



DWM e. V. Dresdner Freundeskreis
der Werkzeugmaschinen- und Steuerungstechnik

Tagungsband

12. Dresdner Werkzeugmaschinen-Fachseminar

Simulation von Umformprozessen unter Einbeziehung der Maschinen- und Werkzeugeinflüsse

- Modelle und Parameter ▪
- Stand der Anwendung ▪
- Praxisbeispiele ▪

6. und 7. Dezember 2007
Dresden



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN

Institut für
Werkzeugmaschinen
und Steuerungstechnik



Teilnehmerliste

Stand: 03.12.2007

Albert , Ernst	Bosch Rexroth Mechatronics GmbH, Schweinfurt
Prof. em. Dr. Bahmann , Werner	DWM e. V., Dresden
Bednarz , Martin	TU München, Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen
Berger , Carsten	MPT Präzisionsteile GmbH, Mittweida
Blau , Peter	Fraunhofer IWU, Chemnitz
Blaich , Christian M.	Universität Stuttgart, Institut für Umformtechnik
Bretscher , Ralf	Bosch Rexroth Mechatronics GmbH, Schweinfurt
Brzezinski , Gunter	TU Dresden, Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik
Dr. Bogon , Peter	Daimler AG, Mercedes-Benz Werk Sindelfingen
Prof. Dr. Großmann , Knut	TU Dresden, Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik
Harmening , Wolfgang	Faurecia Autositze GmbH, Stadthagen
Hardtmann , André	TU Dresden, Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik
Dr. Haufe , André	DYNAmore GmbH Stuttgart
Prof. Dr. Helduser , Siegfried	TU Dresden, Institut für Fluidtechnik
Hirsch , Michael	Profiroll Technologies GmbH, Bad Dübén
Holowenko , Olaf	TU Dresden, Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik
Jahn , Axel	Fraunhofer IWS, Dresden
Jesche , Fred	Fraunhofer IWU, Chemnitz
Jünger , Helmut	Bosch Rexroth AG, Leipzig
Dr. Jungnickel , Günter	TU Dresden, Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik
Dr. Just , Hendrik	FEMUTEC Engineering GmbH, Hamburg
Dr. Kauschinger , Bernd	TU Dresden, Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik
Kötter , Hanno	TU Dresden, Institut für Oberflächen- und Fertigungstechnik
Kretzschmar , Holger	TU Dresden, Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik
Kreutel , Markus	AUDI AG, Neckarsulm
Kroiß , Thomas	Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
Dr. Langer , Detlef	Ingenieurbüro Langer, Markkleeberg
Dr. Lieb , Andreas	SMS Meer GmbH, Witten
Lieber , Thomas	Fraunhofer IWU, Chemnitz
Lingbeek , Roald	Netherlands Institute for Metals Research, Delft
Lohse , Harald	TU Dresden, Institut für Fluidtechnik
Löser , Michael	TU Dresden, Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik
Lücke , Michael	IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH
Dr. Luginger , Florian	Dieffenbacher GmbH & Co. KG, Eppingen
Dr. Mader , Klaus	MAB Maschinen- und Anlagenbau GmbH, Coswig/Sachsen
Möbius , Volker	TU Dresden, Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik

Dr. Mühl , Andreas	TU Dresden, Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik
Müller , Jens	TU Dresden, Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik
Munde , Annedore	Vogel Industrie Medien, Redaktion MM Maschinenmarkt, Würzburg
Neidhardt , Lars	TU Dresden, Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik
Piotrowska , Iwona	Universität Bremen, Zentrum für Technomathematik
Poelmeyer , Jens	Universität Hannover, Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen
Puchhala , Sreedhar	RWTH Aachen, Institut für Bildsame Formgebung
Rehn , Steffen	TU Dresden, Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik
Richter , Andreas	TU Dresden, Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik
Richter , Sebastian	AUDI AG, Neckarsulm
Richter , Sören	TU Dresden, Institut für Fluidtechnik
Riedel , Mirko	TU Dresden, Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik
Risch , Désirée	Universität Dortmund, Institut für Umformtechnik und Leichtbau
Prof. Dr. Roll , Karl	Daimler AG, Mercedes-Benz Werk Sindelfingen
Rudolph , Holger	TU Dresden, Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik
Ryssel , Arne	MPT Präzisionsteile GmbH, Mittweida
Schapp , Lutz	RWTH Aachen, Werkzeugmaschinenlabor
Dr. Schirmacher , Frank	IMA Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH, Dresden
Schmidt , Stefan	Bosch Rexroth AG, Magdeburg
Schnös , Bruno	Bosch Rexroth Mechatronics GmbH, Schweinfurt
Schrake , Axel	MIKROMAT GmbH Präzisionswerkzeugmaschinen, Dresden
Schroeder , Matthias	ESI GmbH, Eschborn
Dr. Schumacher , Klaus	DWM e. V., Dresden
Schunn , Jürgen	Fraunhofer IWU, Chemnitz
Standfuß , Jens	Fraunhofer IWS, Dresden
Stillger , Martin	Adam Opel GmbH, Rüsselsheim
Struck , Robert	Volkswagen AG, Wolfsburg
Dr. Süße , Dietmar	TU Dresden, Institut für Festkörpermechanik
Tannert , Marco	RWTH Aachen, Werkzeugmaschinenlabor
Timoshenkov , Alexander	TU Bergakademie Freiberg, Institut für Metallformung
Prof. Dr. Voelkner , Wolfgang	Fraunhofer IWU, Chemnitz
Doz. Dr. Wasner , Olaf	DWM e. V., Dresden
Dr. v. Schwerin , Markus	BMW Group, Standardisierung u. Konstruktionsmethodik, München
Wehner , Dirk	TU Dresden, Institut für Fluidtechnik
Dr. Wiemer , Hajo	TU Dresden, Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik
Zeeh , Bertram	AWEBA Werkzeugbau GmbH, Aue
Dr. Zimmermann , Rolf	xPLM Solution GmbH, Dresden

Fachbeiträge

1. Prof. Dr.-Ing. K. Roll
Daimler AG, Mercedes-Benz Sindelfingen
Simulation der Blechumformung – neue Anforderungen und Tendenzen
2. Prof. Dr.-Ing. habil. K. Großmann, Dipl.-Ing. A. Hardtmann, Dr.-Ing. H. Wiemer,
Dipl.-Ing. Lars Penter
IWM, TU Dresden
FEM-basierte Modellierung und Simulation des Blechumformprozesses mit den elastischen Wechselwirkungen zur Maschine und zum Werkzeug
3. Prof. Dr.-Ing. B.-A. Behrens, Dipl.-Ing. M. Ahrens, Dipl.-Ing. F. Dietrich,
Dipl.-Ing. J. Poelmeyer
IFUM, Leibniz Universität Hannover
Modellbildung zur Berücksichtigung des Maschineneinflusses in der numerischen Simulation von Umformprozessen mittels gekoppelter Simulation
4. Prof. Dr.-Ing. S. Helduser, Dipl.-Ing. H. Lohse
IFD, TU Dresden
Antriebs- und Prozessoptimierung hydraulischer Tiefziehpressen mit Hilfe der gekoppelten Simulation
5. Prof. Dr.-Ing. A. E. Tekkaya, Dr.-Ing. A. Brosius, Dipl.-Ing. V. Psyk,
Dipl.-Ing. K. Demir
IUL, TU Dortmund
Untersuchung der komplexen Wechselwirkungen beim elektromagnetischen Umformen rohrförmiger Werkstücke mittels gekoppelter Simulation
6. Dr.-Ing. M.v.Schwerin, Dr.-Ing. J. Meinhardt, Dipl.-Ing. I. Heinle
BMW AG, München
Entwicklung einer Methodik zur optimierten Gestaltung von Umformwerkzeugen
7. Dipl.-Ing. M. Schroeder
ESI GmbH, Eschborn
Weitere Potenziale der Topologieoptimierung zur Rückfederungskompensation von Blechformteilen
8. Dr.-Ing. A. Lieb
SMS Meer GmbH, Witten
Simulation in der Massivumformung als Optimierungswerkzeug im Anlagenbau
9. Prof. Dr.-Ing. habil. U. Engel, Dipl.-Ing. Th. Kroiß, Dipl.-Ing. R. Völkl
LFT, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Berechnung der Wechselwirkungen zwischen Umformmaschine und -prozess auf Basis der Integration eines Pressenmodells in die FE-Fließpress-Simulation

10. Prof. Dr.-Ing. Ch. Brecher, Dipl.-Ing. L. Schapp, Dipl.-Ing. M. Tannert
WZL, RWTH Aachen
Gekoppelte Simulation von Presse und mehrstufigem Massivumformprozess
11. Prof. Dr.-Ing. G. Hirt, MSc. S. Puchhala
IBF, RWTH Aachen
Entwicklung eines validierten Simulationswerkzeuges zur Abbildung der Wechselwirkungen zwischen Werkzeug und Werkstück am Beispiel des Flachwalzprozesses
12. Dr.-Ing. H. Just
Femutec Engineering GmbH, Hamburg
Prof. Dr.-Ing. M. Kolbe
Institut für Produktionstechnik, Westsächsische Hochschule Zwickau
Dipl.-Ing. A. Wagner
Fraunhofer IWU, Chemnitz
Einbeziehung der Maschinen in die Umformsimulation – Schritt in die richtige Richtung?
13. Dr.-Ing. A. Haufe, D. Lorenz, S. Mandel
DYNAmore GmbH, Stuttgart
Konzepte zur Abbildung großer Werkzeugstrukturen mit reduzierten Modellen in der Blechumformung
14. Ir. R. Lingbeek
Netherlands Institute for Metals Research, Delft (Niederlande)
Effiziente Modellierung von Pressen- und Werkzeugelastizität

Simulation der Blechumformung – neue Anforderungen und Tendenzen

Prof. Dr.-Ing. K. Roll

Daimler AG
Mercedes-Benz Sindelfingen

SIMULATION DER BLECHUMFORMUNG - NEUE ANFORDERUNGEN UND TENDENZEN

Prof. Dr.-Ing. Karl Roll, Daimler AG, Produktions- und Werkstofftechnik, Sindelfingen
karl.roll@daimler.com

1. Einleitung

Die Umformtechnik ist ein Fertigungsverfahren, bei dem die Herstellung eines umgeformten Werkstückes bis vor einigen Jahren in der Regel erst nach Vorversuchen und/oder durch Nutzen von Expertenwissen möglich war. Der Grund für die Notwendigkeit von Vorversuchen liegt in der Tatsache begründet, dass die umformtechnischen Verfahren nicht mit geschlossenen analytischen Beziehungen beschrieben werden können. In den vergangenen 30 Jahren wurden deshalb Verfahren entwickelt, die eine realitätstreue „Vorfertigung“ des Werkstückes auf dem Rechner erlauben und somit kostenintensive Versuche einsparen bzw. drastisch reduzieren. Diese Vorgehensweise, bei der die Verfahrensentwicklung mit Hilfe einer Prozesssimulation durchgeführt wird, wird auch als *virtuelle Umformtechnik* bzw. *digitale Fertigung* bezeichnet. Die virtuelle Umformtechnik wird einen hohen Stellenwert in der Informations- und Wissensgesellschaft erhalten und zunehmend wichtiger werden. Die Entwicklung von neuen Umformverfahren oder die Anwendung bekannter Verfahren auf neue Werkstoffe wird ohne die Anwendung der virtuellen Umformtechnik in Zukunft nicht mehr stattfinden.

2. Stand der Umformsimulation

2.1 Tiefziehsimulation

Bereits in frühen Designphasen werden heute Simulationen des Umformprozesses mit Hilfe der Finiten-Element-Methode (FEM) durchgeführt. Die wichtigsten Ziele sind dabei die Überprüfung der Herstellbarkeit der Blechformteile und die Gewinnung wichtiger Hinweise bezüglich der optimalen Werkzeuggestaltung. Zur Erreichung dieser Ziele wird dabei die Simulation folgendermaßen eingesetzt [1]:

Vorhersagemöglichkeiten bei der Blechumformsimulation		
Gut	Durchschnittlich	Schlecht
<ul style="list-style-type: none">➤ Versagen durch Reißen➤ Faltenbildung im freien Umformbereich➤ Blechdicken- und Dehnungsverteilung➤ Stofffluss➤ Niederhalterpressung	<ul style="list-style-type: none">➤ Umformkräfte➤ Blecheinzug➤ Ausgangskontur der Platine➤ Spannungsverteilung➤ Oberflächenfehler (dehnungsbedingt)➤ Rückfederungsbedingte Formänderungen	<ul style="list-style-type: none">➤ Oberflächenfehler (spannungsbedingt)➤ Faltenbildung unter Kontaktbedingungen

Bild 1: Stand der Vorhersagemöglichkeiten bei der Blechumformsimulation

- Zur schnellen Übersicht und einer ersten Abschätzung der Herstellbarkeit und zur 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.

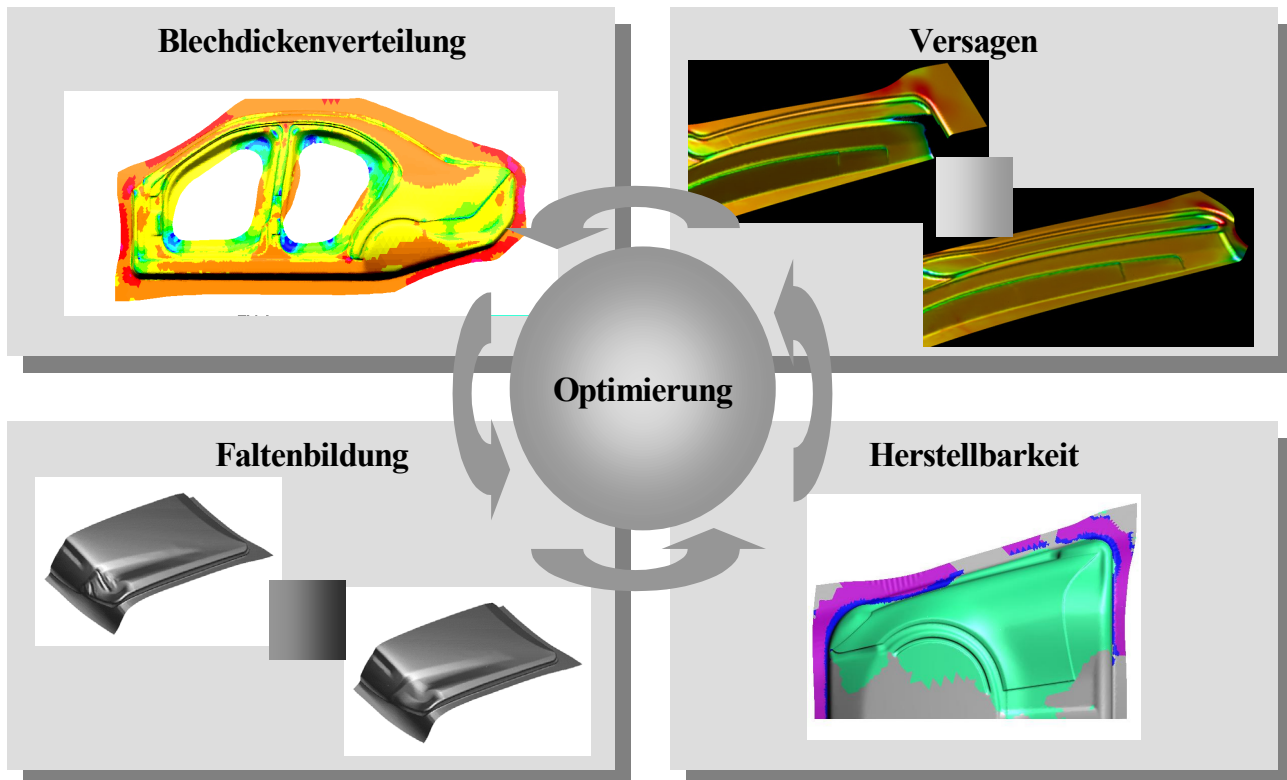


Bild 2: Einsatz der Blechumformsimulation in der Automobilindustrie

Bild 2 verdeutlicht die mittlerweile verwirklichten Möglichkeiten der Simulation von Blechumformprozessen. Der Einsatz der Blechumformsimulation beschränkt sich nicht mehr 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].

2.2 Simulation und Kompensation der Rückfederung

Wie bereits ausgeführt, ist die Simulation der ersten Umformstufe, also des Ziehprozesses, heute Stand der Technik und wird bei der Werkzeugentwicklung und -optimierung in der täglichen Arbeit eingesetzt. Das Ziel ist aber, den kompletten Herstellungsprozess inklusive aller Nachfolgeprozesse zu simulieren und somit Aussagen über möglichst alle Fehler und Probleme der kompletten Herstellungskette zu erhalten. Der grundsätzliche Ablauf der Simulation eines kompletten Herstellungsprozesses für ein Karosseriebauteil ist in Bild 3 dargestellt.

Bei der Simulation der gesamten Prozesskette in der Blechteilefertigung ist die exakte Simulation der Rückfederung ein zentrales Problem, da die Rückfederung nach dem letzten Fertigungsschritt ganz entscheidenden Einfluss auf die Genauigkeit des Bauteils hat. Unter Rückfederung wird die Formabweichung eines umgeformten Blechbauteils von der Sollgeometrie verstanden, welche sich nach dem Entfernen der äußeren Lasten einstellt. Wenn es nach der Entfernung der äußeren Lasten, das heißt der Werkzeuge, zu keinen Formabweichungen kommt, kann ein Eingriff in den im Werkstück vorherrschenden Eigenspannungszustand z. B. durch einen Beschnitt des Teiles dennoch zu erheblichen Rückfederungen führen. Untersuchungen, die in [2,3] durchgeführt wurden, zeigen, dass es heute möglich ist, die Rückfederung mit akzeptabler Genauigkeit zu berechnen. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Richtung der Rückfederung heute in der Regel richtig vorausgesagt werden kann, die gerechnete Rückfederung liegt dabei in den meisten Fällen unter den gemessenen Werten, die maximale Abweichung beträgt etwa 20%.

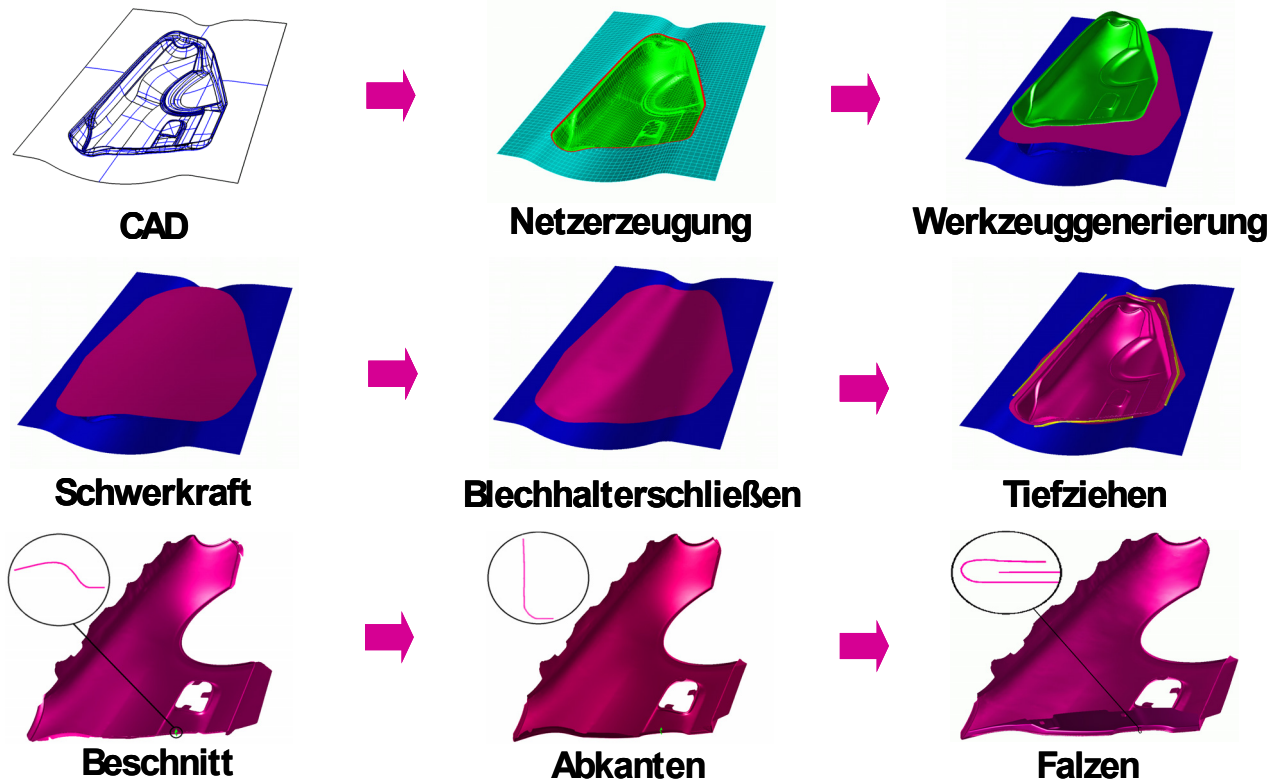


Bild 3: Simulation der kompletten umformtechnischen Prozesskette eines komplexen Karosserieblechformteils

Ziel der Rückfederungssimulation ist letztendlich die Kompensation der Formabweichung, sei es durch Veränderungen in der Werkzeuggeometrie oder durch Veränderungen im Fertigungsprozess. Aufbauend auf den bisherigen Ergebnissen ist es nun möglich, Strategien für eine Kompensation der Rückfederung zu entwickeln. Zurzeit gibt es erste Ansätze [4] aber noch keine allgemeingültigen Strategien zur Kompensation der Rückfederung.

Ein Beispiel für eine gelungene Kompensation der Rückfederung ist in [5] beschrieben. Für den Zusammenbau der Motorhaube wurde erwartet, dass der vordere Bereich in der Nähe des Kühlergrills eine Formabweichung in Fahrzeuglage nach vorne aufweisen würde. Da die Form des Zu-

sammenbaus stark durch das steifere Innenteil bestimmt wird, beschränkte sich die Untersuchung der Rückfederung auf das Motorhauben-Innenteil. Die Simulation des Herstellungsprozesses mit Beschnitt und Rückfederung dieses Bauteils ergab, dass der gesamte vordere Bereich ab einer Quer-verlaufenden Verprägung nach oben auffedert, siehe Bild 4a. Die Berechnung der Rückfederung zeigt sehr große Abweichungen von der Sollgeometrie im Bereich der „Hörner“ nach außen und im Bereich des Aktivkohlefilters nach innen. Die Werkzeuggeometrie wurde entsprechend überbogen (dazu wurde das Programm ICEM-Surf verwendet), die Rückfederung wurde mit der neuen Werkzeuggeometrie überprüft und anschließend das Werkzeug mit der korrigierten Geometrie hergestellt. Nach dem Abpressen des Motorhauben-Innenteils und der Beplankung wurden diese gefügt. Eine Vermessung dieses Zusammenbaus bezüglich des Umrisses und Überganges ergab, dass die Formabweichungen im vorderen Bereich nur noch an drei Messpunkten geringfügig außerhalb der Toleranz liegen (Bild 4c).

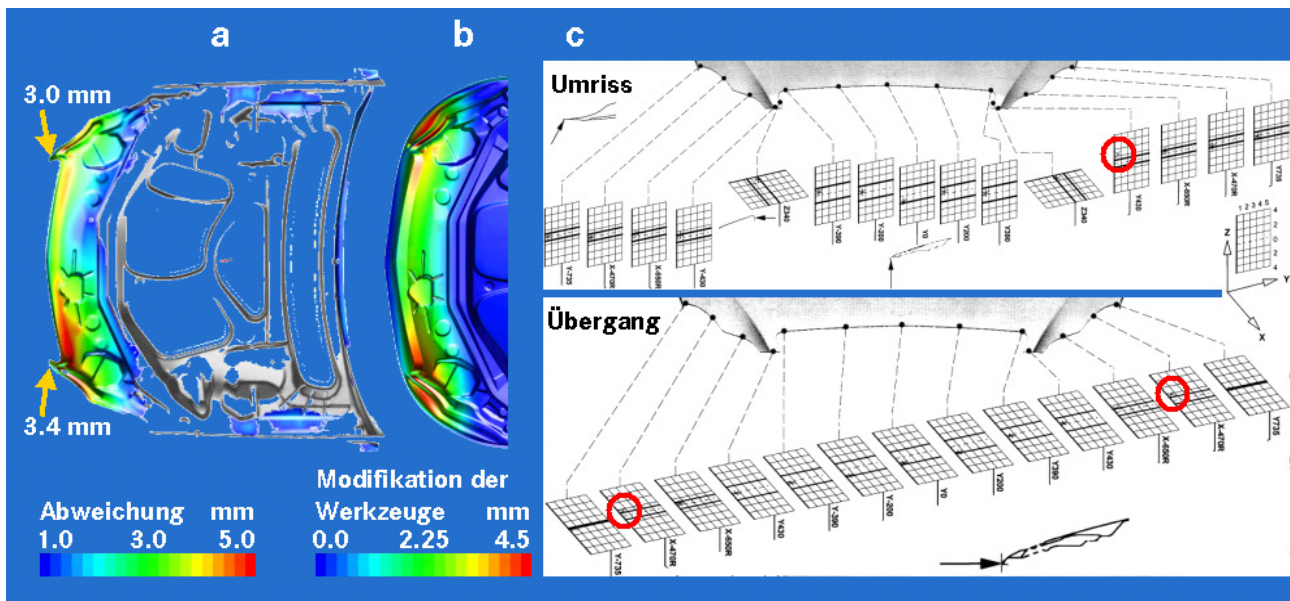


Bild 4: *Simulationgestützte Kompensation eines Motorhauben-Innenteils*
a) *Berechnete Formabweichung ohne Kompensation*
b) *Beschlossene Modifikation der Werkzeuge*
c) *Messbericht des realen Zusammenbaus für Umriss und Übergang*

3. Notwendige Weiterentwicklungen in der Simulationstechnik

Die Simulation der Blechumformung, einschließlich Rückfederung und Kompensation, ist mit ausreichender Genauigkeit heute bei entsprechendem Aufwand möglich. Für den erweiterten Einsatz der Umformsimulationsverfahren in der industriellen Praxis sind allerdings noch weitere Entwicklungen auf verschiedenen Gebieten erforderlich [6].

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 werden (Tabelle 1)

Für eine reine Umformsimulation reicht die Approximation des Simulationsmodells aus, damit werden gute Ergebnisse erzielt. Für eine noch genauere Berechnung der Rückfederung und der Rückfederungskompensation muss das Modell jedoch an verschiedenen Stellen erweitert werden. Die dabei zu lösende Aufgabe besteht vor allem darin, dass es sehr schwierig ist die Einflüsse der heute nicht berücksichtigten Effekte auf die Genauigkeit der Simulation abzuschätzen. Bei den heute verwendeten Werkstoffen reicht es z. B. 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 [7].

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

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

3.1 Werkstoffmodellierung und Versagensmodelle

Die bis heute verwendeten Modelle zur Beschreibung des Werkstoffverhaltens scheinen bei den hoch- und höchstfesten Stählen nicht mehr uneingeschränkt gültig zu sein. Eine immer mehr an Bedeutung gewinnende Gruppe hochfester, kaltumformbarer Stähle sind Werkstoffe mit induzierter Plastizität. Hierzu zählen die TRIP-Stähle, die metastabilen Austenit als Gefügebestandteil aufweisen, der während der Verformung zu Martensit umwandelt und die neueren X-IP-Stähle, die ein stabiles austenitisches Gefüge besitzen und im Laufe der Umformung Zwillinge bilden. Diese signifikant von konventionellen Stählen verschiedenen Verformungsmechanismen entziehen sich bisher einer exakten Modellierung. Es hat sich herausgestellt, dass die heute in der produktiven Simulation häufig verwendeten Materialmodelle das Verhalten solcher Materialien während der Umformung nicht hinreichend genau wiedergeben. Diese Modelle konzentrieren sich sehr darauf, die senkrechte und planare Anisotropie des Materials abzubilden. Was Ihnen jedoch fehlt, ist eine vom Spannungszustand abhängige Beschreibung der Verfestigung. Denn, im Gegensatz zum Versetzungsgleiten, ist die Bildung von Verformungsmartensit und –zwillingen stark von der Belastungsrichtung abhängig. Dies führt in der Konsequenz zu Problemen im Simulationsalltag und auch zu einer nicht optimalen Ergebnisqualität. Die Verfestigung wird in Bereichen unter Tiefziehbeanspruchung überschätzt, wohingegen in Bereichen mit Streckzugbeanspruchung das Material zu wenig verfestigt.

Spricht man von der Anisotropie eines Bleches, so ist in aller Regel von der ebenen Anisotropie die Rede, also von Unterschieden in den Eigenschaften des Bleches, abhängig von der Orientierung zur Walzrichtung. Um diese ebene Anisotropie zu beschreiben, existiert eine Vielzahl verschiedener Modelle. Das am weitesten verbreitete hiervon ist die Fließortkurve nach Hill aus dem Jahre 1948 [8]. Das Modell erweitert die Fließbedingung nach v. Mises und präsentiert sich mathematisch als eine gedrehte und leicht verformte Ellipse. Wegen seiner Einfachheit bietet dieses Modell, implementiert in einen FEM-Code, sehr schnelle Rechenzeiten bei zufrieden stellenden Ergebnissen und ist deshalb vor allem in der industriellen Anwendung sehr weit verbreitet.

Zusätzlich zur Fließbedingung benötigt man noch eine Regel, die die Kaltverfestigung des Werkstoffes während der Umformung beschreibt. Auch hierzu bietet die Literatur viele Ansätze (z.B. [9, 10]). Unabhängig davon, welcher dieser Ansätze zur Anwendung kommt, wird in der konventionellen Umformsimulation die Verfestigung ohne Berücksichtigung der Gestalt des jeweiligen Spannungszustandes, also z.B. Zug, Druck oder Scherung, mit ein und derselben Verfestigungskurve beschrieben. Mathematisch gesehen bedeutet dies, dass die Fließortkurve gleichmäßig in alle Rich-

tungen vergrößert wird. Die Konsequenz daraus ist, dass die bei einer bestimmten Vergleichsformänderung bestimmte Form der Fließortkurve für alle Niveaus der Formänderung und Verfestigung in den unterschiedlichen Richtungen den besten Kompromiss darstellen muss, da sie unveränderlich ist. Diese Abstimmung und das Vorgehen sind für die bisher gängigen weichen Tiefziehstähle vollkommen legitim und liefern sehr gute Ergebnisse. Moderne hoch- und höchstfeste Stähle zeigen jedoch teilweise ein signifikant abweichendes Verhalten in ihren Verfestigungseigenschaften im gesamten, für die Umformtechnik interessanten Formänderungsraum. Abhängig vom herrschenden Spannungszustand zeigen sie jeweils eine andere Verfestigung. In Bild 5 ist dies anhand eines simulierten Beispiels dargestellt. Für die Annahme der isotropen Verfestigung (Bild 5a) sind die Fließkurven für einachsigen Zug, einachsigen Druck, äquibiaxialen Zug und reine Scherung nur leicht parallelverschoben, haben jedoch alle dieselbe Form und Steigung. Diese Parallelverschiebung resultiert aus der ebenen Anisotropie. Im rechten Teil wurden die experimentellen Ergebnisse eines umwandlungsintensiven Werkstoffs berücksichtigt und in das Modell übertragen. Als Ergebnis der anisotropen Verfestigungsmodellierung erhält man ein komplett anderes Abbild des Werkstoffverhaltens (Bild 5b). Ausgehend von einer relativ einheitlichen Fließspannung (basierend hier auf dem Modell von Hill '48) entwickeln sich die Kurven in den dargestellten Hauptbeanspruchungsrichtungen einachsiger Zug-, Druck-, Schub- und biaxialer Zugbelastung unabhängig voneinander. Dieses Verhalten kann sich speziell dann auswirken, wenn Bauteile mit hohen Verformungsgraden bewertet werden sollen.

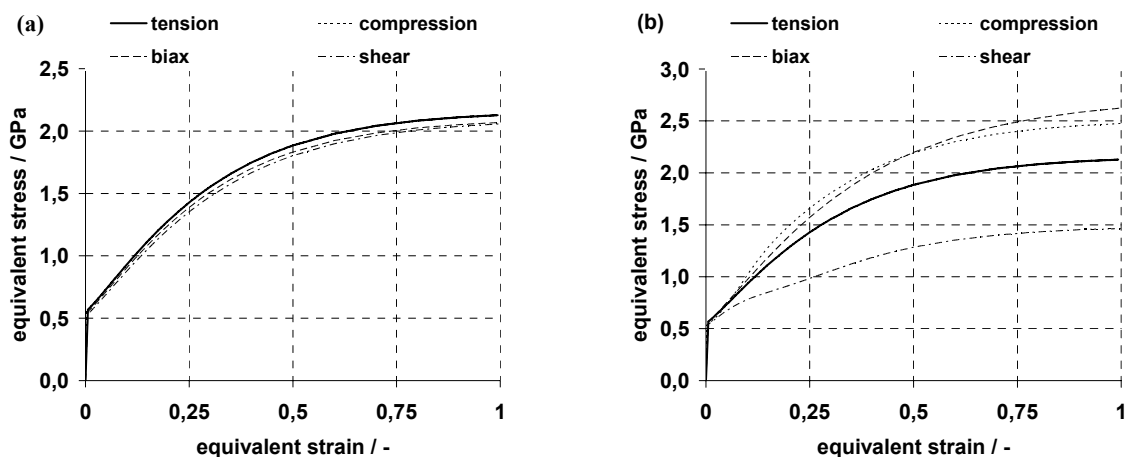


Bild 5: Fließkurven für einachsigen Zug, einachsigen Druck, äquibiaxialen Zug und reine Scherung für den isotropen (a) und anisotropen (b) Fall

Die herkömmliche Simulation des Tiefziehens moderner hochfester Stähle sagt deshalb die Umformgrade im fertigen Bauteil stellenweise nur unzureichend voraus. Um das Ergebnis an diesen Stellen zu verbessern, stellt die Berücksichtigung der anisotropen Verfestigung des Werkstoffes eine viel versprechende Option dar. In vielen Bereichen erreicht man dadurch eine genauere Vorhersage, stellenweise verbessert sich das Ergebnis jedoch nicht, oder wird sogar schlechter. Dies hat vielfältige Gründe. So ist das Aufbereiten der experimentellen Daten sehr aufwändig und beruht zumeist auf nicht genormten Experimenten für deren Bestimmung. Zudem wurden erst wenige Erfahrungen mit dieser Beschreibungsart für die Verfestigung eines Stahles gesammelt, wodurch sich auch die Verifikation der erstellten Materialkarten schwierig gestaltet, da die bisherigen Verifikationsrechnungen nicht mehr ausreichen. In der Verarbeitung der experimentellen Daten steckt somit noch ein großes Potenzial, ebenso in der eigentlichen Ermittlung der Eingangsgrößen. In der Vergangenheit war die wesentliche Eingangsgröße für die Umformsimulation der einachsige Zugversuch. Dieser Versuch ist seit Jahrzehnten genormt und das Ergebnis ist inzwischen weitestgehend unabhängig von der Prüfstelle. Die Modellierung der anisotropen Verfestigung hingegen erfordert einige Versuche, die auch experimentell immer noch

Neuland darstellen und fern von einer Normung sind. Hierdurch gelangt man in die missliche Lage, dass die Ergebnisse für ein und den selben Werkstoff von Prüflabor zu Prüflabor schwanken können. Ebenso stellen die Versuche häufig nur eine Annäherung an den Spannungszustand dar, den man abbilden möchte. So ist z.B. beim hydraulischen Tiefungsversuch, dem momentan bevorzugten Versuch, um eine Fließkurve unter äquibiaxialer Spannung aufzunehmen, der zweiachsigen Zugspannung immer auch eine Biegespannung überlagert, die unter Zuhilfenahme von theoretischen Annahmen, die ihrerseits natürlich wieder eine Vereinfachung darstellen, herausgerechnet werden muss. Schwierig gestaltet sich auch die Wahl eines geeigneten Versuchs zur Aufnahme einer Fließkurve unter reiner Scherung. Zwar gibt es eine Vielzahl verschiedener Versuche, doch ist bei fast allen schon bei kleinen Umformgraden der Scherspannung eine nicht unerhebliche Zugspannungskomponente überlagert.

Ein weiterer Punkt der Werkstoffmodellierung, der bislang oft untersucht, aber in der industriellen Anwendung nicht komplett übernommen wurde, ist die durchgängige Berücksichtigung der isotrop-kinematischen Verfestigung. Hierunter versteht man eine Reduzierung der Fließspannung bei einem Lastwechsel, die Fließortkurve erfährt eine Ursprungsverschiebung (Bild 6b). Führt man z.B. einen einachsigen Zugversuch durch und unterbricht ihn, so beginnt das Material bei derselben Spannung wieder zu fließen, bei der man den Versuch unterbrochen hat. Unter einachsigem Druck beginnt das Material jedoch bei einer geringeren Spannung zu fließen.

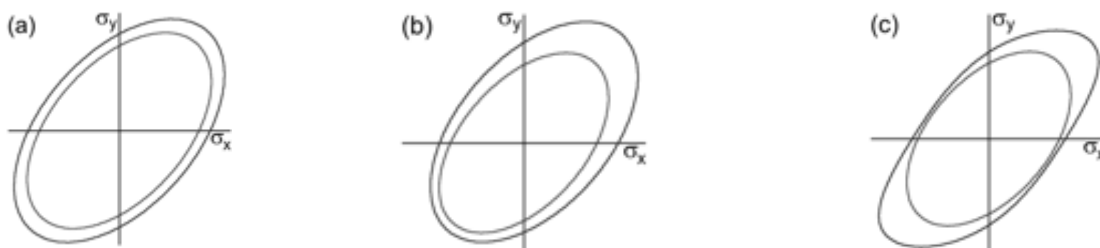


Bild 6: Schematische Darstellung der isotropen (a), kinematischen (b) und anisotropen (c) Verfestigung

Zwar bieten fast alle Programme verschiedene Materialmodelle an, die die kinematische Verfestigung unterstützen, jedoch in den allermeisten Fällen nur in Kombination mit einem Fließort nach v. Mises, der die ebene Anisotropie nicht berücksichtigt. Die Firma MATFEM hat für den kommerziellen FEM-Code LS-Dyna eine User-Subroutine namens MF GeneralizedYield [11] entwickelt. Es handelt sich dabei um eine sehr flexible Schnittstelle, die u.a. die Kombination nahezu beliebiger Fließkriterien mit vielen verschiedenen Verfestigungsmodellen prinzipiell ermöglicht und die anisotrope und kinematische Verfestigung berücksichtigen kann.

Die theoretischen Unterschiede der verschiedenen Verfestigungsmodelle sind sehr groß, doch was bedeutet dies für die Umformsimulation? Man muss sich darüber im Klaren sein, dass die Unterschiede nur unter bestimmten Voraussetzungen zum Tragen kommen. Zum einen muss als allererstes das Material eine ausgeprägt anisotrope Verfestigung zeigen, dieser Effekt ist bei Stählen mit induzierter Plastizität am größten, jedoch nicht auf diese beschränkt. Bei ihnen treten während der Umformung verschiedene Gefügeveränderungen und Versetzungsansammlungen auf, die in aller Regel spannungsabhängig sind. Zum anderen muss es im Bauteil verschiedene Spannungszustände und hinreichend hohe Umformgrade geben, damit die Unterschiede sich auswirken können. Denn wie in Bild 5 zu erkennen ist, entfernen sich die verschiedenen Fließkurven mit steigendem Umformgrad voneinander. Darüber hinaus ist auch der Effekt der isotrop - kinematischen Verfestigung bei höheren Umformgraden stärker ausgeprägt.

Das Verhalten des Modells bei Lastwechseln ist heute ebenfalls noch nicht zufrieden stellend beschrieben. Versuchsrechnungen mit Berücksichtigung der kinematischen Verfestigung zeigen, dass diese nicht immer korrekt wiedergegeben wird. Ebenso werden die Anisotropieeffekte teilweise überschätzt, so zeigt sich z.B., dass in Bereichen mit Zug-Druck-Belastungen, in denen der Umformgrad bei der isotropen Rechnung zu niedrig ist, nun eine zu große Umformung berechnet wird.

Auch diese Probleme rühren vor allem aus der mangelnden Erfahrung bei der Simulation von Blechumformvorgängen unter Berücksichtigung dieser Effekte. Um zweifelsfrei festzustellen, wo das Problem letztendlich liegt, ob es die Eingangsdaten, die Anwendung des Modells oder vielleicht auch das Modell selbst ist, bedarf es noch weiterer Studien. Alles in allem bleibt festzuhalten, dass die hier vorgestellte Methode ein sehr großes Potenzial hat, das auszuschöpfen jedoch noch einiger Anstrengungen und weitergehender Entwicklungsarbeit bedarf. Der aktuelle Stand lässt einen produktiven Einsatz in der industriellen, täglichen Umformsimulation, bei der es darum geht, viele Bauteile in kurzer Zeit zu berechnen, noch nicht zu. Verfolgt man das Konzept jedoch weiter, so bietet sich eine leistungsfähige und effiziente Möglichkeit, um moderne höchstfeste Stähle mit der selben hohen Ergebnisqualität simulieren zu können, die man schon heute bei den weichen Tiefziehstählen erreicht.

Ein weiteres Phänomen, das vor allem die TRIP-Stähle betrifft, ist die Verschlechterung des Umformvermögens bei steigender Temperatur. Dies hängt ebenfalls mit der Martensitbildung zusammen, die nicht nur vom Spannungszustand, sondern auch von der vorherrschenden Temperatur maßgeblich beeinflusst wird. Die durch eine erhöhte Umformarbeit auftretende Erwärmung des Bauteils während der Umformung stellt also einen Faktor dar, der zu beachten ist. Ein Ansatz dazu ist in dem Materialmodell nach Hänsel [12] beschrieben, dabei wird die Temperaturabhängigkeit der Martensitumwandlung in TRIP-Stählen berücksichtigt. Diesem Modell liegt jedoch ein Fließsort nach von Mises zugrunde, wodurch es nicht möglich ist, gleichzeitig auch die Anisotropie des Stahls zu beschreiben.

Diese schlechte Beschreibung des Werkstoffverhaltens hat Auswirkungen, wie an folgendem Beispiel gezeigt werden kann [13]. Bild 7 zeigt ein Versuchsbauteil, abgepresst aus einem TRIP-Stahl. Das Teil weist eine Ziehtiefe von 78 mm auf. Bei größeren Ziehwegen treten Reißen und Einschnürungen im Bereich der Kofferecken auf, wie in Bild 5 bei einem Ziehweg von 80 mm dargestellt ist. Simuliert wurde ebenfalls bis zu einer Tiefe von 80 mm. Bei einer Ziehtiefe von 60 mm wird jedoch das FE-Netz instabil und die Verformung konzentriert sich auf eine Elementreihe (Bild 5 rechts). Eine solche Lokalisierung bildet das tatsächliche Versagen sehr gut ab, allerdings zu einem zu frühen Zeitpunkt. Da jedoch ein instabiles FE-Netz kein geeignetes Versagenskriterium ist, wurde zusätzlich noch das Grenzformänderungsdiagramm (GFD) betrachtet. Doch dessen Aussagekraft ist bei der Simulation von TRIP- und TWIP-Stählen enge Grenzen gesetzt. Laut GFD versagt der Werkstoff bereits bei einer Ziehtiefe von 18 mm an der in Bild 5 rechts markierten Stelle. Erklären lässt sich dies über die zu hoch eingeschätzte Verfestigung unter Druckbelastung. Das Material unter dem Niederhalter verfestigt in der Simulation sehr viel stärker als in der Realität. Aus diesem Grund ist die von der Zarge zu übertragende Kraft zu hoch und es kommt zu einer überhöhten Ausdünnung in der Kofferecke, am Punkt der größten Streckzugverformung. Die Folge ist in der Simulation ein verfrühtes Überschreiten der Grenzformänderung und später die Instabilität des FE-Netzes

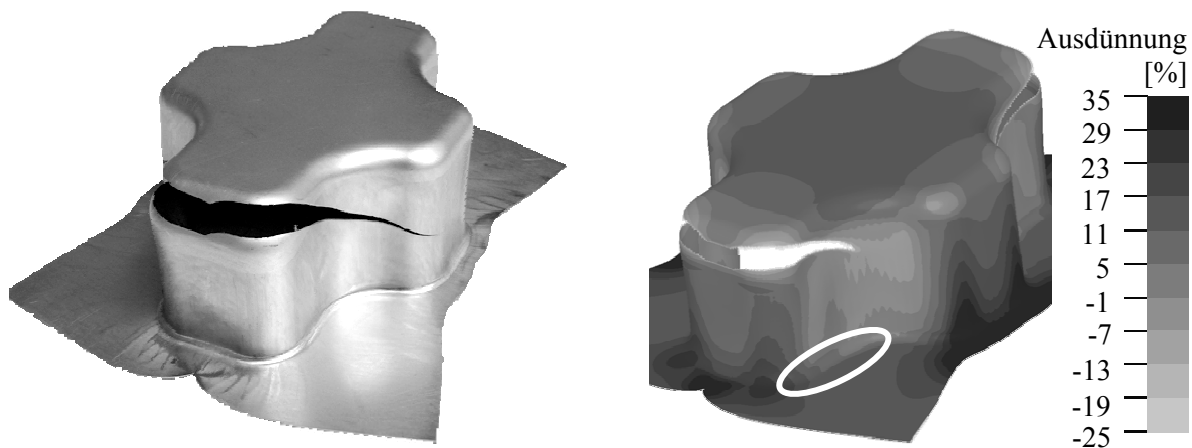


Bild 7: Links: umgeformtes Versuchsbauteil. Ziehtiefe 80 mm; rechts: simuliertes Bauteil. Ziehtiefe 80 mm. Markiert der per GFD vorhergesagte Versagensort

3. 2. Berücksichtigung der Werkzeugelastizität

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 [14, 15]. 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 [16] beschrieben.

In konventionellen Tiefziehsimulationen werden die Werkzeuge durch starre Wirkflächenmodelle idealisiert. Diese Variante ist sehr günstig im Rechenaufwand und beschränkt den Aufwand der Netzerzeugung auf die Wirkflächen der Werkzeuge. Als Nachteil werden Kontaktbedingungen und Reibungszustände zwischen Blech und Werkzeug ungenau dargestellt. Werkzeugmodelle aus Kontinuums-elementen 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 Kontinuums-elementen die Rechenzeiten von Tiefziehsimulationen erheblich verlängern, wird zur Zeit versucht über Ersatzmodelle die Werkzeugsteifigkeit abzubilden. Eine mögliche Methode stellt dabei das Verfahren der Substrukturtechnik dar [17]. 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 der einzelnen Werkzeuge beschränkt 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 Krafeinleitung 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. 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. Diese konstante Steifigkeit macht die separate Berechnung der Werkzeugsteifigkeit vor der Tiefziehsimulation möglich. Die kondensierte Steifigkeitsmatrix eines Werkzeugteils 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. Der Einfluss der Werkzeugelastizität soll am Beispiel des in Bild 8 dargestellten Werkzeuges gezeigt werden.

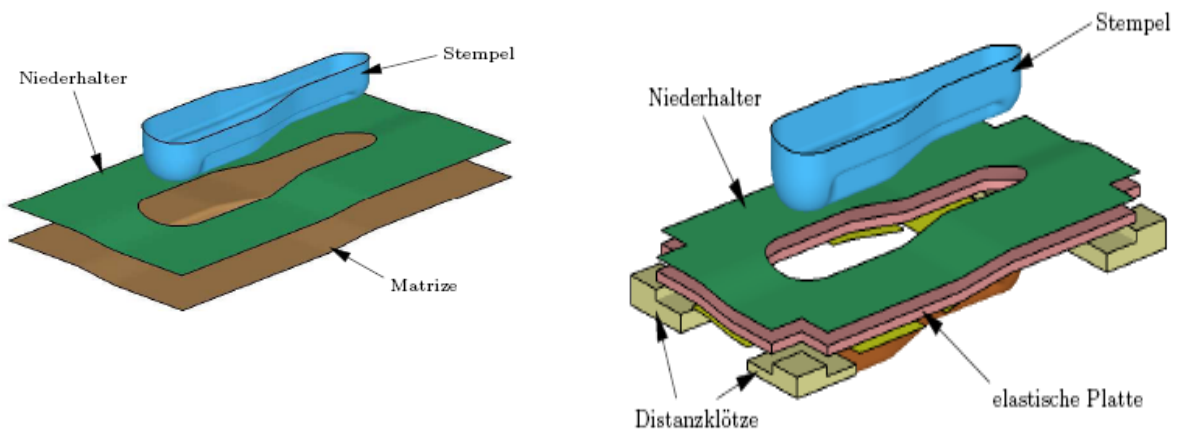


Bild 8: FE-Modell des Werkzeuges; links: starres Modell, rechts elastischer Niederhalter

Der größte Unterschied zwischen dem starren und dem elastischen Modell ist in den Mitten der Bauteilköpfe sichtbar. Das starre Modell reagiert auf die Aufdickungen mit lokal sehr hohen Kontaktdrücken (Bild 9, 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 9, rechts). Damit werden größere Aufdickungen an den Bauteilenden zugelassen. Infolge der größeren Blechaufdickungen im Flansch an den Bauteilköpfen biegt sich die elastische Platte in diesen Bereich stärker durch.

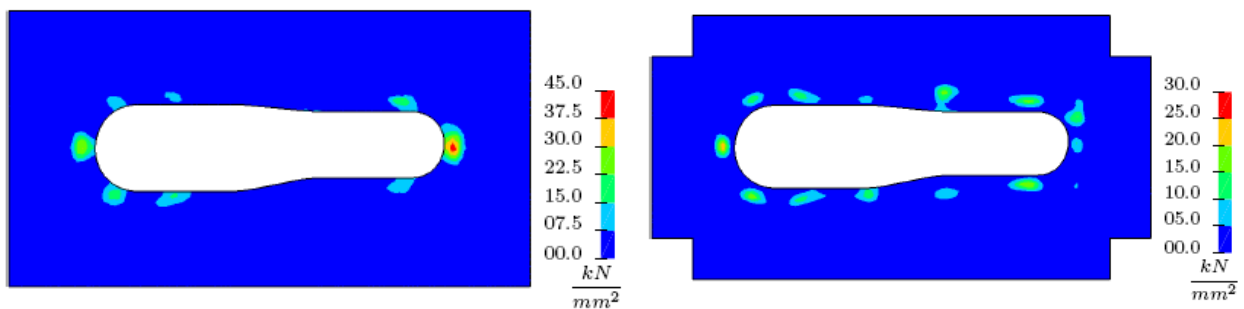


Bild 9: Kontaktdruckverteilung auf der Niederhalterfläche
links starres Werkzeug, rechts: elastisches Werkzeug

Die Berücksichtigung der Steifigkeit der elastischen Platte und der lokalen Lasteinleitung durch Druckkissen verändert den Blecheinzug an den Bauteilköpfen signifikant um 6,6 mm. Durch die unterschiedlichen Reibzustände im Flansch beeinflusst die elastische Platte die Formänderungs- und Spannungszustände während des Umformvorgangs.

Die Verwendung elastischer Werkzeuge bietet die Möglichkeit, lokale Lasteinleitungen bei den Niederhalterkräften in die Simulationsmodelle einzubeziehen. Die bis jetzt durchgeführten Berechnungen zeigen charakteristische Unterschiede zwischen Starrkörpermodellen und Modellen mit elastischen Werkzeugteilen. 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 kann bis jetzt nur eingeschränkt angewandt werden. Berechnungen mit diesen Ersatzmodellen zeigten qualitativ das gleiche Verformungsverhalten der Niederhalterstrukturen wie die elastischen Volumenmodelle. Es wurden geringe Abweichungen bei der Steifigkeit zwischen beiden Varianten festgestellt. 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 kom-

pakten, binären Speicherformats für die Substrukturen. Zur Bewertung der Effizienz der Ersatzmodelle müssen noch Validierungen mit realen Versuchen durchgeführt werden.

3.3. Simulation entlang der Prozesskette Blechteilefertigung

In der Produktionsplanung Presseblechteilefertigung werden heute sämtliche Prozesse zur Blechteileherstellung vor der eigentlichen Realbauteilfertigung mittels leistungsfähiger Simulations-Software virtuell auf Rechnern abgebildet. Auf diese Weise lassen sich bereits im frühen Entwicklungsstadium zukünftiger Produkte Aussagen zur Herstellbarkeit bestimmter Bauteile unter Verwendung bestimmter Materialien treffen, sowie Werkzeuggeometrien frühzeitig optimieren.

Interessant für die Blechteilefertigung sind, neben der Machbarkeitsanalyse, grundsätzlich diejenigen Prozesse, die zu Veränderungen in der Materialstruktur und damit zu Veränderungen der Bauteileigenschaften führen. Bislang erfolgten die Simulationsrechnungen der einzelnen Prozesse meist autark. Ein möglicher Einfluss eines in der Prozesskette vorangestellten Schrittes bleibt bei dieser Vorgehensweise unberücksichtigt. Je nach untersuchtem Material ist die Historie der Verformung jedoch von entscheidender Bedeutung für die Realitätsnähe der Simulationsergebnisse. Aus diesem Grund werden zur Zeit große Anstrengungen unternommen, die digitale Prozesskette der Blechteilefertigung ganzheitlich zu schließen.

Die digitale Prozesskette zur Blechteilefertigung gliedert sich grob in die Simulations-Pakete Gießen, Walzen, Glühen, Umformen, Fügen, Lebensdaueranalyse bzw. Crash. Zur Zeit wird intensiv an den einzelnen Bausteinen gearbeitet mit dem Ziel die Prozesskette für die Berechnung der Bauteileigenschaften zu schließen. Bild 10 zeigt das Konzept der geplanten digitalen Prozesskette [18].

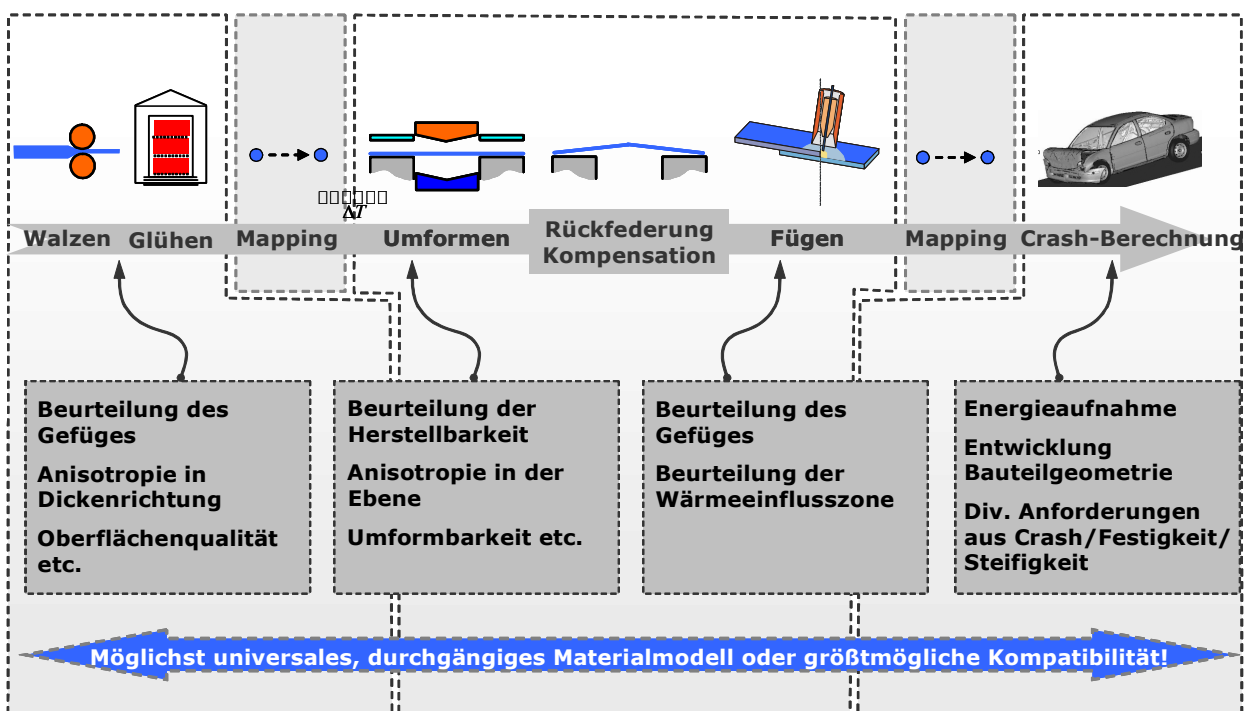
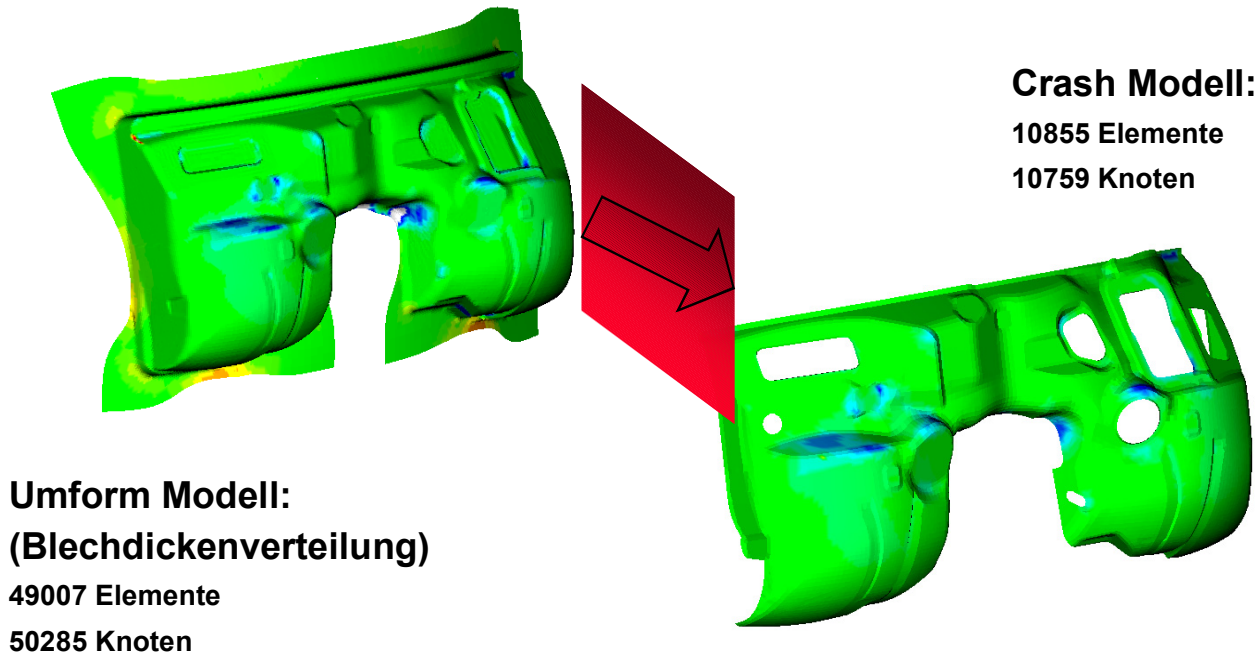


Bild 10: Skizze der digitalen Prozesskette Blechteileherstellung (Quelle: DynaMore)

FE-Simulationen, die das z. B. Crashverhalten von Bauteilen nachbilden, werden heutzutage hauptsächlich aufgebaut aus CAD-Datensätzen, die einzig und alleine die geometrischen Informationen der jeweiligen Bauteilgruppe bzw. des jeweiligen Bauteils beinhalten, nicht jedoch die Umformhistorie. In den vergangenen Jahren wurden so genannte Mapping-Algorithmen [19] entwickelt, die es ermöglichen bestimmte Parameter (Elementdicke, Dehnung) aus den Ergebnissen einer Umformsimulation auf das Ausgangsnetz der Crashsimulation zu übertragen. Die Herausforderung hierbei besteht darin, dass FE-Netze zur Umformsimulation, die pro Bauteil gerechnet werden, viel feiner gegliedert sind als FE-Netze zur Crashsimulation, die pro Fahrzeug gerechnet werden. Ein sinnvoll-

ler Mapping-Algorithmus muss also in der Lage sein, Ergebnisparameter vieler feiner Umformelemente auf ein gröberes Element des Crashnetzes zusammenfassend zu übertragen. Dieses Verfahren kommt heute bei bestimmten Crashberechnungen bereits zum Einsatz, entspricht jedoch noch nicht der üblichen Vorgehensweise. Bild 11 zeigt als Beispiel das Mappen der Blechdicke nach dem Umformen vom Umformmodell auf das Crashmodell.

Bild 11: Übertragen der Umformdaten auf das Crash-Netz



Alternativ zu den Mapping-Verfahren wird an einer Methode gearbeitet, die das für Crashberechnungen entscheidende Versagenskriterium bereits bei Simulationen des Umformvorgangs mitführt.

Anders als bei der herkömmlichen Umformsimulation entscheidet in Crashsimulationen eine so genannte Schädigungsvariable (z. B. nach dem Gurson-Modell), ob die Deformation des jeweiligen finiten Elements dem reellen Deformationsverhalten des Materials entspricht. Entscheidend ist hierbei die so genannte Mehrachsigkeit des Spannungszustandes – ein Skalar, der das Verhältnis der mittleren Elementnormalspannung zur Vergleichsspannung nach von Mises beschreibt. Abhängig von der Mehrachsigkeit wird die Bruchdehnung und damit der Schädigungsparameter bestimmt.

Erreicht der Schädigungsparameter den Grenzwert, so wird das entsprechende Element aus dem FE-Netz entfernt, so dass an dieser Stelle ein Loch entsteht und zuvor übertragene Kräfte im anschließenden Berechnungsschritt auf die Nachbarelemente umgelagert werden. Auf diese Weise wird das Materialversagen abgebildet.

Autarke Crashsimulationen starten mit einer „unberührten“ Schädigungsvariablen mit dem Wert Null. Durch leichte Modifikationen des einer Umformsimulation zu Grunde liegenden Schädigungsmodells ist es möglich, den Schädigungsparameter bereits während einer Umformberechnung mitzuführen. Auf diese Weise ist sein Betrag nach der Umformsimulation und damit vor der eigentlichen Crashsimulation nicht mehr automatisch gleich Null, sondern spiegelt die „Vorschädigung“ durch die Umformung wider [20, 21].

Für die Realisierung der digitalen Prozesskette ist dabei eine Transferarchitektur erforderlich die es möglich macht, dem Folgeprozess essenzielle Ergebnisse des vorangehenden Prozessschrittes bereitzustellen. Die bei einer Simulation des Gießvorgangs entstehende Gefügekongfiguration kann dann zum Beispiel verwendet werden um die Simulation des Walzvorgangs durchzuführen. Die Erkenntnisse der Walzsimulation können dann benutzt werden, um den Glühprozess zu simulieren. Die nach einer Glühsimulation vorliegende Gefügekongfiguration kann wiederum mittels FE-Rechnung an repräsentativen Einheitszellen übertragen werden in die makroskopische Eigenschaften des

geglühten Bleches anhand virtuell generierter Zugversuche. Die Ergebnisse dieser Simulationen, z. B. r -Werte, E-Modul, Verfestigungsexponent usw. sind dann die Eingangsgrößen für die Umformsimulation. An diesem Punkt innerhalb der Prozesskette existieren heutzutage noch keine kommerziellen Mapping-Tools. Während der Umformrechnung kann dann bereits ein Schädigungsparameter mitgeführt werden, welcher zu Beginn einer Crashsimulation orts aufgelöste Informationen über das Restumformpotenzial sämtlicher Bauteilbereiche bereitstellt.

Teile dieser Transferarchitektur sind bereits heute umgesetzt und finden vereinzelt Anwendung in prozessübergreifenden Simulationen der Bauteileigenschaften, sind allerdings noch nicht standardmäßig integriert in die Entwicklungsroutine zukünftiger Produkte.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die kontinuierliche Entwicklung kommerzieller Finite-Element-Programmpakete für die Simulation von Blechumformprozessen ermöglicht heutzutage eine numerische Analyse von komplexen, multiphysikalischen Blechumformprozessen. Die dabei erzielte Ergebnisgüte entspricht allerdings nicht immer dem technisch Machbaren, denn obwohl die zur Qualitätssteigerung erforderlichen theoretischen Beschreibungen in Form von Stoffgesetzen zum Teil bereits in kommerzielle FE-Programme implementiert sind, kann das reale Materialverhalten des Blechwerkstoffes aufgrund fehlender Materialkennwerte nur unzureichend abgebildet werden. Aus diesen Gründen muss zur Verbesserung der Ergebnisqualität, in Abhängigkeit der zu analysierenden Fragestellung und der dabei wirksam werdenden (multi-) physikalischen Effekte, eine adäquate Beschreibung des Materialverhaltens und der tribologischen Gegebenheiten weiterentwickelt werden. Eine wesentliche Voraussetzung zum praktischen Einsatz dieser meist komplexeren Gesetzmäßigkeiten ist dabei die Möglichkeit, die benötigten Parameter mit einem vertretbaren experimentellen Aufwand ermitteln zu können.

Für eine weitere Steigerung der Genauigkeit in der Umformsimulation ist der Einfluss von Werkzeug und Maschine zu berücksichtigen. Dabei werden zur Zeit verschiedene Verfahren diskutiert und entwickelt (Substrukturtechnik, Modalanalyse, etc.). Die Ergebnisse der Umformsimulation werden mehr und mehr als Eingangsdaten für weitergehende Simulationen, wie z. B. Crash- und Lebensdauerberechnungen verwendet.

Das Ziel aller Entwicklungen ist dabei die digitale Prozesskette Blechteilefertigung, mit ihr wird es möglich sein, den Einfluß der Fertigungsverfahren auf die Bauteileigenschaften zu ermitteln.

5. Literaturverzeichnis

- [1] Roll, K.; Rohleder, M.: Einsatz und Potenzial der Blechumformsimulation im Entwicklungsprozess von Karosserieblechformteilen. 17. Umformtechnisches Kolloquium Hannover, 27.2. - 28. 2. 2002
- [2] Rohleder, M: Simulation rückfederungsbedingter Formabweichungen im Produktentstehungsprozess von Blechformteilen; Dr.-Ing. Dissertation, Universität Dortmund, 2001.
- [3] Wagoner, R. H.; He, N: Springback Simulation in Sheet Metal Forming; Proceedings of the 3rd International Conference on Numerical Simulation of 3-D Sheet Metal Forming Processes – Verification of Simulations with Experiments - , pp. 308 – 315, 1996
- [4] Chu, E.; Zhang, L.; Wang, S.; Zhu, X.; Maker, B.: Validation of Springback Predictability with Experimental Measurements and Die Compensation for Automotive Panels. Proceedings of the Numisheet 2002, Korea, pp. 313 - 318.
- [5] Roll, K.; Lemke, T.: Möglichkeiten und Strategien zur Simulation und Kompensation der Rückfederung. Tagungsband EFB-Kolloquium "Optimierung von Produktionsabläufen in der Blechverarbeitung", Fellbach, 18./19. 3. 2003.

- [6] Roll, K.; Bogon, P.: Rückfederung als Genauigkeitshindernis - notwendige Weiterentwicklungen der Simulationstechnik. In: Tagungsband 10. Sächsische Fachtagung Umformtechnik SFU 2003, Chemnitz, S. 89 - 108.
- [7] Roll, K.; Wiegand, K.: Eine Möglichkeit zur Berücksichtigung der Werkzeugelastizität bei der Blechumformsimulation. In Tagungsband Seminar „Neuere Entwicklungen in der Blechumformung“, Institut für Umformtechnik, Universität Stuttgart, 2006.
- [8] Hill, R.: A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals, Proc. Roy. Soc. London; A193, 281-297, 1948
- [9] Swift, H.W.: Plastic instability under plane stress. J. Mech. Phys. Solids, Vol. 1, pp. 1 to 18, 1952
- [10] Voce, E.: The relationship between stress and strain for homogeneous deformation. J. Inst. Met., pp. 537 to 562, 1948
- [11] H. Gese, H. Dell, G. Oberhofer: Verbesserte Materialmodelle für die virtuelle Auslegung von Leichtbaustrukturen im Automobilbau bei Crashbelastung. DVM 2005
- [12] Hänsel, A.; Hora, P.; Reissner, J.: Model for the Kinetics of Strain-Induced Martensitic Phase Transformation at Isothermal Conditions for the Simulation of Sheet Metal Forming Processes with Metastable Austenitic Steels. In: Huétink und Baaijens (Hrsg.): Simulation of Materials Processing, Rotterdam: Balkema (1998).
- [13] Roll, K.; Lorenz, D.; Faust, A.: Herausforderungen bei der Simulation hochfester Stähle in Prozessketten. Industriekolloquium SFB 396, Erlangen, 2006.
- [14] Ropers, C.: Berücksichtigung der Temperatur und Werkzeugnachgiebigkeit in der Simulation von Blechumformprozessen. Dr.-Ing. Diss. Univ. Hannover, 2001.
- [15] Y.T.Keum, I.H.Ahn, I.K.Lee, M.H.Song, u. a.: Simulation of Stamping Process of Automotive Panel Considering Die Deformation. In: Proceedings NumiSheet2005, Detroit.
- [16] Bogon, P.: Anforderungen an Simulationssysteme zur Optimierung der Produktionseigenschaften von Pressmaschinen. In: 6. Dresdener Werkzeugmaschinen-Fachseminar „Simulation an Umformmaschinen“. Dresden, 2003.
- [17] Roll, K.; Wiegand, K.: Eine Möglichkeit zur Berücksichtigung der Werkzeugelastizität bei der Blechumformsimulation. In Tagungsband Seminar „Neuere Entwicklungen in der Blechumformung“, Institut für Umformtechnik, Universität Stuttgart, 2006.
- [18] Roll, K.: Advanced Simulation Techniques - Exceeding Reality? Proceedings Materials & Technology Conference, 16.- 20. September, Detroit.
- [19] A. Zöller, T. Frank, A. Haufe: Berücksichtigung von Blechumformergebnissen in der Crashberechnung, 3. LS-DYNA Anwenderforum, Bamberg 2004
- [20] F. Neukamm, M. Feucht, A. Haufe: Forming and Crash Induced Damage Evolution and Failure Prediction - Part 2: A Comparison of Damage Models, 6th German LS-DYNA Forum, 11th-12th of October 2007 in Frankenthal, Germany
- [21] F. Schmeing, M. Feucht, A. Haufe: Forming and Crash Induced Damage Evolution and Failure Prediction - Part 1: Extension of the Gurson Model to Forming Simulations, 6th German LS-DYNA Forum, 11th-12th of October 2007 in Frankenthal, Germany

**FEM-basierte Modellierung und Simulation
des Blechumformprozesses
mit den elastischen Wechselwirkungen
zur Maschine und zum Werkzeug**

Prof. Dr.-Ing. habil. K. Großmann
Dipl.-Ing. A. Hardtmann
Dr.-Ing. H. Wiemer
Dipl.-Ing. L. Penter

Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik
TU Dresden

FEM-BASIERTE MODELLIERUNG UND SIMULATION DES BLECHUMFORMPROZESSES MIT DEN ELASTISCHEN WECHSELWIRKUNGEN ZUR MASCHINE UND ZUM WERKZEUG

Prof. Dr.-Ing. habil. K. Großmann, Dipl.-Ing. A. Hardtmann,
Dr.-Ing. H. Wiemer, Dipl.-Ing. L. Penter
(Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik, TU Dresden)

1 Einleitung

Ein Forschungsschwerpunkt am IWM ist seit Jahren die Verhaltensanalyse an Pressmaschinen. Diese Arbeiten hatten vorerst zum Ziel, Grundlagen für die Modellierung und Simulation des Verhaltens der Pressmaschinen unter Betriebslast zu entwickeln [1-3]. Weiterführend stand die Modellanwendung im Vordergrund. Beispielhaft wurde demonstriert, dass es mit den geschaffenen Pressenmodellen möglich ist, für die Teilequalität und den Werkzeugverschleiß relevante Einflüsse aus der Presse abzubilden.

So wurde in [4] der Einfluss der Stufenfolge auf die Stößelverlagerungen demonstriert. In [5, 6] wurde gezeigt, dass die Beeinflussung der Stößelbewegung durch Hubzahl, Antriebskinematik und durch den Prozess angeregte Schwingungen modellseitig abgebildet werden kann. Weiterhin lässt sich das dynamische Verhalten der Ziehanlage für unterschiedliche Hubzahlen simulieren [5].

Im bekannten Modell des Umformprozesses werden die in der Realität wirkenden Einflüsse unterschiedlich stark vereinfacht. Einige relevante Einflüsse bleiben sogar gänzlich unberücksichtigt. Das FEM-Modell zur Simulation des Umformprozesses besteht aus der Platine und den Werkzeugkomponenten (Ziehring, Stempel, Blechhalter), die in den meisten Fällen als starre Körper modelliert werden. In der Praxis führt - vor allem bei großen Werkzeugstrukturen - die elastische Werkzeugdeformation zu Problemen im Umformprozess.

Weiterhin wird auch die Umformmaschine als starr angenommen, d.h. es wird auf eine Modellierung der Pressenkomponenten (Gestell, Antrieb, Stößel, Tisch) und der Zieheinrichtung und damit der Lagerung der Werkzeugelemente verzichtet. Somit können keine Verlagerungen der Werkzeugkomponenten abgebildet werden, obwohl diese eine wesentliche Prozessbeeinflussung darstellen. Hubzahl und Antriebskinematik werden ebenfalls vernachlässigt. Um jedoch die nachgewiesenen Presseneinflüsse in der Prozessplanung berücksichtigen zu können, ist die interaktive Modellkopplung von Presse und Prozess notwendig.

In mehreren Forschungsprojekten [7, 8] wurden am IWM Möglichkeiten untersucht, diese Modellkopplung durch Erweiterung der bisherigen FEM-Prozessmodelle zu erreichen, um die bisher unberücksichtigten Einflüsse aus Werkzeug und Maschine und deren Wechselwirkungen mit dem Prozess simulieren zu können. Grundlage war und ist die Nutzung des in kommerzieller FEM-Software verfügbaren Funktionsumfangs. Trotz weiter Verbreitung von Umformsimulationsprogrammen wie PAM-STAMP, LS-DYNA oder MSC.MARC wurden deren Möglichkeiten zur Berücksichtigung der elastischen Randbedingungen aus Maschine und Werkzeug bisher weitestgehend nicht genutzt [9].

Die entwickelte Modellierungsmethode und die erzielten Ergebnisse sowie deren experimentelle Überprüfung werden im Folgenden vorgestellt. Abschließend wird die erfolgreiche Anwendung des erweiterten Umformprozessmodells bei der Prozessauslegung für ein piezoaktorisches Ziehwerkzeug gezeigt.

2 Erweitertes Umformprozessmodell

2.1 Vorgehensweise

Ziel der Forschung ist die Verbesserung der Aussagefähigkeit der FEM-Prozessanalyse durch die Erweiterung des FEM-Prozessmodells mit den Einflüssen der Umformmaschine und Werkzeuge auf den Umformprozess. Durch die prozessabhängige Berücksichtigung von Werkzeugdeformation (wesentlich abhängig von Geometrie und Werkstoff der Werkzeuge) und Werkzeugverlagerung (wesentlich beeinflusst von den elasto-statischen Pressen- und Zieheinrichtungseigenschaften) wurden Grundlagen für ein umformtechnisches Gesamtmodell gelegt.

Das Umformprozessmodell wird schrittweise erweitert:

- Erweiterung um die Einflüsse der elastischen Werkzeugeigenschaften.
- Erweiterung um die Einflüsse aus Gestell, Antrieb und Führungssystem der Presse auf die Stößel- und damit die Ziehring- bzw. Stempelverlagerung.
- Erweiterung um die Einflüsse aus der Zieheinrichtung und damit auf die Blechhalterverlagerung.

Die vorgestellte Modellierungsmethode wird am Beispiel einer einfach wirkenden Presse mit Zieheinrichtung erläutert. Die prinzipielle Vorgehensweise lässt sich aber auch auf doppelt wirkende Pressen anwenden.

2.2 Werkzeugmodellierung

Neben den geometrischen und kinematischen Eigenschaften des Werkzeugs, welche weitestgehend von der technologisch notwendigen Stadienfolge und dem Bauteildesign bestimmt werden, wirken vor allem die Werkzeugdeformationen unter Prozesslast auf das Umformergebnis. Die Werkzeugdeformationen können in lokal und global wirksame unterschieden werden. Lokale Deformationen des Werkzeugs sind elastische Geometrieänderungen an den Formelementen wie den Ziehringradien. Globale Werkzeugdeformationen sind elastische Durchbiegungen des Werkzeugs, welche aus den Wechselwirkungen mit den Deformationen von Pressentisch und –stößel unter Prozesslast resultieren.

