

Eine Möglichkeit zur Berücksichtigung der elastischen Werkzeugeigenschaften bei der Blechumformsimulation¹

Prof. Dr.-Ing. Karl Roll¹, Dipl.-Ing (FH) Jens Hoffmann²

¹DaimlerChrysler AG, Sindelfingen, Produktions und Werkstofftechnik

²Fachhochschule Lausitz, Cottbus

Abstract:

The simulation of metal forming processes, in the field of massive forming as well as for sheet metal forming processes, has reached such a high level, that provides the possibility to carry out realistic simulations of industrial forming processes. At present the simulation of sheet metal forming processes is used in a standardized procedure already during the design of the forming tools in order to assure the producibility of sheet metal parts at an early stage.

The simulation and computer-supported compensation of springback has become more and more important. Results of springback simulations demonstrate the ability that springback-related shape deviations can be calculated qualitative accurate and are quantifiable even within a small bandwidth. The numerically predicted shape deviations provide valuable indications for the compensation due to an adapted redesign of the tool geometry or of the forming process.

Since the tools are presently still modelled as rigid bodies this modelling approach leads especially for high and highest strength steels to a more and more significant loss in simulation accuracy. Thus an enhancement of the tool models including the elastic properties is necessary. In this paper a method to account for the tools elastic properties in the forming simulation is described. The method makes use of the substructure technology, which is well known from static simulations.

Keywords:

Umformsimulation, Rückfederung, Kompensation, elastische Werkzeugeigenschaften, Ersatzmodell, Substrukturtechnik

¹ Der Beitrag gibt im Wesentlichen die Ergebnisse der Diplomarbeit "Berücksichtigung elastischer Werkzeugeigenschaften in der Blechumformsimulation" von Jens Hoffmann wieder. Die Diplomarbeit wurde von Prof. Dr.-Ing. C. König, FH Lausitz, betreut und bei der DaimlerChrysler AG im Werk Sindelfingen angefertigt.

1 Einleitung

Die Prozesssimulation in der Umformtechnik hat heute, sowohl bei der Massivumformung als auch im Bereich der Blechumformung, einen Stand erreicht, der es ermöglicht, industrielle Umformprozesse realitätsnah zu simulieren. Es ist heute möglich, einen vollständigen Fertigungsprozess auf dem Rechner nachzubilden bevor er in der Realität abläuft. Die Simulation des Blechumformprozesses wird deshalb heute standardisiert eingesetzt, um bereits während der Werkzeugkonstruktion die versagensfreie Herstellbarkeit des Blechformteils zu gewährleisten.

Zunehmend gewinnen die Simulation der Rückfederung und deren rechnergestützte Kompensation an Bedeutung. Die dabei erzielten 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.

Vor allem bei der Simulation der Rückfederung zeigt sich, dass die heute verwendeten Simulationsmodelle mit starren Werkzeugen bei der Simulation der Rückfederung hoch- und höchstfester Stähle an die Grenzen ihrer Genauigkeit stoßen. Notwendig ist deshalb eine Erweiterung der Simulationsmodelle um die elastischen Eigenschaften der Werkzeuge (und später auch der Maschine) in der Simulation mit erfassen zu können. In diesem Beitrag wird eine Methode beschrieben, wie die elastischen Eigenschaften eines Werkzeuges in der Umformsimulation berücksichtigt werden können. Verwendet wird dabei die aus der Statik bekannte Unterstrukturtechnik.

2 Stand der Technik

Heute wird die Simulation der Blechumformung folgendermaßen eingesetzt [1]:

- Zur schnellen Übersicht und groben Überprüfung der Herstellbarkeit und Voroptimierung werden inverse Programme eingesetzt.
- Zur Optimierung des Werkzeugs und des Prozesses kommen je nach Blechformteil implizite Finite Elemente Programme mit Membranelementen und explizite Programme mit Schalenelementen zum Einsatz
- Zur Berechnung von Spannungsverteilungen und rückfederungsbedingten Formänderungen werden explizite und implizite oder Kombinationen von expliziten und impliziten Programmen mit Schalenelementen verwendet.

Die Vorhersage- und Einsatzmöglichkeiten der Blechumformsimulation veranschaulicht Bild 1. Versagenserscheinungen wie Reißen und Faltenbildung werden sehr gut vorausbestimmt. Dies gilt ebenfalls für den Werkstofffluss, die Blechdicken- und Dehnungsverteilung sowie die Niederhalterpressung. Durch den Einsatz der Prozesssimulation kann der Aufwand für die Ein- und Überarbeitung der Werkzeuge der ersten Umformstufe enorm reduziert werden.

Der Einsatz der Blechumformsimulation beschränkt sich heute nicht mehr nur auf die Überprüfung der Herstellbarkeit, obwohl dies weiterhin das wichtigste Ergebnis ist, vielmehr wird die Simulation inzwischen zur Optimierung der ersten Umformstufe eingesetzt. Bei komplexen Karosserieteilen werden bis zu 30 Berechnungsläufe durchgeführt, wobei die Optimierung der Blechformteile hauptsächlich in Bezug auf die beiden Versagenserscheinungen Reißen und Faltenbildung erfolgt [1]. In Ausnahmefällen wird die Blechdickenverteilung verbessert.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass mit der Einführung der Prozesssimulation in den Produktentstehungsprozess von Blechformteilen bereits große Einsparungen erzielt wurden. Diese ergeben sich im Wesentlichen durch eine schnellere Entwicklung der Werkzeuge sowie eine starke Verringerung des *Trial and Error Prozess* bei der Fertigung des Serienwerkzeugs. Der gesamte Arbeitsaufwand zur Auslegung der Umformmethode und Konstruktion sowie Fertigung der Blechumformwerkzeuge konnte bei einer gleichzeitigen Verkürzung der Entwicklungszeiten um ca. 40 % reduziert werden. In den vergangenen Jahren wurden die Entwicklungs- und Fertigungszeiten bei der Werkzeugerstellung um ca. 50 % verkürzt, eine weitere Reduzierung um 30% in den nächsten Jahren erscheint realistisch [1].

2.1 Genauigkeitsgrenzen der Simulation

Vergleicht man die physikalische Realität eines Blechumformprozesses mit den heute verwendeten Simulationsmodellen, so erkennt man, dass wesentliche Einflüsse auf den Umformprozess nicht richtig oder gar nicht im Simulationsmodell beschrieben sind.

Einflussgröße	Realität	Simulation
Produktionshubzahl	nicht konstant	<i>nicht abgebildet</i>
Maschine	elastisch	<i>nicht abgebildet</i>
Werkzeug	elastisch	<i>nicht abgebildet, starr</i>
Eigenschaften der Zieheinrichtung	nicht konstant	<i>nicht abgebildet</i>
Reibzahl	nicht konstant	<i>konstant</i>
Temperatur	nicht konstant	<i>nicht abgebildet</i>
Topologie Blechhalteroberfläche	nicht konstant	<i>nicht abgebildet</i>
Werkstoff	komplex	<i>einfache Modelle</i>
Werkstoffkennwerte	nicht konstant	<i>(nicht) konstant</i>

Tabelle 1: Vergleich von Maschinen-, Werkzeug- und Werkstoffeigenschaften in der Realität und im Simulationsmodell

Tabelle 1 gibt einen Überblick zwischen Realität und heute üblichen Simulationsmodellen. Für eine reine Umformsimulation reicht die Approximation des Simulationsmodells aus, damit werden gute Ergebnisse erzielt. Für eine noch genauere Berechnung der Rückfederung muss das Modell jedoch an verschiedenen Stellen erweitert werden. Die Schwierigkeit besteht im Moment vor allem darin, dass es sehr schwierig ist die Einflüsse der heute nicht berücksichtigten Effekte auf die Genauigkeit der Rückfederungsberechnung abzuschätzen.

Bei den heute verwendeten Werkstoffen reicht es aus, die Werkzeuge als starr zu beschreiben. Bei der Umformsimulation von hochfesten Stählen wird es, aufgrund der hohen Belastungen, erforderlich werden, die elastische Deformation des Werkzeuges mit zu berücksichtigen. Erste Ansätze gibt es bereits, allerdings ist die Prozesskette hier noch nicht geschlossen [2, 3].

Neben den elastischen Eigenschaften des Werkzeuges (die heute in der Simulation nicht berücksichtigt werden) hat auch die Umformmaschine einen Einfluss auf den Umformprozess. Die elastische Wechselwirkung zwischen Werkzeug und Maschine wird heute ebenfalls noch nicht abgebildet. Ein Beispiel für die elastische Wechselwirkung von Maschine und Werkzeug ist in [4] beschrieben.

2.2 Ersatzmodell für nachgiebige Werkzeugteile

In konventionellen Tiefziehsimulationen werden die Werkzeuge durch starre Wirkflächenmodelle idealisiert. Diese Variante ist sehr günstig im Rechenaufwand und beschränkt den Aufwand der Netzzeugung auf die Wirkflächen der Werkzeuge. Als Nachteil werden Kontaktbedingungen und Reibungszustände zwischen Blech und Werkzeug ungenau dargestellt. Werkzeugmodelle aus Kontinuumselementen reagieren auf lokale Kontaktdrücke mit örtlichen Deformationen während die konventionellen

Wirkflächenmodelle nur als Starrkörper bewegt werden. Modelle, die örtlich auf Kontaktdrücke reagieren, lassen eine genauere Berechnung der Reibzustände zwischen Blech und Werkzeug zu. Da geeignete Werkzeugnetze aus Kontinuumselementen die Rechenzeiten von Tiefziehsimulationen erheblich verlängern, wird im folgenden Kapitel ein Ersatzmodell zur Berücksichtigung der Werkzeugsteifigkeit vorgestellt. In den folgenden Abschnitten werden die theoretischen Hintergründe sowie die Anwendung auf die Tiefziehsimulation beschrieben.

2.2.1 Ziel des Ersatzmodells

Beim Tiefziehvorgang kann es in Bereichen mit Druckspannungen in der Platine zu Blechaufdickungen und Faltenbildung kommen. Im Flanschbereich treten abhängig von der Platinengeometrie und Bauteilform tangentielle Druckspannungen auf. Mögliche Faltenbildung wird durch den Niederhalter unterdrückt. Der Niederhalterdruck auf den Flanschbereich beeinflusst den Blecheinzug in die Matrize durch Reibung. Nach dem Coulombschen Reibgesetz $F_R = \mu F_N$ beeinflusst die Normalkraft F_N aus dem Kontaktdruck zwischen Blech und Werkzeug die Reibkraft F_R . Infolge der Blechaufdickungen ist der Kontaktdruck über den Blechflansch unterschiedlich verteilt. Konventionelle Tiefziehsimulationen beschreiben das Werkzeug als mit starren Elementen. Diese Modelle können nur Translationen und Rotation des gesamten Körpers ausführen. Eine örtliche Blechaufdickung der Platine verursacht je nach Freiheitsgrad eine Bewegung der starren Werkzeugteile. Bei dem für die Blechsteuerung verantwortlichen Niederhalter verursacht eine geringe Blechaufdickung an einer Stelle im Flansch abhängig von der Niederhalterkraft ein Anheben der gesamten Niederhalterwirkfläche. Damit kommt es zu unrealistischen Verteilungen des Niederhalterdruckes auf die Flanschfläche. Bei nachgiebigen Werkzeugmodellen reagieren die Werkzeugteile auf Kontaktdrücke mit Deformationen. Dadurch wirken lokale Kontaktdrücke abhängig von der Werkzeugsteifigkeit nur auf bestimmte Bereiche des Niederhalters. Die Kontaktdrücke und die resultierende Reibung sind dadurch homogener und realitätsnäher über die Flanschfläche verteilt.

