

**Prozessoptimierte
implizite FEM-Formulierung
für die Umformsimulation
grossflächiger Blechbauteile**

Abhandlung
zur Erlangung des Titels
DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN
der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH



vorgelegt von
Waldemar Kubli
Dipl. Masch. Ing. ETH
geboren am 24. November 1963
von Netstal, Glarus

angenommen auf Antrag von
Prof. Dr. J. Reissner, Referent
Prof. Dr. E. Anderheggen, Korreferent

1995

Kurzfassung

Die Finite-Elemente-Simulation von Umformprozessen grossflächiger Blechbauteile zielt einerseits auf die Minimierung des Ressourceneinsatzes beim Herstellungsprozess und andererseits auf die Optimierung der Produktqualität. Ein hierfür geeignetes Simulationssystem muss im Produkt- und Prozessentwicklungszyklus integriert werden. Dies bedingt, dass das System direkt vom Konstrukteur oder Methodenplaner angewendet werden kann, dass es über die notwendigen Schnittstellen verfügt, dass es die Variation aller Kontrollparameter des Blechumformprozesses erlaubt und dass es genaue Resultate auch für Grossteile auf gängiger CAD(*Computer aided design*)-Hardware innerhalb von wenigen Stunden liefern kann.

Diese Anforderungen können nur mit einem *Special-Purpose*-System erfüllt werden, welches über Algorithmen verfügt, die optimal auf das Problem zugeschnitten und auf die vorhandenen Problemdaten abgestimmt sind.

In einem Vergleich der impliziten und expliziten Zeitintegrationsmethode ergibt sich, dass eine spezielle implizite Methode die Anforderungen am besten erfüllen kann. Dabei werden Biege- und Scheibefreiheitsgrade entkoppelt behandelt – die Biegeform und der Materialfluss werden getrennt ermittelt –, so dass Stabilitätsprobleme vermieden werden und infolge verbesserter Konditionierung der Systemmatrix der Einsatz iterativer Gleichungslöser ermöglicht wird. Für die Beschreibung der grossen Verschiebungen und Verzerrungen eignet sich ein lineares Dreieckselement verbunden mit einer *Total-Lagrange*-Formulierung, korrotierten Koordinaten und einem logarithmischen Dehnungsmass am besten. Eine Formulierung im Dehnungsraum ermöglicht die direkte explizite Integration des Stoffgesetzes. Für die Konvergenzkontrolle der Gleichgewichtsiteration gelingt es, ein anwenderfreundliches, weitgehend vom Problem und von Elementgrössen unabhängiges Kriterium zu definieren.

Eine Speicher- und Rechentechnik auf Basis der Seitensteifigkeiten vermag den Speicherbedarf und die Rechenzeit des iterativen linearen Löseverfahrens nach der Konjugierte-Gradienten-Methode deutlich zu reduzieren. Die bezüglich Rechenzeit optimale Genauigkeitstoleranz des Verfahrens wird aus numerischen Untersuchungen an Realteilen ermittelt. Die Untersuchungen zeigen auch, dass die dabei auftretenden linearen Gleichungssysteme mit deutlich mehr als 100'000 Freiheitsgraden auf gängigen Rechnern nur noch mit iterativen Methoden gelöst werden können.

Mit adaptiver räumlicher und zeitlicher Diskretisierung gelingt es, den Bedarf an Rechenressourcen ohne Genauigkeitseinbusse erheblich zu reduzieren und die Anwendung wesentlich zu vereinfachen. Die adaptive Verfeinerung und Entfeinerung des Finite-Elemente-Netzes ermöglicht erst die genügend genaue Umformsimulation von grösseren Realteilen. Im Unterschied zu anderen Problemklassen muss beim hoch nichtlinearen Blechumformproblem vor allem die Einhaltung der Randbedingungen überwacht werden. Als Kriterien werden deshalb neben einem Dehnungsgradientenkriterium die Krümmung des Netzes und die Kontaktdurchdringungen verwendet. Die zeitliche Adaptivität wird durch den Materialfluss gesteuert.

Das im ersten Teil der vorliegenden Arbeit entwickelte Grundprogramm, bei welchem vorerst die untergeordnete Biegesteifigkeit ganz vernachlässigt wird, wird mittels eines Vergleiches mit einem anderen Programm und mit einer Konvergenzstudie verifiziert. Bei der Konvergenzstudie werden die Simulationsresultate unterschiedlich feiner Diskretisierungen bei einem Realteil miteinander verglichen. Es zeigt sich, dass das Grundprogramm zuverlässige Resultate liefert. Das entkoppelte Löseverfahren und die adaptive Vernetzung vermögen die Rechenzeiten um Faktoren 10 bis 1000 zu reduzieren – einerseits dank der Einsatzmöglichkeit iterativer Löser und andererseits dank der Reduktion der Anzahl Freiheitsgrade.

