

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Innovative Produktionstechnik / hrsg. von Frank-Lothar Krause und
Eckart Uhlmann. - München ; Wien : Hanser, 1998
ISBN 3-446-21062-8

T 10944

R

UB Dortmund

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 1998 Carl Hanser Verlag München Wien
<http://www.hanser.de>

Druck und Bindung: Kösel, Kempten
Umschlaggestaltung: MCP · Susanne Kraus GbR, Holzkirchen
Printed in Germany

Walter Eversheim, Jochen Deuse

Teilfamilienbildung auf der Grundlage von Produktmodellen

Produzierende Unternehmen müssen sich auf wettbewerbsorientierten Märkten behaupten, die durch kurze Produktlebenszyklen, variantenreiche Erzeugnisse und eine starke Preiskonkurrenz zwischen den Wettbewerbern gekennzeichnet sind. Daraus ergeben sich gesteigerte Anforderungen an die Gestaltung der kundenanonymen Produktentwicklung bzw. der kundenspezifischen Auftragsabwicklung. Insbesondere indirekte, planende Bereiche, wie Konstruktion und Arbeitsplanung, bieten ein großes Potential zur Senkung von Herstellkosten und zur Verkürzung von Entwicklungszeiten. Die Wiederverwendung vorhandener Konstruktions- und Fertigungsunterlagen stellt einen Schlüssel zur Erschließung dieses Potentials dar.

Entwicklung der Gruppentechnologie

In der Rationalisierung durch Wiederverwendung liegt die Motivation, die in den 60er Jahren zur Entwicklung gruppentechnologischer Anwendungen und Verfahren geführt hat. Der Begriff „Gruppentechnologie“ bezeichnet das Erkennen ähnlicher Objekte oder Prozesse sowie deren Gruppierung anhand der Ähnlichkeit ihrer Eigenschaften [1]. Als Pioniere der Gruppentechnologie gelten *Opitz*, dessen werkstückbeschreibendes Klassifizierungssystem noch heute die Grundlage betrieblicher Nummernsysteme bildet [2], sowie *Mitrofanow*, der für seine Arbeiten auf diesem Gebiet mit dem Lenin-Preis ausgezeichnet wurde [3]. Seit ihren wissenschaftlich geprägten Anfängen hat die Gruppentechnologie bis in die heutige Zeit hinein zunehmend an Bedeutung für die industrielle Anwendung gewonnen.

Der Begriff „Teilfamilienbildung“ bezeichnet das Finden ähnlicher Werkstücke bzw. Fertigungsabläufe auf der Grundlage funktions-, gestalt- und fertigungsspezifischer Merkmale. Zur näheren Kennzeichnung der Strukturierungsaufgabe werden häufig die Bezeichnungen Gestalt- oder Fertigungsfamilie

gebraucht (Bild 1). Gestaltfamilien werden ausschließlich anhand der Maß- und Formähnlichkeit ihrer Werkstücke charakterisiert, ihr Anwendungsfeld beschränkt sich auf die späten Konstruktionsphasen. Bei einer Fertigungsfamilie handelt es sich um eine Gruppe von Werkstücken, die bezüglich ihrer fertigungstechnischen Anforderungen gleich oder ähnlich sind [4]. Der Begriff „Fertigungsablauffamilie“ bezeichnet die zusätzliche Berücksichtigung ähnlicher Arbeitsvorgangfolgen im Rahmen einer Klassifizierung unter fertigungstechnischen Kriterien.



Bild 1 Anwendungsspezifische Differenzierung des Begriffs „Teilefamilie“ [4]

Fertigungs- bzw. Fertigungsablauffamilien sind sowohl im Anwendungskontext der Arbeitsablaufplanung als auch im Anwendungskontext der Arbeitssystemgestaltung von hoher Relevanz. Die Fertigungsstrukturierung nach gruppentechnologischen Prinzipien ist seit jeher Gegenstand intensiver Forschungsarbeiten. Die von *Burbidge* in den 60er Jahren unter der Bezeichnung „Production Flow Analysis“ (PFA) entwickelte Methode der Teileflußanalyse bildete die Grundlage für zahlreiche Strukturierungsverfahren, wie beispielsweise die Partialablaufgruppenbildung oder die Komplettbearbeitungsanalyse [5, 6, 7].

