

Virtuelle Produktentstehungskette eines Umformwerkzeuges Gießsimulation erweitert den virtuellen Fertigungsprozess

von Markus Lutz von Schwerin, Markus Ostermeier

Einer der ersten Schritte bei der Entwicklung eines neuen Fahrzeuges ist der Entwurf des Designs. Abgeleitet davon werden die einzelnen Fahrzeugkomponenten, wie Karosserie, Motor oder Fahrwerk, entwickelt und konstruiert. Obwohl zur Absicherung zunehmend mehr reale Prozessschritte bereits virtuell vorweggenommen werden können, ist der gesamte Produktentstehungsprozess noch nicht virtuell abbildbar. Ein wesentlicher Vorteil eines virtuellen Gesamtmodells läge jedoch darin, ohne reale Erprobungsbauteile sowohl gewünschte Produkteigenschaften (z. B. Crash-Sicherheit) als auch notwendige Fertigungsschritte (z. B. Umformbarkeit) überprüfen zu können. Damit ließen sich Zeit und Kosten sparen.

Der überwiegende Teil aller Rohkarosserien von Fahrzeugen, die in großen Stückzahlen gefertigt werden, besteht fast ausschließlich aus Blechbauteilen. Deshalb ist ein wesentlicher produktionstechnischer Schwerpunkt in der Automobilindustrie die Umformtechnik. Es soll sichergestellt werden, dass Blechbauteile in der geforderten Qualität prozesssicher gefertigt werden können. Der Einsatz von Simulationssystemen für den Bereich der unmittelbaren Blechumformung ist daher bereits weit fortgeschritten. Die für die Blechumformung notwendigen Umformwerkzeuge und deren prozesstypisches Verhalten sind hingegen bislang noch nicht ausreichend untersucht. Da die Anforderungen an Umformwerkzeuge insbesondere durch den Einsatz hoch- und höherfester Bleche steigen, rücken diese jedoch vermehrt in den Fokus. Vor allem die Steifigkeit der Umformwerkzeuge und die Oberflächenhärte der Wirkfläche sind zu optimieren, um die gewünschte Bauteilqualität zuverlässig zu gewährleisten [1].

Gleichzeitig nimmt die Entwicklungs- und Fertigungszeit von Umformwerkzeugen einen großen Teil der Projektdauer vom Entwurf eines Blechteils bis zu seiner Fertigung in Anspruch. Deshalb sind hier hohe Einsparpotentiale vorhanden. Zwei Lösungsansätze hierfür sind das „parallele und vernetzte Zusammenarbeiten“ sowie die „virtuelle Prozessentwicklung“ [2]. Beim parallelen und vernetzten Zusammenarbeiten wird die gesamte Prozesszeit durch eine enge Verzahnung und Parallelisierung einzelner Prozessschritte stark gestrafft. Für die virtuelle Prozessentwicklung werden, wie bereits erwähnt, alle realen Fertigungsschritte möglichst realitätsnah virtuell abgebildet.

Die Ergänzung des bestehenden virtuellen Entstehungsprozesses um die Gießsimulation ist einer der nächsten logischen Schritte, um den virtuellen Produktentstehungsprozess zu vervollständigen. Um zusätzlich die große Gestaltungsfreiheit des Fertigungsverfahrens Gießen zu nutzen und die strukturelle Steifigkeit von Umformwerkzeugen zu erhöhen, bietet sich eine gleichzeitige Betrachtung der Topologieoptimierung an. Die Möglichkeiten beider Prozessbausteine wurden intensiv untersucht und werden im Folgenden beschrieben.

