65 %
Knotenverschiebung Matrizenradius	100 %	103 %	105 %	8 %
Maximale Stempelkraft	100 %	97 %	111 %	107 %
Rechenzeit	100 %	7 %	50 %	129 %
Arbeitsspeicherbedarf	100 %	9 %	1.714 %	8.000 %
Festplattenspeicherbedarf	100 %	10 %	900 %	11.500 %
Zeit zum Modellaufbau	mittel	schnell	mittel	langsam
Rangfolge	3	1	2	4

Die Rechenzeit ist beim TC-Modell um Faktor 14 und beim DRB-Modell um Faktor 2 verkürzt. Das SC-Modell führt aufgrund der großen zu bearbeitenden Dateien sogar zu einer Rechenzeitverlängerung. Der Modellaufbau kann nur beim TC-Modell verkürzt werden, da auf eine feine Vernetzung der Wirkoberfläche des Volumenmodells verzichtet werden kann. Der Vergleich führt zu dem Ergebnis, dass die TC-Methode am geeigneten zur elastischen Abbildung von Umformwerkzeugen erscheint.

Vereinfachtes Längsträgerwerkzeug

Zur Überprüfung der Anwendbarkeit auf große Werkzeugstrukturen wird die TC-Methode und ergänzend die DRB-Methode an der Ziehstufe eines Serienwerkzeugs für einen Längsträger erprobt. Zur Aufwandsreduzierung werden in diesem etwas vereinfachten Modell Matrize und Blechhalter als starr angenommen. Im vereinfachten Modell sind somit nur der Stempel, die Stempelplatte, der Pressentisch sowie das oben beschriebene virtuelle Pressenbett elastisch modelliert. (Bild 12, links) Alle Wirkflächen des Realwerkzeugs wurden zudem digitalisiert und in das CAD-System zurückgeführt. Neben Rechenzeit und Modellaufbaudauer werden als zusätzliches Kriterium die Tischdurchbiegung sowie die notwendige Kraft zum Ausformen des Bauteils als Vergleichs- und Bewertungsgröße herangezogen. Zur Detektierung des Werkzeugschlusses wird das oben beschriebene Ersatzmodell des elektronischen Endkontrollstempels herangezogen.

Der Modellaufbau mittels TC-Methode führt bei der Stempelvernetzung zu einer deutlichen Zeitersparnis gegenüber der FM / DRB-Methode, da bei diesen auf eine feine

Oberflächenvernetzung mit zunehmender Vergrößerung Richtung Stempelunterseite geachtet werden muss. Jedoch zeigt auch die TC-Methode gewisse Hürden insbesondere in der Anbindung der Wirkflächen an die Werkzeugstruktur, da der Algorithmus teilweise Schwierigkeiten beim Finden der zu den Oberflächenknoten gehörigen Volumensegmente hat. Eine Optimierung ist aktueller Arbeitsgegenstand des Softwareanbieters.

Die Nutzung der DRB-Methode beinhaltet die Berücksichtigung von 25 Eigenmoden, die mit der identischen Diskretisierung der FM-Methode durchgeführt wird.