Der zweite Teil der Arbeit beschäftigt sich mit Biegeeffekten. Der Einfluss der Biegung auf die Blechform ist nur in Spezialfällen wichtig. Die Einführung einer künstlichen Biegesteifigkeit reicht aus. Diese wird so formuliert, dass sich die Anzahl der Freiheitsgrade nicht erhöht. Gleichzeitig besorgt die künstliche Biegung die Stabilisierung der entkoppelten Biegelösung.

Der Einfluss der Biegung auf den Materialfluss beim Umlaufen enger Ziehradien darf insbesondere bei dicken Blechen nicht vernachlässigt werden. Die Berücksichtigung erfolgt mit Hilfe des Krümmungstensors der Blechform und mit Dickenintegration bei der Materialflusslösung. Untersuchungen zeigen, dass fünf Integrationspunkte ausreichen.

Die Berechnung der Rückfederung nach der Umformung wird mit einem gekoppelten Schalenelement durchgeführt. Die elastische Schalenstruktur wird hierzu mit den Werkzeugreaktionen und den während der Umformung mitverfolgten Residualbiegemomenten belastet.

Summary

The finite element simulation of forming processes involving large sheet metal parts is on the one hand aimed at minimizing the resources needed for the production process, on the other hand at optimizing the product quality. An appropriate simulation system must be integrated in the product and process development cycle. This means that the designers and the method planners must be able to use the system directly, that the system features the necessary interfaces, that it permits modifications of all the important control parameters of the sheet metal forming process and that it can yield, in only a few hours of computing time, accurate results even for large forming parts on the existing hardware used for CAD.

These requirements can only be fulfilled with a special purpose system featuring algorithms which are optimally designed for the problem and the available problem data.

A comparison between the implicit and the explicit time integration method shows that a special implicit method best fits the requirements. The method decouples the bending and stretching degrees of freedom: The bending shape and the material flow are determined separately. As a consequence stability problems are avoided and the condition of the system matrix is improved so that iterative methods for the solution of the linear equation systems can be used. In order to describe the large displacements and deformations a linear triangle element using a total Lagrange formulation, corotated co-ordinates and a logarithmic strain description are shown to be appropriate. A formulation in strain space allows the direct explicit integration of the constitutive equations. In order to control the convergence of the equilibrium iteration a user-friendly criterion is developed which is independent of the specific problem and the element sizes.

A storage method based on the side stiffness terms permits a considerable reduction in the requirements for storage space and computing time used by the iterative linear conjugate gradient solver. An optimal solver accuracy tolerance minimizing the computing time is determined from numerical experiments. These experiments also show that the arising linear equation systems, with significantly more than 100'000 degrees of freedom, can only be solved with iterative methods on the usual hardware.

Adaptive discretisation in space and time allows a considerable simplification of the program operation and leads to a substantial reduction in computing requirements without significant loss in accuracy. Moreover the adaptive refinement and coarsening technique makes a sufficiently accurate forming simulation of large real parts possible. For the strongly nonlinear forming problem, unlike for other problem classes, it is essential to make sure that the boundary conditions are maintained. Therefore, besides the strain gradients, the curvature of the mesh and the contact penetrations are used as refinement criteria. The adaptivity in time is controlled by the amount of material flow.

The base program developed in the first part of this work completely neglects the subordinate bending stiffness. It is verified by comparing with another program and by means of a convergence study. The convergence study compares the simulation results from differently refined discretisations for a real part. The verification shows that the base program yields reliable results. The decoupled solution procedure and the adaptive mesh allow a reduction of the computing time by a factor of 10 to 1000—thanks to both the reduction of the total number of degrees of freedom and the possibility of using iterative linear solvers.

The second part of this work deals with bending effects. The bending influence on the sheet shape is only important in some special cases. Introducing an artificial bending stiffness is sufficient. It is formulated in such a way as to avoid an increase in the number of degrees of freedom. At the same time the artificial bending stiffness stabilizes the uncoupled bending solution.

In particular for thick sheets the bending influence on the material flow around small drawing radii cannot be neglected. It is taken into account by using the curvature tensor of the sheet shape and by means of thickness integration during the material flow solution. Experiments show that five integration points are sufficient.

For computing springback after forming a coupled shell element is used. To obtain springback, the elastic shell structure is loaded with the tool reactions and the residual moments which were tracked and stored during the forming process.