Entstehung eines Umformwerkzeuges

Bild 1 zeigt die Prozesskette für die Fertigung eines Umformwerkzeuges. Diese kann in die vier Abschnitte Fertigungsmittel(FM)-Entwicklung, -Konstruktion, -Anfertigung und -Nutzung unterteilt werden. Die realen Prozessschritte werden dabei durch eine Reihe virtueller Prozessschritte begleitet. Der erste Schritt ist bereits ausschließlich virtuell. In der FM-Entwicklung wird der Designprozess durch fertigungstechnische Machbarkeitsbetrachtungen sowie die Entwicklung der Fertigungsmethode begleitet. In der FM-Konstruktion wird das Umformwerkzeug konstruiert. Basierend auf diesen Daten wird eine Umformsimulation durchgeführt. Diese gibt Aufschluss darüber, ob das spätere Blechbauteil in der geforderten Qualität zu fertigen ist. Parallel hierzu wird für ausgewählte und besonders kritische Bauteile mit der Fertigung von Prototypenwerkzeugen begonnen, um die Machbarkeit der Umformbauteile zu bestätigen und erste Prototypenfahrzeuge aufbauen zu können.

Prozesskette	FM-Entwicklung	FM-Konstruktion	FM-Anfertigung	FM-Nutzung
realer Prozess	Keine Aktivitäten	bauteilabhängige Prototypen -werkzeuge	- Gießen - Fräsen - Härten - Qualitätsschleifen	- Transport - Lagerung - Umformvorgang
virtueller Prozess	fertigungs-technische Mitgestaltung	- CAD-Konstruktion Ziehstufe und Fertigungsmittel - Umformsimulation	(- Gießsimulation - Frässimulation)	- Kinematik -simulation

Bild 1: Entstehung eines Umformwerkzeuges (schematisch)

Gleichzeitig wird mit der Konstruktion der endgültigen Umformwerkzeuge begonnen. Auch diese bauen auf der CAD-Fläche des Blechbauteils auf. Die Umformwerkzeuge selbst werden virtuell jedoch nur in Ausnahmefällen weiter überprüft. Es wird normalerweise weder eine Gieß- noch eine Frässimulation durchgeführt, um die mechanischen Eigenschaften und damit das spätere Betriebsverhalten des Umformwerkzeuges zu prognostizieren. Lediglich bei vermeintlich kritischen Umformwerkzeugen wird eine Gießsimulation durchgeführt. Die beschriebene Vorgehensweise basiert deshalb stark auf dem Erfahrungswissen der Konstrukteure über eine gießgerechte Gestaltung von Umformwerkzeugen.

Erweiterung der virtuellen Produktentstehungskette durch die Gießsimulation

Die Ergebnisse aus der Umformsimulation konnten bislang nicht vollständig für die Konstruktion der Umformwerkzeuge berücksichtigt werden. Deshalb wurde zunächst ein Verfahren erarbeitet, um die Umformkräfte der Umformsimulation auf das CAD-Modell des Umformwerkzeuges zu übertragen [6]. Damit können die Prozesskräfte der Umformung als realitätsnahe, äußere Randbedingungen für eine strukturmechanische Analyse verwendet werden. Die Ergebnisse daraus werden für die Topologieoptimierung benötigt.

Ebenso sind die Ergebnisse aus der Gießsimulation bezüglich der Gusseigenstressen notwendig. Die erweiterte virtuelle Prozesskette beginnt daher mit einer 3-D-Konstruktion des Umformwerkzeuges in ausreichender Detaillierung. Insbesondere müssen die Wirkflächen von Stempel und Matrize sowie die spätere Verrippungsgeometrie und andere steifigkeitsrelevante Strukturen enthalten sein. Die dergestalt vorliegende 3-D-Volumenkonstruktion ist der Ausgangspunkt für die sich anschließende Diskretisierung des Volumenmodells.

Es ist vom jeweiligen Simulationsprogramm abhängig, ob das 3-D-Modell mit Tetraeder, Quader oder Pentaeder zu diskretisieren ist. Programme zur Gießsimulation oder zur Festigkeitsberechnung erfordern unter Umständen unterschiedliche Volumenelemente zur Berechnung. Die notwendigen Schnittstellen, um die Daten ohne zu großen Informationsverlust von einem Programm in das nächste zu transferieren, sind jedoch oftmals nicht vorhanden. Diese müssen deshalb jeweils neu entwickelt werden.

