

Herbert SCHULZ; Klaus SCHÜTZER

Institut für Produktionstechnik und Spanende Werkzeugmaschinen  
Technische Hochschule Darmstadt, Deutschland

## **INTEGRIERTE FERTIGUNGSGERECHTE KONSTRUKTION UND AUTOMATISCHE ARBEITSPLAN-GENERIERUNG MIT FERTIGUNGSELEMENTEN**

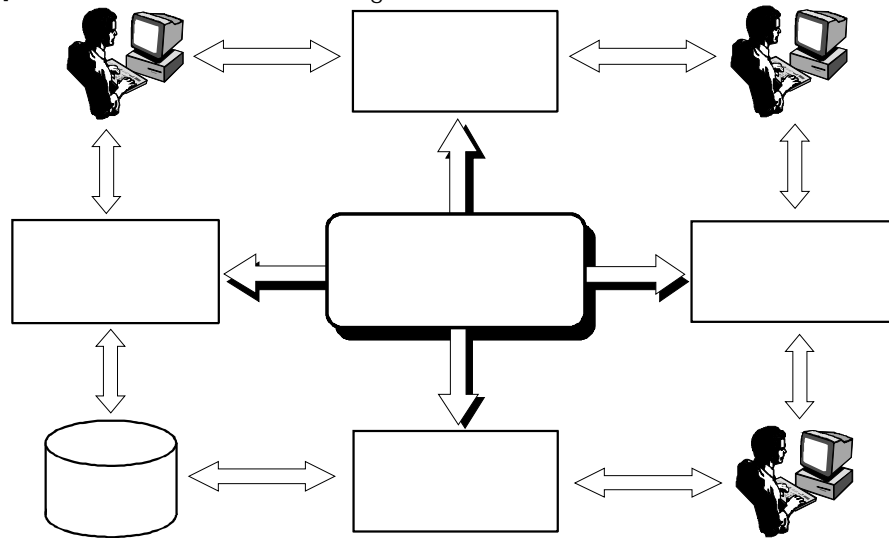
**Zusammenfassung:** *Das Ziel ist, die Funktionalitäten eines existierenden CAD/CAM-Systems durch eine neue Konstruktionssemantik, die auf Fertigungselementen basiert, zu erweitern und die Integration mit der Arbeitsplanung (CAPP) und NC-Programmierung (CAM) zu realisieren. Die Implementierung des Systems FINDES bietet dem Benutzer die Möglichkeit mit dem CAD-System auf einer Fertigungselemente-basierten Ebene zu interagieren. Nach der Instanziierung eines jeden Fertigungselements prüft das System die Gültigkeit seiner Parameter, seiner Lage, seiner Beziehung zu den existierenden Fertigungselementen und seiner Fertigbarkeit. Der Benutzer wird auch bei der Eingabe von technologischen Attributen, wie Toleranz, Wärmebehandlung usw. unterstützt. Die Integration mit dem CAPP-System wird durch ein Fertigungselement-basiertes Werkstück-Modell realisiert. Danach bietet FINDES die Möglichkeit, einen Arbeitsplan einzulesen und mit seinem eigenen Fertigungswissen das NC-Programm automatisch zu generieren.*

### **Einführung**

Die Entwicklung des CAD-Systems Ende der 60er Jahre und sein Einsatz zu Beginn der 70er Jahre in der Nord-Amerikanischen Automobil-Industrie [1] mit den zusätzlichen Entwicklungen stellte eine deutliche Erhöhung der Produktivität der Konstruktionsabteilungen dar. Dieses Produktivitätswachstum ist mit den weiteren und schnelleren Entwicklungen im Software- und Hardware-Bereich deutlicher geworden.