Bisher werden die Werkzeugdeformationen im Modell des Umformprozesses und damit die elastischen Wechselwirkungen zwischen Prozess und Werkzeug üblicherweise nicht berücksichtigt, da die Werkzeuge als starre Körper beschrieben werden. Die elastischen Eigenschaften der Werkzeuge können aber mit einem aus Volumenelementen bestehenden FEM-Werkzeugmodell in Verbindung mit einem elastischen Werkstoffmodell abgebildet werden. Bild 1 zeigt den aus CAD-Daten (Quelle: DaimlerChrysler AG) vernetzten Werkzeugsatz für das Benchmarkteil „S-Rail“ in LS-DYNA. Die Einflüsse aus der Presse bleiben in diesem Modell unberücksichtigt.

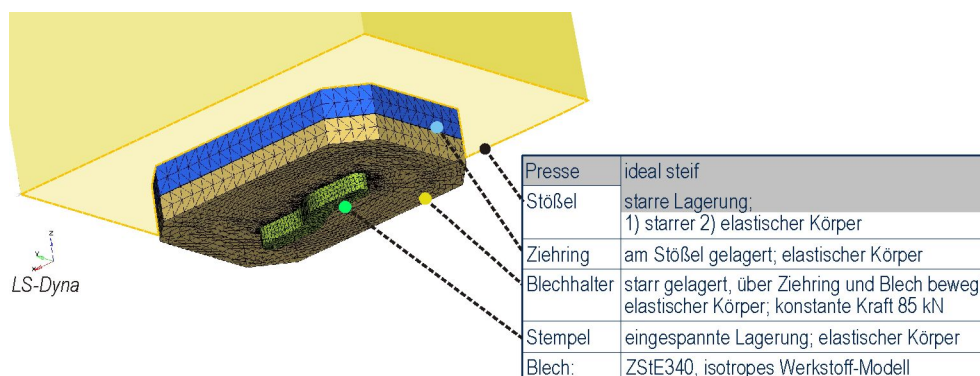


Bild 1: Elastische Werkzeugbeschreibung mittels FEM für das Bauteil „S-Rail“

Im Beispiel werden die elastischen Werkzeugeinflüsse auf den Umformprozess mit unterschiedlich erweiterten Prozessmodellen analysiert [7], deren Ergebnisse für Blechhalter- und Matrizen deformation in Bild 2 dargestellt ist. In beiden Modellen (Modell 1: elastische Matrice am starren Stößel; Modell 2: elastische Matrice am elastischen Stößel) verformt sich die Matrice unter Einwirkung der Prozesslast sowohl lokal an den Ziehkantenradien als auch durch globale Plattendurchbiegung. Aufgrund der elastischen Stößelbeschreibung ist im Modell 2 die Matrizendurchbiegung größer als im Modell 1. Die im Modell 1 wegen der Matrizenlagerung am starren Stößel nicht plausibel auftretende Durchbiegung resultiert möglicherweise aus einer fehlerhaften Kontaktmodellierung. Aufgrund der kompakten und damit steifen Werkzeugkonstruktion sind die lokalen Deformationen gegenüber den globalen Deformationen relativ klein. Die Modellierung der Werkzeuge mit elastischen Körpern ist daher in Verbindung mit einer elastischen Stößel- oder Tischbeschreibung durchzuführen.

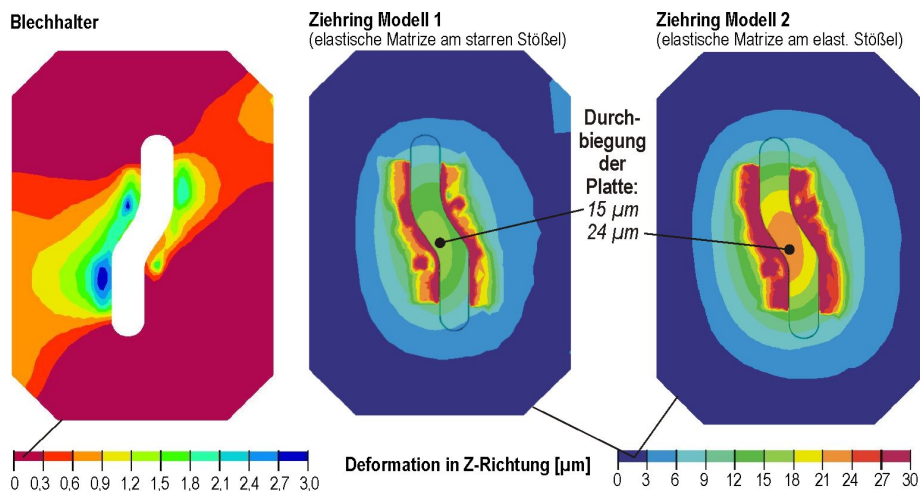


Bild 2: Deformationen von Ziehring und Blechhalter unter Lasteinwirkung des Umformprozesses im Umformprozessmodell mit elastischer Werkzeugbeschreibung für das Bauteil „S-Rail“

2.3 Pressenmodellierung

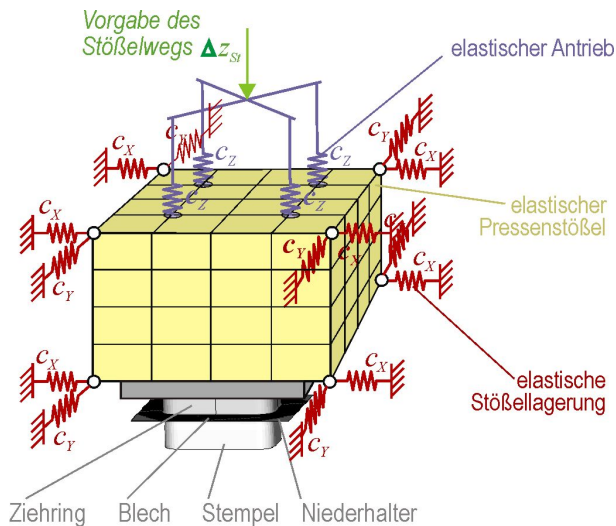
Die im Prozess wirkenden Lasten verursachen über die Steifigkeiten der Maschine Verlagerungen der Werkzeug tragenden Komponenten. Die Folgen sind Formabweichungen am Blechteil, Qualitätsbeeinflussung an Schnittflächen, Abweichungen von den eingestellten Blechhaltekräften (was als Ursache für Falten und Reißen im Werkstück gilt) oder zunehmender Werkzeugverschleiß.

Für den Blechumformprozess sind die aus dem Verformungs- und Verlagerungsverhalten resultierenden genauigkeitsbestimmenden Einflüsse der Presse relevant. Diese sind in der Norm [10] als Genauigkeitskenngrößen der Presse definiert. Vorerst sollen mit der Modellerweiterung nur diese statischen Einflüsse berücksichtigt werden:

- vertikale Gesamtsteifigkeit c_{gesZ} ,
- horizontale Gesamtsteifigkeiten c_{gesX} und c_{gesY} ,
- Kippsteifigkeiten c_{kA} und c_{kB} .

Diese resultierenden Steifigkeiten fassen alle statischen Einflüsse aus den Pressenbaugruppen bzgl. je eines Freiheitsgrades im Pressenkoordinatensystem [10] zusammen.

Im Modell des Umformprozesses bleibt derzeit der Presseneinfluss unberücksichtigt. Werden die Werkzeugkomponenten als starre Körper behandelt, ist es hinreichend, die Werkzeuglagerung am starren Stößel zu definieren. Der Vorteil der Anwendung eines starren Stößelmodells liegt darin, dass für eine Beschreibung der Presseneinflüsse deren Hauptsteifigkeiten direkt durch Ankopplung im Schwerpunkt des Stößels mit konzentrierten Parametern genutzt werden können. Für eine angestrebte Modellierung elastischer Werkzeugkomponenten ist diese Lösung nicht realisierbar.



$$\begin{aligned}
 & \text{- horizontal:} \\
 & \text{(Führung u. Gestell)} \quad c_x = \frac{c_{kB} - \frac{c_{gesZ} \cdot x_{Tr}^2}{4}}{2 \cdot z_{St}^2} \quad c_y = \frac{c_{kA} - \frac{c_{gesZ} \cdot y_{Tr}^2}{4}}{2 \cdot z_{St}^2} \\
 & \text{- vertikal:} \\
 & \text{(Antrieb und Gestell)} \quad c_z = \frac{c_{gesZ}}{4}
 \end{aligned}$$

Verteilte Steifigkeiten

Bild 4: Erweitertes Prozessmodell mit Pressenmodell in Antriebs- und Führungsfedern, aufgelöst für elastischen Stößel (Beispiel: O-Gestell mit 4-Punkt-Antrieb)

Elastische Werkzeugmodelle erfordern die elastische Bettung in der Maschine. Das bedeutet, im Pressenmodell sind der Stößel und der Tisch elastisch zu beschreiben. Am elastischen Stößel ist aber die Lagerung des Stößels im Schwerpunkt nicht zulässig. Die Lagerung des elastischen Stößels in der Presse wird gleich der realen Pressenstruktur über den Antrieb und die Stößelführung definiert. Bild 4 zeigt das erweiterte Prozessmodell mit den verteilten Federelementen. Dabei werden an den Eckpunkten des Stößelmodells Federelemente in horizontaler (X- bzw. Y-) Richtung sowie entsprechend der Antriebsanordnung in vertikaler (Z-) Richtung angekoppelt. Über die Lage und Parametrierung dieser Federelemente lassen sich folgende Eigenschaften der Presse darstellen:

- Hauptsteifigkeiten der Presse,
- Antriebsanordnung und -spiel,
- Gestellsteifigkeit, -bauform und -gliederung,
- Führungstyp.

In [7, 12-14] sind Pressenmodelle schematisch für unterschiedliche Pressenstrukturen vorgestellt worden. Auf Grundlage der Momentenbilanz gelingt die Umrechnung aus den Kippsteifigkeiten c_{kA} , c_{kB} und der vertikalen Gesamtsteifigkeit c_{gesZ} in die Steifigkeiten der horizontalen und vertikalen Federelemente c_x , c_y und c_z . Die Gleichungen in Bild 4 zeigen diesen Zusammenhang beispielhaft für eine Presse mit O-Gestell und 4-Punktantrieb. Zur Parametrierung der Pressenmodelle können - falls keine aktuellen Daten vorliegen - in erster Näherung realitätsnahe Werte aus [11] genutzt werden. In [11] sind typische Bereiche für vertikale Gesamtsteifigkeiten und Kippsteifigkeiten nach Pressennennkraft geordnet angegeben.

2.4 Modellierung der Zieheinrichtung

Ein wesentlicher Einfluss auf die Kontakt- und Reibungsverhältnisse in der Wirkfuge zwischen Ziehmatrize und Blechhalter resultiert aus dem Blechhalter. Dieser ist im bisherigen Umformprozessmodell wie in der breiten Anwendung üblich [9] als konstante Flächenpressung auf der Blechhalteroberfläche abgebildet. Die Flächenpressung auf der Blechhalteroberfläche stellt sich jedoch zeitlich und örtlich aus dem Gleichgewicht der sich u. U. zeitlich und örtlich veränderbaren Prozesslast (Ziehkissenkraft) und der Blechhalterverlagerung und -deformation ein. Um diesen wesentlichen Einfluss auf das Ziehergebnis in der Simulation des Umformprozesses mit darstellen zu können, ist eine Modellerweiterung um die Deformation und Verlagerung des Blechhalters erforderlich.

Während unter Prozesslast die Form des Blechhalters von dessen elastischen Eigenschaften abhängt, wird die Lage durch die elastischen Eigenschaften der Zieheinrichtung (Antrieb, Ziehkissen, Ziehkissenführung) sowie der Werkzeugführung bestimmt. Für die Modellierung der Blechhalterlagerung über eine Zieheinrichtung wurden ähnlich der Pressenmodellierung die Modellstrukturen der Zieheinrichtung für elastische Blechhalter entwickelt.

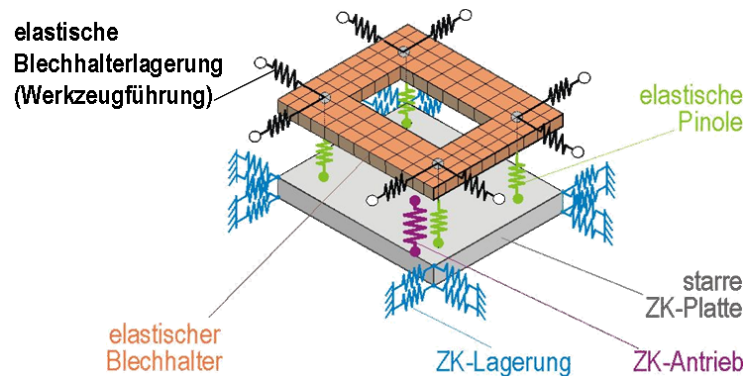


Bild 5: Modellstruktur der Zieheinrichtung für elastischen Blechhalter

Im Bild 5 ist ein Modell einer Zieheinrichtung für elastische Blechhalter dargestellt. Mit dem Prinzip der ersetzenden Federelemente werden die Ziehkissenantriebs- und -führungssteifigkeiten sowie die Pinolenaxialsteifigkeiten abgebildet. Ersetzenden Federelemente werden ebenfalls am elastischen Blechhalter an Koppelknoten entsprechend der Werkzeugführung verteilt angeordnet. Die Parametrierung der Federelemente erfolgt nach den in der Literatur [15] angegebenen Steifigkeitswerten.

3 Experimentelle Überprüfung

3.1 Experimentiereinrichtung

Zur experimentellen Verifikation der Modellierungsmethode steht am IWM eine einfach wirkende hydraulische Presse mit hydraulischem Ziehkissen der Fa. Wanzke vom Typ HPV 160 zur Verfügung. Zunächst wurde für diese Presse das statische Kipp- und Auffederungsverhalten mittels definierter Momenteneinleitung durch eine Pressenprüfeinrichtung ermittelt (Bild 6). In dem dort dargestellten Diagramm ist das drehrichtungsabhängige Kippverhalten des Pressenstößels um die X- und Y-Achse zu erkennen.

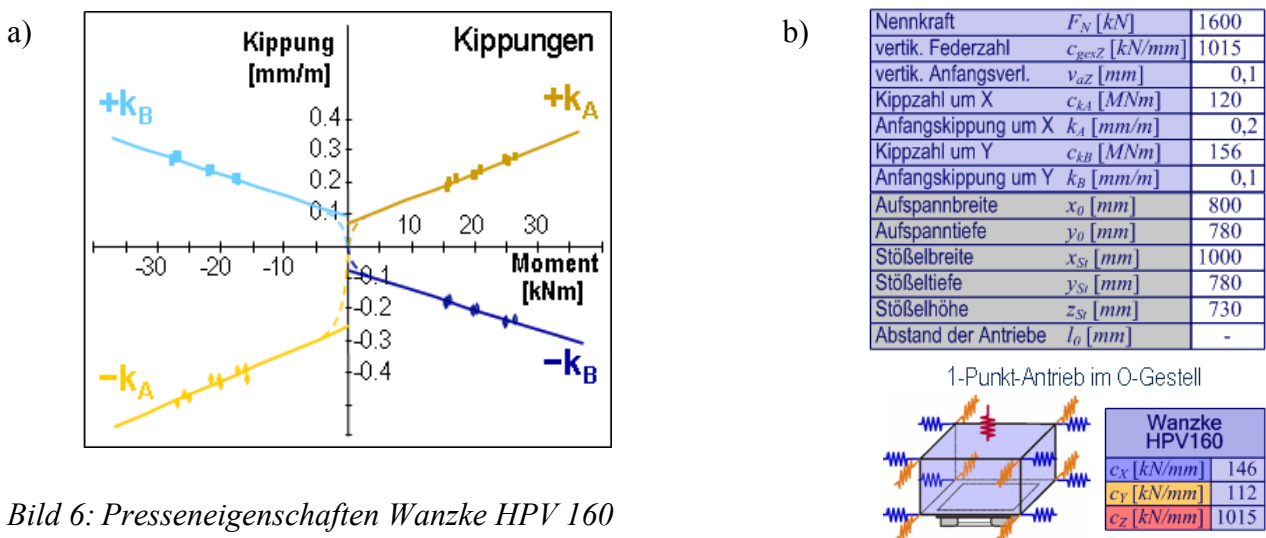


Bild 6: Presseneigenschaften Wanzke HPV 160

a) Kippung um X-Achse (k_A) und Y-Achse (k_B),

b) daraus abgeleitete Hauptsteifigkeiten und Einzelfedersteifigkeiten des Pressenmodells

Aus diesen Kippungs-Kennlinien wurden die mittleren Kippsteifigkeiten c_{kA} , c_{kB} sowie die vertikale Gesamtsteifigkeit c_{gesZ} bestimmt, die wiederum zu den Steifigkeiten der horizontalen und vertikalen Federelemente c_X , c_Y und c_Z des verwendeten Modells einer O-Gestell-Pressen mit Einpunkt-Antrieb umgerechnet wurden. Da diese Abbildung mittels linear-elastischen Federn nicht dem tatsächlichen Kipp- und Auffederungsverhalten der Versuchspresse entsprach, ist das Pressenmodell hinsichtlich nichtlinearer Kennlinien weiterentwickelt worden. Wie Bild 7 verdeutlicht, wurden dabei nur nichtlineare Druckfedern an den Stößeckknoten verwendet, um auch das drehrichtungsabhängige Verhalten in den einzelnen Kipprichtungen abzubilden.

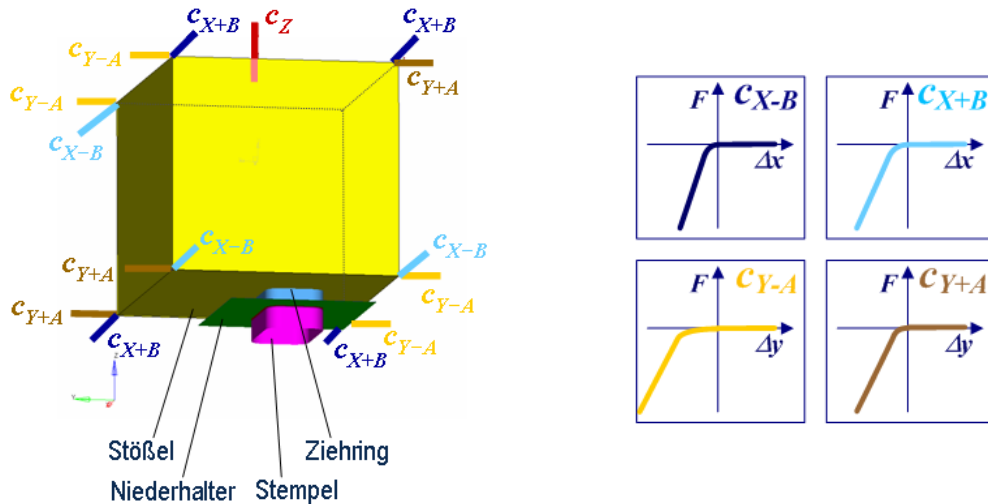


Bild 7: Pressenmodell Wanzke HPV 160 mit nichtlinearen Federkennlinien bei starrer Lagerung des Blechhalters

Für die experimentelle Überprüfung ist eine Rechteck-Wanne (Bild 10) als Versuchsteil ausgewählt worden. Die Steifigkeitseigenschaften des zugehörigen Experimentierwerkzeugs wurden durch den Einsatz von Tellerfedern im Ziehling modifiziert (Bild 8), um die Gesamtsteifigkeiten im System Presse-Werkzeug variieren zu können.

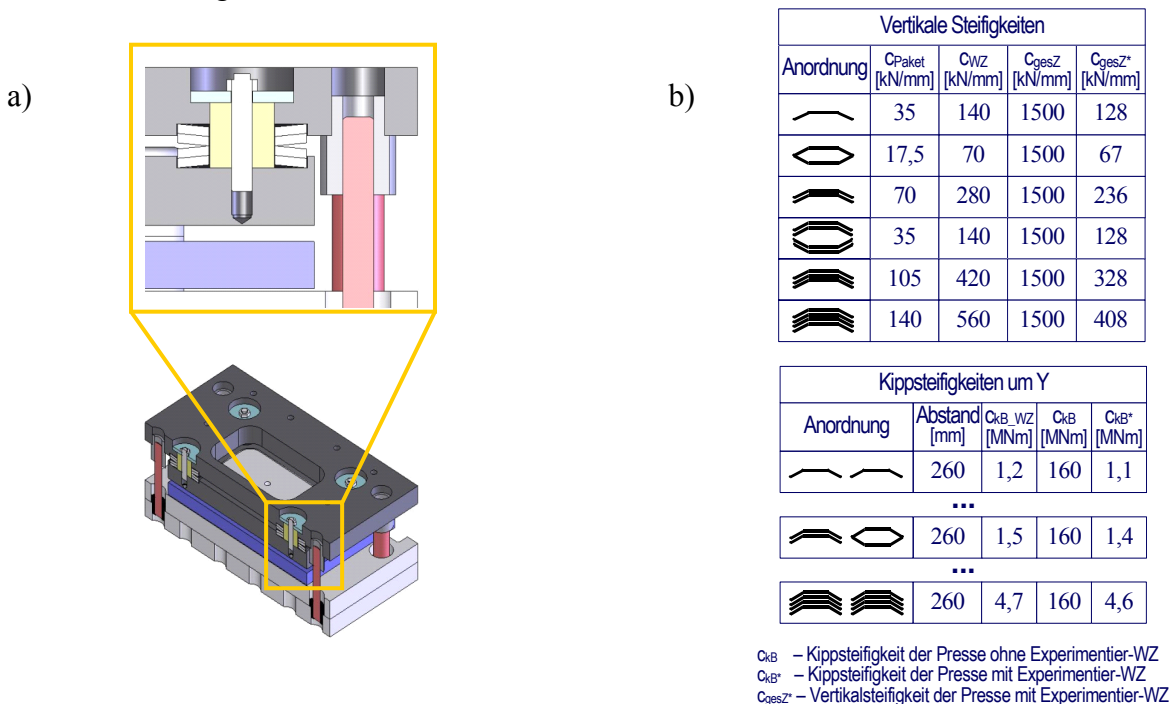


Bild 8: Variation der Gesamtsteifigkeit in der Experimentierumgebung
a) Experimentierwerkzeug, b) variable Gesamtsteifigkeiten

3.2 Erweitertes Umformprozessmodell der Experimentiereinrichtung

Das Pressenmodell mit nichtlinearen Federn wurde zunächst mit starrem Blechhalter und elastischer Blechhalterlagerung aufgestellt. Es konnte zwar unterschiedliches Kippverhalten beim asymmetrischen Einbau des Werkzeuges in der Presse simulativ ermittelt werden, ein Übereinstimmung der experimentell aufgetretenen Tiefziehfehler konnte jedoch nicht nachgewiesen werden. Hierzu war die Aufstellung eines umformtechnischen Gesamtmodells (Bild 9) in LS-DYNA notwendig, das die elastischen Eigenschaften der Presse HPV 160 mit ihrer Zieheinrichtung und des Umformwerkzeuges einschließlich der Tellerfedern im Ziehring beinhaltet.

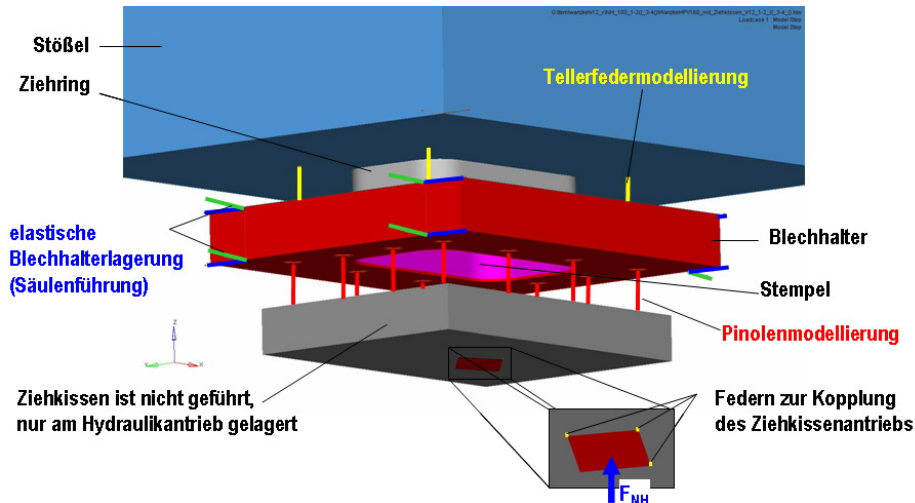


Bild 9: Modellierung des Versuchswerkzeuges einschließlich elastischer Lagerung des Blechhalters und des Ziehkissens

Da bei der Zieheinrichtung der Versuchspresse das Ziehkissen nicht geführt ist sondern nur am Ziehkissenantrieb gelagert ist, wurde ein entsprechendes Ersatzfedermodell entwickelt. Die Anordnung der Federn der Blechhalterlagerung ergibt sich aus den Eigenschaften der Werkzeug-Säulenführungen. Die Steifigkeiten wurden mit Hilfe von Literaturwerten [15] parametrisiert. Aus Performance- und Stabilitätsgründen (Massenskalierung, Dämpfung) wurden die Relativbewegungen im Werkzeug durch die Bewegung des (in der Realität feststehenden) Stempels anstelle durch die Antriebsbewegung des Stößels realisiert.

3.3 Vergleich von Simulation und Experiment

Beispielhaft soll anhand einer Tellerfederkonfiguration die Leistungsfähigkeit des erweiterten Prozessmodells veranschaulicht werden. Durch die Lagerung des Werkzeuges auf Tellerfedern können mit unterschiedlicher Steifigkeitsverteilung verschiedene Gesamtsteifigkeiten im System Presse und Werkzeug an der Wanzke eingestellt werden. Bild 10 zeigt einen unsymmetrischen Lastfall.

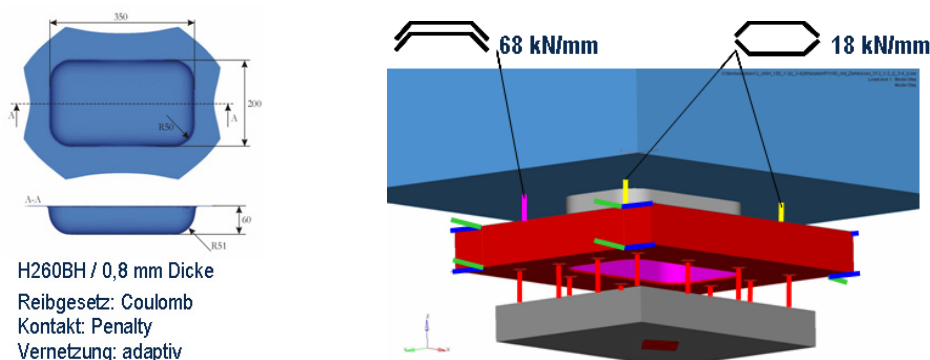


Bild 10: Versuchswerkstück und ausgewählter unsymmetrischer Lastfall

Der Platinezuschnitt wurde mit Schalenelementen vernetzt und der Werkstückwerkstoff mit einem anisotropen Materialmodell für H260BH beschrieben sowie adaptive Netzverfeinerung verwendet. Die tribologischen Verhältnisse wurden mit einem Coulombschen Reibmodell in Verbindung mit einem Penalty-Kontakalgorithmus modelliert. Für unterschiedliche Blechhalterkräfte wurden an den gezogenen Rechteckwannen der Blecheinzug und die Blechdicke gemessen sowie Tiefziehfehler (Falten, Reißen) und deren Entstehungsort identifiziert.

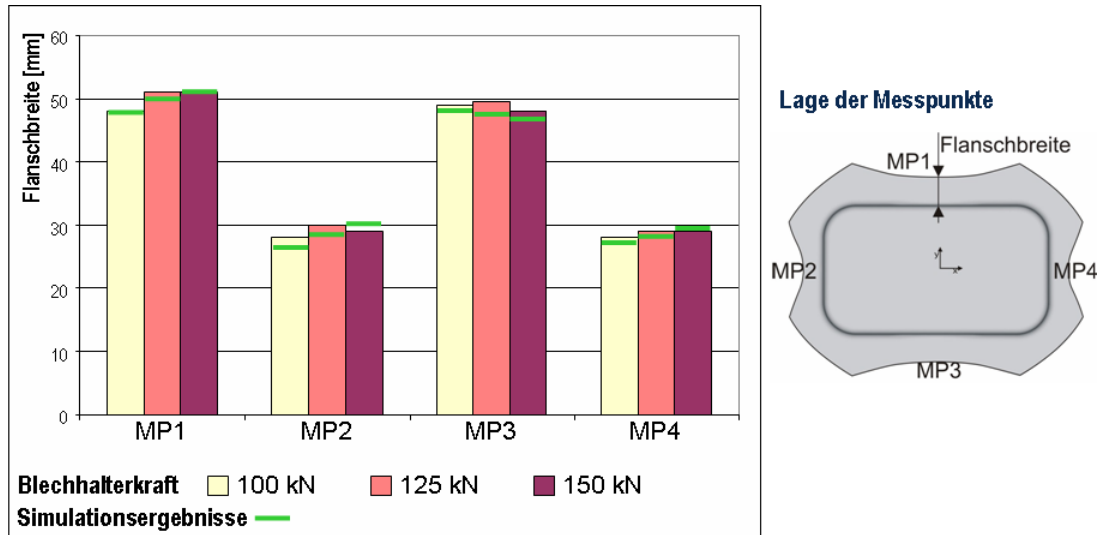


Bild 11: Ergebnisvergleich zwischen Experiment und Simulation - Restflanschbreiten bei unterschiedlichen Blechhalterkräften

Verglichen mit den zugehörigen Simulationsergebnissen ist eine gute Übereinstimmung von Simulation und Experiment festzustellen, wie in Bild 11 anhand des Blecheinzuges an den vier Seiten des Restflansches zu sehen ist. Auch die Berechnung der Faltenbildung und Rissvorhersage unter Verwendung einer Grenzformänderungskurve stimmen mit den Versuchsergebnissen überein (Bild 12).

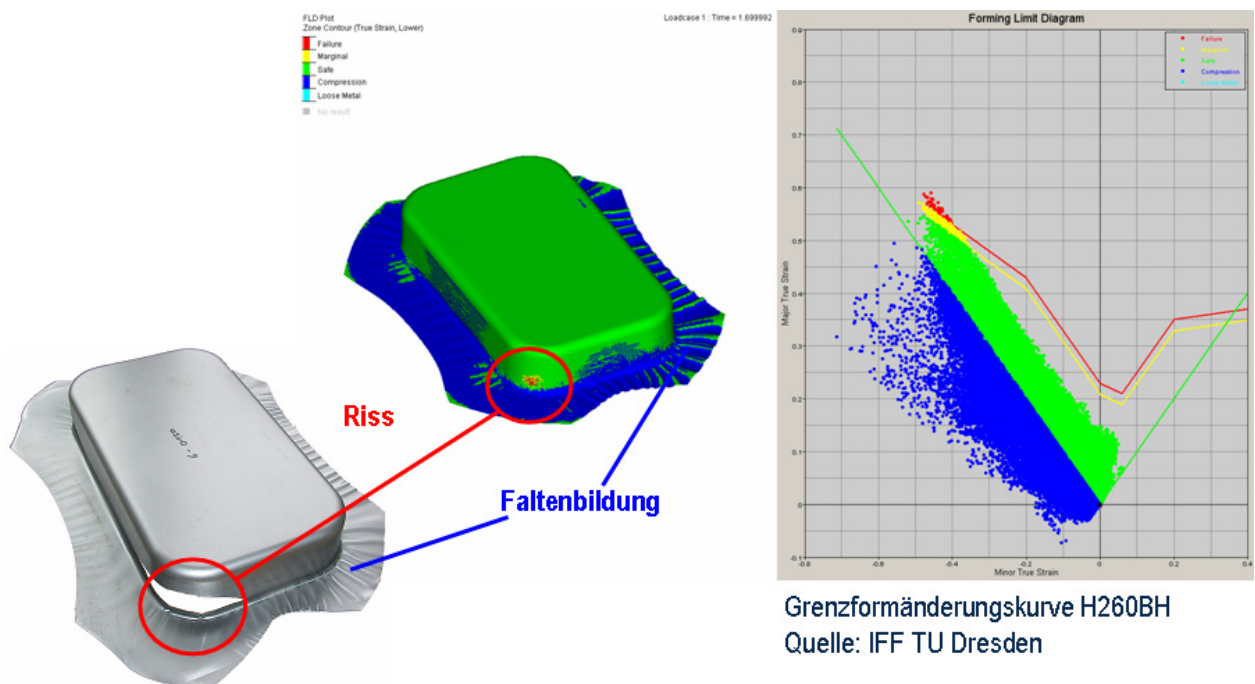


Bild 12: Ergebnisvergleich zwischen Experiment und Simulation - Fehleranalyse mit Grenzformänderungskurve

4 Anwendungsbeispiel „Piezoaktorisches Ziehwerkzeug“

Im Rahmen eines EFB-Projekts [16] wurde am Institut für Formgebende Fertigungstechnik (IFF) der TU Dresden ein piezoaktorisches Ziehwerkzeug erfolgreich entwickelt und gebaut. Um dessen Inbetriebnahme zu verkürzen, wurden mittels FEM-Prozessanalyse geeignete Startwerte für die Regelung der Piezoaktoren gesucht. Hierfür ist in Zusammenarbeit mit dem IFF die vorgestellte Modellierungsmethode genutzt worden [17].

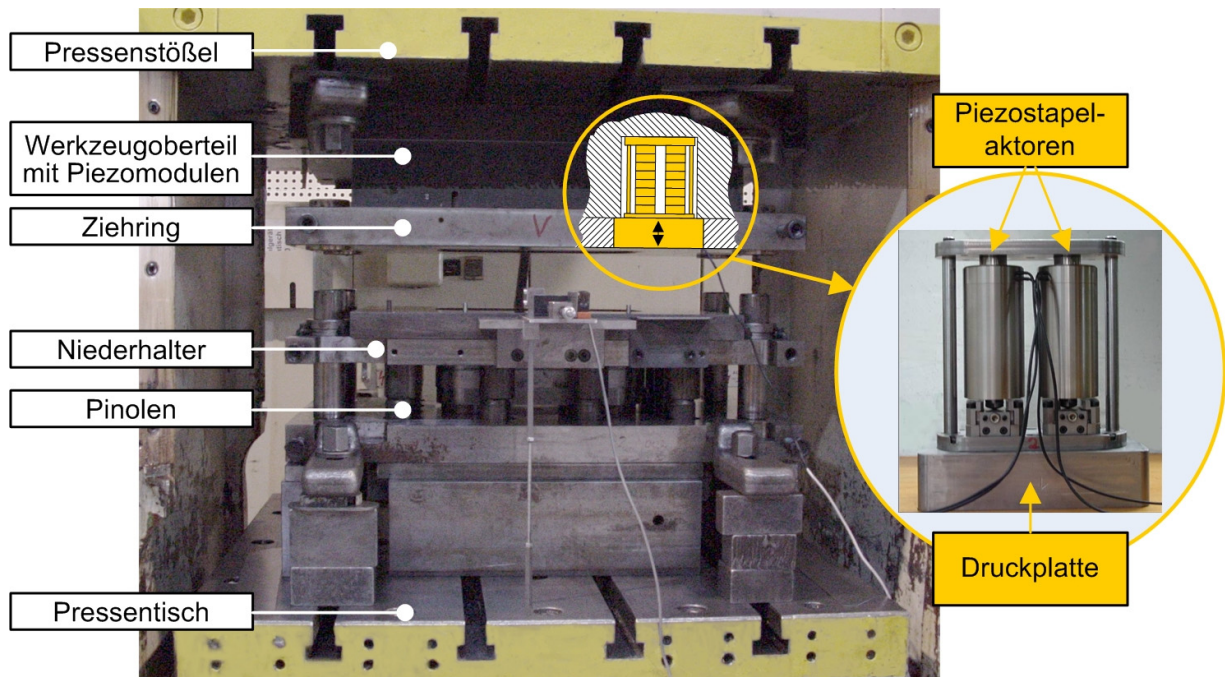


Bild 13: Prinzip piezoaktorisches Ziehwerkzeug [16]

Das Prinzip des piezoaktorischen Ziehwerkzeugs ist im Bild 13 am Rechteckwannen-Werkzeug veranschaulicht. Mit den piezoelektrischen Aktivelementen wird der Werkstofffluss während des Ziehvorganges geregelt. Hierzu wurden bei diesem Ziehwerkzeug Durchbrüche in den Grundkörper des Ziehtrings eingefräst, in welche bewegliche Druckplatten eingelassen wurden. Die Druckplatten werden unter kritischen Blechteilbereichen positioniert. Mit Hilfe von Piezostapelaktoren können die Druckplatten zur lokalen Beeinflussung des Blechhaltedrucks vertikal verstellt werden.

Ausgangspunkt für die Prozesssimulation war zunächst die bisher übliche Modellierung des Umformprozesses (Bild 14, Modell a) [17]. Die elastischen Eigenschaften des Werkzeugs und der Maschine wurden vorerst nicht berücksichtigt. Dieses Grundmodell bildete jedoch die Segmentierung des Ziehtrings und die eingelassenen Druckplatten ab. Die Teilmodelle der Piezoaktoren stellten das charakteristische Piezoverhalten vereinfacht als vorgespannte Feder dar.

Die erste Simulationsrechnung wurde begleitend zur Werkzeugentwicklung durchgeführt und hatte zum Ziel die Machbarkeit des neuen Werkzeugkonzepts nachzuweisen. Zudem konnten per Simulation geeignete Startwerte für die Aktoreinstellungen berechnet werden, welche in den Erstversuchen erfolgreich genutzt wurden. Die Inbetriebnahme des Werkzeugs konnte auf diese Weise wesentlich verkürzt werden.

Zum Ergebnisvergleich zwischen Simulation und Experiment wurde als charakteristische Größe die Restflanschbreite bewertet. Der Vergleich der Simulations- mit den Versuchsergebnissen zeigte beim Grundmodell (a) zwar tendenziell gute Übereinstimmung, im Flanschbereich jedoch erhebliche Abweichungen.

Aus einer genaueren Analyse der Simulationsergebnisse hinsichtlich der durch die Aktoren beeinflussten Druckverteilung auf der Blechoberfläche wurde geschlussfolgert, dass das zugrunde gelegte Modell aufgrund der starren Werkzeugbeschreibung unzulässig stark vereinfacht war. Denn aus der eingestellten Druckverteilung und den damit verbundenen Blechaufdickungen resultieren lokal unterschiedliche Werkzeugdeformationen, die den Werkstofffluss beeinflussen, die im Modell aber nicht abgebildet wurden.

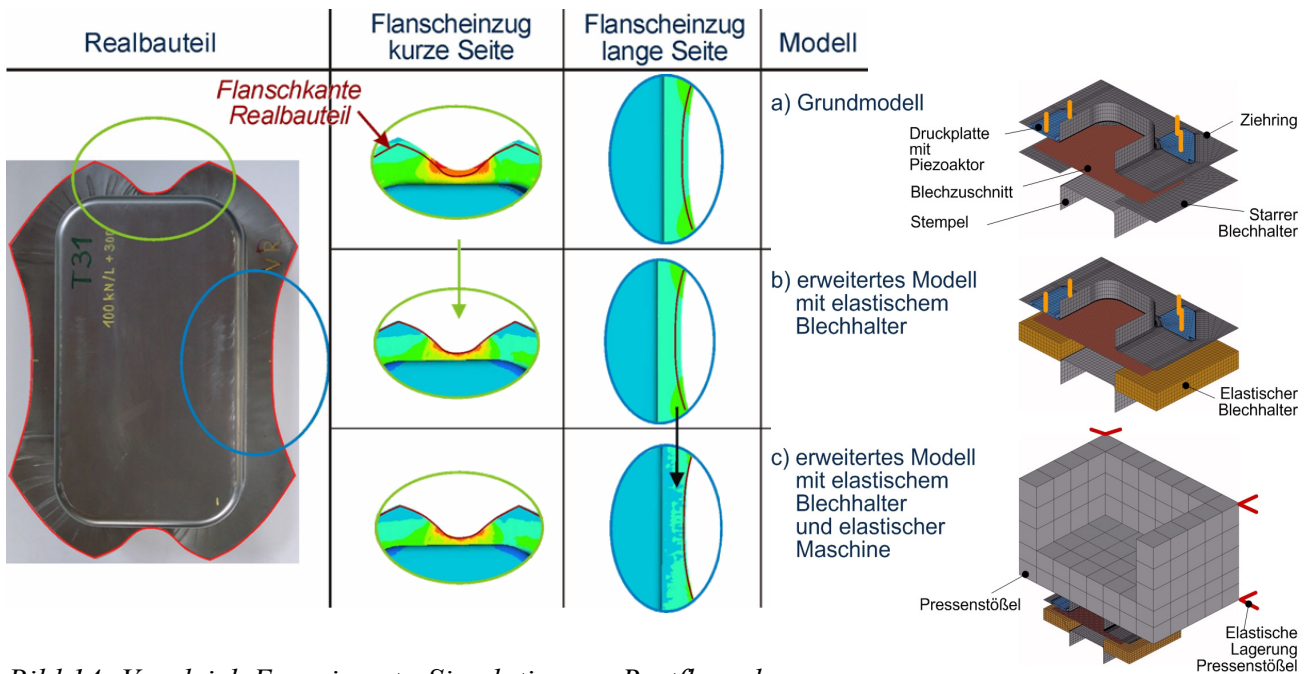


Bild 14: Vergleich Experiment - Simulation am Restflanscheinzug bei unterschiedlichen Modellentwicklungsstufen [17]

Deshalb wurde der Tiefziehprozess fortan in erweiterten Modellen mit elastischer Werkzeugbeschreibung (Bild 14, Modell b) simuliert. Aufgrund der Steifigkeitsverhältnisse am Versuchswerkzeug war hier die elastische Beschreibung des Blechhalters hinreichend. Die Berechnungsergebnisse dieser Modelle zeigten eine deutlich bessere Übereinstimmung mit den Flanschkonturen der Versuche. Weiterhin unberücksichtigt blieben aber die Nachgiebigkeiten von Maschine und Matrize.

Relevante Abweichungen zwischen Simulation und Experiment waren nur noch zu verzeichnen, wenn die eingestellte Druckverteilung zu starken exzentrischen Lastenleitungen in die Presse führte. Infolgedessen kam es aufgrund der Maschinennachgiebigkeit zur Verkippung zwischen Pressenstößel und Blechhalter. Diese Verkippung beeinflusste jedoch rückwirkend die Verteilung des Blechhalteredrucks am Werkstück und somit den Blecheinzug. Diese Wechselwirkungen konnten nur mit einem erweiterten Umformprozessmodell (Bild 14, Modell c), welches das elastische Maschinenverhalten mit einbezieht, abgebildet werden. Die Ergebnisse zeigen, dass mit dieser Modellerweiterung die größte Realitätsnähe erreicht werden konnte.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Ausgehend von der herkömmlichen Prozessmodellierung in einem FEM-System wurde nach Analyse der relevanten Einflüsse aus Werkzeug, Presse und Ziehleinrichtung auf den Umformprozess eine Modellierungsmethode entwickelt, die das bisherige FEM-Modell des Umformprozesses erweitert. Der Vergleich der Simulationsergebnisse der erweiterten Umformprozessmodelle mit den Ergebnissen der bisherigen Modellierung zeigt, dass mit um die Einflüsse der Presse und der Ziehleinrichtung erweiterten Umformprozessmodellen maschinenbedingte Einflüsse auf das Ziehergebnis sichtbar gemacht werden können.

Am Beispiel eines Rechteckwannen-Werkzeuges mit einer zugehörigen Experimentierumgebung ist eine gute Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit den experimentellen Untersuchungen nachgewiesen worden. Durch die Anwendung der Modellierungsmethode für die Prozessauslegung an einem piezoaktorischen Ziehwerkzeug konnte dessen Inbetriebnahme wesentlich verkürzt werden.

Damit steht prinzipiell ein Gesamtmodell des Umformprozesses zur Verfügung, um sowohl Einflüsse unterschiedlicher Presseneigenschaften als auch unterschiedlicher Ziehkissenkonfigurationen und -einstellungen in der Prozessplanung zu berücksichtigen und somit auf simulativem Weg den Aufwand bei Werkzeugeinarbeitung und Serienanlauf zu reduzieren.

Weiterführende aktuelle Forschungsarbeiten befassen sich mit folgenden Schwerpunkten:

- systematische Modellentwicklung für unterschiedliche Ziehleinrichtungen,
- Untersuchungen zur Umformprozessauslegung industrierelevanter Bauteile,
- Untersuchung zur reduzierten elastischen Modellierung großer Werkzeugstrukturen und
- Einbindung kinematischer und dynamischer Einflüsse.

6 Quellen

- [1] Großmann, K.; Schmoeckel, D.; Wiemer, H.; Schneider, R.: Simulation der dynamischen Schneidspaltbeeinflussung bei kombinierten Schneid- und Tiefziehoperationen an Mehrstößel-Transferpressen. EFB-Forschungsbericht Nr. 162, Hannover 2001
- [2] Wiemer, H.: Stand und Möglichkeiten der Systemsimulation von mechanischen Pressmaschinen. Dissertation, TU Dresden, 2004
- [3] Großmann, K.; Wiemer, H.; Groche, P.; Hofmann, T.: Modellgestützte Analyse von Pressmaschinen auf Grundlage experimentell verifizierter Parameter. EFB-Forschungsbericht Nr. 245, Hannover 2006
- [4] Großmann, K.; Wiemer, H.; Thoms, V.; Schirmacher, F.: Modellierung des Blechumformprozesses in der Anlagensimulation auf Grundlage von Ergebnissen der FEM-Prozesssimulation. EFB-Forschungsbericht Nr. 178, Hannover 2002
- [5] Wiemer, H.; Bogon, P.: Virtuelles Presswerk – Pressensimulation ein wesentlicher Baustein. EFB-Kolloquium „Optimierung von Produktionsabläufen in der Blechverarbeitung“, Fellbach 2003
- [6] Hoffmann, H.; Kühlewein, R.; Großmann, K.; Wiemer, H.: Ermittlung von Prozessparametern beim Nachschneiden schergeschnittener Konturen. EFB-Forschungsbericht Nr. 206, Hannover 2003
- [7] Großmann, K.; Hardtmann, A.; Wiemer, H.; Ulbricht, V.; Süße, D.: Vergleichende Bewertung der Simulation von Umformprozessen unter elastischen Randbedingungen – Virtuelle Werkzeugeinarbeitung. EFB-Forschungsbericht Nr. 264. Hannover 2007
- [8] Großmann, K.; Wiemer, H.; Hardtmann, A.: Entwicklung und Bewertung von Simulationstechnologien für die Blechumformung unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Maschine/Werkzeug und Prozess/Werkstück. laufendes Vorhaben der DFG im SPP 1180

- [9] Roll, K.; Wiegand, K.:
Eine Möglichkeit zur Berücksichtigung der Werkzeugelastizität bei der Blechumformsimulation. in Band „Neuere Entwicklungen in der Blechumformung“ MAT-INFO, Werkstoff-Informationsgesell., Frankfurt (Main) 2006
- [10] Deutsche Normschrift DIN 55189:
Ermittlung von Kennwerten für Pressen der Blechverarbeitung bei statischer Belastung. Beuth Verlag Berlin 1988
- [11] VDI-Richtlinie VDI 3145:
Pressen zum Kaltmassivumformen. Blatt 1: Mechanische und hydraulische Pressen. VDI-Verlag Düsseldorf 1985
- [12] Großmann, K.; Hardtmann, A.; Wiemer, H.:
Simulation des Blechumformprozesses unter Berücksichtigung des statischen Verhaltens der Pressmaschine. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 101 (2006) H. 10, S. 600-605
- [13] Großmann, K.; Wiemer, H.; Hardtmann, A.; Penter, L.:
Berücksichtigung (quasi)statischer Einflüsse von Maschine und Werkzeug in der FEM-Simulation des Blechumformprozesses. Tagungsband. 13. Sächsische Fachtagung Umformtechnik, Chemnitz 2006
- [14] Großmann, K.; Wiemer, H.; Hardtmann, A.; Penter, L.:
Faster to Sound Parts by Advanced Forming Process Simulation - Advanced Forming Process Model Including the Elastic Effects of the Forming Press and Tool. Steel research international 78, 2007 No. 10-11 p. 825-830, Verlag Stahleisen GmbH Düsseldorf, 2007
- [15] Pahl, K.-J.:
Elastische Wechselwirkungen im Ziehapparat einfach wirkender Pressen. VDI Verlag, Düsseldorf 1994
- [16] Thoms, V.; Schatz, M.: Regelungen des Werkstoffflusses in Niederhaltersystemen von Zieh- und Nachformwerkzeugen durch Piezo-Aktoren. laufendes EFB-Forschungsprojekt AIF14443BR
- [17] Penter, L.; Wiemer H.; Schatz, M.:
Erweiterte Prozesssimulation unterstützt Inbetriebnahme eines Ziehwerkzeuges. MM Maschinenmarkt. Das IndustrieMagazin 38 (2007) S. 30-33

Modellbildung zur Berücksichtigung des Maschineneinflusses in der numerischen Simulation von Umformprozessen mittels gekoppelter Simulation

Prof. Dr.-Ing. B.-A. Behrens
Dipl.-Ing. M. Ahrens
Dipl.-Ing. F. Dietrich
Dipl.-Ing. J. Poelmeyer

Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen
Leibniz Universität Hannover

MODELLBILDUNG ZUR BERÜCKSICHTIGUNG DES MASCHINENEINFLUSSES IN DER NUMERISCHEN SIMULATION VON UMFORMPROZESSEN MITTELS GEKOPPLETER SIMULATION

Prof. Dr.-Ing. B.-A. Behrens, Dipl.-Ing. M. Ahrens, Dipl.-Ing. F. Dietrich, Dipl.-Ing. J. Poelmeyer

Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM)
Leibniz Universität Hannover
An der Universität 2, 30823 Garbsen

1 Abstrakt

Bei numerischen Untersuchungen von Umformprozessen wie dem Prägen oder dem Tiefziehen wird heutzutage der Einfluss der Eigenschaften der Umformmaschine im Allgemeinen nicht in die Prozesssimulation einbezogen. Insbesondere die Berücksichtigung der Verlagerungen und der Vorformungen der Maschine genauso wie die Wechselwirkungen zwischen der Umformmaschine und dem Umformprozess ist wesentlich. In dieser Veröffentlichung wird ein Ansatz für eine erweiterte Umformprozesssimulation mit Hilfe der Finite-Element-Methode in Kombination mit den Maschineneigenschaften vorgestellt. Hierfür wurde eine kombinierte Simulation entwickelt, um die gegenseitigen Einflüsse zwischen der Prozesssimulation (zeitabhängiger Verlauf der Stößelkraft) und der Maschinensimulation (zeitabhängiger Verlauf der Stößelbewegung) zu berücksichtigen. Zur Verifikation der berechneten Ergebnisse sind Umformversuche mit einem mehrstufigen Werkzeug erfolgt. Durch diese Vorgehensweise konnte die Ergebnisgenauigkeit der Prozesssimulation ohne einen wesentlich erhöhten Berechnungsaufwand verbessert werden

2 Einleitung

Beim ersten Einsatz neuer Werkzeuge mit mehreren Umformstufen werden auch heutzutage nicht sofort Bauteile mit einer ausreichenden Qualität produziert. Ein Grund hierfür ist die Abweichung der Ergebnisse der vorausgehenden Prozesssimulation mit Hilfe der Finite-Element-Methode von den realen Gegebenheiten bei der Werkzeugprüfung. Neben den lokalen Einflüssen auf den Prozess (z. B. Befettung, Schwankungen der Materialeigenschaften) werden die Wechselwirkungen zwischen der Maschine und dem Umformprozess in der Prozesssimulation bislang nicht berücksichtigt. In dieser Veröffentlichung wird ein Ansatz für die Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit von Umformprozesssimulationen mit Hilfe der Finite-Element-Methode (FEM) durch die Berücksichtigung des Verformungs- und Verlagerungsverhaltens der Umformmaschine vorgestellt. Um dies zu erreichen, werden Einflüsse wie z.B. Stößelkipfung, Auffederung, Tisch- und Stößeldurchbiegung experimentell untersucht. Basierend auf den ermittelten Daten wurde ein mathematisches Modell entwickelt, das die charakteristischen Presseneigenschaften abbildet. Das Maschinenmodell, das in einer Matlab[®]-Umgebung entwickelt wurde, wird mit einer Prozesssimulation, die mit dem Software-System Abaqus[®] durchgeführt wird, kombiniert (siehe Bild 1).

Durch die Anwendung geeigneter Messmethoden und Verfahren werden die Wechselwirkungen zwischen dem umformtechnischen Prozess und der verwendeten Maschine experimentell ermittelt. Auf Grundlage dieser Untersuchungen wird das Maschinenmodell parametrisiert und verifiziert. Durch die Kopplung bzw. Kombination kann in der Prozesssimulation die Interaktion von Prozess und Maschineneigenschaften berücksichtigt werden. Am Beispiel eines Tiefziehprozesses werden in diesen Ausführungen Ergebnisse einer gekoppelten Simulation beschrieben. In weiterführenden Arbeiten werden in gleicher Weise Simulationen eines mehrstufigen Blechumformprozess durchgeführt.

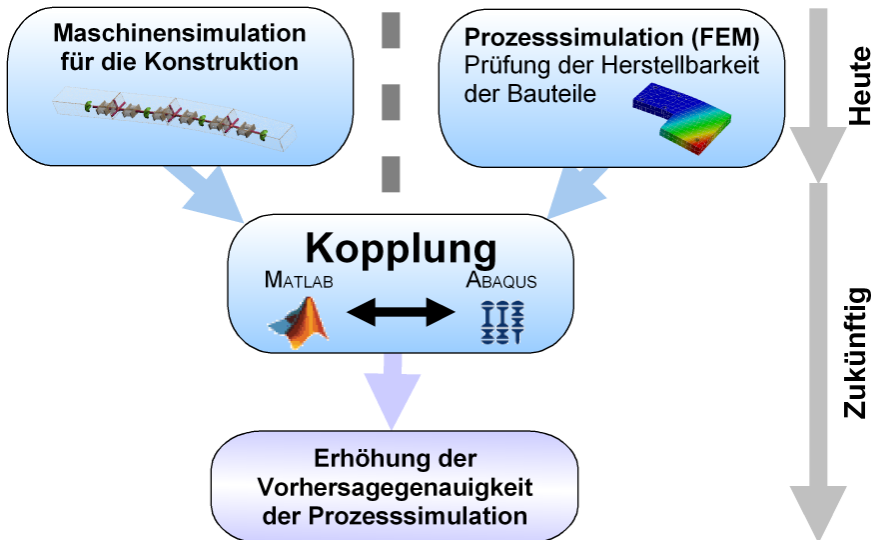


Bild 1: Erhöhung der Simulationsgenauigkeit durch die Kopplung der Maschinen- und der Prozesssimulation

3 Ergebnisse der kombinierten Simulation für einen einstufigen Umformprozesses

Für jede Umformstufe wurde ein numerisches Modell erstellt. Die hier vorgestellten Ergebnisse handeln überwiegend von der betrachteten Tiefziehstufe. Der Maschineneinfluss wird in die Prozesssimulation mit Hilfe eines Kreislauf, wie er in Bild 2 gezeigt ist, eingebettet. In einem ersten Schritt wurden konventionelle FEM-Simulationen der drei geplanten und konzipierten Umformstufen Tiefziehen, Nachformen und Prägen durchgeführt. Die Umformmaschine wurde hierbei als ideal steif angesehen und kinematischen Startparameter angenommen (Bild 3).

Aufbau der gekoppelten Simulation

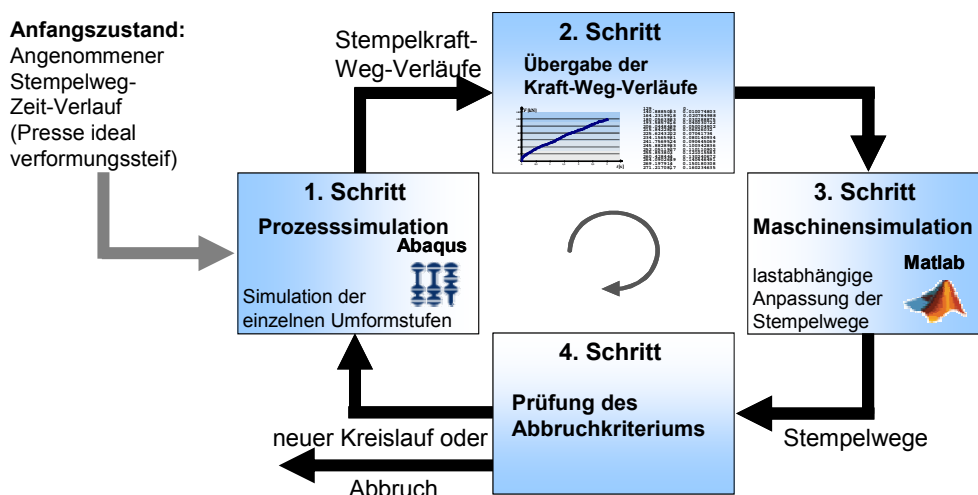


Bild 2: Kombinierte Simulation

Der dargestellte Kreislauf (Bild 2) beinhaltet vier verschiedene Schritte, die jeweils nacheinander abgearbeitet werden. Im ersten Schritt wird eine Umformsimulation durchgeführt. Zunächst wird der theoretische Stempelweg, der für die gewünschte Bauteiltiefe benötigt wird, vorgegeben. Die Berechnung liefert als ein Ergebnis den maximalen Kraftbedarf am Ende der Umformung. Die Stempelkraft-Weg-Verläufe werden im zweiten Schritt vom binären Ergebnisdatenformat in ein ASCII Format umgewandelt und an die Maschinensimulation übergeben. Im dritten Schritt wird mit Hilfe der Maschinensimulation die Stößelverlagerung aufgrund der Umformkraft berechnet. Mit dem in Matlab[®] modellierten analytischen Ansatz werden die zeitabhängigen Stößelweg lastabhängig angepasst und in eine erneute Prozesssimulation eines neuen Kreislaufs implementiert [2,3,4,6]. In einem vorgeschalteten Schritt wird der neu berechnete Stößelweg mit dem zuvor verwendeten Stößelweg verglichen. Mit Hilfe eines Abbruchkriteriums wird entschieden, ob ein neuer Berechnungskreislauf gestartet wird. Die einzelnen Schritte der gekoppelten Simulation werden automatisiert abgearbeitet bzw. gestartet.

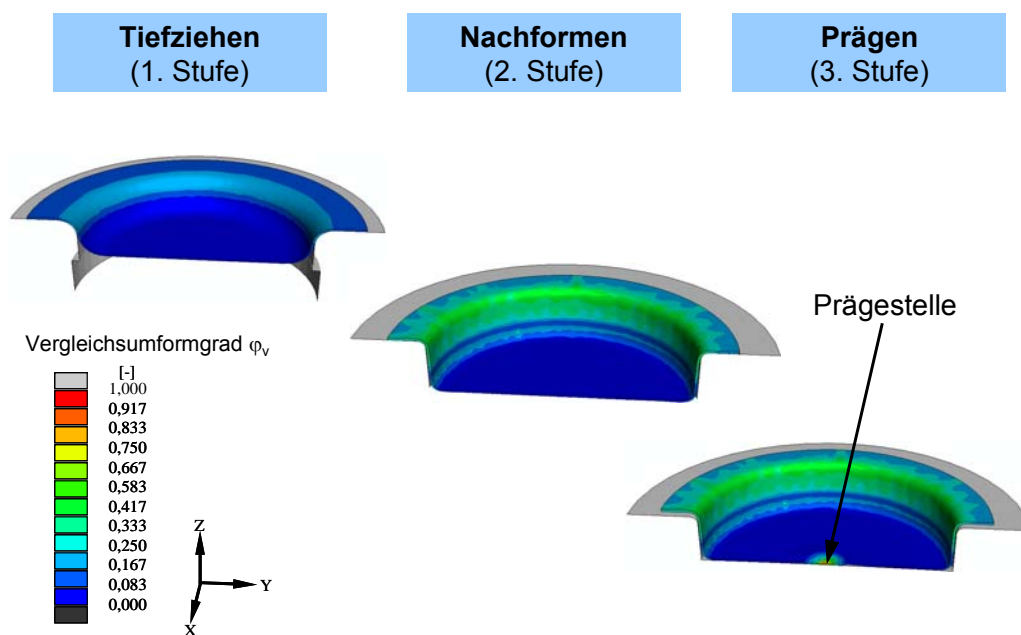


Bild 3: Ergebnisse der konventionellen Prozesssimulation

Bei der Durchführung des neuen Simulationskreislaufs mit dem korrigierten Stößelweg folgt aus der Prozesssimulation eine neu errechnete maximale Umformkraft. Diese Kraft wird wiederum an die Maschinensimulation übergeben, in der ein neuer lastabhängiger Umformweg berechnet wird. Der beschriebene Kreislauf wird solange durchgeführt, bis das Abbruchkriterium erfüllt ist.

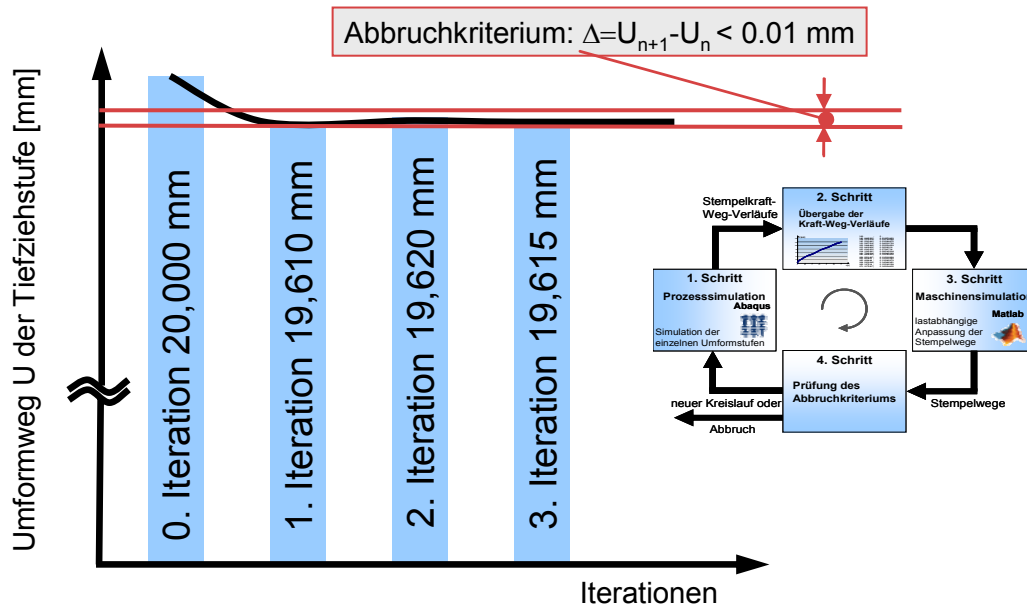


Bild 4: Ergebnisse der kombinierten Simulation

Durch diese Vorgehensweise können die Wechselwirkungen zwischen dem Prozess und der Umformmaschine in der Prozesssimulation berücksichtigt werden. In Bild 4 sind die berechneten Stempelwege, die mit der Maschinensimulation berechnet und in die Prozesssimulation implementiert wurden, dargestellt. Es ist offensichtlich, dass der Stempelweg sich einem Grenzwert annähert. Nach vier Durchläufen der gekoppelten Simulation wurde der Kreislauf gestoppt, da die Differenz zwischen dem aktuell berechneten Stempelweg und dem zuvor verwendeten Stempelweg kleiner als das Abbruchkriterium von 0,01 mm war [1,5].

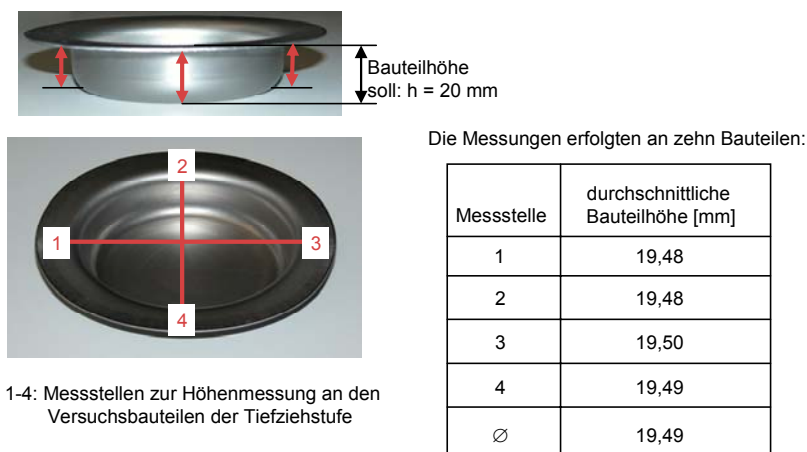


Bild 5: Experimentell ermittelte Bauteiltiefen bzw. Stempelwege

Um die berechneten Ergebnisse zu verifizieren, wurden experimentell ermittelte Bauteilhöhen mit den berechneten Ergebnissen verglichen. Wie in Bild 5 zu sehen, beträgt die durchschnittliche

Bauteilhöhe 19,49 mm. Die gezeigten Ausführungen zeigen eine Verbesserung der Berechnungsgenauigkeit der Prozesssimulation durch die Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen dem Umformprozess und der Maschine. Die Abweichung der gemessenen Bauteilhöhe und der berechneten Höhe mit Hilfe der kombinierten Simulation ist kleiner als 0,13 mm.

3 Danksagung

Diese Veröffentlichung resultiert aus einem durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) unterstützten Forschungsprojekt im Schwerpunktprogramm 1180 „Prognose und Beeinflussung der Wechselwirkungen von Strukturen und Prozessen“.

4 Referenzen

4.1 Tagungsbandbeiträge von Konferenz

- [1] Behrens, B.-A.; Ahrens, M., Poelmeyer, J.; Krimm, R.:
Consideration of interactions between the forming machine and the forming process in a coupled simulation. Conference „Forming the future“, International Deep Drawing Research Group (IDDRG), Győr, Hungary, 21-23. may 2007

4.2 Fachzeitschriften

- [2] Behrens, B.-A, Krimm, R.:
System zur Verkürzung des Rüstvorganges auf Transferpressen, EFB-research report, Hannover, 2004
- [3] Behrens, B.-A, Doege, E., Krimm, R.:
Shortening Tool Setting Time for Transfer Presses Journal of Engineering Manufacture, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B (Professional Engineering Publishing), Vol. 220, Nr. 4/2006 pp. 533-539
- [4] Behrens, B.-A, Krimm, R.:
Shortening the Tool Setting Time on Transfer Presses by Prediction of the Machines Deflection, WGP e.V. Annals of the German Academic Society for Production Engineering, Production Engineering Research and Development, Volume XII, Issue2, pages 191 - 196, 2005
- [5] Behrens, B.-A.; Ahrens, M., Poelmeyer, J:
Modellbildung zur Berücksichtigung des Maschineneinflusses in der numerischen Simulation von Umformprozessen. Berichte aus dem PZH. Jahresbericht 2006. Garbsen: PZH-Verlag, 2007

4.3 Dissertationen

- [6] Krimm, R.:
Berechnung der lastabhängigen Maschinenauffederung zur Verkürzung der Anlaufzeit neuer Transferwerkzeugsätze, Dissertation, Universität Hannover, 2006

Antriebs- und Prozessoptimierung hydraulischer Tiefziehpressen mit Hilfe der gekoppelten Simulation

Prof. Dr.-Ing. S. Helduser
Dipl.-Ing. H. Lohse

Institut für Fluidtechnik
TU Dresden

ANTRIEBS- UND PROZESSOPTIMIERUNG HYDRAULISCHER TIEFZIEHPRESSEN MIT HILFE DER GEKOPPELTEN SIMULATION

Dipl.-Ing. H. Lohse, Prof. Dr.-Ing. S. Helduser

1 Einleitung

1.1 Wissenschaftliche Problemstellung

Vorteile der Hydraulik wie die hohe Kraftdichte sowie die einfache Erzeugung von Linearbewegungen, verbunden mit einer guten Steuer- und Regelbarkeit, führten zur Anwendung in hydraulischen Tiefziehpressen [A1, N2]. Eine wirtschaftlichere Umformprozessgestaltung ist bei diesen Maschinen bezüglich der erreichbaren Hubzahlen und Umformgrade bei gleichzeitig guter Prozessstabilität heute jedoch nur begrenzt möglich. Kleinere Prozessfenster für die Herstellung von Gutteilen können mit Standardparametrierungen der Antriebsregelkreise nicht in befriedigendem Maße eingehalten werden. Deshalb wird entweder auf eine verbesserte Prozessführung verzichtet oder eine günstige Reglereinstellung experimentell ermittelt, was mit erheblichem Zeitaufwand und eingeschränkter Maschinenverfügbarkeit verbunden ist. Außerdem ist das Vorgehen nach der Trial-and-Error-Methode schlecht planbar und es können keine Aussagen zur Anwendbarkeit der ermittelten Reglerkennwerte außerhalb des Arbeitsbereichs, der während der Inbetriebnahme untersucht wurde, getroffen werden. Die Simulation gewann in der Anlagen- und Prozessuntersuchung in den letzten Jahren an Bedeutung. Trotzdem konnte sie sich in der Antriebsauslegung und Reglerparametrierung hydraulischer Tiefziehpressen noch nicht auf breiter Basis durchsetzen. Dies ist vor allem auf die Scheu der Unternehmen vor dem langen Prozess des Aufbaus von Erfahrungswissen zurückzuführen, bis schließlich ein effektiver Einsatz erfolgen kann, der gegenüber der bisherigen Vorgehensweise bessere Ergebnisse bzw. kürze Entwicklungszeiten mit sich bringt [D1].

1.2 Zielsetzung

Die Modellierung und Simulation hydraulischer Tiefziehpressen soll untersucht und beispielhaft durchgeführt werden. Als Erweiterung der bisherigen Praxis, den Umformprozess stark vereinfacht mittels Kennlinien im Modell zu integrieren, finden nun auch die Wechselwirkungen, die zwischen Maschine und Tiefziehvorgang auftreten, Berücksichtigung. Zu diesem Zweck wird eine gekoppelte Simulation von Maschine und Umformprozess angestrebt, wobei Letzterer, wie in der industriellen Praxis üblich, mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode abgebildet werden soll. Damit ergibt sich eine große Realitätsnähe, wodurch die Antriebsauslegung verstärkt an die „virtuelle Maschine“ verlagert und die Inbetriebnahme infolge einer Verkürzung der experimentellen Reglereinstellung beschleunigt werden kann. Zudem kann eine Verbesserung der Aussagefähigkeit der Umformsimulation infolge der Berücksichtigung von Maschineneinflüssen erfolgen.

Im Fokus dieses Beitrags stehen Arbeiten zur Modellierung und Simulation hydraulischer Tiefziehpressen. Außerdem wird eine Methodik vorgestellt, geeignete Reglerkennwerte unter Kenntnis der Maschinenstruktur und –kennwerte auf theoretischem Wege mit Hilfe der linearen Regelungstechnik abzuschätzen. Eine realitätsnahe Simulation würde auch die iterative Bestimmung optimaler Reglereinstellungen durch systematisches Ausprobieren erlauben. Ohne geeignete Starteinstellungen, die aus linearen Modellen gewonnen werden können, wäre jedoch der rechentechnische Aufwand um ein Vielfaches höher.

2 Modellbildung hydraulischer Tiefziehpressen

2.1 Maschinenmodell

Den Startpunkt der hier vorgestellten Methodik zur Modellbildung bildet eine Maschine, die durch Konstruktionsunterlagen, Schaltpläne und Messdaten beschrieben wird. Beispielhaft wird eine einfach wirkende Tiefziehpresse Wanzke GTA 250 mit einer Stößelnennkraft von 2500 kN genutzt. Die Modellbildung berücksichtigt nur die Umformphase. Effekte bzw. Komponenten, die darin keine relevanten Funktionen ausüben, können zur Verbesserung der Handhabbarkeit und zur Senkung des Rechenaufwands vernachlässigt werden. Zunächst wird die Maschine in Teilmodelle untergliedert. Für jedes werden Ersatzschaltbilder aufgestellt, die Systemgleichungen formuliert und die benötigten Parameter soweit wie möglich unter Verzicht auf Messungen bestimmt. Nur bei dieser Herangehensweise ist die Methodik später auch für Untersuchungen in der Projektierungsphase einer neuen Tiefziehpresse, in der noch keine Messdaten verfügbar sind, anwendbar. Darauf aufbauend können die Umsetzung in einer geeigneten Software, welche die Simulation mit diskret verteilten Parametern ermöglicht, und die Modellüberprüfung erfolgen.

Bei hydraulischen Tiefziehpressen ist die Einteilung in Teilmodelle für die Pressenmechanik, den Stößelantrieb, das Parallelhaltesystem und den Ziehkissenantrieb zweckmäßig. Im Anschluss an die Entwicklung der Teilmodelle werden diese zu einem Gesamtmodell der Maschine zusammengefügt. Durch Verknüpfung mit der getrennt vorbereiteten Umformsimulation kann eine Simulation der Maschine unter Einbeziehung der Wechselwirkungen mit dem Tiefziehprozess realisiert werden (s. Bild 1).

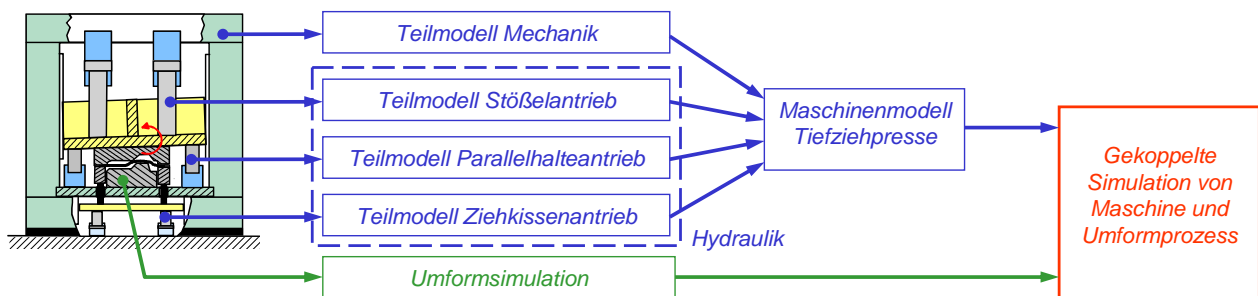


Bild 1: Schritte der Modellbildung hydraulischer Tiefziehpressen

Als erstes wird die Modellierung der Pressenmechanik als Basiselement jeder Tiefziehpresse vorgenommen. Wesentliche Effekte, die dabei berücksichtigt werden, sind die vertikale Bewegung des Stößels und des Ziehkisses sowie die Stößelkippen und die Auffederung des Kopfstückes der Presse unter Last. Die hydraulischen Antriebe verursachen genauso wie der Umformprozess Kräfte, die an der Pressenmechanik angreifen. Infolgedessen kann diese auch als Bindeglied der übrigen Teilmodelle angesehen werden.

Bei der Modellierung der hydraulischen Antriebstechnik muss sinnvoll entschieden werden, welche Bauteile wesentlich für die Funktion sind und Berücksichtigung finden sollten. Praktisch ausgeführte Anlagen enthalten eine Fülle von Komponenten für Sicherheits- und Hilfsfunktionen, deren Abbildung im Modell zwar möglich wäre, den Parametrierungs- und Rechenaufwand aber ohne Zugewinn an Aussagekraft übermäßig erhöhen würde. Beim Stößelantrieb hat sich die Verdrängersteuerung gegenüber der Ventilsteuerung wegen des Entfallens der prinzipbedingten Energieverluste durchsetzen können [L1, N2]. In der Beispielmachine kommt eine Pumpe mit hydraulisch-mechanischer Förderstromregelung zum Einsatz. Im Parallelhalte- und Ziehkissenantrieb wird die Volumenstromsteuerung nach wie vor meist über Ventile realisiert. Die Beispielmachine verfügt über ein passives Parallelhaltesystem mit jeweils einem Kurzhub-

Verdrängerzylinder in jeder Stößecke, welcher der Stößelbewegung entgegen wirkt. Bei Bedarf kann der abfließende Volumenstrom über Regelventile gedrosselt und so ein definierter Druck bzw. eine Gegenkraft zur Kippungskompensation erzeugt werden. Der Vorteil einer solchen Ausführung gegenüber einem aktiven Parallelhaltesystem, bei dem die Ausregelung der Kippung über die Stößelantriebszylinder erfolgt, sind die kürzeren Ölsäulen, die aufgrund der wesentlich höheren Eigenfrequenzen der Parallelhaltezyylinder eine bessere Dynamik ermöglichen [A1]. Die Funktionsweise des Ziehkissenantriebs entspricht der des Parallelhaltesystems. Das Druckmedium wird ebenfalls aus einem Verdrängerzylinder heraus gedrückt. Als Drosseleinrichtung kommt in der Beispielmaschine jedoch ein vorgesteuertes Druckbegrenzungsventil zum Einsatz.

