

Prozesskettenunterstützung für die Umformsimulation – Rückführung von Umformgeometrien in CAD-Systeme

Burkhard Alpers, Peter Gantner

Fachhochschule Aalen, D-73430 Aalen, Deutschland

Burkhard.Alpers@fh-aalen.de, Peter.Gantner@fh-aalen.de

Summary

This paper is concerned with closing a gap in the process chain of metal forming. Tools for simulating the metal forming process like LS-DYNA3D® produce output geometries (and stress information) which cannot be easily re-imported in CAD-Systems for further processing. Currently a combination of expensive general surface reconstruction programs and “hand work” is required.

We developed a concept and implemented a corresponding program which allows to re-import parts with certain topologies (tube, plane) very easily from LS-DYNA3D® into any STEP-conformant CAD program. Our method is mainly based on using the interconnection information which is contained in the LS-DYNA3D® output file. This information allows to construct interpolating cubic B-Spline-surfaces which can be represented in the STEP standard format. So, we do not have to reinvent general purpose surface reconstruction programs but can harvest on the additional information available in our situation.

How to also make stress information available for further investigation of a part is the content of current studies.

Keywords

Flächenrückführung, surface reconstruction, Prozesskettenunterstützung, CAD-FEM-Kopplung, LS-DYNA3D®, STEP, Umformsimulation

1. Einleitung

Um die Umformung eines Teils (Rohr, Blech etc.) zu simulieren, wird dieses zusammen mit den für die Umformung benötigten Teilen (Stempel, Werkzeug) in der Regel zunächst in einem CAD-System als Flächenmodell konstruiert. Das Modell des umzuformenden Teils und des Werkzeugs wird dann mit einem FEM-Netzwerker in Schalenelemente zerlegt und in ein Umformsimulationsprogramm eingegeben. Dieses berechnet die Geometrie sowie den Spannungs- und Dehnungszustand nach der Umformung. Da es sich bei der Geometriebeschreibung um Eckpunkte auf Mittelflächen von Schalenelementen handelt, ist ein „Reimport“ in ein CAD-System nicht ohne weiteres möglich. Dieser ist aber erforderlich, um das umgeformte Teil weiter zu untersuchen und bearbeiten, etwa für Bauraumeinpassungen, Werkzeugkonstruktionen, Geometrieänderungen, Dickenuntersuchungen oder weitere Festigkeitsberechnungen (z.B. Crash).

Es besteht also das Problem, dass an dieser Stelle die Prozesskettenunterstützung eine Lücke aufweist. Diese wird momentan durch die Nutzung teurer Flächenrückführungsprogramme geschlossen. Zum einen können letztere aber die Geometrieinformation (Mittelflächen, Schalendicken) nicht unmittelbar verwenden, so dass noch weitere Handarbeit erforderlich ist. Zum anderen sind diese meist „überdimensioniert“, da sie mit (fast) beliebigen Punktemengen und zugrundeliegenden Topologien umgehen können, während die Punktemengen der Umformsimulation durch Elemente strukturiert sind und die Teile topologisch meist einfach sind. Außerdem geht bei der Benutzung von Geometrieprogrammen die Spannungs- und Dehnungsinformation verloren, die für weitere Festigkeitsuntersuchungen wichtig ist.

Ziel der in diesem Beitrag beschriebenen Arbeiten ist es nun, die oben beschriebene Lücke mit einem eigenen Programm zu schließen, das auf die Problemsituation zugeschnitten ist. Wir beschränken uns dabei vorerst auf folgende Rahmenbedingungen:

- Als Umformsimulationsprogramm liegt LS-DYNA3D® zugrunde.
- Zugelassene Topologien sind Bleche („flache Quader“) und Rohre.
- Zur (adaptiven) Vernetzung sind viereckige Schalenelemente zugelassen

Das Programm erstellt dann eine Geometrie-Datei, die von allen STEP-kompatiblen CAD-Programmen eingelesen werden kann. Ziel weiterer Arbeiten ist es, auch die Spannungsinformation zu integrieren.

Den Ausgangspunkt des Programms bildet der Output von LS-DYNA3D®, der im nächsten Abschnitt beschrieben wird. Dann legen wir unser Konzept zur Rückführung der Geometrie dar, wobei insbesondere auf Zwischenergebnisse eingegangen wird, die auch für andere Programme nutzbar sind. Die nach diesem Konzept erstellten Module sind die Bildung von innerer und äußerer Punktwolke, die Sortierung der Punkte in Punktescharen und die Berechnung interpolierender B-Splineflächen. Deren Darstellung im STEP-Format ermöglicht dann den „Reimport“. Alle Schritte werden schließlich anhand eines Beispiels erläutert. Abschließend gehen wir noch auf Perspektiven der weiteren Arbeit ein.

2. Ausgangsdaten der Umformsimulation

Das Programm LS-DYNA3D® liefert folgende Informationen über die Geometrie sowie die Spannungen und Dehnungen im umgeformten Bauteil („dynain-Datei“):

- Koordinaten der Elementeckpunkte auf der Mittelfläche des Schalenelements
- Zugehörigkeit der Punkte zu den Schalenelementen und Dicke der Schalenelemente
- Informationen zur adaptiven Vernetzung während der Umformsimulation (Herkunft während der Adaption neu erzeugter Elemente, Lage neu erzeugter Punkte zwischen Eckpunkten)
- Spannungs- und Dehnungsinformation.