Auch erfordern die einzelnen Simulationssysteme je nach gewünschtem Ergebnistyp andere Eingangsdaten. Beispielsweise benötigt eine Gießsimulation Materialparameter wie Wärmeleitfähigkeit, temperaturabhängige Zugfestigkeit oder Gieß- und Abkühlzeit. Die Festigkeitssimulation hingegen benötigt neben verschiedenen Materialkennwerten die Ergebnisse der Gießsimulation (Temperaturfeld oder Eigenspannungsfeld) und der Umformsimulation (Prozesslasten) als Anfangsrandbedingungen.

Es wurden drei verschiedene Möglichkeiten untersucht, die Gießsimulation und eine auf den Ergebnissen aufbauende strukturmechanische Simulation miteinander zu verbinden:

- thermische Simulation mit dem Gießsimulationsprogramm WinCast und anschließende Eigenspannungsberechnung mit dem Standard-FEM-Programm Abaqus (Szenario I),
- thermische Simulation und Eigenspannungsberechnung mit WinCast und Übergabe der Eigenspannungsdaten an Abaqus (Szenario II),

- thermische Simulation mit dem Simulationsprogramm MagmaSoft und nachfolgende Eigenspannungsberechnung mit MagmaLink (Szenario III).

Das Ergebnis enthält jeweils die Eigenspannungen aus dem Gießprozess. Darauf aufbauend kann sowohl eine Betriebssimulation als auch eine Topologieoptimierung durchgeführt werden.

Für jede dieser drei Szenarien war es notwendig, das Modell am Ende als Tetraedernetz vorliegen zu haben. Nur dadurch war eine Weiterverarbeitung in Abaqus möglich. Das vorliegende CAD-Modell wurde hierzu solange vereinfacht, wie bei der Simulation kein Genauigkeitsverlust erkennbar war. **Bild 2** zeigt die einzelnen Schritte der drei Szenarien im Detail.

Beim ersten Szenario wurde das CAD-Modell im stl-Dateiformat an WinCast übergeben. Hier wurde das Modell mit Pentaedern diskretisiert und die notwendigen Gießparameter (Materialkarte) übergeben. Das System berechnete dann ein Temperaturfeld. Im nächsten Schritt wurde das Temperaturfeld, das auf einem Pentaedermodell vorlag, auf ein Tetraedernetz in Abaqus überführt. Dieser Schritt wird „Mapping“ genannt und war ein aufwändiger, noch nicht vollständig automatisierter Prozessschritt. Hierbei wurden element- und knotenspezifische Ergebnisgrößen von einem Netz auf ein zweites Netz unterschiedlicher Topologie übertragen. Durch die notwendige Interpolation von Daten kann es abhängig von der Diskretisierungsgüte zu Genauigkeitsverlusten kommen. In Abaqus wurden anschließend mit dem neuen Netz die Eigenspannungen berechnet.

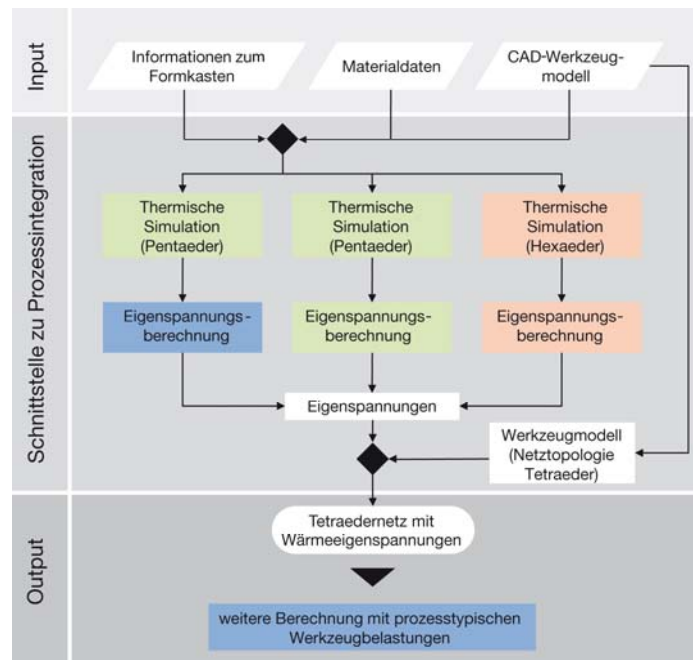


Bild 2: Prozessablauf im Überblick, Grün – WinCast, Blau – Abaqus, Rot – MagmaSoft/Magmalink

Das Vorgehen von Szenario II ähnelte dem von Szenario I. Jedoch wurden auch die Eigenspannungen bereits in WinCast berechnet und anschließend direkt von dem Pentaedernetz auf ein Tetraedernetz in Abaqus übergeben. Ergebnis war wiederum ein eigenspannungsbehaftetes Modell für weitere Analyseschritte.