2.2 Konzept einer gekoppelten Simulation

Zwischen Umformmaschine und –prozess treten in der Praxis Wechselwirkungen auf, die bei Berücksichtigung des Tiefziehvorgangs in der Maschinensimulation in Form von Kennlinien nicht detailgetreu nachgebildet werden können. Aus diesem Grund wird derzeit ein Konzept zur Ankopplung der Simulation des Tiefziehprozesses mittels FEM an das Maschinenmodell umgesetzt. Dieses sieht vor, dass zunächst die Maschinensimulation gestartet wird, welche dann einen Rechenschritt vereinbarter, fester Länge ausführt. Danach erfolgt eine automatische Unterbrechung, und es wird ein Vektor von Kopplungsgrößen an die Umformsimulation übertragen. Der Empfang des Datenpakets ist für diese das Startsignal, ebenfalls einen Rechenschritt gleicher Länge auszuführen, wobei die Kopplungsgrößen als Randbedingungen dienen. Danach werden ausgewählte Ausgangsgrößen wiederum an das Maschinenmodell gesendet und dort eingesetzt, worauf der nächste Rechenschritt folgt. Dieser Zyklus wird solange ausgeführt, bis eine Abbruchbedingung erreicht ist. Der Datenaustausch soll über eine TCP/IP-Schnittstelle erfolgen, über welche die zur Maschinensimulation verwendete Software standardmäßig verfügt [N1]. Das FEM-Programm für die Umformsimulation muss diesbezüglich noch angepasst werden.

3 Untersuchungen zur Maschinensteuerung

3.1 Motivation

Wie bereits einleitend erwähnt, erfolgt die Reglereinstellung an hydraulischen Tiefziehpressen in der bisherigen industriellen Praxis meist experimentell unter hohem Zeitaufwand, verbunden mit Nachteilen bezüglich Planbarkeit und Ergebnissicherheit. Die theoretische Reglerauslegung, die nun betrachtet werden soll, kann Zeitvorteile bringen, weil sie automatisierbar ist. Außerdem steht ein fester Algorithmus zur Verfügung. Damit lassen sich Aussagen über den kompletten Betriebsbereich einer Maschine treffen. Unsicherheiten ergeben sich hierbei infolge der begrenzten Modellgenauigkeiten. Für hydraulische Antriebe verwendet man meist lineare, ein- oder mehrschleifige Regelungskonzepte, die bei sehr hohen Anforderungen an Dynamik und Genauigkeit durch zusätzliche nichtlineare Reglerfunktionen, beispielsweise eine Betriebspunktadaption der Reglerkennwerte, ergänzt werden können.

3.2 Reglerauslegung auf Basis linearer Modelle

Als Grundlage dient das nichtlineare Modell des jeweiligen betrachteten hydraulischen Antriebs. Dieses wird zunächst linearisiert und vereinfacht. Daran schließt sich die Bestimmung der Modellparameter an. Nachdem die Regelstrecke nun vollständig beschrieben ist, kann die Verkopplung mit einer gewählten Reglerstruktur erfolgen. Für den so entstandenen geschlossenen

Regelkreis sind verschiedene Einstellregeln aus der Literatur bekannt, die auf den konkreten Antrieb angepasst werden müssen [B1, H1, M1]. Man gelangt damit zu einer Abschätzung geeigneter Reglerkennwerte auf Basis der linearen Regelungstechnik. Diese können später mit Hilfe einer iterativen Optimierung im nichtlinearen Gesamtmodell weiter verbessert und schließlich in der Maschine für die Ziehteilproduktion angewendet werden.

Die Hydraulik stellt besondere Anforderungen an die Reglerauslegung, weil starke Nichtlinearitäten vorhanden sind. Zum einen ist das dynamische Verhalten von Antriebszylindern eine Funktion des Zylinderhubs. Zum anderen besitzen die eingesetzten Ventile nichtlineare Durchflusskennlinien. Deshalb ist zunächst eine Linearisierung der Modelle hydraulischer Zylinderantriebe notwendig. Dies geschieht üblicherweise mittels Taylor-Reihenentwicklungen. Damit ist die Modellgültigkeit auf die nähere Umgebung des gewählten Arbeitspunkts beschränkt, was auch für daraus gewonnene Reglerkennwerte gilt.

Bei der Reglerauslegung auf Basis der linearen Regelungstechnik wurden im Wesentlichen zwei Einstellmethoden genutzt, das Verfahren nach Ziegler/Nichols sowie die Betrachtung der Pol- und Nullstellen. Für einschleifige P-, PI-, und PID-Regler sind die Empfehlungen nach Ziegler/Nichols vorteilhaft anzuwenden. Dabei wird die Reglerverstärkung des geschlossenen Kreises mit einem P-Regler solange erhöht, bis beim Erreichen der Stabilitätsgrenze ungedämpfte Schwingungen auftreten. Günstige Reglerkennwerte werden nun anhand der kritischen Reglerverstärkung und der zugehörigen Schwingungsdauer abgeleitet. Bei dieser Art der Einstellung handelt es sich eigentlich um ein schnelles experimentelles Verfahren. Man kann aber auch, wie im vorliegenden Fall, auf rechnerischem Wege anhand der Übertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises zur kritischen Reglerverstärkung und Periodendauer gelangen. Die Untersuchung der Pol- und Nullstellen des geregelten Systems ist im Gegensatz zum Verfahren nach Ziegler/Nichols universell für eine beliebige lineare Struktur anwendbar. Berechnet werden diese ebenfalls aus der Übertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises. Anhand ihrer Lage in der komplexen Zahlenebene sind Rückschlüsse auf das dynamische Systemverhalten möglich. Dementsprechend wird versucht, mit Hilfe geeigneter Reglerparameter eine günstige Positionierung zu erreichen. Der Beitrag zeigt dies beispielhaft für den Parallelhalteantrieb der Versuchsmaschine.

Als Ergebnis der Untersuchungen zur Maschinensteuerung wurde am Beispiel der Versuchspresse eine Methodik entwickelt und angewendet, wie man geeignete Kennwerte für verschiedene Reglerstrukturen abschätzen kann. Für den lagegeregelten Parallelhalteantrieb wurden einschleifige Regler sowie mehrschleifige Regelungskonzepte, die über zusätzliche Rückführungen von Zustandsgrößen verfügen, parametrisiert. Für den druckgeregelten Ziehkissenantrieb erfolgten ebenfalls Untersuchungen einschleifiger Konzepte. Dies umfasst auch den Test derart parametrisierter Reglerstrukturen am realitätsnahen nichtlinearen Maschinenmodell.

4 Zusammenfassung

Hydraulische Tiefziehpressen weisen eine hohe Flexibilität bezüglich der Anpassungsmöglichkeiten an verschiedene Umformaufgaben auf. Deshalb werden sie vor allem in der Werkzeugeinarbeitung sowie bei der Teilefertigung in kleinen und mittleren Losgrößen mit häufigem Werkzeugwechsel eingesetzt. Um diese Maschinen wirtschaftlich betreiben zu können, bestehen hohe Anforderungen an die Hubzahl und Prozessstabilität. Beides hängt unmittelbar von der Genauigkeit und Dynamik der hydraulischen Antriebe ab. Aus diesem Grund werden der Stößelantrieb und das Parallelhaltesystem üblicherweise lagegeregelt und der Ziehkissenantrieb druckgeregelt ausgeführt. Die Ermittlung günstiger Reglerkennwerte erfolgt bisher meist experimentell mit hohem Aufwand und Unsicherheiten. Darum wird eine theoretische

Reglerauslegung angestrebt, die bereits in der Projektierungsphase durchführbar ist und nur minimalen Testaufwand an der realen Tiefziehpresse erfordert. Diese kann auf der realitätsnahen Abbildung von Maschine und Umformprozess in der Simulation aufbauen, wobei geeignete Startwerte der Reglerparameter für eine Optimierung mit Hilfe der linearen Regelungstechnik und vereinfachter linearer Modelle abgeschätzt werden können. Daneben bietet der ganzheitliche Simulationsansatz aber auch die Möglichkeit, die Treffsicherheit von Machbarkeitsstudien für neue Ziehteile zu verbessern.

Die vorgestellten Arbeiten entstanden im Rahmen des Forschungsvorhabens „Antriebs- und Prozessoptimierung hydraulischer Tiefziehpressen mit Hilfe der gekoppelten Simulation“ (AiF 14485BG), das aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) gefördert wird.

5 Literatur

- [A1] Adolph, H.; Müller, M.:
Ein hydraulischer Stoßantrieb für den universellen Einsatz in einem Ausprobierzentrum der Blechumformung
10. Fachtagung Hydraulik und Pneumatik, Dresden, 5.-6.10.1995, S. 43-58
- [B1] Boes, C.:
Hydraulische Achsantriebe im digitalen Lageregelkreis
Dissertation, RWTH Aachen, 1995
- [D1] Doege, E.; Brandt, J.; Helduser, S.; Li, H.:
Antriebs- und Prozessoptimierung hydraulischer Pressen für Entwicklung und Inbetriebnahme
EFB-Forschungsbericht Nr. 170, Hannover, 2001
- [H1] Helduser, S.:
Arbeitsblätter zur Vorlesung Antriebstechnik/Aktorik
Institut für Fluidtechnik, TU Dresden, 2006
- [L1] Lodewyks, J.:
Primäre Verdrängersteuerung für hydraulische Pressen
Maschinenmarkt 101 (1995), Heft 40, S. 56-58
- [M1] Mann, H.; Schiffelgen, H.; Froriep, R.:
Einführung in die Regelungstechnik
7. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1997
- [N1] N.N.:
SimulationX User Manual
ITI GmbH, Dresden, 2006
- [N2] N.N.:
O+P-Gesprächsrunde: Hydraulik für Pressen und Umformmaschinen
O+P Ölhydraulik und Pneumatik 43 (1999), Heft 5, S. 356-372

Antriebs- und Prozessoptimierung hydraulischer Tiefziehpressen mit Hilfe der gekoppelten Simulation

H. Lohse, S. Helduser

Gliederung

- 1 Einleitung
- 2 Modellbildung hydraulischer Tiefziehpressen
- 3 Untersuchungen zur Maschinensteuerung
- 4 Ergebnisse
- 5 Zusammenfassung



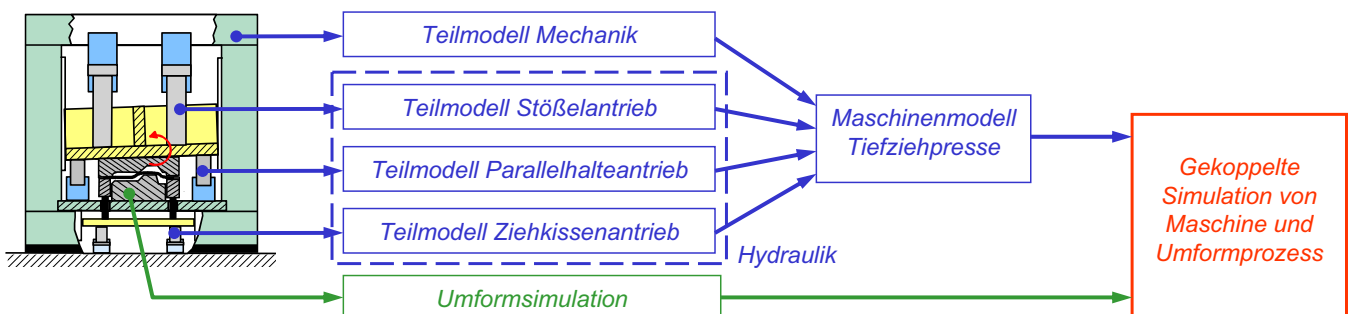
12. Dresdner WZM-Fachseminar 06.-07.12.2007

1 Einleitung

Wissenschaftliche Problemstellung

- Wirtschaftlichere Umformprozessgestaltung und höhere Prozessstabilität erfordern optimale Regelung der Antriebssysteme
- Reglerparametrierung bisher weitestgehend experimentell (hoher Aufwand) oder mittels einfacher Simulationsansätze (unsicher)

Zielsetzung



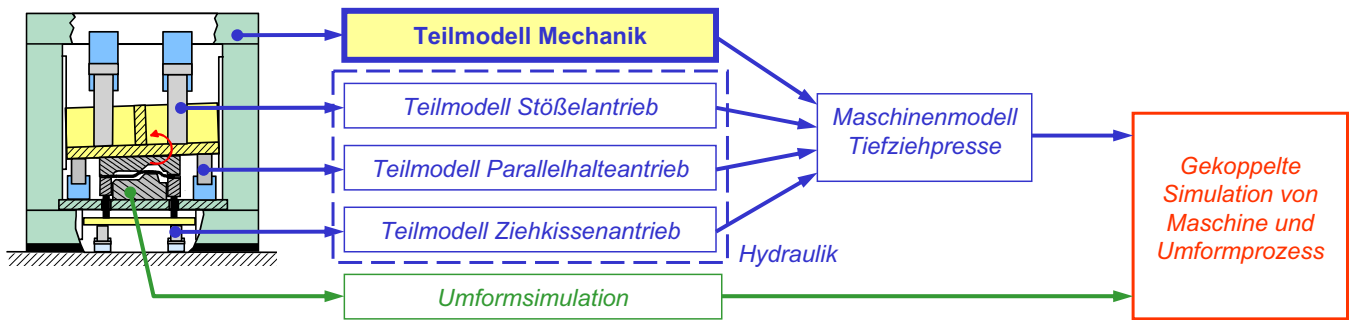
Hauptziel: realitätsnahe Abbildung von Umformmaschine und -prozess in der Simulation

- Ermittlung optimaler Parameter der Antriebsregler in der Projektierungsphase
- Zuverlässige Vorhersage über Machbarkeit von Teilen (virtueller Tiefziehprozess)

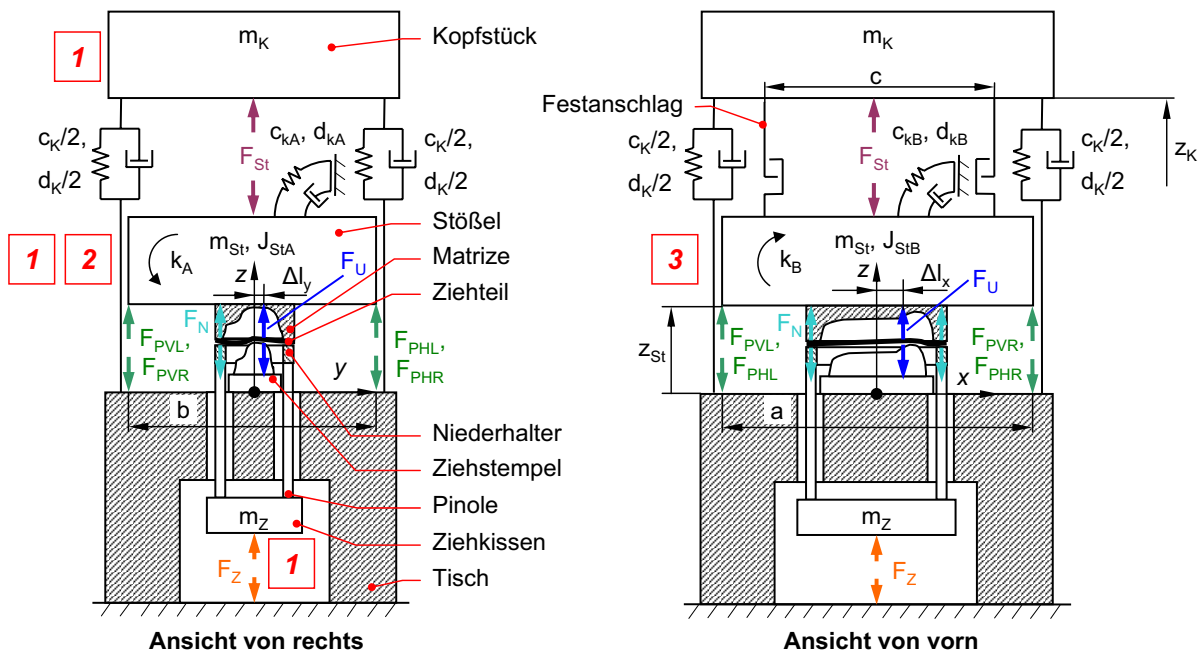
Schritte der Modellbildung



Versuchsmaschine Wanzke GTA 250



Pressenmechanik – Struktur und Systemgleichungen



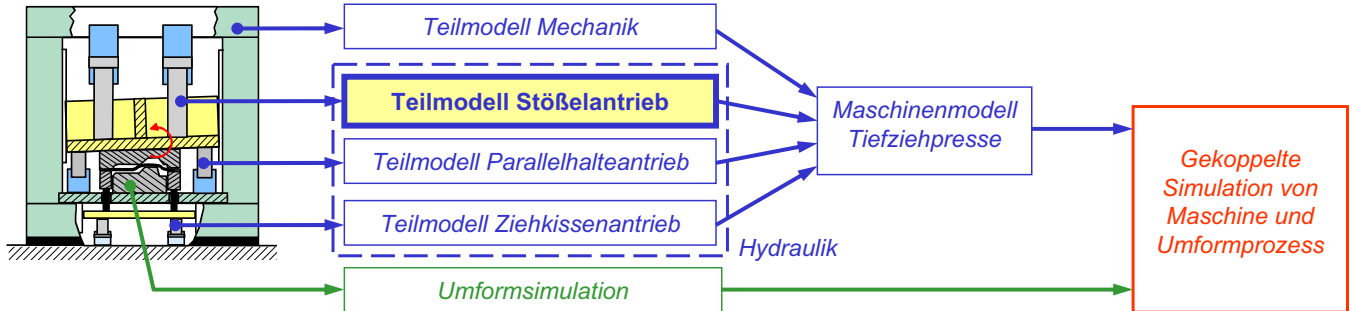
1 Vertikales Kräftegleichgewicht $\sum F_z = 0$

2 Momentengleichgewicht um x-Achse $\sum M_A = 0$

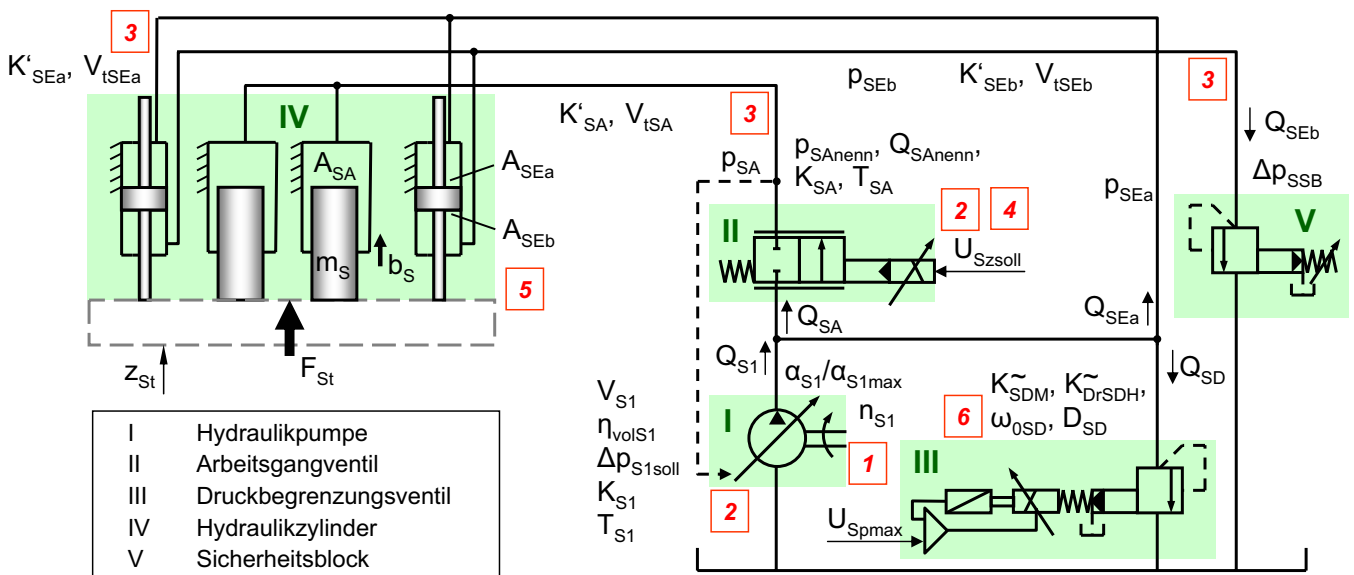
3 Momentengleichgewicht um y-Achse $\sum M_B = 0$

↑ Kraftkopplung mit Hydraulik und Umformprozess

Schritte der Modellbildung



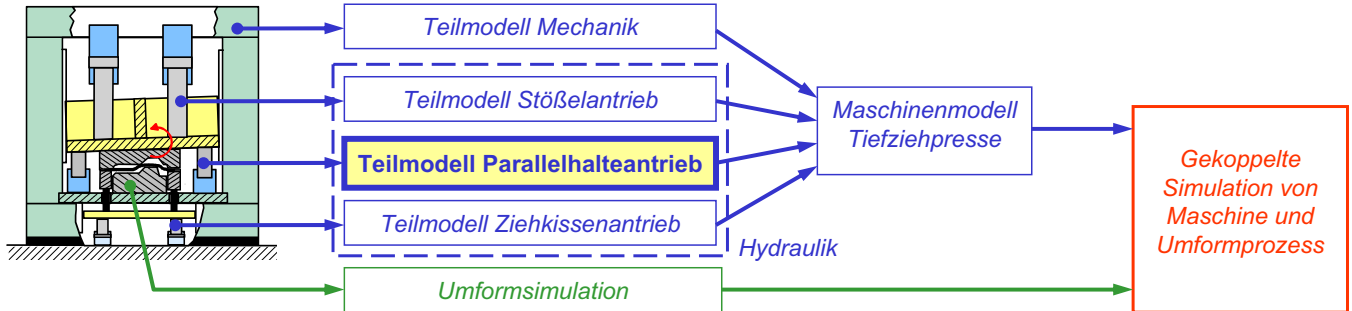
Stoßelantrieb – Struktur und Systemgleichungen



- I Hydraulikpumpe
- II Arbeitsgangventil
- III Druckbegrenzungsventil
- IV Hydraulikzylinder
- V Sicherheitsblock

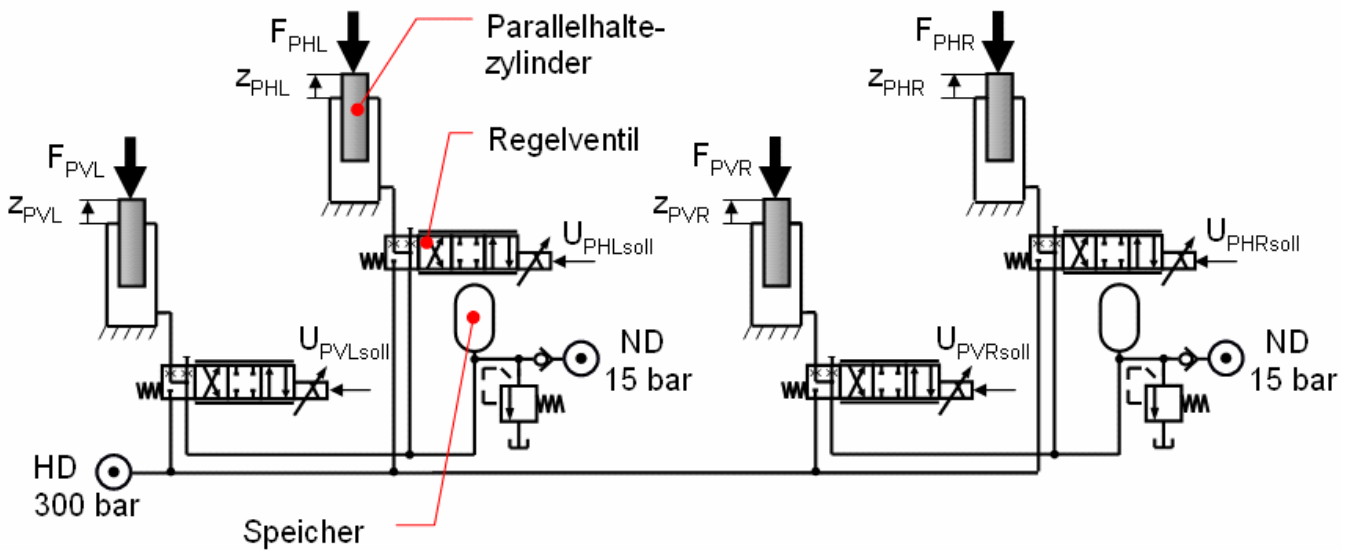
- 1** Förderstrom $Q_{S1} = n_{S1} V_{S1} \eta_{volS1} \alpha_{S1} / \alpha_{S1max}$
- 2** Stellodynamik $x_a(s) / x_e(s) = K_P / (T * s + 1)$
- 3** Druckaufbaugleichung $\dot{p} = K' / V * (Q_{zu} - Q_{ab} - A * \dot{x})$
- 4** Drosselgleichung $Q = K_{Dr} * A_{Dr} * \sqrt{\Delta p_{Dr}}$
- 5** Kräftegleichgewicht $\sum F = 0$
- 6** Druckventilmodell

Schritte der Modellbildung



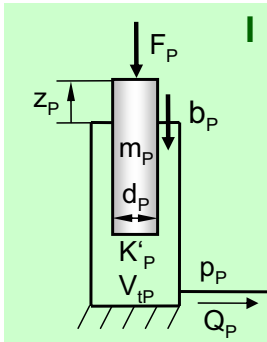
Parallelhalteantrieb – Struktur

V – vorn; H – hinten;
L – links; R – rechts



Parallelhalteantrieb – Systemgleichungen

Symmetrie → System nur teilweise dargestellt



I Parallelhaltezylinder

Kräftegleichgewicht:

$$m_P \ddot{z}_P = A_P p_P - b_P \dot{z}_P - F_P$$

Druckaufbaugleichung:

$$\dot{p}_P = \frac{K'_P}{V_{IP} + A_P z_P} (-Q_P - A_P \dot{z}_P)$$

II Regelventil

Schieberbewegung:

$$\frac{U_P}{U_{Psoll}} = \frac{K_{PV}}{\omega_{0PV}^2 s^2 + \frac{2D_{PV}}{\omega_{0PV}} s + 1}$$

Durchflussgleichung:

$$U_P \geq 0: Q_{P1} = 0$$

$$Q_P = Q_{PS} = Q_{PVnenn} \frac{U_P}{U_{Pmax}} \sqrt{\frac{p_P - p_{PS}}{p_{PVnenn}}}$$

$$U_P < 0: Q_{PSa} = 0$$

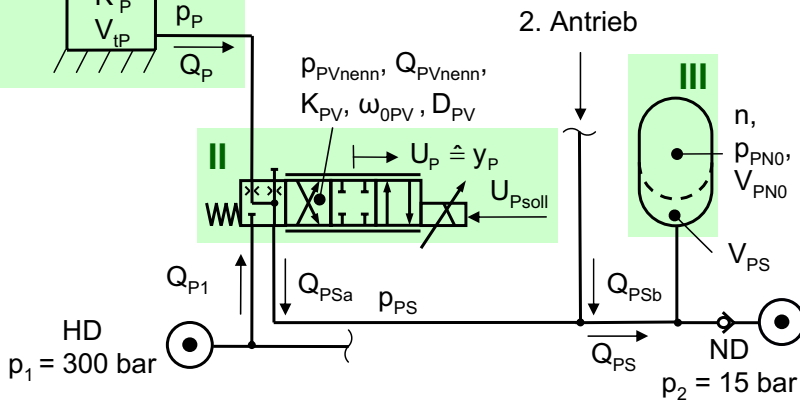
$$Q_P = -Q_{P1} = Q_{PVnenn} \frac{U_P}{U_{Pmax}} \sqrt{\frac{p_1 - p_P}{p_{PVnenn}}}$$

III Speicher

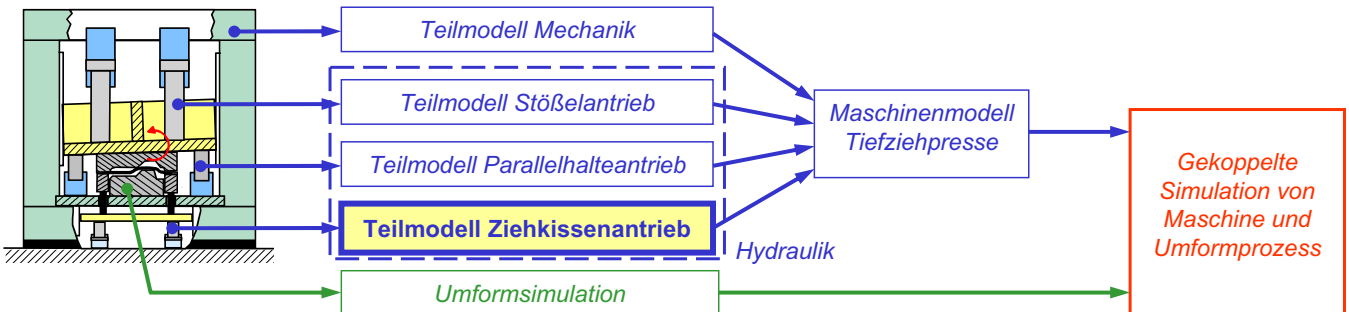
Änderung des Ölvolumens:

$$\Delta V_{PS} = V_{PN1} - V_{PN} = V_{PN0} \frac{p_{PN0}}{p_2} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_{PS}} \right)^{\frac{1}{n}} \right]$$

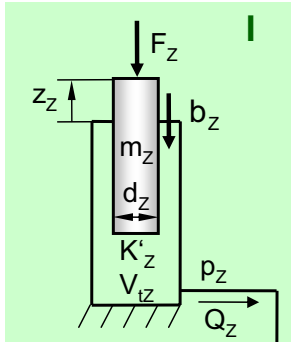
$$Q_{PS} = Q_{PSa} + Q_{PSb} = \Delta \dot{V}_{PS}$$



Schritte der Modellbildung



Ziehkissenantrieb – Struktur und Systemgleichungen



I Ziehkissenzylinder
(2 gleiche Zylinder zusammengefasst)

Kräftegleichgewicht:

$$m_z \ddot{z}_z = A_z p_z - b_z \dot{z}_z - F_z$$

Druckaufbaugleichung:

$$\dot{p}_z = \frac{K'_z}{V_{iz} + A_z z_z} (-Q_z - A_z \dot{z}_z)$$

II Druckbegrenzungsventil

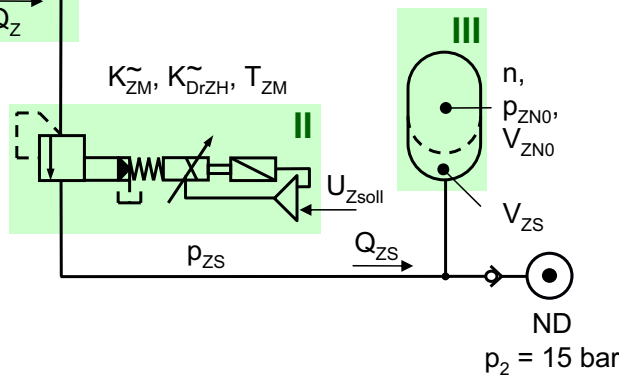
- Das Verhalten des Ventils prägt die Dynamik des Ziehkissenantriebs maßgeblich.
- Modellparametrierung: Datenblatt, Konstruktionsdaten

III Speicher

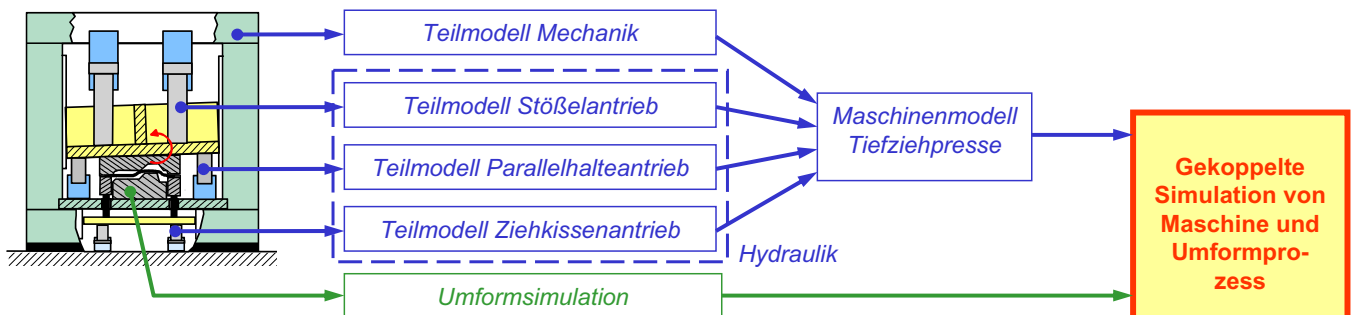
Änderung des Ölvolumens:

$$\Delta V_{zs} = V_{zN1} - V_{zN} = V_{zN0} \frac{p_{zN0}}{p_2} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_{zS}} \right)^{\frac{1}{n}} \right]$$

$$Q_{zS} = \Delta \dot{V}_{zS}$$



Schritte der Modellbildung

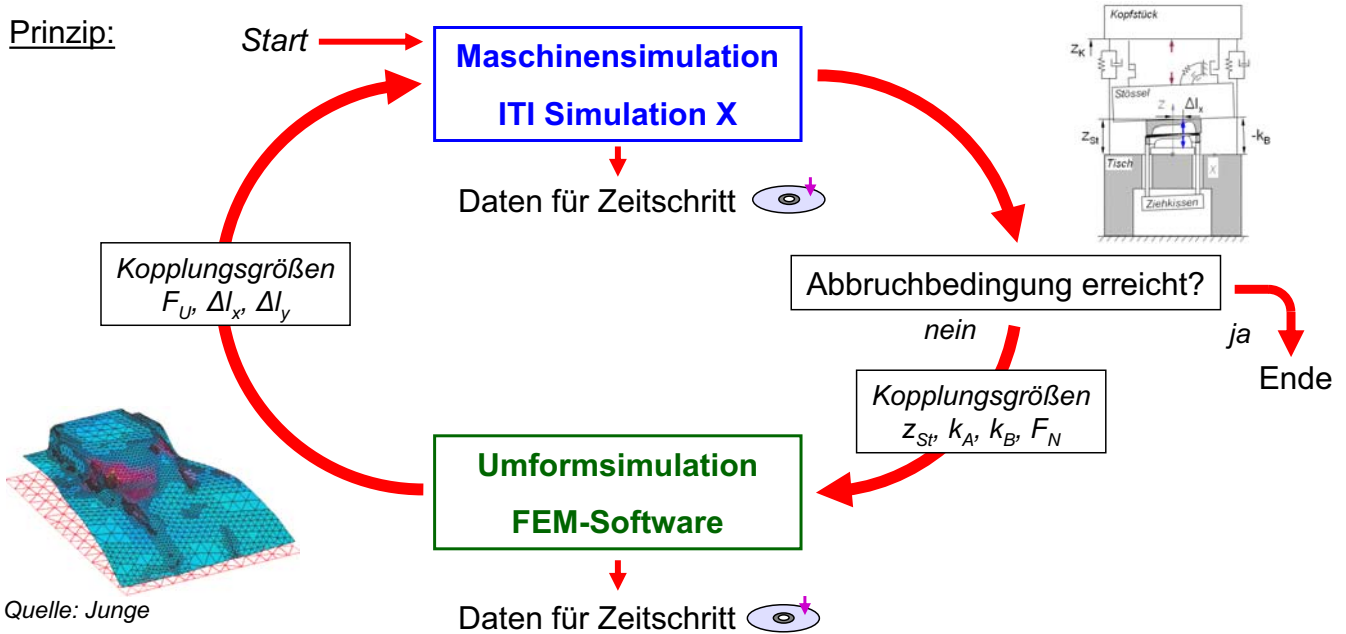


Konzept einer gekoppelten Simulation

Motivation:

Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Umformmaschine und –prozess

Prinzip:



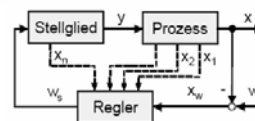
3 Untersuchungen zur Maschinensteuerung

Motivation für die theoretische Reglerauslegung

- Bisher: meist experimentelle Reglereinstellung
- Jetzt: theor. Reglereinstellung mit Mitteln der linearen Regelungstechnik und gekoppelten Simulation

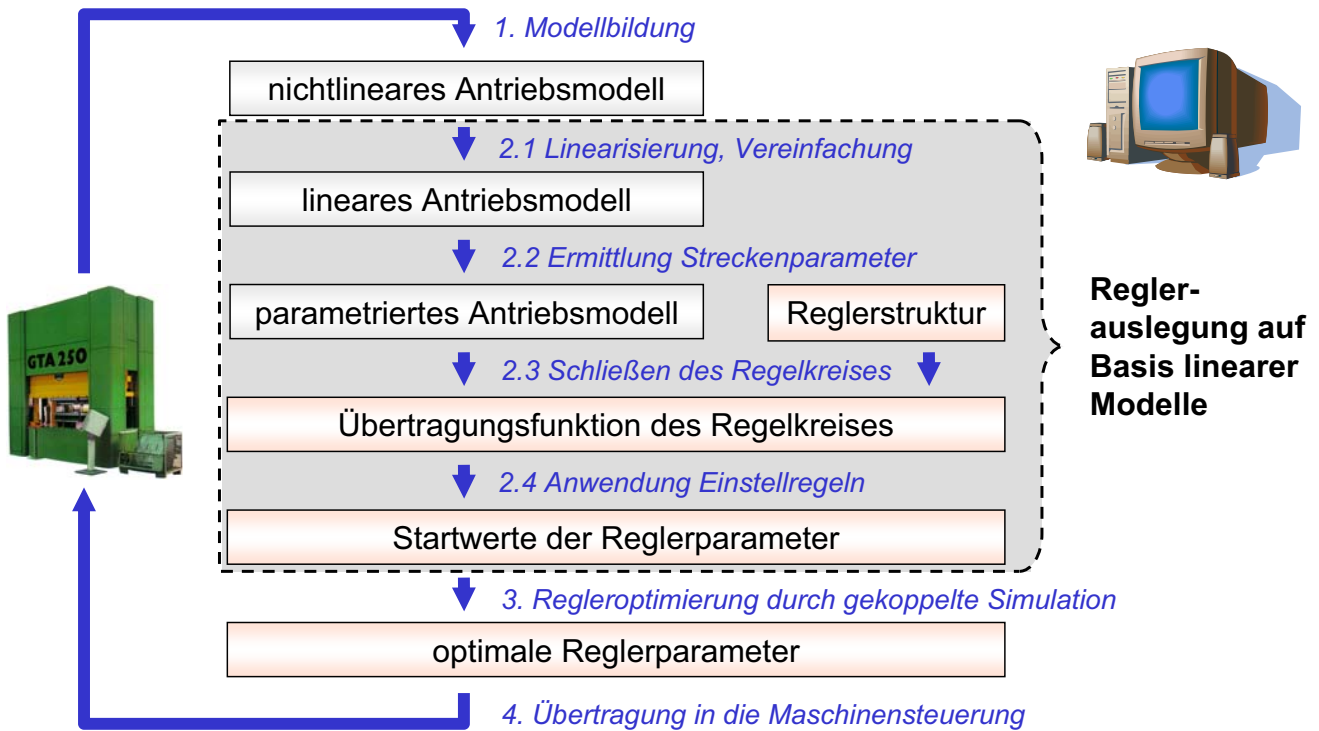
Reglereinstellung	experimentell	theoretisch
Zeitaufwand	hoch	geringer, weil automatisierbar
Planbarkeit	gering infolge Trial-and-Error-Methode	gut wegen festem Algorithmus
Ergebnissicherheit	nur für untersuchten Arbeitsbereich	begrenzt durch Modellgenauigkeit

	Einschleifige Regelung	Mehrschleifige Regelung	
		Regler + Hilfsgröße	Zustandsregelung
Lineare Grundkonzeption		 Hilfsregelgrößen bei elektropneum. Antrieben • Beschleunigung • Geschwindigkeit • Lastdruck • Weg des Stellgliedes	 • Anzahl n der proportionalen Regelschleifen entspricht der Ordnung n des Systems
Ergänzende nichtlineare Reglerfunktion (Auswahl)	<ul style="list-style-type: none"> • Schaltender Integrierer 	<ul style="list-style-type: none"> • Kennlinien Korrektur 	<ul style="list-style-type: none"> • Adaption der Reglerparameter an Betriebspunkt



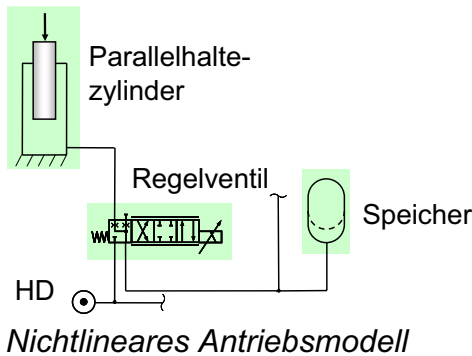
Regelungskonzepte für hydraulische Antriebe

Vorgehensweise bei der theoretischen Reglerauslegung



3 Untersuchungen zur Maschinensteuerung

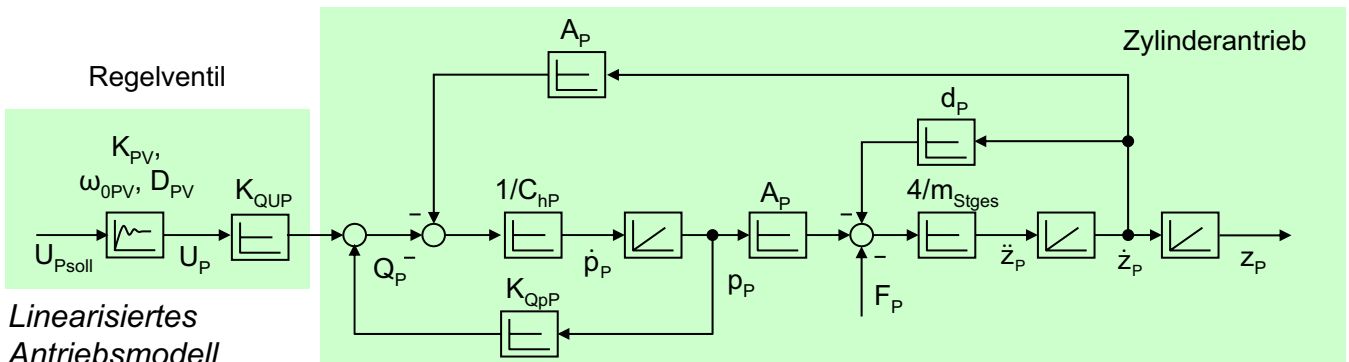
Linearisierung nichtlinearer Modellgleichungen und Vereinfachung



Nichtlineare Modellgleichung: $f(x_1, \dots, x_n)$

Linearisierung durch Taylor-Reihe:

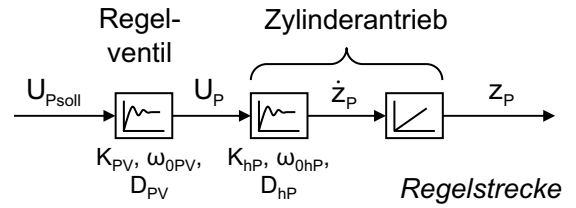
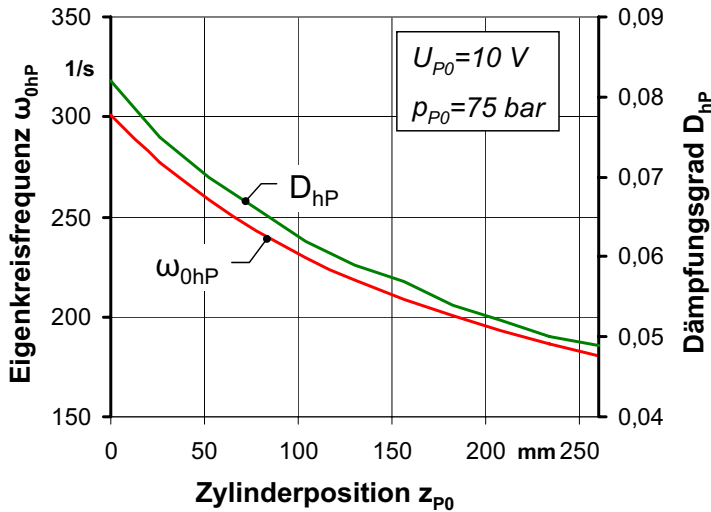
$$f_{Lin} = f_{AP} + \left. \frac{\partial f}{\partial x_1} \right|_{AP} (x_1 - x_{1AP}) + \dots + \left. \frac{\partial f}{\partial x_n} \right|_{AP} (x_n - x_{nAP})$$



Linearisiertes Antriebsmodell

Ermittlung der Streckenparameter im gesamten Betriebsbereich

- Parameter des Regelventils K_{PV} , ω_{0PV} , D_{PV} als konstant betrachtet
- Kennwerte des Zylinderantriebs stark arbeitspunktabhängig



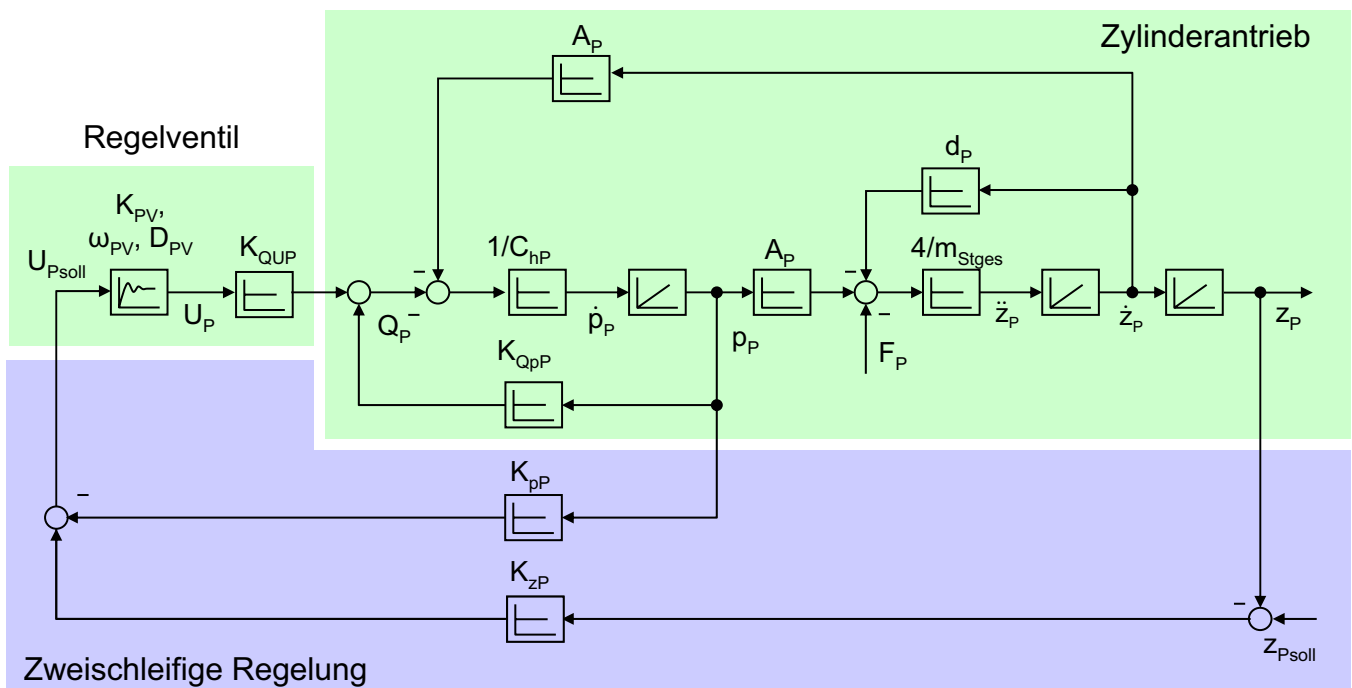
Verstärkung K_{hP} :
 $K_{hP} = f(U_{P0}, p_{P0})$

Eigenkreisfrequenz ω_{0hP} :
 $\omega_{0hP} = f(U_{P0}, z_{P0}, p_{P0})$

Dämpfungsgrad D_{hP} :
 $D_{hP} = f(U_{P0}, z_{P0}, p_{P0})$

→ Arbeitspunktabhängigkeit muss bei Reglerauslegung berücksichtigt werden

Schließen des Regelkreises



Zweischleifige Regelung

Anwendung von Einstellregeln – Reglereinstellung nach Ziegler / Nichols

- Für einschleifige P-, PI-, PID-Regler
- Regelkreis mit P-Regler an Stabilitätsgrenze bringen → kritische Reglerverstärkung K_{Pkrit}
→ Schwingungsdauer T_{krit}
- Übertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises mit P-Regler

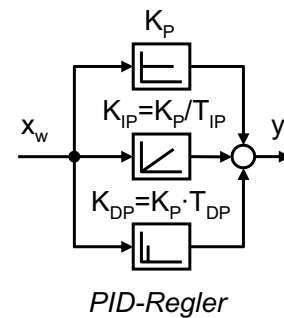
$$G_{Pw}(s) = \frac{z_p(s)}{z_{Psoll}(s)} = \frac{1}{\omega_{0hP}^2 \omega_{0pV}^2} s^5 + \left(\frac{2D_{hP}}{\omega_{0hP}^2 \omega_{0pV}^2} + \frac{2D_{pV}}{\omega_{0hP}^2 \omega_{0pV}^2} \right) s^4 + \left(\frac{1}{\omega_{0hP}^2} + \frac{4D_{hP}D_{pV}}{\omega_{0hP}\omega_{0pV}} + \frac{1}{\omega_{0pV}^2} \right) s^3 + \left(\frac{2D_{hP}}{\omega_{0hP}} + \frac{2D_{pV}}{\omega_{0pV}} \right) s^2 + s + K_{hP}K_{pV}K_P = 0$$

$s = j\omega_{krit} \quad T_{krit} = \frac{2\pi}{\omega_{krit}}$

\downarrow
 K_{Pkrit}, T_{krit}

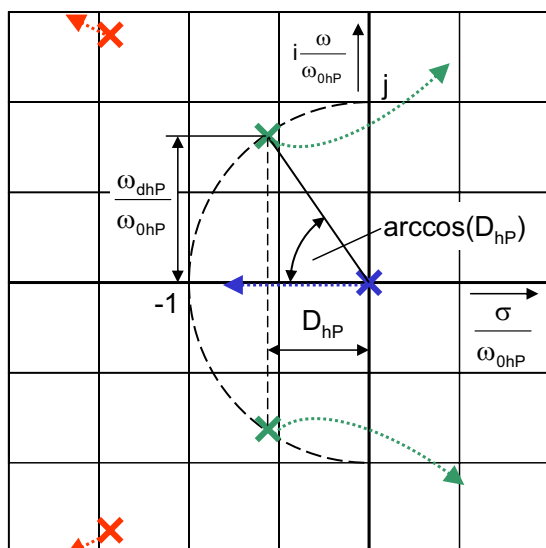
- Günstige Wahl der Reglerparameter

Regler	K_P	T_{IP}	T_{DP}
P	$0,5 \cdot K_{Pkrit}$	-	-
PI	$0,45 \cdot K_{Pkrit}$	$0,83 \cdot T_{krit}$	-
PID	$0,6 \cdot K_{Pkrit}$	$0,5 \cdot T_{krit}$	$0,125 \cdot T_{krit}$



Anwendung von Einstellregeln – Betrachtung von Pol- und Nullstellen

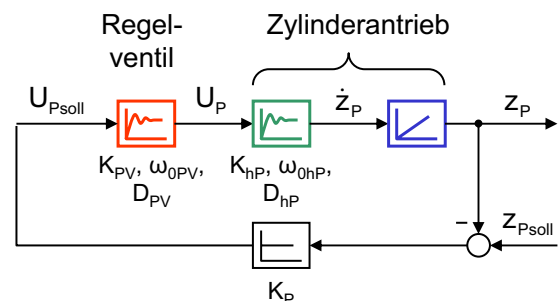
- Lage der Pol- und Nullstellen der Übertragungsfunktion charakterisiert Systemverhalten
- Universell einsetzbar



Wanderung der Polstellen für Regelkreis mit P-Regler bei Erhöhung von K_P (Wurzelortskurven)

$$G_{Pw}(s) = \frac{z_p(s)}{z_{Psoll}(s)} = \frac{Z(G_w(s))}{N(G_w(s))} \quad \text{Nullstellen: } Z(G_{Pw}(s)) = 0$$

$$\text{Polstellen: } N(G_{Pw}(s)) = 0$$



- × Streckenpolstellen
- ω_{0hP} Kennkreisfrequenz des Zylinderantriebs
- ω_{dhP} Eigenkreisfrequenz des Zylinderantriebs
- D_{hP} Dämpfung des Zylinderantriebs
- $s = \sigma + j\omega$ Laplace-Operator

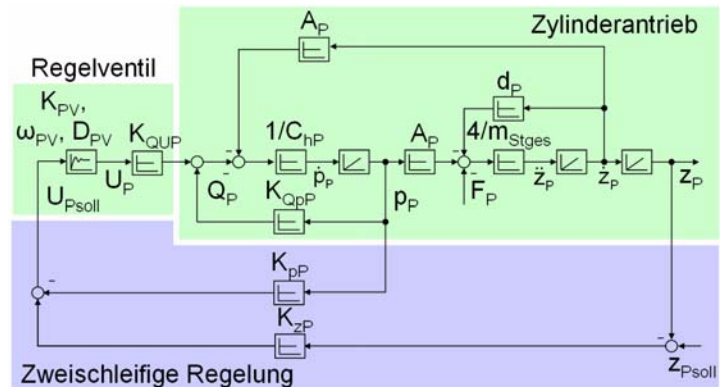
Anwendung von Einstellregeln – Polvorgabeverfahren

- Ermittlung der Übertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises
 - Nutzung Zustandsraummodell / Umformung Systemgleichungen

$$G_{Pw}(s) = \frac{z_P(s)}{z_{Psoll}(s)} = \frac{z_{OF}}{s^5 + s^4 \cdot n_4 + s^3 \cdot n_3 + s^2 \cdot n_2(K_{pP}) + s \cdot n_1 + n_0(K_{zP})}$$

Zählergrad 0 → keine Nullstellen

Nennergrad 5 → 5 Polstellen

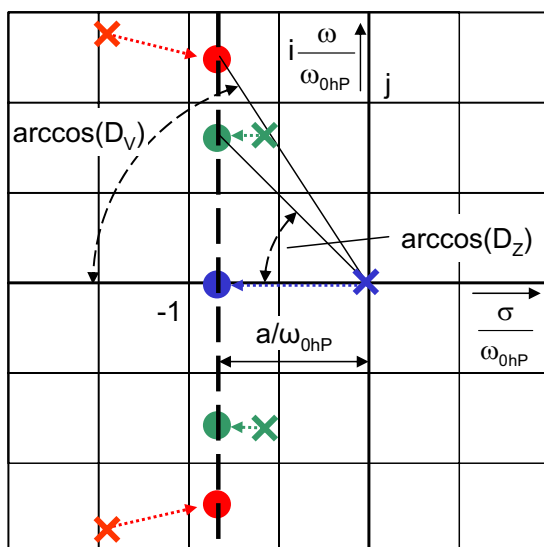


- Polvorgabe zur Erzeugung der gewünschten Eigendynamik des Systems

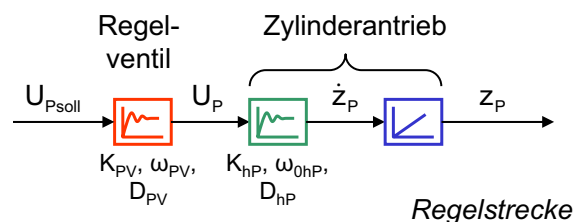
$$(s - s_1) \cdot (s - s_2) \cdot (s - s_3) \cdot (s - s_4) \cdot (s - s_5) = s^5 + s^4 \cdot n_4 + s^3 \cdot n_3 + s^2 \cdot n_2(K_{pP}) + s \cdot n_1 + n_0(K_{zP})$$

↑ **Polvorgabe s_1, s_2, s_3, s_4, s_5**
↓ **Reglerverstärkungen K_{pP}, K_{zP}**

Anwendung von Einstellregeln – Polvorgabeverfahren



Verschiebung der Polstellen für günstiges dynamischen Verhalten des geregelten Systems



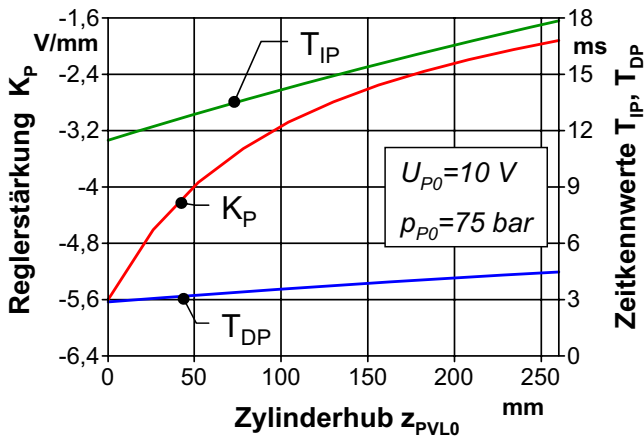
- × Streckenpolstellen
- Polstellen des geregelten Systems
- ω_{0hP} Kennkreisfrequenz des Zylinderantriebs
- a Polschwerpunkt
- D_V Dämpfung des Ventilpolpaars im RK
- D_Z Dämpfung des Zylinderantriebs im RK

Polvorgabe für günstiges dynamisches Verhalten:

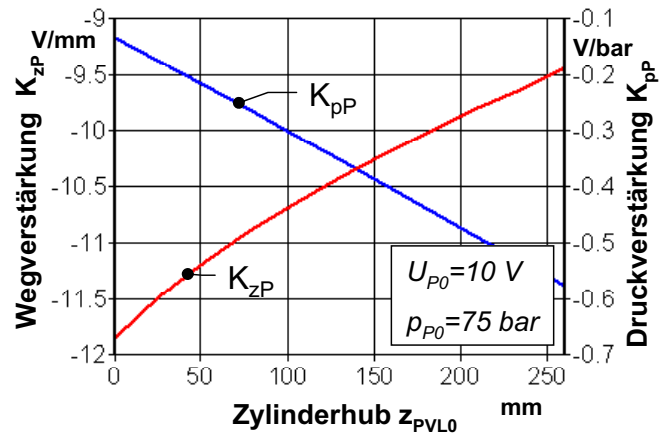
$$s_{1/2} = a \pm j \cdot a \cdot \sqrt{\frac{1}{D_V^2} - 1} \quad s_{3/4} = a \pm j \cdot a \cdot \sqrt{\frac{1}{D_Z^2} - 1}$$

$$s_5 = a$$

Günstige Reglerkennwerte für den Parallelhalteantrieb

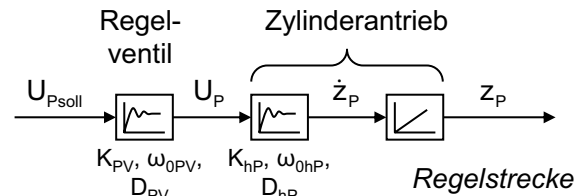


Einschleifige PID-Regelung (Ziegler/Nichols)

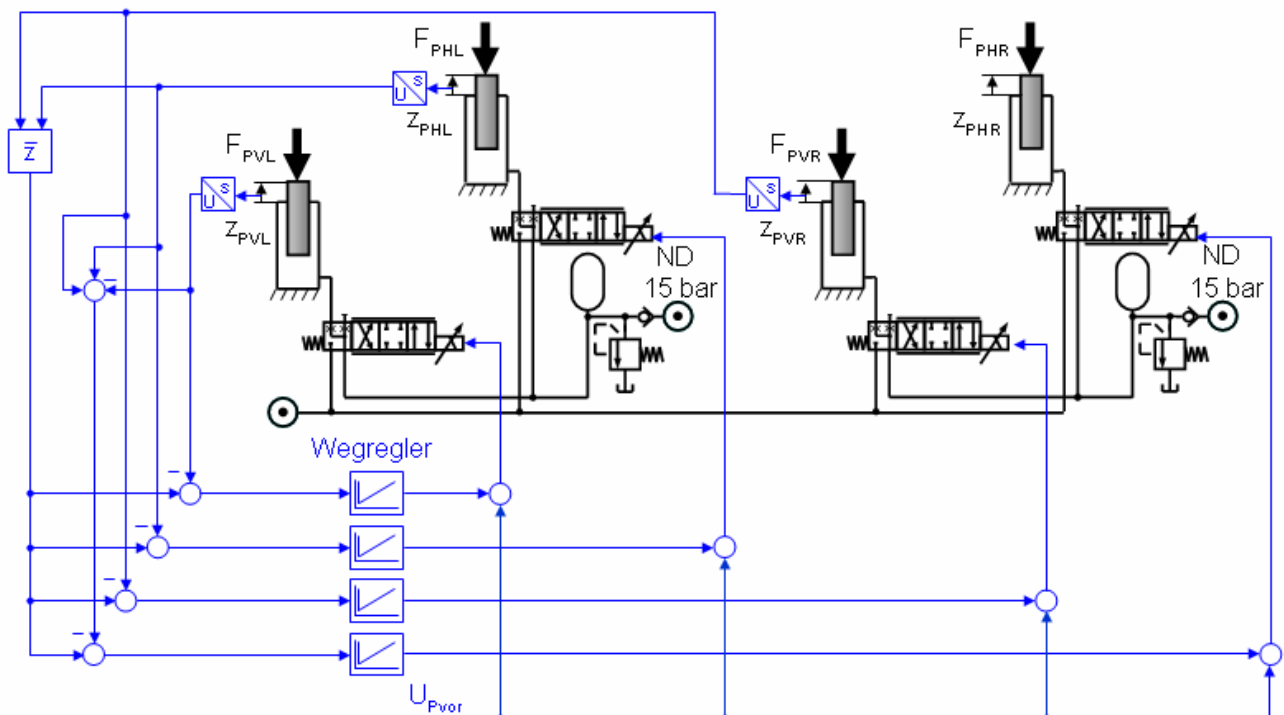


Zweischleifige Regelung (Polvorgabe)

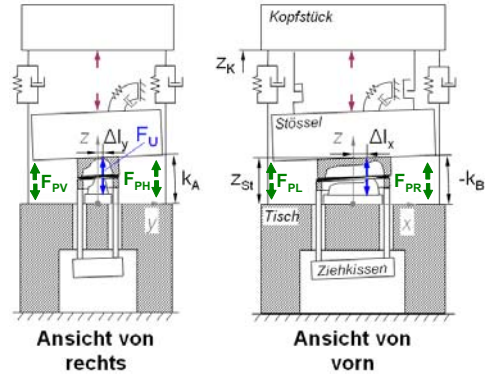
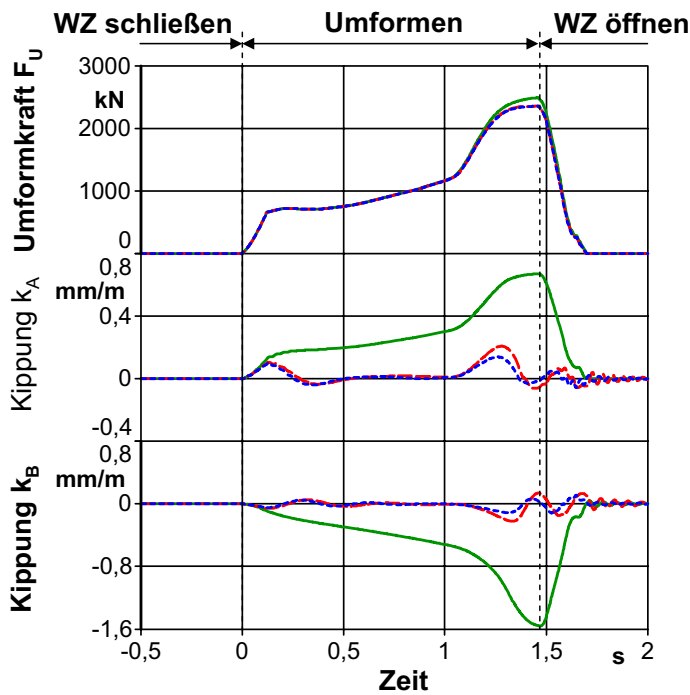
→ Arbeitspunktabhängigkeit zeigt sich in Reglerparametern deutlich, Adaption sinnvoll



Struktur des Parallelhalteantriebs bei einschleifiger PID-Regelung



Ergebnisse für den Parallelhalteantrieb bei einschleifiger PID-Regelung

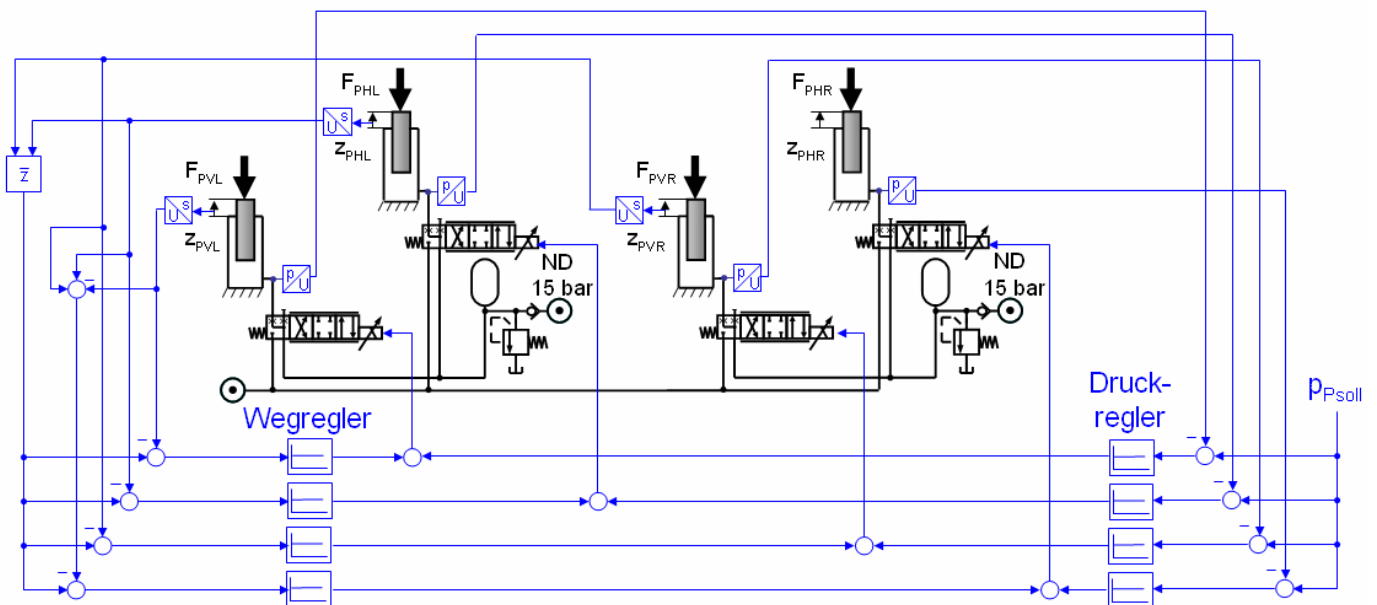


- Ungeregelt
- - - Reglerparameter konst.
- ⋯ Wegadaption der Reglerparameter

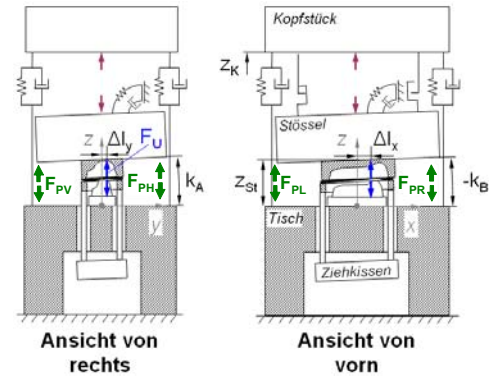
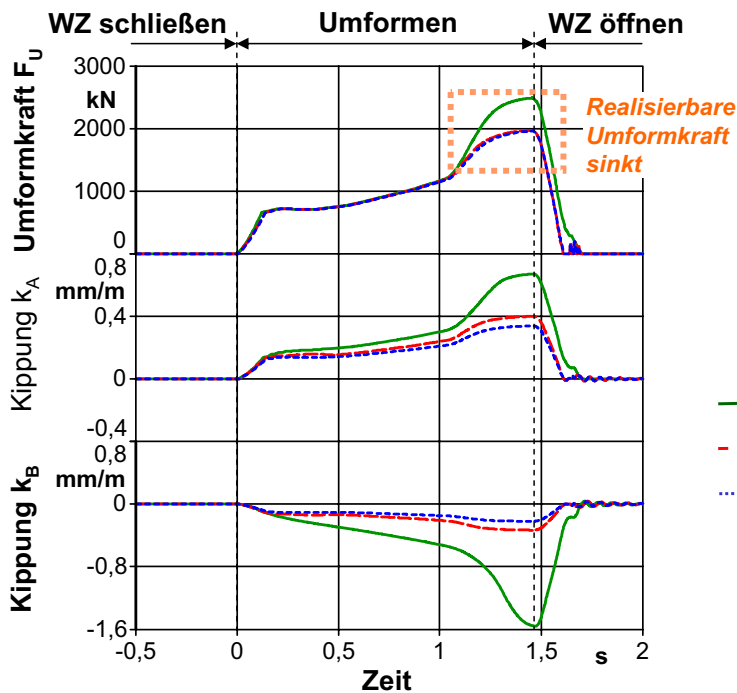
Nichtlineares Maschinenmodell
Arbeitsgeschwindigkeit 50 mm/s
Außer mittige Umformkraft
($\Delta l_x = 100 \text{ mm}$, $\Delta l_y = 28 \text{ mm}$)

→ Gute Eignung der PID-Regelung, Parameteradaption vorteilhaft

Struktur des Parallelhalteantriebs bei zweischleifiger Regelung



Ergebnisse für den Parallelhalteantrieb bei zweischleifiger Regelung



- Ungeregelt
- - - Reglerparameter konst.
- ⋯ Wegadaption der Reglerparameter

Nichtlineares Maschinenmodell

Arbeitsgeschwindigkeit 50 mm/s

*Außermittige Umformkraft
($\Delta l_x = 100 \text{ mm}$, $\Delta l_y = 28 \text{ mm}$)*

→ *Bleibende Regelabweichung, Stößelantrieb zusätzlich stark belastet*

5 Zusammenfassung

 • **Modellbildung hydraulischer Tiefziehpressen**

- Pressenmechanik
- Hydraulische Antriebe
- Konzept zur Simulationskopplung

 • **Untersuchungen zur Maschinensteuerung**

- Abschätzung günstiger Reglerparameter mit Hilfe der linearen Regelungstechnik

 • **Ausgewählte Ergebnisse**

- Auswirkungen des Parallelhalteausgleichs auf Stößelkipfung
- Effekte bei Druckregelung des Ziehkissenantriebs

Untersuchung der komplexen Wechselwirkungen beim elektromagnetischen Umformen rohrförmiger Werkstücke mittels gekoppelter Simulation

Prof. Dr.-Ing. A. E. Tekkaya
Dr.-Ing. A. Brosius
Dipl.-Ing. V. Psyk
Dipl.-Ing. K. Demir

Institut für Umformtechnik und Leichtbau
TU Dortmund

UNTERSUCHUNG DER KOMPLEXEN WECHSELWIRKUNGEN BEIM ELEKTROMAGNETISCHEN UMFORMEN ROHRFÖRMIGER WERKSTÜCKE MITTELS GEKOPPELTER SIMULATION

Prof. Dr.-Ing. A. E. Tekkaya, Dr.-Ing. A. Brosius, V. Psyk, K. Demir
Institut für Umformtechnik und Leichtbau, Technische Universität Dortmund

1 Motivation

Bei der elektromagnetischen Umformung handelt es sich um ein Hochgeschwindigkeitsumformverfahren, welches gegenüber konventionellen Fertigungsstrategien erhebliche Vorteile aufweisen kann. So lassen sich mithilfe dieser Technologie beispielsweise rohr- und hohlprofilförmige Halbzeuge aus unterschiedlichen Materialien durch umformtechnisches Fügen auf kraft-, form- oder stoffschlüssiger Basis zu Rahmenstrukturen verbinden [Meh01]. Aufgrund der berührungslosen Kraftereinleitung kann eine Umformung ohne Beschädigung beschichteter Oberflächen erreicht werden. Darüber hinaus ist aus der Literatur bekannt, dass die Umformung bei hohen Dehnraten für viele Werkstoffe ein verbessertes Formänderungsvermögen und damit eine direkte Erweiterung der Formgebungsgrenzen bewirkt [Bal94, Fyf79, Tho07].

Trotz der genannten Vorteile konnte sich das Verfahren jedoch bislang nicht in der industriellen Anwendung durchsetzen. Dies liegt sicherlich nicht zuletzt darin begründet, dass bislang kaum gesicherte Aussagen hinsichtlich der Auslegung und Lebensdauer der verwendeten Ausrüstung und insbesondere von Werkzeugspulen gemacht werden können. Ein wesentlicher Grund hierfür sind die komplexen Wechselwirkungen zwischen Prozess, Werkstück und Werkzeug, die sich unter anderem wegen des hochdynamischen Charakters des Verfahrens nur mithilfe numerischer Verfahren im Detail analysieren lassen. Eine Auslegung des Prozesses und der Ausrüstung erfordert jedoch eine genaue Kenntnis dieser Wechselwirkungen, insbesondere da sich zahlreiche Prozessparameter, wie z.B. der zeitliche Verlauf und die lokale Verteilung der aufgebrachten Kräfte oder die Umformgeschwindigkeit, nur indirekt über die Umformanlage bzw. die Werkzeugspule beeinflussen lassen [Psy04]. Mit dem Ziel, Schlussfolgerungen hinsichtlich der Werkzeugauslegung zu ziehen, sollen diese Wechselwirkungen im vorliegenden Beitrag charakterisiert werden.

2 Prozessanalyse der elektromagnetischen Rohrumformung

2.1 Verfahrensprinzip und Varianten

Bei der elektromagnetischen Umformung rohrförmiger Werkstücke wird die Energie eines impulsförmigen, starken Magnetfeldes genutzt, um innerhalb weniger Mikrosekunden radiale Kräfte auf ein Werkstück aus einem elektrisch gut leitfähigen Werkstoff auszuüben. Wie in *Bild 1* dargestellt, lässt sich dieses Prinzip in zwei unterschiedlichen Verfahrensvarianten nutzen, die sich im Wesentlichen durch die relative Anordnung von Werkzeugspule und Werkstück unterscheiden. Es handelt sich zum einen um die elektromagnetische Kompression, bei der das Werkstück im Inneren einer Zylinderspule angeordnet ist, und zum anderen um die elektromagnetische Expansion, bei der die Werkzeugspule im Inneren des Werkstückes positioniert wird.

In beiden Verfahrensvarianten bildet der Aufbau im Ersatzschaltbild einen seriellen Schwingkreis, bei dem die Umformanlage nach [Win73] durch den Kondensator C , den Innenwiderstand R_i und die innere Induktivität L_i symbolisiert wird und die Werkzeugspule mit dem rohrförmigen Werkstück als Last anzusehen ist. Durch die schlagartige Entladung des Kondensators beim Schließen des Hochstromschalters fließt ein gedämpfter, sinusförmiger Strom $I(t)$ durch die Werkzeugspule, sodass innerhalb weniger Mikrosekunden ein entsprechendes Magnetfeld $H(r,z,t)$ aufgebaut wird. Durch dieses zeitlich veränderliche Feld wird im elektrisch leitfähigen Werkstück ein dem Spulen-

strom entgegengerichteter Strom induziert, welcher das Magnetfeld abschirmt, sodass die magnetische Feldstärke im Spalt zwischen Werkstück und Spule hoch ist. Die in diesem Feld gespeicherte Energiedichte kann als senkrecht dazu wirkender Druck p betrachtet werden. Nach dem Prinzip „Actio est Reactio“ wirkt dieser sogenannte magnetische Druck gleichermaßen auf Werkzeugspule und Werkstück. Die resultierende Druckdifferenz über der Werkstückwand bewirkt bei Überschreiten der Fließspannung durch die mechanischen Spannungen im Werkstück eine plastische Umformung des Werkstückes in Form einer radialen Einschnürung bei der Kompression und in Form einer radialen Aufweitung bei der Expansion.