Die Erstellung nachgiebiger Werkzeugmodelle kann durch eine Diskretisierung mit Kontinuumselementen erfolgen. Dafür muss wie bei Starrkörpermodellen die Topologie der Werkzeugwirkfläche möglichst genau diskretisiert werden und das Volumenmodell mit Elementen vernetzt werden, die fuhr strukturemechanische Berechnungen geeignet sind. Diese Anforderungen an die Netzqualität erfordern eine Vielzahl von Elementen. Da bei expliziten FEM-Simulationen die Rechenzeit linear von der Anzahl der Elemente abhängt, benötigen solche Modelle sehr viel Rechenzeit. Als Alternative soll ein Ersatzmodell die Werkzeugsteifigkeit auf die konventionellen Wirkflächenmodelle der Werkzeuge übertragen. Die Wirkflächen sollen das gleiche Verformungsverhalten wie Volumenmodelle besitzen und durch die Reduktion auf Flächen weniger Rechenzeit als diese beanspruchen. Das Ersatzmodell soll auch die genaue Berechnung der Kontakte durch topologiegetreue Diskretisierung ermöglichen. Ziel des Modells ist die möglichst realitätsnahe Abbildung der Kontakt- und Reibungsverhältnisse zwischen Werkzeug und Blech durch nachgiebige Werkzeugteile.

2.2.2 Statische Kondensation und Substrukturtechnik

Für die Übertragung der Steifigkeit der dreidimensionalen Werkzeugteile auf die Wirkflächen kann die statische Kondensation benutzt werden. Die statische Kondensation (Verdichtung) wird dazu verwendet, die Zahl der Element-Freiheitsgrade zu reduzieren [5]. Auf diese Weise werden die Gleichgewichtsbedingungen des gesamten Finite-Elemente-Systems vor der Zusammenstellung der Strukturmatrizen K und F teilweise gelöst [5]. Sind U_a und U_c die Verschiebungsvektoren, die beibehalten (a) bzw. herauskondensiert (c) werden sollen, lässt sich das Problem mit folgender

$$\begin{bmatrix} K_{aa} & K_{ac} \\ K_{ca} & K_{cc} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_a \\ U_c \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_a \\ F_c \end{Bmatrix}$$

Gleichung beschreiben:

Das Umstellen der zweiten Teil-Gleichung liefert:

$$U_c = K_{cc}^{-1}(F_c - K_{ca}U_a)$$

Damit kann die Matrixgleichung vereinfacht werden und man erhält:

$$(K_{aa} - K_{ac}K_{cc}^{-1}K_{ca})U_a = F_a - K_{ac}K_{cc}^{-1}F_c$$

Durch die Kondensation werden die inneren Freiheitsgrade einer Struktur eliminiert. Die beibehaltenen Knoten enthalten die kondensierten Steifigkeitsinformationen der eliminierten Teil-Gleichungen. Im Prinzip ist die statische Kondensation mit dem Lösungsschema des Gaußschen Eliminationsverfahrens vergleichbar [5]. Nacheinander werden die gewünschten Freiheitsgrade herauskondensiert. Die reduzierten Steifigkeitsmatrizen können dann wieder verwendet werden. Dies spart Speicherplatz und Rechenzeit. Eine erweiterte Anwendung der statischen Kondensation findet bei der Substrukturtechnik

statt. Dabei kann die Gesamtstruktur in Substrukturen aufgeteilt werden, welche aus Gruppierungen von Finiten Elementen bestehen. Eine solche Substruktur kann im Wesentlichen wie ein einzelnes finites Element verwendet werden, dessen innere Freiheitsgrade vor der Element-Gruppierung durch statische Kondensation eliminiert worden sind [5]. Die Gesamtsteifigkeitsmatrix wird dabei aus den kondensierten Teilmatrizen der Substrukturen zusammengestellt. Typische Anwendungsgebiete für diese Technik sind FE-Berechnung von Schiffsrümpfen oder Gebäuden, wo sehr viele Elemente effizient zusammengefasst werden können. Eine weitere Steigerung der Effizienz dieser Technik kann durch Zusammenfassen mehrerer Substrukturen zu einer neuen Substruktur erreicht werden. Das Konzept kann über mehrere Struktur-Niveaus bis hin zu Gesamtstruktur durchgeführt werden, da jede Substruktur als finites "Superelement" betrachtet werden kann.

2.3 Annahmen zum Ersatzmodell

Die Substrukturtechnik ermöglicht die Kondensation der Freiheitsgrade von Teilstrukturen auf äußere, abhängige Freiheitsgrade. Diese Technik bietet damit die Grundlage die Steifigkeit der Werkzeugteile auf ihre Wirkflächen zu extrapolieren. Es können alle Elemente eines einzelnen, zusammenhängenden Werkzeugteiles zu einer Substruktur vereint werden. Die äußeren Freiheitsgrade einer solchen Struktur sind Lagerbedingungen und Knoten, die abhängig von anderen Elementen sind. Damit kann ein Werkzeugteil mit der Substrukturtechnik auf seine Wirkflächen, Kontaktflächen und Lagerknoten kondensiert werden. Für die Kondensation der Steifigkeit eines dreidimensionalen FE-Modells auf die Knoten des Werkzeugnetzes muss das Werkzeug im ersten Schritt mit Volumenelementen beschrieben werden. Dieses Netz sollte für strukturmechanische Berechnungen nutzbar sein und gleichzeitig die Wirkflächentopologie gut diskretisieren. Für Werkzeugteile mit vielen Radien ist ein sinnvolles Volumennetz nach den genannten Eigenschaften nur mit sehr vielen Elementen zu realisieren. Da das Ziel des Ersatzmodelles eine genauere Abbildung des Blecheinzugs im Flanschbereich ist, kann die Kondensation auf die Wirkflächen des Niederhalters und die entsprechenden Kontaktbereiche der Matrize beschränkt werden. Diese Oberflächen weisen i. d. R. keine kleinen Radien auf und können somit nach den genannten Kriterien vernetzt werden. Die Einleitung der Niederhalterkraft beim konventionellen, starren Werkzeugmodell erfolgt über den Schwerpunkt des Niederhalter-Starrkörpersystems. Die Kraft ist somit über die gesamte Wirkfläche gleich verteilt. Bei realen Werkzeugen wird die Kraft auf der von Blech-Werkstück abgewandten Seite durch mehrere Pinolen eingebracht. Bei den kondensierten Ersatzmodellen muss deshalb die Krafteinleitung über die Pinolen abgebildet werden. Dafür müssen an den Kontaktstellen im dreidimensionalen FE-Modell entsprechend äußere, abhängige Freiheitsgrade an den Knoten des Netzes definiert werden. Die Kontaktflächen der Pinolen werden durch starre Wirkflächen- Netze diskretisiert. Sie können in der Tiefziehsimulation als Starrkörper einzeln gesteuert die Kräfte in das Ersatzmodell des Niederhalters einleiten (Bild 1). Aufgrund der geringen Verformungen der Werkzeuge während des Umformprozesses können rein elastische Formänderungen unterstellt werden. Damit ist es möglich, die Steifigkeit der Werkzeugteile nach den Annahmen der linearen Elastostatik zu berechnen. Bei linearen Betrachtungen verändert sich die Steifigkeitsmatrix K während einer transienten Simulation nicht. Diese konstante Steifigkeit macht die separate Berechnung der Werkzeugsteifigkeit vor der Tiefziehsimulation möglich. Die kondensierte Steifigkeitsmatrix eines Werkzeugteiles kann dann in das Ersatzmodell für die Tiefziehsimulation eingebunden werden. Die Berechnung der Steifigkeitsmatrizen des Werkzeugs während der Tiefziehsimulation kann damit entfallen und die Rechenzeit wird gegenüber Berechnungen mit Volumenmodellen stark reduziert.

2.4 Kondensation der Werkzeugsteifigkeit auf Ersatzmodelle

Zur Berechnung der Steifigkeit des Werkzeuges wurde das FEM-Simulationsprogramm PERMAS [6] genutzt. Das Programm enthält einen impliziten Gleichungslöser zur Berechnung linearer und nichtlinearer Problemstellungen. In PERMAS sind Berechnungen mit Substrukturen und die statische Kondensation von Massen- und Steifigkeitsmatrizen auf externe Freiheitsgrade möglich. Die Berechnung der Steifigkeit erfordert eine Diskretisierung der zu berechnenden Struktur in Finite Elemente. Dazu wird ein dreidimensionales FE-Netz des Werkzeugteiles modelliert. Als Randbedingung für dieses Netz müssen die Knoten des späteren Werkzeugnetzes festgelegt werden. Für diese Knoten werden die äußeren, abhängigen Freiheitsgrade definiert. Die gesperrten und externen Freiheitsgrade des Werkzeugteiles müssen alle möglichen kinematischen Starrkörperbewegungen unterdrücken, um ein lösbares System zu erzeugen. Die Kondensation sollte jeweils nur mit einem Werkzeugteil erfolgen, um die Matrizen nach der Berechnung zuordnen zu können. Die Berechnungsparameter müssen u. a. die Angaben zu den Freiheitsgraden und zum Material des Werkzeugteiles enthalten.

Nach der Aufstellung erfolgt die Kondensation beider Matrizen auf die definierten externen Freiheitsgrade. Die kondensierte Matrix und die Zuordnung der Matrizenwerte zu den externen Freiheitsgraden werden jeweils in einer Datei ausgegeben. In der Matrixdatei sind (aufgrund der Symmetrie bei den Matrizen) nur die Werte des oberen Dreiecks der Matrizen gespeichert. Matrix-Werte, die gleich null sind, werden nicht in der Datei gespeichert. Aufgrund des Dateiformates ist die Matrixdatei, je nach Anzahl der externen Freiheitsgrade, z. T. mehrere Gigabyte groß. Die kondensierten Matrizen des Werkzeugteils können dann als Substruktur in die Tiefziehsimulation einbezogen werden.