Trotz dieser Produktivitätssteigerung in den Konstruktionsabteilungen durch den Einsatz von CAD-Systemen ist es nicht möglich zu sagen, daß die Gestaltungsmethodik sich ebenso entwickelte. Die CAD-Entwicklung hat sich stark auf die Optimierung der geometrisch primitiven Funktionen konzentriert [2] und keine Unterstützung für die Entwicklung der Konstruktionsmethode angeboten. Die Gründe können gefunden werden, wenn man den gesamten Konstruktionsprozeß dem CAD-System gegenüber stellt. CAD kann grundsätzlich die Produktbeschreibung durch die interaktive Gestaltmodellierung und Routinetätigkeiten, wie das Erstellen von Stücklisten, automatische Bemaßung, usw., unterstützen [3]. Solche Funktionen reichen nicht für die Entwicklung der Gestaltungsmethodik aus. Um dieses Ziel zu erreichen, muß das CAD-System den Konstrukteur mit einer neuen Semantik unterstützen. Diese Semantik soll sich auf das Konzept der Formelemente-basierten Konstruktion orientieren. Nur eine solche Semantik kann den Konstrukteur bei der gesamten Produktbeschreibung (geometrisch und technologisch) und die Konstruktion mit der Nutzung von hochwertiger Geometrie unterstützen. Einige kommerzielle CAD-Systeme nennen Formelemente als eines der vorhandenen

Konstruktionswerkzeuge, aber berücksichtigt man die ausschließlich geometrischen Kennzeichen dieser Formelemente [4], so sollten sie besser als makro-geometrische Elemente klassifiziert werden.



*Bild 1: Übertragung der Informationen in CAD/CAPP/CAM-Systemen*

Solche Probleme sind nicht auf den Konstruktionsbereich beschränkt. Ähnliches findet sich auch in der Arbeitsvorbereitung und Fertigung. Die verfügbaren Systeme, wie CAPP für eine automatische Arbeitsplan-Generierung und CAM für den NC-Prozeß, bieten nur lokale Lösungen und der Anwender muß selbst die Interpretation und Übertragung der Daten zwischen den verschiedenen Systemen durchführen (Bild 1).

Eine globale Lösung für die Integration von CAD/CAPP/CAM-Systemen kann nur durch eine gemeinsame Werkstück-Darstellung gefunden werden, welche sich durch eine Formelement-basierte Darstellung des Werkstückes realisieren läßt (Bild 1). In diesem Fall soll das Konzept von Fertigungselementen benutzt werden, da die Möglichkeit besteht, nicht nur die genannte Integration zu unterstützen sondern auch eine fertigungsgerechte Konstruktion anzubieten.

Diese formelement-basierte Darstellung kann man grundsätzlich durch drei verschiedene Methoden erhalten [5,6,7,8]: manuelle Formelemente-Identifizierung, automatische Formelemente-Erkennung und Konstruktion mit Formelementen. Jede dieser drei Möglichkeiten bietet Vor- und Nachteile [5,6,9,10], die für verschiedene Anwendungen bedeutsam sein können, aber nur die letzte Methode bietet die Möglichkeit, den Konstruktionsprozeß sinnvoll zu unterstützen.

Innerhalb des Esprit Projekt #6090 - FIRES (Feature-based Integrated Rapid Engineering System), wird die Methode der Konstruktion mit Formelementen verwendet. Das Ziel ist, die Funktionalitäten eines existierenden CAD/CAM-Systems durch eine neue Konstruktionssemantik, die auf Fertigungselementen basiert zu erweitern, und die Integration mit der Arbeitsplanung und Analysis zu realisieren.

Am Institut für Produktionstechnik und Spanende Werkzeugmaschinen der Technischen Hochschule Darmstadt werden Prototypen im Bereich der Konstruktion (FINDES - Feature-based INtegrated DEsign System) und im Bereich der Arbeitsplanung (FINPLAN - Feature INtegrated PLANner) [11] entwickelt.

## **FINDES Architektur-Überblick**

FINDES wurde zur Unterstützung der Konstruktion von prismatischen Werkstücken entwickelt und implementiert. Das System basiert auf den Konzepten der Konstruktion mit der Formelemente-Methode. Während des Konstruktionsprozesses interagiert der Konstrukteur mit einer Formelement-basierten Semantik. Zieht man in Betracht, daß FINDES nicht nur den Konstruktionsprozess unterstützen soll, sondern auch die Integration mit der Arbeitsplanung (CAPP) und NC-Prozeß (CAM) realisiert werden soll, ist die Nutzung der Fertigungselemente sinnvoller und effizienter für solche Implementationen.

Bild 2 zeigt einen Überblick der FINDES Architektur. Während des Konstruktionsprozesses interagiert der Konstrukteur mit einer Fertigungselement-basierten Benutzeroberfläche, die mit dem Fertigungselement-Modellierer und dem Geometrien-Modellierer in Verbindung steht. Der Fertigungselemente-Modellierer beinhaltet zwei Hauptmodule; ein **Konstruktionsmodul** und ein **Fertigungsmodul**.