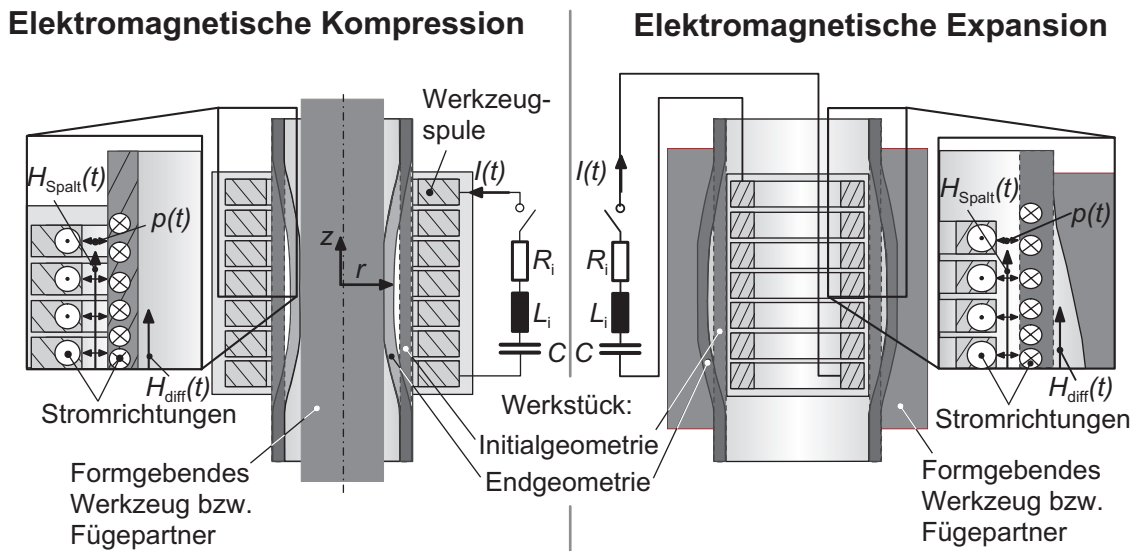


Bild 1: Prinzip der elektromagnetischen Kompression und Expansion rohrförmiger Werkstücke

Die mit dieser Umformung einhergehende Vergrößerung des Spaltvolumens bewirkt eine Verringerung der Energiedichte des Magnetfeldes. Dies kann unter Umständen dazu führen, dass der sogenannte magnetische Druck deutlich schneller abfällt als der Spulenstrom [Bee03]. Dieser Effekt ist insbesondere von der elektromagnetischen Blechumformung, einer Verfahrensvariante, bei der z.B. spiralförmig gewickelte Werkzeugspulen zur Umformung ebener oder dreidimensional vorgeformter blechförmiger Halbzeuge genutzt werden [Voh98, Psy07], bekannt. Sie verdeutlichen, dass eine starke Wechselwirkung zwischen den aufgebrachtene Lasten, welche die Umformung des Werkstückes bewirken, und der Werkstückbewegung existiert.

2.2 Einfluss des radialen Abstandes von Werkzeugspule und Werkstück

Um bei geringem Modellierungsaufwand und kurzer Rechenzeit generelle Effekte hinsichtlich der Spulenbelastung in den beiden Verfahrensvarianten Kompression und Expansion zu identifizieren, ist es sinnvoll, anstelle des komplexen Deformationsablaufes zunächst Extremfälle einzeln zu betrachten. Hierzu kann einerseits das Extrembeispiel eines Prozesses mit verhinderter Werkstückbewegung und andererseits das Extrembeispiel eines Prozesses ohne Werkstück, repräsentativ für den Fall sehr großer Werkstückdeformationen bzw. sehr großer Entfernungen zwischen Werkstück und Spule, herangezogen werden. Aus diesem Grund wurde sowohl der für die Kompression als auch der für die Expansion genutzte Aufbau unter Ausnutzung der Rotations- und Spiegelsymmetrie im General-Purpose-Finite-Element-Programm Ansys durch vierseitige Vier-Knoten-Elemente modelliert. Als Eingangsdaten dienten die geometrischen Abmessungen, die elektrischen Materialkennwerte für den benutzten Werkstoff Aluminium AA6008, konstante Leitfähigkeit und Permeabilität sowie ein abgeschätzter zeitlicher Verlauf des Spulenstroms. Dabei wurde nicht berücksichtigt, dass im Fall einer Werkzeugspule ohne Werkstück die Induktivität im Vergleich mit der gemeinsamen

Induktivität von Werkstück und Spule deutlich höher ist und sich somit ein anderer zeitlicher Verlauf des Spulenstromes mit deutlich geringerer Frequenz und Amplitude einstellt. Auf dieser Basis wurden die Verteilung des elektromagnetischen Feldes sowie die auf die Werkzeugspule wirkenden Kräfte bestimmt (vergleiche *Bild 2*).

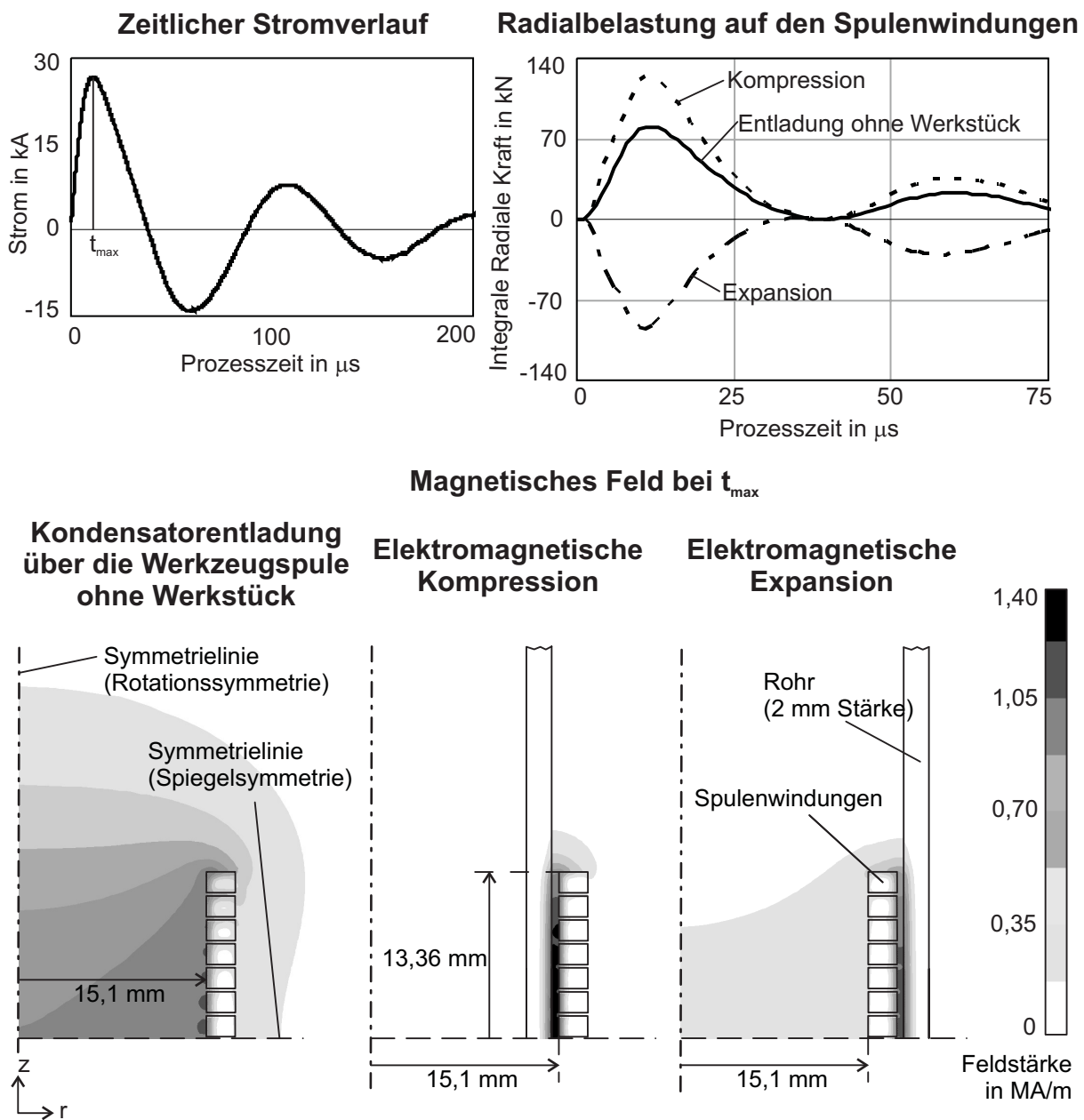


Bild 2: Belastungen von Kompressions- und Expansionsspulen in Prozessen mit verhinderter Werkstückdeformation bzw. ohne Werkstück

Der Vergleich beider Verfahrensvarianten zeigt, dass sich bei der Kompression unabhängig davon, ob sich ein Werkstück in Spulennähe befindet, der gleiche Lastfall einstellt. Dieser ist charakterisiert durch radial nach außen gerichtete Kräfte auf die Werkzeugspule, die im Diagramm durch ein positives Vorzeichen der Kraftwerte gekennzeichnet sind. Bei gleicher Richtung der Kraft sinkt lediglich die Amplitude, wenn kein Werkstück in der Spule vorhanden ist, da sich das elektromagnetische Feld nun im gesamten Volumen innerhalb der Spule verteilen kann und nicht mehr auf das deutlich geringere Spaltvolumen zwischen Werkstück und Spule begrenzt ist.

Im Gegensatz dazu stellt sich die gewünschte Kraftwirkung bei der Expansion nur aufgrund der Wechselwirkung von Werkstück und Spule ein. Nur wenn die Expansionsspule von einem elekt-

risch gut leitfähigen Werkstück mit geschlossenem Querschnitt umgeben ist, konzentriert sich der Spulenstrom an der äußeren Oberfläche des Windungspaketes und auf das magnetische Feld im Spalt zwischen Werkzeugspule und Werkstück. Dementsprechend wirken die Kräfte auf die Spulenwindungen im Wesentlichen radial nach innen gerichtet. Im Diagramm ist dies durch ein negatives Vorzeichen der Kraftwerte gekennzeichnet. Ohne dieses Werkstück in direkter Spulennähe wirken die Kräfte radial nach außen gerichtet auf die Spulenwindungen, und der Lastfall gleicht dem bei der Kompression.

2.3 Einfluss der relativen axialen Position von Werkzeugspule zu Werkstück

Neben dem radialen Abstand von Werkzeugspule und Werkstück stellt auch die axiale Position des Rohres relativ zur Werkzeugspule einen Parameter dar, der in den beiden betrachteten Varianten der elektromagnetischen Umformung, Kompression und Expansion, die wirksamen Lasten signifikant beeinflusst. Ist die Anordnung so gewählt, dass die gesamte Spulenwicklung durch das Werkstück abgedeckt ist (vergleiche *Bild 3a*) und *c*), so verlaufen die Feldlinien des magnetischen Feldes im Spalt zwischen Werkzeugspule und Werkstück parallel zur Werkstückachse. Die Kräfte auf das Werkstück und die Spule wirken orthogonal zu diesen Feldlinien, sodass bei Vernachlässigung des Spulenrandbereichs lediglich radiale Kräfte auftreten. Ist die Spulenwicklung jedoch nur teilweise vom Werkstück abgedeckt, ändern sich die magnetischen Feldlinien, wie in *Bild 3b*) und *d*) gezeigt, so dass höhere axiale Kräfte auf die Spulenwindungen erzeugt werden. Aufgrund ihrer Konstruktion ist eine Expansionsspule aber nicht dazu geeignet, nennenswerte Kräfte in dieser Richtung aufzunehmen, so dass dieser Lastfall sehr ungünstig ist.

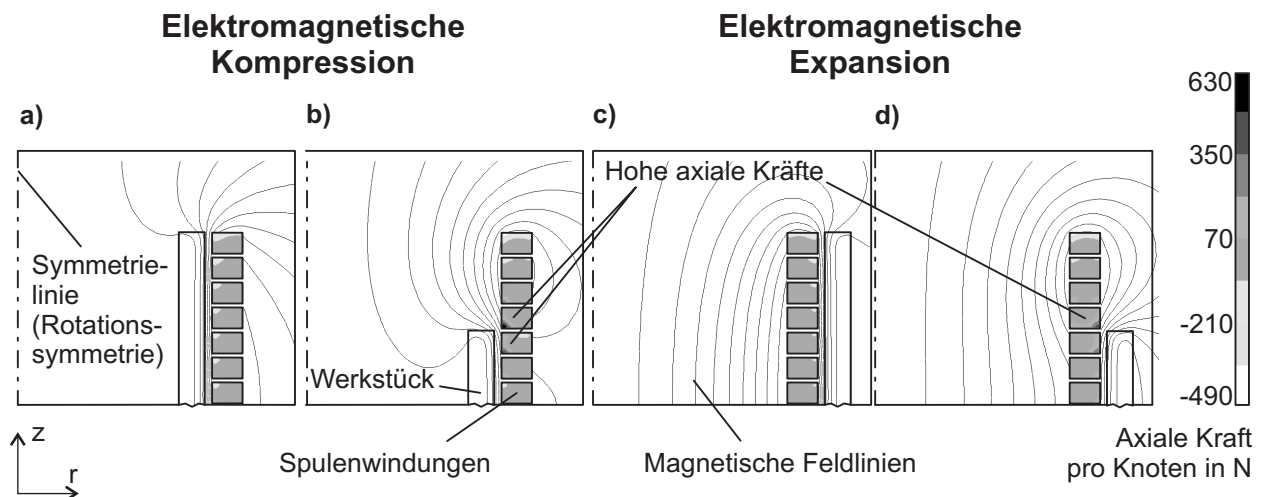


Bild 3: Magnetische Feldlinien und axialer Lastfall bei gesamter bzw. teilweiser Abdeckung der Spulenwindungen durch das Werkstück

2.4 Einfluss des zeitlichen Druckverlaufes

Aus den Untersuchungen hinsichtlich des Einflusses der radialen und axialen Position bzw. des Abstandes von Werkstück und Spule auf die resultierenden Kräfte kann gefolgert werden, dass auch bei der elektromagnetischen Umformung rohrförmiger Werkstücke unter Umständen unterschiedliche Lastfälle bzw. Lastwechsel auftreten können. Dabei stellt die Verfahrensvariante der Expansion den komplexeren Fall dar und soll daher im Folgenden eingehender betrachtet werden. Wegen der oben genannten Wechselwirkungen zwischen den aufgebrachtene Lasten einerseits und der Werkstückbewegung andererseits muss die numerische Analyse des Umformprozesses, die eine zwingende Voraussetzung für eine wirtschaftliche Werkzeug- und Prozessauslegung darstellt, in Form einer gekoppelten elektromagnetischen und strukturmechanischen Simulation erfolgen. Das Prinzip, nach dem eine solche Simulation am Institut für Umformtechnik und Leichtbau der Universität Dortmund durchgeführt wurde, ist im Folgenden kurz erläutert.

Zunächst, in Anlehnung an [Bro05] werde analog zu den zuvor beschriebenen Untersuchungen mittels elektromagnetischer Feldsimulation, durchgeführt im General-Purpose-Finite-Elemente-Programm Ansys (v10.0), die im Initialzustand wirkenden Kräfte auf der Basis eines abgeschätzten, transienten Spulenstroms berechnet. Die ermittelte Verteilung der Kräfte dient dann für ein definiertes Zeitintervall (einen Schritt) als Eingangsgröße für das FE-Programm LS-Dyna (Version 970). Mit diesem wird unter Berücksichtigung der mechanischen Werkstückkennwerte, wie z.B. des Elastizitätsmoduls, der Fließkurve und der Dichte des Materials, die entsprechende Werkstückdeformation berechnet. Anschließend ist auf Seiten der elektromagnetischen Simulation eine Neuvernetzung der das Werkstück umgebenden Luft notwendig, bevor eine neue Verteilung der Kräfte für den nächsten Schritt auf der Basis der aktualisierten Werkstückgeometrie durchgeführt werden kann. Diese Verteilungen dienen als Eingangsgröße für das Finite-Element-Programm LS-DYNA, das zur Berechnung der Werkstückdeformation genutzt wird. Abweichend von [Bro05] erfolgen die Finite-Element-Analysen hier ausschließlich mithilfe von kommerzieller Software, da so eine geplante Erweiterung auf dreidimensionale Fälle leichter erfolgen kann. *Bild 4* verdeutlicht die benutzte gekoppelte Berechnungsstrategie.

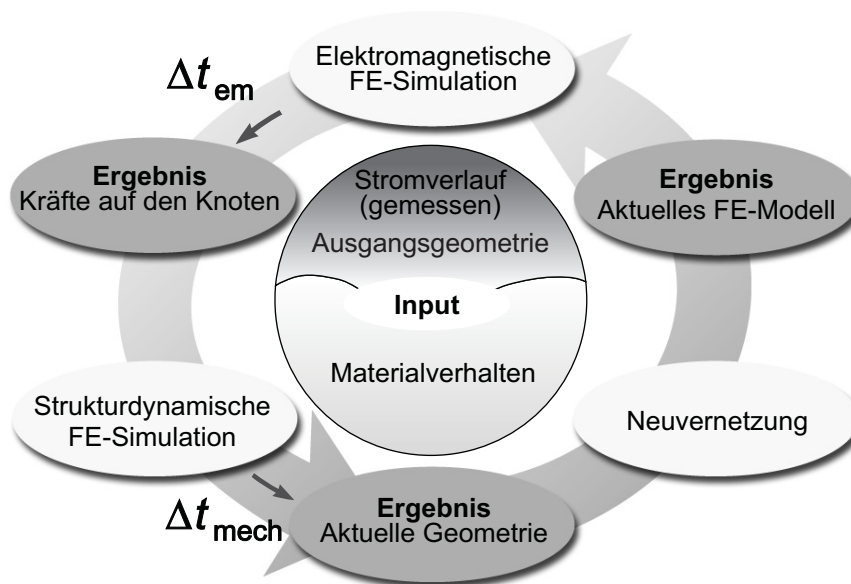


Bild 4: Vorgehensweise der gekoppelten Simulation nach [Bro05]

Mithilfe dieser gekoppelten Simulation wurde der Einfluss des zeitlichen Verlaufes verschiedener Spulenströme auf das Deformationsverhalten des Werkstückes sowie auf die Spulenbelastung anhand von drei Beispielen (I, II und III) untersucht. Dazu wurde ein abgeschätzter Stromverlauf zeitlich so skaliert, dass die Dauer bis zum Erreichen des Strommaximums, gekennzeichnet durch die Zeitpunkte t_1 , t_2 und t_3 , im Fall II doppelt und im Fall III viermal so lang ist wie in Fall I. Der benutzte Werkstoff ist wieder Aluminium AA6008. Wie in *Bild 5* dargestellt, kann es, insbesondere im Fall eines langsamen Stromverlaufs (Fall III), zum Lastwechsel und damit zu radial nach außen gerichteten Kräften auf die Werkzeugspule kommen. Dies liegt darin begründet, dass hier die Deformation des Werkstückes schon deutliche radiale Abstände von Werkstück und Spule bewirkt, bevor der Stromverlauf auf kleine Werte gedämpft ist. Bei kürzeren Stromimpulsen ist die Deformation unter anderem aufgrund der Massenträgheit des Werkstückes zu diesem Zeitpunkt noch deutlich kleiner. Allerdings werden bei kürzeren Stromimpulsen und gleicher Stromamplitude auch über den gesamten Prozess gesehen nur geringere Deformationen erreicht, da für die Realisierung eines solchen Stromimpulses nur eine geringere Energie in den Prozess eingebracht wird.

Des Weiteren treten, ebenfalls besonders ausgeprägt im Fall langsamer Stromverläufe und der damit verbundenen größeren Werkstückdeformationen, axiale Kraftkomponenten auf die Spulenwin-

dungen auf. Diese resultieren daraus, dass die Einschnürung des Werkstückes nicht zylindrisch über der gesamten Spulenlänge auftritt, sondern die Deformationen in der Spulenmitte deutlich größer sind als in den Randbereichen.

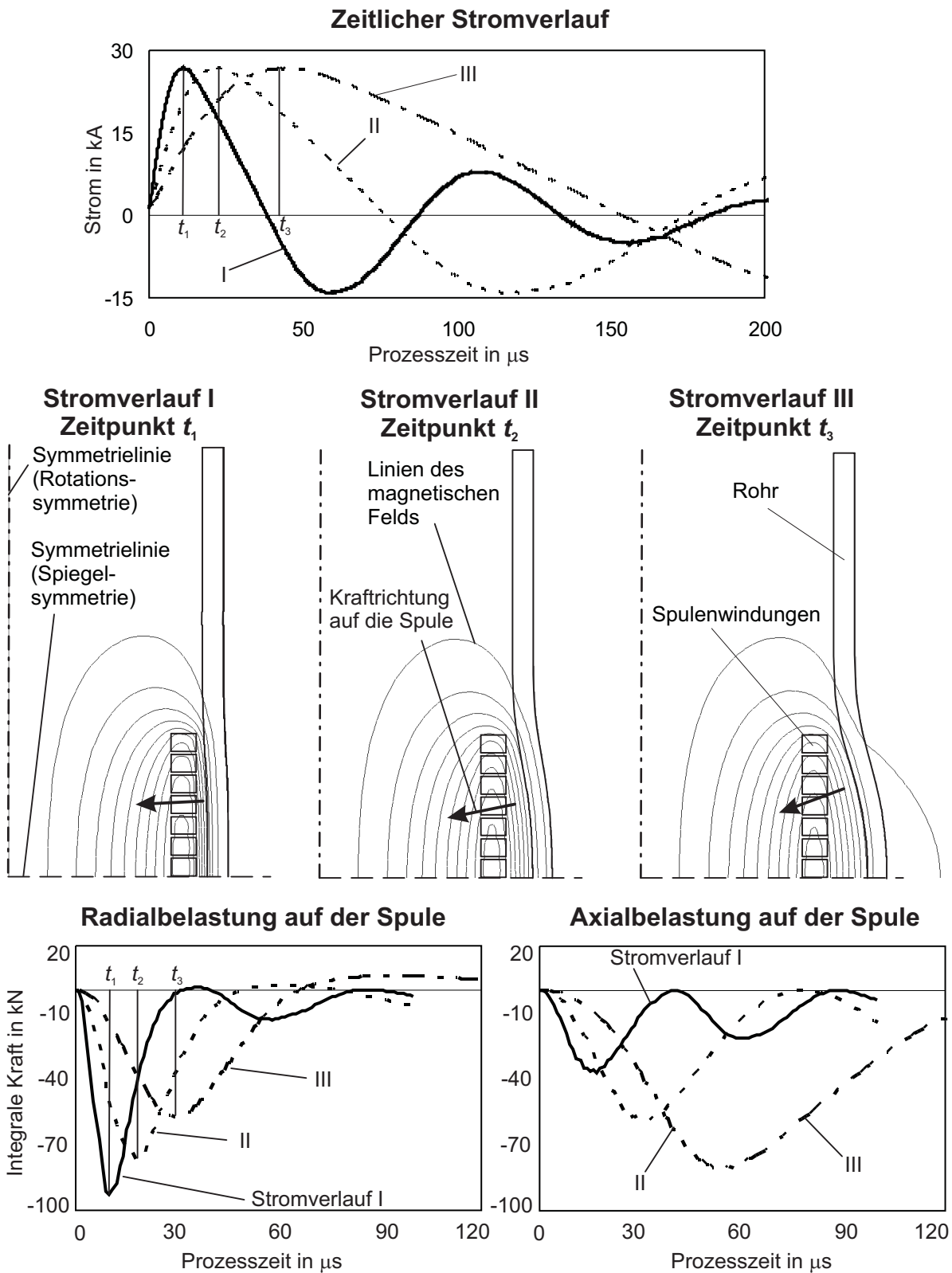


Bild 5: Spulenbelastungen, hervorgerufen durch verschiedene Stromverläufe

3 Schlussfolgerungen hinsichtlich der Werkzeuggestaltung

Auf Basis der beschriebenen Erkenntnisse aus der Analyse der elektromagnetischen Rohrumformung lassen sich Richtlinien für die Auslegung von Werkzeugspulen folgern. Als wichtigster Punkt ist dabei festzuhalten, dass in beiden Verfahrensvarianten - in Abhängigkeit von der Positionierung des Werkstücks relativ zur Werkzeugspule sowie vom Druckverlauf und den daraus resultierenden Umformstadien - unterschiedliche Lastrichtungen auf die Spule wirken können, was ggf. zu einer Beeinträchtigung der Lebensdauer führen kann. Bei der Spulengestaltung ist also zu gewährleisten, dass diese nicht nur Kräfte in der Hauptlastrichtung (d. h. radial nach außen bei der Kompression und radial nach innen bei der Expansion), sondern zu einem gewissen Maß auch in axialer Richtung und bei der Expansion darüber hinaus radial nach außen gerichtet aufnehmen kann. Moderne Werkzeugspulen sind in der Regel so gestaltet, dass ihre verschiedenen Funktionen, wie z.B. die Leitung des Stromes, die Isolation zum Werkstück hin und die mechanische Festigkeit von verschiedenen Komponenten, aus jeweils geeigneten Werkstoffen übernommen werden. Die Aufnahme von Kräften kann dabei z.B. durch eine Armierung mit Kevlarfasern, die sich durch eine hohe Zugfestigkeit auszeichnen, realisiert werden [Bee93].

Nichtsdestotrotz sollten auch Maßnahmen zur Reduzierung unerwünschter Lastfälle getroffen werden. So darf der Spalt zwischen Werkstück und Spule besonders bei der Expansion nicht zu groß gewählt werden. Ein Mindestspalt ist aber aus Isolations- und Armierungsgründen unvermeidlich. Des Weiteren darf der Stromimpuls bei der Expansion nicht zu langsam werden, um Umformstadien mit großem Abstand zwischen Werkstück und Spule bei gleichzeitigen hohen Stromamplituden zu vermeiden.

Bei der elektromagnetischen Kompression sollte in Fällen, bei denen größere Axialkräfte aufgrund von unvollständiger Abdeckung des Wicklungspaketes durch das Werkstück zu erwarten sind, wie z.B. bei der Umformung von Rohrenden, ein sogenannter Feldformer verwendet werden. Dabei handelt es sich um ein rotationssymmetrisches, axial mindestens einmal geschlitztes Bauteil aus elektrisch gut leitfähigem Material (in der Regel einer Kupferlegierung), das zwischen Werkstück und Spule positioniert wird. Das Wirkprinzip ist unter anderem in [Kim59] beschrieben. Diese zusätzliche Komponente gestattet es, die Spulenumwicklung komplett abzudecken und so Axialkräfte auf die Windungen zu vermeiden bzw. deutlich zu verringern, und gleichzeitig das Werkstück an einer beliebigen axialen Position relativ zur Werkzeugspule zu positionieren.

Literatur

- [Bal94] Balanethiram, V. S.; Daehn, G. S.: Hyperplasticity: Increased Forming Limits at High Workpiece Velocity, *Scripta Metallurgica et Materialia* 30 (1994), pp. 515-520.
- [Bee93] Beerwald, H.: Mehrwindungsspule zur Erzeugung starker Magnetfeldimpulse, *Offenlegungsschrift OS DE 4335935 A1*; Deutsches Patentamt, München, 1993.
- [Bee03] Beerwald, C.; Brosius, A.; Kleiner, M.; Psyk, V.: Einfluss des magnetischen Druckes bei der elektromagnetischen Blechumformung, *Tagungsband 2. Kolloquium Elektromagnetische Umformung*, Dortmund, S. 77 – 85, ISBN 3-00-011376-2.
- [Bro05] Brosius, A.: Verfahren zur Ermittlung dehnratenabhängiger Fließkurven mittels elektromagnetischer Rohrumformung und iterativer Finite-Element-Analysen, Dr.-Ing. Dissertation, Universität Dortmund, 2005
- [Fyf79] Fyfe, I. M.; Rajendran, A. M.: Dynamic Pre-Strain and Inertia Effects on the Fracture of Metals, *J. Mech. Phys. Solids* 28 (1980), pp. 17-26.
- [Kim59] Kim, Y. B.; Platner, E. D.: Flux Concentrator for High-Intensity Pulsed Magnetic Fields, *The Review of Scientific Instruments* 30 (1959), No. 7, pp. 524-533.
- [Meh01] Mehnert, S.: Auslegung magnetumgeformter Verbindungen durch Simulation, Dr.-Ing. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2001.
- [Psy04] Psyk, V.; Beerwald, C.; Homberg, W.; Kleiner, M.: Electromagnetic Compression as Pre-forming Operation for Tubular Hydroforming Parts, In: *Proceedings, ICHSF – 1st Int. Conf. on High Speed Forming*, Dortmund, 2004, S. 171-180, ISBN 3-00-012970-7.

- [Psy07] Psyk, V.; Beerwald, C.; Henselek, A.; Homberg, W.; Brosius, A.; Kleiner, M.: Integration of Electromagnetic Calibration into a Deep Drawing Process of an Industrial Demonstrator Part, *Key Engineering Materials* 344 (2007) pp. 435-442.
- [Tho07] Thomas, J. D.; Seth, M.; Daehn, G. S.; Bradley, J. R.; Triantafyllidis: Forming Limits of Electromagnetically Expanded Aluminum Alloy Tubes: Theory and Experiment, *Acta Materialia* 55 (2007), pp. 2863-2873.
- [Voh98] Vohnout, V. J.: A Hybrid Quasi-Static/Dynamic Process for Forming large Sheet Metal Parts From Aluminum Alloys. Ph.D. Dissertation of Vincent J. Ohio State University, Columbus, Ohio, USA, 1998.
- [Win73] Winkler, R.: *Hochgeschwindigkeitsbearbeitung*, Berlin: VEB Verlag Technik, 1973.

Entwicklung einer Methodik zur optimierten Gestaltung von Umformwerkzeugen

Dr.-Ing. M.v.Schwerin
Dr.-Ing. J. Meinhardt
Dipl.-Ing. I. Heinle

BMW AG
München

ENTWICKLUNG EINER METHODIK ZUR OPTIMIERTEN GESTALTUNG VON UMFORMWERKZEUGEN

Dr.-Ing. M.v.Schwerin, Dr.-Ing. J. Meinhardt, Dipl.-Ing. I. Heinle

1 Einleitung

Um den gestiegenen Anforderungen der internationalen Märkte gerecht zu werden, gilt es im Bereich der Fertigung die Produktqualität zu erhöhen und die Entwicklungszeiten und -kosten zu verkürzen. Insbesondere erwartet die Automobilindustrie für die Zukunft Zuwachs bei Nischentypen, für die eine hohe Prozessflexibilität benötigt wird [WEBE03]. Eine wichtige Rolle spielt dabei die Auslegung von Umformwerkzeugen zur Blechumformung, welche nach Schätzungen des VDMA gemeinsam mit Press-, Präge- und Gesenkschmiedewerkzeugen in 2005 rd. 44 % der Produktionsstruktur mit einem Umsatz von geschätzten 5,5 Mrd. Euro ausmachten [NN06]. Trotz eines hohen Automatisierungsgrades und einer durchgängig virtuellen Prozesskette in den CAD-Daten der Werkzeugentwicklung sind manuelle, kosten- und zeitintensive Schritte beim Tuschieren von Umformwerkzeugen ein fester Bestandteil des Werkzeuganfertigungsprozesses [TOEN03]. Aus den Forderungen nach größerer Prozessflexibilität, einer Steigerung der Prozesssicherheit und der damit verbundenen Qualität, sowie nach weiterer Kostenreduzierung ergibt sich ein erheblicher Bedarf an realitätsnahen Simulationsmethoden [WEIS93]. Die Möglichkeit, auf den Entwicklungsprozess von Umformwerkzeugen durch virtuelle Prozessschritte zu einem frühen Zeitpunkt Einfluss nehmen zu können, sowie die Möglichkeit der virtuellen Prozessabsicherung, stellen hierfür einen wesentlichen Erfolgsfaktor dar.

Der vorliegende Beitrag trägt durch die Entwicklung eines virtuellen Prozessmodells dazu bei, wie der Umformprozess unter Berücksichtigung des systemtechnischen Verhaltens von Umformpresse, Werkzeug und Blechbauteil lastspezifisch in einem virtuellen CAE-Prozess erfasst werden kann. Einerseits bedient er sich hierfür schon vorhandener, im Entwicklungsprozess bereits fest etablierter virtueller Teilprozesse, und verbindet diese andererseits durch die Entwicklung neuer Teilprozesse zu einem durchgängigen und virtuellen CAE-Prozessmodell. Durch die Anwendung der entwickelten Methodik wird es möglich, die zu erwartenden elastischen Wechselwirkungen des Ziehprozesses virtuell und methodisch abzubilden. [SCHW06]

2. CAE-Prozessmodell und Modellierung

Im Rahmen des Werkzeugentstehungsprozesses erfolgt nach der Bauteilkonstruktion die Erstellung der Methode. Erst dann wird das Fertigungsmittel konstruiert und es wird mit der Anfertigung begonnen. Schließlich steht ein Fertigungsmittel zur Umformung von Platinen im Serienprozess zur Verfügung. Die Entwicklung der virtuellen Methodik erfolgte in Analogie zu dem in der Praxis etablierten Gesamtprozess mit den zugehörigen Teilprozessen. Neben der Entwicklung der FEM-Modelle war ein wesentlicher Schritt die praxisnahe Modellierung des Lastfalls.

2.1 CAE-Prozessmodell

Der Lastfall Ziehen, mit allen relevanten Teilprozessen, wurde bisher nicht in Form eines durchgängigen Prozessmodells abgebildet, das den spezifischen Lastfall unter Berücksichtigung der individuellen Bauteilgeometrie gesamthaft beschreibt. Zum Stand der Technik zählen heute leider auch nicht die virtuellen Modelle der Fertigungsanlagen [PRIT02]. Umformsimulationen zählen heute zu einem festen Bestandteil des Entwicklungsprozesses. Sie dienen zur Erbringung des Nachweises der fertigungstechnischen Machbarkeit eines Blechbauteils mit den gestellten Qualitätsansprüchen [MEIN02]. Erst durch die Kopplung dieser Umformsimulation mit

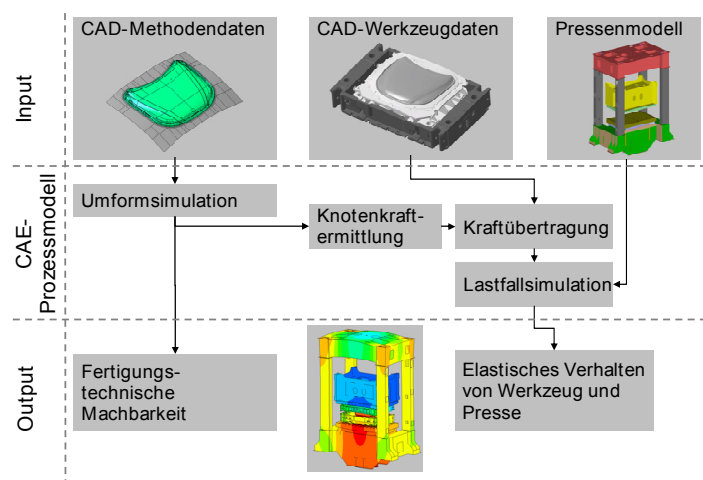


Abbildung 1: CAE-Prozessmodell

dem FEM-Werkzeugmodell, das zumeist in Form einer CATIA V5 3D-Volumenkonstruktion vorliegt, und der Integration des virtuellen Pressenmodells kann der geometrieabhängige Lastfall jetzt prozessspezifisch abgebildet werden. Die Verknüpfung verschiedener Teilprozesse, sowie die Entwicklung geeigneter Schnittstellen führten zu diesem prozessnahen und durchgängig virtuellen Prozessmodell [SCHW06].

2.2 FEM-Modelle

Neben der Umformsimulation werden auch die einzelnen Werkzeugkomponenten und das FEM-Modell der Umformanlage in Form von FEM-Modelle benötigt. Der Aufbau der Umformpresse erfolgt durch Schalen- und 3D-Kontinuumselemente. Besonders gut eignen sich hierfür 3D-Schalenelemente zur Abbildung der Bleche, aus denen eine Presse zu einem Großteil aufgebaut ist [SILB92]. Im Bereich der Werkzeuganbindung (Stößel- und Tischspannplatte) erfolgt die Modellierung analog der Modellierung der Werkzeugkomponenten durch 3D-Kontinuumselemente. Bei der Diskretisierung ist auf eine zielgerichtete Kantenlänge der Elemente zu achten, da andernfalls die Elementanzahl stark zunimmt. Diese würde sich dann in langwierigen Berechnungszeiten widerspiegeln, ohne dabei eine signifikante Steigerung der Berechnungsergebnisse zu bewirken.

2.3 Lastfallbeschreibung

Zur prozesstypischen Abbildung des Prozesslastfalls werden die Werkzeugkomponenten als Finite Elemente Struktur abgebildet. Ihre Lagerung erfolgt analog Realität durch eine geeignete Anbindung am Pressentisch bzw. der Stößelspannplatte. Ebenso werden die einzelnen Werkzeugelemente durch Modellierung der Führungen zwischen Blechhalter und Werkzeugunterteil, sowie zwischen Werkzeugoberteil und Werkzeugunterteil abgebildet. So können in der Berechnung auch Schubkräfte abgebildet werden, die beim Ziehvorgang auftreten. Durch diese realitätsnahe Modellierung ist es möglich, auch das durch einen asymmetrischen Lastfall hervorgerufene Verhalten der Presse abzubilden.

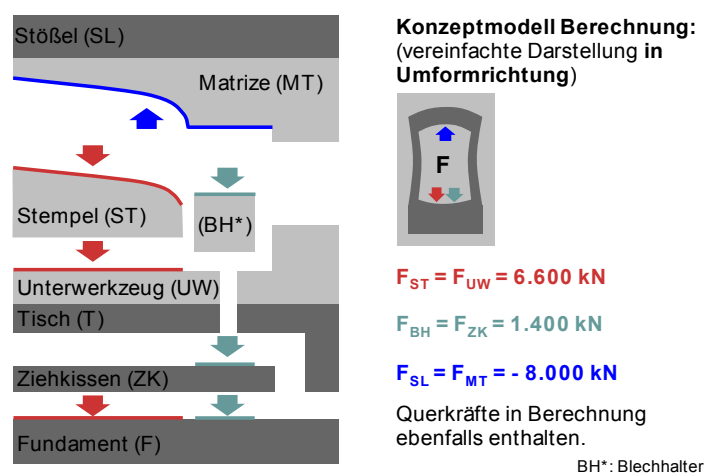


Abbildung 2: Prinzipskizze des Lastfalls

3 Ergebnisse aus Berechnung

Das beschriebene Prozessmodell wurde für die Analyse von drei verschiedenen Lastfällen herangezogen. Während aus dem vereinfachten eine rein vertikale Belastung resultiert, und somit gegenüber realen Bauteilen eine starke Vereinfachung der Lastverhältnisse darstellt, wurden zusätzlich Lastfälle realer Bauteile zugrunde gelegt. Diese stellen prozesstypische Belastungen dar.

3.1 Vereinfachter Lastfall (LF1) vs. Ziehwerkzeug Frontklappe Außenhaut BMW 5er Baureihe (LF2)

Zur Auslegung von Umformpressen wurde insbesondere zur Bestimmung der Biegelinie eines Pressentisches die Lastannahme vereinfacht modelliert. Auf einer Fläche des Pressentisches, die aus 2/3 der Tischlänge und 2/3 der Tischbreite resultiert, wurde die Pressennkraft als konstante Flächenpressung aufgebracht. Lokale Effekte sind so nicht zu berücksichtigen. Besonders spezifische Belastungen, die sich nach der Geometrie des Bauteils und der Blechgüte richten, sind so nicht darstellbar.

Die Effekte lokaler Krafteinleitung, und die elastische Deformation von Werkzeug und Presse sind besonders gut zu verdeutlichen, wenn das Werkzeug eines Serienblechbauteils betrachtet wird. Durch die Kopplung der Umformsimulation mit dem FEM-Werkzeugmodell wird es möglich, eine strukturmechanische Aussage des Umformsystems unter einer prozesstypischen Lastbedingungen zu treffen.

Der Unterschied zwischen den beiden Lastfällen ist in Abbildung 3 deutlich zu erkennen. Durch den vereinfachten und symmetrischen Lastfall sind zwar Biegungen darzustellen, diese weichen aber von den Biegelinien des Lastbildes mit Werkzeug ab. Hier kommt die Rippenstruktur des Werkzeugs zum Tragen und mindert die Durchbiegung des Pressentisches ab. Die Verkippung (Unterschied der Biegelinie quer zur

Durchlaufrichtung vorne bzw. hinten) zeigt, dass asymmetrische Kraftverhältnisse durch das FEM-Modell berücksichtigt werden.

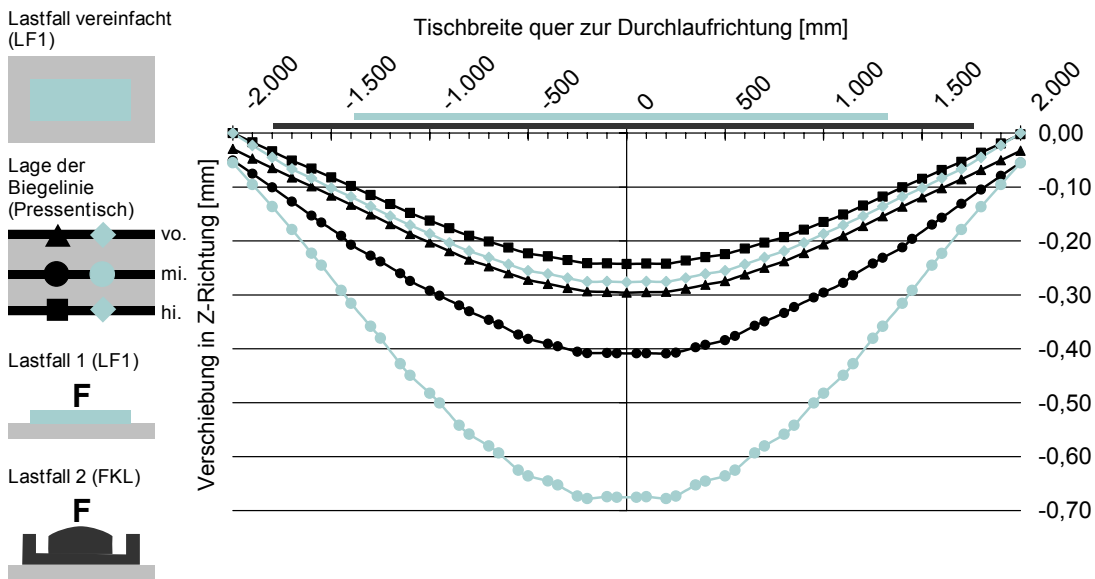


Abbildung 3: Vergleich der Biegelinien LF1 vs. LF2

3.2 Ziehwerkzeug Frontklappe Außenhaut BMW 5er Baureihe (LF2) vs. Ziehwerkzeug Strukturbauteil BMW 3er Baureihe (LF3)

Analog des vorangegangenen Lastfalls werden nun die in der Simulation ermittelten Biegelinien von zwei unterschiedlichen Serien-Ziehwerkzeugen verglichen. Deutlich zu erkennen ist, dass das Ziehwerkzeug des Außenhautbauteils Frontklappe, das über weniger Verprägungen und Radien verfügt als das des Strukturbauteils, bei gleichem Kraftniveau eine deutlich geringere Durchbiegung hervorruft, als das des Strukturbauteils. Neben der Steifigkeit des Werkzeugs spielt also auch die Abmessung des Werkzeugs eine entscheidende Rolle bei der Ausprägung der Biegelinie des Pressentisches. Die Verkippung, hervorgerufen durch die asymmetrische Krafteinleitung, lässt sich bei beiden Werkzeuglastfällen beobachten.

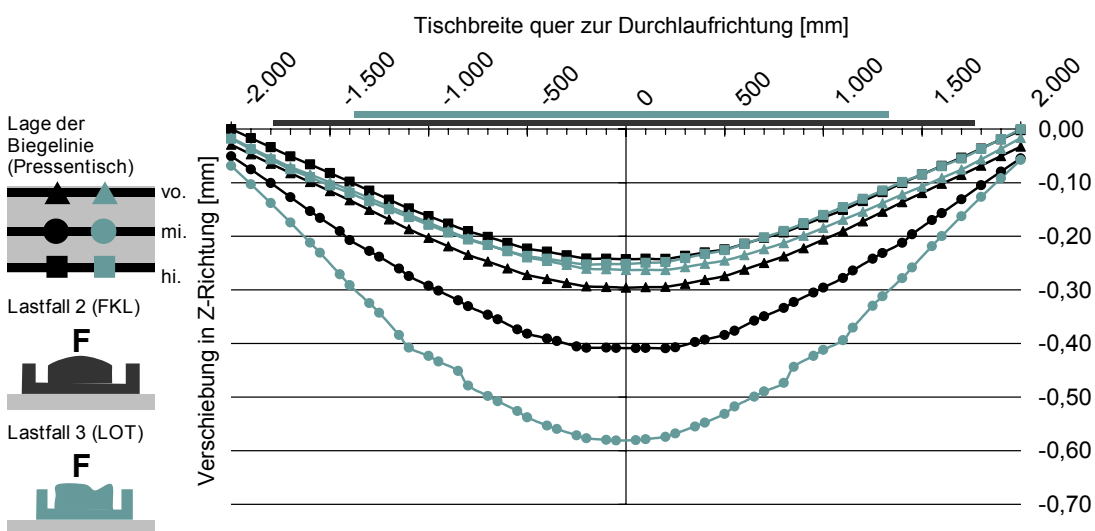


Abbildung 4: Vergleich der Biegelinie LF2 vs. LF3

4 Absicherung durch Messung

Für die Absicherung der durch Berechnung ermittelten Ergebnisse wurde ein geeignetes, mehrteiliges Messkonzept gewählt. Die Plausibilität wird anhand verschiedener Messmethoden nachgewiesen. Unterschiedliche physikalische Wirkprinzipien werden hierfür verwendet.

4.1 Absicherung der Tischbiegeline durch Messung

In der Berechnung wurden Biegelinien des Pressentisches durch elastische Deformation, hervorgerufen von dem Ziehwerkzeug Frontklappe Außenhaut sowie dem Lastfall Ziehen mit Serieneinstellungen, ermittelt. Durch wiederholte Messungen wurde ein Mittelwert gebildet, sodass von einer Reproduzierbarkeit der Ergebnisse ausgegangen werden kann. Die Messergebnisse zeigen, dass die durch Berechnung ermittelte Biegelinie in der Mitte, dem Maximum der Tischverschiebung in Durchlaufrichtung vorne und hinten in Umformrichtung, um rd. 13% von den Ergebnissen der Messung abweichen. Das FEM-Modell zeigt in diesem Fall ein steiferes Verhalten, als in der Realität nachzuweisen ist.

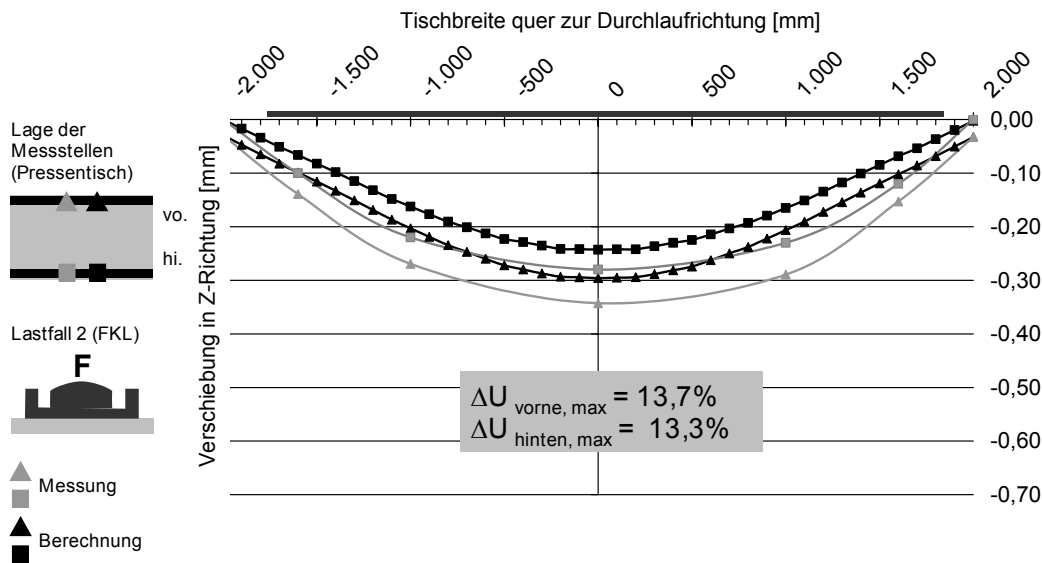


Abbildung 5: Tischdurchbiegung Messung vs. Berechnung

4.2 Absicherung der Kontaktkräfte zwischen Tisch und Werkzeug

Aus der Berechnung wurden Kontaktkräfte ermittelt, die das Kontaktverhalten zwischen der Werkzeugunterseite und der Pressentischoberseite abbilden. Zur Messung wurde eine Druckmessfolie eingesetzt. Durch die Intensität der Verfärbung wird abgeleitet, in welcher Höhe die Flächenpressung des Werkzeugs unter Prozesslast lag. Durch Platzen von Mikrofarbkapseln an der Folienoberfläche erfolgt die Verfärbung. Die Skalierung der Berechnung war analog zum Auflösungsbereich der Druckmessfolie gewählt und lag in beiden Fällen im Empfindlichkeitsbereich zwischen 2,5-10 MPa. Abbildung 6 zeigt eine deutliche Übereinstimmung im Kontaktverhalten des Werkzeugs unter Prozesslast zwischen Simulation und Messung. Insbesondere im flächigen Bereich des Werkzeugs (in Tischmitte) erfolgt nur eine geringe Übertragung von Kontaktkräften. In diesem mittleren Bereich neigt das Werkzeug eher dazu sich im Prozess vom Tisch abzuheben, während in den Randbereichen die Kraftübertragung deutlich zu erkennen ist.

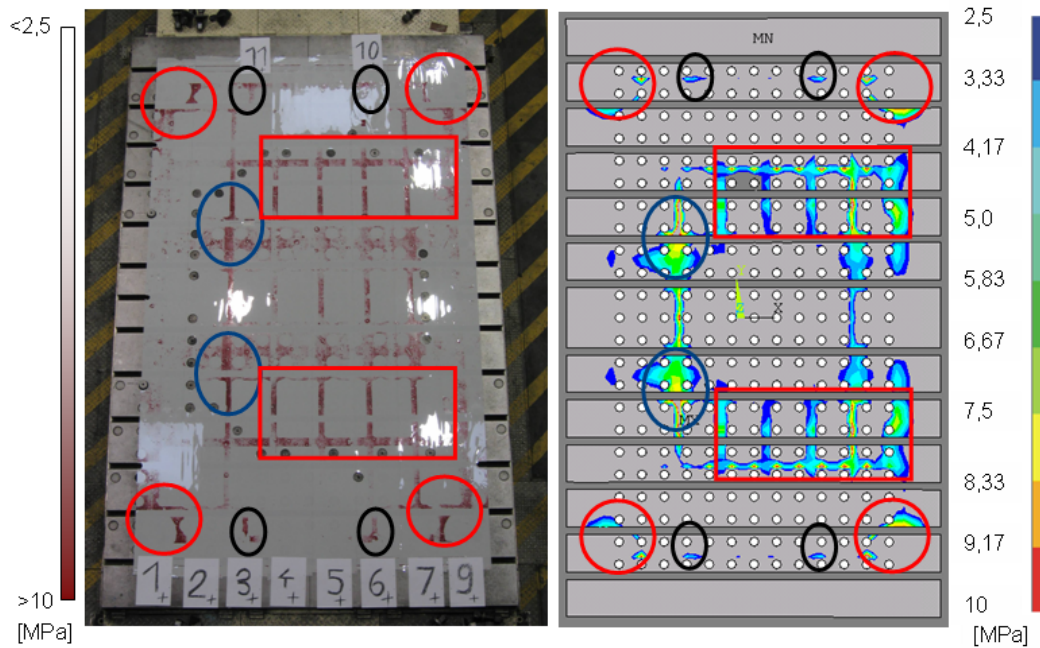


Abbildung 6: Gemessene Kontaktkräfte (li.), berechnete Kontaktkräfte (re.)

4.3 Absicherung der Spannungen durch DMS Messung

Die Überprüfung des Spannungs-/Dehnungsniveaus unter Last erfolgt direkt am Werkzeug. Hierfür werden an den Werkzeuggrippen quer und senkrecht zur Umformrichtung Dehnungsmessstreifen appliziert, und die während des Prozesses auftretenden Dehnungen werden so ermittelt und aufgezeichnet. Durch geeignete Umrechnung lassen sich die dazu gehörenden Spannungen errechnen. Diese werden den durch Berechnung ermittelten Werten an ausgewählten Stellen gegenübergestellt und miteinander verglichen. Das Ergebnis zeigt, dass sich das unterschiedliche Dehnungsniveau am Werkzeug auch bei der Messung durch DMS wiederholt. In den Radienbereichen, an welchen die Platine direkt über den Stempel einlaufradius gezogen wird, tritt in Tischmitte das höchste Dehnungsniveau auf. Dies führt auch zu den lokal hohen Spannungen in diesem Bereich. Im flächigen Mittenbereich des Werkzeugs liegt das Dehnungs-/Spannungsniveau deutlich darunter. Die aus der Berechnung ermittelten Spannungen lassen sich auf diese Weise durch die Spannungen, die aus den gemessenen Dehnungswerten errechnet wurden nachweisen.

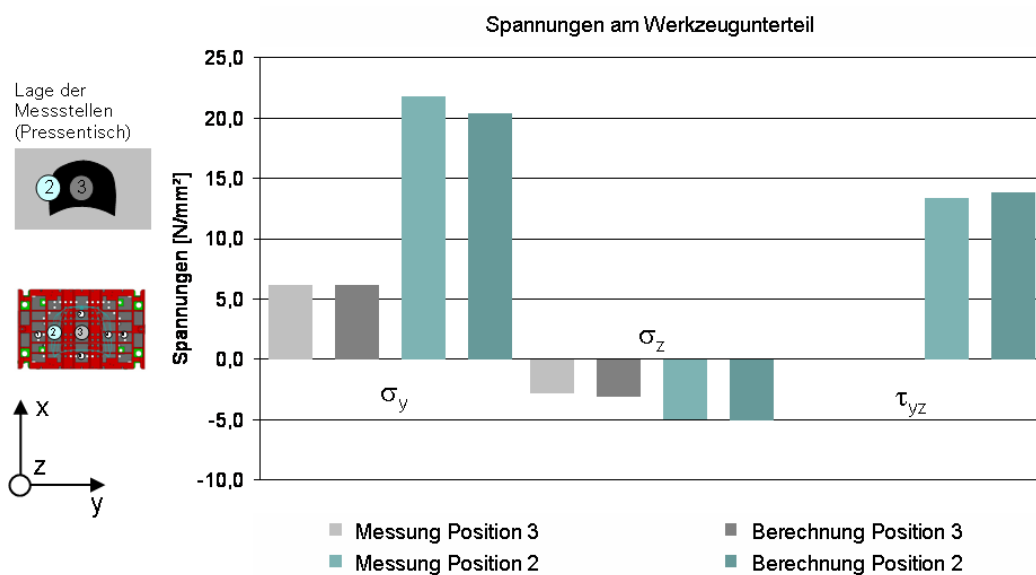


Abbildung 7: Spannungsverteilung an ausgewählten Werkzeugpositionen

5 Zusammenfassung und Ausblick

Durch die Entwicklung des beschriebenen virtuellen Prozessmodells lässt sich das unter Last individuelle Verhalten der jeweiligen Fertigungsanlage gezielt abbilden. Elastische Deformationen von Presse und Werkzeug, die sowohl von der Fertigungsanlage, vom Fertigungsmittel und vom Blechbauteil abhängen, lassen sich auf diese Weise darstellen. So kann die individuelle Gestaltung des Blechbauteils, die den Lastfall durch die Umformsimulation beschreibt, in das Prozessmodell integriert werden. Durch diese strukturelle Analyse kann das elastische Verhalten des Umformsystems gesamthaft untersucht und bei Bedarf rechtzeitig beeinflusst werden.

Ebenso können neue Optimierungsalgorithmen angewendet werden, um die Gestaltung von Umformwerkzeugen gezielt und methodisch zu analysieren, und zu beeinflussen. Gleiche, oder höhere Steifigkeiten können auf diese Weise bei gleichem Fertigungsmittelgewicht erzielt werden. Nicht zuletzt die rasante Entwicklung der Rechnerkapazitäten und des virtuellen Umfeldes begünstigen diese Entwicklungen. Aus den Anforderungen der einzelnen Phasen des virtuellen Produktentwicklungsprozesses für Werkzeugmaschinen, der Planung, der Herstellung und dem Einsatz, resultiert das zentrale Ziel für die virtuelle Produktion: die durchgängige Simulation der Werkzeugmaschine. [PRIT02]

- [MEIN02] Meinhardt, J.; Volk, W.; Schmidt, H.:
Virtuelle Prozessentwicklung von Presswerkzeugen im industriellen Umfeld.
17. Umformtechnisches Kolloquium Hannover 2002,
27.-28. Februar 2002, Hannover, 271-284
- [NN06] N.N.:
Der Werkzeugbau: Eine Schlüsselbranche der industriellen Fertigung in Zahl und
Bild.
Schwende, 2006
- [PRIT02] Pritschow, G.:
Auf dem Weg in die virtuelle Produktion.
wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 92, Heft 5, 2002, 186
- [SCHW06] Schwerin, M. v.:
Prozessbeschreibung zur Modellierung praxisspezifischer Lastfälle von
Umformwerkzeugen im Betrieb.
interne Veröffentlichung, BMW Group, München, 2006
- [SILB92] Silberbach, G.:
Dimensionierung und Tragverhalten bei triebwerksbelasteten
Kopfstücken von Umformmaschinen.
Dissertation, Hannover, 1992
- [TOEN03] Tönshoff, H. K.; Eger, M.; Oelschläger, H.:
Lebenszykluskosten in der Angebotskalkulation.
wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 93, Heft 11/12, 2003, 724-728
- [WEBE03] Weber, T.; Vöhringer, K.:
Innovative Produktionstechnologie für globale Märkte.
8. Umformtechnisches Kolloquium Darmstadt, 2.-3. April 2003,
Darmstadt, 1-14
- [WEIS93] Weiß, K.; Hohnhaus, W.:
Neue Pressentechnologie für die flexible Blechverarbeitung.
14. Umformtechnisches Kolloquium Hannover, 17.-18. März 1993,
Hannover, 22/1-22/12

Werkzeuggestaltung.

Methodik zur optimierten Gestaltung von Umformwerkzeugen.

Dr.-Ing. Markus v. Schwerin
Dr.-Ing. Josef Meinhardt
Dipl.-Ing. Ingo Heinle

BMW Group

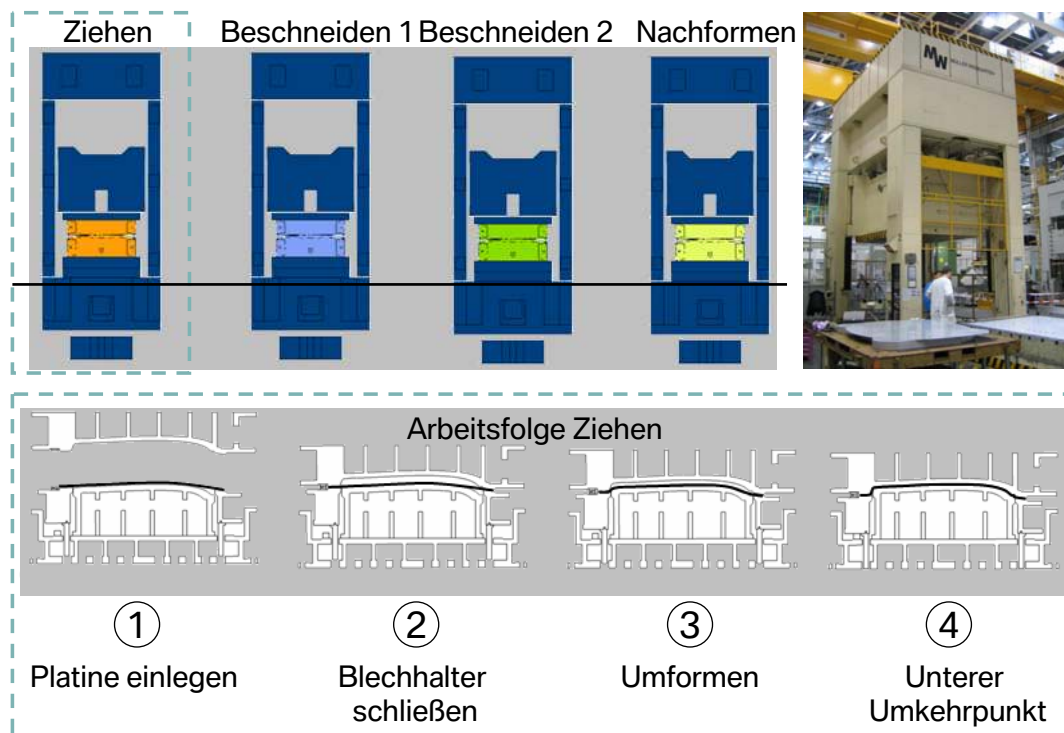


Werkzeuggestaltung.

Inhalte.

- Grundlagen
- Motivation & Zielsetzung
- Vorgehensweise
- Berechnungsmodell
- Messkonzept und Messungen zur Absicherung
- Ergebnisse der Untersuchungen
- Einsatzmöglichkeit
- Zusammenfassung & Ausblick

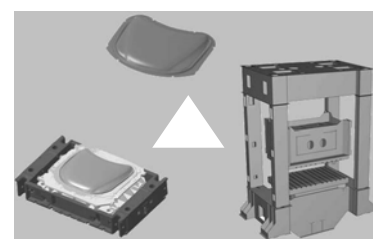
Ausgangssituation. Grundlagen.



Ausgangssituation. Motivation und Zielsetzung.

Motivation

- Bisher kein durchgängiges Prozessmodell zur Simulation der Arbeitsfolge „Ziehen“ (nur Teilprozesse)
- Methodische Darstellung der Elastizität von Werkzeug und Presse unter bauteilabhängiger Belastung war bisher nicht darstellbar



Prozesswechselwirkung

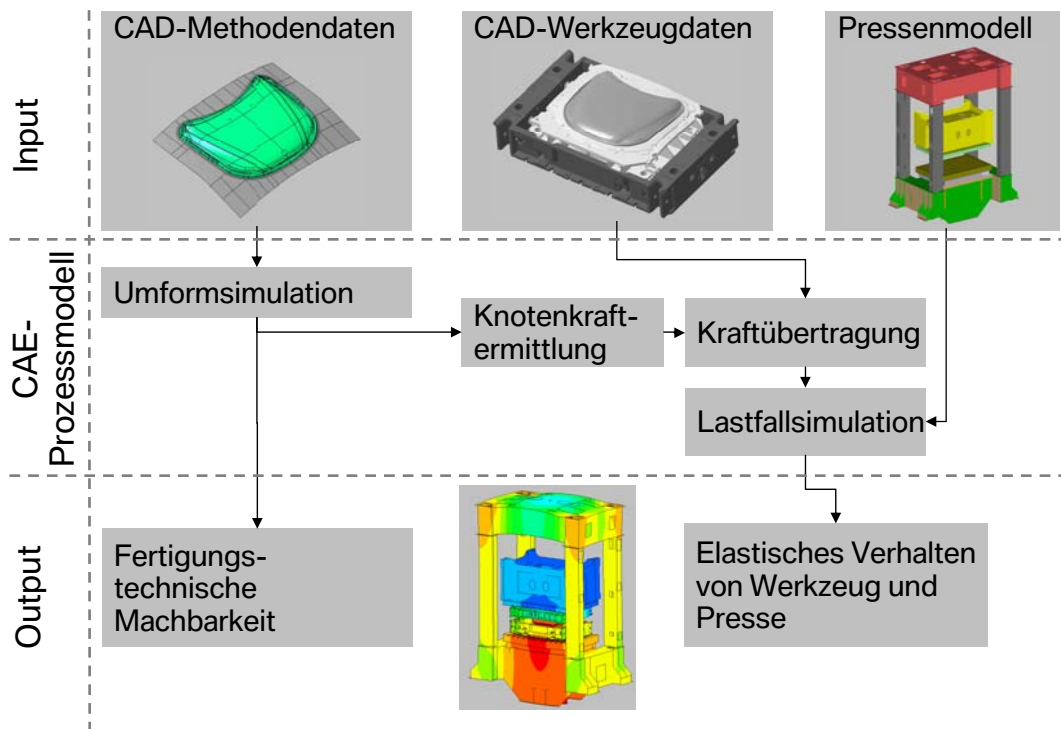
Zielsetzung

- Entwicklung eines durchgängigen Prozessmodells der Arbeitsfolge „Ziehen“
- Validierung des Prozessmodells durch geeignete Messungen
- Reduzierung des manuellen Aufwands beim Tuschieren des Werkzeugs



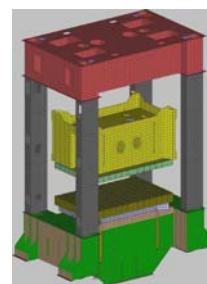
Tuschierbild

CAE-Prozessmodell. Virtuelles CAE-Prozessmodell.

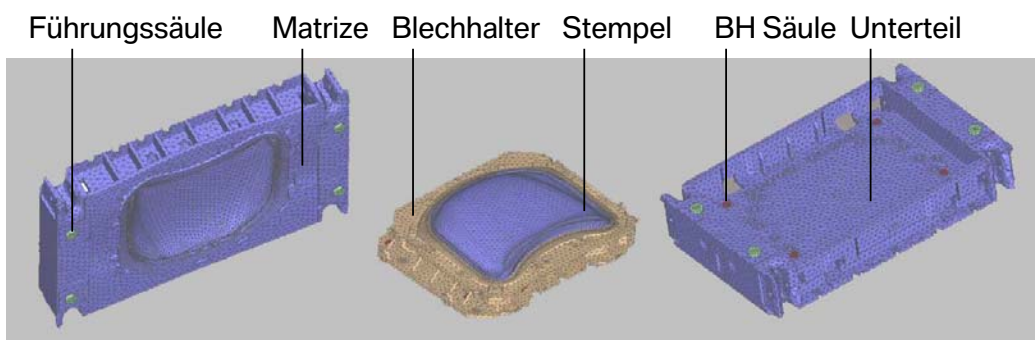


Virtuelle Modelle. Berechnungsmodell Presse - Werkzeug.

FE-Modelle	Elemente (*10 ³)	Knoten (*10 ³)	Elementart
Presse	60	48	Schalen
Presse Spannplatten	30	44	Volumen
Matrize	93	166	Volumen
Werkzeugunterteil	56	106	Volumen
Stempel	55	97	Volumen
Blechhalter	49	88	Volumen
Führungssäulen	2	3	Volumen
Summe	345	547	

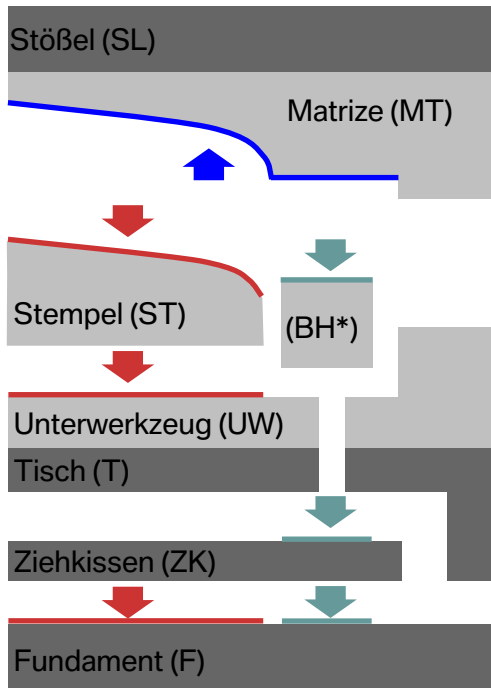


FE-Modell Presse

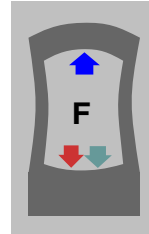


FE-Modell Umformwerkzeug BMW 5er Baureihe

Mechanisches Ersatzmodell. Prinzipskizze Pressen-Werkzeugmodell.



Konzeptmodell Berechnung:
(vereinfachte Darstellung in Umformrichtung)



$$F_{ST} = F_{UW} = 6.600 \text{ kN}$$

$$F_{BH} = F_{ZK} = 1.400 \text{ kN}$$

$$F_{SL} = F_{MT} = -8.000 \text{ kN}$$

Querkräfte in Berechnung ebenfalls enthalten.

BH*: Blechhalter

Praxislastfall – vereinfacht vs. Serienbauteil. Berechnung Tischdurchbiegung bei 8.000 kN.

Lastfall vereinfacht (LF1)

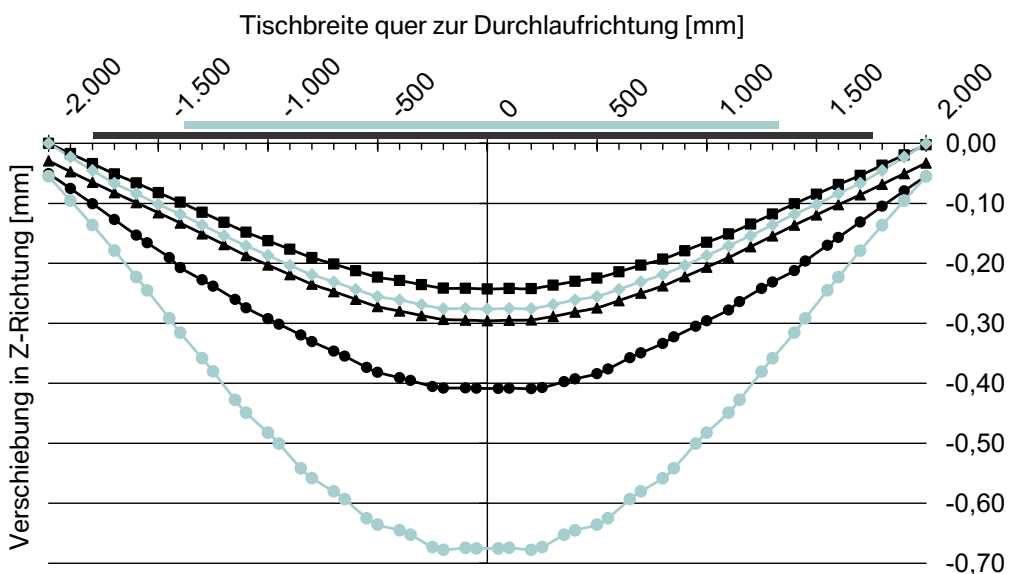


Lage der Biegelinie (Pressentisch)

vo.
mi.
hi.

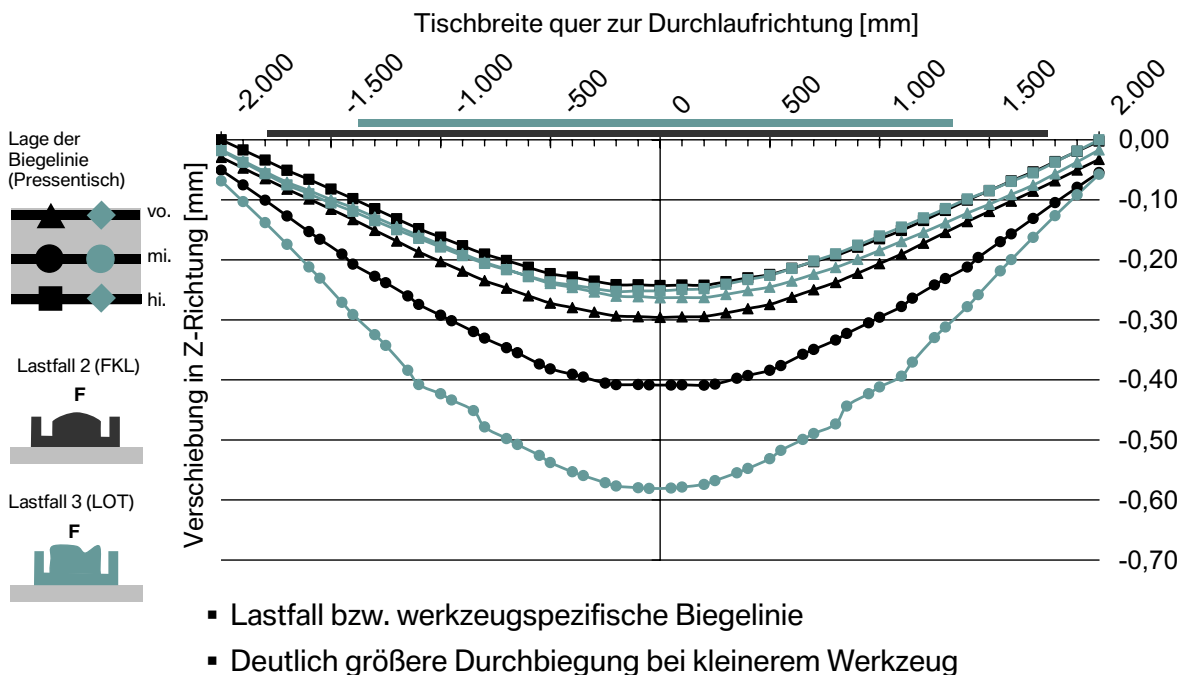
Lastfall 1 (LF1)

Lastfall 2 (FKL)

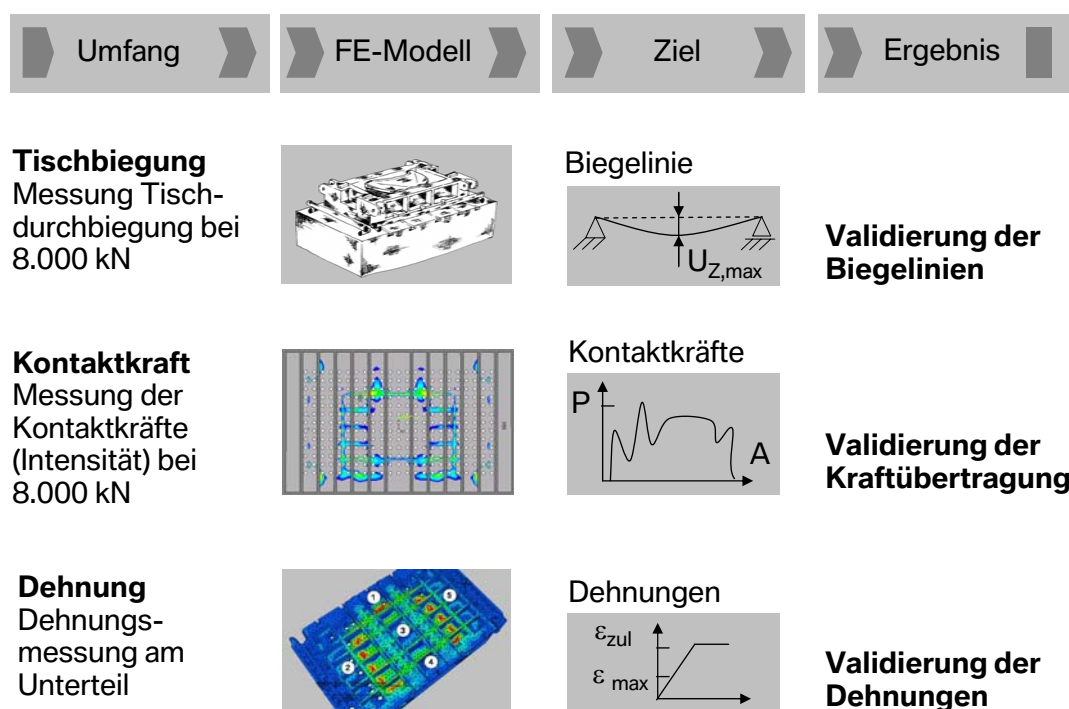


- Spezifische Biegelinie für den jeweiligen Lastfall
- Vereinfachter Lastfall divergiert stark

Praxislastfall – Vergleich zweier Serienbauteile. Berechnung Tischdurchbiegung bei 8.000 kN.