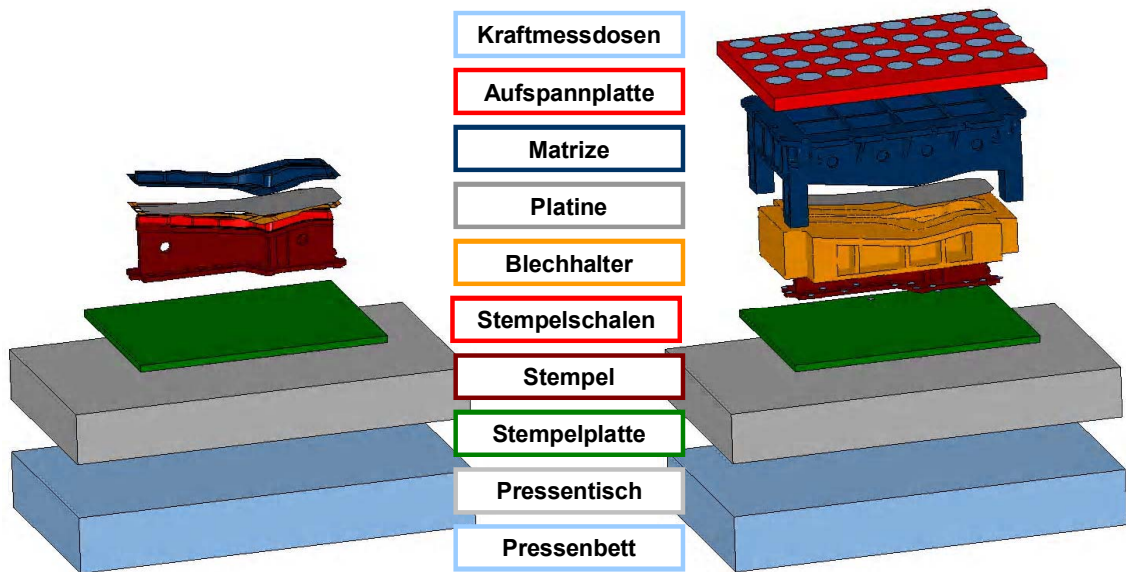


Bild 12: Aufbau des vereinfachten Modells mit starrer Matrize und Blechhalter und Anbindung der fein vernetzten Stempelschalen zum Stempel mittels Tied Contact (links) und des vollständigen Modells inkl. Kraftmesskoppelplatte (rechts)

Die Simulationsergebnisse zeigen in der Gegenüberstellung zum vollmodellierten Modell (FM) die gleichen Tendenzen wie in der Methodenerprobung mittels Hutprofilwerkzeugs. Hierbei stellt sich erneut die TC-Methode als geeignete Methode zur Berücksichtigung elastischer Werkzeugstrukturen dar (Tabelle 2). Dies wird unterstrichen durch die besten Ergebnisse bezüglich Durchbiegung und Kraftbedarf im Vergleich zum Experiment.

Tabelle 2: Vergleich zwischen Experiment und Simulation des vereinfachten Längsträger-Werkzeugmodells

Kriterien	Exp.	FM	Rigid	TC	DRB
Kraftmaximum bei Werkzeugschluss	100 %	90 %	73 %	97 %	70 %
Durchschnittliche Verschiebung des Pressentischs	100 %	51 %	-	77 %	41 %
Rechenzeit	-	100 %	3 %	19 %	50 %
Arbeitsspeicherbedarf	-	100 %	19 %	38 %	120 %
Festplattenspeicherbedarf	-	100 %	17 %	37 %	1043 %
Zeitaufwand zum Modellaufbau	-	langsam	schnell	mittel	langsam

Der Kraftbedarf wird hierbei mit der TC-Methode sehr gut berechnet, jedoch fällt die durchschnittliche Durchbiegung des Pressentisches 23 % geringer aus als beim Experiment. Bei korrekter Abbildung der Verschiebungen ist daher mit einer überhöhten Kraftbedarfsvorhersage zu rechnen. Dabei spielt auch die starre Matrize eine Rolle, so dass die Modellierung des vollständigen Modells einen besseren Abgleich ermöglichen wird. Grundsätzlich ist jedoch nachgewiesen, dass die Berücksichtigung der elastischen Werkzeugstruktur zu einem deutlich verbesserten Berechnungsergebnis führt.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchungen zum Einfluss der Werkzeug- und Pressensteifigkeiten auf die Pressenkraft zeigen, dass die Berücksichtigung der damit verbundenen Elastizitäten in der Umformsimulation zur verbesserten Vorhersage der Kraftbedarfe notwendig ist. Die Analyse der einzelnen Kraftanteile an der Umformkraft stellt zudem dar, dass zur verbesserten Berechnung der Biegekräfte der Einsatz von Volumenelementen sinnvoll ist. Die entscheidende Einflussgröße auf den maximalen Kraftbedarf ist jedoch die korrekte Bestimmung des Werkzeugschlusses sowohl in der Simulation als auch in der Realität. Der elektronische Endkontrollstempel und dessen Abbildung in der Simulation ermöglicht hierbei die reproduzierbare und genaue Bestimmung des Werkzeugschlusses. Dieser ist ein notwendiges Kriterium um auch in der Umformsimulation unter elastischen Randbedingungen den Werkzeugschluss präzise bestimmen zu können. Die elastischen Werkzeugstrukturen lassen sich dabei mit der Anbindung feiner Wirkflächen an eine grobe Werkzeugvernetzung (Tied Contact) bestmöglich und auch produktiv einsetzbar darstellen. Das vollständige Werkzeugmodell (Bild 12, rechts) des Längsträgers ist Bestandteil weiterer Untersuchungen, da hierbei Schwierigkeiten aufgrund großer Masseneffekte und der Kontaktbeschreibungen auftreten. Aktuelle Untersuchungen mit angepassten Verfahrkurven zeigen jedoch bereits vielversprechende Ergebnisse.