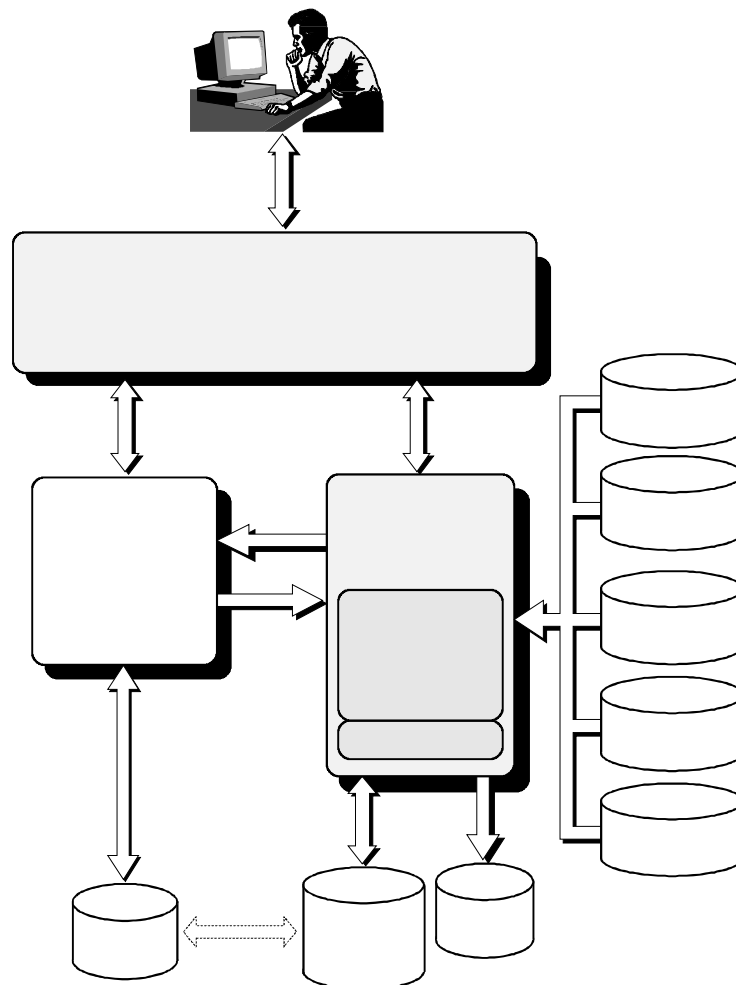


Bild 2: Architektur-Überblick von FINDES

Das **Konstruktionsmodul** beinhaltet alle notwendigen Funktionen für die geometrische und technologische Beschreibung des Werkstückes. Solche Funktionen unterstützen die Generierung, Gültigkeits-Überprüfung und Manipulierung der Fertigungselemente, die automatische Erkennung der Fertigungselement-Interaktionen, die Eingabe der technologischen Attribute und verwaltet zusätzlich den Konstruktionsprozeß. Für die Durchführung dieser Aktivitäten nutzt das System die existierende Wissensdatenbank, welche die Beschreibungsbibliothek für Fertigungselemente, Produktionsmittel, Fertigungselement-basiertes Toleranzwissen und Fertigungselement-

basiertes Bearbeitungswissen beinhaltet. Die notwendigen geometrischen Modellierungsfunktionen und die graphische Benutzeroberfläche werden am CAD/CAM-System durchgeführt.

Die Ergebnisse des Konstruktionsprozesses sind das Fertigungselement-basierte Werkstück-Modell und das geometrische Werkstück-Modell. Das erste Modell enthält die Werkstückverwaltungsdaten, die Beschreibung der Fertigungselemente, die existierenden Fertigungselement-Interaktionen und die definierten technologischen Attribute. Das geometrische Werkstück-Modell enthält die geometrische Beschreibung des Werkstückes, die durch den geometrischen Modellierer generiert wurde. Beide Modelle werden in FINDES verwaltet, was eine implizite Verbindung zwischen den Modellen bedeutet. Das Fertigungselement-basierte Werkstück-Modell bildet auch die Haupteingabe für das Arbeitsplan-System, FINPLAN [11].