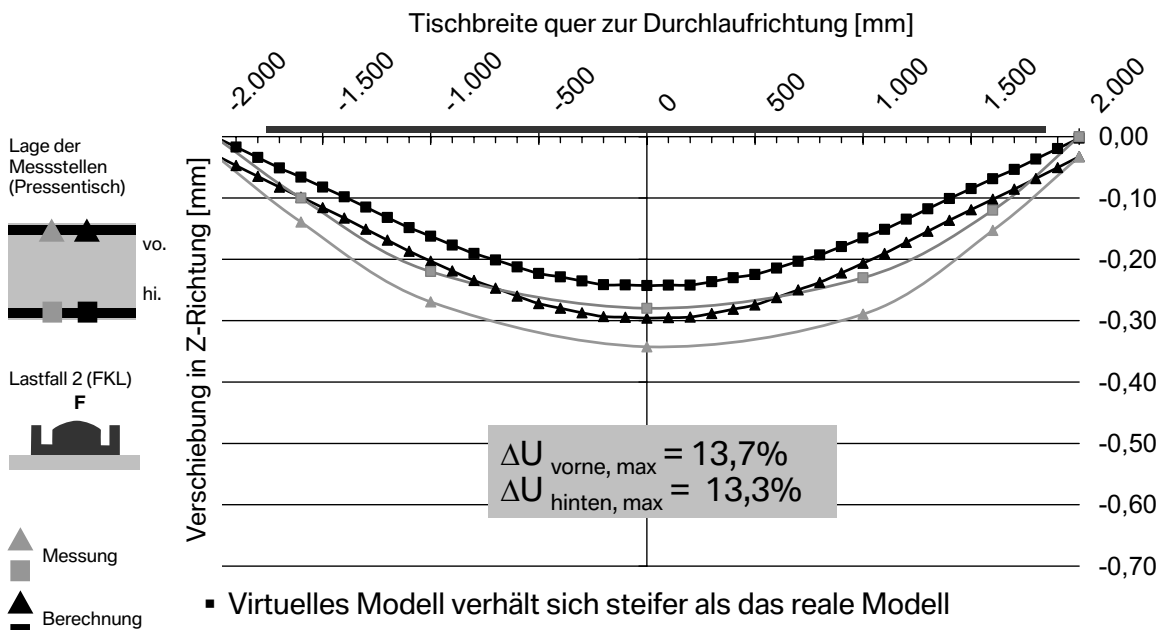


Messkonzept Werkzeug Frontklappe. Dreiteilige Absicherung des Messkonzepts.



Messkonzept – Teil 1.

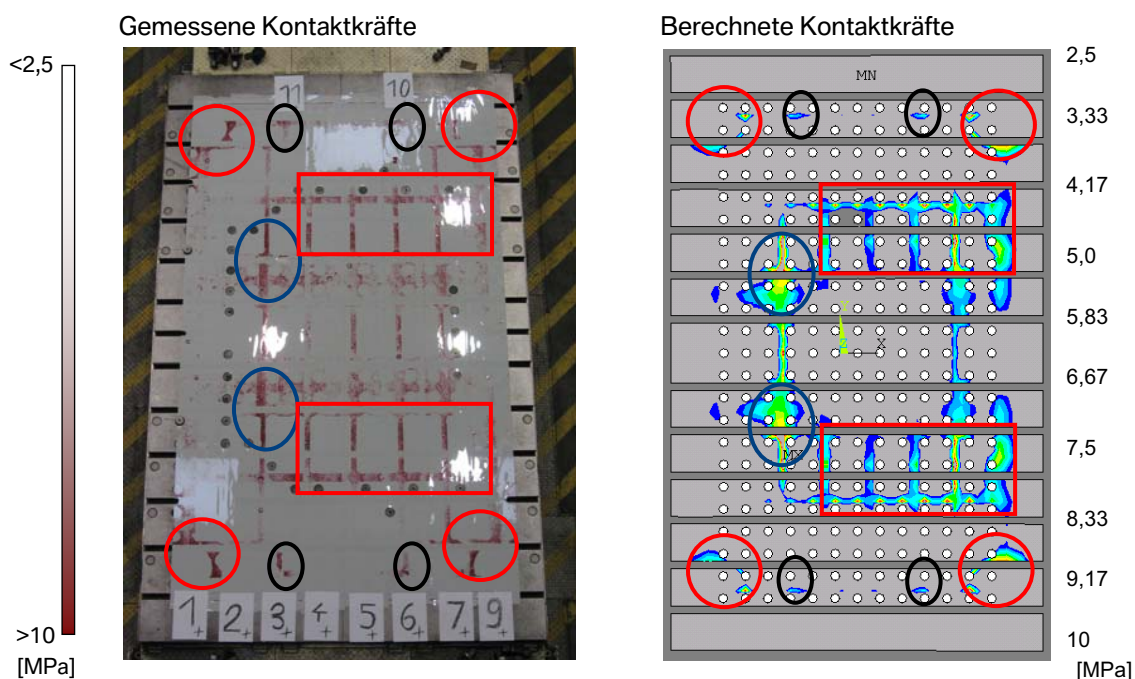
Tischdurchbiegung - Messung vs. Berechnung.



- Virtuelles Modell verhält sich steifer als das reale Modell
- Abweichung der Berechnungsergebnisse von den Messwerten beträgt rd. 13%

Messkonzept – Teil 2.

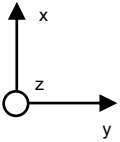
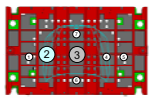
Kontaktkräfte – Messung vs. Berechnung.



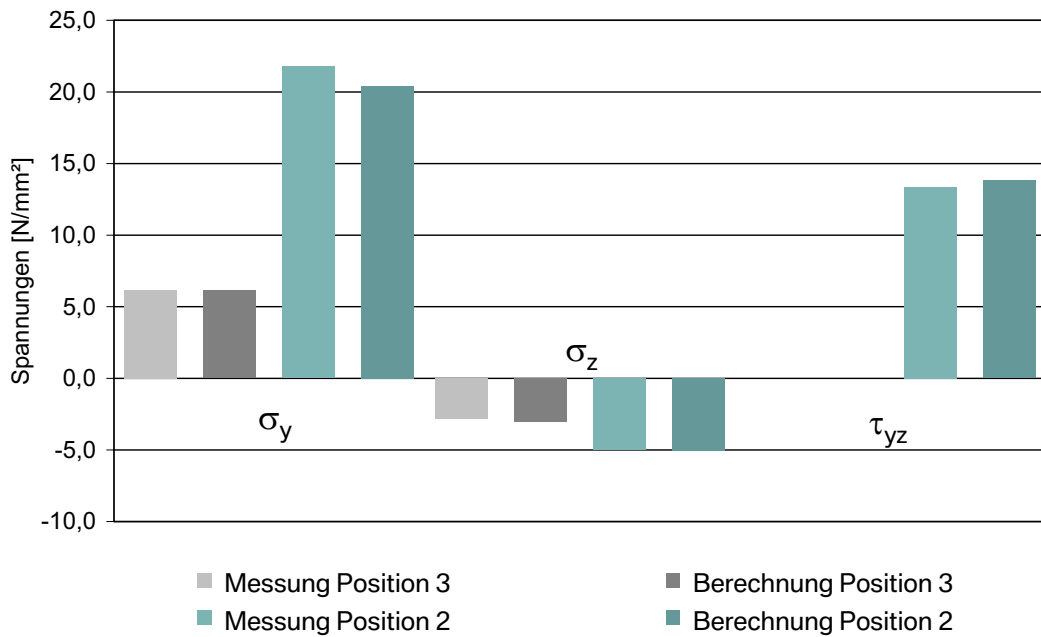
- Identischer Auflösungsbereich: 2,5 - 10 MPa

Messkonzept – Teil 3. Werkzeugdehnungen - Messung vs. Berechnung.

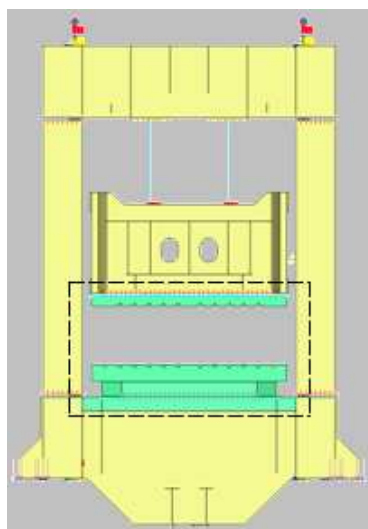
Lage der
Messstellen
(Pressentisch)



Spannungen am Werkzeugunterteil



Ausblick und Anwendungsmöglichkeit. Topologieoptimierung - Vorgehensweise.



Komplettes System als
FE-Pressmodell



reduziertes
System: FE-
Pressenersatzmodell



Optimierungsergebnis
ermittelt durch den
Einsatz eines
Pressenersatzmodells

Methodische Werkzeuggestaltung. Zusammenfassung.

- Entwicklung einer durchgängigen Methodik am Beispiel der Arbeitsfolge „Ziehen“
- Abbildung des elastischen Verhaltens von Presse und Werkzeug unter spezifischer Prozessbelastung
- Anwendung des Prozessmodells am Beispiel von zwei Serienwerkzeugen, sowie einer hydraulischen Umformpresse.
- Nachweis der Funktionalität des Prozessmodells durch dreiteiliges Messkonzept
- Niveau der Tischdurchbiegung ist kraft- und werkzeugabhängig (Bauteilgeometrie und Werkzeugabmessung)
- Basis für neue Entwicklungsmöglichkeiten (z.B. Topologieoptimierung)

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.



Weitere Potenziale der Topologieoptimierung zur Rückfederungskompensation von Blechformteilen

Dipl.-Ing. M. Schroeder

ESI GmbH
Eschborn

WEITERE POTENZIALE DER TOPOLOGIEOPTIMIERUNG ZUR RÜCKFEDERUNGSKOMPENSATION VON BLECHFORMTEILEN

Dipl.-Ing. M. Schroeder (ESI GmbH, Eschborn)

1. Einleitung

Die Herstellung von Blechformteilen im virtuellen Try Out vor der eigentlichen Realerprobung ist im automobilen Umfeld eingeführte Vorgehensweise. Dies wird regions- und herstellerspezifisch auch bis zur ersten Einschnittbetrachtung durch designnahe Entwickler dicht an den Beginn der Fahrzeugentwicklung gebracht. Diese virtuelle Erprobung von Fertigungskonzepten für Bauteile ist im eigentlichen Sinne ein qualitätsgestaltender Prozess. Denn Qualität lässt sich bekanntermaßen nicht erprüfbar, sondern ist im Produktgestaltungsprozess zu entwickeln. Die heutigen Programme der Umformsimulation, wie z.B. PAM-STAMP 2G (PS2G), geben dem Anwender hierfür die erforderlichen Werkzeuge und Methoden an die Hand. Dabei erstreckt sich das Spektrum der virtuell gestaltbaren Blechumformprozesse vom Tief- und Streckziehen über Folgeverbunde mit Zugstreifen bis hin zum Walzprofilieren, Bördeln und hydromechanischen oder superplastischen Umformen bei erhöhten Temperaturen. Die Möglichkeiten der Rohr- und Profilarbeit, wie das Dornbiegen und die Innenhochdruckumformung, seien hier nur der Vollständigkeit halber erwähnt.

Im Vergleich zur heutigen flächendeckenden Verbreitung von CAD-Programmen selbst in kleinsten mittelständischen Betrieben, hat die Umformsimulationssoftware noch deutlichen Nachholbedarf. So ist in manchen Industriezweigen das Fertigen nach Zeichnung oder auf Basis ähnlicher Teile noch akzeptierte Vorgehensweise. Auch im Werkzeugbauumfeld scheint die Simulation zum Teil noch den Charakter eines Qualitätssicherungstools zu haben. Denn die qualitätsplanende bzw. -gestaltende Optimierung der Bauteile und der Prozesse wird historisch gewachsen immer noch in der Real-Erprobung gesehen.

Vor diesem Hintergrund sind auch die Bestrebungen zur Kompensation der eigenspannungsbedingten Formabweichung der Blechformteile, im folgenden Rückfederung genannt, nicht ohne adäquate Einbindung aller beteiligten Bereiche machbar. Die klassische Trennung von Konstruktion, Engineering, Werkzeugbau und Produktion muss in eine partnerschaftliche Zusammenarbeit gewandelt werden, sollen die Anstrengungen von Erfolg gekrönt sein. Dazu ist es unerlässlich die Erfahrungen der Werkzeugmacher aus der Einarbeitung in den Prozess der virtuellen Qualitätsgestaltung einfließen zu lassen.

2. Erkenntnisse aus der Anwendung der Rückfederungskompensation

2.1 Prozess der Rückfederungskompensation mit PAM-STAMP 2G

Die Entlastung des virtuellen Bauteils durch Entfernen der Werkzeugwirkflächen und eine freie oder statisch bestimmte Lagerung zum Auffedern ist mit PS2G schon lange möglich. Vor dem Hintergrund des Ziels einer fräsfähigen, kompensierten Werkzeugoberfläche ist jedoch besondere Sorgfalt in der simulativen Vorgehensweise unerlässlich [1]. Die Einzelheiten der numerischen Randbedingungen sind Thema entsprechender Anwenderschulungen und werden daher an dieser Stelle nicht vertieft. An erster Stelle steht jedoch eine hinreichend gute Diskretisierung der Werkzeugwirkflächen und der Platine. In Verbindung mit dem sogenannten Accurate Contact,

einem nichtlinearen Kontakt, der die Elastizität der Werkzeuge berücksichtigt, kann eine sehr gute Näherung an die realen Prozessbedingungen erreicht werden.

Es werden also die Spannungen und Dehnungen so gut abgebildet, dass eine zuverlässige Rückfederungsvorhersage möglich ist. Diese ist die notwendige Grundlage der Kompensation, die durch ein Überbiegen der Werkzeugnetze in zur Rückfederung entgegengesetzter Richtung das Bauteil in die Nähe der CAD-Referenz bringen soll. Die Annäherung an ein vom Benutzer vorgegebendes Toleranzfenster, z.B. 90% des Bauteils soll im Toleranzfeld $\pm 0,5$ mm liegen, erfolgt iterativ. In der Regel in 2 bis 4 Iterationsschleifen.

Das Simulationsergebnis bleibt eine erste, gute Näherung in Relation zur Realität. Somit wird zunächst eine Momentaufnahme einer Ziehoperation oder Operationsfolge dargestellt. Materialschwankungen, der Einfluss variierender Reibung, Verschleiß der Werkzeuge usw. bleiben unberücksichtigt. Diese sind in entsprechenden Grenzmusterbetrachtungen oder einer stochastischen Analyse z.B. mit PAM-OPT zu untersuchen.

Wenn der Einarbeitungsprozess sich möglichst an der Vorgabe des virtuellen Umformprozess orientiert, so dass auch der Einzug in der Erprobung mit der Simulation übereinstimmt, lassen sich die prognostizierten Resultate nachvollziehen [2]. Gerade in größeren Betrieben liegt in der klassischen Organisationsform, mit ihrer Trennung zwischen der Einarbeitung der ersten Umformoperation und der Behandlung der Folgeoperationen, noch Optimierungspotential.

Übereinstimmende Aussage verschiedener Anwender ist die Forderung, einen robusten Prozess als Ausgangsbasis für die Kompensation der Rückfederung vorauszusetzen [2,3]. Dies lässt sich für Strukturbauteile in vielen Fällen durch das Einbringen von Verprägungen erreichen. Für Bauteile im Sichtbereich sind eher eine homogenere Verteilung der Auszüge und kleinere Radien anzustreben. Wesentliches Detail ist dann ebenfalls die Berücksichtigung geometrischer Ziehsicken an Stelle von Ersatzmodellen, da diese die mit dem Durchlauf der Sicke verbundenen Biege- und Formänderungsanteile nicht oder nur vereinfacht abbilden.

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 [2]. 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.

2.2 Kompensation mehrstufiger Umformoperationen

Insgesamt ist in der industriellen Anwendung der Rückfederungskompensation die Betrachtung der Hauptumformstufe kombiniert mit der ersten Beschnittstufe Stand der Technik [4]. 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 und zum anderen ist noch keine allgemein anwendbare Strategie für die Kompensation bestimmter Teilefamilien bekannt. Diese Thematik bietet Potential für industriennahe Forschungsvorhaben, die z.B. eine Gewichtung der überlagerten Umformoperationen hinsichtlich ihres Einflusses auf das Gesamtergebnis und sinnvolle Stellmechanismen herausarbeiten.

Aus fertigungstechnischer Qualitätssicht endet die Betrachtung des Einzelbauteils in der Spann- und Ausrichtstrategie. Gerade hinsichtlich der Formabweichung lässt sich durch die Wahl der Lager- und Spannungspunkte das Resultat stark beeinflussen. Da das Einzelteil aber nur Teil eines Zusammenbaus ist, zeigt sich hier der Übergang in das größere Feld der Topologieoptimierung des Moduls bzw. der Baugruppe.

3 Weitere Potenziale der Topologieoptimierung

3.1 Ansatz zur Optimierung der Topologie für Zusammenbauten

Die konsequente Fortsetzung der Rückfederungskompensation am Einzelteil ist die Betrachtung des Zusammenbaus. Besonders attraktiv sind hier Türen und Klappen [3], die aufgrund der überwiegend mechanischen Fügeoperationen sich komplett in einer Berechnungsumgebung, wie z.B. PAM-STAMP 2G, abarbeiten lassen. Die Zusammenführung des Außen- und Innenbleches erfolgt über das sogenannte Picking, das Übertragen der Berechnungsergebnisse in ein neues Modell. Unter Anwendung der verfügbaren translatorischen und rotatorischen Werkzeugbewegungen und ihrer Kombination lassen sich die Prozessschritte Abkanten und Falzen bzw. Rollfalzen darstellen. Wobei die Eingabe der Bahnkurve und die Rechenzeit des Rollfalzens noch Optimierungspotential bietet. Die Berechnung der Rückfederung des mechanischen Zusammenbaus kann heute explizit analog zum Einzelteil erfolgen. Die implizite Rückfederungsrechnung mit Kontakt wird aktuell entwickelt. Die Strategie zur Optimierung der Formabweichung des Zusammenbaus nach dem mechanischen Fügen stützt sich aktuell auf Erfahrungswissen von Rohbauexperten. Die Simulation eröffnet hier die Möglichkeit den Gesamtprozess und seine Einflussgrößen systematisch zu analysieren.

Für die Verzugsproblematik zweier, thermisch gefügter Bauteile wurde eine Prozessstrategie von der ESI GmbH entworfen. In Analogie zum Henne-Ei-Problem stellt sich für den Ablauf des Entwicklungsprozesses die Frage, ob zuerst die Umformtechnik oder das thermische Fügen geplant wird. Entsprechend ist entweder der Einstieg über das Prozessmodul Umformen/Kompensieren oder eine schnelle Einschrittlösung denkbar. Über die Einschrittsimulation ließe sich zumindest eine erste Näherung der zu erwartenden Spannungen und Dehnungen aus dem Umformprozess in die Fugesimulation einbringen. Im Gegensatz zur rein mechanischen Fertigung einer Tür wäre hier ein Domänenwechsel, z.B. von PAM-STAMP zu SYSWELD, erforderlich. Dies ist machbar über den Vorgang des sogenannten Mappings. Dazu werden die notwendigen Parameter, wie Spannungen, Dehnungen, Blechdicken und Anisotropie-Vektoren, von einem Netz auf das andere übertragen. Ziel des aufgezeigten Prozessschemas ist u.a., die genauere Abbildung der Rückfederung aus dem Umform- in den Schweißprozess. Dies geschieht durch die Referenzierung von Flächen als Grundlage für die in den jeweiligen Simulationsblöcken verwendeten Netze. Die Machbarkeit der Prozesskette wurde nachgewiesen und wird aktuell vom Kunden praktisch erprobt.

3.2 Einflussfaktoren aus dem Realprozess

Aus der praktischen Anwendung ergibt sich eine hinreichend gute Genauigkeit der Kompensation der Rückfederung mit dem heutigen Stand der Technik. Bisher liegen die Probleme eher noch in der praktischen Nutzbarmachung der Simulationsresultate. Weiteres Potential zur exakteren Prozessbeschreibung liegt aus Sicht unserer Kunden in dynamischen Reibmodellen, der Berücksichtigung der Chargenschwankungen des Materials und in der Berücksichtigung der Elastizität der Werkzeuge und des dynamischen Presseneinflusses.

Die Implementierung dynamischer Reibmodelle ist dem Anwender über die Benutzerschnittstelle möglich. Sobald sich hier ein dem coulomb'schen Reibmodell vergleichbarer Standard etabliert, wird dieser in die Standardoptionen integriert. Zur Beschreibung des dynamischen Presseneinflusses wurden Ersatzmodelle entwickelt, die bisher über die Benutzerschnittstelle bzw. den PAM-CRASH Solver ansprechbar sind [5].

Die Simulation der Werkzeuge als Volumenmodelle ist in PAM-STAMP 2G möglich, jedoch bedeutet eine für die Wirkflächen hinreichend feine Vernetzung eine dramatische Verlängerung der Rechenzeit. Die im Beispiel gezeigte einfache Modellierung des Blechhalters als Platte ergibt bei Simulation auf einer CPU eine zehnfache Rechenzeit. Auch die Möglichkeit auf einer Vielzahl von Prozessoren massiv parallelisiert zu rechnen ist hier sicher nicht zielführend. Daher bietet sich mit der Entwicklung eines PAM-Implizit Solvers die Möglichkeit, zukünftig explizit/implizit gekoppelt zu simulieren. Dabei wird die Methode der statischen Kondensation favorisiert [6]. Diese erfolgt auf der impliziten Seite, während explizit mit der Steifigkeitsmatrix und den verbleibenden Kontaktflächen und Auflagerpunkten simuliert wird.

Vor dem geschilderten Hintergrund des heute schon engen Zeitfensters für die Kompensation der Rückfederung bedeutet die Bereitstellung einer Werkzeuggeometrie, d.h. des Gusskörpers für den Kompensationsprozess eine weitere Herausforderung für die Prozessbeteiligten. Vor einer Praxiseinführung derartig komplexer Prozesse ist sicherlich die Fragestellung der Einflussgröße der Werkzeugelastizität auf den Gesamtprozess zu evaluieren. Für Prozesse mit distanzierterem Blechhalter und in Richtung höherer Festigkeitsklassen und Blechdicken ist sie sicherlich nicht zu vernachlässigen. Trotzdem ist es schon heute über den Accurate Contact möglich, die Elastizität der Werkzeuge näherungsweise zu beschreiben. Vernachlässigt werden dabei bisher die Einflüsse der herrschenden Biegemomente.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Kompensation der ersten Umformstufe ist heute industriell eingeführter Stand der Technik. Die Rückführung der kompensierten Netze in Richtung CAD, mittels Programmen wie Panel Shop, erlaubt die Erzeugung fräsfähiger Werkzeuggeometrien. Weitere Potentiale sind in der Optimierung von mechanisch und thermisch gefügten Zusammenbauten zu sehen, Für letztere wurde ein Ansatz zur Minimierung der Formabweichung des Zusammenbaus vorgestellt. Eine genauere Beschreibung des elastischen Verhaltens der Umformwerkzeuge in der industriell anwendbaren Form, der „statischen Kondensation“ befindet sich in der Entwicklung.

Literatur

- [1] Heath, A.:
Important Influences on Springback Simulations with PAM-STAMP; Proceedings of Springback Seminar; ESI Group, October 2007; Les Diablerets

- [2] Emrich, A.:
Experiences with Springback Simulation and Compensation at the Adam Opel GmbH; Proceedings of Springback Seminar; ESI Group, October 2007; Les Diablerets

- [3] Garabed, J.:
Issue of the geometric quality of a vehicle and solutions for springback

compensation; Proceedings of Springback Seminar; ESI Group, October 2007;
Les Diablerets

- [4] Roll, K.:
Prozesssimulation beim Presshärten; Tagungsband ICAFT 2006, Verlag
Wissenschaftliche Schriften; Zwickau
- [5] Großmann, K; et. al.:
Vergleichende Bewertung der Simulation von Umformprozessen mit elastischen
Randbedingungen; EFB-Forschungsbericht Nr. 264 (2007)
- [6] Roll, K.; Wiegand. K.:
Eine Möglichkeit zur Berücksichtigung der Werkzeugelastizität bei der
Blechumformung; in „Neuere Entwicklungen in der Blechumformung“;
MAT INFO (2006); Frankfurt

Weitere Potentiale der Topologieoptimierung zur Rückfederungskompensation von Blechformteilen

Matthias Schroeder, ESI GmbH

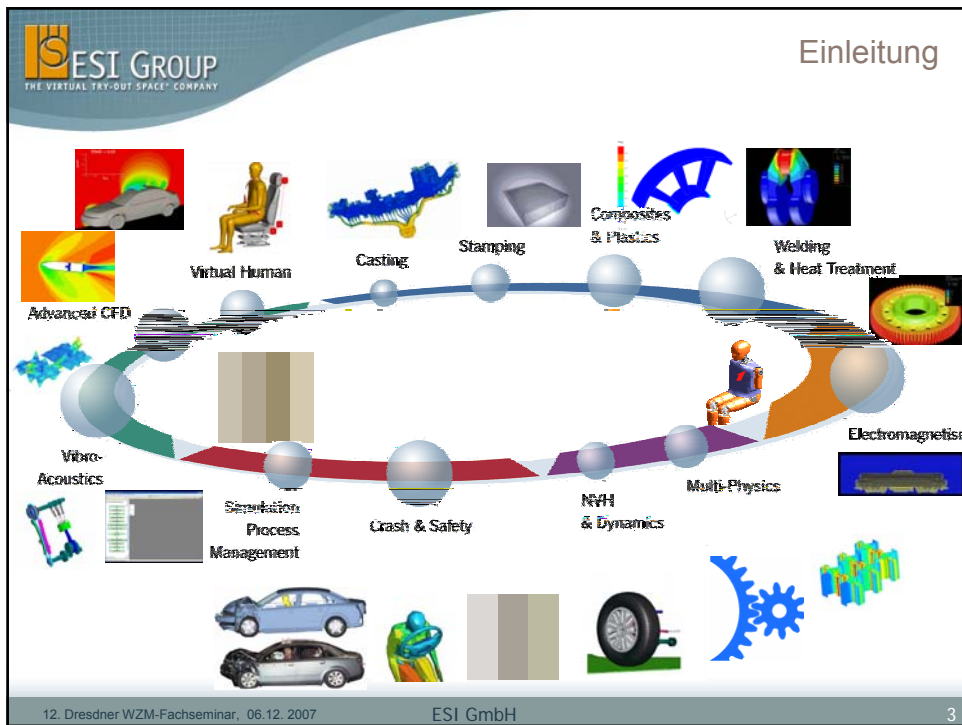
12. Dresdner WZM-Fachseminar

6. Dezember 2007

 **CREATE**
WITHOUT LIMITS

Einleitung

1. Stand der Technik in der Blechumformsimulation
 - 1.1 Prozess der Rückfederungskompensation mit PAM-STAMP 2G
 - 1.2 Erkenntnisse aus der praktischen Anwendung
 2. Weitere Potentiale der Topologieoptimierung
 - 2.1 Einflussfaktoren aus dem Realprozess
 - 2.2 Kompensation mehrstufiger Umformoperationen
 - 2.3 Ansatz zur Optimierung der Topologie für Zusammenbauten
- Zusammenfassung und Ausblick



ESI GROUP
THE VIRTUAL TRY-OUT SPACE COMPANY

Stand der Technik in der Blechumformsimulation

- **Virtueller Erprobungsraum für alle Verfahren der Blechumformung**
 - Prozess Validierung & Tuning
 - Ziehstücken
 - Folgeverbund- / Folgeoperationen
 - Gasdruck-Federn / Geteilte Niederhalter
 - Rückfederung
 - Pressenkraft Ermittlung
 - Umformen mit Wirkmedien
 - Innenhochdruckumformung
 - Außenhochdruckumformung
 - Abstreckziehen
 - Verfahrensentwicklung
 - Rotatorische Wirkbewegungen
 - Translatorische Wirkbewegungen
 - Elastomere
 - Ersatzmodelle für das Punktschweißen
 - Mapping der Bauteileigenschaften in Richtung Crash

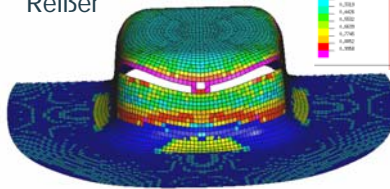
12. Dresdner WZM-Fachseminar, 06.12.2007

ESI GmbH

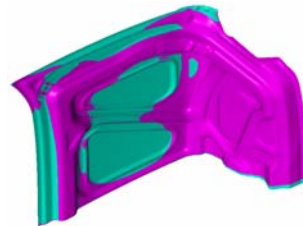
4

Validierung des Umformprozesses

Reißer



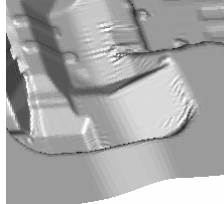
Formabweichung



Falten 1. Art



Falten 2. Art

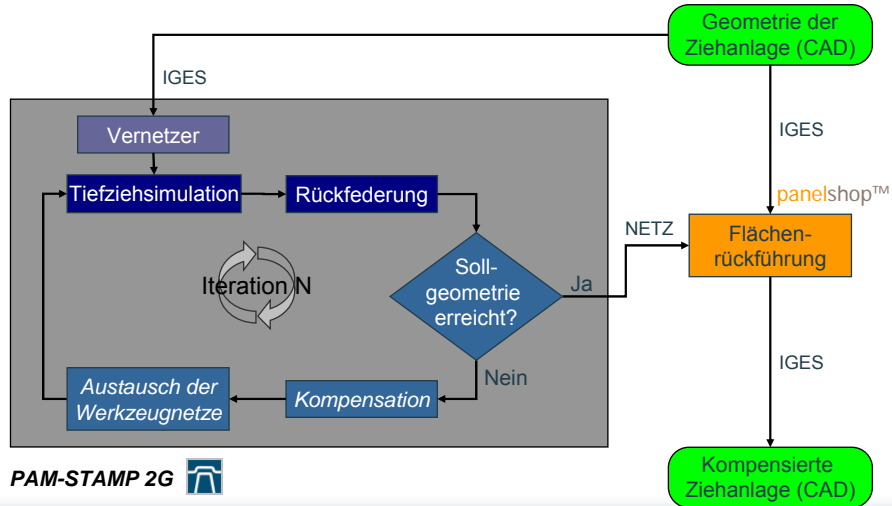


i.O. Bauteil → Mapping zum virtuellen Prototyping (z.B. für Crash-Simulation)

Ziel der Kompensation:

- Ermittlung einer Werkzeuggeometrie, welche die Herstellung eines Bauteils mit möglichst kleinem Abstand zur Sollgeometrie erlaubt.
 - Das Werkzeug wird dazu entgegen der simulierten Rückfederungsrichtung überbogen.
 - Der Ablauf des Kompensationsprozesses in PAM-STAMP 2G erfolgt automatisiert.
 - Die Flächenrückführung mittels panelshop™ ist sehr einfach.
- Reduzierung bzw. Vermeidung der klassischen Erprobungsschleifen
 - Numerische Iteration ersetzt Schleifen in der Erprobung
 - CAD-gestützte Flächenrückführung ermöglicht fräsfähige Geometrien
 - Wesentlich ist die Übertragung der Simulationserkenntnisse in den Werkzeugbau und die Erprobung

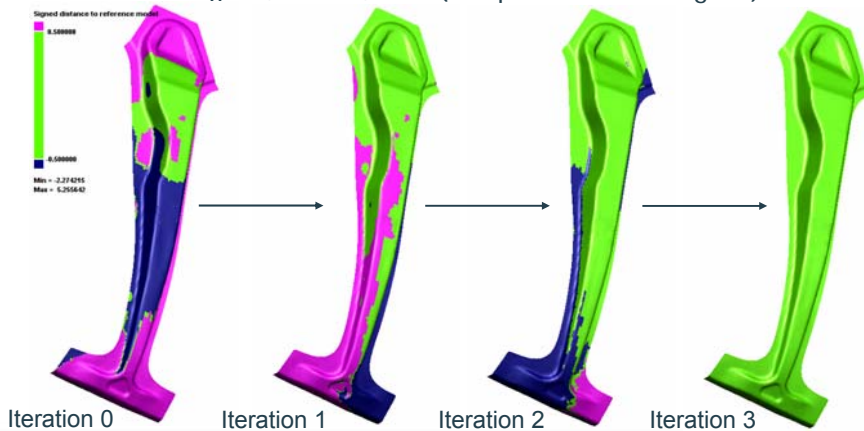
Flußdiagramm zur Rückfederungskompensation



PAM-STAMP 2G

Darstellung der Ergebnisse:

- Beispiel: vorzeichenbehafteter Abstand zum Referenzmodell, Skalierung +0,5 bis -0,5mm (entsprechend Zielvorgabe)

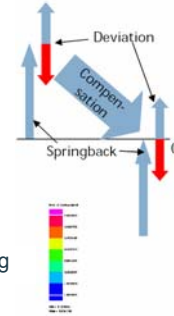
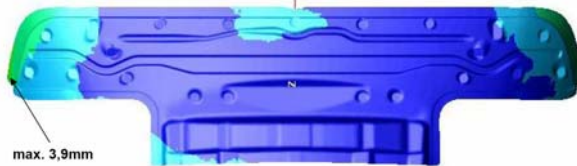


Robuste Prozesse

Optimierung des Bauteils und des Herstellprozesses:



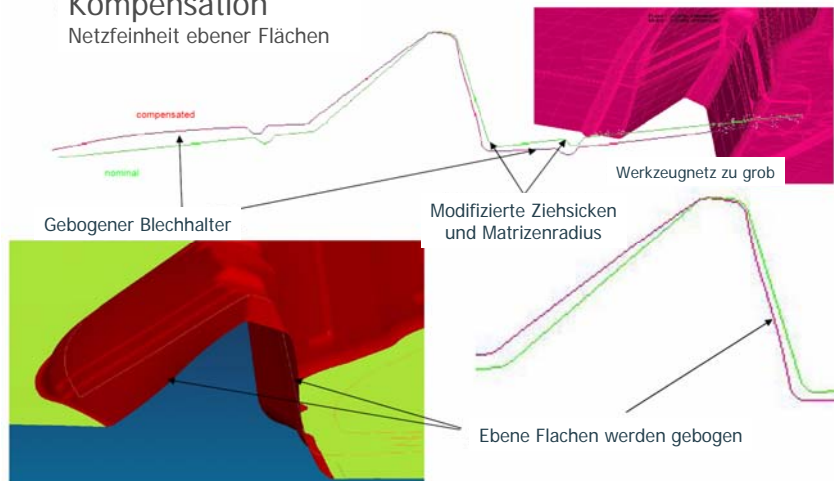
Reduzierung der Rückfederung durch Einbringen von Verprägungen. Die Kompensation hoher Rückfederungswerte ist aufgrund der Streuung der Material- und Prozessparameter nicht zielführend.



Mit freundlicher Genehmigung der Adam Opel GmbH

Kompensation

Netzfeinheit ebener Flächen

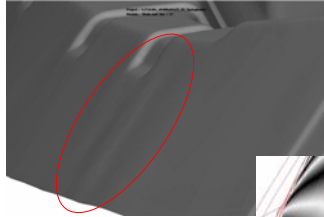


Mit freundlicher Genehmigung der Adam Opel GmbH

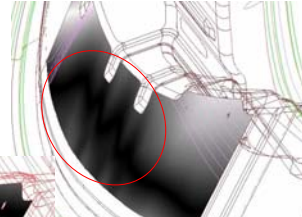
Kompensation

Prozessbedingte Formabweichungen

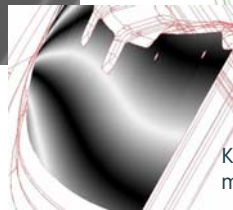
Welligkeit bedingt durch Oberflächenfehler
aus der Rückfederungsanalyse



Kompensierte CAD-Daten



(In PAM-STAMP 2G
Version 2007 verbessert)

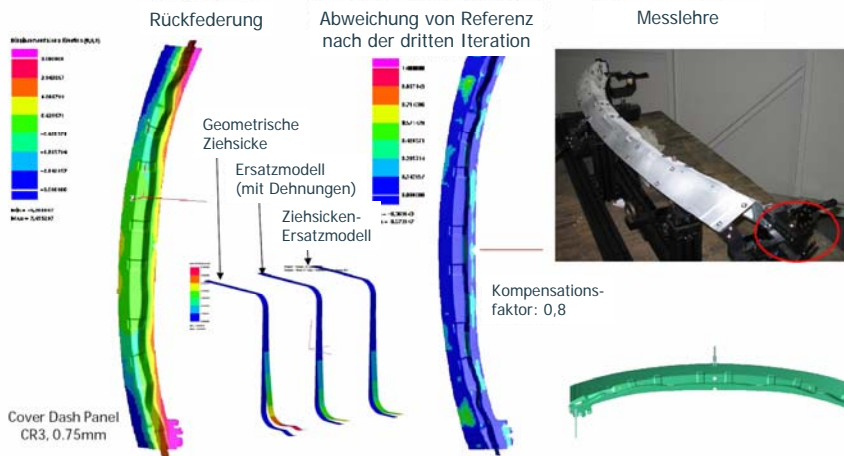


Kompensierte CAD-Daten
mit erhöhter Toleranz

Mit freundlicher Genehmigung der Adam Opel GmbH

Rückfederungskompensation

Ergebnisse

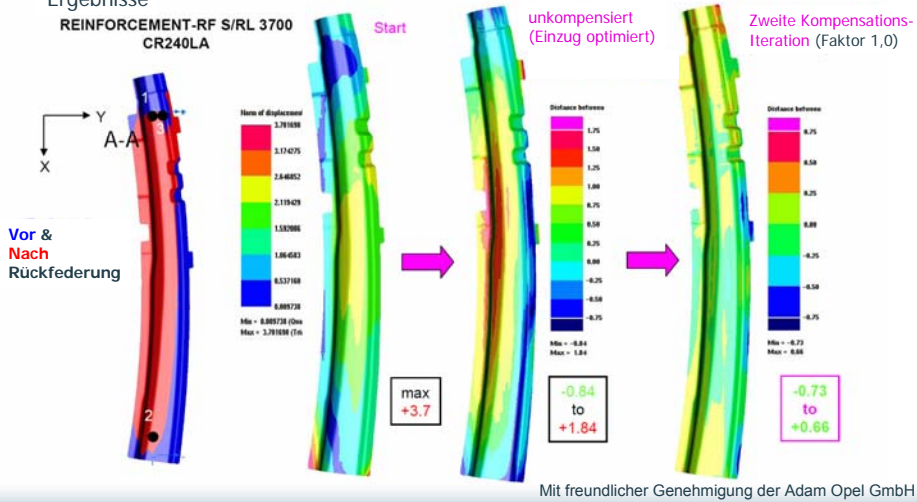


Mit freundlicher Genehmigung der Adam Opel GmbH

Rückfederungskompensation

Ergebnisse

REINFORCEMENT-RF S/RL 3700
CR240LA



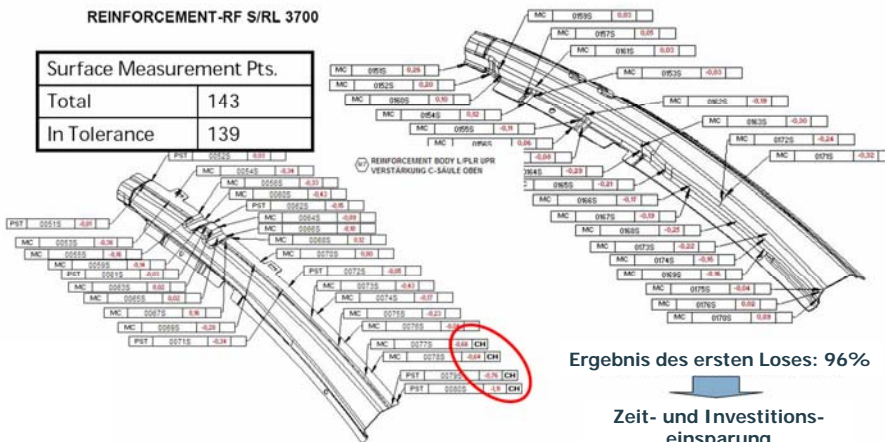
Mit freundlicher Genehmigung der Adam Opel GmbH

Rückfederungskompensation

Ergebnisse

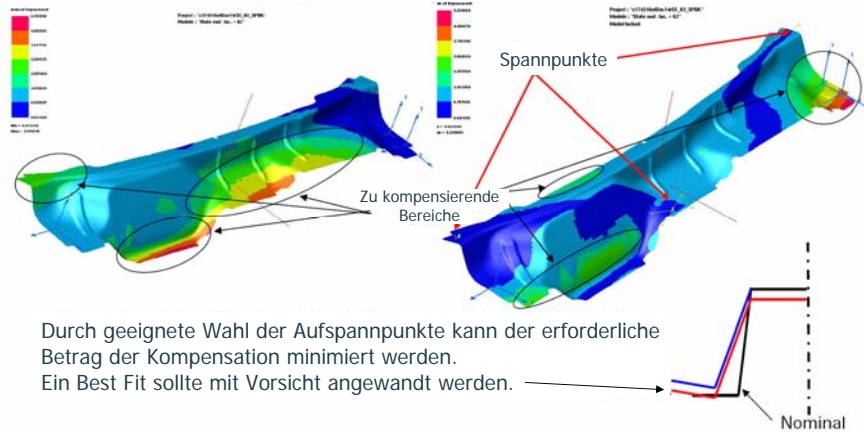
REINFORCEMENT-RF S/RL 3700

Surface Measurement Pts.	
Total	143
In Tolerance	139



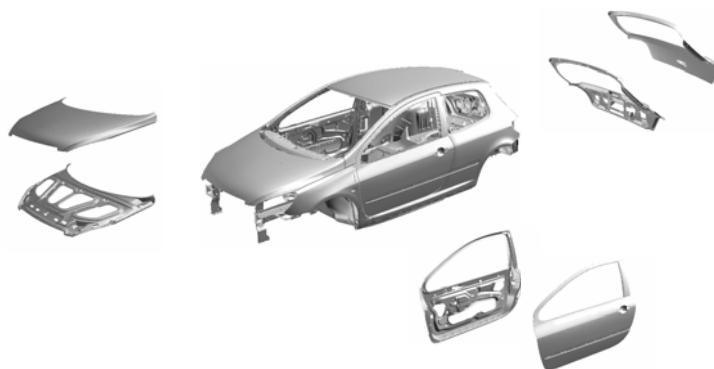
Mit freundlicher Genehmigung der Adam Opel GmbH

Rückfederungskompensation Aufspannbedingungen



Mit freundlicher Genehmigung der Adam Opel GmbH

Herausforderung: Topologieoptimierung von Zusammenbauten Türen, Hauben, Klappen und Hecktüren



Mit freundlicher Genehmigung von PSA Peugeot Citroën

Elastizität der Werkzeuge:

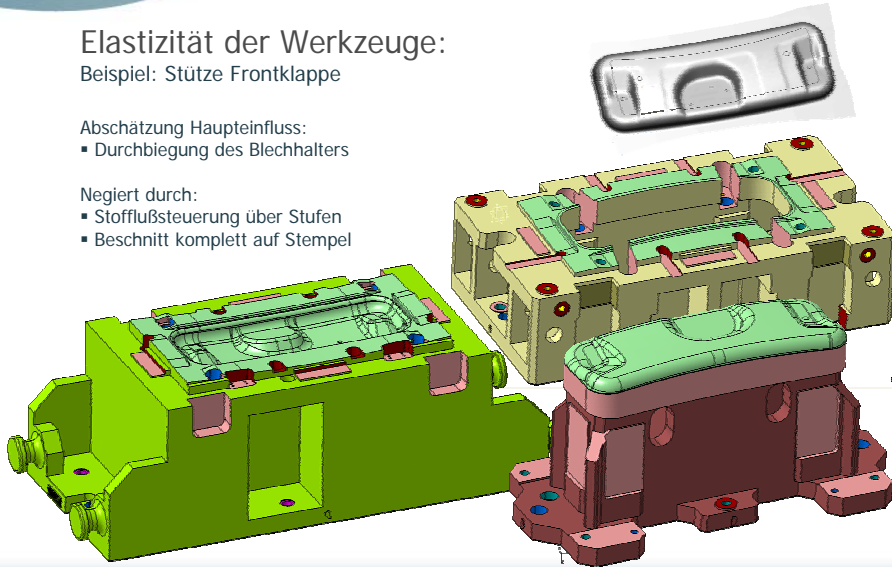
Beispiel: Stütze Frontklappe

Abschätzung Haupteinfluss:

- Durchbiegung des Blechhalters

Negiert durch:

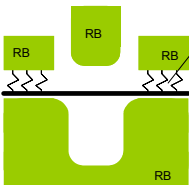
- Stoffflußsteuerung über Stufen
- Beschnitt komplett auf Stempel



Elastizität der Werkzeuge:

Vereinfachter Ansatz: "Accurate Contact"

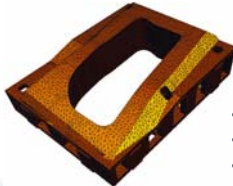
Schalen-Elemente



Kontakt Steifigkeit

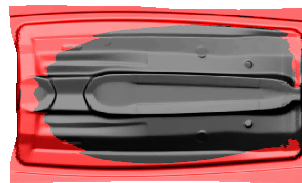
- einfache Vernetzung
- geringe CPU-Zeit
- keine Biegeeffekte

Volumen-Elemente



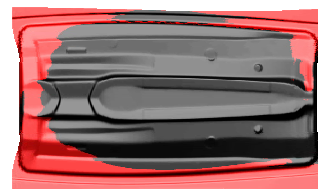
- Aufwendige Vernetzung
- hohe CPU-Zeit
- Biegeeffekte

Geringer Faktor „Werkzeughöhe“



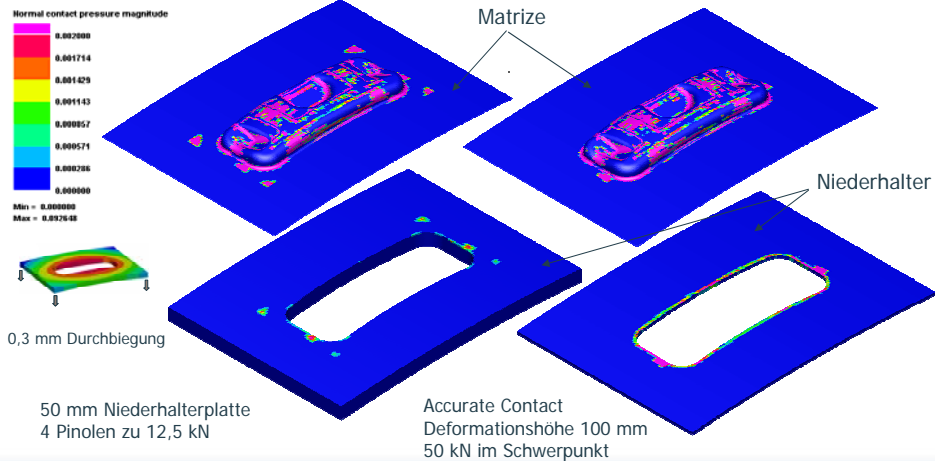
Grosse „Werkzeughöhe“

Bauteil „im UT“
Bauteil entlastet

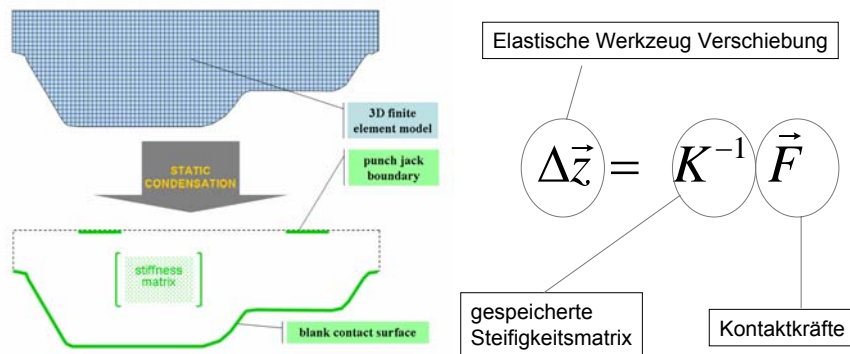


Audi Dachrahmen Benchmark

Elastische Werkzeuge:
Vergleich der Flächenpressung im UT



Elastische Werkzeuge:
Neue Entwicklung: Verbesserte Modellierung der Elastizität

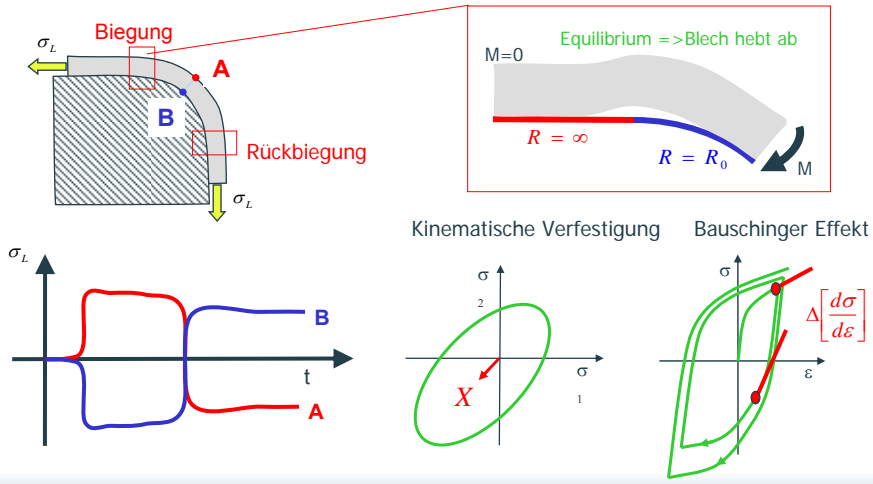


Ziel sind kondensierte Ersatzmodelle als Basis für die Umformsimulation

- PAM-STAMP explizit gekoppelt mit implizitem Solver (PAM-Implicit)

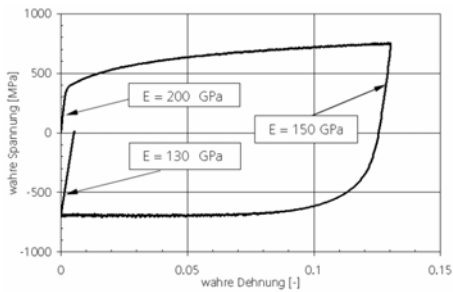
Verfügbarkeit der Werkzeuggeometrie zum Zeitpunkt der Kompensationsrechnung

Physikalische Effekte der Blechumformung:
Hin- und Rückbiegung an überlaufenen Radien

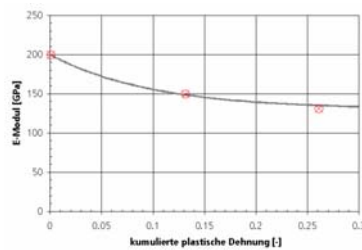


Phänomene der Blechumformung:
Variabilität des E-Moduls

Ermittelter Elastizitätsmodul für DP Stahl
(TKS, Krasovsky 2005)



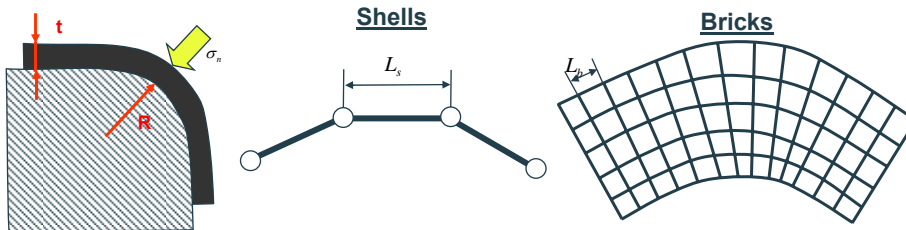
E-Modul als Funktion der
plastischen Dehnung
(Krasovsky 2005)



Yoshida Modell

$$E = E_0 - (E_0 - E_a) [1 - \exp(-\xi \bar{\epsilon})]$$

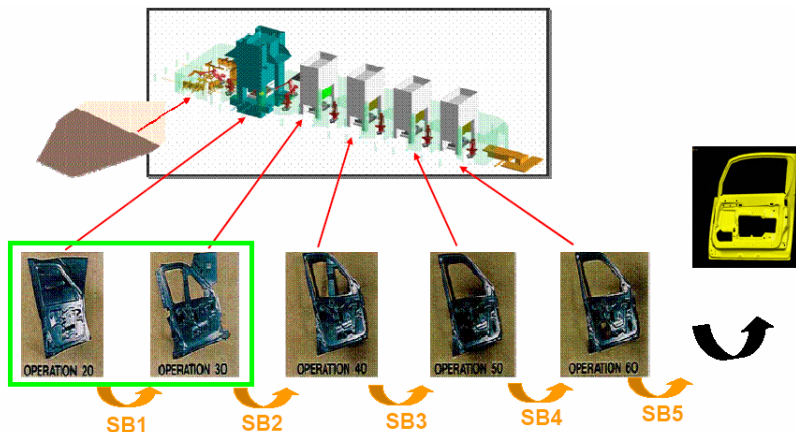
Physikalische Effekte der Blechumformung:
Normal- und Biegespannungen, z.B. an kleinen Radien



Rule of Thumb:
 Shells: $R/t > 3$ und $\sigma_n/Y < 0.1$
 Bricks: otherwise

Good aspect ratio $\Rightarrow L_s \gg L_b \Rightarrow$ $\left\{ \begin{array}{l} 1. \Delta t_b \ll \Delta t_s \\ 2. n_b = \frac{\text{Area} * \text{Thickness}}{L_b^3} \gg n_s = \frac{\text{Area}}{L_s^2} \end{array} \right\} \Rightarrow CPU_b \gg CPU_s$

Korrektur der Rückfederung an Türen:
Kompensation mehrstufiger Prozesse



→ Jede Stufe erzeugt und / oder ändert die rückfederungsbedingte Formabweichung!

Mit freundlicher Genehmigung von PSA Peugeot Citroën

Korrektur der Rückfederung an Türen:

Kompensation mehrstufiger Prozesse



Tiefzieh-
Operation



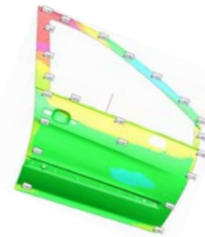
Beschneit-
Operation



Abkant-
Operation 1



Abkant-
Operation 2



- Komplexe Formänderungen in verschiedenen Stufen
 - Großer Einfluss des Beschneidens und Abkantens
 - Verdrillung und Öffnung des Rahmens
- Analyse Stufe für Stufe
- Beitrag der Simulation: Eine Hilfe für den Try Out
- Aber... der Zeitaufwand für Vorbereitung und Simulation ist noch zu hoch!

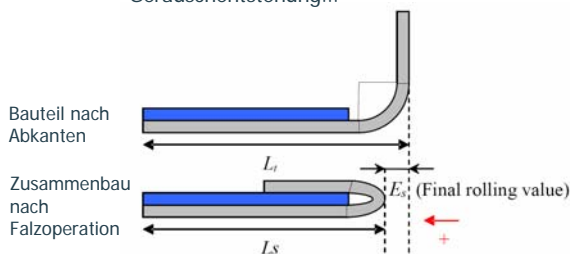
Mit freundlicher Genehmigung von PSA Peugeot Citroën

Korrektur der Rückfederung an Türen:

Zusammenbau durch Rollfalzen

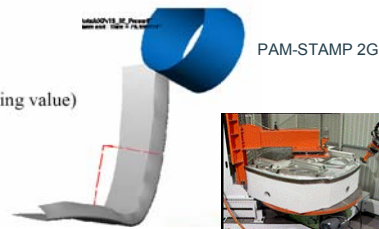
Was steht auf dem Spiel?

- Fugenmaße und Planheit
- Funktionen: Zusammenbau, Dichtigkeit, Geräuscentstehung...



Lösungswege?

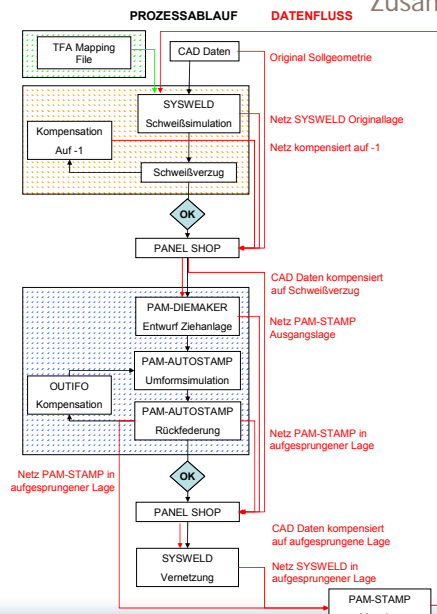
- TRY OUT (Tiefziehen / Falzen)
- Simulationen



Mit freundlicher Genehmigung von PSA Peugeot Citroën

Kompensation der Formabweichung von Zusammenbauten

Schematische Methode:
Thermisches Fügen



- Ein stabiler Umformprozess ist wesentliche Voraussetzung für eine optimale Kompensation der Rückfederung
- Die Kompensation rückfederungsbedingter Formabweichungen ist industriell erfolgreich eingeführt
- PAM-STAMP 2G erlaubt eine benutzerfreundliche, automatische Kompensation der Rückfederung
- Mittels Panel Shop können anschließend fräsfähige Werkzeugflächen generiert werden
- Vorstellung einer Methode zur Topologieoptimierung thermisch gefügter Zusammenbauten
- Potential: Optimierung mehrstufiger Umformprozesse
- Nahziel: Beherrschung der geometrischen Qualität von Türen und Klappen
- Simulation elastischer Werkzeuge über kondensierte Ersatzmodelle ist in Entwicklung

Simulation in der Umformtechnik als Optimierungswerkzeug im Anlagenbau

Dr.-Ing. A. Lieb

SMS Meer GmbH
Witten

Simulation in der Umformtechnik als Optimierungswerkzeug im Anlagenbau

Dr. Andreas Lieb

Allgemeines



Bild 1: Leistungsspektrum der SMS Meer GmbH

Das breite Leistungsspektrum der SMS Meer (Bild 1) gepaart mit der durch den Markt getriebenen Anforderung einer kontinuierlichen Optimierung und Weiterentwicklung der Prozesse erfordert leistungsfähige Entwicklungswerkzeuge. Hier spielt die Simulation der Umformprozesse eine zentrale Rolle bei der SMS Meer.

Wie die angeführten Beispiele zeigen werden zur Auslegung bzw. Optimierung der Prozesse sowohl physikalische als auch numerische Simulationsverfahren angewendet. Dabei bildet neben der in der SMS Gruppe verfügbaren Kompetenz, die in langjähriger Entwicklung am realisierten Produkt gewachsen ist, die intensive Zusammenarbeit mit ausgewählten externen Entwicklungspartnern eine wichtige Basis zur Behandlung komplexer Themen.

Für den Großteil der Fragestellungen kann der Einfluss von Werkzeug und Maschine auf den Umformprozess mit recht einfachen Modellen hinreichend genau beschrieben werden, so dass sich eine gekoppelte Simulation erübrigt. Anders verhält es sich natürlich beim Thema Werkzeugverschleiß, wo für eine effiziente Optimierung eine derartige Kopplung unerlässlich ist (siehe Anwendungsbeispiel Schrägwalzen).

Ebenso lassen sich Umformprozesse, bei denen ein technologisches Modell in die on-line-Steuerung einbezogen ist, nicht hinreichend genau abbilden, wenn dieses Modell (meist ein physikalisches) nicht mit in die Simulation eingezogen wird (siehe Anwendungsbeispiel Ringwalzen).

Anwendungsbeispiel Schrägwalzen

Bei der Herstellung nahtloser Rohre bildet das Lochen des massiven Blocks – in der Regel ein Schrägwalzprozess (Bild 2) - den Anfang der Prozesskette. Der hierbei verwendete Lochdorn unterliegt dabei sehr hohen thermischen und mechanischen Beanspruchungen. Mit Hilfe einer gekoppelten Simulation konnte die plastischen Deformationen des Lochwerkzeuges gezielt berechnet werden. Basierend auf diesen Ergebnissen wurde das Lochwerkzeug hinsichtlich Form, Kühlung, Material und Beschichtung optimiert, wodurch eine deutliche Erhöhung der Lebensdauer erreicht wurde (Bild 2).

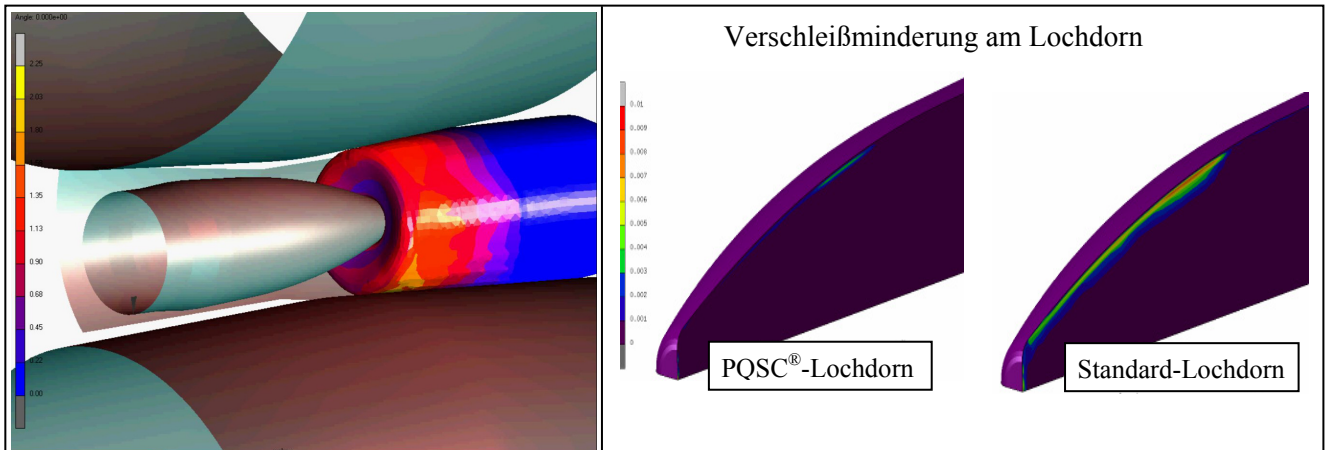


Bild 2: FEM-Simulation des Schrägwalzprozesses (links) und Lochdornbelastung (rechts)

Anwendungsbeispiel Großrohreinformung

Das sogenannte JCO[®]-Verfahren (Bild 3) zur Herstellung längsnahtgeschweißter Großrohre bietet hinsichtlich Flexibilität und Investitionskosten deutliche Vorteile gegenüber der klassischen U-O-Einformung, bei allerdings deutlich geringerer Produktivität.

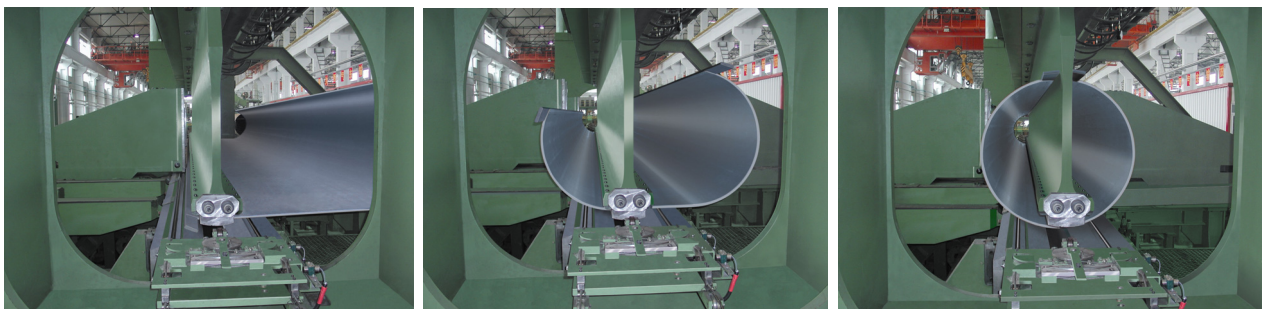


Bild 3: Rohreinformung nach dem JCO[®]-Verfahren

Gerade die große Flexibilität des Verfahrens stellt beim Einfahren neuer Produkte eine besondere Herausforderung dar. So geschieht dies in der Regel manuell, wobei die Qualität des geformten Schlitzrohres stark vom Bediener abhängig ist, dem es überlassen ist, die vielfältigen Einflussgrößen durch entsprechende Maschineneinstellungen zu kompensieren.

Insbesondere ist in diesem Zusammenhang der Einfluss der Blechqualität zu nennen, welcher durch neue Werkstoffe mit hohen E-Modulen immer mehr an Bedeutung gewinnt. In diesen Fällen ist eine realitätsnahe Simulation von großer Bedeutung, um eine geeignete Umformstrategie zu finden oder überhaupt die Herstellbarkeit des Rohres zu überprüfen.

In Zusammenarbeit mit der Salzgitter Mannesmann Forschung wurde deshalb der gesamte Umformprozess nach der FE-Methode simuliert: neben der Einformung des Schlitzrohres gehört

hierzu noch ein vorgeschalteter Anformprozess, der die Blechkanten im Bereich der späteren Schweißnaht gesondert umformt, sowie ein nachgeschalteter Expandier-Prozeß, bei dem das Rohr nach dem Schweißen gezielt gedehnt wird.

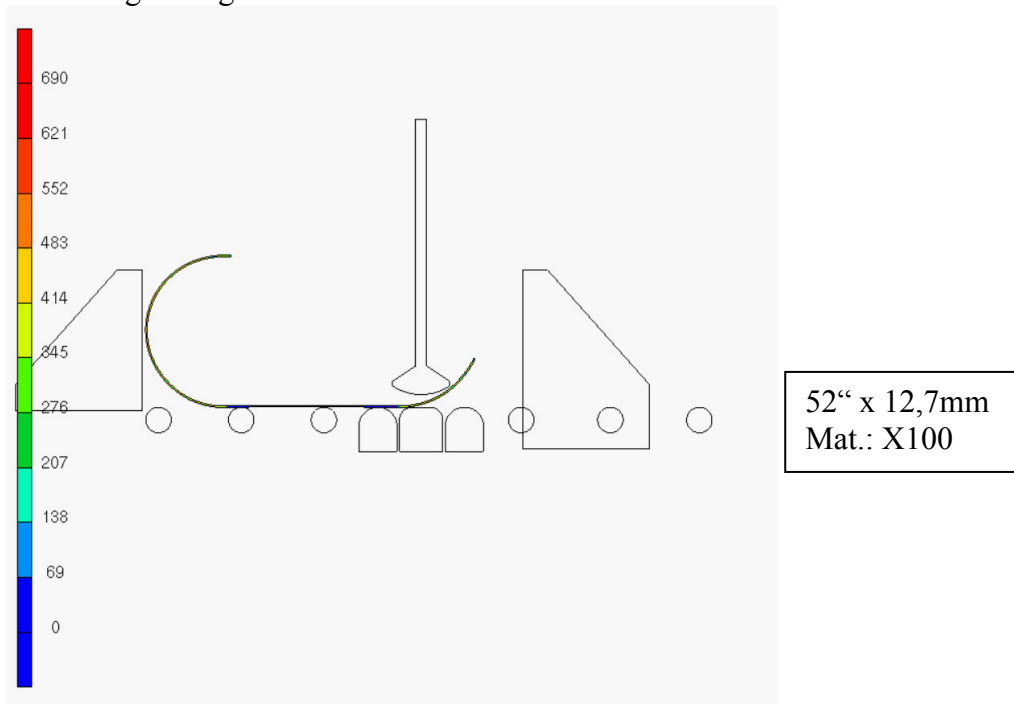


Bild 4: FEM-Simulation des Einformprozesses (Quelle: SZMF)

Durch die Simulationsergebnisse konnten unter anderem wertvolle Hinweise bei der Bearbeitung neuer Werkstoffe mit hoher Elastizität gewonnen werden, deren Umformung auf klassischen U-O-Pressen nicht oder nur eingeschränkt möglich ist. Ebenso zeigte die Simulation, wie sich der Einformprozess durch entsprechende Variation der Werkzeugparameter optimieren lässt.

Auf Grundlage dieser Ergebnisse wird nun in einem nächsten Schritt die vollständige Automatisierung des Einfahrprozesses in Angriff genommen. Hierzu wird die FEM-Simulation mit einem virtuellen Steuerungssystem einer Presse gekoppelt (siehe auch unter „Anwendungsbeispiel Ringwalzen“).

Anwendungsbeispiel Ringwalzen

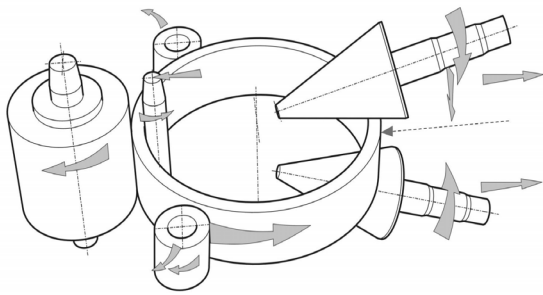
Für den Ringwalzprozess steht bereits seit längerem ein Simulationssystem zur Verfügung, das auf physikalischen Prozessmodellen basiert.

Als Zielgrößen lassen sich neben dem Zusammenhang zwischen Vor- und Endform einige wichtige integrale Größen ermitteln, wobei sich die Betrachtung zunächst auf Rechteckquerschnitte beschränkt.

Darüber hinaus lassen sich bestimmte Kategorien von profilierten Ringquerschnitten (z.B. Flansche, Radreifen) mit Hilfe der Standardsimulation behandeln. Dabei werden die profilierten Querschnitte unter Beachtung der speziellen Randbedingungen (Reibung, Querfluss etc.) in äquivalente Rechteckquerschnitte umgerechnet und so in gewohnter Weise simuliert.

Sollen jedoch komplexere Querschnittsformen betrachtet oder aber lokale Größen berechnet werden, ist dies mit einer physikalischen Simulation mit vertretbarem Aufwand nicht mehr realisierbar. Hier bietet sich die FE-Methode als geeignetes Werkzeug an.

Programmsystem ROLLTECH



Simulationsergebnisse:

- **Produktgeometrie** (Querschnittsverlauf, Durchmesser,.....)
- **Prozessdynamik** (Kräfte, Momente, Geschwindigkeiten,.....)
- **Verlauf der mittleren Ringtemperatur**
- **Umformgrößen** (Zustellung, Abnahme, Breitung)

Bild 2: Physikalische Simulation des Ringwalzprozesses

War die FEM-Simulation des Ringwalzprozesses aufgrund der benötigten hohen Rechenzeiten lange Zeit nur mit Abstrichen möglich, so wurde vor ein paar Jahren am IBF in Aachen ein Verfahren entwickelt, den Ringwalzprozess mit vertretbarem Aufwand nach der FE-Methode zu simulieren. Die adaptive Vernetzung des Ringes mit einer verfeinerten Netzstruktur nur in der Nähe der Umformzonen senkt den Rechenaufwand dramatisch. Ein parallel mitlaufendes Geometrienetz gewährleistet dabei die Konsistenz der mitgeführten Daten (Bild 4).

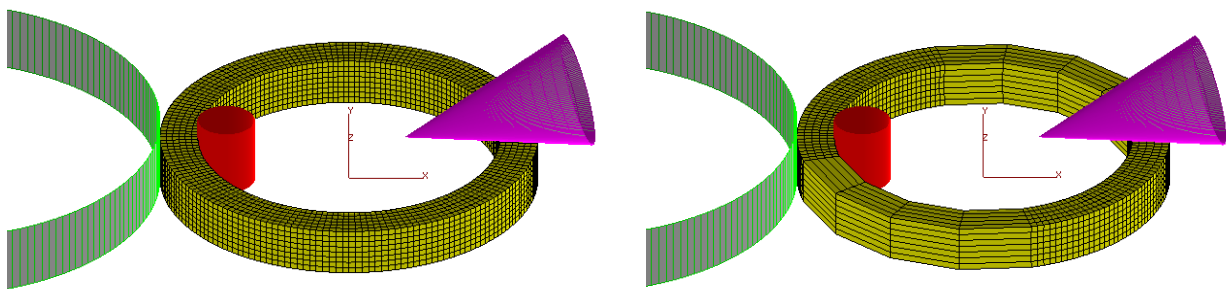


Bild 4: Geometrienetz (links) und Rechennetz (rechts) für die FEM-Simulation des Ringwalzprozesses (Quelle: IBF, RWTH Aachen)

Typischerweise wird die FEM-Simulation dabei mit Sollwertverläufen gespeist, die einem vergleichbaren Ringwalzprozess entnommen wurden. Hierbei ergeben sich naturgemäß Abweichungen zwischen Simulation und Realität, die nicht nur die Aussagekraft der Ergebnisse sondern in ungünstigen Fällen auch die Stabilität der Simulationsrechnung negativ beeinflusst. Zusammen mit dem IBF in Aachen wurde nun für 2008 ein F&E-Projekt vereinbart, in dem die FEM-Simulation direkt an eine virtuelle Maschinensteuerung angekoppelt wird (Bild 4).

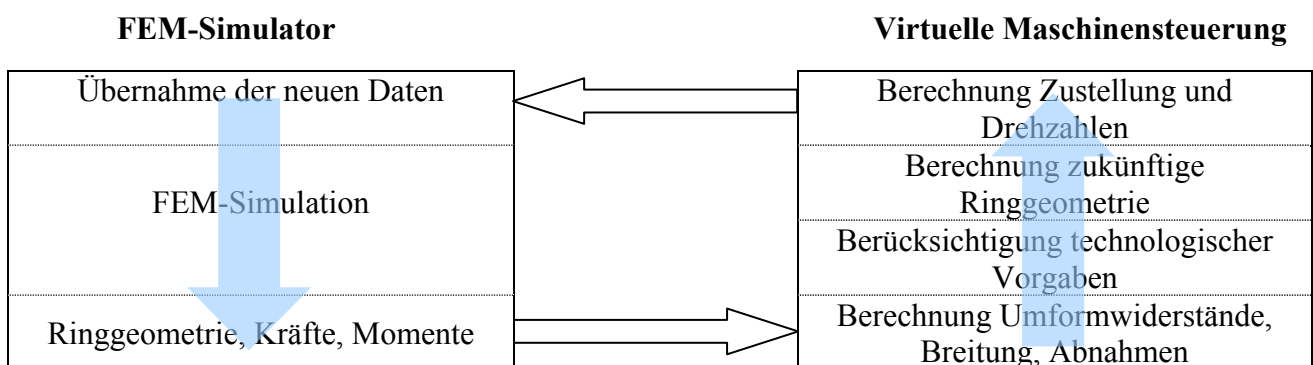


Bild 4: Kopplung von Maschinensteuerung und FEM-Simulation

**Berechnung der Wechselwirkungen
zwischen Umformmaschine und -prozess
auf Basis der Integration eines Pressenmodells
in die FE-Fließpress-Simulation**

Prof. Dr.-Ing. habil. U. Engel
Dipl.-Ing. Th. Kroiß
Dipl.-Ing. R. Völkl

Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

BERECHNUNG DER WECHSELWIRKUNGEN ZWISCHEN UMFORMMASCHINE UND –PROZESS AUF BASIS DER INTEGRATION EINES PRESSENMODELLS IN DIE FE-FLIESSPRESSSIMULATION

Autoren: Thomas Kroiß, Ralf Völkl, Ulf Engel

1 Grundlagen

Die Kaltmassivumformung bietet das Potential, Bauteile mit hoher Maß- und Formgenauigkeit sowie Oberflächengüte in hohen Stückzahlen herzustellen. Vor allem aus wirtschaftlicher Sicht besteht der Wunsch nach der Fertigung toleranzhaltiger Bauteile, die keine Nacharbeit erfordern [1, 2, 3]. Im Gegensatz zum Schmieden bei hohen Temperaturen kommt es bei der Kaltmassivumformung nicht zu einer Verzunderung der Werkstückoberfläche und zu thermischem Verzug beim Abkühlen des Werkstücks von hohen Temperaturniveaus. Bei der Kaltmassivumformung weist der Werkstückwerkstoff jedoch gegenüber dem Schmieden sehr hohe Fließspannungen auf.

