

Das Schmieden zählt nach wie vor zu den wichtigsten Fertigungsverfahren, da mit ihm hochgradig belastbare Werkstücke endkonturnah hergestellt werden können. Schmiedeteile zeichnen sich durch sehr hohe Maß- und Formgenauigkeiten aus und erlauben den Einsatz einer Vielzahl von Werkstoffen. Die weite Verbreitung des Schmiedens resultiert aus der kostengünstigen Herstellbarkeit auch komplexer Bauteilgeometrien. Für die Konstruktion in der Schmiedeindustrie bedeuten die komplexen Bauteilgeometrien jedoch große Aufwände bei

der Auslegung der Werkzeugformen (Gravur). Um dem Wettbewerbsdruck, sowohl in der eigenen Branche als auch gegenüber alternativen Fertigungsverfahren, erfolgreich standhalten zu können, muß der CAD/CAM-Prozeß für die branchenspezifischen Bedürfnisse maßgeschneidert und hinsichtlich der Erfolgsfaktoren Zeit, Kosten und Qualität optimiert werden. Der Industrieverband Deutscher Schmieden e.V. (IDS) hat den hiermit verbundenen Entwicklungsbedarf frühzeitig erkannt. In seinem Auftrag werden bereits seit 1984 IDS-CAD/CAM-Projekte (ICCP) durchgeführt. Ziel ist dabei die

Entwicklung schmiedespezifischer Zusatz- und Technologiemodule auf der Basis eines am Markt erhältlichen CAD/CAM-Systems (strässle Euklid V4). Im Projekt ICCP 3 sollen mit der Optimierung der CAD/CAM-Technologie und -Prozeßkette die Weichen dafür gestellt werden, zukünftig durch eine effizientere Produktentwicklung Wettbewerbsvorteile zu erzielen. Als Projektpartner wurde das Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen zur Lösung spezieller Probleme bei der rechnergestützten Konstruktion in der Schmiedeindustrie beauftragt.

CAD/CAM-Technologie in der Schmiedeindustrie

Walter Eversheim und Richard Gräßler, Aachen

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Dipl.-Wirt. Ing. *Walter Eversheim*, Jahrgang 1937. Studium des Maschinenbaus und wirtschaftswissenschaftliches Aufbaustudium an der RWTH Aachen. 1965 Promotion und Oberingenieur am Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen. Von 1969 bis 1973 leitende Tätigkeiten in namhaften Großunternehmen. Seit 1973 Inhaber des Lehrstuhls für Produktionssystematik am WZL. Seit 1980 Mitdirektor des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnologie (IPT), Aachen, und Leiter der dortigen Abteilung Planung und Organisation. Seit 1989 ständiger Gastprofessor und Mitdirektor des Instituts für Technologie-management (ITM) der Universität St. Gallen (HSG), Schweiz, 1992 Dr. h.c. der Universität Trondheim, Norwegen, und Honorarprofessor der Tianjin-Universität, China.

Dipl.-Ing. *Richard Gräßler*, Jahrgang 1965, studierte Maschinenbau an der Ruhr-Universität Bochum und der RWTH Aachen und ist seit 1992 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Produktionssystematik am Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen.

Alternative rechnerinterne Darstellungen im Umfeld von CAD/CAM

Die Schmiedeindustrie verwendet zur Beschreibung der Werkstücke und Werkzeuge vor allem Flächenmodellierer mit Beziér-Mathematik. Dies hat sich für das Beschreiben und NC-Fräsen komplizierter Hohlformen als geeignet erwiesen. Dennoch gibt es hier Einsatzgrenzen, beispielsweise beim Ändern der Flächenstruktur im 3D-CAD-Modell, beim Erzeugen von approximierenden Flächen basierend auf Stützstellen oder -profilen sowie beim Erstellen von Finite-Elemente (FE)-Strukturen, zum Beispiel zur Fließspannungs- oder Temperaturberechnung.

In marktgängigen CAD-Systemen kommen im 3D-Bereich drei verschiedene rechnerinterne Darstel-

lungen (RID) zum Einsatz: das Draht-, das Flächen- und das Volumenmodell, **Bild 1**. Wegen der komplexen Werkstückgeometrien sind für die Schmiedeindustrie nur das Flächen- und das Volumenmodell von Interesse, da zumindest die Kurven und die darauf aufbauenden Flächen abgebildet werden müssen. Darüber werden die Kurven und Flächen in den einzelnen CAD-Systemen auf unterschiedlichen mathematischen Grundlagen beschrieben: kubischen Splines, Beziér-Polynomen, B(asis)-Splines oder NURBS (Non-Uniform-Rational-B-Splines), **Bild 2**.