Der folgende Auszug aus einer LS-DYNA3D®-Outputdatei zeigt diese Information beispielhaft:

```
...
*NODE
  1      -.200000000E+02   .200000000E+02   .000000000E+02   ...
...  2      -.200000000E+02  -.200000000E+02   .000000000E+02   ...
...  3       .168967857E+02   .196337872E+02   .152427177E+02   ...
...
*ELEMENT_SHELL_THICKNESS
  1      .19999121E+01   ...      25      8      3      13
      .19999121E+01   .19999121E+01   .19999121E+01   .19999121E+01
  2      .19998425E+01   ...      24      9      8      25
      .19998425E+01   .19998425E+01   .19998425E+01   .19998425E+01
...
*CONSTRAINED_ADAPTIVITY
```

```

29    24    9
37    21    24
...
*INITIAL_STRESS_SHELL
      1      1      5
      .000E+00-7.067E-05-5.237E-04-2.818E-03 1.071E-04 1.691E-05 4.463E-04 ...
-9.062E-01-7.493E-05-1.021E-03-2.988E-03 1.070E-04 1.691E-05 4.732E-04 ...
-5.385E-01-7.320E-05-8.193E-04-2.919E-03 1.071E-04 1.691E-05 4.623E-04 ...
...
*END

```

Im ersten Teil sind die Punkte der Mittelfläche mit ihren zugehörigen Identifikationsnummern und den Koordinaten angegeben. Der zweite Teil enthält Information über die Elemente (erste Nummer), die zu einem Element gehörenden Punkte (etwa bei Element 1: Punkte 25, 8, 3, 13) und die Schalendicke (viermal denselben Wert). Die Adaptivitätsangaben im dritten Abschnitt besagen, welcher neu erzeugte Zwischenpunkt zwischen zwei anderen Punkten liegt (etwa: 29 liegt zwischen 24 und 9). Weitere Information zu neuen Punkten wurde ausgelassen, da sie nicht benötigt wird. Schließlich enthält der letzte Teil Spannungs- und Dehnungsangaben, auf die wir hier nicht weiter eingehen.

3. Rückführungskonzept

Ziel der Rückführung ist es, den umgeformten Körper (später mit integrierter Dehnungsinformation) im CAD-System bzw. FEM-System möglichst eigener Wahl zur weiteren Bearbeitung nutzen zu können. Daher sollte der Output der Rückführung in einem programmunabhängigen Format erfolgen. Hierfür bietet sich die standardisierte STEP-Schnittstelle an (vgl. [1]), die zur Geometriemodellierung von den Körper begrenzenden Freiformflächen das mathematische Mittel der B-Spline-Flächen enthält. Als Output ist daher eine Beschreibung der Randflächen des Körpers („boundary representation“) mit derartigen Flächen im STEP-Format vorgesehen.

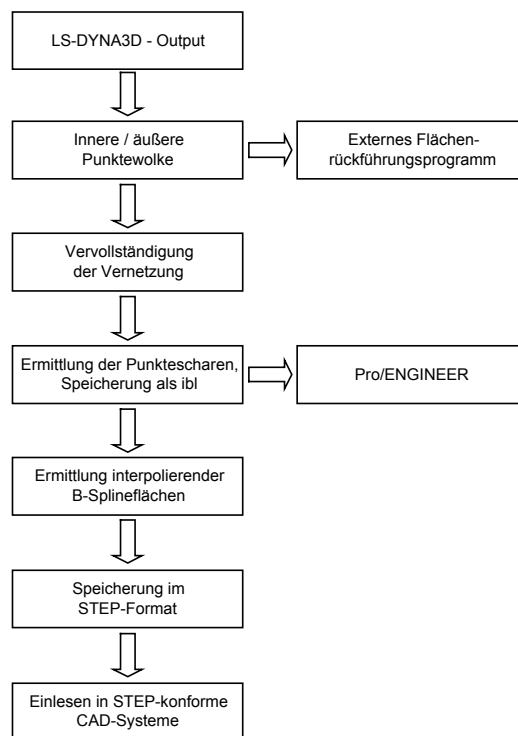


Fig. 1: Rückführungskonzept

Um solche Berandungsflächen zu erzeugen, bedarf es mehrerer Schritte. Bei der im folgenden gewählten Unterteilung in Module wurde darauf geachtet, dass – soweit möglich – ein Modul von möglichst wenigen der eingangs genannten Beschränkungen abhängt und der Output eines Schrittes auch von anderen Programmen genutzt werden kann. Damit soll zum einen die Möglichkeit

geschaffen werden, Zwischenergebnisse leichter überprüfen zu können, zum anderen soll etwa für Körper mit Dreiecksvernetzung wenigstens der vernetzungsunabhängige Teil durchführbar sein.

Im ersten Modul werden daher zunächst aus den Eckpunkten der Mittelflächen mit Hilfe der Elementdickeninformation innere und äußere (bei Rohren) bzw. untere und obere (bei Blechen) Punktwolken erzeugt. Auch wenn die weiteren Module bei Dreiecksvernetzung oder anderen Topologien (z.B. Blech mit Loch) nicht mehr funktionieren, so kann man zumindest mit dem Ergebnis in ein allgemeines Flächenrückführungsprogramm gehen.

Im Gegensatz zu unstrukturierten Messdaten enthält der Output des Umformsimulationsprogramms zusätzliche Zusammenhangsinformation, da Punkte und Elemente miteinander verknüpft sind. Dies kann man ausnutzen, um eine Spline-Interpolation durchzuführen. Bei der adaptiven Vernetzung erhält man jedoch nicht notwendig ein reguläres Punktenetz, da in gewissen Regionen die Vernetzung „dichter“ sein kann. Um nun aber für die spätere Spline-Interpolation ein einfaches, überall gleichdichtes Netz zu haben, wird in einem weiteren Modul eine Netzvervollständigung durchgeführt. Diese verfeinert das Netz so, dass es aus Punktescharen jeweils gleicher Anzahl besteht.