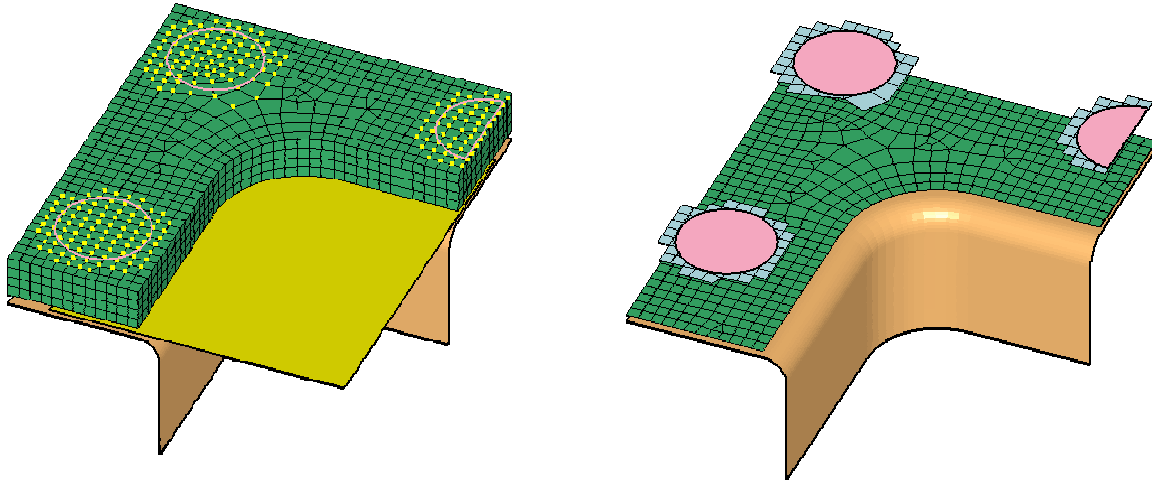


Bild 1: Zur Kondensation ausgewählte Knoten für Kräfteinleitung durch Pinolen

2.5 Tiefziehsimulation mit Ersatzmodellen in LSDYNA

Für die Eingabe der Werkzeug-Substruktur in die Tiefziehsimulation mit LS-DYNA [7] müssen die Matrixdateien in ein anderes Format konvertiert werden. Die Eingabe in LS-DYNA erfolgt im Nastran-Format als DMIG-Datenzeilen. Die Konvertierung ist formatbedingt mit einem Verlust der Genauigkeit der Matrizeneinträge behaftet. Die PERMAS-Ausgabe stellt 23 Zeichen zur Speicherung der Werte bereit, während die Einträge in den DMIG-Datenzeilen auf 16 Zeichen limitiert sind. Die Nastran-Dateien mit den Matrizen haben eine ähnliche Größe wie die PERMAS-Matrixdateien. Wie bei den konventionellen Tiefziehsimulationen muss bei Simulationen mit Ersatzmodell zuerst ein FE-Modell erstellt werden. In das FE-Modell werden die Substrukturen mit dem Keyword ELEMENT DIRECT MATRIX INPUT eingebunden. Die kondensierten Knoten dürfen bei expliziten Berechnungen nicht mit anderen Elementen des FE-Modells verbunden sein. Zur besseren Darstellung der kondensierten Werkzeugteile können die Knoten mit so genannten Nullschalen vernetzt werden. Diesen Schalenelemente wird die Materialformulierung MAT NULL zugeordnet. Sie besitzen keine Steifigkeit und werden in der Berechnung nur mit ihrer Elementmasse berücksichtigt, welche den kondensierten Knoten hinzugefügt wird (lumped mass). Die starren Werkzeugteile müssen so positioniert werden, dass die Durchbiegung der kondensierten, nachgiebigen Teile berücksichtigt wird. Sonst entstehen Klaffungen im Werkzeugmodell, die zu schweren Fehlern bei der Simulation führen. Am Beispiel einer nachgiebigen Matrizenfläche sind diese Klaffungen in Bild 2 dargestellt.

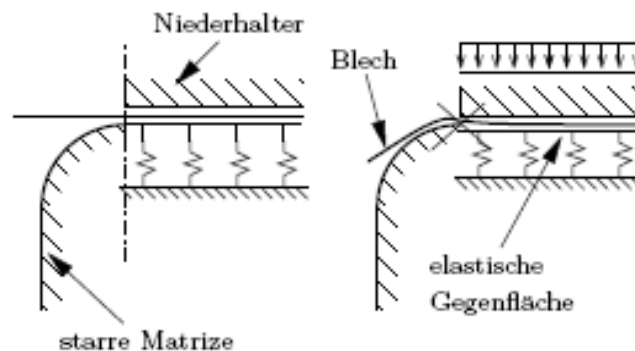


Bild 2: Entstehung von Klaffungen im Werkzeugnetz zwischen nachgiebigen und starren Werkzeugteilen.

Krafteinleitungen, Verschiebungen und Lagerungen von Werkzeugersatzmodellen können nicht wie bei den Starrkörpern über deren Schwerpunkt erfolgen. Diese Randbedingungen müssen über die externen Freiheitsgrade eingeleitet werden. Durch diesen Umstand können die Randbedingungen örtlich verteilt definiert werden. Bei einer Niederhaltersubstruktur kann z. B. die Krafteinleitung über Pinolen simuliert werden. Dafür werden die Kontaktflächen der Pinolen als starre Flächen modelliert und die jeweiligen Kräfte im Kontakt mit den externen Freiheitsgrade des Ersatzmodells übertragen werden (siehe Abb. 4.6). Für die Kontaktdefinitionen sollten die Knoten der externen Freiheitsgrade und die Knoten der anderen Kontaktpartner mit so genannten Segmenten vernetzt werden. Das in LS-DYNA verwendete Coulombsche Reibgesetz wird durch die Knotenkräfte und die in den Kontaktformulierungen festgelegten Reibkoeffizienten umgesetzt. Dadurch besteht kein Unterschied zwischen der Reibung bei Ersatzmodellen und bei Berechnung mit Volumenmodellen. Die bei Tiefziehsimulationen mit expliziter Zeitdiskretisierung angewendete Massenskalierung (vgl. Abschnitt 2.2.7) darf nicht auf die Ersatzmodelle der Werkzeugteile angewendet werden, da deren Massenmatrix konstant bleiben muss. Die Zeitschrittsschranke für die Anwendung der Massenskalierung sollte unter dem kleinsten Zeitschritt der eingebundenen Substruktur festgelegt werden, um die Anwendung auf die Platine zu beschränken.

3 Tiefziehsimulationen mit Ersatzmodellen

Die Berücksichtigung elastischer Werkzeugeigenschaften in der Tiefziehsimulation durch Ersatzmodelle wurde in dieser Diplomarbeit an drei Werkzeugen betrachtet. Bei der Erarbeitung der Ersatzmodelle haben die Werkzeuge für die einzelnen Simulationsschritte unterschiedliche Eignungen gezeigt. Es wurden Simulationen mit konventionellen Starrkörpermodellen, elastischen Volumenmodellen und Ersatzmodellen durchgeführt. Im folgenden Kapitel werden durchgeführte Simulationen mit unterschiedlichen Werkzeugdiskretisierungen beschrieben und ausgewertet. Der Einfluss elastisch modellierter Werkzeugteile und deren Vereinfachung durch Ersatzmodelle wird anhand von Ergebnissen der verschiedenen Varianten dargestellt werden.

3.1 Beschreibung der verwendeten Werkzeuge

Von den verwendeten Werkzeugen besitzt das Napfwerkzeug (Bild 3) eine einfache Geometrie. Durch die rechteckige Form eignet es sich für grundlegende Betrachtungen zum Umformen durch Tiefziehen. Aufgrund der kleinen Abmessungen des Napfwerkzeuges (Stempel: 220 x 160 mm) und infolge der zwei Symmetrieachsen können Berechnungen an einem kleine Viertelmodell mit kurzen Rechenzeiten durchgeführt werden.

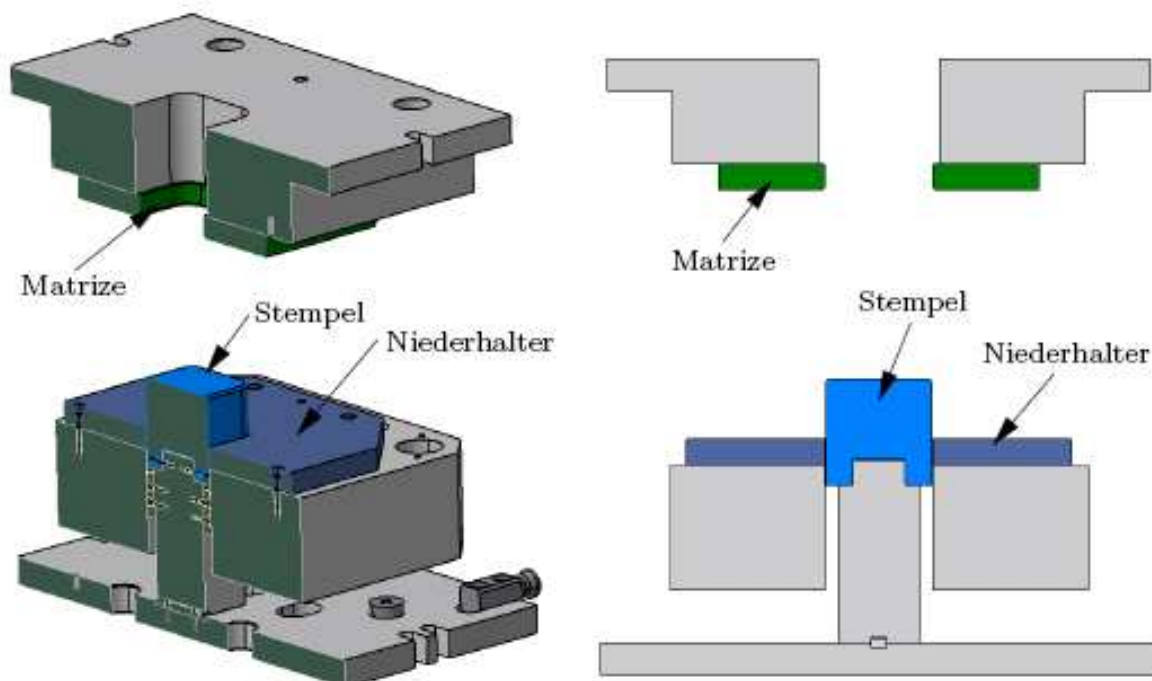


Bild 3: Stempel, Niederhalter und Matrize des untersuchten Napfwerkzeuges

Der Umformprozess des Napfes weist sowohl Tiefziehbeanspruchungen in den Eckbereichen als auch Streckziehbeanspruchungen an den Längsseiten des Napfes auf. Aufgrund der Tiefziehbeanspruchung kommt es zu tangentialen Druckspannungen im Flanschbereich, welche Faltenbildung verursachen. Durch den Niederhalter wird die Faltenbildung unterdrückt und stattdessen eine Aufdickung des Bleches hervorgerufen. Der größte Einfluss elastischer Werkzeugteile wird für einen nachgiebigen Niederhalter im Eckbereich des Flansches erwartet. Ein großer Anteil der Niederhalterverformungen wird aus der Lasteinleitung durch einzelne Pinolen als Biegeverformung resultieren. Diese beeinflusst den Kontaktdruck des Niederhalters auf den Blechflansch beim Rechtecknapf maßgeblich. Für die Berechnung wurde der Rechtecknapf aufgrund des kleinen FE-Modells und der einfach nachvollziehbaren Umformvorgänge gewählt. Das Niederhaltermodell wurde mit der halben Höhe des realen Werkzeugteils erstellt, um die Biegesteifigkeit zu vermindern und Einflüsse lokaler Lasteinleitung deutlich zeigen zu können.