Das zweite Modul von FINDES, das **Fertigungsmodul**, kann den NC-Prozeß für ein Werkstück automatisch generieren. Für diese Aufgabe braucht man zusätzlich den Werkstück-Arbeitsplan, welcher von FINPLAN hergestellt wurde. Das *Fertigungsmodul* benutzt auch das schon genannte Fertigungselement-basierte Bearbeitungswissen, welches das notwendige Wissen für die NC-Bearbeitung jedes Fertigungselementes darstellt.

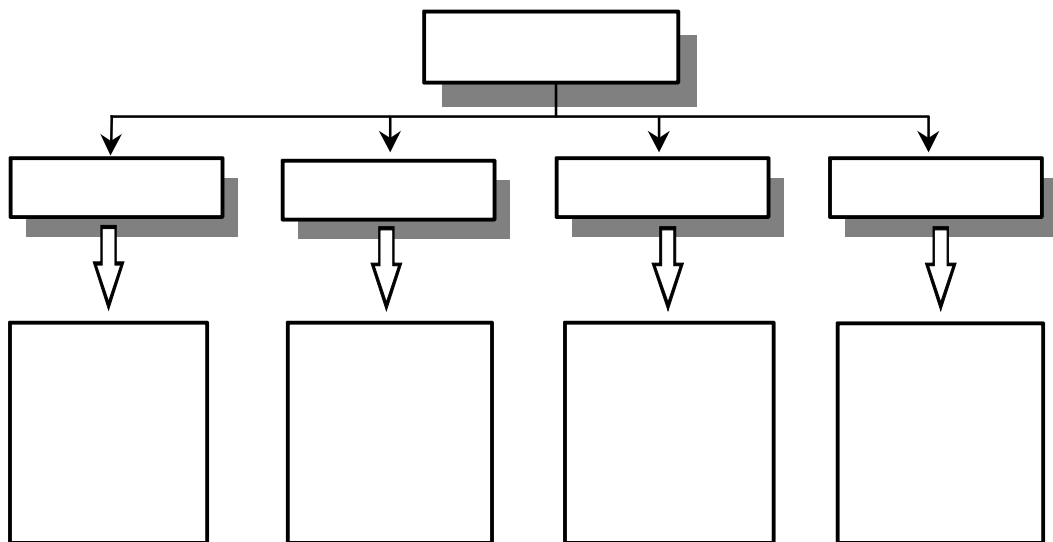


Bild 3: FIERES-feature Klassifizierung

### Fertigungselement-basiertes Konstruktionssystem

Wie schon erwähnt wurde, beinhaltet FINDES zwei Module. Das Konstruktionsmodul wird im Folgendem näher vorgestellt. Für die Unterstützung des Konstruktionsprozesses nutzt das System die verfügbaren Fertigungselemente, die in der Beschreibungsbibliothek für Fertigungselemente definiert sind. Bild 3 zeigt die FIERES-features Klassifizierung und die Hauptmerkmale jeder Formelementgruppe [12]. FINDES orientiert sich an Fertigungselementen (manufacturing feature) und kann basic feature, compound feature und pattern feature betrachten. Beispiele für basic feature sind: Taschen, Nuten, Bohrungen, Gewinde, usw. Das pattern feature betrachtet eine Gruppe von basic features gleichen Typs in einer vordefinierten Darstellung, wie Kreise, Linien oder Matrizen. Die aktuelle FINDES-Version kann auch compound feature unterstützen, hat aber derzeit keine in der Beschreibungsbibliothek. Die Gründe dafür sind, daß erstens das System Fertigungselement-Interaktionen automatisch erkennen kann und zweitens die Implementierung solcher Fertigungselemente eine künstliche Zunahme der Be-

schreibungsbibliothek verursacht, mit der konsequenten Verschlechterung der Benutzeroberfläche. Trotzdem bleibt in FIRES die Möglichkeit compound feature, wie z.B. Führungsloch oder abgesetzte Bohrung, zu implementieren. FINDES betrachtet auch transition feature, wie Fasen oder Rundungen, und design features, die auf 2 ½ D Elementen basieren.