Im dritten Szenario wurde die Gießsimulation vollständig mit dem Simulationsprogramm MagmaSoft durchgeführt. Anschließend wurden die Eigenspannungen mit der speziell dafür entwickelten, systemimmanenten Schnittstelle von MagmaLink an Abaqus übergeben. Auch bei diesem Schritt wurden die Daten interpoliert. Diese Variante wies den höchsten Automatisierungsgrad auf.

Ergebnisse der Gießsimulation

Unabhängig vom angewendeten Prozess waren die Ergebnisse qualitativ nahezu identisch (vgl. **Bild 3**). Bereiche mit Materialanhäufungen kühlten im Vergleich zu Bereichen mit gleichmäßiger Materialverteilung deutlich langsamer ab. Dadurch entstand eine charakteristische Eigenspannungsverteilung. Die Übergänge zwischen Aufstandsfläche, Wänden und die Eckbereiche um die Tragwangen wiesen vorwiegend Zugspannungen, Randbereiche vor allem Druckspannungen

auf. Quantitativ waren deutliche Unterschiede in den Ergebnissen zu erkennen. Dies beruhte vor allem auf den stark variierenden Materialkennwerten, die in den verwendeten Simulationsprogrammen hinterlegt waren, und auf Interpolationsfehlern, die bei der Übergabe der Werte von einem auf das nächste Netz auftraten.

So konnten in den untersuchten Bereichen maximale Zugspannungen von 105 bis 180 N/mm² und Druckspannungen zwischen 120 bis 230 N/mm² gefunden werden. Unabhängig vom jeweiligen Wert waren die Gusseigenstressungen jedoch wesentlich höher als die in der Umformsimulation ermittelten Betriebslasten aus dem Umformvorgang. Im betrachteten Bereich erhöhten sich sowohl die Zug- als auch die Druckspannungen aus dem Umformprozess durch Gusseigenstressungen um mehr als 50 %.



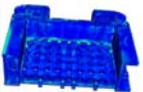

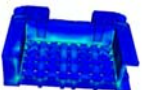
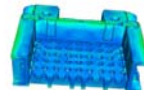
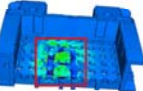
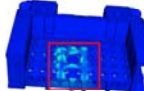
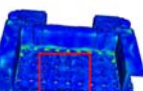
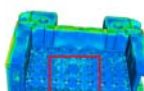
	Zugspannungen [MPa]	Druckspannungen [MPa]
Szenario I Gießsimulation: WinCast, Schnittstelle zu ABAQUS mit Temperaturmapping	$\sigma_{\text{ZUG}} = 180$ 	$\sigma_{\text{DRUCK}} = 230$ 
Szenario II Gießsimulation: WinCast, Schnittstelle zu ABAQUS mit Spannungsmapping	$\sigma_{\text{ZUG}} = 170$ 	$\sigma_{\text{DRUCK}} = 225$ 
Szenario III Gießsimulation: MAGMAIron, Spannungsmapping mit MAGMALink	$\sigma_{\text{ZUG}} = 116$ 	$\sigma_{\text{DRUCK}} = 120$ 
Festigkeitsberechnung ohne Wärmeeigenstressungen	$\sigma_{\text{ZUG}} = 17$ 	$\sigma_{\text{DRUCK}} = 70$ 
Festigkeitsberechnung mit überlagerten Wärmeeigenstressungen	$\sigma_{\text{ZUG}} = 25$ 	$\sigma_{\text{DRUCK}} = 130$ 