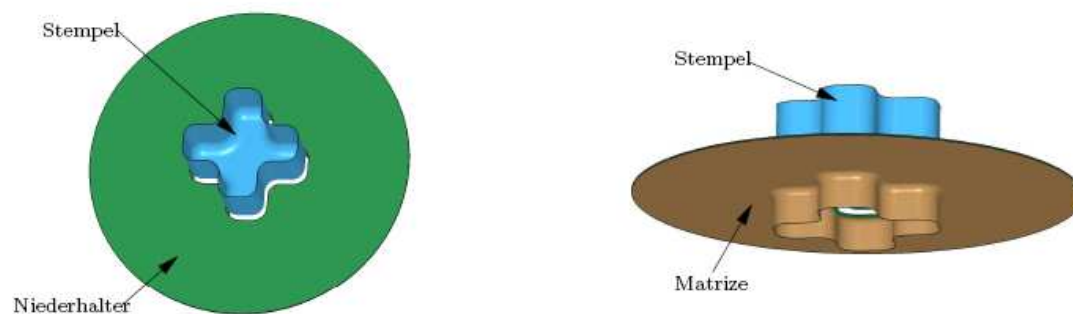


Bild 4: Wirkflächen von Stempel, Niederhalter und Matrize des Kreuzstempelwerkzeuges

Ein ähnlich großes, aber komplexeres Werkzeug stellt das Kreuzstempel-Werkzeug (Bild 4) dar. Es handelt sich dabei um ein Versuchswerkzeug, welches u. a. die Einflüsse starker Blechaufdickungen in Flanschbereichen zeigt. Die Grundrissfläche des Stempels weist die Form eines Kreuzes auf. Durch abwechselnd konkave und konvexe Ecken im Grundriss treten im Flanschbereich beim Umformvorgang abwechselnd Bereiche mit ausgeprägten tangentialen Zug- und Druckspannungen auf. Abhängig von der gewählten Plattenform und dem Niederhalterdruck erzeugen die ausgeprägten Druckspannungen starke Aufdickungen im Blech. Gegenüber anderen Werkzeugteilen wird durch die Aufdickungen ein großer Einfluss eines nachgiebigen Niederhalters beim Umformvorgang erwartet. Bei der Simulation des Umformvorganges kann wie beim Napfwerkzeug die Symmetrie des Kreuzes für ein Viertelmodell genutzt werden. Die geringen Abmessungen des Werkzeugs ermöglichen geringe Rechenzeiten. Eine wesentlich komplexere Ausführung und größere Abmessungen (Stempel ca. 100 x 500mm) weist das 3DS-Werkzeug [8] auf. Mit diesem Versuchswerkzeug (Bild 5) tiefgezogene Werkstücke haben spezielle Geometriemerkmale, welche das Umform- und Rücksprungverhalten stark beeinflussen. Die Niederhalterfläche hat gegeneinander versetzte Höhenunterschiede, die bereits beim Schließen des Niederhalters Verformungen des Blechs verursachen. Die Stufung der Zarge in den Längsseiten hat Einfluss auf den Blecheinzug beim Tiefziehen. Eine weitere Besonderheit ist die Technik der Blechhaltung. Statt durch den massiven Niederhalter wird die Niederhalterkraft über eine dünne Stahlplatte (im folgenden elastische Platte genannt) durch mehrere Druckkissen aufgebracht. Die einzeln ansteuerbaren Druckkissen können bereichsweise unterschiedliche Drücke aufbringen, um so den Blecheinzug örtlich zu beeinflussen.

Durch die segmentweise Aufbringung des Niederhalterdrucks führt eine konventionelle Simulation des Tiefziehvorganges mit starren Werkzeug-Wirkflächen zu ungenauen Ergebnissen. Das 3DS-Werkzeug eignet sich dadurch gut, die Einflüsse elastischer Werkzeugeigenschaften in Tiefziehsimulationen zu zeigen. Aufgrund der Komplexität und Größe des 3DS-Werkzeug ist der Modellierungsaufwand und die Rechenzeit der Simulation gegenüber dem Napfwerkzeug höher.

3.2 Simulationen mit elastischen Werkzeugteilen

Zum Abgleich mit den Ersatzmodellen werden Tiefziehsimulationen mit elastischen Werkzeugteilen gegen Berechnungen mit Starrkörperwerkzeugen verglichen. Es werden für jedes Werkzeug die verwendeten Simulationsmodelle vorgestellt. Die Diskretisierung der elastischen Werkzeugteile als Volumenmodell erfolgte mit Kontinuumelementen. Durch diesen Zwischenschritt können beim Vergleich zwischen Starrkörpern und den Ersatzmodellen die Einflüsse der Werkzeugsteifigkeit berücksichtigt werden, ohne zusätzliche Fehlerquellen aus der Behandlung der Substrukturen einzubringen. Durch

die Einbeziehung der Werkzeugsteifigkeit ermöglicht sich die Berücksichtigung der lokalen Lasteinleitung des Niederhalterdrucks. Diese örtliche Einleitung durch Pinolen oder Druckkissen wurde beim Napfwerkzeug und beim 3DS-Werkzeug angewandt. Die Ergebnisse der Simulationen zeigen beim Vergleich die Unterschiede zwischen den Modellvarianten je Werkzeug. Ein Abgleich mit realen Werkstücken hat nicht stattgefunden, da die Modellbildung für elastische Werkzeugteile in der Simulation im Vordergrund dieser Untersuchung stand. Die folgenden Abschnitte geben für jedes Werkzeug den Vergleich zwischen starren und elastischen Modellvarianten wieder. Sofern Eigenschaften wie die Ausgangsblechdicke, Stempelgeschwindigkeit o.ä. nicht erwähnt werden, sind sie in beiden Modellvarianten gleich.

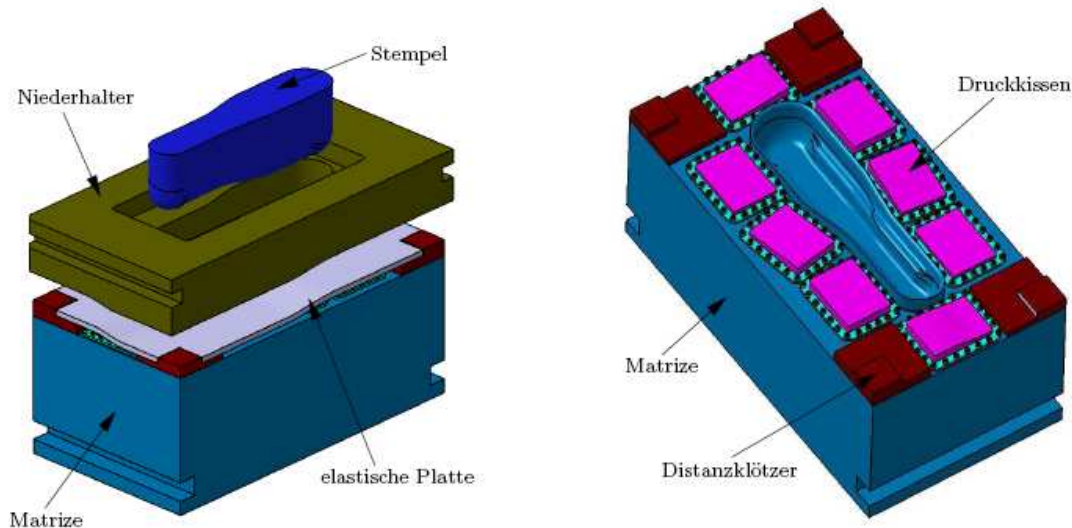


Bild 5: Vereinfachtes CAD-Modell des 3DS-Werkzeuges mit Stempel, Niederhalter, Matrize und elastischer Platte

3.2.1 Napfwerkzeug

Das FE-Modell für die konventionelle Tiefziehsimulation des Rechecknapfes besteht aus Starrkörperwerkzeugen, welche durch die speziellen Werkzeugnetze diskretisiert sind (Bild 6 links). Das Napfwerkzeug wurde für die Simulation unter Ausnutzung der Symmetrien als Viertelmodell diskretisiert. An den Symmetrierändern der Rechteckplatte wurden die Freiheitsgrade für Verschiebungen normal zu Symmetrieebene unterdrückt. Im ersten Schritt der Tiefziehsimulation wird der Niederhalterdruck aufgebracht. Dabei wird der entsprechende Starrkörper mit der resultierenden Kraft im Schwerpunkt beaufschlagt. Die Berechnung des Schließvorgangs des Niederhalters kann wegen des ebenen Flansches entfallen. Nach dem Aufbringen der Kraft wird der Stempel des Werkzeuges weggesteuert und formt dabei die Platine um. In der Ecke der Napfes verbleibt nach dem Umformvorgang ein breiterer Flansch als an den Längsseiten des Napfes. Mit ausreichenden Niederhalterdruck in diesem Bereich dickt das Blech aufgrund tangentialer Druckspannungen auf.

Für die Untersuchung mit elastischen Werkzeugteilen wurde ein Volumenmodell des Niederhalters mit einer Dicke von 20 mm verwendet. Die Grundfläche ist gleich dem Starrkörpermodell. Um den Einfluss eines elastischen Werkzeugteil an diesem kleinen Beispiel deutlich zeigen zu können, wurde die Einleitung der Niederhalterkraft durch einzelne Pinolen in das Simulationsmodell (Bild 6 rechts) einbezogen und die Dicke des Niederhalters gegenüber dem realen Modell (40 mm) für die Simulation halbiert. Zur Einhaltung der Symmetriebedingungen wurden an den Symmetrieflächen entsprechende Translationsfreiheitsgrade zur Behinderung der Bewegung normal zur Symmetrieebene und Rotationsfreiheitsgrade zum Eben-Bleiben des Querschnittes gesperrt.

Die Einleitung der Niederhalterkraft erfolgt durch starre Wirkflächen der Pinolen (Durchmesser 40 mm), die im gleichen Abstand zueinander platziert sind. Die Wirkflächen können jeweils getrennt mit einer Kraft im Schwerpunkt beaufschlagt werden. In der durchgeführten Simulation wurden alle Pinolen mit dem gleichen Niederhalterdruck bezogen auf ihre Fläche belastet. Die Summe der resultierenden Kräfte ist gleich der Niederhalterkraft in der Starrkörpersimulation. Das Volumenmodell des Niederhalters überträgt den Niederhalterdruck von den Pinolenflächen auf die Platine. Nach dem Erreichen des vollständigen Druckes wird der Stempel analog zum starren Modell in die Matrize verfahren. Im Verlauf des Umformvorganges erfährt der elastische Niederhalter Verformungen infolge der Aufdi-

ckung des Bleches im Flanschbereich und der örtlich konzentrierten Lasteinleitung durch die Pinolenstarrkörper. Die Verformungen in Richtung der z-Achse (Ziehrichtung) sind in Bild 7 grafisch dargestellt. Der größte Durchbiegung des Niederhalters entsteht an der Napfecke durch die Aufdickung des Bleches und durch den Hebelarm zwischen der Pinolenkraft und dem äußeren Rand des Blechflansches.