Hohe Bedeutung für produktionstechnische Anwendungen haben die Methoden der multivariaten Statistik erlangt. Bei der Teilefamilienbildung stehen insbesondere die clusteranalytischen Verfahren im Vordergrund, die auch als strukturentdeckende Verfahren bezeichnet werden und deren originären Anwendungsfelder in den Natur- und Sozialwissenschaften liegen. Die Clusteranalyse stellt die für produktionstechnische Anwendungen wohl am häufigsten genutzte Verfahrensgruppe dar, wie durch zahlreiche Veröffentlichungen belegt wird. Wegweisende Untersuchungen zu diesem Themengebiet wurden an den produktionstechnischen Instituten in Berlin, Hannover, Stuttgart und Aachen durchgeführt [8, 9, 10, 11]. Der Einsatz clusteranalytischer Verfahren zur Teile-

familienbildung besitzt auch in jüngerer Zeit eine hohe Aktualität. So kombinieren beispielsweise *Tönshoff* et al. clusteranalytische Verfahren mit Methoden der Expertenbefragung, um auf diesem Wege Fertigungsalternativen im Rahmen von Strukturierungsprojekten besser berücksichtigen zu können [12].

Am Lehrstuhl für Produktionssysteme der Universität Bochum werden gegenwärtig intensive Untersuchungen zur Teilefamilienbildung im Anwendungskontext der Fertigungsstrukturierung angestellt. Zu diesem Zweck kommen Verfahren der klassifikatorischen Datenanalyse zur Anwendung. Dabei handelt es sich sowohl um clusteranalytische Verfahren als auch um Künstliche Neuronale Netze, die Vorteile für die Klassifizierung großer Werkstückspektren bieten. Darüber hinaus werden auch unscharfe Clusteranalyseverfahren in die Untersuchung einbezogen, die eine Bewertung planerischer Alternativen im Rahmen der Fertigungsstrukturierung ermöglichen. Generell haben Methoden der Künstlichen Intelligenz zunehmend Bedeutung für die Lösung produktionstechnischer Problemstellungen, wie beispielsweise die Teilefamilienbildung, erlangt. Neben wissensbasierten Systemen kommen insbesondere Derivate Künstlicher Neuronaler Netze zum Einsatz, wie anhand zahlreicher nationaler und internationaler Veröffentlichungen belegt werden kann [13, 14, 15, 16, 17, 18, 19]).

Handlungsbedarf

Obwohl der Handlungsbedarf, Prozesse nach gruppentechnologischen Prinzipien zu gestalten, gewachsen ist, erschweren gerade die Randbedingungen in der Einzel- und Kleinserienfertigung die industrielle Umsetzung. Die große, schnell wachsende Teilevielfalt führt häufig zu einer mangelnden Transparenz von produkt- bzw. fertigungsprozeßbezogenen Informationen. Das beträchtliche Einsparungspotential, das sich mit einer Erhöhung des Wiederverwendungsgrades erschließen läßt, wird in der Regel nicht ausgeschöpft.

Eine wesentliche Ursache hierfür ist das Fehlen geeigneter Methoden und Hilfsmittel, die zu einer Beherrschung produktbezogener Informationen in Konstruktion und Arbeitsplanung beitragen können. Ein gravierendes Defizit besteht in der Erfassung und Bereitstellung von Produktdaten im Rahmen gruppentechnologischer Anwendungen, wie z. B. der Teilefamilienbildung oder der Ähnlichteilsuche. Sowohl die Codierung von Produktinformationen auf der Basis von Klassifizierungsschlüsseln als auch die Produktbeschreibung auf der Grundlage von Sachmerkmal-Leisten eignen sich unter den bereits geschilderten Randbedingungen nur eingeschränkt.