Ergebnis der Untersuchungen ist, daß die schmiedetechnischen Anforderungen bei der Beschreibung eines Werkstücks und seiner Werkzeuge einzig von dem B-Rep-Volumenmodell (Boundary Representation – Flächenbegrenzungsmodell) vollständig erfüllt werden. Mit Einschränkungen ist auch das Flächenmodell geeignet. Das Fehlen von Topologie und Volumeninformationen erfordert jedoch hohe programmertechnische Aufwände von seiten der CAD-Systemhäuser, um das Ändern der Flächenstrukturen und die Erstellung von FE-Strukturen zu realisieren. In der Kurven- und Flächenmathematik sind die flexiblen NURBS (Non Uniform Rational B-Splines) die zur Geometriemodellierung und späteren Änderung geeignete Darstellungsart, da nur sie Unstetigkeiten und örtliche Modifikationen ohne Beeinflussung der Restkurve erlauben.

Zeichnungserstellung auf der Basis der 3D-CAD-Geometrie

Bei der derzeitigen Vorgehensweise zur Erstellung eines 3D-CAD-Modells für ein Schmiedeteil geht man in der Regel von einer vom Auftraggeber erstellten Fertigteilezeichnung aus, das heißt vom bearbeiteten Schmiedestück. Auf der Basis dieser Zeichnung müssen fertigungsspezifische Geometrieänderungen vorgenommen werden, um zu einem schmiedbaren Bauteil, dem Schmiederohteil, zu gelangen. Die Geometrieänderungen werden von einem erfahrenen Schmiedeteilkonstrukteur beispielsweise durch Erzeugen von Aufmaßstrukturen und Schmiedeschrägen entwickelt. Danach wird das 3D-CAD-Modell des Schmiederohteils rechnerintern beschrieben, wobei sich dann erst die räumlichen Freiformflächen und -konturen ergeben, die in der Fertigteilezeichnung oft nicht enthalten sind. Durch diese Vorgehensweise liegt keine Zeichnung vom Schmiederohteil vor, sondern ausschließlich ein rechnerinternes 3D-CAD-Modell. Eine Rohteilezeichnung ist aber für weitere Absprachen mit dem Auftraggeber und für innerbetriebliche Abteilungen ein wichtiges Dokument.

Die Problematik liegt auf der Hand: Kann aus dem 3D-CAD-Modell keine Zeichnung abgeleitet werden, ist auch diese neu zu „konstruieren“. Weiteres Ziel war es deshalb, Möglichkeiten und Wege aufzuzeigen, wie aus einem 3D-Freiformflächen-

modell für beliebige Raumschnitte 2D-Zeichnungen und bemaßbare Konturen mit Hilfe von CAD-Systemen erzeugt werden können. Hierzu wurden marktgängige CAD/CAM-Systeme untersucht, inwieweit sich für beliebige Raumschnitte 2D-Zeichnungen ableiten lassen. Es zeigte sich, daß dies nur bei CAD-Systemen mit Assoziativität vom 3D-Modell zur 2D-Geometrie ohne zusätzlichen Mehraufwand möglich ist. Voraussetzung für diese Assoziativität ist ein B-Rep-Modell als rechnerinterne Darstellung. Bei anderen CAD-Systemen lassen sich zwar auch 2D-Geometrien ableiten, jedoch müssen die Geometrien aufwendig überarbeitet und beispielsweise Sichtkanten manuell entfernt werden.

Mit der Art der Datenstruktur ist allerdings noch nicht die Frage nach bemaßbaren, das heißt durch Linien- und Kreissegmente interpretierbaren, Freiformkurven gelöst. Leider bieten die marktgängigen Systeme hierzu in den seltensten Fällen Funktionen an. Infolgedessen wurde die „Toleranzkreis“-Methode entwickelt, die auf der Basis von Sekantenkrümmungen von kurzen Kurvenstücken (Schrittweiten) eine Approximation durchführt. Die erreichbare Genauigkeit läßt sich anforderungsgerecht konfigurieren. Alternativ kann die Approximierung der Freiformkurven auch manuell durch Nachzeichnen mit Hilfe der vorhandenen Kreis- und Linienfunktionen des CAD-Systems vorgenommen werden. Neben einem erhöhten Aufwand ist hierbei nachteilig, daß sich damit nur eine zufällige, sehr subjektive Genauigkeit erreichen läßt.