Die vorgestellte Berechnungsmethode ist somit nicht nur eine geeignete Ausgangsbasis zur Werkzeugstrukturoptimierung, sondern ermöglicht auch die Anfertigung werkzeug- und pressenspezifischer bombierter Platten, die die Werkzeug- und Tischdurchbiegung kompensieren. Mit dem Werkzeugeinbau lässt sich abschließend die optimale Stößellage mittels des elektronischen Endkontrollstempels in Richtung der minimal notwendigen Pressenkraft optimieren. Dies führt dann zu einer verminderten Pressen- und Werkzeugbelastung und ermöglicht somit auch eine energieeffizientere Produktion.

5. Literatur

- [1] Schroeter, O., Goede, M.: Fortschritte im Fahrzeugleichtbau zur Verbesserung der Energieeffizienz. Dresden: 12. Dresdner Leichtbausymposium 2008
- [2] Peinemann, F.: Planungsfortschritt- und Kennzahlen-Monitoring innerhalb der Presswerkplanung der Volkswagen AG. TU Berlin 2005
- [3] Kessler, L., Gerlach, J.: Industrial Aspects of Material Modelling for Steel Grades in the Past, Present and Future. Interlaken: Numisheet 2008
- [4] Bogon, P.: Genauigkeit im Presswerk. Überlastsicherung als Sensor zur Kraftmessung verwendet. Blech Rohre Profile, Vol. 3 Nr. 45, 1998
- [5] Stillger, M.: Finite Element Analysis of Press Forces at Stamping Processes using LS-Dyna and Comparison with Test Results. Bamberg: 3. LS-DYNA Anwenderforum 2004
- [6] Doege, E.; Behrens, B.-A.: Handbuch Umformtechnik. Grundlagen, Technologien, Maschinen. Berlin: Springer-Verlag 2007
- [7] Lange, K.: Umformtechnik. Handbuch für Industrie und Wissenschaft. Band 3: Blechbearbeitung. Berlin: Springer-Verlag 1990
- [8] Struck, R., Kulp, S., Härtel, S.: Numerical Analysis of Forming Processes Regarding the Prediction of Press Forces. Interlaken: Numisheet 2008
- [9] Struck, R., Kulp, S., Behrens, B.-A., Krimm, R.: Investigation of the Impacts on the Required Press Force. Olofström: IDDRG 2008
- [10] Kirchoff, D.: Umformgrenzen und Kraftparameter beim Prägesicken von Stahlwerkstoffen. Dissertation. Technische Hochschule Magdeburg 1981
- [11] Ledentsov, D., Düster, A., Rank, E., Heinle, I., Volk, W., Wagner, M.: Model Adaptivity in the Context of Sheet Metal Forming. Interlaken: Numisheet 2008
- [12] Roll, K.; Hoffmann, J.: Eine Möglichkeit zur Berücksichtigung der elastischen Werkzeugeigenschaften bei der Blechumformsimulation. Bamberg: 4. LS-DYNA Anwenderforum 2005
- [13] Lingbeek, R.: Virtual Tool Reworking. New Strategies in Die Design Using Finite Element Forming Simulations. Dissertation. Universität Twente 2008
- [14] Haufe, A., Lorenz, D., Mandel, S.: Konzepte zur Abbildung großer Werkzeugstrukturen mit reduzierten Modellen in der Blechumformung. Dresden: 12. Dresdner Werkzeugmaschinen-Fachseminar 2007
- [15] Struck, R., Medřický, M., Düngen, M., Kulp, S., Behrens, B.-A., Krimm, R.: Considering Tool and Press Elasticity within the Forming Simulation and Experimental Validation. Bamberg: 7. LS-DYNA Anwenderforum 2008

Teile der Untersuchungen wurden im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsprojektes „Innovative Methoden zur Auslegung von Umformwerkzeugen im Fahrzeugbau“ durchgeführt, welches mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) innerhalb des Rahmenkonzeptes "Forschung für die Produktion von morgen" unter dem Förderkennzeichen 02PU2000 gefördert und vom Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe (PTKA), Bereich Produktion und Fertigungstechnologien (PFT) betreut wird.