Vor dem Hintergrund der oben beschriebenen Problemstellung soll in diesem Beitrag die Fertigungsfamilienbildung im Anwendungskontext der Arbeitsab-

laufplanung fokussiert werden. Die Zielsetzung besteht in der Erhöhung des Wiederverwendungsgrades auf der Grundlage von Varianten- und Anpassungsplanung. Gruppentechnologische Fragestellungen, die es in diesem Zusammenhang zu lösen gilt, sind sowohl die Strukturierung des Werkstückspektrums als Basis für die Ableitung von Standardarbeitsplänen als auch die Zuordnung neu konstruierter Werkstücke zu bestehenden Teilefamilien bzw. das Auffinden fertigungstechnisch ähnlicher Werkstücke. Die Erfassung und Bereitstellung der produktdefinierenden Daten nimmt in diesem Anwendungskontext eine Schlüsselstellung ein und bildet den Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten am Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre (WZL), von denen im folgenden berichtet wird.

Methodik zur Fertigungsfamilienbildung

Die am WZL entwickelte Methodik zur Fertigungsfamilienbildung basiert auf der Kombination von Verfahren der Gruppen- und der Produktdatentechnologie [20]. Der Begriff „Produktdatentechnologie“ bezeichnet die Anwendung von Informationstechnologie in allen Bereichen der Produktentwicklung, -herstellung und -nutzung. Die Produktdatentechnologie umfaßt die Entwicklung von Datenmodellen, Schnittstellen und Methoden für alle Funktionen der Produktdatenverarbeitung. Zu diesen Funktionen gehören der Datenaustausch, die Datenspeicherung, die Datenarchivierung und die Produktdatentransformation. Von zentraler Bedeutung für die Entwicklung der Produktdatentechnologie sind die Normungsaktivitäten zur ISO 10303 „Product Data Representation and Exchange“ (STEP) [21, 22].

Den Kern der Methodik bildet die Auswahl der Klassifizierungsmerkmale sowie die automatische Bereitstellung der Merkmalsausprägungen auf Basis eines an die ISO 10303 angelehnten Produktdatenmodells, das mit potentiell klassifizierungsrelevanten Daten für alle Objekte einer Grunddatengesamtheit instanziiert wird (Bild 2). Dabei handelt es sich sowohl um werkstückbezogene Daten auf der Basis von CAD-Modellen als auch um fertigungsprozeßbezogene Daten, wie sie z. B. in CAPP- oder PPS-Systemen vorliegen.

Der eigentliche Klassifizierungsprozeß erfolgt unter Einsatz hierarchisch-agglomerativer und partitionierender clusteranalytischer Verfahren sowie eines unüberwacht-lernenden Derivats Künstlicher Neuronaler Netze, der sogenannten „Selbst-organisierenden Karte“ nach *Kohonen* [23]. Diese Verfahrenskombination ermöglicht sowohl die Gruppierung existierender Werkstücke zu Fertigungsfamilien als auch die Zuordnung neuer Werkstücke zu den gebildeten Gruppen bzw. das Auffinden fertigungstechnisch ähnlicher Werkstücke.