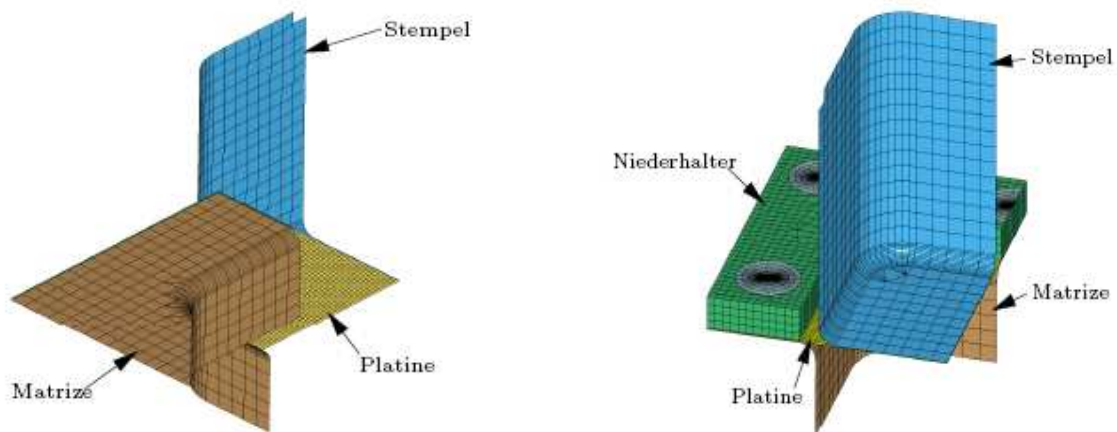


Bild 6: FE-Modell des Napfwerkzeugs mit starren Elementen (links) und Volumenelementen (rechts)

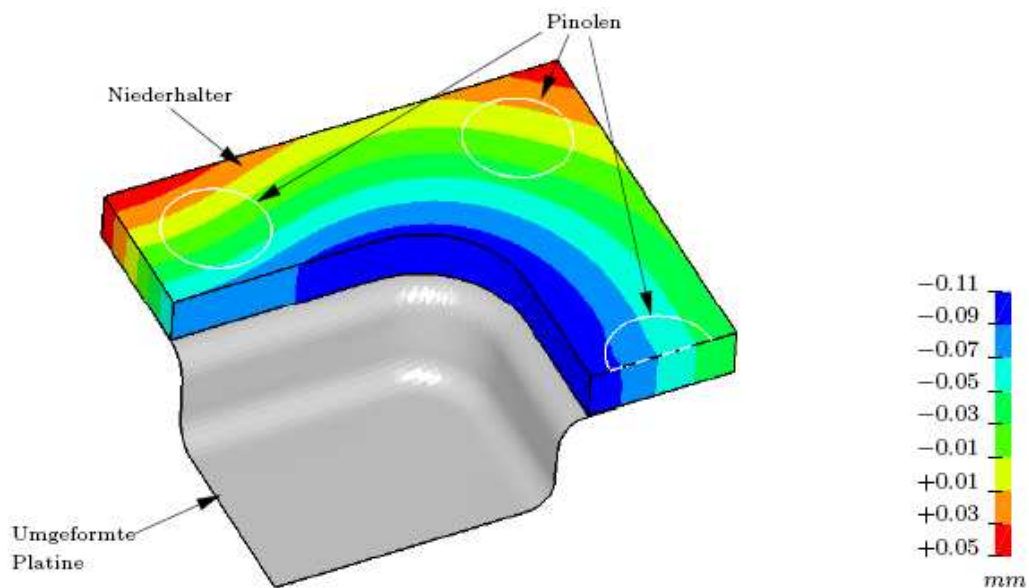


Bild 7: Verschiebungen des Niederhalters in Ziehrichtung bezogen auf dessen Ausgangsgeometrie

Beim Starrkörpermodell ist der Abstand zwischen Niederhalter und Matrize stets gleich groß. Infolge der Aufdickungen des Bleches im Flanschbereich wird der Niederhalterstarrkörper gegen die wirkende Niederhaltekraft um ca. 0.02 mm zurückgeschoben. Beim elastischen Volumenmodell reagieren die Pinolen unterschiedlich auf die Aufdickungen. Trotz des gleichen Druckes auf jede Pinole wird nur Pinole 1 entgegen der Ziehrichtung um ca. 0.02 mm zurückgeschoben. Die Pinolen 2 und 3 werden im Verlauf des Tiefziehvorgangs durch weiter in Ziehrichtung verschoben.

Die größten Aufdickungen sind in Bild 8 für beide Modelle im Übergangsbereich zwischen Tiefziehbeanspruchung in der Ecke und Zugbeanspruchung in den Längsseiten. Diese Aufdickungen verursachen örtlich höhere Kontaktdrücke und somit eine Behinderung des Blecheinzugs durch Reibung. Beim Starrkörpermodell wird in diesen Punkten die Niederhalterfläche entgegen der Ziehrichtung im Ganzen zurückgeschoben. In der restlichen Flanschfläche ist dann mangels Kontakt der Blecheinzug reibungsfrei, bis im weiteren Verlauf neue Aufdickungen entstehen. Im Endzustand nach dem Umformvorgang bildet sich beim Starrkörpermodell vor dem Einlafradius in der Napfecke eine weitere Aufdickung (siehe Bild 8). Durch die örtliche Kräfteinleitung der Pinole im Eckbereich wird im Modell mit nachgiebigem Niederhalter die Aufdickung vor dem Einlafradius verringert. Die lokal starke Rei-

bung unter der Eckpinole überlagert die Tiefziehbeanspruchung im Flanschbereich der Ecke mit radialen Zugspannungen. Durch die Verlagerung des Niederhalterdruckes in die äußere Flanschecke kann aus Nachbarbereichen mehr Blech in die Napfcke nachfließen. Bild 8 weist dadurch beim elastischen Niederhaltermodell weniger Blechdünnung auf. Bild 9 zeigt, dass mit dem elastischen Werkzeugmodell die Flächenpressung unter dem Niederhalter realistischer wiedergegeben wird als beim starren Werkzeugmodell.

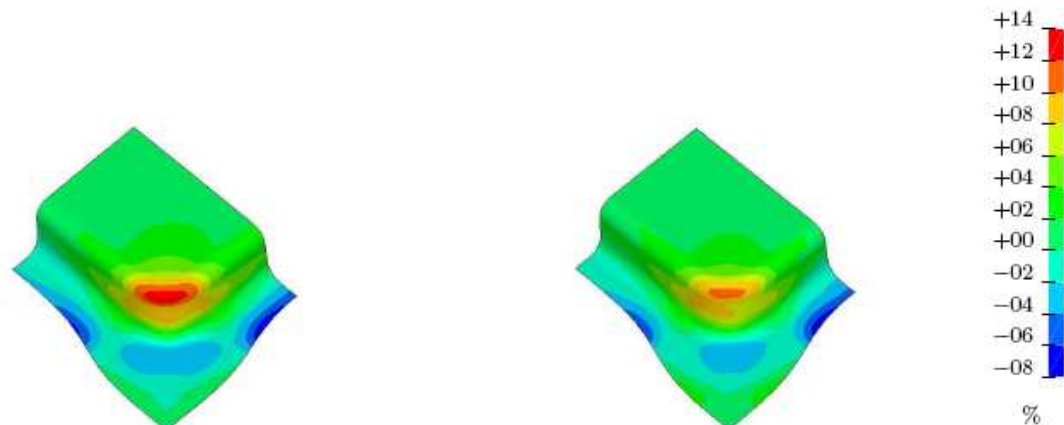


Bild 8 Blechdickenänderung in Prozent bezogen auf die Ausgangsdicke
links: Starrkörpermodell, rechts Modell mit elastischem Niederhalter

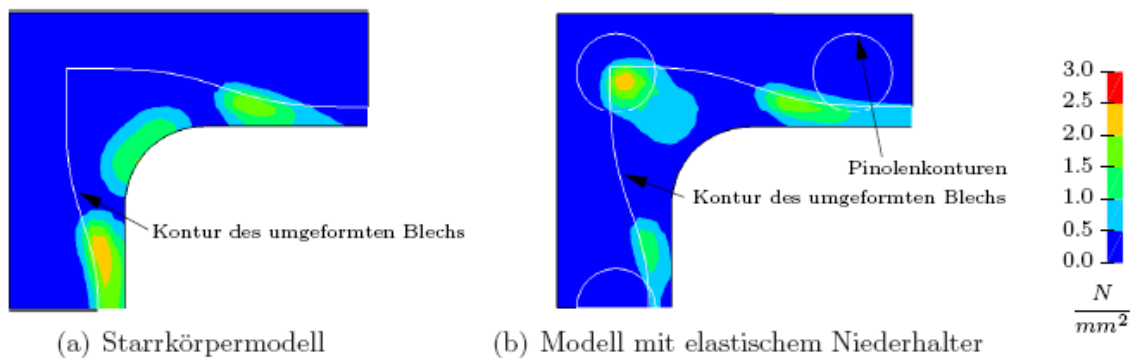


Bild 9: Flächenpressungen unter dem Niederhalter bei verschiedenen Modellen für das Werkzeug

3.2.2 Kreuzstempelwerkzeug

Ähnlich wie beim Napfwerkzeug wurde für die Tiefziehsimulation mit dem Kreuzstempelwerkzeug unter Ausnutzung von Symmetrieachsen ein Viertelmodell verwendet. Zur Einhaltung der Symmetriebedingungen müssen für die Platine entsprechende Freiheitsgrade definiert werden. Für das Volumenmodell des Niederhalters beim elastischen Werkzeugmodell müssen analog zu dem des Napfwerkzeugs an den Symmetrieebenen Verschiebungen normal zur Ebene und Rotationsfreiheitsgrade für das eben-Bleiben des Querschnittes gesperrt werden. Wegen der ebenen Niederhalterfläche und der ebenen Platinen kann die Berechnung des Schließvorgangs bei starrem und elastischem Modell entfallen. Für die Auswertung der Kontaktdrücke auf die Niederhalterflächen unter gleichen Bedingungen wurden bei beiden Modellen die gleichen FE-Netze verwendet.

Beim starren Werkzeugmodell (siehe Bild 10, links) wird der Niederhalterdruck als resultierende Kraft auf den entsprechenden Starrkörper aufgebracht. Der Umformvorgang des Bleches findet durch die weg-gesteuerte Verschiebung des Stempels statt. Als nachgiebiges Werkzeugmodell wurde im elastischen Modell (siehe Bild 10, rechts) wiederum der Niederhalter mit Kontinuumslementen vernetzt. Die Einleitung des Niederhalterdruckes geschieht bei diesem Modell über eine Starrkörperfläche, welche den Druck gleichmäßig auf die gesamte Oberseite des Niederhaltermodells einträgt. Das elastische Volumenmodell des Niederhalters kann durch die flächige Lagerung keine Biegeverformungen ausüben. Mit diesem Modell kann der Einfluss elastischer Werkzeigteile auf den Anteil der Normalsteifigkeit reduziert werden. Der Tiefziehvorgang erfolgt analog zu starren Modell.

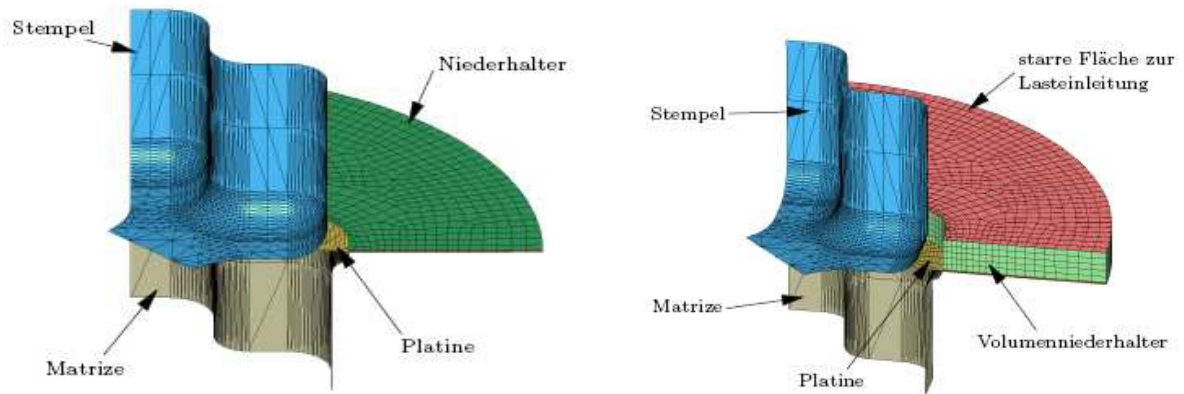


Bild 10: FE-Modelle des Kreuzstempelwerkzeuges
links: Starrkörpermodell, rechts: Modell mit elastischem Niederhalter

Durch die Geometrie des Kreuzstempels wird die Ausgangsplatine mit der Gestalt eines Kreissegmentes unregelmäßig stark in die Matrize eingezogen. Der Rand des nach dem Umformvorgang verbleibenden Flansches weist eine geschwungene Form auf. Durch die konvexe Ecke des Einlaufradius in der Mitte des Viertelmodells wird das Blech beim Einlauf über die Ecke in zwei Richtungen gezogen. In diesem Bereich liegen hauptsächlich tangentialen Zugspannungen vor. Zum äußeren Rand des Flansches ändert sich diese Zugspannung in hohen tangentialen Druck infolge des geringeren Blecheinzuges an den Symmetrierändern. Wegen der Druckspannungen dickt das Blech auf und verursacht Kontaktdruck auf Niederhalter und Matrize. Die daraus resultierende Reibung bremst den Blecheinzug in diesem Bereich.