Bild 3: Maximale Zugspannungen und Druckspannungen in Abhängigkeit der verschiedenen Varianten und Vergleich der Prozessspannungen mit und ohne Eigenstressungen aus der Gießsimulation

Berücksichtigung der Topologieoptimierung

Auf diesen Ergebnissen aufbauend, konnte eine Topologieoptimierung durchgeführt werden. Die Topologieoptimierung wird bereits in vielen Entwicklungsbereichen erfolgreich eingesetzt, um Gewicht zu reduzieren und gleichzeitig die Steifigkeit von Bauteilen zu erhöhen. Die Optimierung von Umformwerkzeugen stellt aber ein weitgehend neues Gebiet dar. Neben den aus dem Fertigungsprozess verbleibenden Spannungen ist für den Einsatz der Topologieoptimierung eine realitätsnahe Abbildung der Prozesskräfte (Spannungszustände) auf das Modell notwendig.

Zu Beginn der Optimierung wurde ein „Optimierungsmodell“ erstellt, das alle aus Funktionalitätsgründen erforderlichen geometrischen Freigängigkeiten und Funktionsflächen enthielt. Die Basis hierfür war das bereits erwähnte CAD-Modell. Die Lagerung des Umformwerkzeuges und das Zusammenspiel mit der Umformpresse spielte hierbei eine bedeutende Rolle [3]. Deshalb wurde die Elastizität der Umformpresse mit abgebildet. Die Komplexität des Umformprozesses erforderte die systematische Erfassung der verschiedenen möglichen Prozesslastfälle. Diese sind die Basis für die Optimierungsaufgabe und bestimmen maßgeblich die Aussagekraft des Optimierungsergebnisses.

Mit einer statischen FE-Berechnung wurden alle definierten Prozesslastfälle nacheinander berechnet und die Ergebnisse für die Topologieoptimierung überlagert. Hierbei wurden auch die Ergebnisse aus der Gießsimulation mit einbezogen.

Bild 4 zeigt das optimierte Werkzeuggrundgestell und die daraus abgeleitete CAD-Konstruktion.

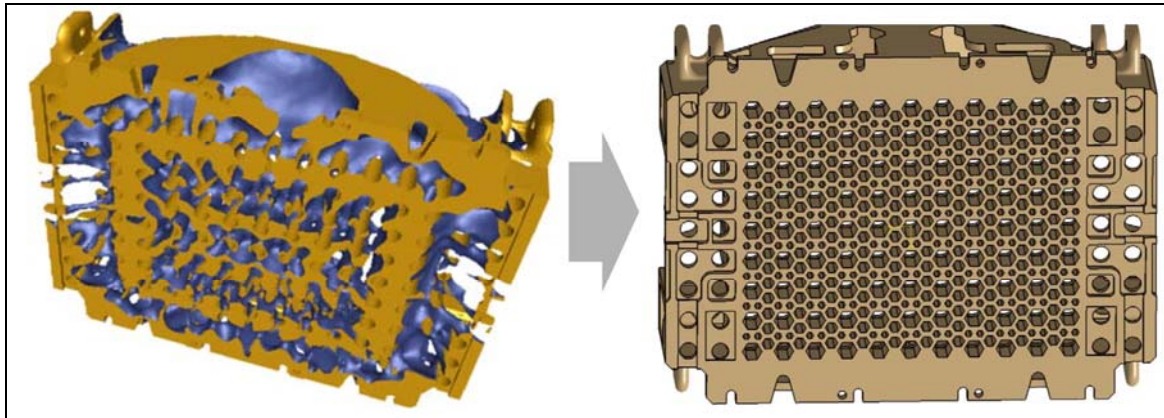


Bild 4: Optimierungsentwurf (links) und optimierte CAD-Konstruktion (rechts)

Die Rückführung der Daten in ein CAD-Modell erfolgte dabei manuell. Im vorliegenden Fall konnte eine durchschnittliche Steifigkeitserhöhung in Umformrichtung von ca. 8 % erzielt werden. Das bedeutet, dass die Durchbiegung der Stempelauflagefläche in Umformrichtung um ca. 0,14 mm geringer ist, als beim ursprünglichen Modell. Quer zur Umformrichtung war die Steifigkeitserhöhung ca. 30 % [3].