Allerdings ist bei fehlender Assoziativität von 3D- und 2D-Geometriemodell trotz der beschriebenen Methoden das Erstellen von vollständig bemaßten Zeichnungen (Konstruktions- und Fertigungsmaße) ausgehend von einem 3D-Flächenmodell wegen des hohen Zeitaufwands nur in Ausnahmefällen sinnvoll. Die Ausführung der kompletten Prozeßkette zur Zeichnungserstellung ergab für ein geometrisch relativ einfaches Pleuel unabhängig von der Approximationsmethode rund 14 h Bearbeitungszeit. Bei Nutzung eines CAD-Systems mit Assoziativität von 3D- und 2D-Geo-

metriemodell läßt sich dies auf etwa 5 h reduzieren. Die hier vorgestellte Vorgehensweise ist aber bei Beschränkung auf wichtige ausgewählte Maße wirtschaftlich vertretbar. Voraussetzung hierfür ist allerdings der Verzicht auf eine normgerechte Zeichnung, in der alle Maße enthalten sind.

CAD-gerechte und änderungsfreundliche Bauteilstruktur

Die Ähnlichkeitssuche und die Wiederverwendung von vorhandenen Bauteilen sind entscheidende Zeit- und Wirtschaftlichkeitsfaktoren. Zur Zeit werden 3D-CAD-Modelle von Schmiederohrteilen und -werkzeugen in der Regel ohne eine definierte logische Struktur zueinander aufgebaut. Es liegt im Ermessen des jeweiligen Konstrukteurs, in welcher Reihenfolge er seine Konstruktion bearbeitet und in welcher Form und in welchem Umfang er die Bauteildaten verwaltet. Konsequenz dieses Vorgehens ist, daß die Ähnlichkeitssuche und die Wiederverwendung von Bauteilen zwischen unterschiedlichen Konstrukteuren sehr schwierig sind.

Zur Lösung dieses Problems wurde für die konstruktionsrelevanten Auftrags- und Artikeldaten sowie für die CAD- und NC-Daten eine logische Bauteilstruktur entwickelt, die eine konsistente Verwaltung der Beziehungen zwischen den verschiedenen Stadien des Schmiedeteils, den Werkzeugteilen, CAD- und NC-Daten erlaubt, **Bild 3**. Die entwickelte Bauteilstruktur unterstützt damit die Wiederverwendung und das Änderungs-wesen durch die Verwaltung der Schmiedebauteile sowie der Einzelteile und Baugruppen der Werkzeuge. Des weiteren werden ein systematischer und strukturierter Aufbau eines Schmiedebauteils und die änderungsfreundliche Dokumentation und Speicherung von CAD-Modellen und deren Entstehungshistorie möglich, um die Erstellung auch anderen Konstrukteuren nachvollziehbar zu gestalten. Das entwickelte Modell läßt sich an die unternehmensspezifischen Gegebenheiten anpassen und in vorhandenen EDV-Systemen, zum Beispiel einer Da-

Bezeichnung	Elemente	Eigenschaft
Flächenmodell	Punkt, Kurve, Fläche	- keine "Körper" zur Werkstückbeschreibung (keine BOOLSchen Operationen) - keine Entstehungshistorie des Modells - keine Topologie (benachbarte Flächen) - NC-Bearbeitung auf einzelne Flächen bezogen - Ausblenden verdeckter Kanten nicht automatisch (Hidden-Line Algorithmus) - Schnittbildung nur mit Hilfe interaktiver Eingaben - Volumenberechnungen (Schwerpunkte, Trägheitsmomentachsen ...) nur als Zusatzfunktionalität
CSG Volumenmodell	Volumen (-körper)	- keine Modellkanten, -flächen - nicht für zusätzliche technische Informationen geeignet - lokale Manipulation schwierig bis unmöglich (z.B. Verrunden einer Kante) - keine Freiformflächen
B-REP Volumenmodell	Punkt, Kurve, Fläche, Volumen	- keine Entstehungshistorie des Modells - keine Überführung von einem B-REP- in ein CSG-Modell ohne Verluste