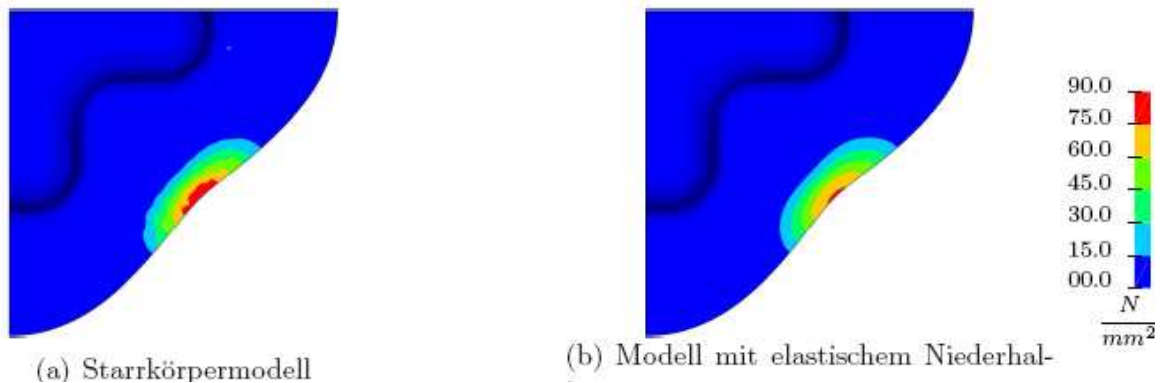


Bild 11: Kontaktdruck zwischen Blech und Niederhalter am Ende des Tiefziehvorganges

Die Kontaktdruckverteilung in Bild 11 zeigt einen leicht höheren Druck beim starren Werkzeug, der ungleichmäßiger verteilt ist. Die Verformungen des elastischen Niederhaltermodells (Bild 12 links) vermindern lokale Druckspitzen und bewirken eine homogenere Verteilung. Durch den etwas geringeren Kontaktdruck beim elastischen Modell wird die Reibung zwischen Blech und Werkzeug leicht vermindert. Dadurch ist der Blecheinzug im Bereich der hohen Aufdickungen beim elastischen Modell geringfügig größer (Bild 12, rechts).

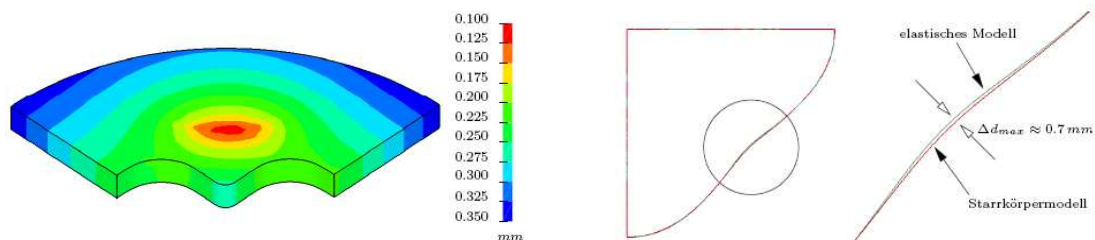


Bild 12: Durchbiegung des elastischen Niederhalters am Ende des Tiefziehvorganges, linkes Bild Blecheinlauf bei starrem und elastischen Modell, rechtes Bild

3.2.3 3DS-Werkzeug

Das 3DS-Werkzeug weist gegenüber dem Napfwerkzeug und dem Kreuzstempelwerkzeug keine Symmetrien auf. Mit dem Werkzeug tiefgezogene Bauteile weisen eine geschlossene Form auf. Das starre Werkzeugmodell (siehe Bild 13, links) beinhaltet die konventionelle Blechhalter durch Niederhalter und Matrize als Wirkflächennetze. Aufgrund der geringen Breite des Werkzeuges kann eine Schwerkraftberechnung entfallen. Die Niederhalterfläche des 3DS-Werkzeug hat eine nichtebene Oberfläche. Dadurch ist eine Berechnung des Niederhalter-schließens notwendig. Dafür werden Matrize, Ausgangsplatine und Niederhalter positioniert. Der Niederhalter wird in der Simulation weg-gesteuert bis auf Blechdicke an die Matrize gefahren. Die Berechnung des Tiefziehvorganges erfolgt wie bei den starren Modellen des Napfwerkzeugen und des Kreuzstempelwerkzeugen. Nach dem Aufbringen der resultierenden Niederhalterkraft wird der Stempel weggesteuert in des Gegenwerkzeug verfahren. Die Matrize des Werkzeugs verfügt im Gegensatz zum Napfwerkzeug und dem Kreuzstempelwerkzeug über keinen geschlossenen Boden. Damit ist die Ziehtiefe geometrisch vorgegeben. Durch den Profilunterschied in der Längsachse entstehen beim Tiefziehvorgang am Bauteilboden Falten. Der größte Einfluss eines elastischen Werkzeugs auf den Blecheinzug ist auch beim 3DS-Werkzeug im Niederhalterbereich gegeben. Dafür muss beim elastischen Modell (Bild 13 rechts) des 3DS-Werkzeugs die komplexe Form der Blechhaltung berücksichtigt werden. Im Gegensatz zu den anderen Werkzeugen ist eine dünne, elastische Platte ($t = 12\text{mm}$) als nachgiebiges Volumenmodell Bestandteil der Matrize.

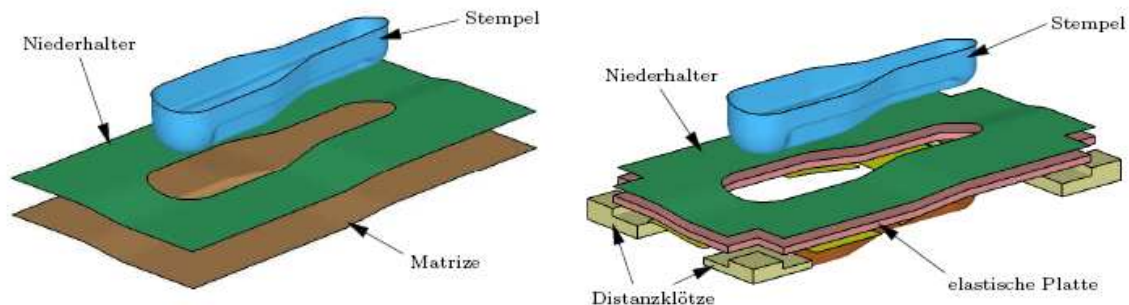


Bild 13: FE-Modell des 3DS-Werkzeuges; links: starres Modell, rechts elastischer Niederhalter

Der größte Unterschied zwischen den starrem und dem elastischen Modell ist in den Mitten der Bauteilenden sichtbar. Das starre Modell reagiert auf die Aufdickungen mit lokal sehr hohen Kontaktdrücken (Bild 14, links). Mit der daraus resultierenden Reibung wird der Blecheinzug gebremst. Durch die nachgiebige Platte im elastischen Modell werden die Kontaktdrücke über den gesamten Flansch homogener verteilt (Bild 14, rechts). Damit werden größere Aufdickung an den Bauteilenden zugelassen. Infolge der größeren Blechaufdickungen im Flansch an den Bauteilenden biegt sich die elastische Platte in diesen Bereich stärker durch. Die einzelnen Druckkissen des elastischen Modells reagieren auf die Durchbiegung der Platte mit unterschiedlichen Verschiebungen gegen die wirkenden Niederhalterkräfte. Bild 15 zeigt für die Druckkissen am Bauteilende mit der größeren Profilweite die größten Relativverschiebungen in entgegen der Niederhalterkraft. Die Druckkissen 3 und 7 in den Längsseiten werden durch den Blecheinzug weiter entgegen der Ziehrichtung verschoben und verursachen ein Biegemoment in der Platte um den Blechrand.

Die Berücksichtigung der Steifigkeit der elastischen Platte und der lokalen Lastenleitung durch Druckkissen verändert den Blecheinzug an den Bauteilenden signifikant um 6.6mm. Durch die unterschiedlichen Reibzustände im Flansch beeinflusst die elastische Platte die Formänderungs- und Spannungszustände während des Umformvorgangs. Das 3DS-Werkzeug zeigt die Einflüsse nachgiebiger Werkzeugteile deutlicher als das Napfwerkzeug und das Kreuzstempelwerkzeug. Die Ursache dafür liegt u. a. an der geringen Biegesteifigkeit der elastischen Platte und in der Interaktion zwischen mehreren Aufdickungen.

4 Simulationen mit Ersatzmodell

Der folgende Abschnitt beinhaltet den Vergleich zwischen Berechnungen mit elastischem Modell und Modellen bei denen nachgiebige Werkzeugteile durch Substrukturen ersetzt wurden. Die Vergleiche werden für das Napfwerkzeug und für das Kreuzstempelwerkzeug angestellt. Für das 3DS-Werkzeug war die Berechnung mit kondensiertem Ersatzmodell aufgrund von Limitierungen der eingesetzten Software LS-DYNA Version 970 nicht möglich. Es werden je Werkzeug das Ersatzmodell vorgestellt

und anhand charakteristischer Ergebnisse mit dem elastischen Volumenmodell verglichen. Der Schwerpunkt bei den Ergebnissen liegt dabei auf dem Blecheinzug und dem Verformungsverhalten beider Modelle. Ziel der Nutzung von Ersatzmodellen mit Substrukturen ist es, gleichwertige Verformungseinflüsse zu dem elastischen Volumenmodell zu erzielen. In den folgenden Abschnitten werden daher nur unterschiedliche Ergebnisse zwischen beiden Modellvarianten diskutiert.