Im nächsten Modul werden aus dem jetzt regulären Netz die Punktescharen in einer Parameterrichtung als Liste extrahiert. Hierbei benutzt man wiederum die Zusammenhangsinformation. Diese Punktescharen werden in eine sogenannte IBL-Datei geschrieben, die zur Kontrolle im CAD-System Pro/ENGINEER® einlesbar ist. Man könnte zwar von hier aus das Volumenmodell in Pro/ENGINEER® erzeugen, wäre dann aber CAD-systemspezifisch und müsste ferner noch sehr viel Handarbeit bis hin zum Volumenmodell erledigen (vgl. [8], [11]).

Im nächsten Modul werden dann die Punktescharen genutzt, um eine interpolierende B-Splinefläche zu berechnen. Die wesentlichen Informationen dieser Fläche (Knotenvektoren, Kontrollpunkte) können schließlich in einer STEP-Datei abgespeichert werden.

Die Module, der Datenfluss zwischen diesen und mögliche „Quereinstiege“ in andere Programme sind in Figur 1 dargestellt. Im folgenden beschreiben wir die Module näher.

4. Erzeugung von innerer und äußerer Punktwolke

Da das LS-DYNA3D®-Ausgabefile nur die Schaleneckpunkte einer Mittelpunktsfläche angibt, sind im ersten Schritt hieraus Punkte der inneren und äußeren bzw. unteren und oberen Berandungsfläche zu ermitteln. Dazu nutzt man die Schalendickeninformation und die Information über die Zugehörigkeit eines Punktes zu einem Element.

Die Umformsimulation von LS-DYNA3D® liefert keinen stetigen Übergang aneinandergrenzender Schalenelemente. Da nun aber ein Schaleneckpunkt zu mehreren Elementen mit möglicherweise verschiedenen Dicken gehört, ist eine Mittelung erforderlich. Diese erfolgt in zweifacher Weise (für eine ausführliche Beschreibung vgl. [8], [11]):

- Um einen Normalenvektor zu bestimmen, werden die Normalenvektoren der angrenzenden Schalenelemente gewichtet mit der Fläche gemittelt (siehe Fig. 2). Dies basiert darauf, dass die vier Eckpunkte der Mittelfläche eines Schalenelements bei LS-DYNA3D® koplanar sind.
- Um welche Länge man in Richtung des Normalenvektors bzw. in Gegenrichtung von einem Mittelflächenpunkt aus geht, bestimmt man nun, indem man die Dicken der angrenzenden Schalenelemente – wieder gewichtet nach Fläche – mittelt und halbiert.

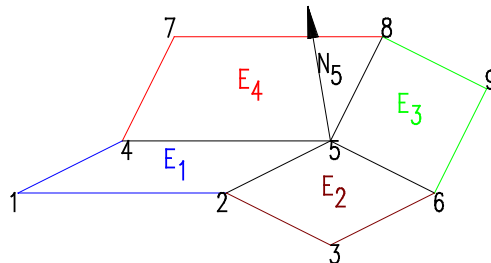


Fig. 2: Ermittlung von Randflächenpunkten

Auf diese Weise erhält man den zu einem Mittelflächenpunkt gehörigen inneren und äußeren (bzw. unteren und oberen) Punkt. Natürlich ist in dem Mittelungsverfahren eine gewisse Willkür enthalten. Da in der Realität aber im Gegensatz zur Simulation ein stetiger Übergang vorhanden ist, scheint diese Art der Mittelung plausibel zu sein.

Die so gewonnenen Punkte liegen nun auf den Berandungsflächen, so dass man an dieser Stelle auch ein kommerzielles Flächenrückführungsprogramm einsetzen kann, wenn die in der Einleitung genannten Voraussetzungen für das Funktionieren der weiteren Module nicht gegeben sind.

5. Regularisierung der adaptiven Vernetzung

Bei der ursprünglichen Vernetzung mit Vierecksschalenelementen erhält man ein reguläres, d.h. überall gleichmaschiges Netz mit jeweils m Punkten in einer Richtung und n Punkten in der anderen Richtung. Muss nun aber wegen starker Verformung während der FEM-Berechnung das Netz an einigen Stellen verfeinert (adaptiert) werden, so geschieht dies, indem ein Element geteilt wird. Figur 3 zeigt ein schematisches Beispiel für das Resultat mehrerer solcher Verfeinerungsschritte.