Legende: CSG = Constructive Solid Geometry
B-REP = Boundary Representation

Bezeichnung	Eigenschaften
Splines - interpolierend - natürlich - periodisch - ausgleichend	+ durchlaufen Stützstellen + mit allen standardisierten Datenschnittstellen übertragbar + relativ einfache mathematische Basis - glatte Kurven nur bis zum Grad 5 - neuer Stützpunkt führt zu komplett neuer Kurve - Regelgeometrien nicht abbildbar
Bezier-Polynome	+ glatte Kurven (geringe Schwingungsneigung) + am Bildschirm interaktiv handhabbar - von VDAFS nicht abbildbar (Spline-Approximation) - durchläuft nur Anfangs- und Endpunkt - Tangenten nur im ersten und letzten Punkt manipulierbar - Regelgeometrien nicht abbildbar - zusätzliche Stützpunkte nur durch Splitten der bestehenden Kurve oder Graderhöhung
B(asis)-Spline NURBS	+ weniger Stützstellen erforderlich als bei normalen Splines oder Bezier-Polynomen + lokal modifizierbar ohne Änderung der gesamten Kurve + neue Stützstellen in die Kurve einfügbar + Gewichtung von Punkten möglich + Bezier-Polynome sind eine Untermenge + auch Regelgeometrien abbildbar - Erfahrung erforderlich / Handhabung schwierig - von VDAFS nicht abbildbar (Spline-Approximation) + auch gerade Teilstücke und Ecken (Unstetigkeiten) abbildbar (nur NURBS)

Legende: + : Vorteil, - : Nachteil
VDAFS : Verband der Automobilindustrie - Flächenschnittstelle
NURBS : Non Uniform Rational Basis Splines

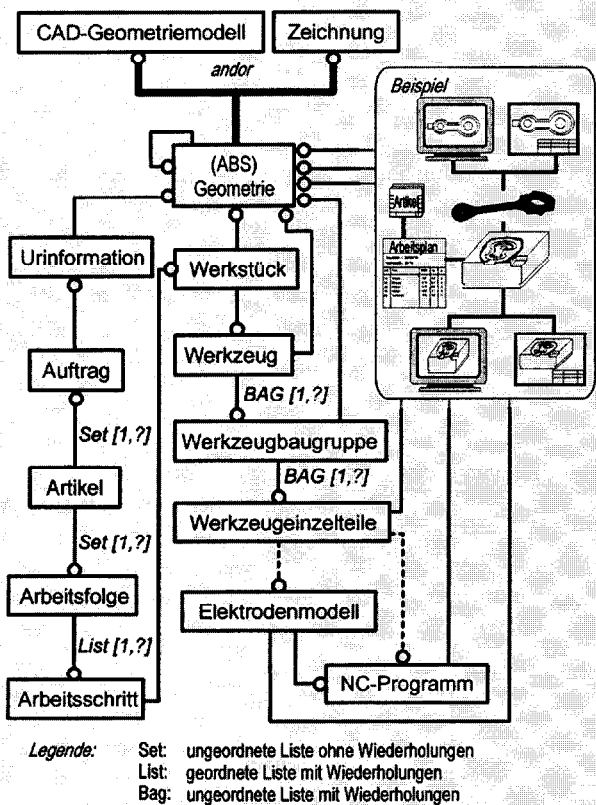
tenbank, einem Engineering Database System (EDB) oder einem PPS-System, integrieren.

Bild 1 Rechnerinterne Darstellungen von CAD-Systemen.

Qualitätssicherung für CAD-Modelle

In der Schmiedeindustrie ist ein hoher Standard in der Qualitätssicherung für 3D-CAD-Modelle erforderlich. Bei der derzeit üblichen Vor-

Bild 2 Mathematische Beschreibungsformen von Kurven- und Flächendarstellungen.