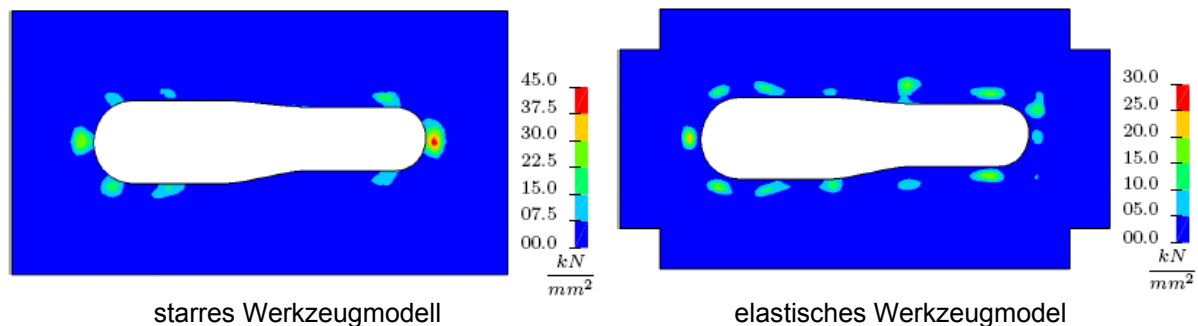


Bild 14: Kontaktdruckverteilung auf der Niederhalterfläche

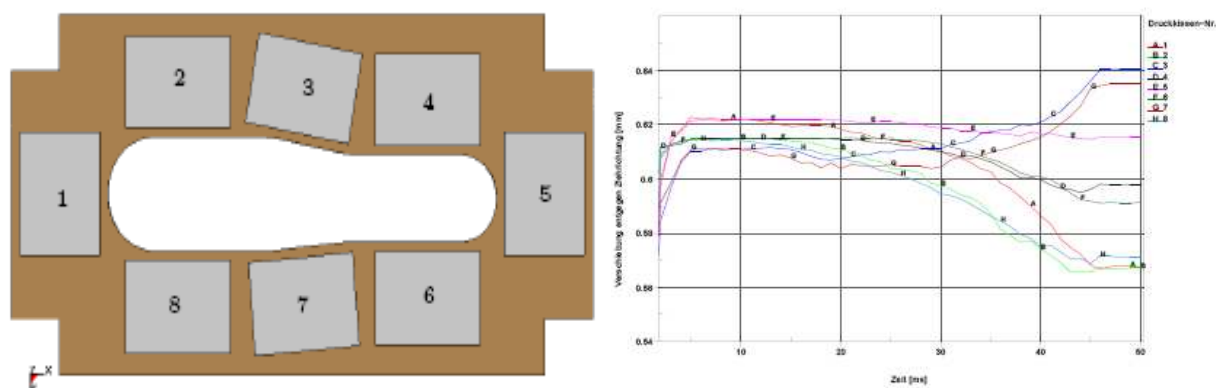


Bild 15: Relativverschiebungen der Druckkissenstarrkörper während der Tiefziehsimulation (bedingt durch Blechaufdickungen)

4.1 Napfwerkzeug

Für das Napfwerkzeug wurde der Niederhalter als nachgiebiges Bauteil modelliert. Zur Erzeugung des Ersatzmodells des Niederhalters müssen die Knoten und Freiheitsgrade für die statische Kondensation definiert werden. Beim Napfwerkzeug sind die Kontaktknoten in Bild 16 gelb markiert. Die Berechnung der Steifigkeiten erfordert eine statisch bestimmte Lagerung der Platte damit Starrkörperbewegungen nicht möglich sind. Das Volumenmodell des Niederhalters wird durch Sperrung der Translationsfreiheitsgrade normal zur Ziehrichtung (x-y-Ebene) an möglichen Starrkörperbewegungen gehindert. Dafür können zweckmäßig die Knoten an den Symmetrieflächen gewählt werden, da dort Freiheitsgrade zur Einhaltung der Symmetriebedingungen unterdrückt werden müssen. Die Kondensation der Steifigkeit kann aufgrund der ebenen Niederhalterfläche auf die Ziehrichtung (z-Achse) beschränkt werden. Die dadurch vernachlässigte Querkontraktion der elastischen Platte hat keinen Einfluss in der späteren Tiefziehsimulation. Somit sollten alle verbleibenden Freiheitsgrade normal zur Ziehrichtung (x-y-Ebene) beim Niederhaltermodell gesperrt werden, da ihnen keine Steifigkeit zugeordnet wird. Durch die Beschränkung der Freiheitsgrade wird die Berechnung der Substruktur vereinfacht und damit beschleunigt. Mit der Angabe des E-Moduls und der Rohdichte des Niederhalters wird die Kondensation mit dem Berechnungsprogramm PERMAS durchgeführt. Als Ergebnis liegen die kondensierten Steifigkeiten und Massen als Matrizen vor. Die damit erzeugte Substruktur des Volumenmodells wird in die spätere Tiefziehsimulation eingebunden. Für den Aufbau des FE-Modells wurde das nachgiebige Volumenmodell des Niederhalters durch die Substruktur ersetzt. Zur visuellen Darstellung der kondensierten Steifigkeiten und für die Kontaktdefinition wurden die Oberflächenknoten mit Nullschalen vernetzt. Die Simulation des Tiefziehvorgangs erfolgt analog zum elastischen Modell.

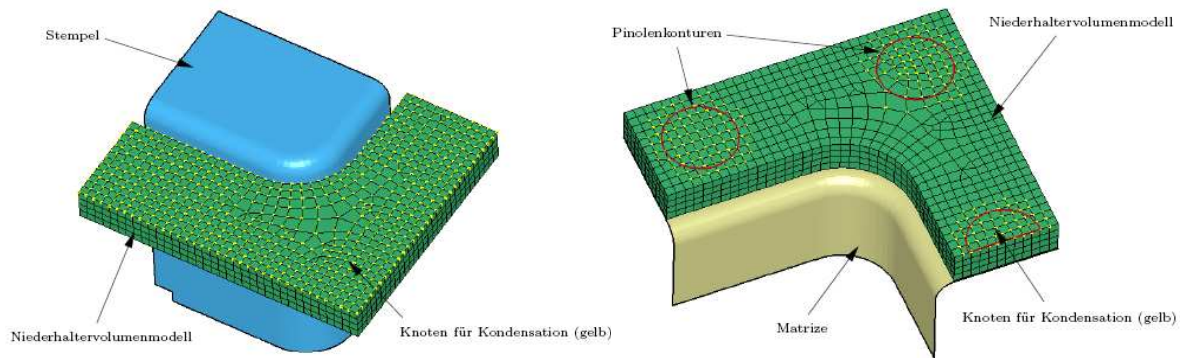


Bild 16: Ausgewählte Knoten (gelb) für die Kondensation der Steifigkeit

Für den Vergleich zwischen Tiefziehsimulationen mit elastischem Volumenmodell und den Simulationen mit Ersatzmodell ist deren Verformungsverhalten maßgebend. In Bild 17 wird der Verformungsunterschied zwischen elastischem Modell und dem Ersatzmodell gezeigt. Im Diagramm wurden die relativen Verschiebungen an einem Schnitt der blechzugewandten Oberfläche zwischen Napfecke und der Ecke des Niederhalters dargestellt. Das Ersatzmodell aus der Substruktur zeigt in einen höheren Anstieg gegenüber dem Volumenmodell. Dieser Unterschied schließt auf eine geringere Biegesteifigkeit der Substruktur. Die Ursache des Unterschiedes liegt in den unterschiedlichen Wortlängen der Dateien für den Transfer der Steifigkeiten zwischen PERMAS und LS-DYNA. Direkte Auswirkungen hat die Verformung des Niederhalters auf den Kontaktdruck zwischen Blech und Niederhalter. Da die unterschiedliche Durchbiegung zwischen beiden Modellen über den Niederhalter gleichmäßig ist, sind die Verteilungen der Blechdicke und des Kontaktdruckes gleich. Die Verteilung des Kontaktdruckes auf der Niederhalteroberfläche des elastischen Volumenmodells und für das Substrukturmodell ist ebenfalls gleich. Infolge der etwas geringeren Biegesteifigkeit des Ersatzmodells ist der Kontaktdruck in der Napfecke etwas in geringer als beim Volumenmodell. Die zwischen beiden Modellen gleichen Pinolenkräfte verursachen bei geringerer Biegesteifigkeit lokal höhere Normaldrücke im Ersatzmodell.

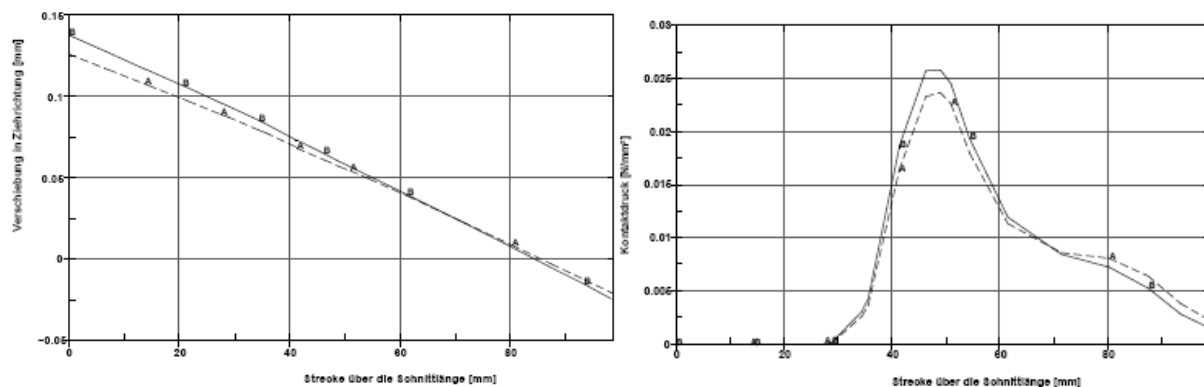


Bild 17: Vergleich von Verschiebung (linkes Diagramm) und Normaldruck zwischen Volumen- und Ersatzmodell (rechtes Diagramm)

4.2 Kreuzstempelwerkzeug

Das nachgiebige Werkzeugteil des Kreuzstempelwerkzeugs ist der Niederhalter. Für das Ersatzmodell wurde eine Substruktur des Niederhaltervolumenmodells durch Kondensation der Steifigkeit erzeugt. Statt einer lokalen Lasteinleitung wird der Niederhalterdruck gleichmäßig auf die gesamte platinenabgewandte Oberfläche aufgebracht. Dadurch hat nur die Normalsteifigkeit des elastischen Werkzeugteiles einen Einfluss auf den Blecheinzug. Die Kondensation der Normalsteifigkeit erfolgt auf die Knoten der Ober- und Unterseite des Volumenmodells und kann auf die Freiheitsgrade senkrecht zur Niederhalteroberfläche beschränkt werden (Bild 18). Um eine statisch bestimmte Lagerung der Volumenmodells festzulegen und um die Symmetriebedingungen zu definieren wurden Translationsfreiheitsgrade normal zu Ziehrichtung in der x-y-Ebene an den Symmetrieflächen gesperrt. An den Oberflächen für die kondensierten Normalsteifigkeiten wurden die Freiheitsgrade für

Bewegungen in der Niederhalterebene unterdrückt. Die Erzeugung der Substruktur wurde mit dem Berechnungsprogramm PERMAS durchgeführt, welches die kondensierten Steifigkeiten und Massen als Matrizen in Dateien abspeichert.

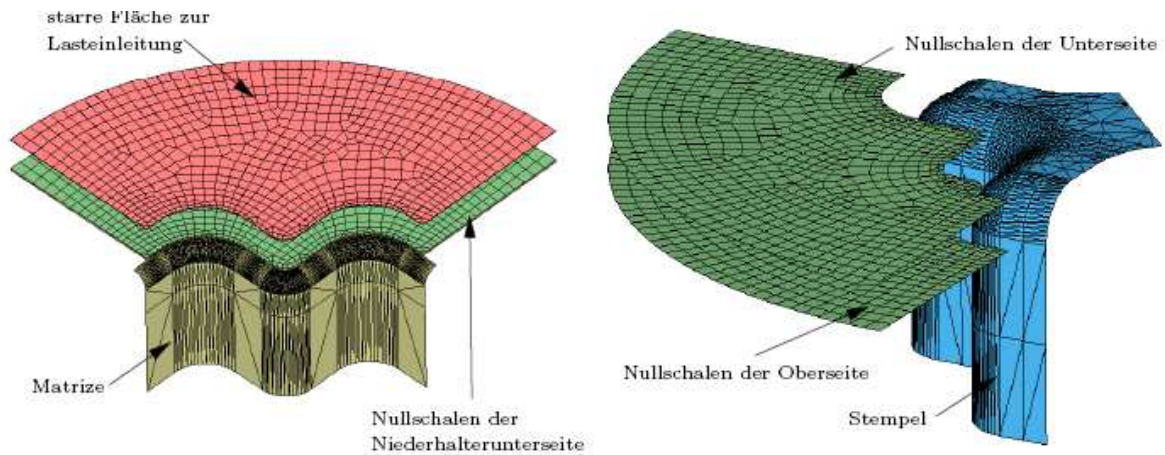


Bild 18: Darstellung der Substruktur für das Kreuzwerkzeug

Für die Berechnung des Tiefziehvorgangs mit dem Ersatzmodell wird im FE-Modell das nachgiebige Volumenmodell des Niederhalters durch die Substruktur aus den abgespeicherten Matrizen ersetzt. Zur visuellen Darstellung der kondensierten Steifigkeiten und für die Definition der Kontakte wurden die Oberflächenknoten mit Nullschalen vernetzt. Die Tiefziehsimulation erfolgt analog zum elastischen Modell. Im folgenden Bild 19 sind die Verschiebung des Niederhalters und die Blechdicke an einem Diagonalschnitt aufgezeigt. Der Vergleich zwischen dem Volumenmodell und dem Ersatzmodell zeigt auch hier eine gute Übereinstimmung.