Die durch die Topologieoptimierung erzielte Steifigkeitserhöhung des Werkzeuggrundgestells hat damit nicht nur einen positiven Einfluss auf die Bauteilqualität, sondern trägt auch in hohem Maße zu einer schnelleren und von der verwendeten Presse unabhängigeren Werkzeugeinarbeit bei [4].

Schlussfolgerungen und Ausblick

Die beschriebenen Untersuchungen zeigen, dass sowohl eine Integration der Gießsimulation in die virtuelle Produktentstehungskette als auch eine darauf aufbauende Topologieoptimierung wirkungsvolle Maßnahmen sind, um die Qualität von gegossenen Werkzeugen im Vorfeld zu beurteilen und zu verbessern. Man erhält Aussagen zu Eigenspannungen und zu Lunkerorten und -wahrscheinlichkeit, kann diese Ergebnisse bei einer Betriebsfestigkeitsbetrachtung berücksichtigen und mit Hilfe der Topologieoptimierung iterativ zu optimal konstruierten Umformwerkzeugen gelangen.

Zunächst sollte deshalb die Gießsimulation nicht nur für Sonderfälle, sondern auch für Standardumformwerkzeuge Anwendung finden. Hierfür ist die vollständige Integration der beschriebenen Simulationswerkzeuge in die virtuelle Produktentstehungskette notwendig. Nicht abgestimmte Schnittstellen stellen jedoch ein Hindernis für eine reibungslose Integration ohne manuelle Bearbeitungsschritte in den virtuellen Produktentstehungsprozess dar. Die spezifischen Aufgabenstellungen lassen sich mit den einzelnen Softwareprogrammen gut bewältigen. Die Übergabe der Ergebnisdaten von einem Programm zum nächsten ist jedoch teilweise mit hohem Aufwand verbunden. Standen bis vor kurzem noch die langen Rechenzeiten einem wirtschaftlichen Einsatz einer durchgängigen virtuellen Produktsimulation im Wege, sind es nunmehr aufwändige Datenübergaben aufgrund nicht abgestimmter Schnittstellen.

Langfristig sollte auch die Topologieoptimierung in den virtuellen Produktentstehungsprozess eingebunden werden. Hier besteht aber noch weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der Ergebnisgenauigkeit und der automatisierten Flächenrückführung.

Markus Lutz von Schwerin, Hochschule München, und Markus Ostermeier, MAN Diesel & Turbo Augsburg

www.mandieselturbo.com

Literatur

- [1] Siegert, K. und Häussermann, M.: Weiterführende Untersuchungen zur Optimierung der Gestaltung von Umformwerkzeugen. EFB-Forschungsbericht Nr. 152, Stuttgart 2001.
- [2] Meinhardt, J., Volk, W. und Schmidt, H.: Virtuelle Prozessentwicklung von Presswerkzeugen im industriellen Umfeld. 17. Umformtechnisches Kolloquium Hannover 2002, 27.-28. Februar 2002, Tagungsband S. 271-284.
- [3] Ben Hnia, M.: Rechnergestützte Optimierung eines Werkzeugstandardelements für die Blechumformung. Diplomarbeit, ifu, Universität Stuttgart, 2006.
- [4] Krimm, R.: Berechnung der lastabhängigen Maschinenauffederung zur Verkürzung der Anlaufzeit neuer Transferwerkzeugsätze. Dissertation, TU Hannover, 2006.
- [5] Haage, H.: Integration der Gießsimulation in den virtuellen Entwicklungsprozess von Werkzeug-Standardelementen. Diplomarbeit, Fachbereich Maschinenwesen, Fachhochschule Ingolstadt, 2006.
- [6] Schwerin, M. von: Methodik zur optimierten Gestaltung von Umformwerkzeugen. 3-D-Erfahrungsforum – Innovation im Werkzeug- und Formenbau, München 2007, 30.-31. Mai 2007, Tagungsband S. 27-1 - 27-12.