Nach der Initialisierung der Konstruktion eines neuen Werkstückes oder die Reinitialisierung eines existierenden Werkstückes durch die Verwaltungsfunktionen kann der Konstrukteur ein beliebiges Fertigungselement generieren. Dieses Element gehört solange nicht zum Bauteil bis die Fertigungselement-Gültigkeitsüberprüfung durchgeführt wurde [12].

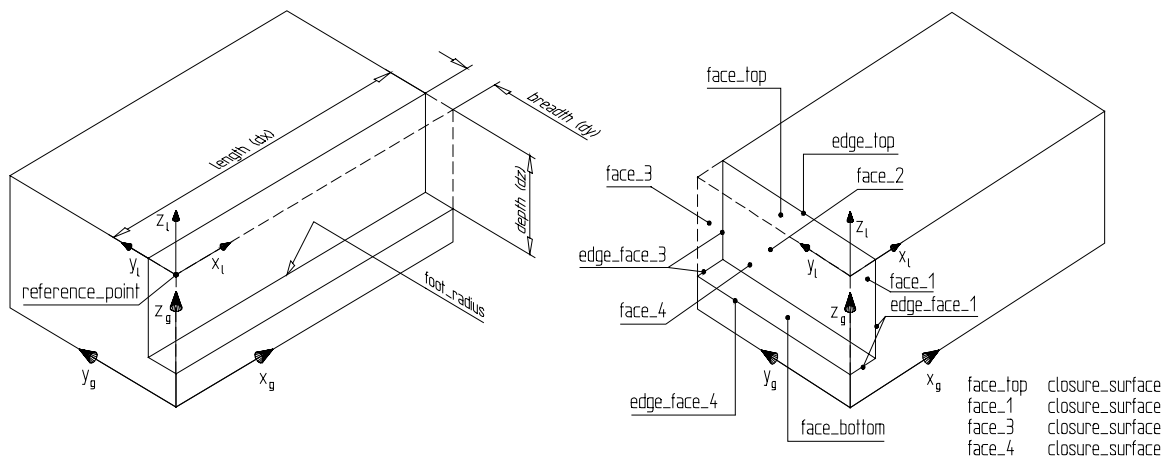


Bild 4: Stufe mit geometrischer Parameter- und Flächenbeschreibung

Die Fertigungselement-Beschreibungsbibliothek beinhaltet die detaillierte Beschreibung jedes Fertigungselements, wie Parameter, virtuelle und Material- Flächen, usw. (Bild 4). Bevor ein generiertes Element zum Werkstück gehören kann, muß seine Beschreibung, seine Fertigbarkeit und die Interaktionen mit anderen Fertigungselementen überprüft werden. Während dieser Aufgabe werden folgende Gültigkeitsüberprüfung durchgeführt:

- **Parameter-Gültigkeitsprüfung:** die vom Benutzer definierten Parameter werden überprüft, ob sie ein gültiges Fertigungselement bilden können, z.B., würde das System die Eingabeparameter für die Instanzierung einer viereckigen Tasche nicht akzeptieren, bei denen der Eckenradius größer als Hälfte der Länge oder Hälfte der Breite ist. Es wird auch überprüft, ob Werkzeug zu Verfügung stehen, mit denen Fertigungselement bearbeiten kann.
- **Fertigungselementflächen-Gültigkeitsprüfung:** FINDES prüft nach, ob die Flächen des instanziierten Fertigungselementes ihrer entsprechenden Beschreibung in der Bibliothek entsprechen. Nur wenn alle virtuellen und Material-Flächenbeschreibung gültig sind, ist diese Überprüfung wirksam.
- **Fertigbarkeitsprüfung:** dieser dritte Maßstab stellt fest, ob das Fertigungselement mit den verfügbaren Produktionsmitteln bearbeitet werden kann.

Diese drei Überprüfungen sind entscheidend für die Fertigungselement-Gültigkeitsprüfung. Erst wenn alle positiv ausfallen, wird das Fertigungselement als gültig bezeichnet und in das Werkstück-Modell eingebunden. Für die gültigen Fertigungselemente wird zusätzlich die folgende Überprüfung durchgeführt:

- **Überprüfung der Fertigungselement-Interaktionen:** bei diesem Maßstab werden alle expliziten Fertigungselementinteraktionen identifiziert. Solche Interaktionen sind, z.B., Vater-Sohn-Beziehungen, die sowohl für die Konsistenz des Werkstückmodells als auch für den Arbeitsplaner notwendig sind.