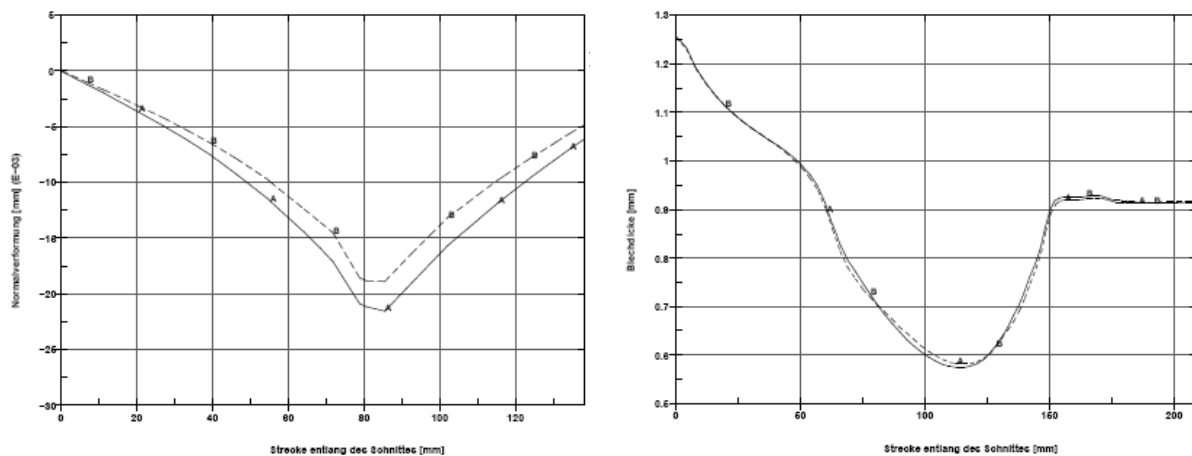


Bild 19: Vergleich von Verschiebung (linkes Diagramm) und der Blechdicke zwischen Volumen- und Ersatzmodell (rechtes Diagramm)

4.3 Auswertung

Für die drei untersuchten Werkzeuge konnte der Einfluss elastischer Werkzeuteile (hier des Niederhalters) auf das Simulationsergebnis gezeigt werden. Beim Viertelmodell des Napfwerkzeugs sind die Unterschiede auf die örtliche Lasteinleitung und die geringe Querschnittshöhe des Niederhalters zurückzuführen. Beim Starrkörpermodell wird der Blecheinzug wesentlich durch die Flanschverdickungen in den Nachbarbereichen der Ecke bestimmt. Im elastischen Modell konzentrieren sich die Bereiche mit hoher Reibung an den Pinolen. Dadurch entstehen an der Napfecke höhere Formänderungen während mehr Blech in den Längsseiten eingezogen wird. Im dargestellten Beispiel wirken sich die Anordnung der Pinolen und die Niederhalterdicke demnach negativ auf das Ziehergebnis aus. Durch andere Pinolenanordnung und unterschiedliche Pinolenkräfte kann im Gegensatz zum Starrkörpermodell der Blecheinzug gezielt gesteuert werden. Beim Kreuzstempelwerkzeug ist an einer Stelle im Blechflansch eine starke Aufdickung aufgetreten. Die Berücksichtigung von Normalverformungen des Niederhalters bewirkt im Ergebnis eine stetigere Kontaktdruckverteilung des elastischen Modells. Der

Einfluss auf den Blecheinzug ist sehr gering, da durch die einzelne Aufdickung nahezu die gleiche Kontaktdruckverteilung im Flansch vorliegt und der Blecheinzug in Nachbarbereichen nicht verändert wird. Das 3DS-Werkzeug zeigt durch mehrere Aufdickungsbereiche an den Ziehteilenden deutliche Unterschiede zwischen starrem und elastischem Niederhaltermodell. Das starre Modell des Niederhalters verstärkt die erste größere Aufdickung im Verlauf des Tiefziehvorgangs weiter und verursacht eine punktiert überhöhte Reibung. Diese hohen Kontaktdrücke schieben den Niederhalterstarrkörper gegen die wirkende Kraft zurück und bewirken einen nahezu reibungsfreien Blecheinzug in den übrigen Bereichen. Beim elastischen Modell bewirkt die nachgiebige Platte eine Homogenisierung der Kontaktdruckverteilung an den Bauteilenden. Spitzendrücke werden infolge der Verformungen der Platte über größere Bereiche verteilt. Bei der elastischen Platte bewirken lokale Aufdickungen örtlich begrenzte Verformungen. Trotz der größeren Blechaufdickungen an den Ziehteilenden führen auch die kleineren Aufdickungen im Flansch an den Längsseiten zu Kontaktdrücken und daraus resultierender Reibung. Damit sind die Einflüsse elastischer Werkzeigteile beim 3DS-Werkzeug im Vergleich zu den anderen Werkzeugen am deutlichsten zu sehen. Für das Napfwerkzeug und das Kreuzstempelwerkzeug wurden Berechnungen mit Ersatzmodelle mit Substrukturen für die elastischen Werkzeigteile durchgeführt. Beim Ersatzmodell des Napfwerkzeugs wurden im Vergleich zum elastischen Volumenmodell größere Biegeverformungen bei der Substruktur festgestellt. Daraus lässt sich eine geringere Biegesteifigkeit ableiten. Dadurch sind in der Kontaktdruckverteilung geringe Unterschiede bei den Beträgen festzustellen. Bei den resultierenden Ziehteilen beider Modellvarianten sind die Unterschiede im Blecheinzug kaum messbar. Im Ersatzmodell des Kreuzstempelwerkzeugs wird die Normalsteifigkeit des Niederhaltervolumenmodells durch eine Substruktur einbezogen. Die Niederhaltersubstruktur weist größere Normalverformungen als das Volumenmodell auf. Daraus kann ähnlich wie beim Napfwerkzeug eine geringere Normalsteifigkeit abgeleitet werden. Die Blechaufdickungen und die verursachten Kontaktdrücke sind bei beiden Modellvarianten nahezu identisch. Auf die Ziehteile wirkt sich die geringere Steifigkeit der Substruktur mit leicht höherem Blecheinzug beim Ersatzmodell aus. Die Vereinfachung von Volumenmodell zu Substrukturen zeigt bei beiden Werkzeugen geringe Einflüsse. Die deutlichen Auswirkungen der elastischen Platte beim 3DS-Werkzeug konnten wegen Limitierungen in der eingesetzten Software nicht an Substrukturen untersucht werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Studie wurde der Einfluss des elastischen Werkzeugverhaltens bei Tiefziehsimulationen untersucht. Dafür wurde der Niederhalter aus konventionellen Berechnungsmodellen mit elastischen Volumenelementen diskretisiert. Die Verwendung elastischer Werkzeuge bietet die Möglichkeit, lokale Lasteinleitungen bei den Niederhalterkräften in die Simulationsmodelle einzubeziehen. Bei den untersuchten Modellvarianten wurden diese örtlichen Lasteinleitungen einbezogen und deren Auswirkungen untersucht. Ein primäres Ziel war dabei die Vereinfachung der Volumenmodelle elastischer Werkzeuge durch Substrukturen. Dabei stand die Umsetzung dieser Technik für die Anwendung in der Praxis im Vordergrund. Die mit Substrukturen vereinfachten Ersatzmodelle für die Tiefziehsimulation wurden mit den elastischen Volumenmodellen anhand verschiedener Werkzeuge verglichen. Bei den Berechnungen wurden verschiedene Modellvarianten von drei Versuchswerkzeugen untersucht. Die Ergebnisse zeigten charakteristische Unterschiede zwischen Starrkörpermodellen und Modellen mit elastischem Werkzeugteil. Bei der zusätzlichen Berücksichtigung der lokalen Lasteinleitung der Niederhalterkraft in den Modellvarianten mit elastischem Niederhalter wurden signifikante Unterschiede zum Starrkörpermodell festgestellt. Die Kondensation der Werkzeugsteifigkeit auf die Wirkflächen von Substrukturen konnte nur eingeschränkt angewendet werden. Berechnungen mit den Ersatzmodellen zeigten qualitativ das gleiche Verformungsverhalten der Niederhalterstrukturen wie die elastischen Volumenmodelle. Es wurden geringe Abweichungen bei der Steifigkeit zwischen beiden Varianten festgestellt. Beim Blecheinzug in der Tiefziehsimulation waren an den untersuchten Werkzeugen keine Unterschiede sichtbar. Mit den Substrukturen können somit elastische Werkzeugeigenschaften in der Tiefziehsimulation vereinfacht berücksichtigt werden.

Die Erstellung von Ersatzmodellen für größere Werkzeuge erfordert eine Verbesserung der Schnittstellen der eingesetzten Berechnungsprogramme. Vorrangig ist dabei die Unterstützung eines kompakten, binären Speicherformats für die Substrukturen. Zur Bewertung der Effizienz der Ersatzmodelle sollte eine Validierung mit realen Versuchen durchgeführt werden. Für die Ersatzmodelle zur Berücksichtigung der Werkzeugsteifigkeit sind Anwendungen bei der Prozesssimulationen weiterer Umformverfahren wie etwa dem Innenhochdruckumformen denkbar.

6 Literatur

- [1] Roll, K.; Rohleder, M.: Einsatz und Potenzial der Blechumformsimulation im Entwicklungsprozess von Karosserieblechformteilen. 17. Umformtechnisches Kolloquium Hannover 2002.
- [2] Ropers, C.: Berücksichtigung der Temperatur und Werkzeugnachgiebigkeit in der Simulation von Blechumformprozessen. Dr.-Ing. Diss. Univ. Hannover, 2001
- [3] Y.T.Keum, I.H.Ahn, I.K.Lee, M.H.Song, S.O.Kwon and J.S.Park: Simulation of Stamping Process of Automotive Panel Considering Die Deformation. In: Proceedings NumiSheet2005, Detroit.
- [4] Bogon, P.: Anforderungen an Simulationssysteme zur Optimierung der Produktionseigenschaften von Pressmaschinen. In: 6. Dresdener Werkzeugmaschinen-Fachseminar „Simulation an Umformmaschinen“. Dresden, 2003
- [5] Bathe, K.-J.: Finite-Elemente-Methoden, Springer, 1986.
- [6] PERMAS – Benutzerhandbuch, INTES GmbH, Stuttgart
- [7] Hallquist, J.: LS-DYNA Theoretical Manual, LSTC, Livermore (California) 1998.
- [8] Roll, K.; Rohleder, M.: A Complex Testing Tool for the Investigation of Springback Deviations. Proceedings of the Numisheet 2002, Korea