Auf Grund der hohen Fließspannung des Werkstückwerkstoffs treten während der Umformung hohe Spannungen und Dehnungen auf, die zu einer Deformation des Umformwerkzeugs und einer deutlichen Auffederung der Umformmaschine führen. Die Konsequenzen daraus sind Maß- und Formabweichungen des Werkstücks. Die Wechselwirkungen zwischen Umformmaschine, Werkzeug und -prozess erschweren dabei die Optimierung der Bauteilabmessungen.

Um kaltmassivumgeformte Bauteile möglichst hoher Präzision in einbaufertiger Qualität herstellen zu können, ist es daher notwendig, den Einfluss von Prozess- und Konstruktionsparametern sowie deren Wechselwirkungen auf die Maß- und Formabweichungen zu berechnen und durch eine geeignete Werkzeugkontur, Werkzeugkonstruktion und Prozessauslegung zu kompensieren. Grundlage hierfür ist die Modellierung des Umformvorgangs sowie des Werkzeug- und Maschinenverhaltens.

2 Berechnung und Modellierung des Maschinenverhaltens

2.1 Lösungsansätze zur Maschinenmodellierung

Die Modellierung wurde am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie (LFT) beispielhaft an einem Vollvorwärts-Fließpress-Prozess in Verbindung mit zwei weggebundenen Umformmaschinen durchgeführt. Basis hierfür ist die Simulation des Beispielprozesses mit dem FE-Programm MSC.Superform. Für die Modellierung der Umformmaschine findet die Methode der Finiten Elemente in der Praxis ebenfalls immer mehr Anwendung [4], da sich das Maschinenverhalten mit Hilfe der FE-Simulation hinreichend genau abbilden lässt [5, 6, 7, 8]. Darüber hinaus kann das Maschinenverhaltens beispielsweise mit Hilfe eines Mehrkörpersystems modelliert werden.

Der Nachteil dieser Modellierungsansätze liegt in der aufwändigen Modellerstellung sowie dem hohen Berechnungsaufwand. Dies zeigte auch eine exemplarische FE-Simulation des Winkelhebels der Kniehebelpresse Komatsu-Maypress MKN 63/6A.

Zur Verifikation der Simulationsergebnisse wurden mit dieser Maschine Fließpressversuche durchgeführt und die Dehnung des Winkelhebels in Abhängigkeit der Umformkraft mit einem Dehnungsmessstreifen aufgezeichnet. Die Dehnung des Winkelhebels in Abhängigkeit der Kraft verhält sich dabei linear. Der Vergleich zwischen Messung und Simulation zeigte eine Abweichung von ca. 7%. Um das Verhalten der gesamten Presse abbilden zu können, müssten die übrigen Maschinenkomponenten, die sich im Kraftfluss befinden, ähnlich aufwendig modelliert und unter Berücksichtigung der Maschinenkinematik miteinander verknüpft werden.

Eine weitere, vereinfachte, Möglichkeit zur Abbildung des Maschinen- und Werkzeugverhaltens ist die Verwendung eines linearelastischen Modellkörpers, z.B. in Form einer Feder, dem die Steifigkeit von Maschine und Werkzeug zugewiesen wird. Wenn das Werkzeug- und Maschinenverhalten durch ein solches lineares Modell hinreichend genau beschrieben werden kann, lässt sich der Aufwand zur Modellierung des Werkzeug- und Maschinenverhaltens deutlich reduzieren.

2.2 Berechnung der Maschinen- und Werkzeugsteifigkeit

In der Realität treten nicht nur an der Umformmaschine, sondern auch am Werkzeuggestell bis hin zum Stempel Deformationen auf, die den tatsächlichen, d.h. für den Umformprozess wirksamen, Stempelweg beeinflussen. Deshalb müssen auch diese Komponenten in die vollständige Abbildung des Werkzeug- und Maschinenverhaltens einfließen. Deformationen finden somit bis an die Wirkfuge zwischen Werkzeug und Werkstück statt, die jedoch messtechnisch nicht zugänglich ist. Das erschwert die Erfassung der Deformation und damit der Steifigkeit. Um dennoch die Steifigkeit von Werkzeug und Maschine berechnen zu können, wurde ein Ansatz entwickelt, der sich die im Falle des Beispielprozesses Vollvorwärts-Fließpressen unmittelbare Abhängigkeit der Werkstücklänge vom tatsächlichen Stempelweg zu Nutze macht.

Neben der Änderung des Stempelwegs durch die Auffederung von Umformmaschine, Werkzeuggestell, Kraftmessdose und Stempel hat auch die radiale Deformation des armierten Werkzeugs sowie die elastische Rückfederung des Werkstückwerkstoffs Einfluss auf die gesamte Änderung der Werkstücklänge Δl_1 (Gleichung 1). Dieser Anteil Δl_2 wird in der FE-Prozesssimulation berücksichtigt. Daher ergibt sich der Anteil der Längenänderung Δl_{ges} , der durch das Federelement abgebildet werden soll, zu $\Delta l_{ges} = \Delta l_1 - \Delta l_2$.

$$\Delta l_1 = \underbrace{\Delta l_{Matr., Armierung} + \Delta l_{el. Rückfederung_WS}}_{\Delta l_2} + \underbrace{\Delta l_{Masch} + \Delta l_{Gestell, KMD, Stempel}}_{\Delta l_{ges}} \quad (1)$$

Mit der Änderung ΔF der Umformkraft, welche die Änderung der Deformation und damit der Werkstücklänge verursacht, können Steifigkeiten von Maschinen- und Werkzeugkomponenten berechnet werden. ΔF ist die Differenz der Umformkräfte im Unteren Totpunkt (UT) der Umformmaschine, da der Stempelweg im UT entscheidend für die Ausbildung der Werkstücklänge ist. Die Gleichungen zur Ermittlung der Steifigkeiten lauten:

$$C_1 = m \cdot \frac{\Delta F}{\Delta l_1}; \quad C_2 = m \cdot \frac{\Delta F}{\Delta l_2}; \quad C_{ges} = m \cdot \frac{\Delta F}{\Delta l_{ges}} \quad (2)$$

$$\text{mit} \quad m = \frac{A_0 - A_1}{A_1} = \frac{d_0^2 - d_1^2}{d_1^2} \quad (3)$$

C_{ges} soll dem linearen Maschinen- und Werkzeugmodell zugewiesen werden, ist unbekannt und wird aus C_1 und C_2 berechnet. Da die Federelemente seriell angeordnet sind und sich die Nachgiebigkeiten somit addieren, gilt:

$$\frac{1}{C_1} = \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_{ges}} \quad \text{und damit} \quad C_{ges} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_2 - C_1} \quad (4)$$

C_1 wird experimentell und C_2 aus der Prozesssimulation bestimmt. Um im Experiment Kraft- (ΔF) und damit Längenänderungen Δl_1 messen zu können, wurden Fließpressversuche mit zwei

Werkstoffen unterschiedlicher Festigkeit durchgeführt. Es kamen die Werkstoffe 100Cr6 ($k_f = 1080 \frac{N}{mm^2}$; $\varphi = 0,5$; $\dot{\varphi} = 1$) und 20MnB4 ($k_f = 730 \frac{N}{mm^2}$; $\varphi = 0,5$; $\dot{\varphi} = 1$) zum Einsatz.

Die Experimente wurden am LFT auf zwei weggebundenen Pressen durchgeführt, die sich in ihrem Aufbau deutlich unterscheiden. Dies waren die Kniehebelpresse Komatsu-Maypress MKN 63/6A und die Schnellläuferpresse Bruderer BSTA 300-85B, die im Einzelhub betrieben wurde. Die Komatsu Kniehebelpresse besitzt ein Einständer C-Gestell, für das auf Grund des nicht geschlossenen Pressenrahmens eine hohe Auffederung zu erwarten war. Die Bruderer Schnellläuferpresse zeichnet sich durch eine besonders steife, geschlossene 4-Säulen-Bauweise aus.

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen sind in *Bild 1* dargestellt. Es zeigte sich, dass ein nahezu lineares Verhalten der Pressen im UT vorliegt. Die Bruderer Schnellläuferpresse in 4-Säulen-Bauweise weist mit $C_{1_B} = 207 \frac{kN}{mm}$ eine deutlich höhere Steifigkeit auf als die Komatsu-Kniehebelpresse ($C_{1_K} = 127 \frac{kN}{mm}$).

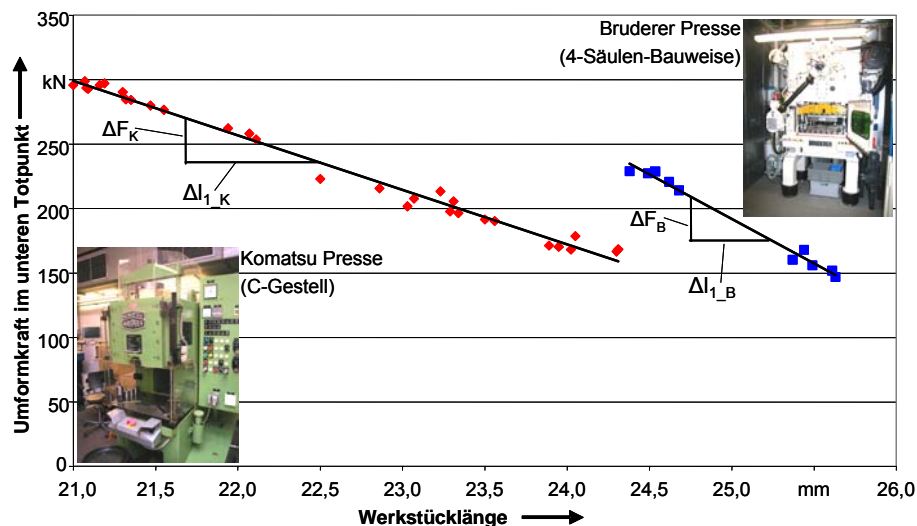


Bild 1: Experimentelle Berechnung der Steifigkeit C_1 der Umformpressen

Um aus C_1 gemäß (4) die Gesamtsteifigkeit C_{ges} berechnen zu können, wurde die Längenänderung Δl_2 ermittelt, die durch die Auffederung des armierten Werkzeugs entsteht. Δl_2 wird überwiegend durch radiale Deformation verursacht. Da sich diese jedoch auf die Werkstücklänge auswirkt, wird C_2 wie eine Steifigkeit in Wirkrichtung der Maschine behandelt.

Dazu wurde ein 2D-axialsymmetrisches FE-Simulationsmodell des Beispielprozesses erstellt. Es wurde eine thermisch-mechanisch gekoppelte, kombinierte Werkstück-Werkzeuganalyse mit elastischem Werkzeug durchgeführt. Das geometrische Übermaß der beiden Armierungsringe, durch das die Matrize vorgespannt wird, wurde ebenfalls abgebildet. Nach Simulation der Umformung wurde auch das Auswerfen des Werkstücks simuliert, um die elastische Rückfederung zu berücksichtigen. Mit diesem Modell wurde jeweils eine Fließpress-Simulation mit den Materialdaten der Versuchswerkstoffe 100Cr6 und 20MnB4 durchgeführt. Die Längendifferenz der Werkstücke unterschiedlichen Werkstoffs zeigte einen Unterschied von $\Delta l_2 = 0,27mm$ bei einem Kraftunterschied von $\Delta F = 68,3kN$ im UT. Daraus folgt mit (2) $C_2 = 764 \frac{kN}{mm}$. Mit Gleichung (4)

berechnen sich die gesuchten Steifigkeiten C_{ges} für die Komatsu Kniehebel-Pressen zu $C_{ges_K} = 152 \frac{kN}{mm}$, für die Bruderer Schnellläufer-Pressen zu $C_{ges_B} = 284 \frac{kN}{mm}$.

2.3 Verifikation der berechneten Steifigkeit

Die berechneten Steifigkeiten wurden mit Hilfe eines Federelements in die FE-Prozesssimulation integriert. Zur Verifikation der Steifigkeiten und des linearen Modells wurden mit den Werkstoffen 100Cr6 und 20MnB4 jeweils Versuche bei Raumtemperatur sowie mit beheiztem Werkzeug bei 100 und 140°C durchgeführt, um den Einfluss der Werkzeugerwärmung in der Serienfertigung zu untersuchen. Im Simulationsmodell wurde die Beheizung des Werkzeugs als Randbedingung aufgebracht. Über die Variation des Reibfaktors wurden die Umformkräfte im UT aus der Simulation an die Versuchsergebnisse angepasst. Die sehr gute Übereinstimmung der Werkstücklängen zwischen Versuch und Simulation in *Bild 2* bestätigt, dass die reale Maschinenauffederung mit dem linearen Modell sehr gut beschrieben werden kann.

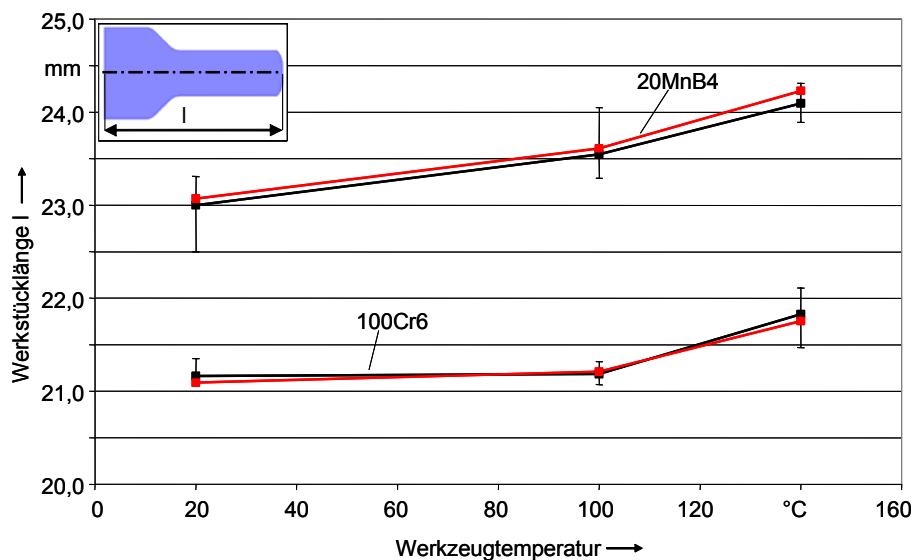


Bild 2: Vergleich Simulation – Versuch an Werkstücklänge l ; (Komatsu Kniehebelpresse)

3 Berechnung und Prognose der Wechselwirkungen

Da das Prozessmodell mit integrierter Federsteifigkeit das Maschinen- und Werkzeugverhalten sehr gut abbildet, können auf Basis dieses Modells die Wechselwirkungen zwischen den Maschinen- und Werkzeugkomponenten sowie dem Umformprozess untersucht werden. Dabei werden verschiedene Einflussfaktoren, z.B. Werkzeugabmessungen, Stempelweg und Vorspannungszustand des Werkzeugs auf mehreren Stufen variiert. Die Veränderung einer Zielgröße in Abhängigkeit zweier Einflussgrößen kann in einer Antwortfläche dargestellt werden.

Die Berechnung der Wechselwirkungen in einem vollfaktoriellen Versuchsplan ist sehr aufwändig, da die notwendige Berechnungsanzahl i_v in Abhängigkeit der Anzahl der Einflussgrößen n und der Variationsstufen k mit $i_v = k^n$ zunimmt. Im vollfaktoriellen Fall müssten für $n = 10$ und $k = 3$ somit $i_v = 59048$ Berechnungen erfolgen, um die Wechselwirkungen vollständig abbilden zu können. Dieser Berechnungsaufwand ist in der Praxis nicht durchführbar.

Um den Aufwand zu reduzieren, soll auf Basis einer Sensitivitätsanalyse und von Prozesswissen aus einer Datenbank eine Prognose der Wechselwirkungen durchgeführt werden. Der Berechnungsaufwand nimmt in der Sensitivitätsanalyse, d.h. bei Variation jeweils eines Einflussfaktors, nur linear mit der Anzahl von Prozesseinflussgrößen zu. Die Berechnungsanzahl

ergibt sich zu $i_s = (k - 1)n + 1$. Mit $n = 10$ und $k = 3$ sind hier lediglich $i_s = 21$ Berechnungen notwendig. Auf Basis der Prognose der Wechselwirkungen wird anschließend eine Optimierung der Werkzeug- und Prozessauslegung zur Verbesserung der Bauteilgenauigkeit erfolgen.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Für den Beispielprozess Vollvorwärts-Fließpressen wurde ein Ansatz entwickelt, der mit Hilfe von Versuchen und der FE-Prozesssimulation die Berechnung der Gesamtsteifigkeit aus weggebundener Umformmaschine und Werkzeug ermöglicht. Die berechnete Steifigkeit wurde über ein Federelement in die Prozesssimulation integriert. Es wurde eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Versuch und der Prozesssimulation mit integriertem Maschinenmodell nachgewiesen. Die lineare Modellierung des Werkzeug- und Maschinenverhaltens ist somit hinreichend genau. Mit dem entwickelten Simulationsmodell können Wechselwirkungen zwischen Maschinen- und Werkzeugkomponenten sowie dem Umformprozess berechnet werden. Um den Berechnungsaufwand hierfür zu reduzieren, soll im weiteren Projektverlauf eine Prognose der Wechselwirkungen auf Basis einer Sensitivitätsanalyse und Datenbank realisiert werden.

Literatur

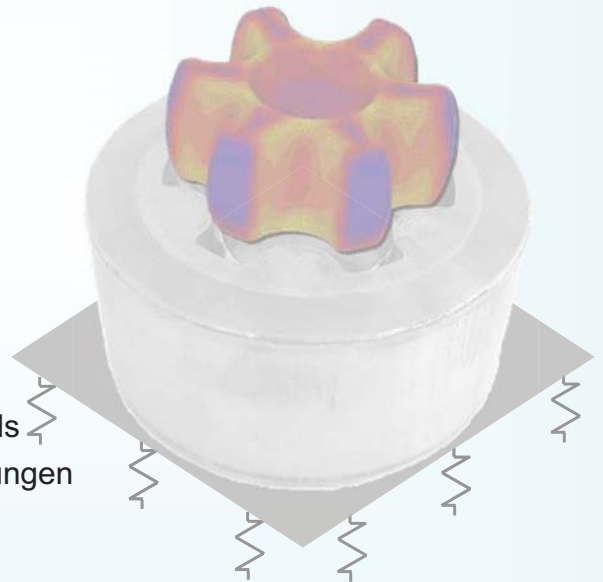
- [1] Doege, E.; Behrens, B.-A.:
Reduce process chains due to the precision forging of gears-effect on the conventional forging technology. Journal of Materials Processing Technology 71 (1997), S. 14-17
- [2] Schmöckel, D.:
Konturnah Fertigen in der Kaltmassivumformung. Konferenz-Einzelbericht: 13. Umformtechnisches Kolloquium, 11 (1990), S. 6.1-6.10
- [3] Groche, P.; Schneider, R.:
Umformtechnik für die Produkte von Morgen. Konferenz-Einzelbericht: UKD 2000, 7. Umformtechnisches Kolloquium (2000), Bamberg: Meisenbach, S. 1-8
- [4] Behrens, A.; Landgrebe, D.:
Berechnung statischer und dynamischer Matrizenbelastungen mit der FEM. Umformtechnik 31 (1997), S. 36-39
- [5] Huhn, S.; Siegert, K.:
Anwendung der virtuellen Realität in der Prozessoptimierung und Werkzeugentwicklung. In: wt Werkstattstechnik 92 (2002) 10, S. 472-476
- [6] Großmann, K.; Wiemer, H.:
Anforderungen an die Simulation des Systems „Maschine-Werkzeug-Prozess“ in der Umformtechnik. Tagungsband „Simulation im Maschinenbau – Softwaretools und Anwendungen in Lehre, Forschung und Praxis, Dresden, 2000
- [7] Denkena, B.; Rehling, St.; Tracht, K.:
Simulationsmodul für Maschinendynamik im Rahmen eines Fertigungssimulationssystems. In: wt Werkstattstechnik 92 (2002), S. 223-225
- [8] Neumaier, T.; Schmidt-Jürgensen, R.:
Automatische Werkzeugkorrektur mit der Finite-Elemente-Methode. VDI-Z Integrierte Produktion Special (2002) 1, S. 67-70

Berechnung der Wechselwirkungen zwischen Umformmaschine und –prozess auf Basis der Integration eines Pressenmodells in die FE-Fließpresssimulation

Thomas Kroiß, Ralf Völkl, Ulf Engel

Inhalt:

1. Einführung
2. Berechnung der Maschinensteifigkeit
3. Verifikation des linearen Maschinenmodells
4. Berechnung / Prognose der Wechselwirkungen
5. Zusammenfassung



© LFT 07 / 1

Einführung Herausforderungen für die Kaltmassivumformung

Vorteile der Kaltmassivumformung:

- Geringer thermischer Verzug
- Hohe Oberflächengüte
- Kaltverfestigung des Werkstoffs

➔ Potential zur Herstellung einbaufertiger, hochpräziser Bauteile

Herausforderungen:

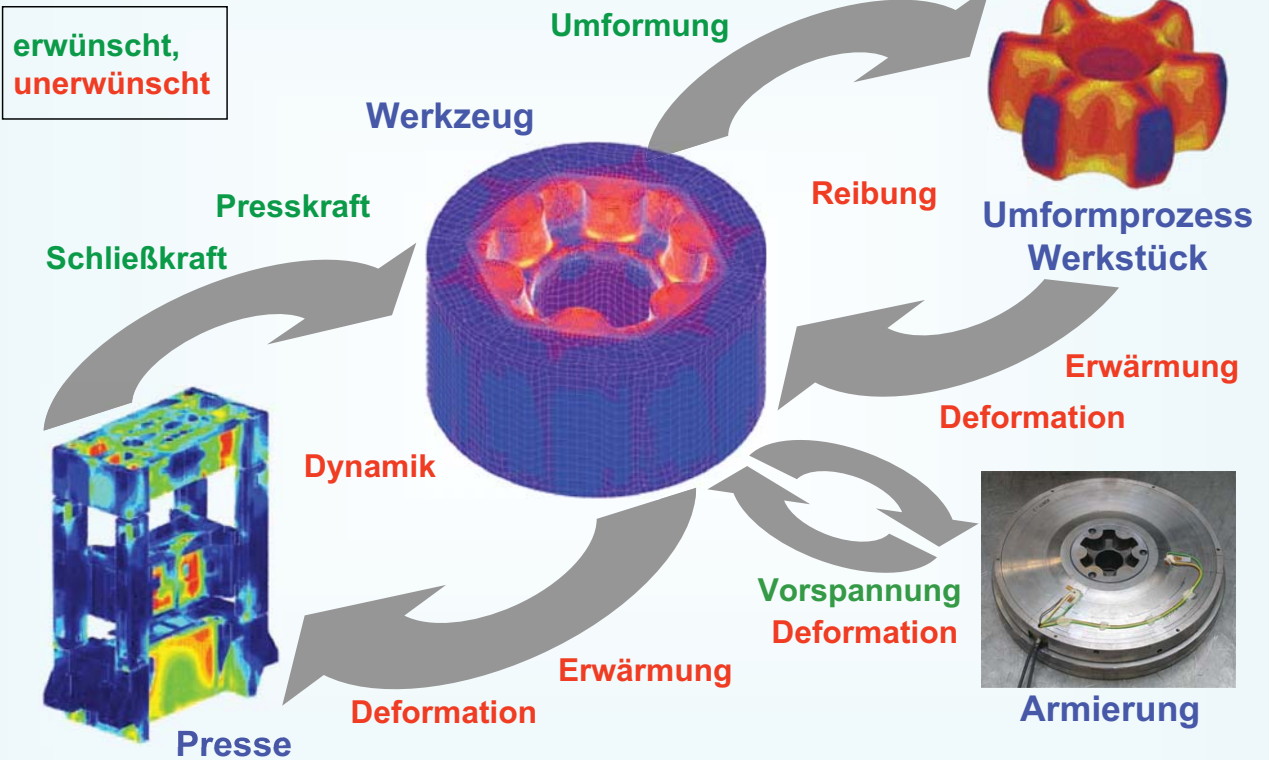
- Hohe Fließspannung des Werkstückwerkstoffs
- Hohe Werkzeugbelastung und –deformation
- Hohe Maschinenbelastung und –deformation

➔ Wechselwirkungen erschweren die Optimierung der Bauteilgenauigkeit

Ziel:

- Modellierung der Wechselwirkungen zwischen Umformmaschine, -werkzeug und –prozess
- Kompensation durch geeignete Werkzeug- und Prozessauslegung

© LFT 07 / 2

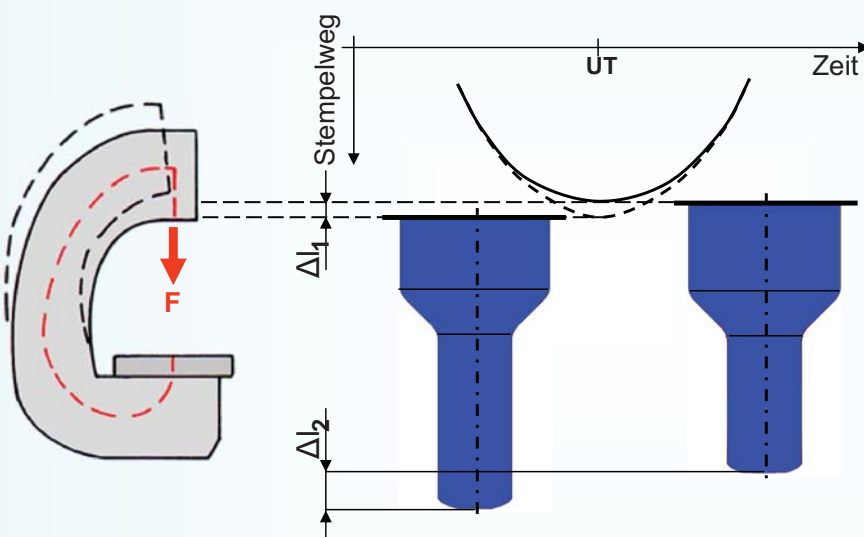


Umformmaschine

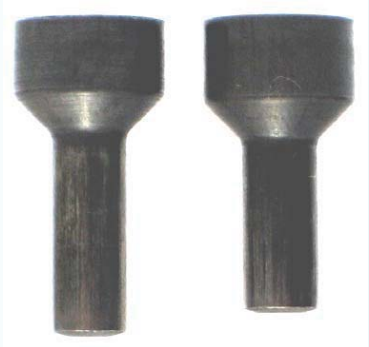
Stempelweg / Werkstücklänge

Realität

Beispielprozess
Vollvorwärts-
Fließpressen



Fließspannung
niedrig hoch



Auffederung
mechanischer
Pressen unter
Kraftwirkung

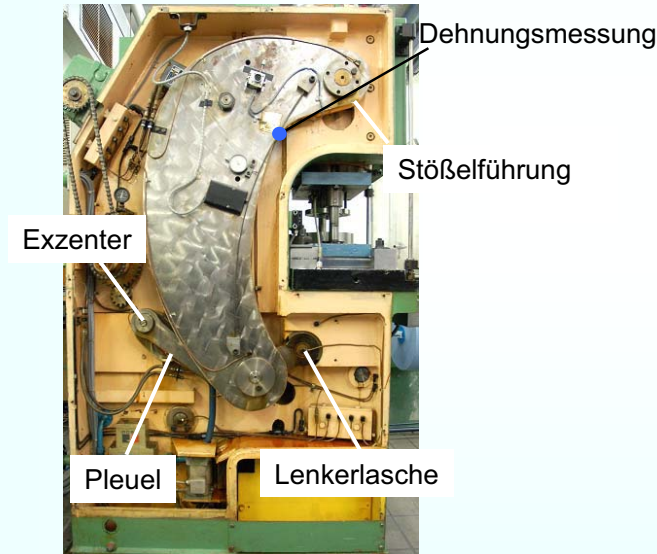
Reduktion des
Stempelwegs

Beeinflussung der
Werkstück-
abmessungen

Abbildung des Maschinenverhaltens in der FE-Prozess-Simulation Lösungsmöglichkeiten

1. Integration von FE-Maschinenmodell in Prozess-Simulation:
 - ⊖ mit vorhandenen FE-Programmen nicht möglich / sehr aufwändig
2. Kopplung mit externer Maschinensimulation (MKS, FE, ...):
 - ⊖ aufwändige Modellerstellung und Berechnung

Bsp.: FE-Modellierung des Winkelhebels einer Komatsu-Kniehebelpresse

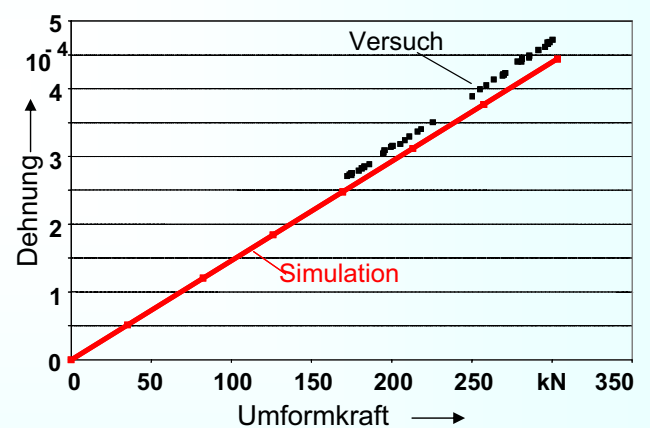
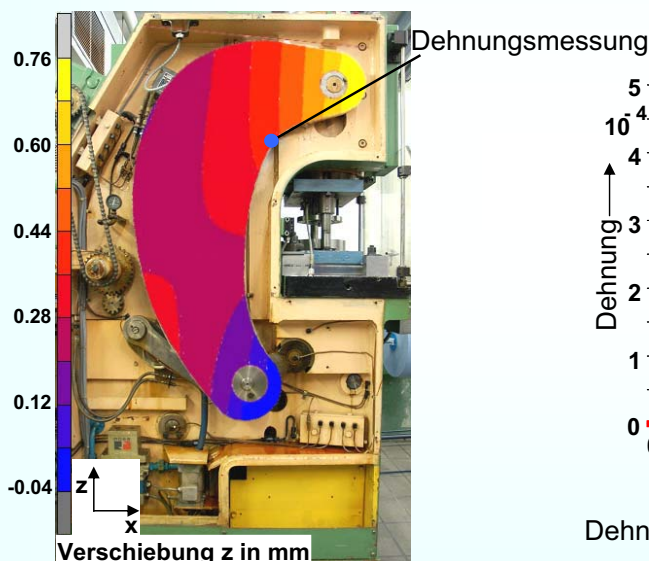


© LFT 07 / 5

Abbildung des Maschinenverhaltens in der FE-Prozess-Simulation Lösungsmöglichkeiten

1. Integration von FE-Maschinenmodell in Prozess-Simulation:
 - ⊖ mit vorhandenen FE-Programmen nicht möglich
2. Kopplung mit externer Maschinensimulation (MKS, FE, ...):
 - ⊖ aufwändige Modellerstellung und Berechnung

Bsp.: FE-Modellierung des Winkelhebels einer Komatsu-Kniehebelpresse



Dehnung des Winkelhebels in Abh. der Umformkraft

Lineares Maschinenverhalten

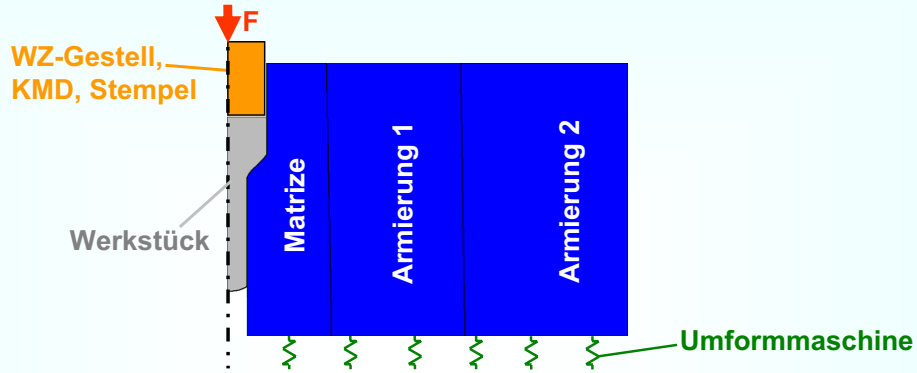


vereinfachte Modellierung der Maschine /
Berechnung der Maschinensteifigkeit

© LFT 07 / 6

Berechnung der Steifigkeit von Maschine und Werkzeug über die Änderung der Werkstücklänge

- Maschinen- und Werkzeugkomponenten mit Einfluss auf die Werkstücklänge



$$\Delta l_1 = \underbrace{\Delta l_{\text{Matr., Armierung}} + \Delta l_{\text{el. Rückfed. WS}}}_{\Delta l_2} + \underbrace{\Delta l_{\text{Masch.}} + \Delta l_{\text{Gestell, KMD, Stempel}}}_{\Delta l_{\text{ges}}}$$

1. Messung
(Variation der Fließspannung im Versuch)

2. Ermittlung in FE-Prozess-Simulation

Δl_{ges}

• Steifigkeitsberechnung:

$$C_1 = m \cdot \frac{\Delta F}{\Delta l_1}$$

$$C_2 = m \cdot \frac{\Delta F}{\Delta l_2}$$

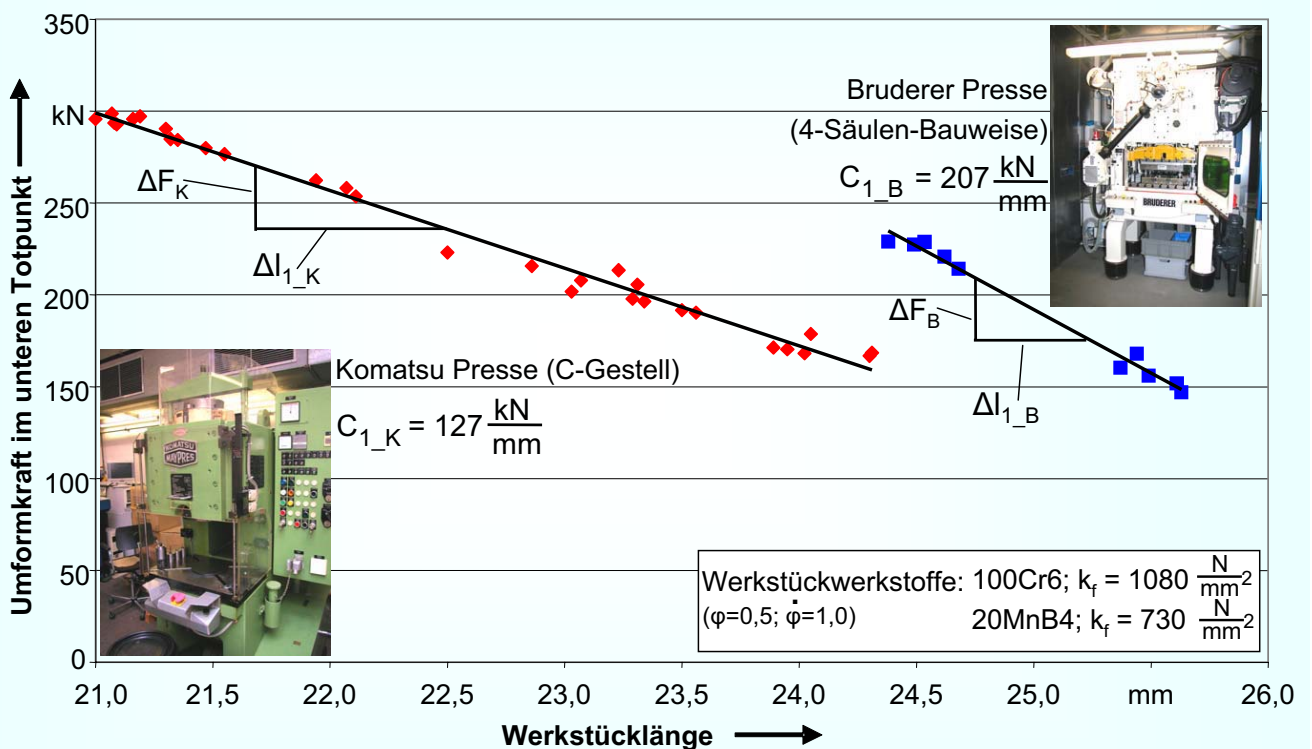
3. →

$$C_{\text{ges}} = m \cdot \frac{\Delta F}{\Delta l_{\text{ges}}}$$

unbekannt

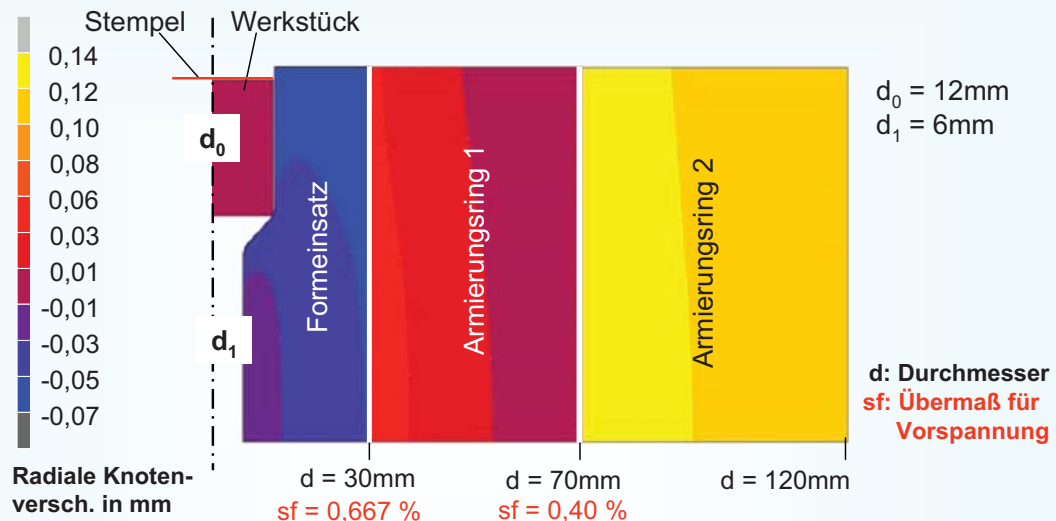
Kraftänderung $\Delta F \rightarrow \Delta l_i$

1. Messung der Längenänderung des Werkstücks – Berechnung der Steifigkeit C_1



➔ Steifigkeit konstant ➔ Maschinenverhalten im UT linear

2.1 FE-Simulationsmodell des Voll-Vorwärts-Fließprozesses zur Bestimmung von Δl_2 und C_2



- Stempel starr
- Werkzeug elastisch
- Modellierung des Vorspannungszustands
- elastoplastisches Modell des Werkstückwerkstoffs
- Auswerfen des Werkstücks

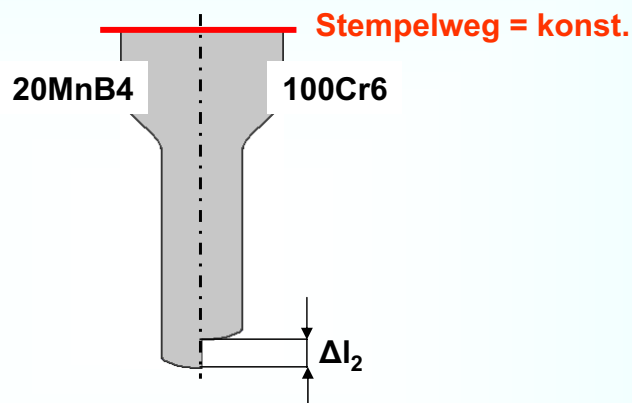


© LFT 07 / 9

2.2 Simulationsbasierte Berechnung der Steifigkeit C_2

• Berechnung der Werkzeugsteifigkeit

- FE-Simulationen mit zwei Werkstückwerkstoffen unterschiedlicher Festigkeit



- $\Delta l_2 = 0,27\text{mm}$
 - $\Delta F = 68,3\text{ kN}$ (Differenz der Umformkräfte im UT):
- $$C_2 = m \cdot \frac{\Delta F}{\Delta l_2} = 764 \frac{\text{kN}}{\text{mm}}$$

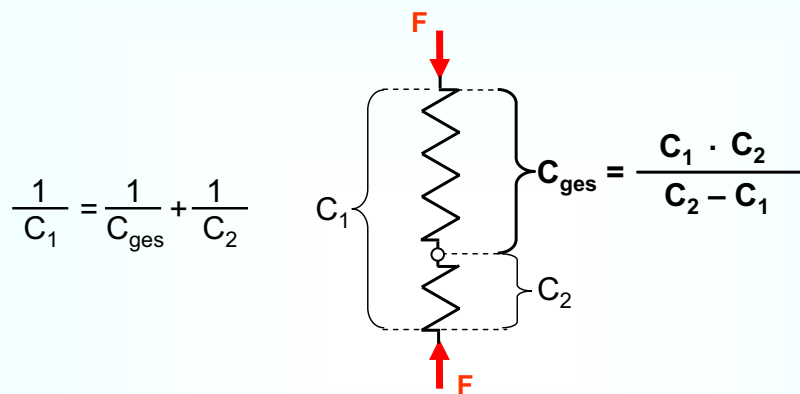
$$m = \frac{A_0 - A_1}{A_1} = \frac{d_0^2 - d_1^2}{d_1^2} = 3$$

$$\begin{aligned} d_0 &= 12\text{mm} \\ d_1 &= 6\text{mm} \end{aligned}$$

© LFT 07 / 10

3. Berechnung der Gesamtsteifigkeit C_{ges}

- Berechnung der Steifigkeit C_{ges} von Maschine, Werkzeuggestell, Kraftmessdose, Stempel:



Komatsu:

$$C_{ges} = 152 \frac{\text{kN}}{\text{mm}}$$

Bruderer:

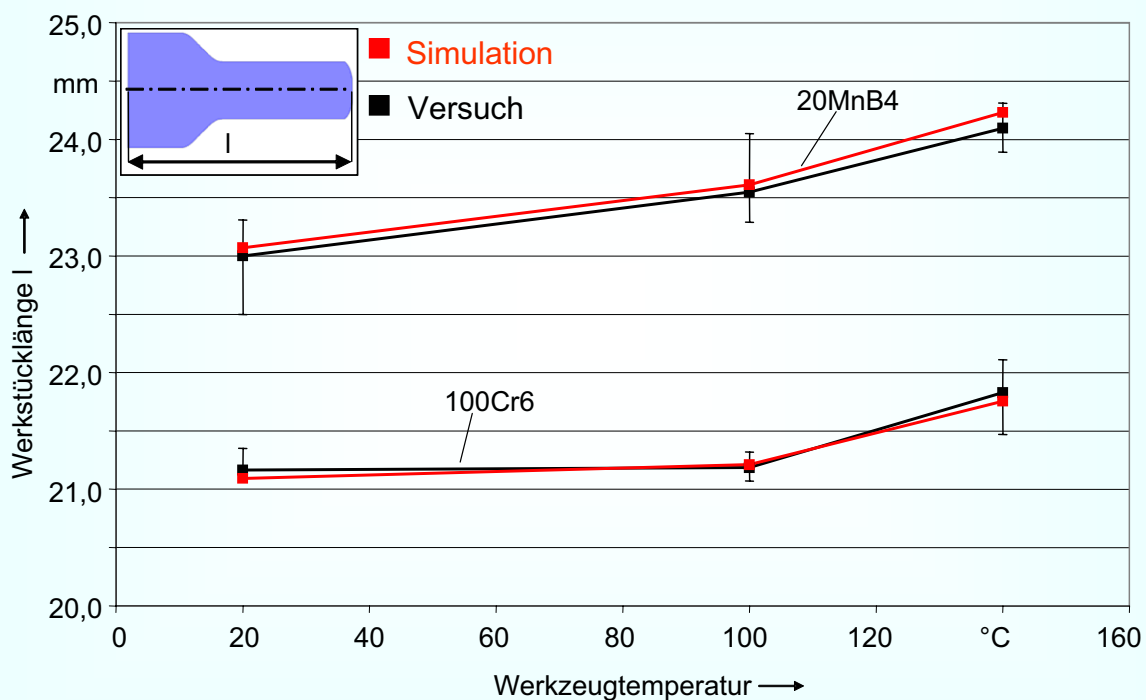
$$C_{ges} = 284 \frac{\text{kN}}{\text{mm}}$$

➔ Integration des linearen Maschinenmodells in FE-Prozesssimulation durch Federelement

Verifikation der berechneten Maschinensteifigkeit

Vergleich Simulation – Versuch an Werkstücklänge l

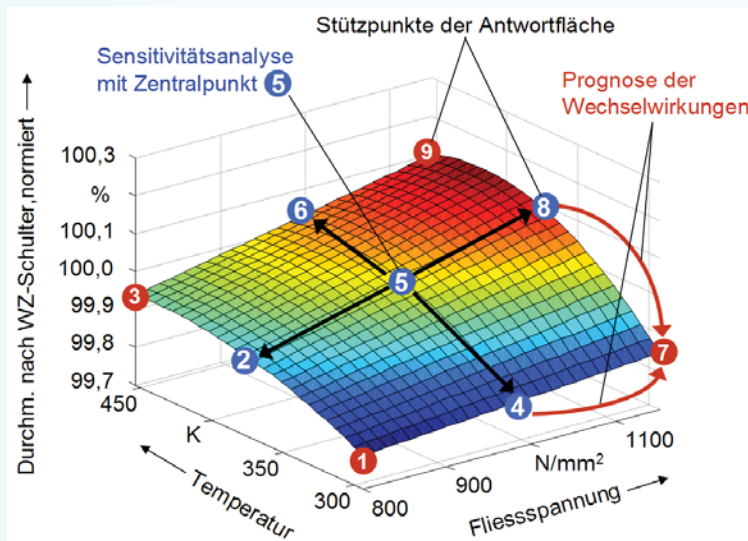
Umformmaschine: Komatsu Kniehebel-Press ($C_{ges} = 152 \frac{\text{kN}}{\text{mm}}$)



➔ Sehr gute Übereinstimmung zwischen Modell und Realität

Berechnung der Wechselwirkungen zwischen Umformmaschine, -werkzeug und -prozess

- Berechnung der Wechselwirkungen mit integriertem Prozess- und Maschinenmodell
- Hoher Berechnungsaufwand bei vollfaktoriellen Untersuchungen:



Berechnungsaufwand:

n : Prozessgrößen

k : Variationsstufen

i : Berechnungsanzahl

Vollfaktorieller Versuch:

$$i = k^n$$

Sensitivitätsanalyse:

$$i = (k-1)n+1$$

Beispiel:

$$n = 10; k = 3$$

Vollfaktoriell: $i = 59049$

Sensitivitätsanalyse: $i = 21$

➔ **Ziel: Vermeidung rechenzeitintensiver vollfaktorieller Untersuchungen**

Prognose der Wechselwirkungen mit Hilfe von:

Sensitivitätsanalyse und Datenbank

Zusammenfassung und Ausblick

- Bestimmung der Werkzeug- und Maschinensteifigkeit über Werkstückabmessungen
- Integration eines linearen Maschinenmodells in FE-Prozesssimulation
- Gute Übereinstimmung zwischen Versuch und Simulation mit integriertem Maschinenmodell
- Berechnung der Wechselwirkungen zwischen Maschine und Prozess

Ausblick

- Prognose der Wechselwirkungen ➔ deutliche Reduzierung der Berechnungszeit
- Übertragung auf komplexe Werkstücke

Gekoppelte Simulation von Presse und mehrstufigem Massivumformprozess

Prof. Dr.-Ing. Ch. Brecher
Dipl.-Ing. L. Schapp
Dipl.-Ing. M. Tannert

Werkzeugmaschinenlabor
RWTH Aachen

GEKOPPELTE SIMULATION VON PRESSE UND MEHRSTUFIGEM MASSIVUMFORMPROZESS

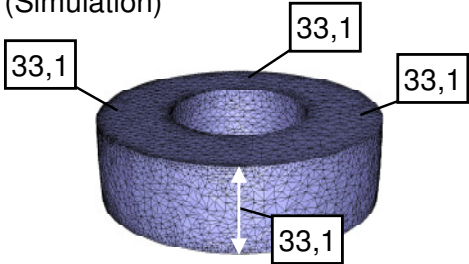
Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher, Dipl.-Ing. Lutz Schapp, Dipl.-Ing. Marco Tannert

1 Einleitung und Zielsetzung

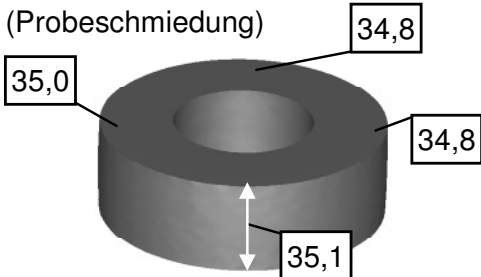
Steigende Anforderungen an die Qualität von massivumgeformten Werkstücken sowie der gleichzeitig vorhandene Kostendruck erfordern eine effiziente Entwicklung der eingesetzten Werkzeuge und ein schnelles Einfahren der Prozesse. Zur Auslegung von Bauteilen und Prozessen hat sich daher die Umformsimulation in der Massivumformung als effizientes Werkzeug etabliert [1, 2].

Einleitung

Werkstückmaße (Simulation)



Werkstückmaße (Probeschmiedung)



Ausgangslage:

- **steigende Anforderungen an die Schmiedequalität und wachsender Kostendruck**
 - Notwendigkeit zur effizienten Entwicklung und zum schnellen Einfahren neuer Prozesse
 - Einsatz der Umformsimulation in der Prozess- und Werkzeugauslegung

Problem:

- **limitierte Genauigkeit der Umformsimulationsergebnisse**
- **weiterhin iterativer Optimierungsprozess auf Produktionsaggregat notwendig**
 - Zeit- und kostenintensive Maschinenstillstandszeiten
 - Wahrscheinlichkeit eines sub-optimalen Endprozesses

© WZL/Fraunhofer IPT

Fraunhofer Institut Produktionstechnologie

WZL RWTH AACHEN

Seite 2

Bild 1: Notwendigkeit für den Einsatz und die Verbesserung der Umformsimulation

Der durch den Einsatz der Umformsimulation erzielbare Nutzen hängt dabei im Wesentlichen von der Güte der Simulation, d.h. von der Übereinstimmung der Simulation mit dem realen Prozess ab [3]. Während der Stofffluss in der Simulation schon mit befriedigender Genauigkeit berechnet wird, zeigen sich noch deutliche Abweichungen bei der Simulation von Werkstückmaßen und -formen (Bild 1). Die Folge ist, dass, trotz simulationsunterstützter Werkzeugkonstruktion, beim erstmaligen Einfahren der Werkzeuge Werkstückfehler auftreten, die von der Simulation nicht erfasst wurden. So ist nach dem Werkzeugeinbau auf der Presse ein aufwändiger, meist iterativer Optimierungsprozess notwendig, der zu zeit- und kostenintensiven Maschinenstillstandszeiten führt [4]. Da mit den an der Maschine vorhandenen Optimierungsmöglichkeiten, wie z.B. der Verstellung des Stößelhubs oder der Anpassung des Werkzeugs durch die Unterlage von Einstellplatten, oft kein zufriedenstellendes Ergebnis erreicht wird, ist häufig eine spanende Nachbearbeitung des Werkzeugsatzes erforderlich, welche zusätzliche Kosten verursacht.

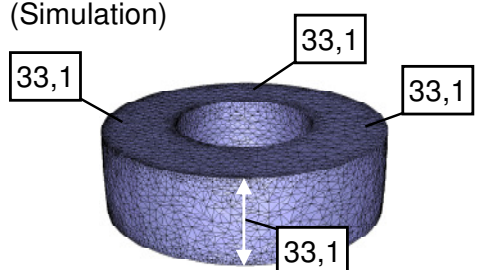
Bild 1 (links) zeigt beispielhaft anhand der Werkstückdickenmaße einer Ringstauchprobe die mit der Umformsimulation erreichbare Berechnungsgenauigkeit im Vergleich zu einer Probeschmiedung. Die Simulation wurde mit dem Programm Forge2005 (Fa. Transvalor) und, wie in der industriellen Praxis üblich, idealstarrer Pressen- und Werkzeugmodell durchgeführt. Die Umformung findet exzentrisch im Arbeitsraum der Maschine statt.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse werden zwei Aspekte deutlich. Die gemittelte Werkstückdicke im Schmiedeversuch (34,9 mm) weicht deutlich vom Sollmaß (32,9 mm) ab, was auf die nicht-linear-elastische Pressenauffederung und die elastische Verformung des Werkzeugs unter Last zurückzuführen ist, und die Umformsimulation erreicht keine genaue Berechnung der sich beim Realversuch einstellenden Werkstückmaße. Weder die gemittelte Werkstückdicke noch die sich einstellende Dickendifferenz links/rechts wird richtig berechnet.

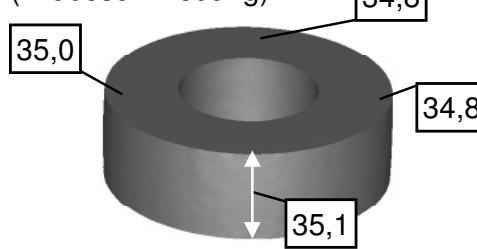
Ursache für die fehlerbehafteten Simulationsergebnisse ist die stark vereinfachte Modellierung des Maschinenverhaltens in der Umformsimulation (Bild 2). Um eine realitätsnahe Repräsentation des Maschinenverhaltens zu erhalten, müssen speziell für die Berechnung von Werkzeugmaschinen geeignete Systeme mit der Umformsimulation gekoppelt werden, welche eine Berechnung des nicht-linear-elastischen Maschinenverhaltens ermöglichen.

Zielsetzung

Werkstückmaße (Simulation)



Werkstückmaße (Probeschmiedung)



Problemursache


Randbedingungen in der Umformsimulation

a) Werkstoffkennwerte	b) Randbedingungen
■ Fließspannung k_f ✓	■ Reibungsbedingungen ✓
■ Dichte ✓	■ Wärmeübergänge ✓
■ E-Modul ✓	■ Pressenverhalten
■ ...	– ideal-starr ✓
	– linear-elastisch ✓
	– nicht-linear-elastisch ✗


Lösungsansatz

- Entwicklung nicht-linear-elastischer Pressenmodelle
- Verwendung von Pressensimulationssystemen und Anbindung an die Umformsimulation

© WZL/Fraunhofer IPT



Fraunhofer Institut
Produktionstechnologie



Seite 3

Bild 2: Ursache für die Berechnungsfehler in der Simulation und Lösungsansatz

2 Aufbau und Funktionsweise der gekoppelten Simulation

Für die Kopplung eines Maschinensimulationssystems mit einer Umformsimulation müssen beide Systeme geeignete Datenübergabeschnittstellen zur Verfügung stellen. Da seitens der Umformsimulation keines der am Markt erhältlichen Systeme über entsprechende Schnittstellen verfügt, wurde das Umformsimulationsprogramm Forge2005 (Fa. Transvalor) exemplarisch mit der entsprechenden Funktionalität erweitert. Auf Seite der Maschinensimulation bieten verschiedene Systeme, wie z.B. die digitale Blocksimulation oder die Mehrkörpersimulation (MKS) mit flexiblen Körpern, bereits standardisierte Datenschnittstellen zu externen Berechnungssystemen an, so dass auf diese zurückgegriffen werden kann.

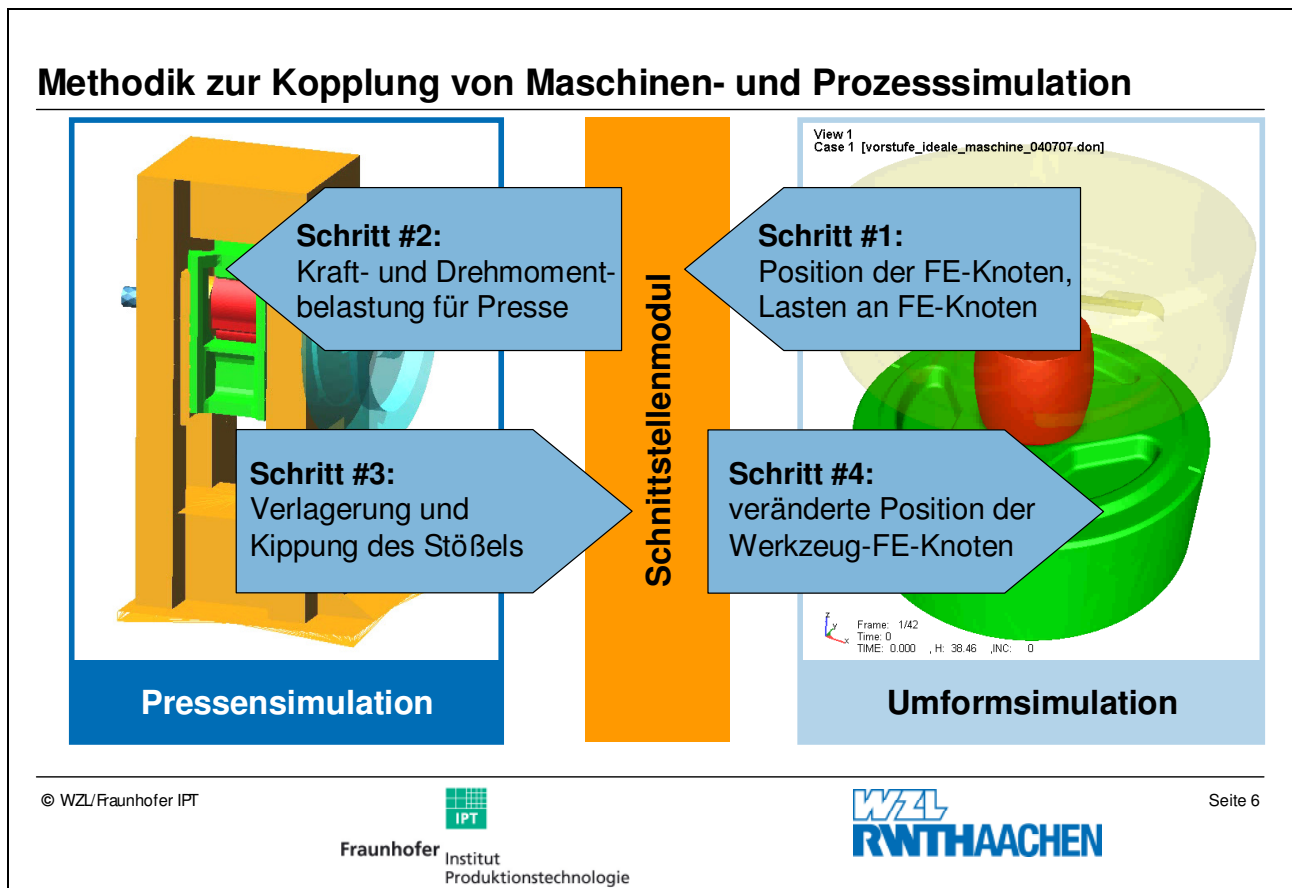


Bild 3: Methodik zur Kopplung von Maschinen- und Prozesssimulation

Bild 3 verdeutlicht den für die Kopplung notwendigen Informationsfluss. Typischerweise wird in der Umformsimulation die Berechnung des Gesamtprozesses in mehrere Einzelschritte aufgeteilt, deren Schrittweite, ausgedrückt in mm Umformweg, aus der Stabilität des numerischen Lösungsprozesses hervorgeht. Bei der Kopplung der Umformsimulation mit der Maschinensimulation werden die Zeitpunkte zwischen den einzelnen Berechnungsschritten der Umformsimulation für die Datenübergabe mit der Maschinensimulation genutzt.

Das in der Mitte von Bild 3 dargestellte Schnittstellenmodul verwaltet automatisiert den hierfür notwendigen Datenaustausch. Ist ein Berechnungsschritt abgeschlossen, werden die Koordinaten der Finite-Elemente-Knoten des Werkzeugmodells und die an den FE-Knoten anliegenden Prozesslasten von der Umformsimulation an das Schnittstellenmodul übertragen (Schritt #1). Dort werden die an den Werkzeugknoten anliegenden Prozesskräfte entsprechend des relativen Angriffspunktes zum Stößel und Pressentisch ausgewertet sowie die Kraft- und Momentenbelastung für die Presse ermit-

telt. Das Schnittstellenmodul übergibt die Summenbelastung an das Pressensimulationssystem (Schritt #2), welches das resultierende Pressenverhalten (Relativverlagerungen und -kipnungen von Stößel und Pressentisch) berechnet und an das Schnittstellenmodul zurückgibt (Schritt #3). Dieses bestimmt daraufhin die maschinenbedingten Koordinatenverschiebungen der Finite-Elemente-Knoten des Werkzeugmodells im Vergleich zur ideal-starren Maschine und gibt diese Verlagerungen an die Umformsimulation weiter (Schritt #4). Dort wird das FE-Netz des Werkzeugmodells angepasst und der nächste Berechnungsschritt gestartet. Dieser Ablauf wiederholt sich bis die Prozesssimulation vollständig abgeschlossen ist. Die Erstellung des Schnittstellenmoduls erfolgte auf Basis der Programmiersprache Matlab m-Code (Fa. Mathworks).

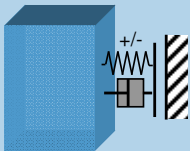
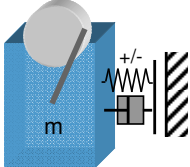
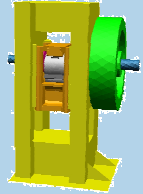
Gekoppelte Simulation – Implementierte nicht-linear-elastische Pressenmodelle			
Modell	Skizze	Beschreibung	Pressendaten
analytisches Pressenmodell (Programmier-Hochsprache)		<ul style="list-style-type: none"> vereinfachte Berücksichtigung von Spielen in Antrieb und in der Stößelführung auf die Verlagerungen und Kippungen des Stößels 	<ul style="list-style-type: none"> Federzahl Kippfederzahl Führungs- und Antriebsspiele
Digitale Blocksimulation		<ul style="list-style-type: none"> zusätzliche Berücksichtigung dynamischer Effekte Modellierung antriebskinematischer Einflüsse 	<ul style="list-style-type: none"> Federzahl Kippfederzahl Stößel- und Antriebsdaten Führungs- und Antriebsspiele
Mehrkörper-Modell mit flexiblen Körpern		<ul style="list-style-type: none"> komplette Modellierung der Maschine als Mehrkörper-Modell mit elastischen Bauteileigenschaften und Spielen im Antriebs- und Stößelführungssystem 	<ul style="list-style-type: none"> Federzahl Kippfederzahl Führungs- und Antriebsspiele Maschinenzeichnung

Bild 4: Pressenmodelle der gekoppelten Simulation

Bild 4 gibt einen Überblick über die im Rahmen der gekoppelten Simulation entwickelten Maschinenmodelle. Neben einer Kurzbeschreibung der Modellierungsschwerpunkte sind die für die jeweilige Maschinenmodellierung verwendeten Daten, wie Feder- und Kippfederzahlen oder Antriebs- und Kippspiele, aufgeführt.

Als Erweiterung zu teilweise in kommerziellen Simulationssoftwaresystemen bereits verfügbaren linear-elastischen Pressenmodellen bildet das entwickelte analytische Modell zusätzlich eine vereinfachte Simulation nicht-linearer Steifigkeitsverläufe ab, wie sie beispielsweise durch Spiele im Antrieb oder im Stößelführungssystem hervorgerufen werden. Dabei wird das Maschinenverhalten auf Kippungen und Verlagerungen des Stößels reduziert. Die translatorischen und rotatorischen Steifigkeiten der Presse werden durch nicht-linear-elastische Federgleichungen abgebildet.

Das blockbasierte Modell bietet zudem die Möglichkeit der Abbildung antriebskinematischer Einflüsse auf die aktuelle Stößelposition, wodurch beispielsweise die Überführung vertikaler Prozess-

kräfte in horizontale Kraftanteile aufgrund der vorliegenden Exzenterstellung simuliert werden kann. Für schnelllaufende Pressen können zudem dynamische Einflüsse auf das Verlagerungs- und Kippverhalten des Stößels berücksichtigt werden. Vernachlässigt wird bei dieser Modellierungsart allerdings das lokale Verformungsverhalten der Pressenbauteile (Stößel, Exzenterwelle, Ständer usw.), wodurch die erreichbare Genauigkeit prinzipiell begrenzt ist.

Den höchsten Detaillierungsgrad stellt das Mehrkörper-Pressenmodell mit flexiblen Körpern dar. Hier wird die Presse komplett, ähnlich wie in einem CAD-System modelliert, wofür Zeichnungsdaten der Maschine vorliegen müssen. Die hierbei notwendige Definition der Steifigkeits- und Dämpfungsparameter für Lager- und Koppelstellen der Maschine setzt allerdings eine gewisse Erfahrung in der Modellierung solcher Systeme voraus.

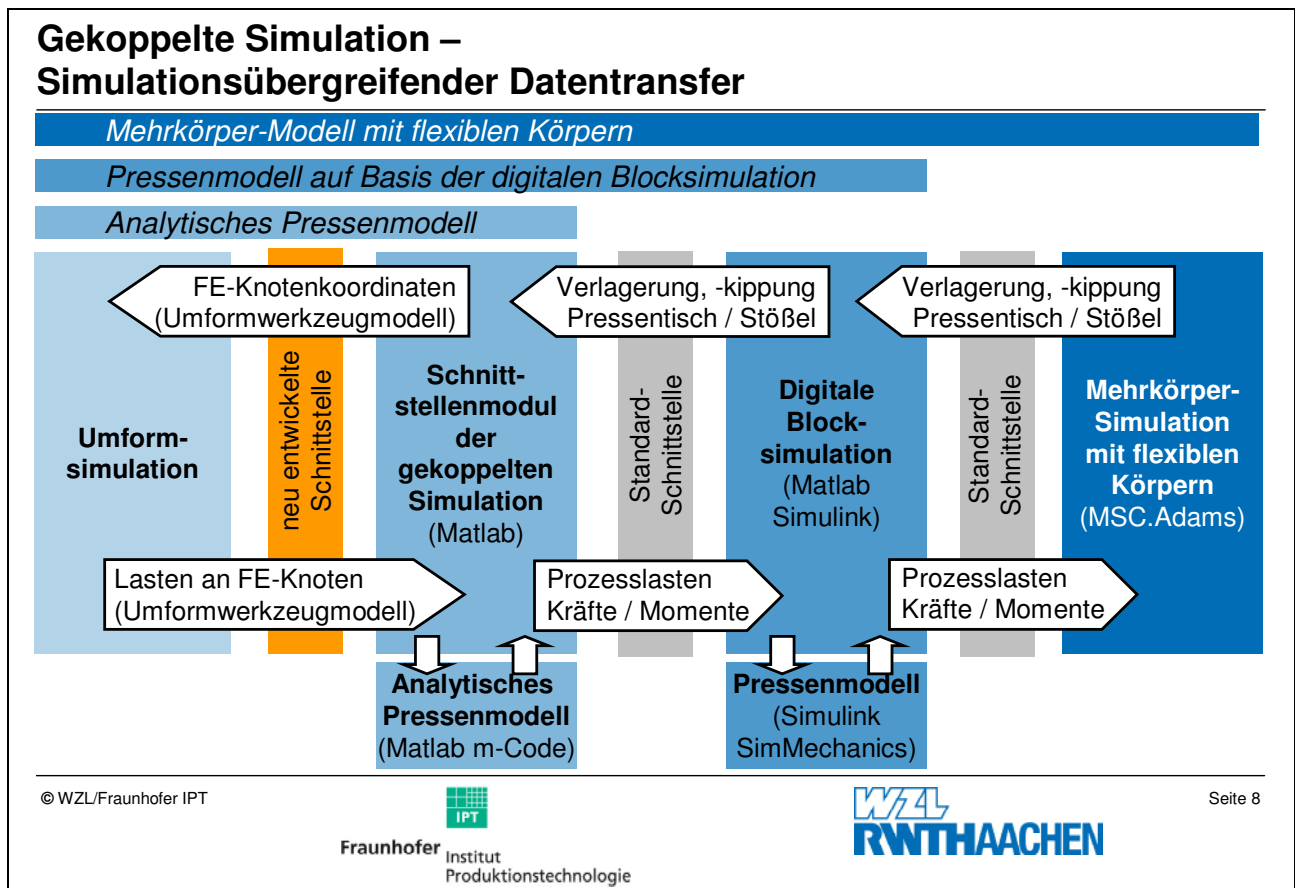


Bild 5: Simulationsübergreifender Datentransfer in der gekoppelten Simulation

Der Simulationsübergreifende Datentransfer bei der Verwendung verschiedener Pressenmodelle in der gekoppelten Simulation ist in Bild 5 dargestellt. Die Programmierung des analytischen Pressenmodells erfolgte in der gleichen Sprache wie die des Schnittstellenmoduls, wodurch ein einfacher Datenaustausch erreicht wird. Die Umsetzung des Pressenmodells mit Hilfe der digitalen Blocksimulation erfolgte auf Basis von Simulink/SimMechanics. Dieses in Matlab integrierte Simulationssystem verfügt über standardisierte DatenübergabeprozEDUREN, so dass eine Anbindung an das Schnittstellenmodul der gekoppelten Simulation ebenfalls problemlos möglich ist. Die Anbindung des Mehrkörper-Simulationsmodells (MKS-Modell) an das Schnittstellenmodul erfolgt über die digitale Blocksimulation, in der das MKS-Modell einen eigenen Grafikkblock mit Ein- und Ausgängen darstellt.

Die für die Durchführung der gekoppelten Simulation notwendigen Dateiverwaltungsfunktionen wurden in einer grafischen Benutzeroberfläche hinterlegt. Diese ermöglicht es z.B. industriellen Anwendern mit geringfügigem Einarbeitungsaufwand die gekoppelte Simulation zu nutzen. Bild 6 verdeutlicht den modularen Aufbau dieser Benutzeroberfläche. Das Schnittstellenmodul dient neben dem Aufruf des Pre-Prozessor-, des Berechnungs- und des Post-Prozessor-Moduls ebenfalls der Definition häufig gebrauchter Pfadangaben. Diese Verzeichnisse sind in den einzelnen Bausteinen der gekoppelten Simulation dann als Verzeichnisse vorgewählt und ermöglichen eine zügige und komfortable Definition aller für die Durchführung der gekoppelten Simulation notwendigen Angaben. Im Pre-Prozessormodul können die maßgeblichen Pressenparameter für mechanische Pressen, wie Hubzahl, Exzenterradius usw., eingegeben und gespeichert werden. Für die Durchführung der gekoppelten Simulation ist dann lediglich die entsprechende Maschinendatei (mit den Pressenparametern) auszuwählen. Der Anwender kann somit die in seinem Betrieb befindlichen Pressen einmal komplett modellieren und später für weitere Simulationen stets wieder verwenden.



Bild 6: Modularer Aufbau der grafischen Oberfläche der gekoppelten Simulation


Im Berechnungsmodul findet die Definition der für die gekoppelte Simulation von Maschine und Prozess notwendigen Daten statt. Exemplarisch für die gesamte grafische Oberfläche sei an dieser Stelle das Berechnungsmodul in Bild 7 dargestellt. So wird hier festgelegt, welches Maschinenmodell für die gekoppelte Simulation verwendet werden soll und welche Pressenparameterdatei auf dieses Modell Anwendung findet. Des Weiteren wird die Berechnungsdatei der Umformsimulation bestimmt. Somit liegt eine vollständige Definition der gekoppelten Simulation vor, d.h. welcher Umformsimulationsfall mit welchem Maschinenmodell gekoppelt berechnet werden soll. Schließlich muss vor Beginn der Simulation noch die Position des Werkzeugs im Arbeitsraum der Maschine festgelegt werden. Nach dem Start der gekoppelten Simulation wird der Anwender über den Berechnungsfortschritt in einem Statusfensters informiert, in dem der verbleibende Umformweg,

die vorliegende Belastung und die hieraus resultierende Maschinenverlagerung in Hubrichtung angezeigt wird.


Nach Abschluss der Simulation werden die Ergebnisse der Maschinensimulation in Dateiform abgespeichert. Im Post-Prozessormodul ist neben der Darstellung in Diagrammform auch die Möglichkeit vorhanden, die Verlagerungen und Kippungen des Stößels in animierter Form als Drahtgittermodell darzustellen, so dass die stattfindenden Vorgänge auch für den Praktiker leicht verständlich sind. Für eine eventuelle Weiterverwendung der Daten wird zudem die Möglichkeit des Exports der Verlagerungs-, Kippungs- und Belastungsdaten in ein z.B. von Microsoft-Excel lesbares Dateiformat zur Verfügung gestellt.

Gekoppelte Simulation – Grafische Benutzeroberfläche (Berechnungsmodul)

© WZL/Fraunhofer IPT



Fraunhofer
Institut
Produktionstechnologie



Seite 10

Bild 7: Grafische Benutzeroberfläche des Berechnungsmoduls

3 Anwendung der gekoppelten Simulation am Beispiel Ringstauchprobe

Die bei der Anwendung der gekoppelten Simulation mit den verschiedenen Pressenmodellen erzielbaren Simulationsergebnisse werden am Beispiel des Werkstücks „Ringstauchprobe“ und einer einstufigen Umformung verdeutlicht.

In Bild 8 (links) ist das Umformsimulationsmodell der Ringstauchprobe, bestehend aus Oberwerkzeug, Ringstauchprobe und Unterwerkzeug dargestellt. Da die Elementkantenlänge in der Kontaktfläche zum Werkzeug die Genauigkeit der Simulation (maximal zugelassene Durchdringung von Werkzeug und Werkstück) definiert, wird das Werkstück im Kontaktbereich engmaschiger vernetzt. Das Werkzeug ist in diesem Fall als starre, ebene Platte modelliert. Die für das Beispiel gewählte

Position der Umformung im Arbeitsraum der Presse ist als Draufsicht auf den Pressentisch dargestellt.

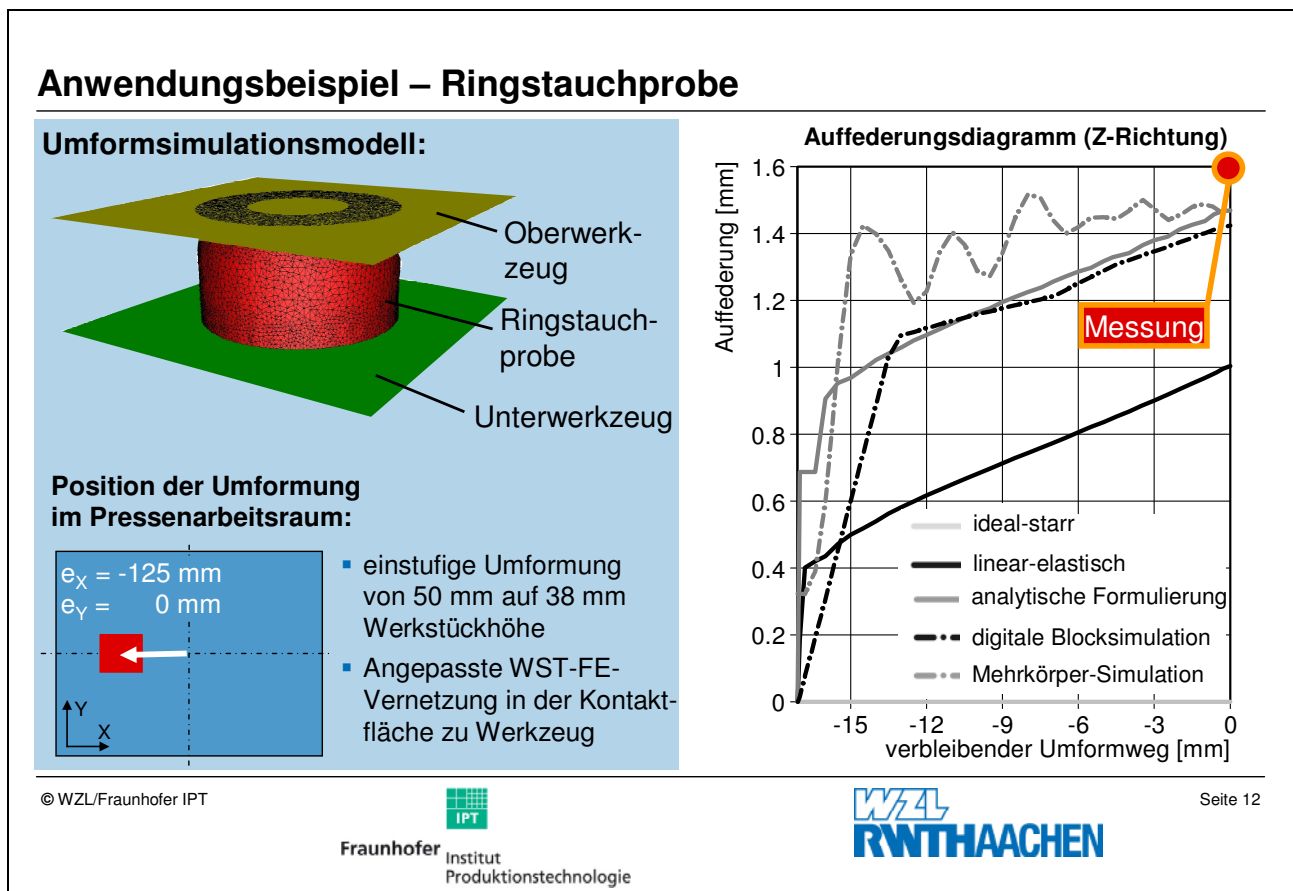


Bild 8: Anwendungsbeispiel Ringstauchprobe

Auf der rechten Seite von Bild 8 ist das mit den verschiedenen Pressenmodellen bei der Umformung der Ringstauchprobe berechnete Auffederungsverhalten der Maschine in Z-Richtung vergleichend dargestellt. Das zugehörige berechnete Kippungsverhalten der Maschine um die Y-Achse ist in Bild 9 (links) abgebildet. Weiterhin ist die im Realversuch mittels taktile Sensorik gemessene Auffederung und Kippung der Presse im unteren Totpunkt UT dargestellt.