FINDES kann die expliziten und auch teilweise die impliziten Interaktionen zwischen Fertigungselementen automatisch identifizieren und verwalten. Für solche, die noch nicht automatisch identifiziert werden können, bietet

das System die notwendige Unterstützung für die interaktive Identifizierung. Danach werden beide gemeinsam verwaltet.

Für die Eingabe der technologischen Attribute interagiert FINDES gleichzeitig mit den Wissensdatenbanken und dem Konstrukteur, damit eine optimale Attributdefinition realisiert werden kann. Solche Wissensdatenbanken beinhalten Toleranz-, Wärmebehandlungswissen, usw., basierend auf Fertigungselementen. Dort findet FINDES die notwendigen Auskünfte, um den Konstrukteur bei den technologischen Attributeingaben zu unterstützen und um die Gültigkeit dieser Eingabe zu überprüfen. Die folgenden technologischen Eingaben werden durch das System unterstützt: Allgemeintoleranzen, Maßtoleranz, Formtoleranzen, Lagetoleranzen und Rauigkeitstoleranzen.

Das fertigungselementbasierte Werkstück-Modell ist in FINDES und auch für die Integration mit dem CAPP-System, FINPLAN [11], das Kernmodul. Dieses Modell beinhaltet alle Werkstück-Informationen, mit Ausnahme des geometrischen Modells, in Form eines hierarchischen Modells. Im ersten Informationsblock stecken alle Werkstück-Verwaltungsdaten und die Rohmaterialbeschreibung. Der zweite Block beinhaltet die fertigungselementbasierten Auskünfte; hier sind alle Fertigungselemente mit ihren Parametern, Flächen und technologischen Attributen beschrieben. Zusätzlich sind auch alle Interaktionen zwischen den Fertigungselementen eingetragen. Solche Interaktionen und die technologischen Attribute bilden die Randbedingungen für die Arbeitsplan-Generierung.

### **Automatische NC-Programm-Generierung**

Das zweite Modul von FINDES hat die Aufgabe den NC-Prozeß automatisch zu generieren. Ein Werkstück, das schon mit FINPLAN [11] bearbeitet wurde, hat einen gültigen Arbeitsplan. FINDES kann dieses Werkstück sowie dessen Arbeitsplan wieder einlesen.

Zuerst wird der Arbeitsplan bei FINDES eingelesen und interpretiert, damit alle Aufspannungen und Bearbeitungsoperationen identifiziert werden können. Aus den Ergebnissen wird der gesamte NC-Prozeß strukturiert. Gleichzeitig werden auch die ausgewählten Werkzeugmaschinen, Werkzeuge und Vorrichtungen erkannt und das System nutzt den gemeinsamen Produktionsmittel-Katalog für die notwendigen Daten. Im Anschluß wird der NC-Prozeß bearbeitet, um das NC-Programm für jede Aufspannung zu generieren. Hier wird die schon genannte Datenbank für Bearbeitungswissen über Fertigungselemente befragt. Diese Datenbank unterstützt mit den notwendigen Informationen für die Generierung des Werkzeugweges jede Bearbeitungsoperation des Fertigungselementes.

Anschließend werden die NC-Programme für jede Aufspannung berechnet und der Benutzer hat die Möglichkeit sie zu simulieren, zu modifizieren und dann an die Werkstatt zu übergeben.

### **Praxisbeispiel**

Bild 5 zeigt ein Teil eines mit FINDES gestalteten Spritzgußwerkzeuges der Firma Mares S.A.- Construcciones Mecanicas, Barcelona, einem Mitglied des FIRES-Projekts. Für die Konstruktion dieses Werkstückes wurde als Rohmaterial ein Blechteil (1750X780X90 mm) verwendet. Die Gültigkeit und Fertigbarkeit aller generierten Fertigungselemente in Beziehung zu den Ressourcen des Produktionsmittel-Kataloges wurde schon während der

Konstruktion geprüft. Für die Konstruktion dieses Werkstückes wurden Bohr-Bilder, Gewindeloch-Bilder, Bezugsfläche, Stufen, usw. genutzt. Wie schon erwähnt wurde, sind Fertigungselemente wie gestuftes Loch nicht erforderlich, da FINDES alle expliziten Interaktionen zwischen den Fertigungselementen der Werkstücke automatisch erkennen kann. Eine dieser Interaktionen, zwischen der oberen Fläche des Führungslochs (HOLE\_\*\*\_10) und der Bezugsfläche (SLAB\_\*\*\_11, nicht an Bild 5 dargestellt), ist in Bild 6 dokumentiert.