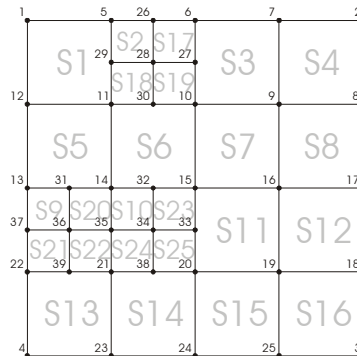


Fig. 3: Adaptive Vernetzung

Man erkennt Verbindungslinien, die nicht mehr vollständig von links nach rechts (oder oben nach unten) laufen, sondern nur in einem gewissen Teilbereich auftauchen (z.B. von Punkt 29 zu Punkt 27 in Figur 3). Um nun aber mit einfachen Interpolationsalgorithmen arbeiten zu können, benötigt man ein gleichmaschiges Netz. Es ist daher ratsam, das Netz durch Elementteilung und Einführung neuer Punkte so zu verfeinern, dass es wieder gleichmaschig wird. Wir nennen dies eine Regularisierung und das Resultat sieht man in Figur 4. Dies geschieht mit folgendem Algorithmus: Immer wenn ein Punkt in der Mitte einer Kante eines Schalenelements liegt, wird der gegenüberliegende Punkt ermittelt (oder erzeugt) und das Element wird zweigeteilt. So wird im ersten Schritt z.B. das Element S11 geteilt. Dafür wird ein neuer Punkt eingeführt, der dem Punkt 33 gegenüberliegt. Gibt es bereits einen gegenüberliegenden Punkt wie z.B. beim Paar (30,32), so kann man das Element einfach aufteilen. Zur Durchführung dieses Algorithmus nutzt man die im LS-DYNA3D®-Output vorhandene Information über Zwischenpunkte, die sich bei der Adaptierung ergeben haben. Für die Konfiguration in Figur 4 (linkes Bild) enthielte die Datei z.B. eine Zeile der Gestalt

```
30 11 10,
```

also Punkt 30 liegt zwischen 11 und 10 und ist bei einem Element (hier: S6) ein Zwischenpunkt auf einer Seite. Die letzte Konfiguration in der Bildfolge von Figur 4 zeigt dann als Resultat wieder ein gleichmaschiges Netz, wobei dies nicht bedeutet, dass die Maschen gleich groß sind.

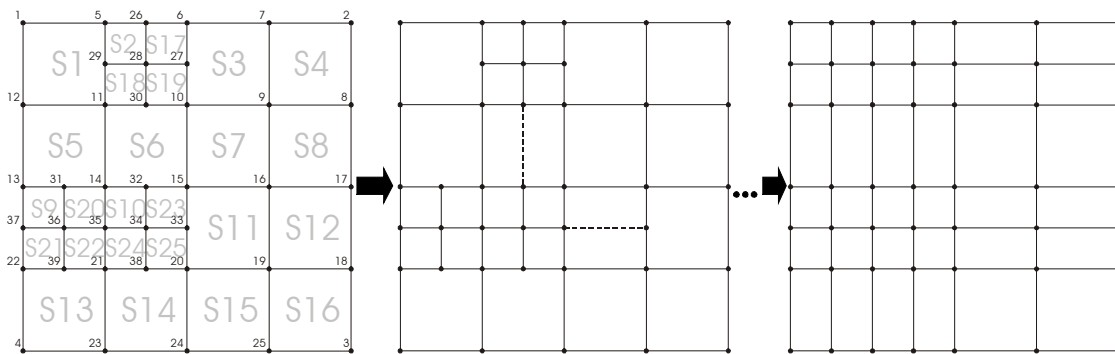


Fig. 4: Netzvervollständigung

Man braucht dieses Verfahren natürlich nur einmal für die inneren (bzw. unteren) Punkte oder die äußeren (bzw. oberen) Punkte durchzuführen, da deren Lagen und Bezeichnungen entsprechend sind, weil beide durch Verschiebung aus den Punkten der Mittelfläche hervorgegangen sind.

Für die Erstellung von Punktescharen in einer Richtung (siehe nächster Abschnitt) benötigt man die Zusammenhangsinformation zwischen Punkt und Element. Diese ist für die neu eingeführten Punkte und Elemente zusätzlich zu speichern.

6. Rekonstruktion von Punktescharen in einer Parameterrichtung

Um nun in einfacher Weise eine B-Spline-Interpolation durchführen zu können, benötigt man Informationen über die Anordnung der Punkte, genauer: über die Punktescharen in einer Richtung. Für die Konfiguration in Figur 5 ist diese Information in den rechts angegebenen Punktelisten verfügbar. Die Aufgabe besteht also im wesentlichen in der Erstellung solcher Listen. Hierzu kann man die im LS-DYNA3D®-Output (bzw. der Verfeinerung nach Abschnitt 5) enthaltene Zusammenhangsinformation zwischen Punkten und Elementen verwenden. Wir machen die grundlegende Arbeitsweise unseres Algorithmus' an der Blechkonfiguration aus Figur 5 deutlich:

- Um einen Eckpunkt zu finden, ermittelt man einen Punkt, der nur zu einem Element gehört. So findet man beispielsweise den Eckpunkt 1, der nur zum Element S1 gehört.
- Jetzt ermittelt man in diesem Element einen weiteren Punkt, der nur zu zwei Elementen gehört, etwa den Punkt 5 (man könnte auch zu Punkt 12 gelangen und würde dann vertikal voranschreiten).
- Dann findet man das Element, das ebenfalls den Punkt 5 enthält, also Element S2. In diesem Element sucht man nach demjenigen Punkt, der nur zu zwei Elementen gehört, aber nicht zum Element S1. Dies ist Punkt 6.
- Ist man bei dieser Vorgehensweise wieder an einer Ecke angelangt, so terminiert der erste Durchgang und man kennt die Reihenfolge der obersten Punkteschar.