Das mit dem ideal-starren Pressenmodell berechnete Maschinenverhalten weicht deutlich von dem im realen Versuch gemessenen Maschinenverhalten ab (0 mm Auffederung in UT, hellgraue Linie, deckungsgleich mit der Abszisse des Diagramms). Auch mit dem linear-elastischen Pressenmodell (schwarze Volllinie) ist eine befriedigende Simulation des Pressenverhaltens nicht möglich (Abweichung der Auffederung Simulation – Messung 0,6 mm in UT). Mit den nicht-linear-elastischen Pressenmodellen und der gekoppelten Simulation werden wesentlich bessere Ergebnisse erzielt (Fehler 0,1-0,2 mm). Das Auffederungsspiel von 0,5 mm wird bei Verwendung dieser Modelle zu Prozessbeginn komplett durchlaufen, wobei die fehlende Dämpfung beim analytischen Pressenmodell zu einem wesentlich steileren Anstieg der Z-Verlagerung führt als im Falle des digitalen Block- oder Mehrkörper-Simulationsmodells.

Die in negative X-Richtung versetzte Anordnung des Prozesses im Arbeitsraum der Presse führt zu einem positiven Belastungsdrehmoment um die Y-Achse, was zu dem in Bild 9 links dargestellten Kippungsverhalten des Stößels führt. Das Diagramm zeigt wieder eine deutliche Abweichung der Simulationsergebnisse des ideal-starren (Fehler 2,5 mm/m) und des linear-elastischen Pressenmo-

dells (Fehler 0,9 mm/m) vom gemessenen Kippungswert. Die Abweichungen der nicht-linear-elastischen Pressenmodelle liegen bei allen drei Modellen unter 0,2 mm/m, was wiederum eine deutliche Steigerung der Simulationsgenauigkeit darstellt.

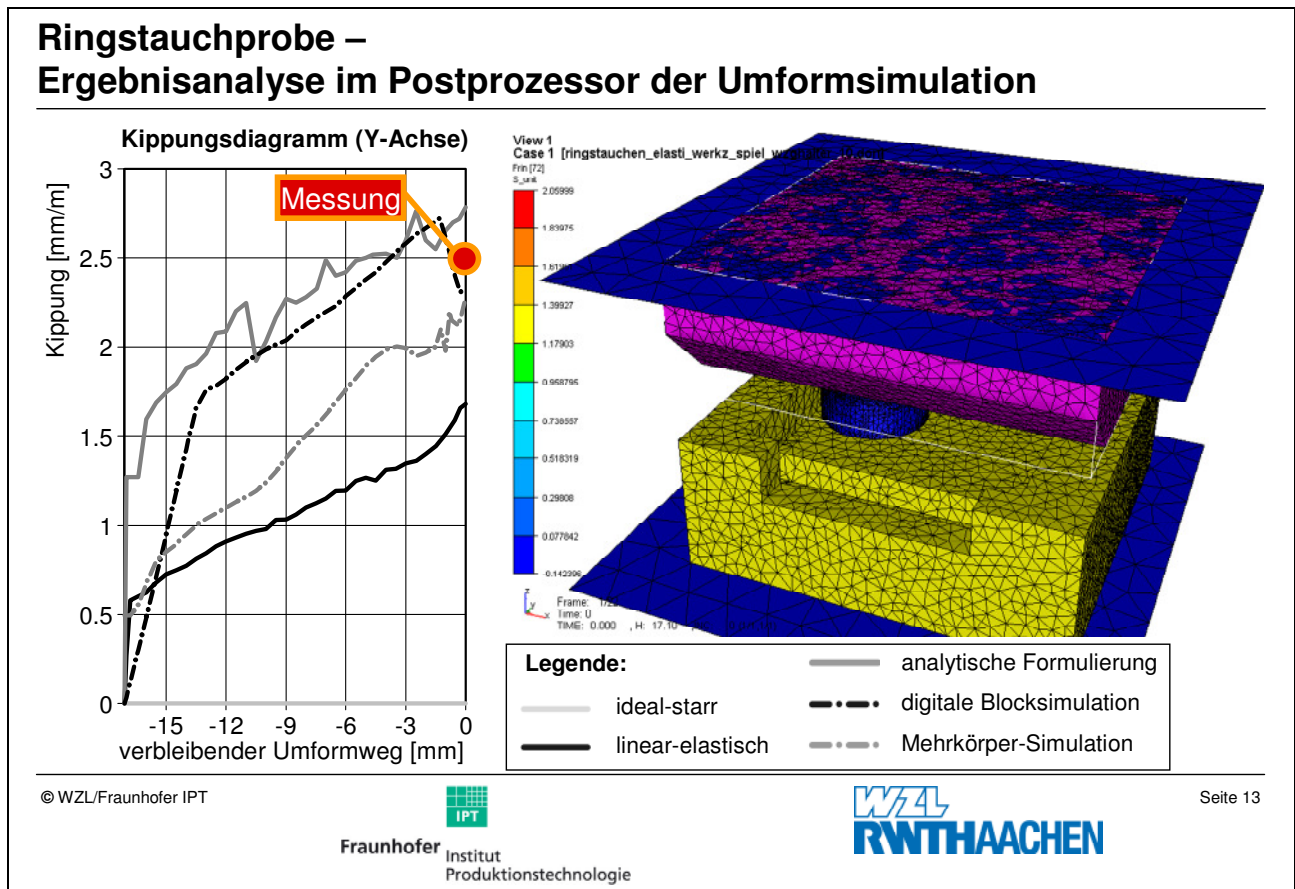


Bild 9: Ergebnisanalyse der gekoppelten Simulation der Ringstauchprobe

Auf der rechten Seite in Bild 9 ist das Umformsimulationsmodell der Ringstauchprobe bei Verwendung flexibler Werkzeuge dargestellt. Dazu wurden die Komponenten des Werkzeugsystems, bestehend aus oberem und unterem Werkzeughalter sowie Ober- und Untergesenk, in der Umformsimulation als flexible Körper modelliert und mit einem Finite-Elemente-Netz versehen. Die Darstellung zeigt die Simulationsauswertung im Postprozessor der Umformsimulation.

Die Tabelle in Bild 10 zeigt eine Gegenüberstellung der simulierten Werkstückmaße der Ringstauchprobe bei der Verwendung verschiedener Pressenmodelle und der flexiblen Werkzeugmodellierung aus Bild 9 mit dem Messergebnis des realen Schmiederversuchs.

Ringstauchprobe – Vergleich Simulation / Messung: Werkstückmaße

Legende:		gemittelte WST-Dicke [mm]	auf WST übertragene Y-Stößelkipfung [mm/WST-Ø]
Δ_d	Simulationsfehler WST-Dicke		
Δ_k	Simulationsfehler auf WST übertragene Stößelkipfung		
Schmiedeversuch		34,9	0,20
Stand der Technik	ideal-starres Pressenmodell	33,6 ($\Delta_d = -1,3$)	0,00 ($\Delta_k = 0,20$)
	linear-elastisches Pressenmodell	34,5 ($\Delta_d = -0,4$)	0,16 ($\Delta_k = 0,04$)
Gekoppelte Simulation	analytisches Pressenmodell	34,9 ($\Delta_d = 0,0$)	0,20 ($\Delta_k = 0,00$)
	digitale Blocksimulation	34,8 ($\Delta_d = -0,1$)	0,21 ($\Delta_k = 0,01$)
	Mehrkörper-Simulation mit flexiblen Körpern	35,0 ($\Delta_d = +0,1$)	0,20 ($\Delta_k = 0,00$)

Bild 10: Vergleich der Ergebnisse Simulation / Schmiedeversuch

Es wird deutlich, dass mit der konventionellen Umformsimulation und ideal-starrem Pressenmodell trotz flexibler Werkzeugmodellierung deutliche Simulationsfehler vorliegen ($\Delta_d = -1,3$ mm, keine Stößelkipfung), während mit dem linear-elastischen Pressenmodell bereits bessere Ergebnisse erzielt werden.

Bei Einsatz der nicht-linearen Pressenmodelle (gekoppelte Simulation) und dem deformierbaren Werkzeugmodell wird der Berechnungsfehler in der gemittelten Werkstückdicke auf unter 0,1 mm reduziert, was eine enorme Steigerung gegenüber dem Stand der Technik in der Umformsimulation darstellt. Zudem wird die auf das Werkstück übertragene Stößelkipfung sehr genau berechnet. Die Restabweichungen sind dabei auf die Linearisierung der Pressenkennzahlen und die Genauigkeit der Kraftberechnung zurückzuführen.

4 Simulationsgestützte Optimierung einstufig belegter mehrstufiger Massivumformprozesse

Im Folgenden wird am Beispiel des Serienwerkstücks „Dreilochflansch“ der Ablauf einer simulationsgestützten Werkzeugoptimierung für einen einstufig belegten Massivumformprozess erläutert.

Bild 11 zeigt die Stadienfolge bei der Warmumformung des Werkstücks. Es handelt sich dabei um einen dreistufigen, einstufig belegten Gesenkschmiedeprozess. An die dargestellte Stadienfolge schließt sich eine Abgratoperation ohne weitere Umformung auf einer weiteren Maschine an. Der Rohling (Werkstoff 38MnVS6) wird in einer ersten Umformstufe auf eine Höhe von 41,7 mm gesetzt. Diese Setzoperation findet in X- und Y-Richtung exzentrisch versetzt im Arbeitsraum der

Presse statt. Vor- und Fertigstufe des Werkstücks sind in X-Richtung exzentrisch und in Y-Richtung zentrisch positioniert. Im unteren Teil von Bild 11 sind die Positionen der einzelnen Umformstufen im Arbeitsraum der Maschine als Draufsicht auf den Pressentisch dargestellt.

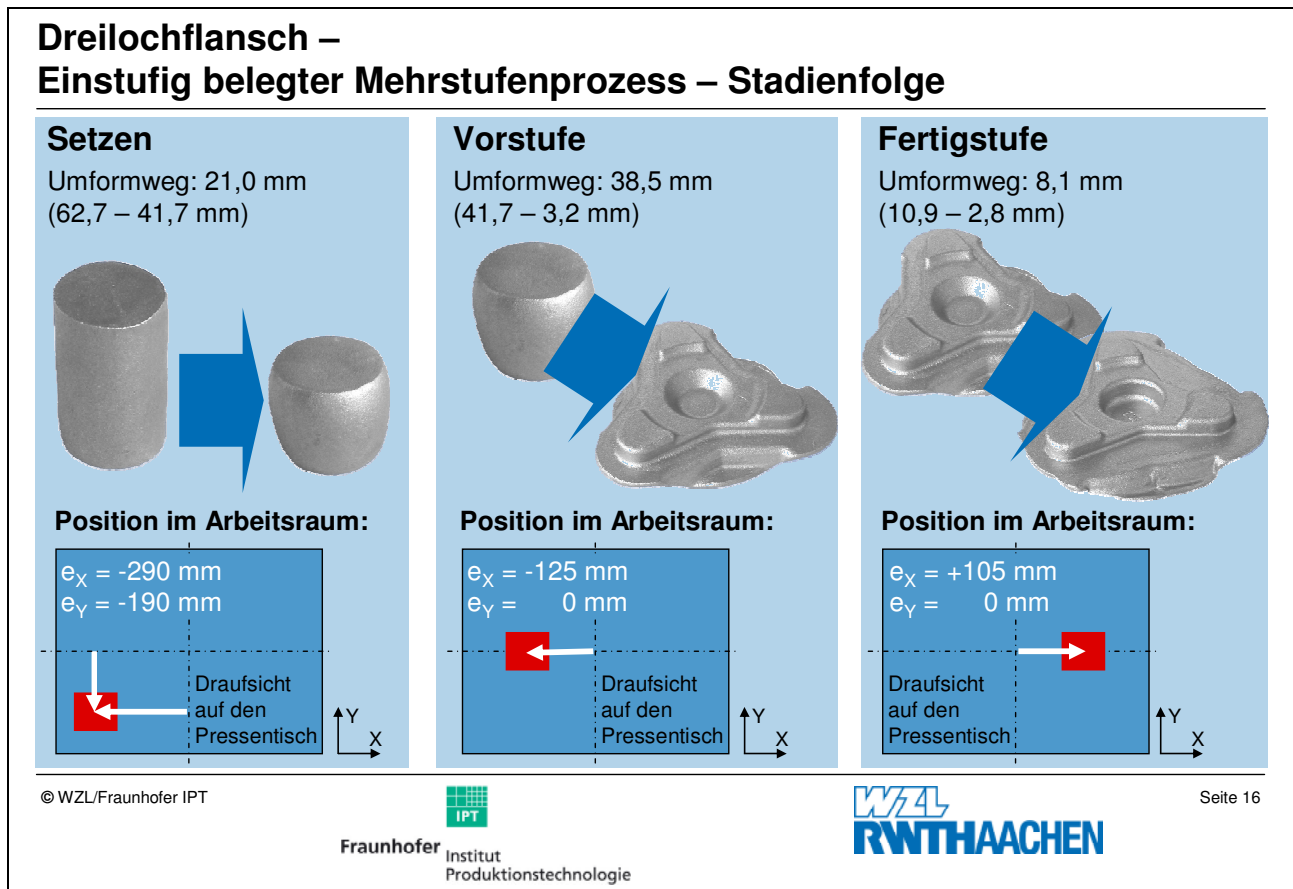


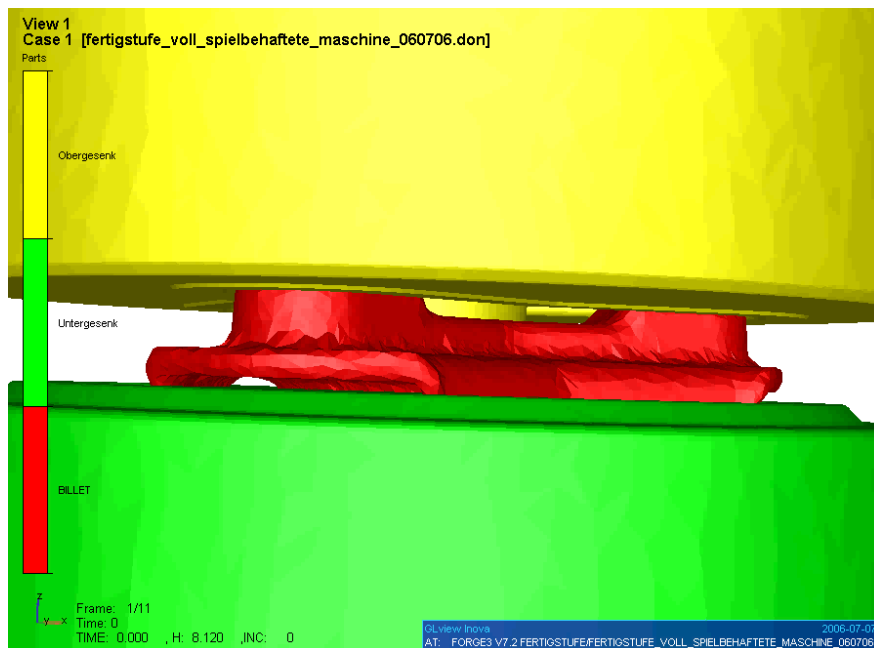
Bild 11: Stadienfolge des Serienwerkstücks „Dreilochflansch“

In der Berechnung mit der gekoppelten Simulation kommt ein analytisches Pressenmodell zur Anwendung, welches die Berücksichtigung nicht-linear-elastischen Pressenverhaltens ermöglicht und mit messtechnisch ermittelten Pressenkennzahlen abgeglichen wurde.

Bild 12 zeigt die Auswertung der Berechnungsergebnisse der gekoppelten Simulation im Post-Prozessor der Umformsimulation. Es wird deutlich, wie Schmiedefehler einer Werkzeugstufe den Umformprozess weiterer Stufen negativ beeinflussen können, da bei mehrstufigen Prozessen das Schmiedeergebnis einer Stufe gleichzeitig die Ausgangsgeometrie des Werkstücks der folgenden Stufe darstellt. In dem hier gezeigten Fall ist das Werkstück aufgrund des nicht-linear-elastischen Auffederungs- und Kippungsverhaltens der Presse beim Vorstufenprozess nicht richtig umgeformt worden. Deswegen liegt die Ausgangsform des Werkstücks für die Fertigstufe nicht wie gewollt plan im Untergesenk der Fertigstufe auf, was zur Folge hat, dass der Fertigstufenprozess gestört abläuft. Solche Verhaltensweisen wären ohne gekoppelte Simulation nicht abbildbar.

Bei mehrstufigen Umformprozessen bietet prinzipiell jede Stufe des Werkzeugs Optimierungsmöglichkeiten. Allerdings ist die Änderung der letzten Umformstufe, also des Kalibrierwerkzeugs zu bevorzugen, da dadurch direkt Einfluss auf die finale Werkstückkontur genommen wird. Nur bei Prozessen, bei denen die Abweichungen aus den Vorstufenoperationen so gravierend sind, dass sie in der Kalibrier- oder Fertigstufe nicht mehr ausgeglichen werden können, sollten Veränderungen an den Vorstufenwerkzeugen durchgeführt werden.

Dreilochflansch – Simulationsgestützte Analyse der Formfehlerentstehung



nicht-lineares
Auffederungs- und
Kippungsverhalten der
Maschine in der Vorstufe

von der Sollkontur ab-
weichendes Ausgangs-
material für Fertigstufe

fehlerhafte Auflage des
Werkstücks im
Fertigesenk

Fehlerfortpflanzung führt
zu ungenügendem
Prozess-Endergebnis

Bild 12: Simulationsgestützte Analyse der Formfehlerentstehung bei Mehrstufenprozessen

Die simulationsgestützte Werkzeugoptimierung lehnt sich an die Vorgehensweise der Optimierung auf Basis von Probeschmiedungen an. Anhand der identifizierten Werkstückfehler werden Änderungen am Werkzeug bezüglich der Schiefstellung und Werkzeughöhe vorgenommen (Bild 13). Die Auswirkungen werden durch eine erneute Berechnung überprüft. Dieser Vorgang wiederholt sich so lange, bis die gewünschten Werkstückmaße und Formen erreicht werden.

In der Tabelle in Bild 13 sind die Fertigstufenmaße aus gekoppelter Simulation und Messung gegenübergestellt. Es wird deutlich, dass die Werkstückmaße mit dem analytischen, nicht-linear-elastischen Pressenmodell realitätsnah berechnet werden (vgl. „Messung“ und „Ausgangswerkzeug“), was die Voraussetzung für eine sinnvolle simulationsgestützte Werkzeugoptimierung darstellt. Aus der Tabelle geht ebenfalls hervor, dass das mit dem Ausgangswerkzeug berechnete Werkstück in der gemittelten Werkstückdicke um 1,1 mm vom gewünschten Sollmaß abweicht.

In der Optimierungsstufe 1 wird zunächst die Dicke des Werkzeugmodells nicht nur um den Dickenfehler des Werkstücks von 1,1 mm, sondern um 1,2 mm vergrößert, um den aus der zu erwartenden höheren Umformkraft größeren linear-elastischen Auffederungsanteil der Presse in Z-Richtung vorzuhalten. Auf der rechten Seite von Bild 13 ist die Veränderung der Stößelverlagerung in Z-Richtung auf Grund der einzelnen Optimierungsmaßnahmen gegenüber dem Ausgangswerkzeug dargestellt, wobei die simulierten Auffederungsunterschiede der Presse zu Prozessende deutlich erkennbar sind. Nach der Optimierungsstufe 1 steigt die Z-Verlagerung des Werkzeugs um 0,15 mm gegenüber dem Ausgangswerkzeug an. Dieser zusätzliche elastische Auffederungsanteil führt, zusammen mit der sich aus der Exzentrizität der größeren Prozesskraft ergebenden, stärkeren Kippung des Stößels um die Y-Achse, dazu, dass noch nicht das gewünschte Dickensollmaß er-

reicht wird (Abweichung +0,2 mm) und das Werkstück eine Dickendifferenz von -0,1 mm in X-Richtung aufweist.

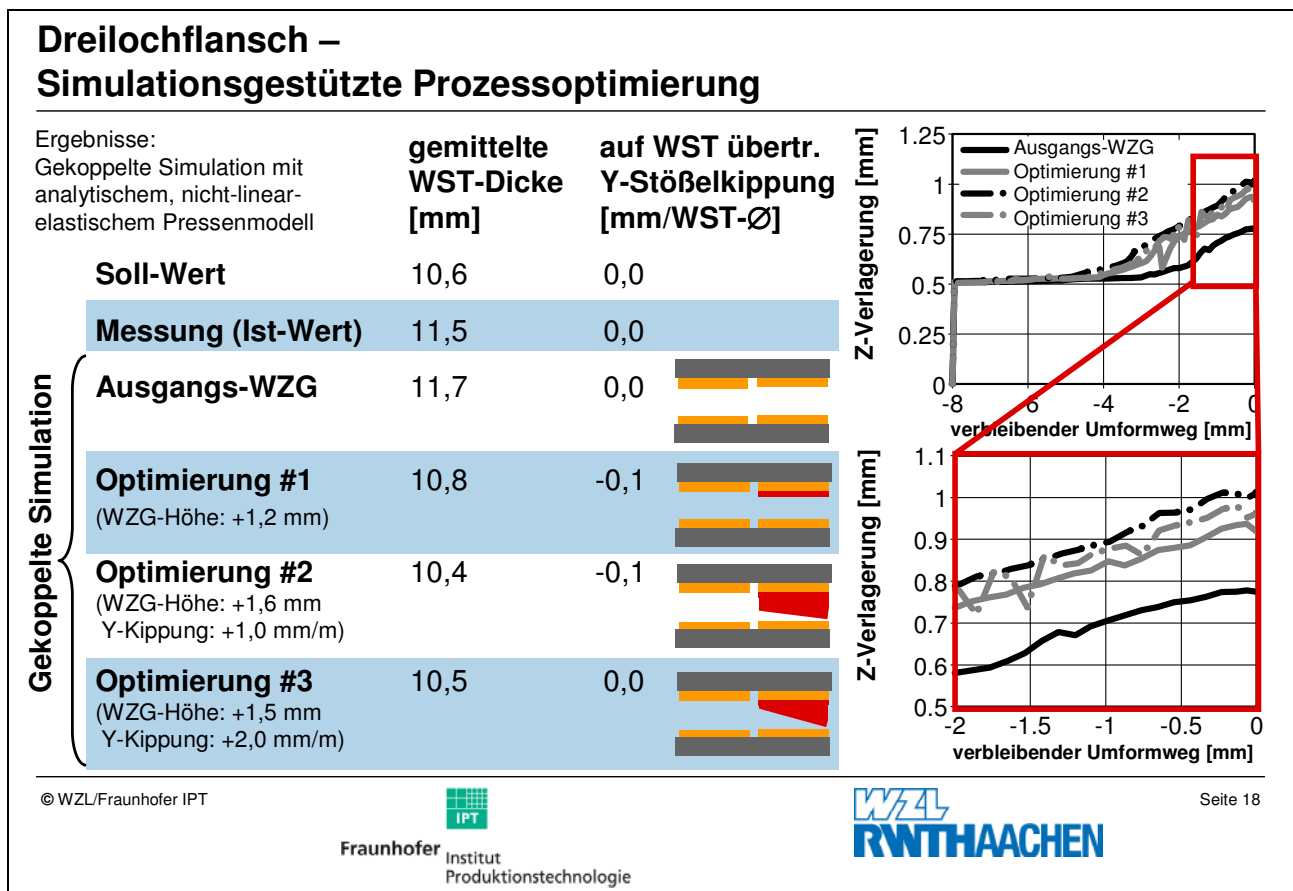


Bild 13: Werkzeugoptimierung mit gekoppelter Simulation

Aus diesem Grund wird im zweiten Optimierungsschritt das Werkzeug um weitere 0,4 mm unterlegt und ein Kippungsoffset des Obergesenks von 0,1 mm/m in positive Y-Richtung gewählt. Durch diese Maßnahme steigt die vertikale Auffederung der Presse um weitere 0,1 mm an. Die Analyse der Werkstückmaße zeigt, dass die simulierte Werkstückdicke nun um 0,2 mm zu klein ist und dass das Kippungsoffset zu gering gewählt wurde, um die sich einstellende Stößelkippung auszugleichen.

Mit der Wahl einer gesamten Werkzeughöhenveränderung von 1,5 mm und einem Kippungsoffset von 2,0 mm gegenüber dem Ausgangswerkzeug (Optimierungsstufe 3) wird schließlich ein optimales Werkstück gefertigt, dass in den Dickemaßen den Sollwerten mit Abweichungen vom maximal 0,1 mm entspricht und keinen Dickenunterschied in X-Richtung aufweist.

Das Beispiel verdeutlicht, dass die Werkzeugoptimierung in den meisten Fällen mehrerer Optimierungsschritte bedarf, da eine Veränderung des Werkzeugs auch zu einer Veränderung des Maschinenverhaltens führt. Die genaue quantitative Veränderung des Maschinenverhaltens ist allerdings in der Regel im vorhinein nicht eindeutig zu bestimmen.

5 Gekoppelte Simulation mehrstufig belegter Massivumformprozesse

Die bisherigen Betrachtungen beschränkten sich auf mehrstufige, einstufig belegte Massivumformprozesse. In der industriellen Serienfertigung ist jedoch die Mehrzahl der Umformprozesse mehrstufig belegt, d.h. es finden auf einer Maschine pro Stößelhub mehrere Umformungen gleichzeitig statt. Die Auslegung und Optimierung mehrstufig belegter Prozesse ist wesentlich komplexer als die mehrstufiger, einstufig belegter. Während bei einstufig belegten Prozessen die gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Stufen allein dadurch vorliegt, dass das Schmiedeergebnis einer Umformstufe gleichzeitig die Ausgangsgeometrie des Werkstücks der Folgestufe ist („werkstückbezogene Interaktion“), interagieren die Einzelstufen bei mehrstufig belegten Prozesse noch stärker. Da alle Umformstufen zum sich einstellenden Maschinenverhalten beitragen, führt die Veränderung einer Prozessstufe zu einer veränderten Gesamtbelastung der Umformmaschine und somit zu Rückwirkungen auf alle Umformstufen („maschinenbezogene Interaktion“).

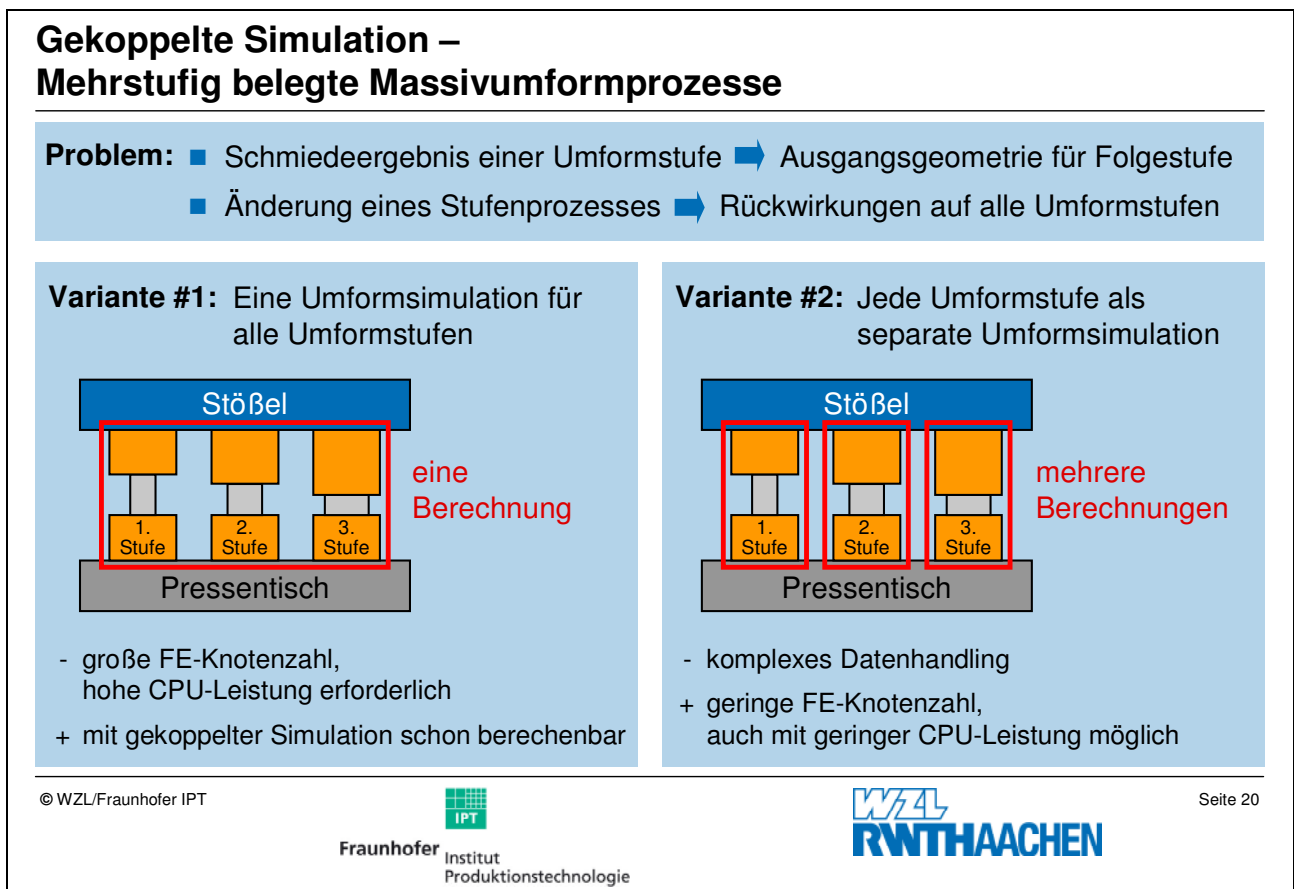


Bild 14: Gekoppelte Simulation mehrstufig belegter Mehrstufenprozesse

Bild 14 zeigt schematisch die zwei prinzipiellen Möglichkeiten der Anwendung der gekoppelten Simulation zur Berechnung mehrstufig belegter Massivumformprozesse. In der links dargestellten Variante #1 werden die einzelnen Prozesse aller Umformstufen als separate Objekte in einer Umformsimulation zusammengefasst. Für das Prinzip der gekoppelten Simulation ergibt sich daraus keine Änderung, da weiterhin eine Umformsimulation mit einer Maschinensimulation gekoppelt wird. Die Interaktionen zwischen den einzelnen Prozessstufen werden innerhalb der Umformsimulation abgebildet. Anwendungsrestriktionen bestehen bei dieser Variante allerdings darin, dass die eingesetzten Umformsimulationsmodelle sehr umfangreich und somit sehr rechenzeitintensiv werden.

In der in Bild 14 rechts dargestellten Variante #2 der gekoppelten Simulation mehrstufig belegter Umformprozesse wird jede Prozessstufe des Werkzeugs in einer eigenen Umformsimulation berechnet. Das Schnittstellenmodul der gekoppelten Simulation ist in diesem Fall derart erweitert, dass eine Kopplung mit einer beliebigen Anzahl von Einzelstufensimulationen stattfinden kann. Die Berechnung der Interaktionen zwischen den einzelnen Prozessstufen findet hier nicht innerhalb der Umformsimulation, sondern im Schnittstellenmodul der gekoppelten Simulation statt, was zu einem wesentlich komplexeren Datenhandling führt und eine intelligente Steuerung und Datenverwaltung für die einzelnen Stufensimulationen erfordert. Der Vorteil von Variante #2 der gekoppelten Simulation für mehrstufig belegte Prozesse gegenüber Variante #1 liegt dabei in der geringeren Komplexität der Umformsimulationsmodelle der einzelnen Stufensimulationen.

Die Möglichkeiten, die die gekoppelte Simulation für mehrstufige Prozesse bietet, werden exemplarisch anhand einer zweistufigen Umformung dargestellt und gelten in ähnlicher Weise auch für Prozesse mit höherer Stufenzahl. Als Werkstück wird eine Ringstauchprobe verwendet, die in zwei Stufen von 50 mm auf 30 mm gestaucht wird. Die Umformsimulation ist in diesem Beispiel derart gestaltet, dass beide Umformprozesse in einer Umformsimulation zusammengefasst sind (s. Bild 14, Variante #1).

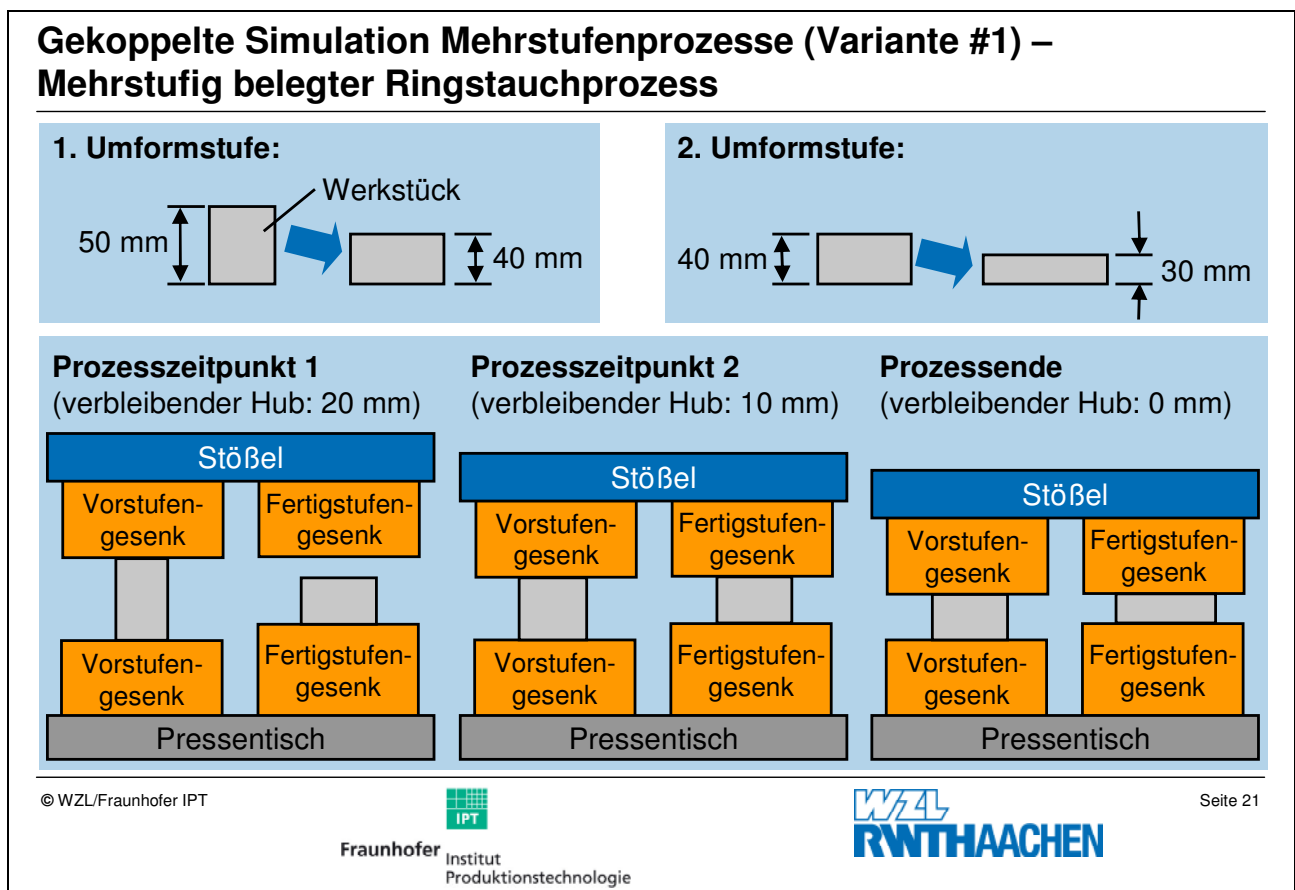


Bild 15: Prozessfolge eines mehrstufig belegten Ringstauchprozesses

Die Prozessfolge zu drei charakteristischen Zeitpunkten ist in Bild 15 dargestellt. Zu Prozesszeitpunkt 1 beginnt die Umformung des Werkstücks in der Vorstufe. Charakteristisch für mehrstufig belegte Prozesse ist, dass gerade zu Prozessbeginn noch nicht in allen Werkzeugstufen Umformungen stattfinden. So beginnt die Umformung in der Fertigstufe zeitverzögert, in diesem Beispiel bei einem verbleibenden Hub von 10 mm (Prozesszeitpunkt 2). Der Prozess endet, wenn die

Ringstauchprobe auf ihre Endhöhe von 30 mm gestaucht ist (Prozesszeitpunkt 3). Von Zeitpunkt 2 bis 3 finden die Umformungen in der Vor- und Fertigstufe gleichzeitig statt.

In Bild 16 ist auf der linken Seite das mit der gekoppelten Simulation berechnete Auffederungsverhalten der Presse in Z-Richtung und auf der rechten Seite das Kippungsverhalten um die Y-Achse bei Verwendung eines nicht-linear-elastischen, analytischen Pressenmodells dargestellt. Zusätzlich sind die Auffederungen und Kippungen aufgetragen, die sich bei einstufiger Prozessführung, also bei Umformung nur in der Vorstufe und nur in der Fertigstufe, einstellen würden.

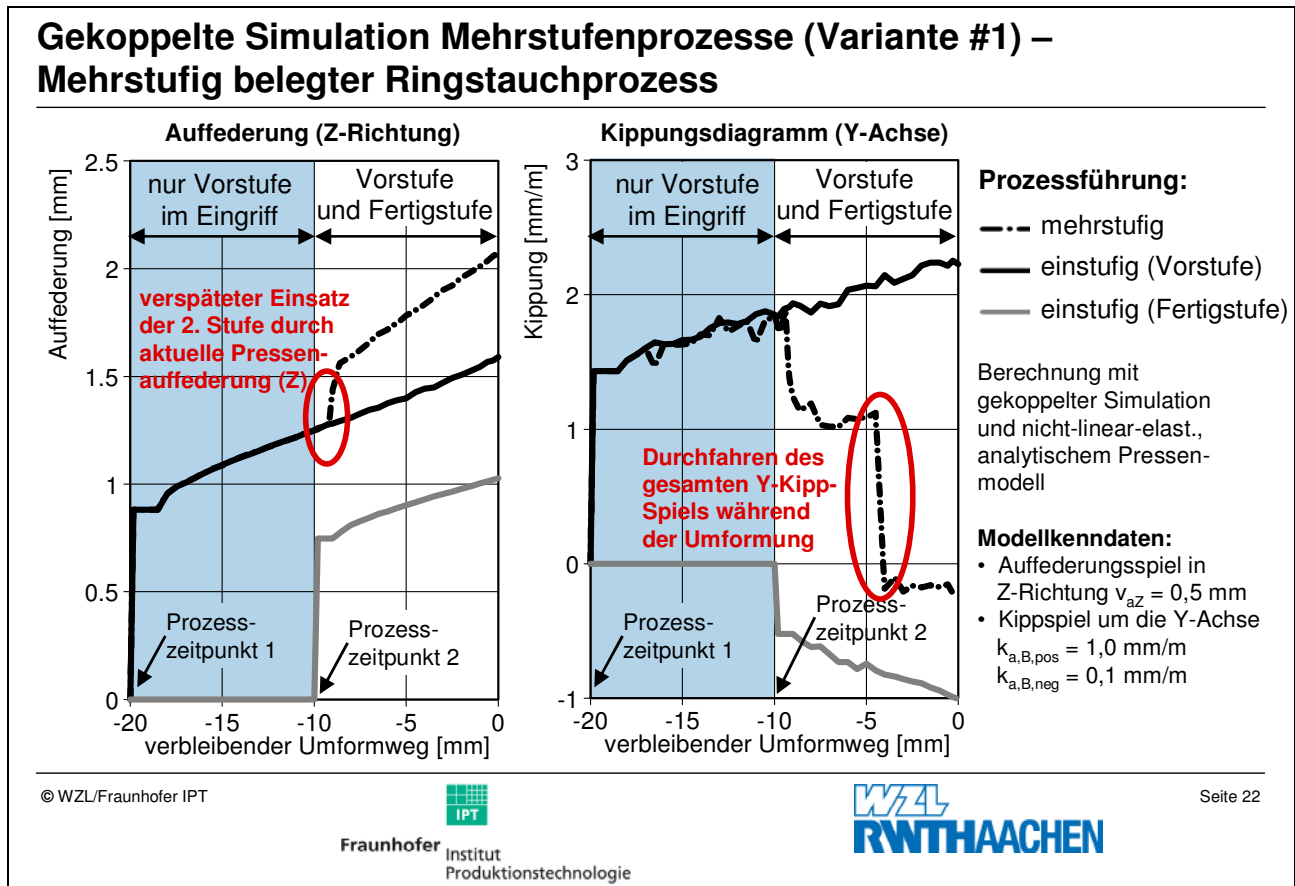


Bild 16: Simuliertes Pressenverhalten eines mehrstufig belegten Ringstauchprozesses

Bei der Analyse des Auffederungsverhaltens bei mehrstufig belegter Prozessführung ist der Anstieg der Auffederung durch die zusätzliche Belastung zu Beginn des Fertigstufenprozesses zum Prozesszeitpunkt 2 klar zu erkennen. Dabei setzt die zweite Stufe bei der mehrstufig belegten Umformung erst verspätet bei 8,8 mm und nicht bereits bei 10 mm verbleibendem Umformweg ein, da zu diesem Zeitpunkt die Auffederung der Maschine bereits 1,2 mm beträgt. Eine Addition der sich aus den Einzelprozessen einstellenden Verlagerungen würde zu fehlerhaften Ergebnissen führen, da der in beiden Einzelauffederungen enthaltene nicht-linear-elastische Anteil beim mehrstufig belegten Prozess nur einmalig vorliegt.

Der Einfluss des Maschinenspiels auf das Pressenverhalten zeigt sich in ausgeprägter Weise im Verlauf der Stößelkippung um die Y-Achse. Während sich auf Grund der exzentrisch in X-Richtung versetzten Position des Vorstufenprozesses zunächst eine positive Stößelkippung einstellt, folgt aus der in positiver X-Richtung versetzten Umformung der Fertigstufe eine deutliche Beeinflussung des Gesamtkippungsverlaufs. Das aus der Fertigstufenumformung resultierende Moment um die Y-Achse steigt schneller als das aus der Vorstufenumformung, so dass das auf den Stößel wirkende Gesamtdrehmoment negativ wird. Hieraus folgt, dass die Stößelkippung bei einem verbleibenden

Umformweg von 4 mm das gesamte definierte Kippspiel von +1,0 mm/m bis -0,1 mm/m durchläuft und bis zum Prozessende negativ bleibt.

Das Beispiel zeigt, dass mit der gekoppelten Simulation und nicht-linear-elastischer Pressensimulation auch komplexe mehrstufig belegte Umformprozesse berechnet werden können. Die für diese Prozesse sehr ausgeprägte maschinenbedingte Interaktion der Einzelstufen wird somit simulations-technisch darstellbar. Durch die Verwendung des Finite-Elemente-Netzes des umgeformten Vorstufen-Werkstückmodells als Ausgangszustand für die nachfolgende Fertigstufe wird zudem die werkstückbedingte Interaktion abgebildet, so dass alle beim realen Umformprozess auftretenden gegenseitigen Beeinflussungen der Einzelstufen mit der gekoppelten Simulation erfasst werden. Dies stellt die Grundlage für die simulationsgestützte Optimierung von mehrstufig belegten Umformprozessen dar, die dann in ähnlicher Weise wie für einstufig belegte Prozesse durchgeführt wird.

Bild 17 verdeutlicht den notwendigen Informationsfluss für die gekoppelte Simulation von mehrstufig belegten Umformprozessen nach Variante #2 am Beispiel eines dreistufigen Prozesses.

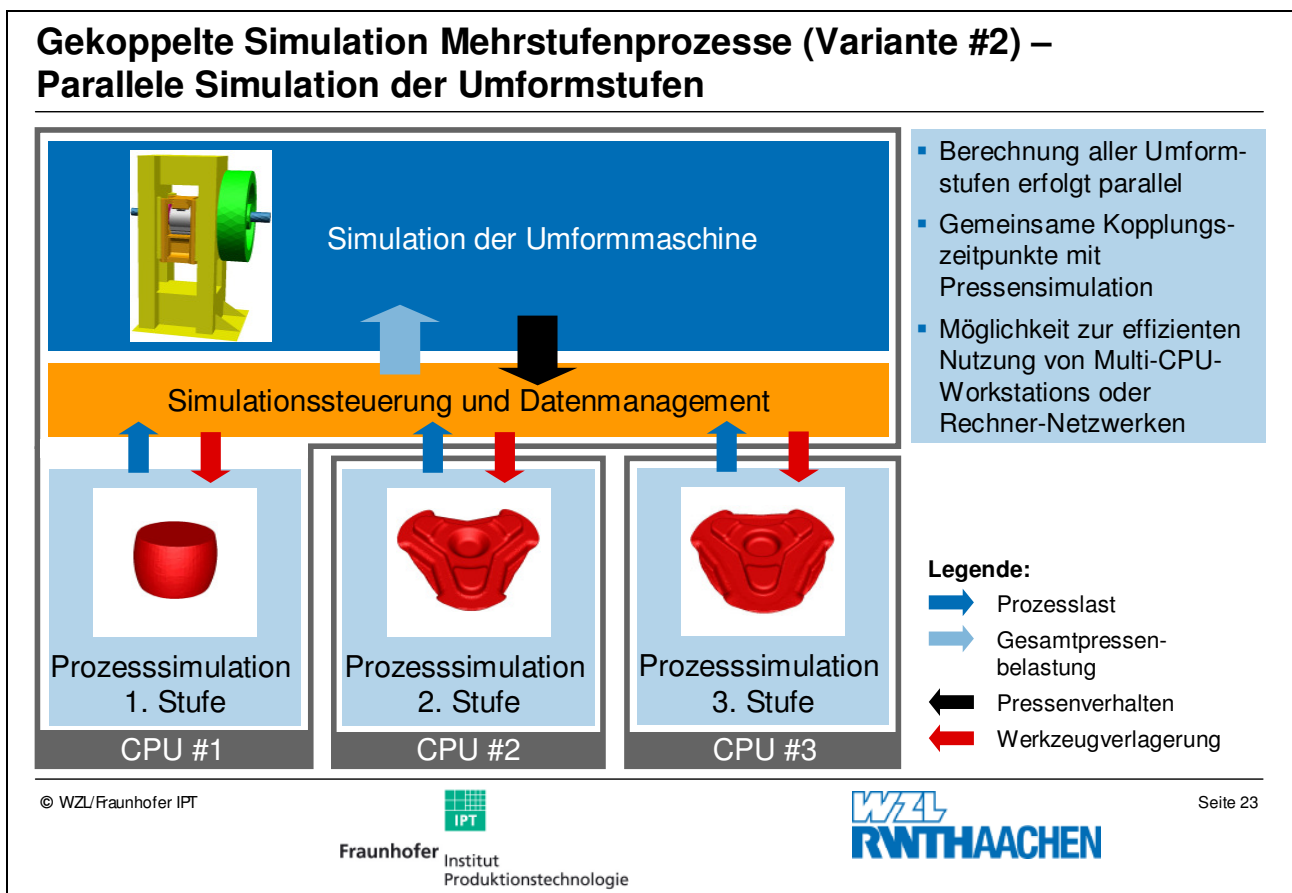


Bild 17: Parallele Simulation der Prozessstufen mehrstufig belegter Umformprozesse

Die grundlegende Methodik der gekoppelten Simulation (vgl. Bild 3) wird nicht verändert. Die Berechnung der einzelnen Umformstufen erfolgt parallel und die Kopplung mit der Pressensimulation findet zu festgelegten gemeinsamen Kopplungszeitpunkten statt. Dadurch erfolgt die Übergabe der Gesamtpressenbelastung vom Schnittstellenmodul an die Pressensimulation erst, wenn alle Prozesssimulationen ihren entsprechenden Berechnungsschritt beendet haben und die Prozesslasten der einzelnen Umformstufen vorliegen. Aus dem von der Pressensimulation zurückgegebenen Verlagerungs- und Kippungsverhalten des Stößels werden anschließend im Schnittstellenmodul die Werk-

zeugverlagerungen der einzelnen Prozessstufen berechnet und an die zugehörigen Prozesssimulationen weitergeben, wodurch der nächste Berechnungsschritt der Prozesssimulationen gestartet wird.

Durch die separate Umformsimulation der einzelnen Prozessstufen bei dieser Variante der gekoppelten Simulation mehrstufig belegter Umformprozesse (Variante #2) ergibt sich die Möglichkeit der effizienten Nutzung von Multi-CPU-Workstations oder Rechner-Netzwerken. Da jede Umformsimulation als eigenständige Anwendung arbeitet und lediglich der Start der Berechnungsschritte vom Schnittstellenmodul der gekoppelten Simulation gesteuert wird, ist es ausreichend, wenn das Berechnungsverzeichnis der einzelnen Simulationen bekannt ist. Die Umformsimulationen selbst können auf verschiedenen CPUs oder Rechnern in einem Netzwerk stattfinden. Somit wird eine schnelle Berechnung komplexer mehrstufiger Massivumformprozesse ermöglicht.

In Bild 18 ist eine modifizierte Variante der in Bild 17 gezeigten parallelen gekoppelten Simulation von mehrstufig belegten Umformprozessen nach Variante #2 dargestellt. Hierbei findet die Prozesssimulation der einzelnen Umformstufen nicht parallel sondern sequentiell statt, und es müssen nicht im vorhinein gleiche Kopplungszeitpunkte für alle Prozesssimulationen definiert werden. Dies ermöglicht eine rechenzeitoptimierte gekoppelte Simulation komplexer mehrstufiger Prozesse auch auf Einzelplatz-Rechnersystemen, da stets nur eine Prozesssimulation rechnet.

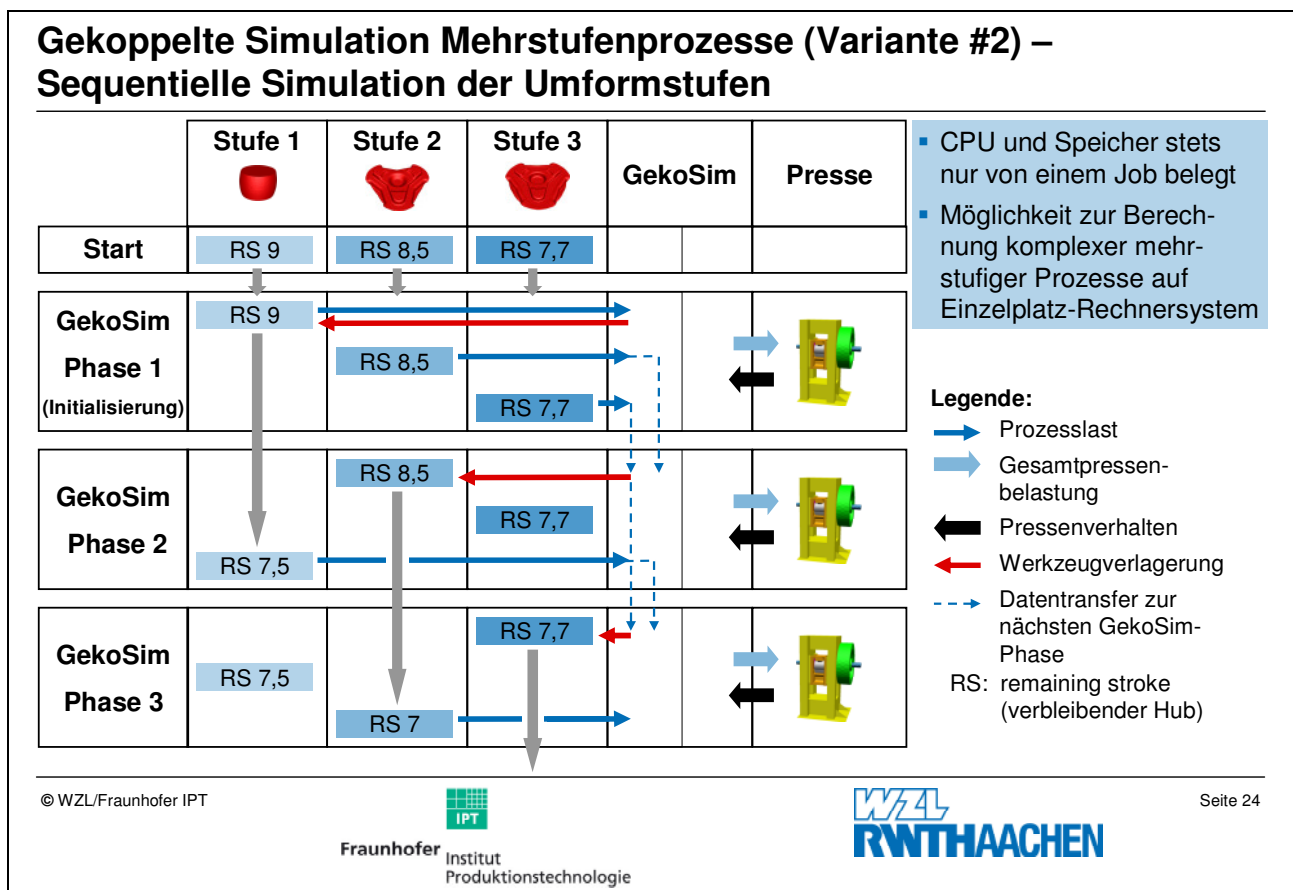


Bild 18: Sequentielle Simulation der Prozessstufen mehrstufig belegter Umformprozesse

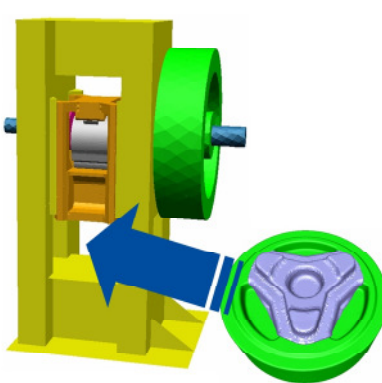
Die in Bild 18 dargestellte sequentielle Simulation der einzelnen Umformstufen basiert darauf, dass stets die Prozessstufe mit dem größten noch verbleibenden Hub (RS: remaining stroke) als nächste einen Berechnungsschritt in der Umformsimulation ausführt.

Zu Beginn der mehrstufigen gekoppelten Simulation findet zunächst eine Initialisierung der einzelnen Umformsimulationen statt. Am Ende dieser Initialisierung übergeben alle Prozesssimulationen die Koordinaten der FE-Knoten ihres Werkzeugmodells mit den anliegenden Prozesslasten und ihren RS an das Schnittstellenmodul. Dies berechnet die Gesamtpressenbelastung, übergibt diese an die Pressensimulation und erhält die Verlagerung und Kippung des Stößels zurück. Das Schnittstellenmodul berechnet daraus die Werkzeugverlagerungen der einzelnen Prozessstufen (zu Beginn der Simulation „0“, da keine Prozesslast). Nun vergleicht das Schnittstellenmodul die RS aller vorhandenen Prozessstufen und übergibt nur der Prozesssimulation mit dem größten RS die neuen Werkzeugverlagerungen, wodurch diese ihren nächsten Berechnungsschritt startet. Die Daten der anderen Prozessstufen, die nicht zu rechnen beginnen, da ihr RS geringer ist, bleiben im Schnittstellenmodul gespeichert. Hat die rechnende Prozessstufe ihren Berechnungsschritt beendet, übergibt sie ihre neuen Werkzeug-FE-Knotenkoordinaten mit den neuen anliegenden Lasten und dem neuen RS an das Schnittstellenmodul. Dies verarbeitet die neuen Daten mit den gespeicherten der anderen Prozessstufen und der Zyklus beginnt erneut, bis die gekoppelte Simulation vollständig abgeschlossen ist.

Für die Steuerung des sequentiellen Simulationsablaufs ist eine zusätzliche Erweiterung des Schnittstellenmoduls der gekoppelten Simulation um weitere Steuerungs- und Datenverwaltungsfunktionen notwendig. Die Entscheidung, ob eine parallele (Bild 17) oder eine sequentielle gekoppelte Simulation (Bild 18) des mehrstufig belegten Massivumformprozesses stattfinden soll, wird vom Anwender beim Start der Berechnung getroffen.

6 Zusammenfassung


Zusammenfassung




- Kopplung von Umform- und Maschinensimulation mit nicht-linear-elastischen Pressenmodellen führt zu deutlicher Steigerung der Berechnungsgüte
- Pressenindividuelle Werkzeugoptimierung bereits während der Entwicklungsphase von Ein- und Mehrstufenwerkzeugen möglich (Virtuelle Werkzeugeinarbeitung)
- Softwaretechnische Umsetzung der Gekoppelten Simulation erlaubt einfache und kostengünstige Anwendung in der industriellen Praxis
- Weiterführende Arbeiten hinsichtlich intelligenter Simulationssteuerung der gekoppelten Simulation für mehrstufig belegte Massivumformprozesse

Projektförderung: Stiftung Industrieforschung, Industrieverband Massivumformung e.V.

© WZL/Fraunhofer IPT



Fraunhofer
Institut
Produktionstechnologie



Seite 26

Bild 19: Zusammenfassung

Literatur

- [1] Körner, E.; Szentmihalyi, V.; Lutz, M.: Rechnergestützte Entwicklung von Präzisionsumformteilen. In: Tagungsband zur Konferenz „Neuere Entwicklungen in der Massivumformung“. Fellbach, 03.-04. Juni 2003. MAT INFO Werkstoff-Informationsgesellschaft mbH, Frankfurt a. M. 2003
- [2] N. N.: Erfahrungen mit der Simulation von Umformprozessen. Schmiede-Journal, September 2005, S. 8-9.
- [3] Muckelbauer, M.; Böse, L.: Virtuelle Prozessentwicklung mit Schmiedesimulationssoftware. Schmiede-Journal, September 2000, S. 36-37.
- [4] Slagter, W.; Hambrecht, J.: Schmiedesimulation: Umfrageergebnisse zur Wirtschaftlichkeit, Schmiede-Journal, September 2002, S. 14-16.

Das Forschungsprojekt SI S 789 „Optimierung von Mehrstufenwerkzeugen durch gekoppelte Simulation von Maschine und Prozess“ wird aus Mitteln der Stiftung Industrieforschung über den Industrieverband Massivumformung e.V. gefördert.

Das Forschungsprojekt SI S 683 „Gekoppelte Simulation von Massivumformprozess und Maschine“ wurde aus Mitteln der Stiftung Industrieforschung über den Industrieverband Massivumformung e.V. gefördert. Die Langfassung des Abschlussberichts kann bei der Forschungsstelle Stahlverformung, Goldene Pforte 1, 58093 Hagen angefordert werden.

Entwicklung eines validierten Simulations- werkzeuges zur Abbildung der Wechselwirkungen zwischen Werkzeug und Werkstück am Beispiel des Flachwalzprozesses

Prof. Dr.-Ing. G. Hirt
MSc. S. Puchhala
Dipl.-Ing. M. Franzke

Institut für Bildsame Formgebung
RWTH Aachen

ENTWICKLUNG EINES VALIDIERTEN SIMULATIONSWERKZEUGES ZUR ABBILDUNG DER WECHSELWIRKUNGEN ZWISCHEN WERKZEUG UND WERKSTÜCK AM BEISPIEL DES FLACHWALZPROZESSES

Sreedhar Puchhala, Martin Franzke, Gerhard Hirt

1 Abstract

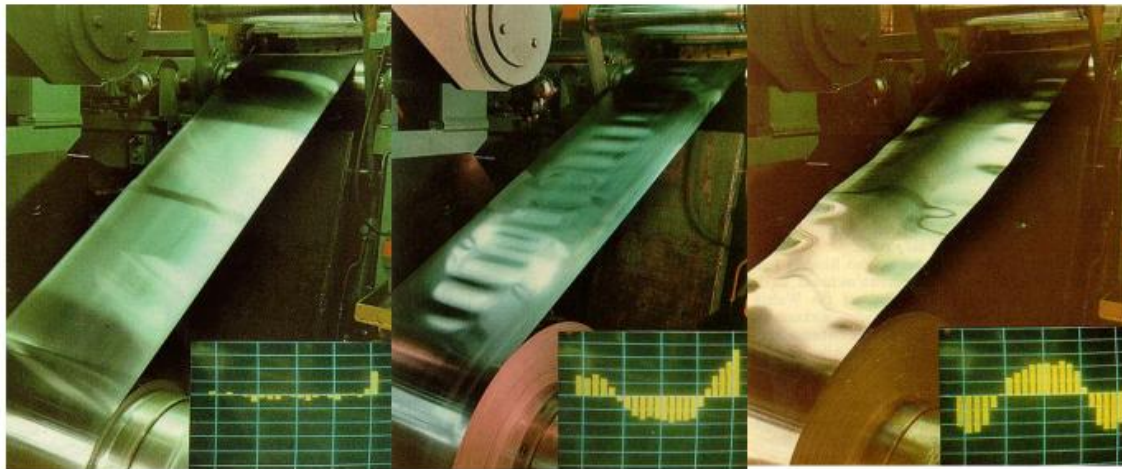
In cold rolling process, elastic deformation of the tools has a big impact on the final shape of the work-piece. For fine surface finish of the strip, small diameter work rolls have to be used. As the work roll diameter reduces, the contact length between workroll and strip reduces. Computation of such processes considering elastic effects of the tools, requires very fine discretisation of both work roll and strip and complicates to manage the convergence criteria of the whole FE model. This situation is even aggravated if the contact situations (between working and support rolls) have to be considered in the simulation.

This paper presents recently developed concept which meets the above mentioned demands very effectively. Within this concept, the computation of the elastic effects of the tools is separated from the process simulation (which considers elastic-plastic effects of the work-piece). Both simulations are coupled via automatic data interchange, which is bi-directional, because both simulations influence each other. The advantages of this concept include a quite easy to handle contact situations in process simulation, smaller stiffness matrix compared to single model approach and good convergence of the computation. This concept is highly generalized and successfully applied to simulate rolling, drawing, extrusion and forging processes. The above mentioned concept is being implemented into the FE package PEP and LARSTRAN/SHAPE. Rolling experiments are conducted in duo and quarto configuration. Optical three-dimensional digitalising system was used to measure the deformations within the machine and work-piece profile. These results are used for the validation of FE simulations. This work is being sponsored by the German Research Foundation (DFG) through the project "Interaction effects between processes and structures -SPP1180".

Gliederung

- **Problemdefinition**
 - Elastische Werkzeugdeformation
 - Konventionelle Simulationsmodelle
- **Vorstellung einer FEM – FEM Modellkopplung**
 - Konzept
 - Prozesssimulationsmodell
 - Elastisches Simulationsmodell (DOELTOSIM)
- **Ergebnisse**
 - Experimentelle Untersuchungen
 - Werkzeugabflachung
 - Werkzeugbiegung
 - Quarto Modell (Änderungen im Querschnitt)
 - Übertragung auf weitere Umformprozesse
- **Zusammenfassung und Ausblick**

Problem definition during flat rolling process



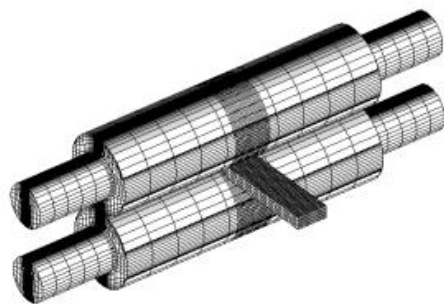
Ideal flat strip

Middle crowns

Edge crowns

3

Elastic tool deformation

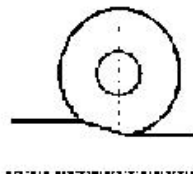


The load distribution between rollers and workpiece causes elastic deformation in the rollers.