Bild 6 zeigt die ASCII-Ausgabe für das Fertigungselement HOLE\_\*\*\_10. In diesen Loch wird eine Buchse für den Abzieher montiert. Dafür wurden notwendige Maßtoleranzen und Oberflächengüte mit Unterstützung von FINDES eingegeben.

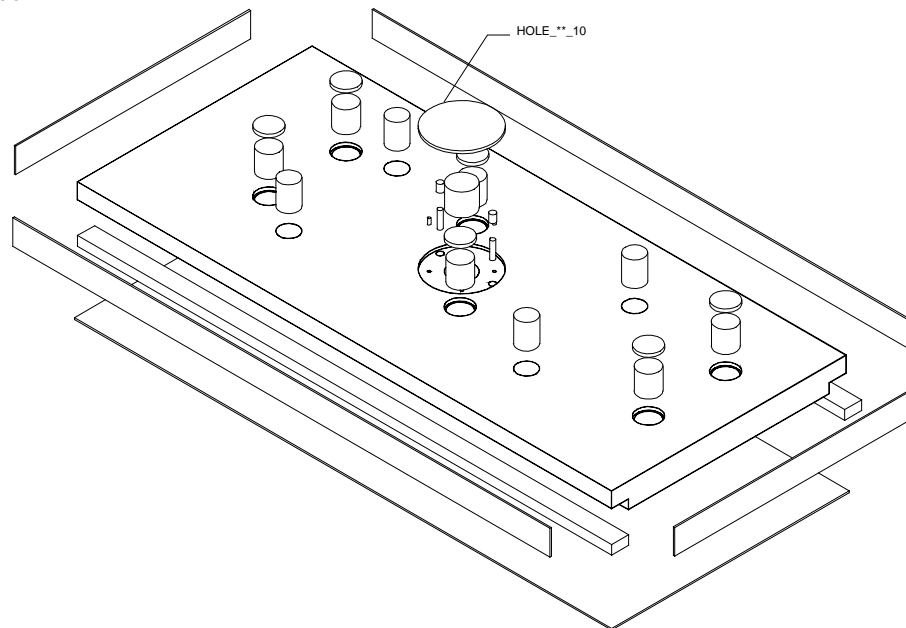


Bild 5: Teil eines Spritzgußwerkzeuges gestaltet mit FINDES (Mares S.A. - Construcciones Mecanicas)

<b>FEATURE_IDENTIFICATION</b>	
name_of_feature	HOLE
code_of_feature	HOLE_**_10
<b>FEATURE_GEOMETRY</b>	
type_of_feature	BLIND
reference_point_glob	870.000 385.000 5.000 GLOBAL
reference_point_face	870.000 385.000 -5.000 OZ-
diameter_hole	200.000
depth_hole	8.000
foot_radius	1.000
<b>SURFACE_AND_EDGE_INFORMATION</b>	
face_top	face_bottom SLAB_**_11
face_botton	MATERIAL_SURFACE
face_cylinder	MATERIAL_SURFACE
edge_top	
<b>QUALITY_SPECIFICATION</b>	
quality_type	INTERNAL_DIMENSIONAL_TOLERANCE
reference_dimension	diameter_hole
nominal_dimension	200.000
upper_value	0.046
lower_value	0.000
<b>QUALITY_SPECIFICATION</b>	
quality_type	SURFACE_TOLERANCE
type_of_surface_tolerance	Ra
list_of_surfaces	face_cylinder
tolerance_value	6.300

Bild 6: ASCII-Ausgabe des Fertigungselementes HOLE\_\*\*\_10 mit den geometrischen und technologischen Parametern.