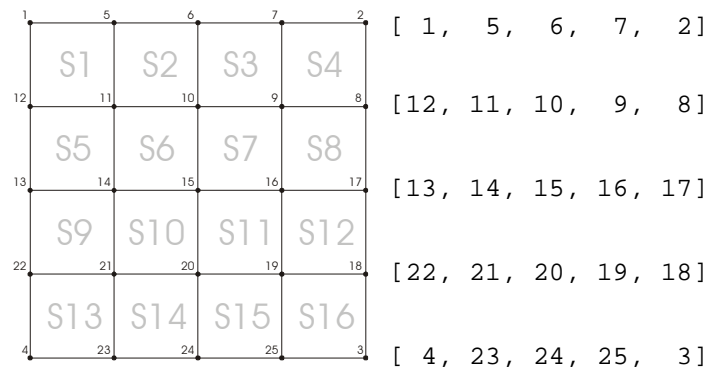


Fig. 5: Ermittlung der Punktescharen

Mit leichten Modifikationen kann man in ähnlicher Weise die weiteren Punktescharen ermitteln. Bei topologisch rohrförmigen Körpern findet man zunächst einen Randpunkt, der dadurch gekennzeichnet ist, dass er nur zu zwei Elementen gehört. Von dort aus „hangelt“ man sich dann in ähnlicher Weise durch die Punkteschar. Man sieht sofort, dass die skizzierten Algorithmen nur dann funktionieren können, wenn es sich topologisch um Bleche oder Rohre handelt und wenn die Vernetzung gleichmäßig mit Viereckselementen erfolgt.

Das Ergebnis dieses Arbeitsschritts legen wir in einer sogenannten *.ibl-Datei ab, die spezifisch für das CAD-System Pro/ENGINEER® ist. Es handelt sich um eine ASCII-Datei, die im wesentlichen nur die einzelnen Punktescharen mit der Koordinateninformation enthält. Man kann eine solche Datei bereits in Pro/ENGINEER® einlesen und dabei B-Spline-Kurven in einer Richtung erzeugen lassen. Um aber zu einer Fläche zu gelangen, ist noch umfangreiche Handarbeit (u.a. Anklicken eines jeden Splines) erforderlich. Auf jeden Fall ergibt sich auf diese Weise eine Kontrollmöglichkeit für die eigene spätere B-Splineflächenberechnung.

7. Berechnung der B-Splineflächen

Für die mathematische Modellierung rohrförmiger oder blechförmiger Freiformflächen bieten sich die sogenannten kubischen Tensorprodukt-B-Splineflächen an. Zur Erstellung einer solchen Fläche benötigt man folgende Daten (für das folgende vgl. [2], [4], [9]):

- Ein Netz von Kontrollpunkten \mathbf{B}_{ij} , $i=0, \dots, n$, $j=0, \dots, m$
- Zwei Knotenvektoren (u_0, \dots, u_p) und (v_0, \dots, v_q) für die beiden Parameterrichtungen. Damit die Randpunkte des Kontrollnetzes auf der B-Splinefläche liegen, sind in den Knotenvektoren die ersten vier sowie die letzten vier Knoten jeweils identisch zu wählen. Solche B-Splines werden dann auch „clamped“ genannt (siehe [9, S.571])

Die kubische B-Splinefläche in Parameterdarstellung ergibt sich nun in der Form

$$X(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m B_{ij} N_{i3}(u) N_{j3}(v) \quad , \quad (u, v) \in [u_0, u_p] \times [v_0, v_q] \quad (\text{Formel 1}),$$

wobei die Funktionen N_{i3} , N_{j3} die kubischen B-Splinebasisfunktionen zu den beiden Knotenvektoren sind.

Beim Aufstellen und Lösen der Interpolationsaufgabe folgen wir [2]. Um die Interpolationsaufgabe als Gleichungssystem modellieren zu können, benötigt man eine Parametrisierung der Interpolationspunkte, d.h. für einen zu interpolierenden Punkt benötigt man das zugehörige Parameterpaar (\bar{u}_i, \bar{v}_j) .

Für die Ermittlung solcher Parameter gibt es unterschiedliche Verfahren (siehe etwa [4, S.194,265]), die später auch zu unterschiedlichen und teilweise sehr „schlechten“ Interpolationsflächen führen. In der Praxis hat sich die sogenannte „zentripetale“ Parametrisierung, die auf den Abständen zwischen den Interpolationspunkten und Richtungsänderung beruht, als meistens tauglich erwiesen. Die so ermittelten Parameter werden auch als Knoten im Knotenvektor verwendet.

Um am Rande noch Einflußmöglichkeiten zu haben (wenig gekrümmter Auslauf, glatter Übergang bei geschlossenen Kurven bzw. Flächen), wird in jeder Richtung mit einer Anzahl unbekannter Kontrollpunkte angesetzt, die um 2 größer ist als die Anzahl der Interpolationspunkte. Hat man etwa als Resultat des letzten Abschnitts die zu interpolierenden Flächenpunkte P_{ij} , $i=0\dots r$, $j=0\dots s$, ermittelt, so setzt man in Formel 1 mit $m=r+2$, $n=s+2$ an. Die Interpolationsaufgabe lautet dann:

$$P_{kl} = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m B_{ij} N_{i3}(\bar{u}_k) N_{j3}(\bar{v}_l) \quad \text{für } k=0,\dots,r \text{ und } l=0,\dots,s.$$

Hierbei sind die Kontrollpunkte B_{ij} , $i=0,\dots,n$, $j=0,\dots,m$ (genauer: deren drei Koordinaten) zu ermitteln. Dies ist ein lineares Problem, das mit dem bei [2] angegebenen Algorithmus effizient gelöst werden kann.