Verfahren	maximaler Fehler [µm]	Dauer [h]	Kosten [DM]	Dauer [h] bei Fehler zusätzlich	Kosten [DM]
Modell fräsen und vermessen	0,051	6	755	-	-
Elektrode fräsen und vermessen	0,061	4*	480*	7	860
Gesenk fräsen und vermessen	0,201	4*	480*	7	1110
Zeichnung generieren	0,010	4	473	-	-

* Dauer bzw. Kosten nur für das Vermessen, da Fertigung der Werkzeuge ohnehin erfolgt

Verfahren	100% Wahrscheinlichkeit der Maßfehler [µm]	100% Wahrscheinlichkeit der Lagefehler [µm]	100% Wahrscheinlichkeit der Formfehler [µm]
Modell fräsen und vermessen	0,051	0,051	0,100
Elektrode fräsen und vermessen	0,061	0,061	0,200
Gesenk fräsen und vermessen	0,201	0,201	0,200
Zeichnung generieren	0,010	0,500	1,000

Bild 3 Bauteilstruktur für die Schmiedeindustrie.

Bild 4 Vergleich von Verfahren zur Qualitätssicherung von 3D-CAD-Modellen am Beispiel eines Pleuels.

gehensweise wird ausgehend von einer vorliegenden Zeichnung oder Skizze des Fertigteils das 3D-CAD-Modell generiert. Auf der Basis dieses CAD-Modells werden sämtliche Werkzeuge gefertigt. Dabei besteht die Gefahr, daß ein Fehler bei der CAD-Generierung aus der Urinformation des Auftraggebers bis zur ersten Fertigung der Schmiedeteile nicht erkannt wird. Ursache hierfür ist, daß Maßnahmen zur Qualitätssicherung auf der Basis des 3D-CAD-Mo-

dells und nicht ausgehend von der Urinformation durchgeführt werden. Die hohen Folgekosten eines solchen Fehlers erforderten die Entwicklung geeigneterer Maßnahmen zur Qualitätssicherung für 3D-CAD-Modelle. Hierzu muß frühzeitig mit möglichst geringem Aufwand und so genau wie notwendig sichergestellt werden, daß das 3D-CAD-Modell keine Fehler gegenüber der Urinformation enthält.

Ausgehend von einer Analyse der Prozeßkette wurden zunächst die möglichen Fehler und deren Ursachen bei der Generierung der 3D-CAD-Modelle erfaßt. Bei der anschließenden Analyse von Methoden und Vorgehensweisen zur Sicherung der Konsistenz zwischen den Urinformationen und den CAD-Modellen zeigte sich, daß das Verfahren „Modell fräsen und vermessen“ vor allem wegen der hohen Wahrscheinlichkeit der Fehlerentdeckung und der hohen maximalen Genauigkeit das sicherste Verfahren ist, **Bild 4**. Die zusätzlich anfallenden Kosten für die Modellerstellung können vor dem Hintergrund vertreten werden, daß nach der Qualitätssicherung ein physisches Modell vorliegt, das man dem Kunden zur Verfügung stellen kann. Wenn von vornherein klar ist, daß Fehler äußerst selten auftreten, sind die Verfahren „Gesenk oder Elektrode fräsen und vermessen“ vorzuziehen, da ihre Anwendung lediglich mit dem zusätzlichen Vermessungsaufwand verbunden ist. Treten jedoch Fehler auf, so werden diese nicht immer entdeckt, und es entstehen vergleichsweise hohe Kosten. Das Verfahren „Zeichnung generieren“ zeichnet sich hingegen durch den niedrigen Zeitaufwand und die hohe Genauigkeit aus. Diese Aussage gilt allerdings nicht für eine normgerechte Zeichnung, in der das Werkstück komplett vermaßt ist. Bei Bemaßungen von Sichtkanten ist eine Überprüfung zeitaufwendig und unsicher. Falls für den Kunden auf jeden Fall eine Zeichnung angefertigt werden muß, bietet sich diese Methode an.

Schlußbetrachtung | In Zusammenarbeit mit dem IDS wurden vom WZL spezielle Probleme bei der rechnergestützten Konstruktion in der Schmiedeindustrie gelöst. Die erzielten Ergebnisse machen es den im IDS zusammengeschlossenen Firmen möglich, den eigenen CAD/CAM-Einsatz hinsichtlich noch nicht genutzter Potentiale zu überprüfen und ihre CAD/CAM-Prozessketten anwendungsspezifisch zu optimieren. Hiermit konnte ein Beitrag zur Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit deutscher Schmiedunternehmen geleistet werden.