## Ausblick und Entwicklungen

FINDES wurde implementiert, indem die "Design by Feature"-Methode benutzt wurde. Seine Formelement-Bibliothek basiert auf manufacturing features (Herstellungs-Features). Diese Kombination und alle zusätzlichen Gestaltungen (design) und Herstellungshilfen (manufacturing), die von dem System zur Verfügung gestellt werden, stellten sich als Werkzeuge heraus, die die Fähigkeit hatten, die Gestaltungsmethode zu verbessern und als entscheidender Schritt in Richtung Integration von CAD, CAPP und CAM-Systemen zu fungieren.

Der Konstrukteur muß sich nun nicht mehr mit Geometrien der unteren Ebene abgeben. FINDES unterstützt die Gestaltung mit einer neuen Semantik, die auf den Elementen basiert, die benutzt werden, um ein wirkliches Teil (real part) zu produzieren, welches zu der hohen Geometrieebene Bezug hat. Modifikationen der Gestalt einzelner Formelemente werden durch FINDES ebenfalls unterstützt, was zu einer beträchtlichen Reduktion der Gestaltungszeit führt. Auch die Definition der technologischen Attribute wird durch das System unterstützt und das resultierende Teilmodell welches auf der Beschreibung des manufacturing features basiert, kann ohne zusätzliche Aktionen in ein CAPP-System transferiert werden.

Es wurde gezeigt, daß das Herstellungsmodul (manufacturing module) von FINDES in der Lage ist, ein schon gestaltetes Teil und seinen Prozeßplan wiederherzustellen und automatisch einen NC-Prozess zu generieren. Es wurden auch Tests durchgeführt, in denen man das gleiche Teil mit FINDES gestaltete und die Standard-Werkzeuge eines CAD-Systems benutzt hat, was in einer signifikanten Zeitreduktion resultierte. Wenn man die Integration von Konstruktion/Planung/Herstellung betrachtet, ist die gezeigte Integration noch signifikanter. Dies ermutigt uns, das System FINDES weiter zu entwickeln.

## Literatur

- [1] Chasen, S.H.: Historical highlights of interactive computer graphics. Mechanical Engineering. 103 (1981) 11, S. 32-41
- [2] Krause, F.-L.; Bienert, M.; Vosgerau, F.; Yamanoglu, N.: Feature oriented system design for geometric modeling. In: Straßer, W.; Seidel, H.-P. (Hrsg.): Theory and Practice of Geometric Modeling. Springer-Verlag, Berlin 1989, S. 483-498
- [3] Grabowski, H.; Langlotz, G.; Rude, S.: 25 Jahre CAD in Deutschland: Standortbestimmung und notwendige Entwicklungen. VDI Berichte 993 - Datenverarbeitung in der Konstruktion '92. VDI Verlag, München, 1992, S. 1-29
- [4] Schunke, A.: Ähnlichkeitsuche für die Rechnerunterstützte Konstruktion. Dissertation Universität Hannover 1990
- [5] Shah, J.J.: Assessment of features technology. Computer-Aided Design. 23 (1991) 5, S. 331-343
- [6] Case, K.; Gao, J.: Feature technology: an overview. International Journal of Computer Integrated Manufacturing. 6 (1993) 1-2, S. 2-12
- [7] Pratt, M.J.: Aspects of form feature modelling. In: Hagen, H.; Roller, D. (Hrsg.): Geometric Modeling - Methods and Applications. Springer Verlag 1991, S. 227-250



- [8] Sreevalsan, P.C.; Shah, J.J.: Unification of form feature definition methods. In: Brown, D.C.; Waldron, M.; Yoshikawa, H. (Hrsg.): Intelligent Computer Aided Design. Elsevier Science Publishers, 1992, S. 83-99
- [9] Anderson, D.C.; Chang, T.C.: Geometric reasoning in feature based design and process planning. Computers & Graphics. 14 (1990) 2, S. 225-235
- [10] Schulz, H.; Schützer, K.: Design by features - Feature based design of prismatic parts. In: Proceedings of Workshop on Flexibility through Integrated Design, Process Planning and Scheduling. ESPRIT Project #2590 - IPDES. Senlis, 1992
- [11] Schulz, H.; Hintz, A.: FINPLAN - A problem solving shell specialized in process planning. Production Engineering, I (1993) 1, S. 211-214
- [12] Schulz, H.; Schützer, K.: Feature database editor - Feature validity constraints (Project Report). ESPRIT Project #6090 - FIRES, Darmstadt 1993