Bei Blechbauteilen ergibt sich eine B-Splinefläche, die in beiden Parameterrichtungen „clamped“ ist. Dies gilt auch bei rohrförmigen Flächen, obwohl man in der geschlossenen Richtung auch „eleganter“ mit periodischen B-Splines arbeiten könnte, bei denen die Kontrollrandpunkte i.a. nicht auf der Fläche liegen. Da solche Splines aber nicht von allen CAD-Systemen unterstützt werden, verwenden wir nur „clamped“ B-Splines.

8. Output im STEP-Format

Sind Kontrollpunkte und Knotenvektoren berechnet, so bleibt im letzten Schritt die Speicherung in einem Format, das für viele CAD- und FEM-Systeme (Vernetzungstools) einlesbar ist. Die Entscheidung fiel auf das von der ISO standardisierte STEP-Format. Nun ist STEP (ISO 10303) ein sehr umfangreicher, durch eine eigene Daten- und Funktionsbeschreibungssprache erweiterbarer und stets wachsender Standard, mit dem nicht nur Geometriebeschreibungen möglich sind, sondern generell der Produktdatenaustausch unterstützt werden soll (vgl. allgemein zu STEP: [1]). STEP wurde daher nicht nur wegen der umfangreichen Geometriebeschreibungsmöglichkeiten gewählt, sondern auch im Hinblick auf eine spätere Erweiterung um Spannungsdaten (siehe nächsten Abschnitt). Aus der Fülle an Bestandteilen des ISO-Standards sind für die Belange der Geometrierückführung die folgenden Teilstandards wichtig:

- ISO 10303-42 ([6]) : Integrated generic resource: Geometric and topological representation. Hier werden die wesentlichen Geometrieobjekte in der Beschreibungssprache EXPRESS spezifiziert. Für Freiformflächen gibt es die B-Splines oder noch allgemeiner die NURBS.
- ISO 10303-214 ([7]): Application Protocol: Core Data for Automotive Mechanical Design. Dieser Teil enthält (wie andere Applikationsprotokolle auch, vgl. [1]) eine Zusammenstellung der für den Bereich „Automotive Mechanical Design“ wesentlichen Objekte. Solche Objektmengen referenzieren in der Regel Objektklassen („ENTITY types“) aus den Basisstandards wie dem oben genannten ISO 10303-42, es können aber auch noch genauere Spezifikationen hinzugefügt oder Beschränkungen (etwa bei Zahlbereichen von Attributen) vorgenommen werden. ISO 10303-214 beschreibt verschiedene „Conformance Classes“ (CC), so dass es verschiedene Abstufungen bei der Standard-Konformität gibt.
- ISO 10303-21 ([5]): Implementation methods: Clear text encoding of the exchange structure. Dieser Teil legt dar, wie konkrete Instanzen der mit Hilfe von EXPRESS beschriebenen Datentypen und Objektklassen („ENTITIES“) in einem ASCII-File zu formatieren sind, bestimmt also letztlich das Format der Austauschdatei. Neben den Produktdaten ist auch ein gewisses Headerformat festgelegt.

Für die Flächenrückführung mittels B-Splineflächen sind die in der Norm ISO 10303-42 angegebenen ENTITIES „b_spline_surface“ und der Subtyp „b_spline_surface_with_knots“ von Bedeutung, deren wesentliche Bestandteile die folgenden sind (vgl. [6], p. 105-107; die vollständigen EXPRESS-Beschreibungen sind im WWW bei [10] einzusehen):

```

ENTITY b_spline_surface
  SUPERTYPE OF ... # Auslassung
  SUBTYPE OF (bounded_surface);
  u_degree          : INTEGER;
  v_degree          : INTEGER;
  control_points_list : LIST [2:?] OF LIST [2:?] OF cartesian_point;
  surface_form      : b_spline_surface_form;
  u_closed          : LOGICAL;
  v_closed          : LOGICAL;
  self_intersect    : LOGICAL;
  ...               # Auslassung
END_ENTITY;

```

```

ENTITY b_spline_surface_with_knots
  SUBTYPE OF (b_spline_surface);
  u_multiplicities : LIST [2:?] OF INTEGER;
  v_multiplicities : LIST [2:?] OF INTEGER;
  u_knots          : LIST [2:?] OF parameter_value;
  v_knots          : LIST [2:?] OF parameter_value;
  knot_spec        : knot_type;
  ...             # Auslassung
END_ENTITY;

```

Die wesentliche Information, die man für die Angabe konkreter Instanzen dieser ENTITIES benötigt, besteht aus der Liste der Kontrollpunkte und aus den Knotenvektoren. Diese Daten sind in der vorhergehenden Splineberechnung ermittelt worden. Die anderen ENTITY-Attribute sind in unserem Fall immer gleich (*_degree=3, *_multiplicities=[4,1,...,1,4] für „clamped“ B-Splines) oder haben nur den Charakter von Zusatzinformation (z.B. *_closed) ohne Wichtigkeit für die Flächenberechnung. Die beiden ENTITIES sind Bestandteil der Konformitätsklasse CC2 des Standards ISO 10303-214, gemäß der z.B. das CAD-System Pro/ENGINEER® STEP-Daten abspeichert. In der Praxis haben sich jedoch beim Einlesen Probleme ergeben, wenn die B-Splines nicht „clamped“, sondern periodisch sind, obwohl die CC2 solche Einschränkungen nicht enthält. Möchte man nun Instanzen dieser ENTITIES abspeichern, so muss man sich an das in ISO 10303-21 genannte Format halten. Beispielsweise ergibt sich folgender Dateiauszug:

```

:
#1=CARTESIAN_POINT(",(3.263099E+000,-1.030531E+002,9.494244E+001));
#2=CARTESIAN_POINT(",(1.357688E+001,-9.846300E+001,9.370705E+001));
:
#35=CARTESIAN_POINT(",(2.184718E+001,8.223670E+001,-4.284212E+001));
#36=CARTESIAN_POINT(",(2.502546E+001,8.521254E+001,-3.244556E+001));
:
#55=B_SPLINE_SURFACE_WITH_KNOTS(",3,3,((#1,#2,#3,#4,#5,#6),(#7,#8,#9,#10,#11,#12),(#13,#
14,#15,#16,#17,#18),(#19,#20,#21,#22,#23,#24),(#25,#26,#27,#28,#29,#30),(#31,#32,#33,#34,#35,#
36)),UNSPECIFIED,..F,..F,..F.,(4,1,1,4),(4,1,1,4),(0.000000E+000,3.058345E-001,5.791911E-001,
1.000000E+000),(0.000000E+000,2.961919E-001,7.319924E001,1.000000E+000),.UNSPECIFIED.);
:

```

Wie man erkennen kann, werden zunächst die Kontrollpunkte einzeln und mit einer Nummer angegeben, die dann in der Beschreibung der B-Splinefläche zum Referenzieren benutzt wird. Solche ASCII-Dateien können zwar sehr groß werden, sind aber immer noch „lesbar“ für Kontrollzwecke.

9. Beispiel

Das Beispiel eines durch die Simulation des Innenhochdruckverfahrens gekrümmten Rohres dient zur Erläuterung unserer Vorgehensweise. Das erste Bild in Figur 6 zeigt das noch ungekrümmte Rohr in Pro/ENGINEER®. Als Ergebnis der Umformsimulation mit LS-DYNA3D® erhält man das zweite Bild, ein Schalenmodell mit circa 14.000 Punkten (Eckpunkten der Mittelflächen der Schalenelemente). Das linke Bild in Figur 7 zeigt die Visualisierung als Punktwolke in LS-POST®. Man kann auch die Punktwolke in das CAD-System Pro/ENGINEER® importieren, wie im rechten Bild gezeigt ist. Es steht aber immer nur eine Punktmenge zur Verfügung, die für die weitere Bearbeitung untauglich ist. Mit unserem Verfahren erzeugen wir nun die Berandungsflächen, aus denen sofort ein

Volumenmodell erzeugt werden kann. Dies ist im linken Bild von Figur 8 dargestellt. Zum Vergleich zeigen wir noch das Bild des real umgeformten Rohres.