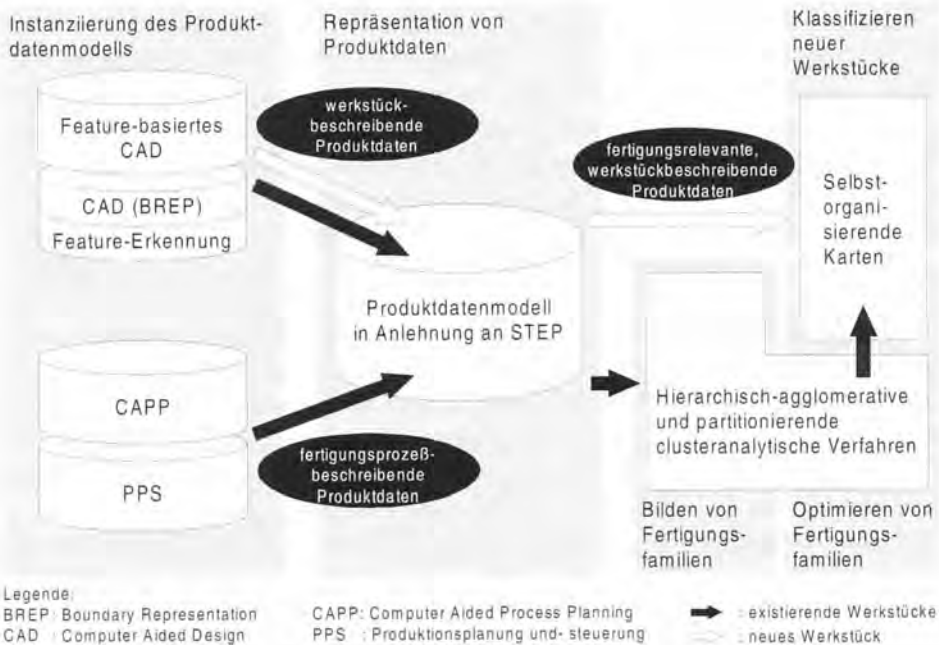


Bild 2 Methodik zur Fertigungsfamilienbildung [20]

Anforderungen an die Klassifizierungsmerkmale

Die Fertigungsfamilienbildung im Anwendungskontext der Arbeitsablaufplanung erfordert die Gruppierung von Werkstücken unter fertigungsrelevanten Kriterien. Die Ähnlichkeit von Werkstücken hinsichtlich ihrer Fertigungsprozesse wird häufig in Form eines Standardarbeitsplans repräsentiert. Vor diesem Hintergrund bietet sich eine Verwendung der als Arbeitspläne vorliegenden Fertigungsanweisungen zur Klassifizierung des Werkstückspektrums an. Mögliche Klassifizierungsmerkmale sind z. B. die Bezeichnung der Bearbeitungsvorgänge, die eingesetzten Betriebsmittel oder allgemein fertigungsspezifische Verschlüsselungsmerkmale. Die Aufbereitung der o. g. Klassifizierungsmerkmale kann beispielsweise in Form einer binären Werkstück-Betriebsmittel-Matrix erfolgen.

Bei der Klassifizierung auf Basis von Fertigungsanweisungen wird grundsätzlich vernachlässigt, daß für die Zuordnung neu konstruierter Werkstücke zu einer Teilefamilie bzw. für die Identifikation eines fertigungstechnisch ähnlichen Werkstücks diese Merkmale noch nicht vorhanden sind. Für eine Zuordnung eignen sich dagegen Angaben, die unter anderem im Kopffeld eines Standardarbeitsplans zu finden sind und dessen Einsatzbereich kennzeichnen, wie

z. B. Gestalt und Werkstoff der „Familienmitglieder“. Diese Angaben werden in der Regel aus einem für die Teilefamilie repräsentativen Komplexteil abgeleitet. Die zu einer Fertigungsfamilie gehörenden Teile müssen demnach über fertigungsrelevante Merkmale charakterisiert werden, die bereits in der Produktgestaltung festgelegt werden. Diese Merkmale dienen unabhängig vom eingesetzten Klassifizierungsverfahren als Klassifizierungskriterien. Daß es sich dabei um keine grundsätzlich neue Erkenntnis handelt, beweisen sowohl der praktische Einsatz des werkstückbeschreibenden Klassifizierungssystems nach *Opitz* als auch die Nutzung von Sachmerkmalen zur Ähnlichkeitsuche [24, 25]. Die Fertigungsfamilienbildung, unabhängig vom gewählten Gruppierungsverfahren, erfordert demnach Klassifizierungskriterien, wie sie beispielsweise im werkstückbeschreibenden Klassifizierungsschlüssel nach *Opitz* herangezogen werden. Dies betrifft insbesondere die Stellen 1 bis 5 des Schlüssels, den sogenannten Formenschlüssel. Ein wichtiges Merkmal des Formenschlüssels ist die Verwendung von Formelementen als Klassifizierungskriterien. Das Vorhandensein eines speziellen Formelement-Typs, z. B. einer Nut oder einer Gewindebohrung, stellt ein wichtiges Klassifizierungsmerkmal aus Fertigungssicht dar. Eine formelement-orientierte Beschreibung der Zerspanaufgabe, d. h. des Zerspanvolumens sowie der technologischen Anforderungen, bietet demzufolge eine gute Ausgangsbasis zur Ableitung von Klassifizierungsmerkmalen. Hieraus läßt sich die Forderung nach einer formelementorientierten Repräsentation werkstückbeschreibender Produktdaten ableiten. Die featurebasierte Repräsentation der Gestalt eines zu bearbeitenden Werkstücks bietet hierfür die Voraussetzung.