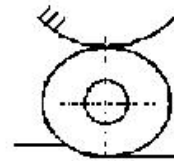
Bending



Flattening



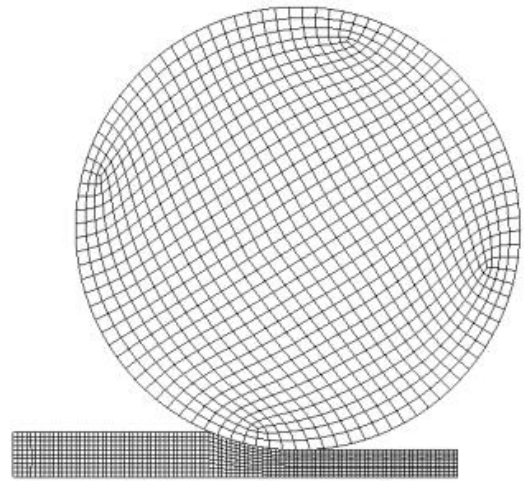
Change in profile



4

Conventional numerical simulation model

- Consider as a single FE model
- Very fine discretisation at contact regions – large finite element models
- Contact between working and supporting rolls
- High computational effort and time

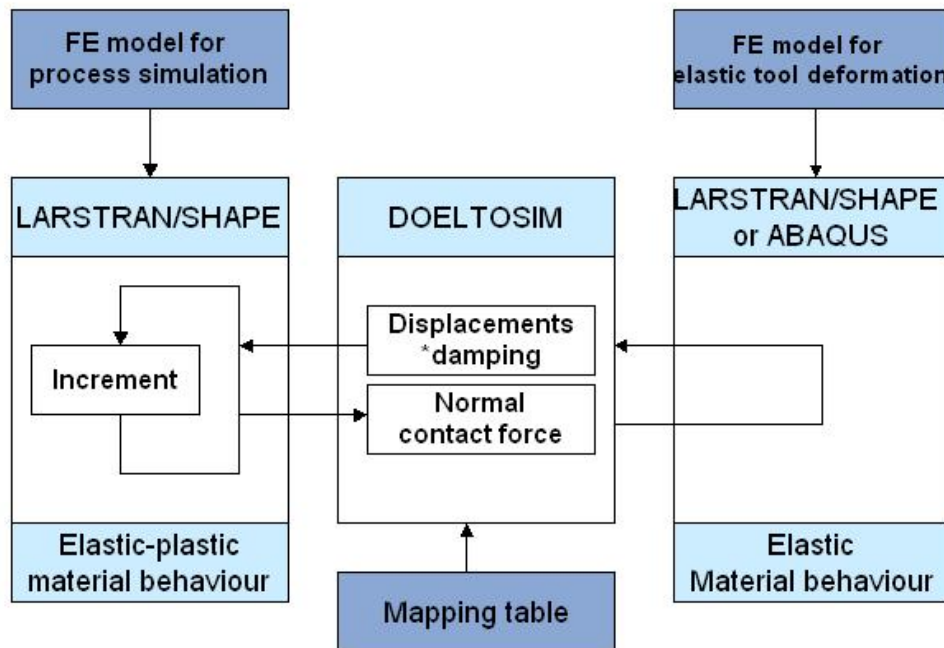


Conventional FE model to simulate flat rolling process considering tool deformations

Gliederung

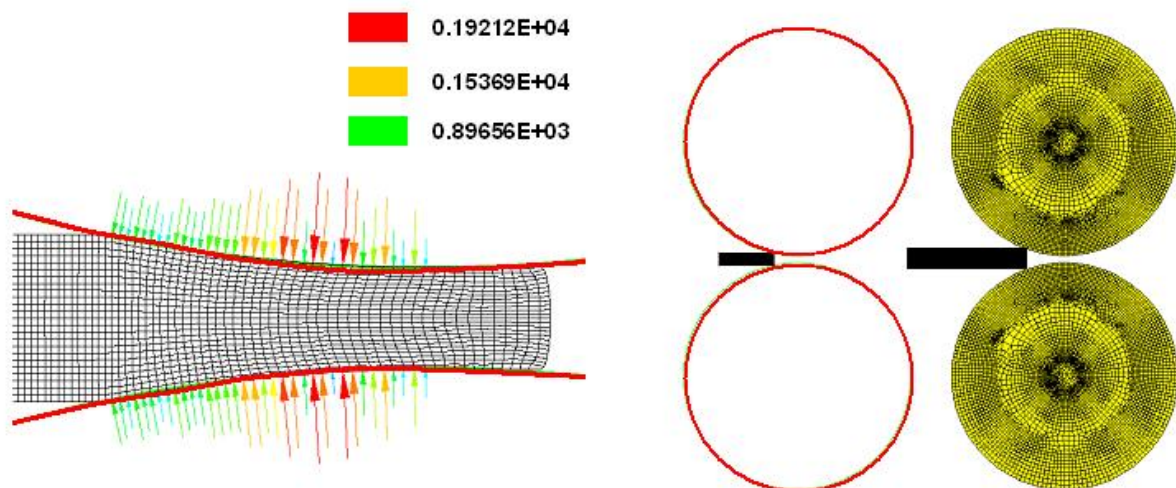
- Problemdefinition
 - Elastische Werkzeugdeformation
 - Konventionelle Simulationsmodelle
- Vorstellung einer FEM – FEM Modellkopplung
 - Konzept
 - Prozesssimulationsmodell
 - Elastisches Simulationsmodell (DOELTOSIM)
- Ergebnisse
 - Experimentelle Untersuchungen
 - Werkzeugabflachung
 - Werkzeugbiegung
 - Quarto Modell (Änderungen im Querschnitt)
 - Übertragung auf weitere Umformprozesse
- Zusammenfassung und Ausblick

Proposed numerical model – concept (FEM – FEM coupling)



7

Process Simulation Model



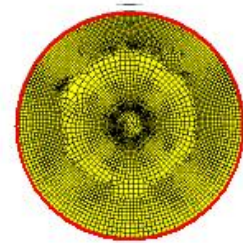
Normal contact forces

Process simulation (left) and conventional simulation (right) models

8

Elastic simulation model (DOELTOSIM)

- DOELTOSIM module uses a “ Mapping table ”
 - One-to-one mapping of surface elements in both models
 - Extracts normal contact forces from the process simulation
 - Normal contact forces are applied onto the elastic model
 - LARSTRAN/SHAPE computes elastic deformations
 - Updates tool geometry in the process simulation model



Elastic dobl

Gliederung

- Problemdefinition
 - Elastische Werkzeugdeformation
 - Konventionelle Simulationsmodelle
- Vorstellung einer FEM – FEM Modellkopplung
 - Konzept
 - Prozesssimulationsmodell
 - Elastisches Simulationsmodell (DOELTOSIM)
- Ergebnisse
 - Experimentelle Untersuchungen
 - Werkzeugabflachung
 - Werkzeugbiegung
 - Quarto Modell (Änderungen im Querschnitt)
 - Übertragung auf weitere Umformprozesse
- Zusammenfassung und Ausblick

Experimental techniques – Overview

Optical strain measurement (ARGUS)

Measuring the strain distribution

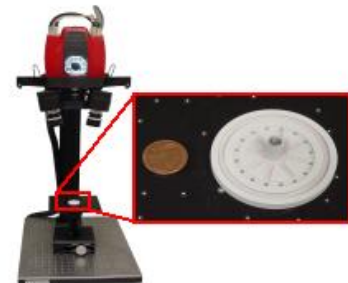
Quality of the measurement:= 0.01% strain



Advanced Topographic Sensor (ATOS)

Measuring the surface profile

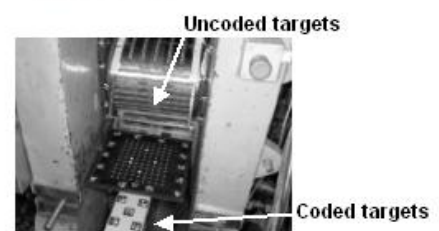
Quality of measurement:= 1/20,000 measuring field size



Optical coordinate measuring (TRITOP)

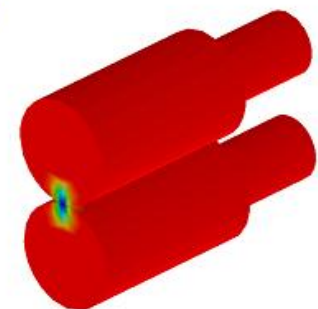
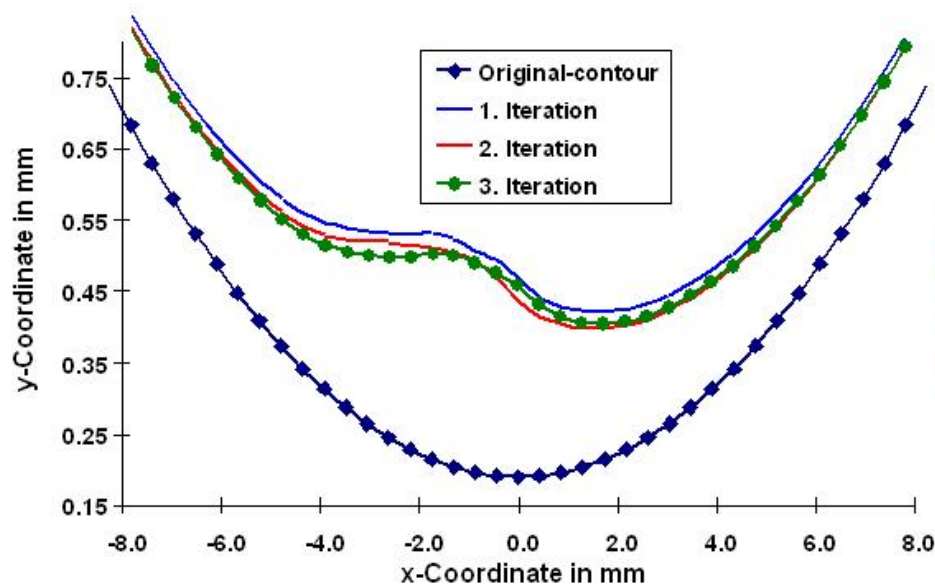
Measuring the mill deformation

Quality of measurement:= 0.01mm per meter object size



11

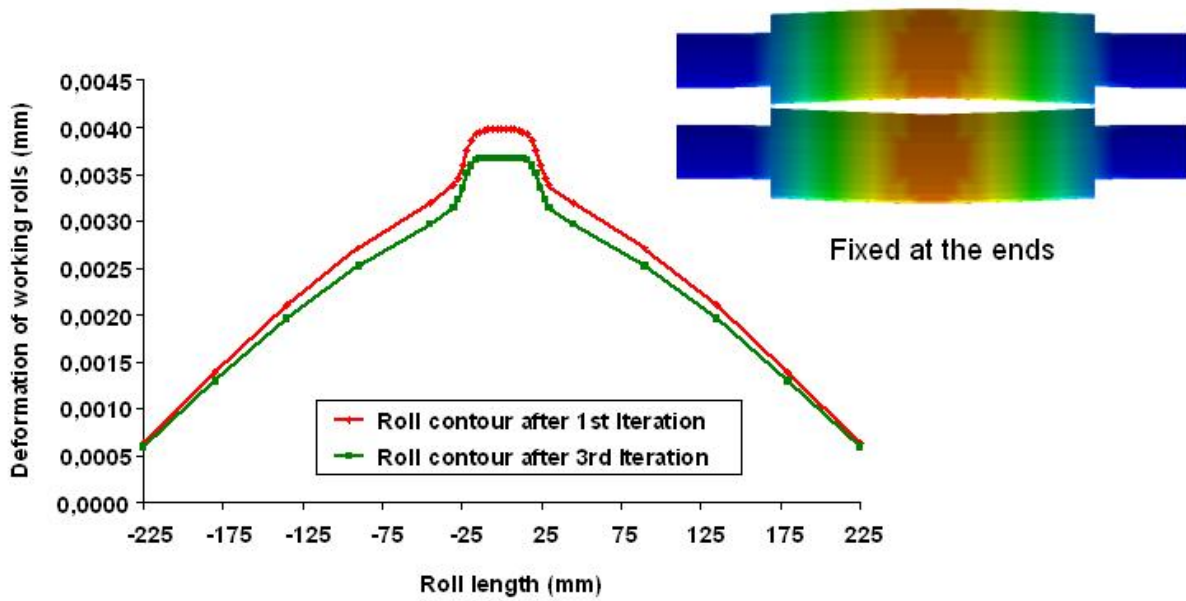
Contour of the working rolls at contact region (flattening)



Fixed axis model

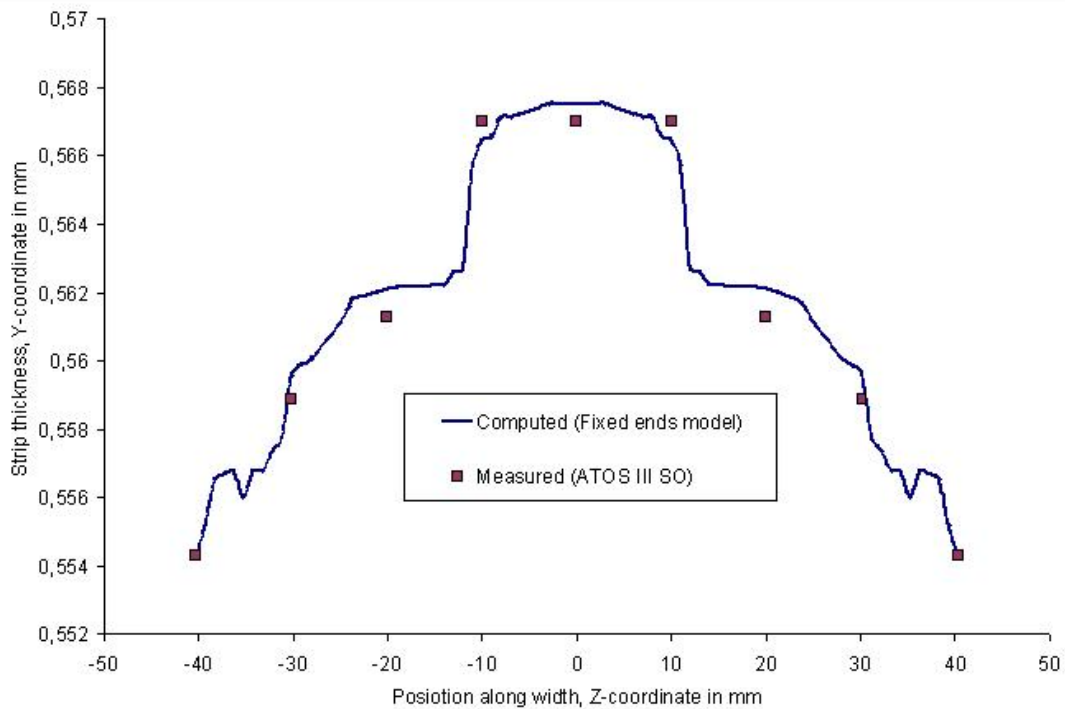
12

Roll bending effects



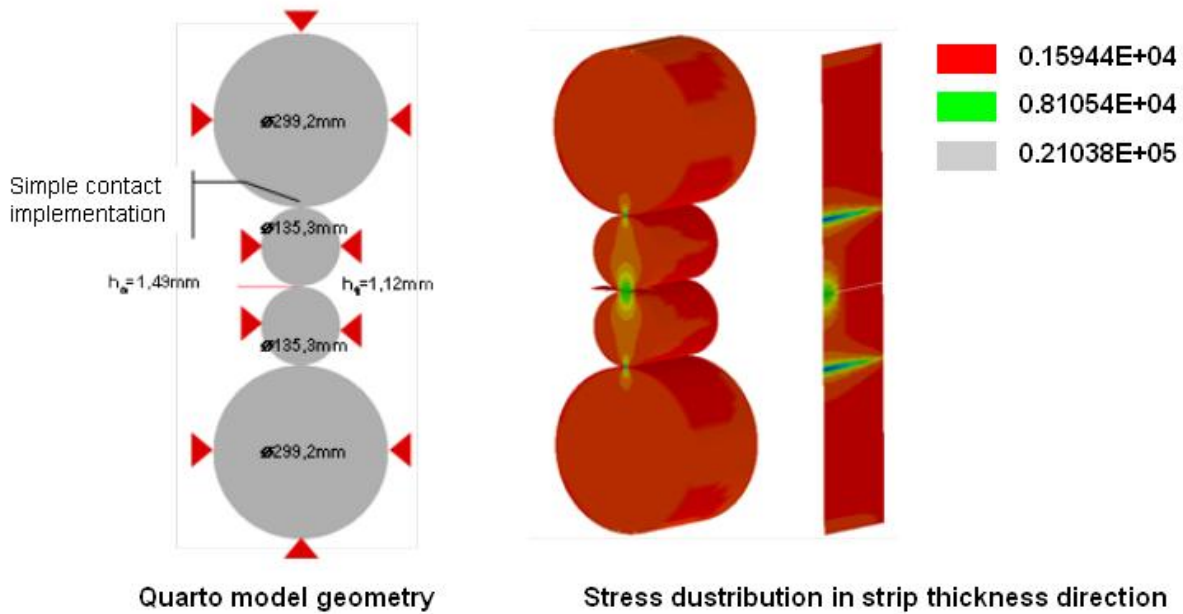
13

Strip thickness profile



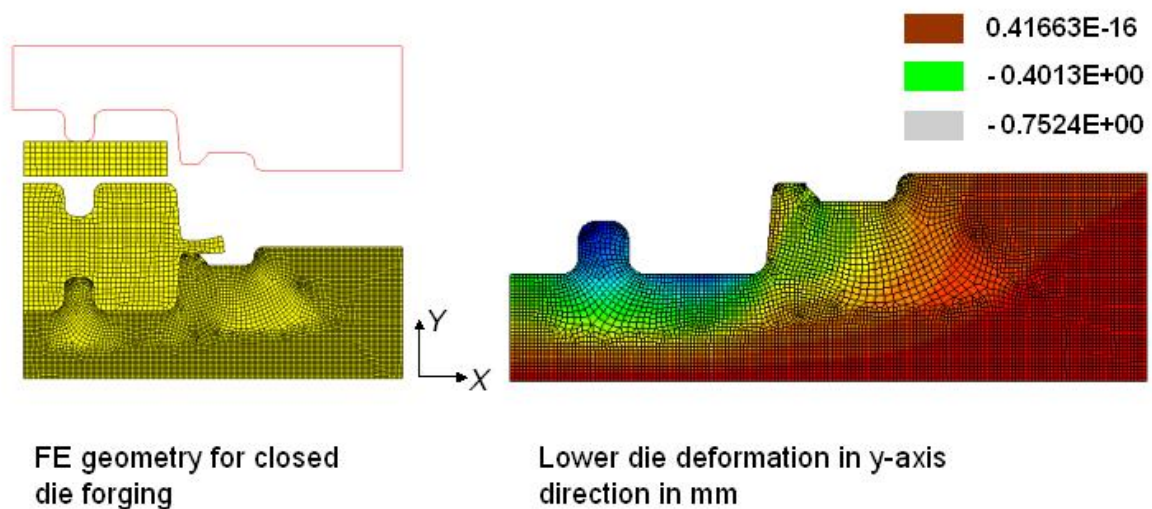
14

Elastic simulation model considering supporting rolls



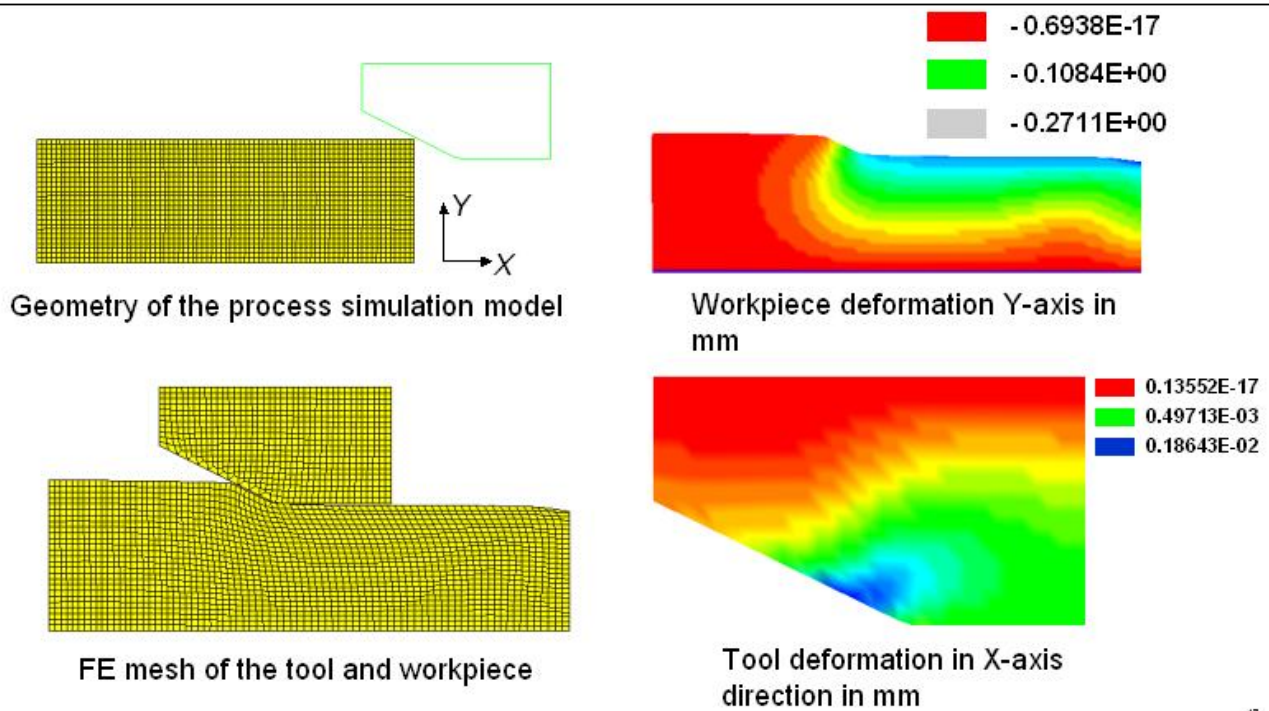
15

Tool deformation during closed die forging



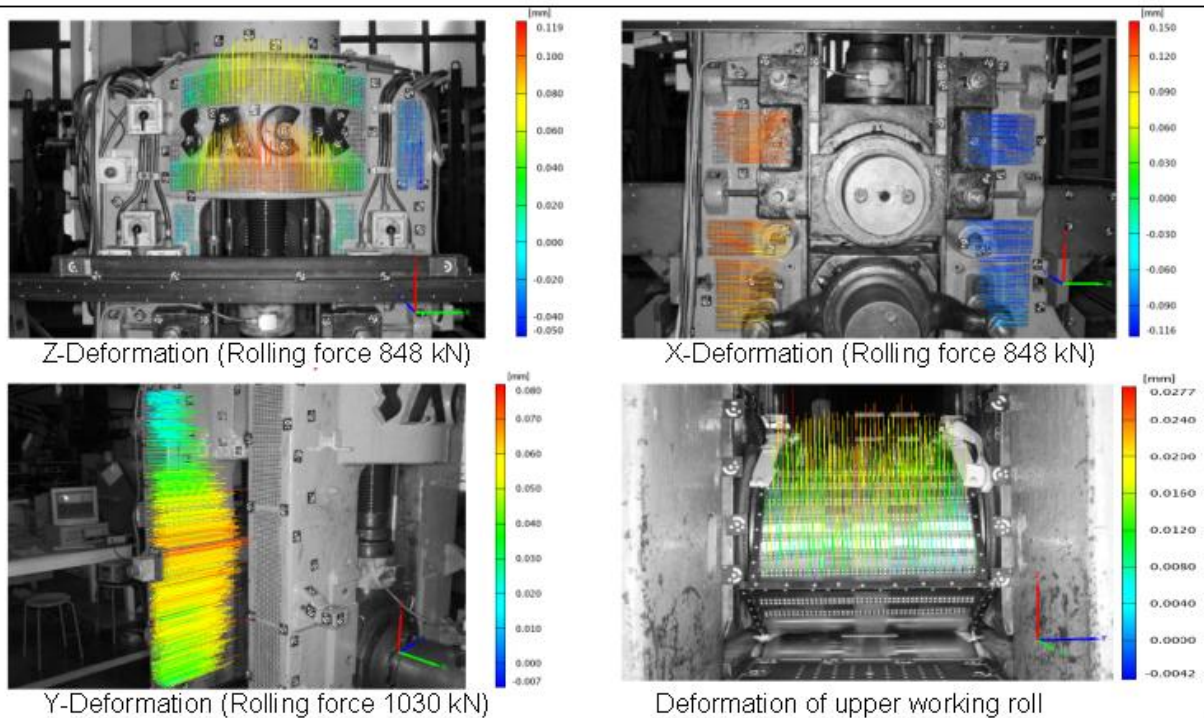
16

Tool deformation during drawing process



17

Deformation of mill stand and working roll (TRITOP)



18

Gliederung

- Problemdefinition
 - Elastische Werkzeugdeformation
 - Konventionelle Simulationsmodelle
- Vorstellung einer FEM – FEM Modellkopplung
 - Konzept
 - Prozesssimulationsmodell
 - Elastisches Simulationsmodell (DOELTOSIM)
- Ergebnisse
 - Experimentelle Untersuchungen
 - Werkzeugabflachung
 - Werkzeugbiegung
 - Quarto Modell (Änderungen im Querschnitt)
 - Übertragung auf weitere Umformprozesse
- Zusammenfassung und Ausblick

19

Conclusion

- Separate finite element models for process and elastic simulations (FEM – FEM Coupling)
- Computation of tool flattening, bending and change in tool profile (Through out fixed and only at the ends fixed model)
- Easy to handle, efficient in computational time (Small FE model due to separation of tool computation)
- Independent of process simulations types (tool deformation in closed die forging, drawing)
- Optical measuring techniques used for the validation (ATOS, ARGUS, TRITOP)

20

Outlook

- Consideration of contact conditions (working and supporting rolls)
- Development of ABAQUS models (contact between working and supporting rolls)
- Computation of elastic strip tension module (DOELSTRIPSIM)

Acknowledgements

We would like to thank „**Deutsche Forschungsgemeinschaft**“ (**DFG**) for their continuous support through the project „Development of a validated simulation tool for the computation of interaction effects between the process and tool – SPP1180“



Einbeziehung der Maschinen in die Umformsimulation – Schritt in die richtige Richtung?

Dr.-Ing. H. Just
Femutec Engineering GmbH, Hamburg

Prof. Dr.-Ing. M. Kolbe
Institut für Produktionstechnik, Westsächsische Hochschule Zwickau

Dipl.-Ing. A. Wagner
Fraunhofer IWU, Chemnitz

Einbeziehung der Maschinen in die Umformsimulation – Schritt in die richtige Richtung?

Dr.-Ing. Hendrik Just, Femutec Engineering GmbH, Hamburg

Prof. Dr.-Ing. Matthias Kolbe, Institut für Produktionstechnik, Westsächsische Hochschule Zwickau

Dipl.-Ing. André Wagner, FhG Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Chemnitz

In vielen Fertigungsprozessen wird der Einfluss der Maschine bei der Prozessauslegung vernachlässigt, da eine exakte Bestimmung meist sehr aufwändig ist oder diese Parameter abhängig von der Zeit (Alterung) und den Umgebungsbedingungen sind. Trotzdem ergeben sich Fragestellungen rund um die Maschine, die nur durch Erfahrung oder Probieren gelöst werden können. Die Befestigungstechnik bei Schmiedehämmern stellt hierbei eine besondere Herausforderung dar, da aufgrund der hohen Belastungen nur mechanisch eingesetzte Keile in Frage kommen. Die nachfolgend beschriebenen Arbeiten sollen einen Beitrag zur Fragestellung einer optimalen Befestigungsstrategie in Schmiedehämmern geben.

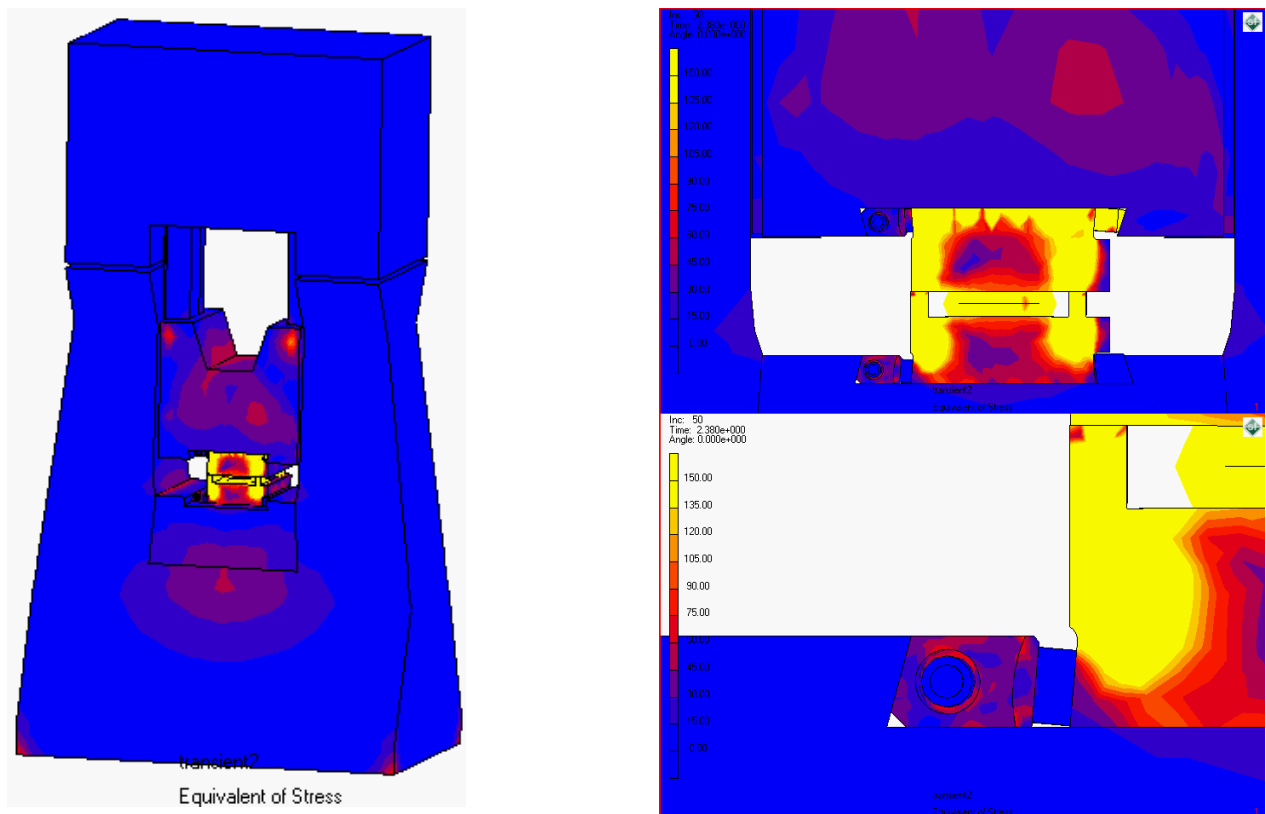


Bild 1: Vergleichsspannung zum Zeitpunkt des Prellschlags bei Schraubspannkeilen.

Die in der Schmiedetechnik überwiegend eingesetzten Hammer-Aggregate verfügen mit Schlag- und Schraubkeilen über relativ einfache Befestigungsmittel für die Gesenke. Diese in verschiedensten geometrischen Formen verfügbaren Keile sorgen dabei für eine form- und reibschlüssige Verbindung. Obwohl sie höchsten Belastungen widerstehen müssen, sind sie die erste Wahl hinsichtlich Rüstaufwand, Haltbarkeit und Dauerfestigkeit. Dennoch ist die Handhabung schwierig, denn neben unsachgemäßem Einsatz stellt eine Bewegung der Keile im Hammer aufgrund der hohen Belastungen im praktischen Einsatz die Hauptquelle für ein Versagen der Verbindung oder sogar eines Werkzeugbruchs dar. Auch erhöht sich der

Rüstaufwand erheblich, wenn die engen Toleranzbereiche im praktischen Einsatz überschritten werden.

Diese besonderen Herausforderungen motivierten eine Gruppe von Firmen eine vom Industrieverband Massivumformung und Patenfirmer geförderte Studie durchzuführen, deren Ziel in der Bestimmung optimaler Keilgeometrien und Vorspannbedingungen für den Einsatz von Schraub- und Schlagkeilen in Hämmern besteht. Der Projektverbund bestand aus dem Fraunhofer Institut IWU in Chemnitz (experimentelle Messungen an den eingesetzten Maschinen) und der Femutec Engineering GmbH (FEM Simulationen). Bei den Partnerfirmen wurden umfangreiche experimentelle Messungen unter Fertigungsbedingungen in exemplarischen Schmiedeprozessen durchgeführt. Hierzu wurden exakte Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverläufe aufgenommen und dadurch die Belastungen im Prozess identifiziert. Insbesondere konnte durch die Messung auftretender Dehnungen an den eingesetzten Schlag- und Schraubspankeilen deren Belastung in der Schmiedefolge und die daraus resultierende Bewegungstendenz ermittelt werden (Lösen oder Eintreiben der Keile).

Die Untersuchungen erfolgten u.a. an einem Riemenfallhammer Beché RF4 (40 kJ) an einer 4-stufigen Schmiedefolge flacher, länglicher Teile mit insgesamt 8 Schlägen. Besonderes Augenmerk wurde auf die Prellschläge beim Fertigschlag gelegt, wenn aufgrund der maximalen Energieeinbringung in die Gesenke auch die Belastung von Aggregat und Keilen am höchsten war. Die experimentellen Untersuchungen ergaben, dass die Verkeilung der Gesenke hochdynamisch belastet wird. Nach Erreichen des stationären Betriebszustandes erfolgte während jedem Schlag eine Zunahme der Spannungen im Keil bis zum Lastmaximum. Während des Bährücksprungs erreichten die Spannungen im Schlagkeil wieder den Ausgangszustand, der sich nach dem Eintreiben eingestellt hatte. Beim Fertigschlag traten die höchsten Beschleunigungswerte mit bis zu +/- 2.000g in wenigen Millisekunden am unteren Keil auf. Diese hohen Werte verdeutlichen die extreme Belastung des Schmiedeaggregats unter Lastbedingungen.

Die Femutec Engineering GmbH modellierte die untersuchten Schmiedeprozesse in einer Umformsimulation mit dem hauseigenen Produkt Simufact.forming 8.0 (vormals MSC.SuperForge), gekoppelt mit einer dynamischen Strukturanalyse des Schmiedeaggregats unter MSC.Marc (Bild 1).

Viele Fertigungsprozesse werden auch heutzutage noch mit teils extremen Vereinfachungen simuliert. Insbesondere unterstellt man durchgängig ein ideales Maschinenverhalten ohne Kippungen, Auffederungen und den bei hochdynamischen Prozessen auftretenden Rückwirkungen der Maschine auf den Fertigungsprozess selbst. So können maschinenabhängige Abweichungen, die zu teils erheblichen Fertigungsschwankungen führen, nicht erfasst werden. Beispielsweise ändert sich der Stofffluss zwischen Schmiedegesenken dann, wenn durch Kippungen im Gesenk Gratsperren auftreten oder durch Nachschwingen der Gesenke Werkstoff zusätzlich umgeformt wird. Umgekehrt beeinflusst aber auch der Fertigungsprozess die Maschine, ihre Genauigkeit und Lebensdauer.

Diese wechselseitige Beeinflussung ist gerade bei der heutzutage üblichen maximalen Auslastung erheblich und ohne größeren Aufwand durch die Prozess-Simulation kaum zu erfassen.

Ein weiterer Aspekt betrifft die Darstellungsmöglichkeiten der gängigen Softwarepakete für die Prozess-Simulation. So ist die Stoffflusssimulation bei Umformprozessen, unter Verwendung elastisch deformierbarer und durch Armierungen vorgespannter Werkzeugverbände als Stand der Technik im Tagesgeschäft des Umformtechniklers anzusehen. Auch Schmiedeprozesse zählen dabei seit Jahren überwiegend zum Standardrepertoire. Allerdings bedient sich die Simulation dabei auch der Möglichkeit, physikalisch hochkomplexe Sachverhalte wie z.B. den Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück, durch starke Vereinfachungen zu modellieren. Nur dadurch sind neben annehmbaren Rechenzeiten auch auf einfache Weise Materialkennwerte gewinnbar. Zu einer

sicheren simulatorischen Auslegung von Fertigungsprozessen zählt auch die Einbindung der Strukturanalyse, d.h. die Modellierung der realen Einsatzbedingungen. Dies kann einmal durch die Kopplung zwischen Fertigungsprozess und Maschine erfolgen und nachgeschaltet als Simulation der Einsatzbedingungen des Werkstücks (Belastungsanalyse). Im Allgemeinen bedingt dies einen erweiterten Modellierungsbedarf sowie einen erhöhten Rechenaufwand. Dennoch ist die derzeit verfügbare Software zu einer durchgängigen gekoppelten Simulation in der Lage, was nachfolgend demonstriert wird.

Die reine Prozess-Simulation erfolgte mit Simufact.forming 8.0 (Finite Volumen Ansatz) auf einem PC (3,4 GHz, ca. 8 h für alle Umformstufen). Die Bewertung des Stoffflusses erlaubte die Verifikation der Simulation auf der Basis der realen Schmiedeergebnisse. Erst dieser Abgleich erlaubte eine sichere Bestimmung wichtiger Eingangsgrößen in die Strukturanalyse: Kraft- und Geschwindigkeitsprofile, eingebrachte Energie in die Gesenke, Ableitung der resultierenden Schrägstellung der Gesenke zueinander zur Bestimmung der Prellflächen. Für die Strukturanalyse mit MSC.Marc wurde der Fallhammer samt Gesenk durch Finite-Elemente modelliert. Aufgrund der hohen Elementanzahl wurden in weniger relevanten Bereichen zumeist geometrische Vereinfachungen angebracht. Dennoch entspricht der Gesamtaufbau weitgehend dem realen Aggregat. Die Rechenzeiten lagen in einem vertretbaren Rahmen, auf einem PC (3,4 GHz) konnte der Prellschlag dynamisch mit ca. 60.000 Hexaeder-Elementen in ca. 14 Stunden komplett berechnet werden.

Erst die Kalibrierung des Simulationsmodells anhand der experimentellen Daten erlaubte verlässliche Aussagen über die Belastungen während des Schmiedens. Folgende Lasten wurden auf die modellierte Maschine aufgebracht: Ober- und Untergesenk mit Gravitationsbeschleunigung; Bär mit Auftreffgeschwindigkeit und Energie, geometrischer Fehlstellung durch Kippung und Toleranz in den Führungsschienen. Das Obergesenk traf mit bis zu 4,5m/s auf das Untergesenk auf, wodurch die gesamte (Prell-)Schlagenergie über das Untergesenk in die Schabotte eingeleitet wurde. Hier wurde die Energiewelle reflektiert und teilweise wieder in das Obergesenk eingebracht. Dieser Vorgang wiederholte sich mehrere Male, was auch durch den oszillierenden Kraftverlauf in der Simulation bestätigt wird. Zusätzlich erfolgt eine elastische Deformation der Gesamtstruktur, die ebenfalls zu den Schwingungen beiträgt.

Aus den Simulationen konnten so die Belastungen der Keile sicher abgeleitet werden. Hierzu wurden verschiedene Spannungsgrößen und Verschiebungen herangezogen. Die Auswertung ergab eine von der Keilgeometrie abhängende Tendenz, aufgrund der Prellschläge fester eingetrieben oder gelockert zu werden. Auch sind gute Übereinstimmungen in den Erkenntnissen der langjährigen, erfahrungsbasierten Entwicklung dieser Geometrien und entsprechenden Resultaten der Simulation festzustellen.

Die Arbeiten motivierten zu einer Erweiterung der Untersuchungen auf die Belastungssituation von Schraubkeilen, die vorwiegend in kleinen und mittleren Hämmern zum Einsatz kommen. Sie zeichnen sich durch einen weniger anfälligen Rüstvorgang aus, allerdings besteht auch die Gefahr einer Fehlbedienung, wenn federnd vorgespannte Schraubkeile zu stark angezogen werden und damit einen Großteil ihrer Dämpfungswirkung verlieren. Gerade hinsichtlich des besonderen Aufbaus der Schraubkeile sind die Anforderungen an die Messtechnik und die Modellierung in der Simulation höher. Auch sind Vorgänge während der Schmiedefolgen in den aufwändigeren Schraubkeilen komplexer und umso mehr ein Grund, die Simulation heranzuziehen.

Aufgrund der Vertraulichkeit der Studienergebnisse kann im Vortrag nur die Methodik an sich dargestellt werden, die zu einer deutlichen Erweiterung des Anwendungsspektrums der

Simulation führt. Auch wird diese Methode und die sich daraus ergebenden Anforderungen an die Modellerstellung kritisch hinterfragt.

Die Bearbeiter der Studie danken dem Industrieverband Massivumformung e.V. und der Patengruppe der beteiligten Unternehmen für die Förderung des Projekts. Auch gilt ein besonderer Dank denjenigen Unternehmen, welche die experimentellen Untersuchungen ermöglicht und unterstützt haben.

Daten der Autoren:

Dr.-Ing. Hendrik Just
Femutec Engineering mbH
Tempowerkring 3
21079 Hamburg
office@femutec.de

Prof. Dr.-Ing. Matthias Kolbe
Westfälische Hochschule Zwickau
Dr.-Friedrichs-Ring 2A
08056 Zwickau
Matthias.Kolbe@iwu.fraunhofer.de

Dipl.-Ing. André Wagner
FhG IWU Chemnitz
Reichenhainer Straße 88
09126 Chemnitz
Andre.Wagner@iwu.fraunhofer.de

Konzepte zur Abbildung großer Werkzeugstrukturen mit reduzierten Modellen in der Blechumformung

Dr.-Ing. A. Haufe
D. Lorenz
S. Mandel

DYNAmore GmbH
Stuttgart

KONZEPTE ZUR ABBILDUNG GROSSER WERKZEUGSTRUKTUREN MIT REDUZIERTEN MODELLEN IN DER BLECHUMFORMUNG

Dr. André Haufe, David Lorenz, Silvia Mandel

DYNAmore GmbH
Industriestrasse 2
70565 Stuttgart
andre.haufe@dynamore.de

1 Einführung

Die numerische Simulation von Blechumformprozessen erfolgt gewöhnlich unter Berücksichtigung strukturmechanischer Annahmen und Vereinfachungen, die vor dem Hintergrund ständig steigender Anforderungen an die Prognosegenauigkeit und ebenfalls ständig steigender Rechnergeschwindigkeit zu überprüfen sind. Vergleicht man zum Beispiel den realen Blechumformprozess mit den heute verwendeten Simulationsmodellen, so erkennt man, dass wesentliche Einflüsse auf den Umformprozess nicht vollständig, nicht richtig oder gar überhaupt nicht im Simulationsmodell beschrieben sind. So fehlen in den heutigen Modellen nicht nur die elastischen Eigenschaften der Maschine, die elastischen Eigenschaften des Werkzeuges, ggf. weitere Eigenschaften der Zieheinrichtung oder die tatsächliche Reibsituation im Prozess, sondern auch die Werkzeug- und Werkstofftemperatur und die Topologie der Blechhalteroberfläche. Gesteigerte Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen sind daher in allen diesen Bereichen zu verzeichnen. Der vorliegende Beitrag beschränkt sich jedoch auf den Problembereich, der die Berücksichtigung der Werkzeug- und Maschinenelastizität zum Fokus hat.

2 Stand der Technik

Der Stand der industriellen Anwendung bei der Blechumformsimulation mit Finiten Elementen wird derzeit durch sehr detaillierte Material- und Strukturmodelle für das Umformbauteil, einfache Reibmodelle, anspruchsvolle Kontaktalgorithmen und starre Werkzeuge definiert. Als Zeitintegrationsverfahren werden sowohl explizite als auch implizite Verfahren, jeweils optimiert auf den Einsatzzweck angewendet. So wird der eigentliche Ziehprozess explizit oder implizit, die Rückfederungssimulation zumeist implizit berechnet. Die Berücksichtigung der elastischen Werkzeug- und Maschinensteifigkeit im Ziehprozess ist prinzipiell für beide Verfahren möglich.

Hierfür ist in einem ersten Schritt jedoch ein geeignetes Finite-Elemente-Modell der Presse inklusive aller am Formprozess beteiligten Strukturteile sowie der Werkzeuge notwendig. Ziel in der Prozessauslegung ist es unter anderem lediglich elastische Deformationen in den Werkzeugen und in der Presse zuzulassen. Dies erlaubt als Nebeneffekt in einem zweiten Schritt die Maschinensteifigkeit bzw. -deformationen als Randbedingungen auf ein entsprechend erweitertes Umformmodell aufzubringen. Gewinnen lassen sich entsprechende Daten entweder aus Messungen oder aus Simulationen, wobei letztere jedoch an entsprechenden Versuchen abzugleichen sind.

Schwieriger gestaltet es sich dagegen, die elastischen Deformationen der Werkzeuge abzubilden. Als ultimative Lösung wäre hier die vollständige Diskretisierung mit 3D Volumenelementen in der notwendigen Feinheit an der Werkzeugoberfläche anzustreben. Es versteht sich von selbst, dass ein solcher zusätzlicher Vernetzungsaufwand die Anzahl der Freiheitsgrade stark anheben würde und damit die Rechenzeit bei industrieller Anwendung – insbesondere bei impliziten Zeitintegrationsverfahren – nicht zu tolerieren wäre. Als gangbarer Weg erscheint daher die Reduktion des fein diskretisierten, elastischen Werkzeugmodells auf die Oberfläche mittels

statischer Kondensation (vgl. Bild 1). Damit lassen sich die elastischen Deformationen korrekt abbilden und zugleich ein Grossteil der Rechenzeit einsparen.

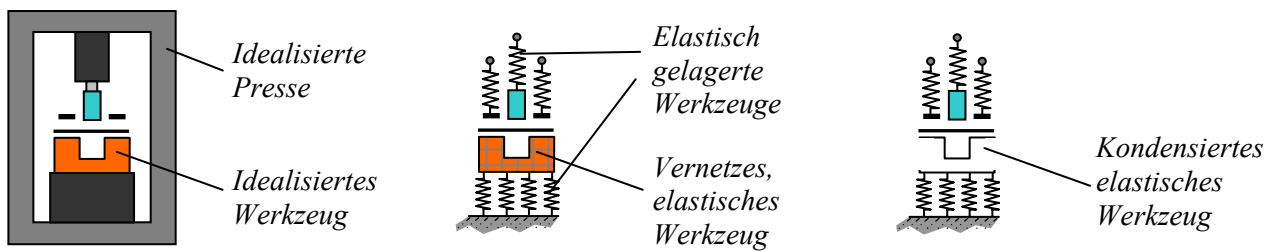


Bild 1: Idealisierter Pressenaufbau und mögliche Diskretisierungen

3 Vorgehensweise

Sofern der Aufwand der Netzerzeugung für die vorhandene Problemstellung nicht zu hoch erscheint und auf geeignete CAD-Daten zugegriffen werden kann, lassen sich die Werkzeuge automatisch mit Tetraedern vernetzen. Ausgehend hiervon können sämtliche internen Freiheitsgrade des FE-Netzes auf klassische Weise mit statischer Kondensation entfernt werden (siehe [1]).

Geht man von einer klassischen impliziten Lösungsstrategie aus, so lässt sich die Steifigkeitsmatrix der Werkzeugmatrize bzw. des Stempels nach Freiheitsgraden aufteilen und sortieren. Sämtliche Knoten, die nach der Kondensation von Bedeutung sind, d. h. die Knoten, die die Wirkfläche bilden, sowie jene, die als Randbedingungen für die Maschinensteifigkeit fungieren, werden in die Knotengruppe *a* zusammen gefasst. Knoten, die lediglich interne Lasten und keine externe Randbedingungen haben, werden in die Knotengruppe *b* zusammengefasst. Nach Bilden und umsordern der Steifigkeitsmatrix stellt sich diese mit dem Untermatrizen *aa*, *ab*, *ba* und *bb* wie folgt dar.

$$\begin{bmatrix} K_{aa} & K_{ab} \\ K_{ba} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_a \\ F_b \end{bmatrix} \quad (1)$$

Dabei sind u_a und u_b die entsprechenden Verschiebungsuntervektoren, sowie F_a und F_b die zugehörigen Einwirkungen (vgl. Bild 2). Umstellen der zweiten Gleichung und einsetzen in die erste liefert schließlich die kondensierte Steifigkeitsmatrix K_{cc} , die gespeichert und für Folgesimulationen zu einem bestehenden Simulationsmodell hinzu geladen werden kann:

$$\underbrace{\left(K_{aa} - K_{ab} K_{bb}^{-1} K_{ba} \right)}_{K_{cc}} u_a = F_a - K_{ab} K_{bb}^{-1} F_b \quad (2)$$

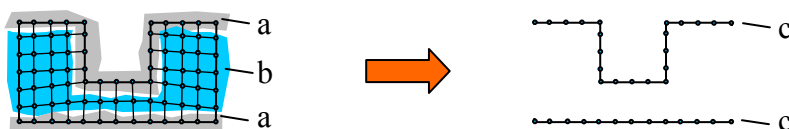


Bild 2: Kondensation des FE-Netzes auf die Wirkflächen der Werkzeuggeometrie

Es muss betont werden, dass diese Methode selbstverständlich nur für linear-elastische Problemstellungen zulässig ist. Es ist weiterhin wichtig anzumerken, dass die statische Kondensation bei den zu erwartenden und in der Praxis eingesetzten Werkzeuggeometrien zu sehr großen Steifigkeitsmatrizen führt. Diese werden in der Regel in eine ASCII-Datei (NASTRAN-Format) geschrieben und für weitere Berechnungen in den Umformlöser eingeladen. LS-DYNA

stellt für diese Vorgehensweise ab der Version 971 R3 die Befehle *CONTROL_IMPLICIT_STATIC_CONDESATION und *ELEMENT_DIRECT_MATRIX_INPUT zur Verfügung.

Die beschriebene Methode birgt jedoch auch einen entwicklungsprozesstechnischen Nachteil: Die üblicherweise fein detaillierten CAD-Geometrien bedürfen einer sehr feinen Vernetzung mittels 3D-Volumenelementen (siehe [2] & [3]). Diese mitunter relativ großen Werkzeugmodelle werden dann mit einigem Aufwand auf die Wirkflächen kondensiert. Werden nun durch die weitere Bauteilentwicklung Änderungen in der CAD-Geometrie notwendig, ist der gesamte Prozess zur Generierung der kondensierten Steifigkeitsmatrix erneut anzustoßen – obwohl die tatsächlichen Modifikationen in der Regel eher geringer Natur sind. Die nächsten Entwicklungsschritte müssen daher darin liegen, eine Möglichkeit zur Verwendung vorkondensierter Werkzeugmatrizen zu schaffen, deren repräsentative Oberfläche variabel an die jeweils aktuelle CAD-Geometrie bzw. die entsprechend vernetzte FE-Geometrie anpassbar ist. Hierzu werden ihm Rahmen des vorgestellten Projektes mögliche Verfahren geprüft und ggf. implementiert.

4 ZUSAMMENFASSUNG

Die Berücksichtigung elastischer Werkzeugdeformationen in Tiefziehsimulationen kann mit der vorgestellten, einfach zu implementierenden Methode vorgenommen werden. Die entsprechenden Erweiterungen wurden in LS-DYNA vorgenommen. Zukünftige Programmversionen werden diese enthalten. Gravierende Nachteile der Methode ergeben sich in der Praxis durch die großen anfallenden Datenmengen und den großen Aufwand bei Designänderungen. Die Minimierung des letzteren ist Gegenstand aktueller Entwicklungsarbeit.

5 DANKSAGUNG

Die vorliegende Arbeit wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Referat Produktionssysteme und -technologien im Rahmen des Verbundprojektes „Innovative Methoden zur Auslegung von Umformwerkzeugen im Fahrzeugbau (IMAUF)“ unter dem Kennzeichen 02PU2008 gefördert.

6 LITERATUR

- [1] Hoffmann, J.: Berücksichtigung der elastischen Werkzeugeigenschaften in der Blechumformsimulation, Diplomarbeit, FH Lausitz in Kooperation mit DaimlerChrysler AG, 2005.
- [2] Roll, K. (DaimlerChrysler AG), Hoffmann, J. (DYNAmore GmbH): Eine Möglichkeit zur Berücksichtigung der elastischen Werkzeugeigenschaften bei der Blechumformsimulation, 4. Deutsches LS-DYNA Forum, 20.-21. Oktober 2005, Bamberg, Germany.
- [3] Roll, K.; Wiegand, K.: Eine Möglichkeit zur Berücksichtigung der Werkzeugelastizität bei der Blechumformsimulation. In: Neuere Entwicklungen in der Blechumformung, MAT-INFO Werkstoff-Informationsgesellschaft mbH, Fellbach, 09.05.–10.05.2006

Effiziente Modellierung von Pressen- und Werkzeugelastizität

Ir. R. Lingbeek

Netherlands Institute for Metals Research
Delft (Niederlande)

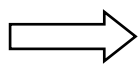


Kooperationsprojekt zwischen **INPRO** und **NIMR** (Netherlands Institute for Metals Research) im Rahmen einer Promotionsarbeit

Effiziente Modellierung von **Pressen- und Werkzeugelastizität**

Roald Lingbeek
roald.lingbeek@inpro.de
 (030) 3 99 97-279

Nutzen der Modellierung von Pressen- und Werkzeugdeformation



Pressen- und Werkzeugdeformation werden zurzeit in der Prozess-Simulation nicht berücksichtigt

Vorhersage des Blecheinzuges ist nicht zuverlässig

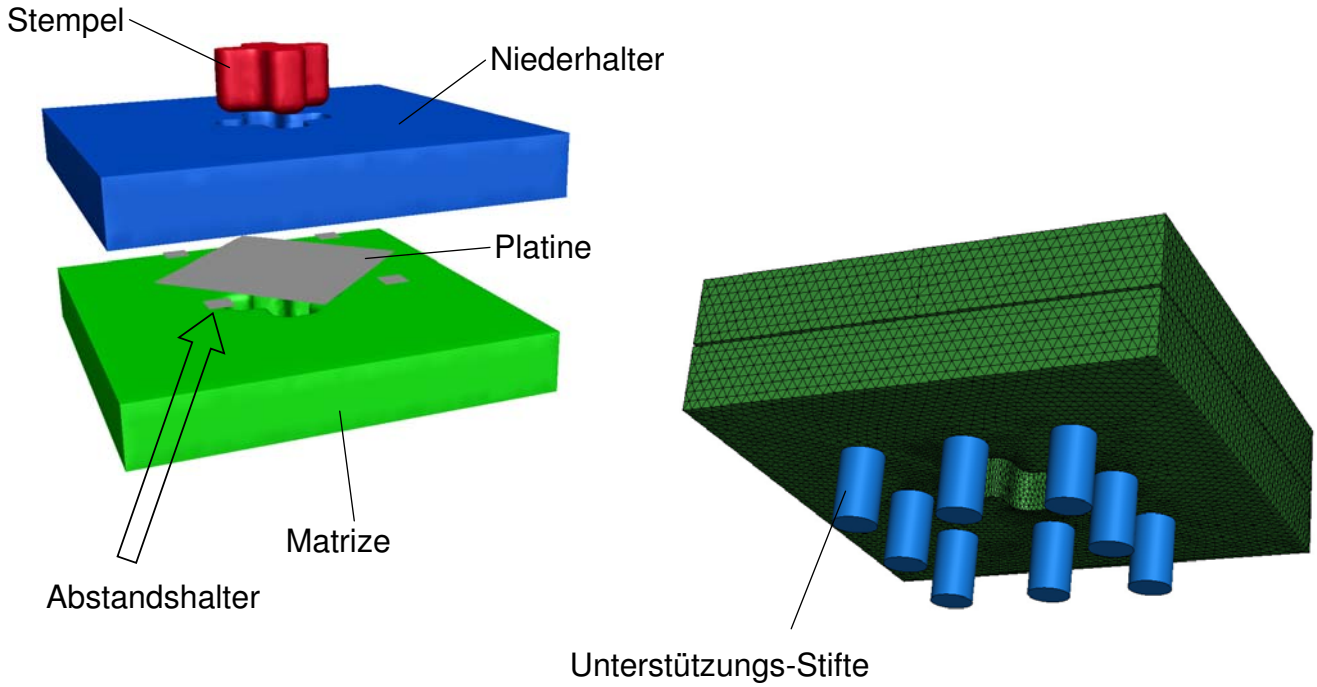
Dadurch werden Produkteigenschaften, so wie Rissbildung und Rückfederung indirekt beeinflusst



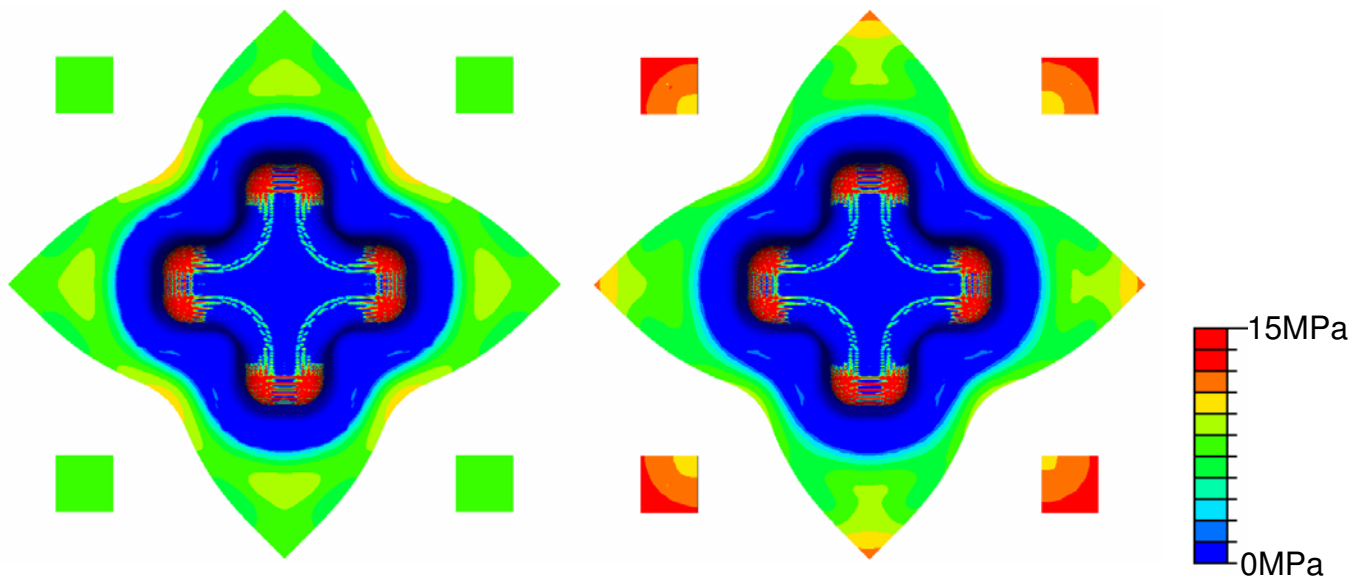
**Pressen- und
Werkzeugdeformation**

Die Berechnung der Pressenkraft ist ungenau

Verformbarer Niederhalter bietet flexible Steuermöglichkeiten für komplexe Produkte



Motivation Lösungsweg Beispiel



Starr

33.000

1 Tag

Freiheitsgraden

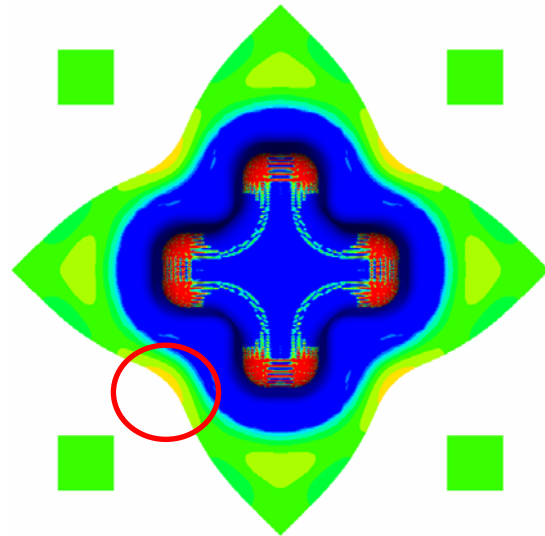
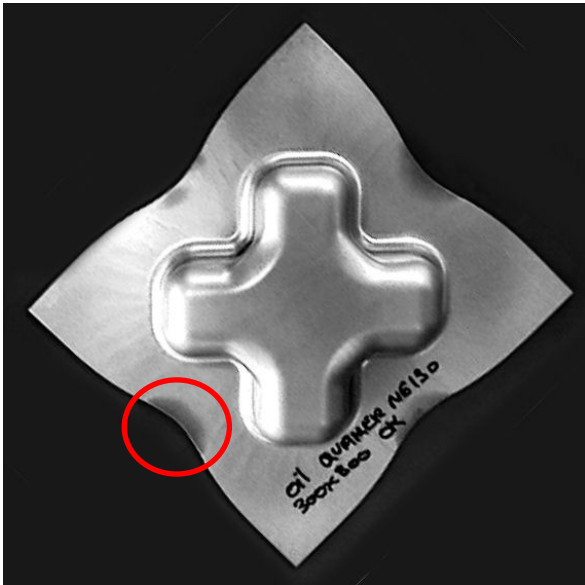
Rechenzeit

Deformierbar

340.000

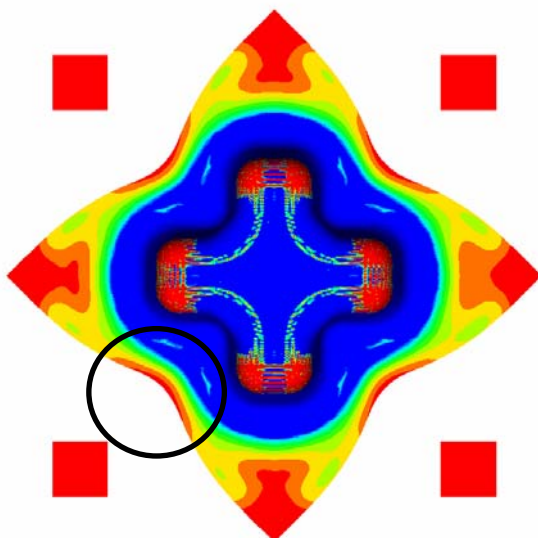
3 Tage

Motivation Lösungsweg Beispiel

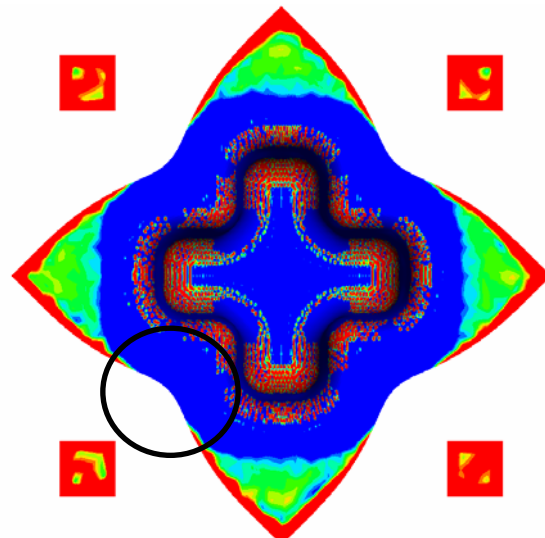


- Die Hochdruckstellen sind auf dem Foto als **glänzende Flächen** erkennbar
- Auch wenn einige Praxisparameter nicht in der Simulation berücksichtigt wurden, stimmen die Ergebnisse **qualitativ** überein

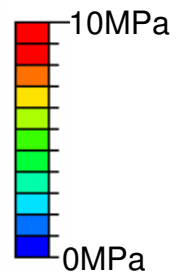
Motivation Lösungsweg Beispiel



Solid-Schellelemente



Shellelemente

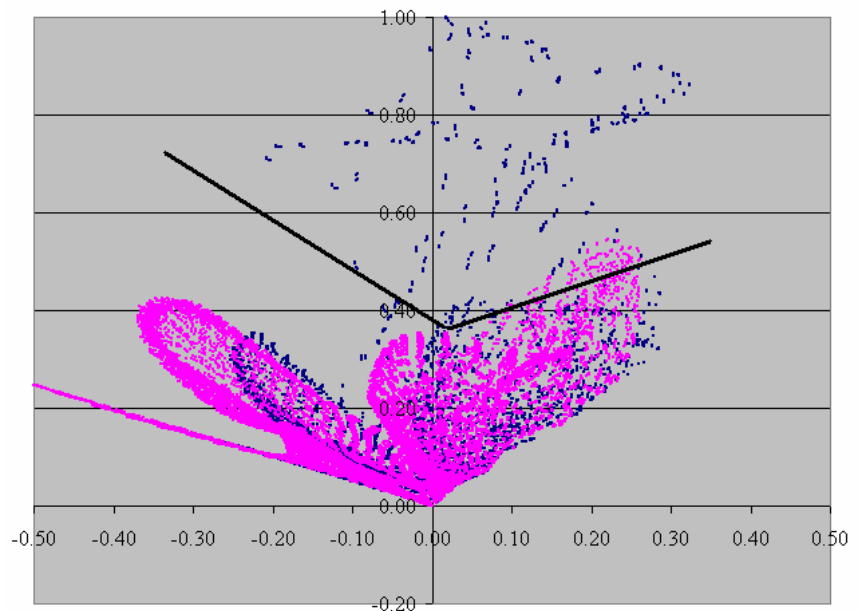


- Bei Shellelementen wird die Dickenänderung **nicht** im Kontaktalgorithmus berücksichtigt
- **Solid-Schellelemente** bilden die Druckstelle durch Aufdickung richtig ab
- Die Rechenzeit ist bei Solid-Schellelementen erheblich **niedriger**
- Die Dickenänderung ist bei Solid-Schellelementen **viel geringer** (Praxisabgleich erwünscht)

Motivation Lösungsweg Beispiel

- Die Simulation mit starren Werkzeugen gibt eine falsche Vorhersage über die Rissgefahr
- Das ist - vor allem bei diesem Benchmark - ein gravierender Fehler

■ Deformierbar
■ Starr



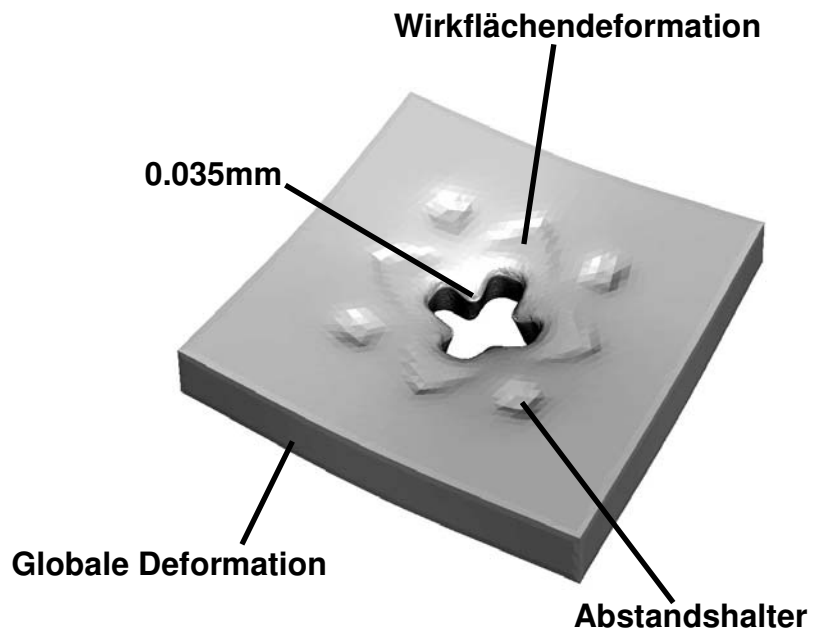
Motivation Lösungsweg Beispiel

Potenzial

- Auch bei industriellen Bauteilen, besonders größeren **Außenhautbauteilen** oder Bauteilen aus **höherfesten Stählen**, treten in der Presse und in den Werkzeugen signifikante Deformationen auf
- Die **Einarbeitung** ist bei der Prozessplanung momentan der größte Flaschenhals
 - Sie ist **zeitaufwändig** - pro Bauteil werden durchschnittlich etwa 8 Wochen benötigt
 - Sie ist **kostspielig** - eine Werkstatt mit Try-out-Pressen ist erforderlich
 - Sie ist arbeitsintensiv und erfordert viel **Erfahrungswissen**
- Computermodellierung der Pressen- und Werkzeugelastizität könnte ...
 - ... den „**Time-to-Market**“ senken, da der Zeitaufwand der Einarbeitung pro Bauteil um **50 %** gesenkt werden kann
 - ... die **Abhängigkeit von Erfahrungswissen** reduzieren und durch nachvollziehbare Berechnungsschritte ersetzen

Motivation Lösungsweg Beispiel

- Die extrem hohe Anzahl von zusätzlichen Freiheitsgraden macht die Finite-Elemente-Simulation um Größenordnungen **zu langsam**
- Mit den **Modalen Methoden** können die Werkzeugdeformationsberechnungen maßgeblich beschleunigt werden
- Die Methode ist für Wirkflächen-deformationen **nicht** geeignet
- Die Genauigkeit der FE Simulation reicht nicht aus, um deren Effekte realistisch abzubilden



Deformation der Cross-Die Matrize (x5000)

- Linear elastischer FE:

$$[\mathbf{K}]\mathbf{u} = \mathbf{F}$$

- Die Steifigkeitsmatrix wird Spektral zerlegt

$$[\mathbf{K}] = [\mathbf{P}][\mathbf{D}][\mathbf{P}]^{-1}$$

- Dies ermöglicht eine einfache Inversion:

$$[\mathbf{K}]^{-1} = ([\mathbf{P}][\mathbf{D}][\mathbf{P}]^T)^{-1} = [\mathbf{P}]^T [\mathbf{D}]^{-1} [\mathbf{P}]$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} | & | & | & | & | & | \\ \text{Eigenvektor oder mode} \end{bmatrix}$$

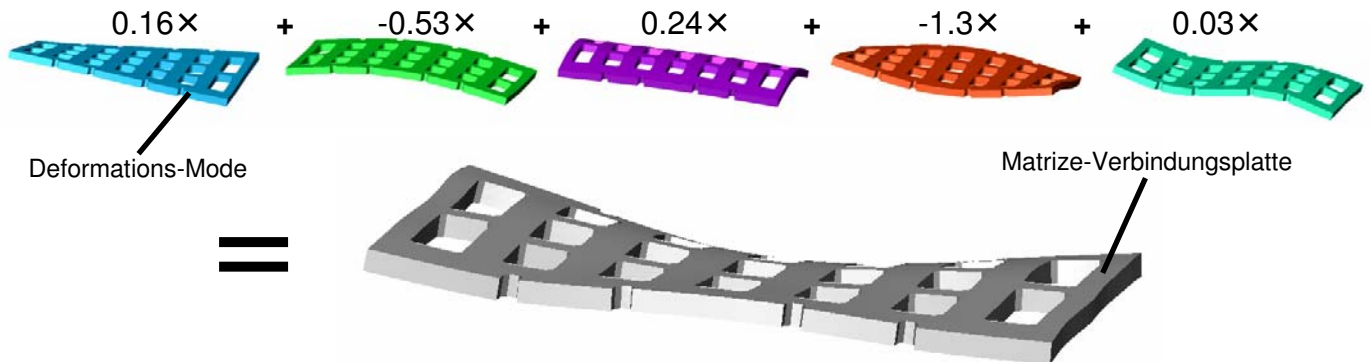
$$[\mathbf{D}]^{-1} = \begin{bmatrix} \lambda_1^{-1} & 0 & \dots \\ 0 & \lambda_2^{-1} & 0 \\ \vdots & 0 & \ddots \end{bmatrix}$$

- Die Lösung wird approximiert, wenn die ersten m Moden und Eigenwerte verwendet werden.

$$\mathbf{u} \approx [\tilde{\mathbf{P}}][\tilde{\mathbf{D}}]^{-1}[\tilde{\mathbf{P}}]^T \mathbf{F}$$

$$\tilde{\mathbf{P}} = \begin{bmatrix} | & | & | & | & | & | \\ \text{Eigenvektor oder mode} \end{bmatrix}$$

Durch die Approximation kann die Anzahl von Freiheitsgraden sehr stark gesenkt werden



- Die Moden, die neuen **Freiheitsgrade** des Systems, werden vor der Simulation berechnet
- Die Anzahl der Moden ist üblicherweise viel niedriger als die Anzahl der Freiheitsgrade des Finite-Elemente-Modells, **weniger als 100 Moden** reichen aus für eine genaue Berechnung der Deformation
- Da der Rechenaufwand so gering ist, werden diese Körper auch **Deformable Rigid Bodies** genannt

Motivation Lösungsweg Beispiel

Netzabhängigkeit

- **Die Approximationsgüte ist von der Vernetzung abhängig.** Dies kann gelöst werden, wenn die Belastung auch mit in der Spektralzerlegung einfließt
- Die Belastung wird auch mit den Ansatzfunktionen diskretisiert
- Dadurch kann ein generalisiertes Eigenwertproblem formuliert werden

$$\mathbf{t}(x) = \mathbf{N}^T \hat{\mathbf{t}}$$

$$\underbrace{\int_{\Omega} \mathbf{B} \cdot \cdot \underline{\mathbf{C}} \cdot \cdot \mathbf{B}^T d\Omega}_{\mathbf{K}} \hat{\mathbf{u}} = \underbrace{\int_{\Gamma_t} \mathbf{N} \mathbf{N}^T d\Gamma}_{\mathbf{M}} \hat{\mathbf{t}}$$

“Randflächenmatrix”
Kontaktspannung

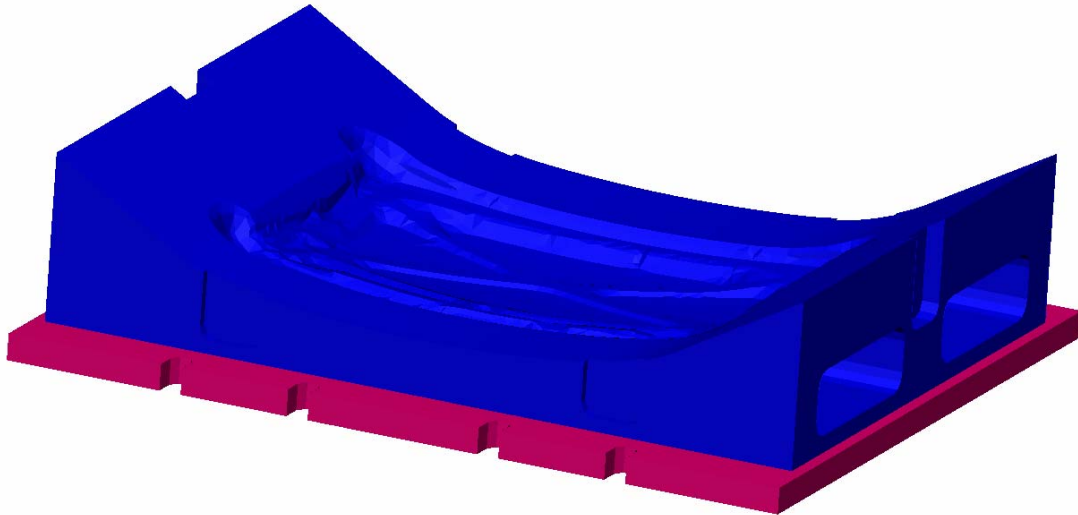
- Die Moden sind weniger anfällig für ungleichmäßige Vernetzung

Motivation Lösungsweg Beispiel

Industrielles Beispiel (DaimlerChrysler)



- Um die komplette Presse modellieren zu können, müssen die unterschiedlichen Bauteile miteinander **verbunden** werden oder sogar **interagieren**
- Als Beispiel werden eine Matrize und eine Verbindungsplatte mit Prozesskräften belastet
- Bereits **40 Freiheitsgrade** genügen, um die Deformation beider Werkzeuge hinreichend genau abzubilden

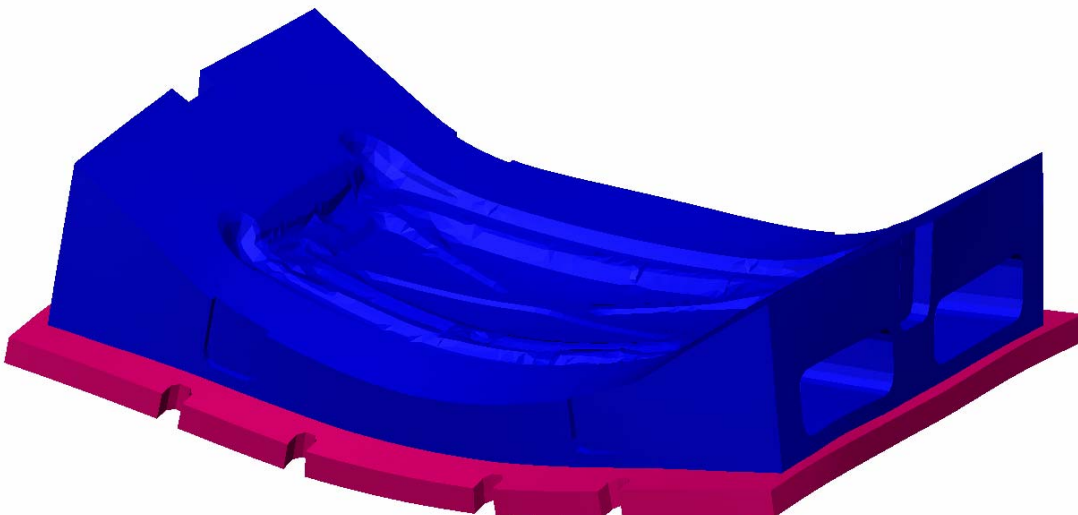


Motivation Lösungsweg Beispiel

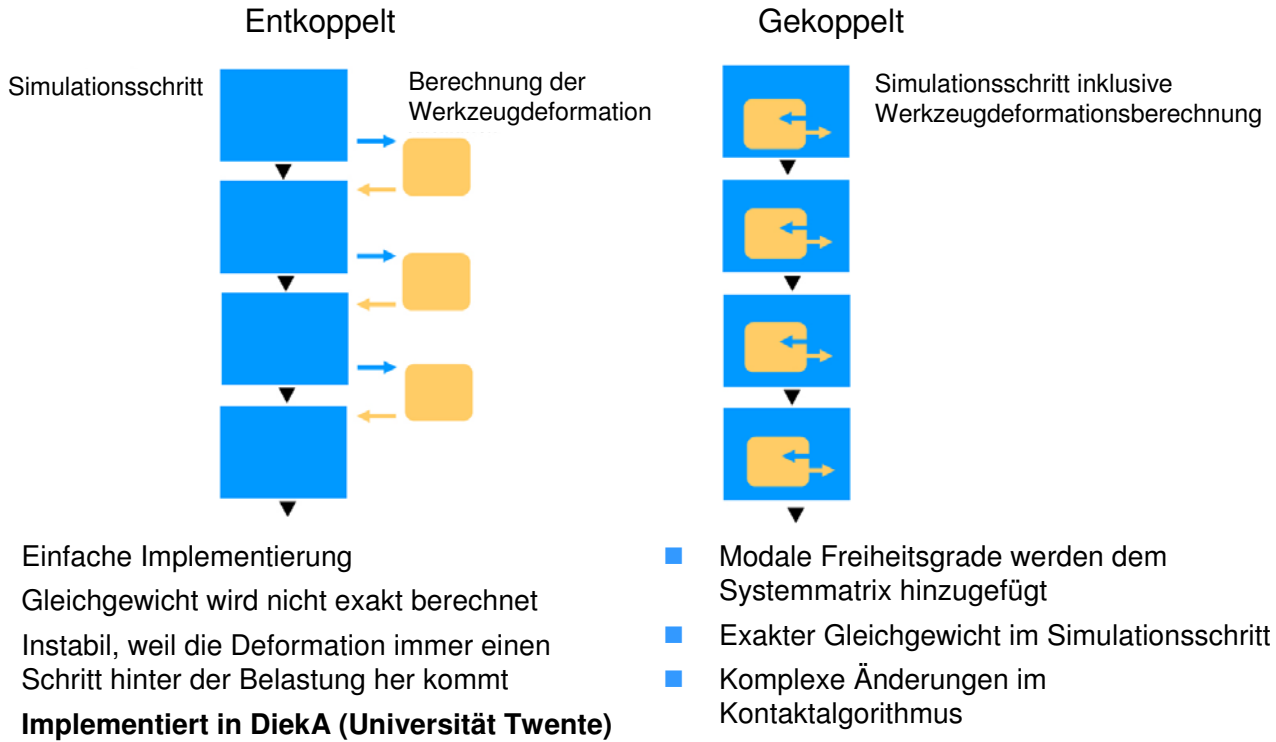
Industrielles Beispiel (deformiert)



- Um die komplette Presse modellieren zu können, müssen die unterschiedlichen Bauteile miteinander **verbunden** werden oder sogar **interagieren**
- Als Beispiel werden eine Matrize und eine Verbindungsplatte mit Prozesskräften belastet
- Bereits **40 Freiheitsgrade** genügen, um die Deformation beider Werkzeuge hinreichend genau abzubilden



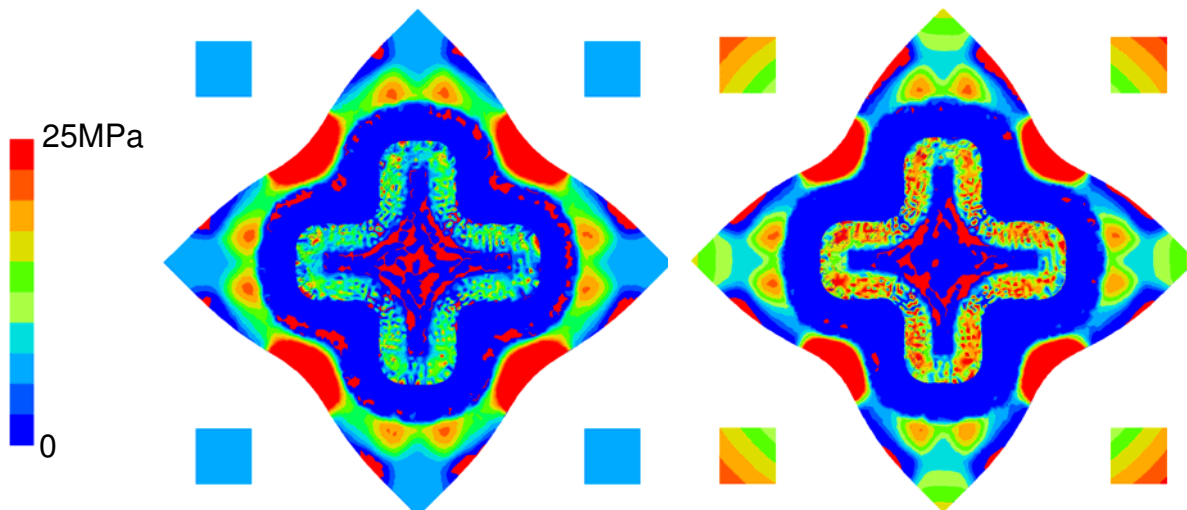
Motivation Lösungsweg Beispiel



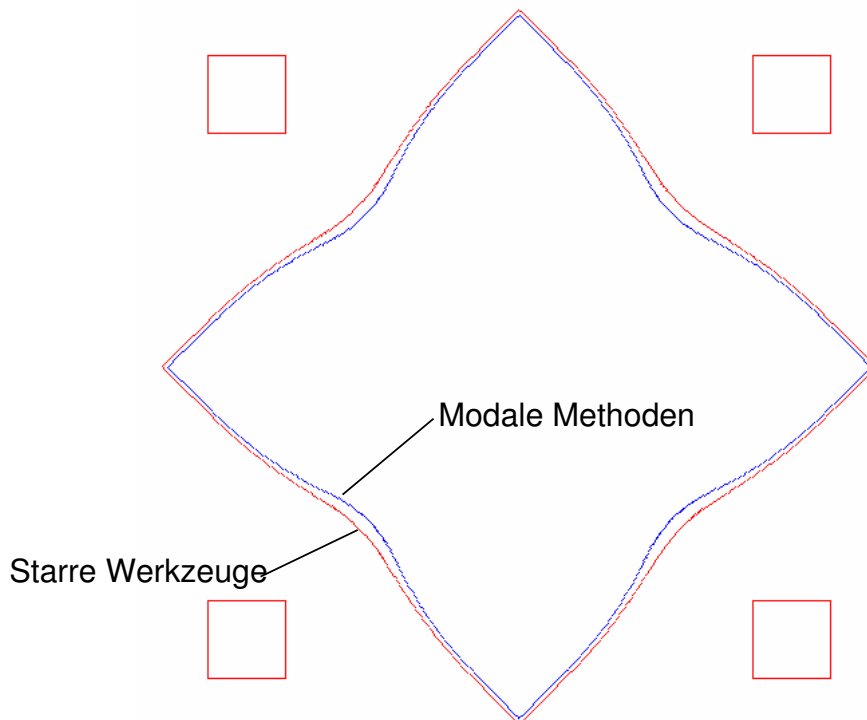
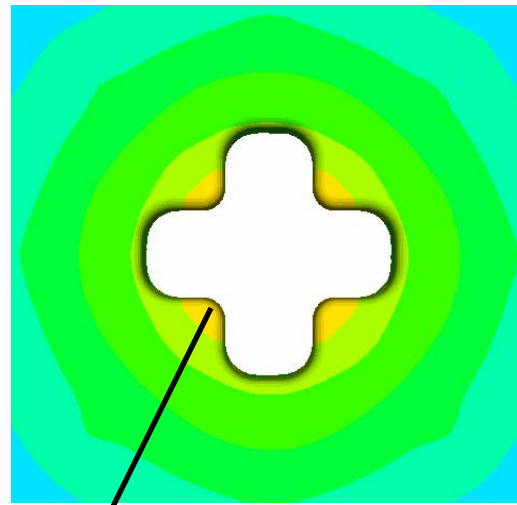
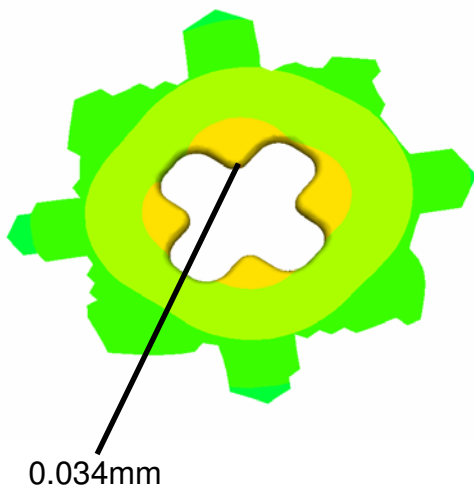
Motivation Lösungsweg Beispiel

DieKA / **Starre Werkzeuge**
 ■ **6.5 Stunden**

DieKA / **Modal Methods**
 ■ **7 Stunden**



Motivation Lösungsweg Beispiel



- Es zeigen sich besonders beim Cross-Die Benchmark Unterschiede, wenn die Werkzeuge deformierbar modelliert werden
- Es ist schwierig die Simulation realitätsnah zu gestalten, da die Kontaktparameter einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse haben
- Mit den modalen Methoden können Werkzeuge und Presse mit **geringem Zusatzaufwand** in die Simulation integriert werden
- Die **komplette Presse** kann mit Deformable Rigid Bodies abgebildet werden
- **Globale Deformationen** werden gut erfasst
- Die Simulation mit Deformable Rigid Bodies zeigt die **gleiche Tendenz** wie die Vollberechnung in ABAQUS