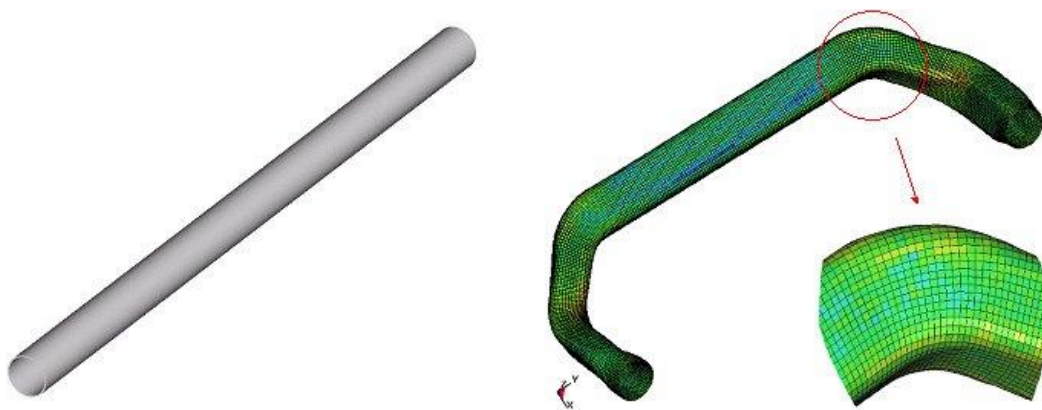


Fig. 6: Ausgangsmodell (Pro/ENGINEER®) und Ergebnis der Umformsimulation

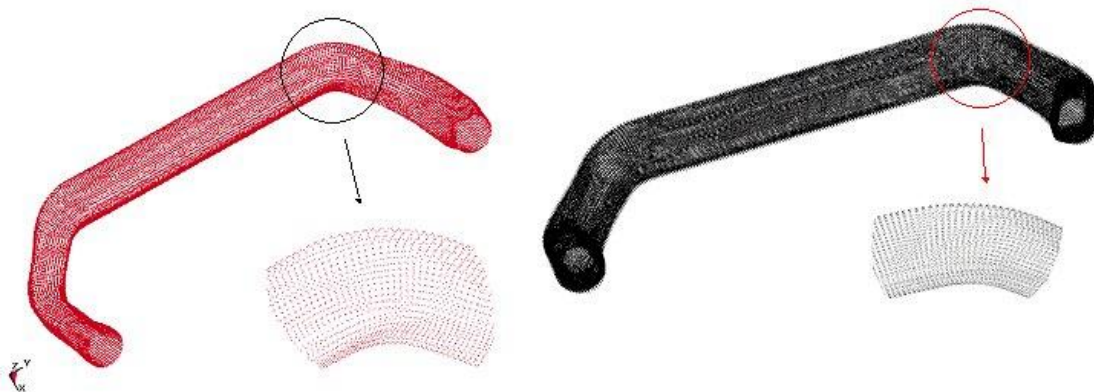


Fig. 7: Visualisierung als Punktwolke in LS-POST® und in Pro/ENGINEER®

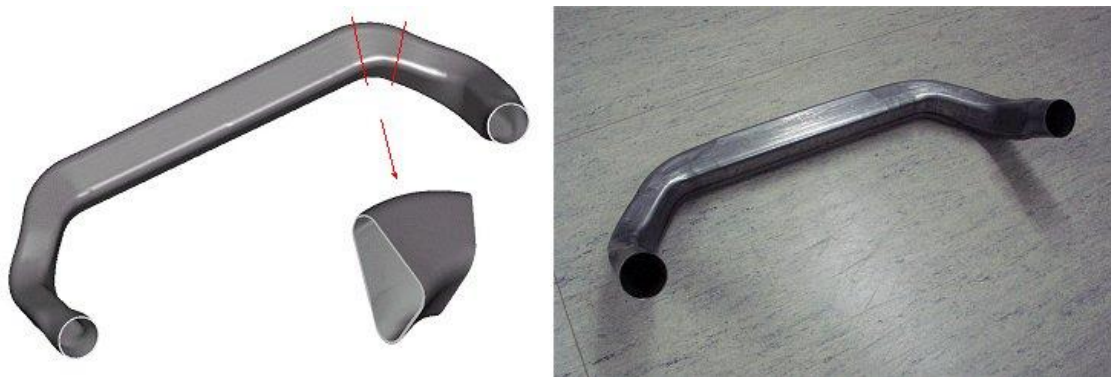


Fig. 8: Ergebnis der Rückführung (B-Splineflächen) und reales Bauteil

10. Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag schliessen wir eine Lücke bei der Prozesskettenunterstützung für die Umformsimulation. Der Output eines Umformsimulationstools wie LS-DYNA3D® kann im allgemeinen nicht leicht in ein CAD-Programm für weitere Untersuchungen reimportiert werden, da die Geometriedarstellungen völlig unterschiedlich sind. Mit dem dargelegten Konzept und der zugehörigen Software

ist die Rückführung aus dem Programm LS-DYNA3D® für Körper mit gewissen Topologien (Rohr, Platine) fast „auf Knopfdruck“ möglich. Wir nutzen dabei im Gegensatz zu generellen Flächenrückführungsprogrammen die Zusammenhangsinformation aus, die in der LS-DYNA3D®-Ausgabedatei enthalten ist. Sicherlich wäre es nicht sinnvoll, für beliebige Topologien ein Programm zu entwerfen, da man dann doch wieder wesentliche Teile eines generellen Rückführungsprogramms implementieren müsste.

Die Zusammenhangsinformation aus LS-DYNA3D® wird genutzt, um das Bauteil berandende B-Spline-Flächen zu erzeugen, die dann leicht im standardisierten STEP-Format allen konformen CAD- oder FEM-Programmen bzw. Vernetzungstools zugänglich gemacht werden können.

Die Verfügbarkeit als Spline-Fläche hat auch den Vorteil, den nächsten Schritt in der Prozesskettenunterstützung zu unterstützen, nämlich die Integration von Spannungs- und Dehnungsinformation über das umgeformte Teil. Dies ist für weitere Festigkeitsuntersuchungen wesentlich. Mit Hilfe der B-Spline-Darstellung dürfte die interpolierende Berechnung von Spannungen an neu vernetzten Knoten deutlich einfacher werden. Auch gibt es in STEP Möglichkeiten der Integration von FEM-Daten, so dass die STEP-Darstellung ebenfalls im Hinblick auf die Spannungsinformation günstig scheint. Weitere zukünftige Arbeiten beschäftigen sich mit der Nutzung kommerzieller Mathematikprogramme und -bibliotheken zur Berechnung und Ausgabe im STEP-Format.

11. Literatur

- [1] Anderl, R., Trippner, D. (Hrsg.): STEP – Standard for the Exchange of Product Model Data, Stuttgart-Leipzig: Teubner, 2000
- [2] Farin, G.: Curves and Surfaces for Computer-Aided Geometric Design, 4th Edition, San Diego: Academic Press, 1996
- [3] Gantner, P.: Prozesskettenunterstützung für die Umformsimulation – Flächenrückführung von geänderten FEM-Geometriedaten, Diplomarbeit FH Aalen, Aalen 2001
- [4] Hoschek, J., Lasser, D.: Grundlagen der geometrischen Datenverarbeitung, 2. Auflage, Stuttgart: Teubner, 1992
- [5] ISO 10303-21: Industrial Automation Systems and Integration – Product Data Representation and Exchange - : Part 21: Implementation methods: Clear text encoding of the exchange structure, 1994
- [6] ISO 10303-42: Industrial Automation Systems and Integration – Product Data Representation and Exchange - : Part 42: Integrated generic resource: Geometric and topological representation, 2nd Edition, 2000
- [7] ISO 10303-214: Industrial Automation Systems and Integration – Product Data Representation and Exchange - : Part 214: Application Protocol: Core Data for Automotive Mechanical Design 1999
- [8] Kahler, M.: Entwurf und Implementierung eines Programms zur Konvertierung von geänderten FEM-Geometriedaten in ein CAD-Format, Diplomarbeit FH Aalen, Aalen 1999
- [9] Piegl, L., Tiller, W.: The NURBS Book, 2nd Edition, Berlin: Springer, 1997
- [10] Pro STEP GmbH: <http://www.prostep.de>
- [11] Rimkus, W.: Simulation and Optimisation of the Interior High Pressure (IHP) manufacturing process using the Finite Element Method (FEA), PhD Thesis, University of Wolverhampton, Aalen 2000