Modell zur Repräsentation produktdefinierender Daten

Der Forderung nach einer featurebasierten Repräsentation der Werkstückgestalt entsprechend, enthält das Produktdatenmodell alle erforderlichen Konstrukte zur Abbildung feature-basierter Werkstück- und Arbeitsplaninformationen. Es ist formal in EXPRESS spezifiziert und in Module, sogenannte Schemata, bestehend aus logisch gruppierten Informationseinheiten (Entities), strukturiert [26]. Dabei handelt es sich im wesentlichen um Schemata zur Repräsentation von:

- Planungsdaten,
- featurespezifischen Daten,
- Betriebsmitteldaten und
- Parametern.

Das *Planungs_Schema* bildet das zentrale Modul des Datenmodells. In diesem Schema werden die Abhängigkeiten zwischen gestaltbeschreibenden und ferti-

gungsbeschreibenden Produktdaten sowie die administrativen Daten spezifiziert [14]. Das Entity *Werkstueck* besitzt neben administrativen Attributen, wie z. B. *Name* und *ID*, die Attribute *Material* und *Fertigungsanweisung* (Bild 3).

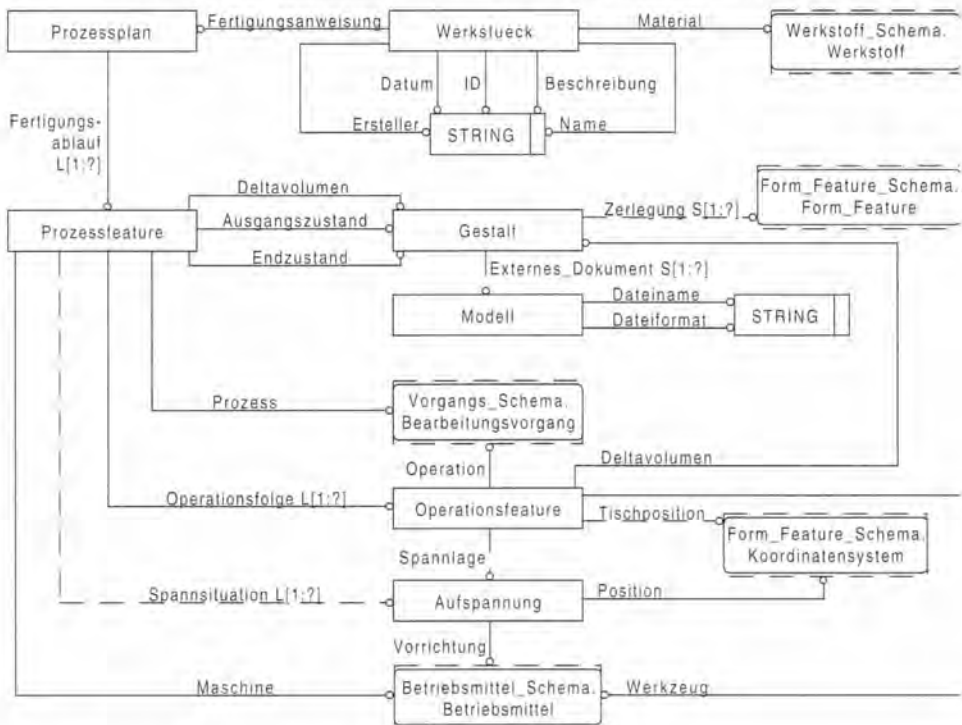


Bild 3 Planungs_Schema des Produktdatenmodells

Das Attribut *Material* zu *Werkstueck* referenziert auf das Entity *Werkstoff*, das sachlogisch getrennt im *Werkstoff_Schema* repräsentiert wird. Die individuellen *Eigenschaften* des Werkstoffs werden als *Parameter* im *Parameter_Schema* repräsentiert. Das Attribut *Fertigungsanweisung* verweist auf das Entity *Prozessplan*, das den *Fertigungsablauf* als eine geordnete Liste des Entity *Prozessfeature* repräsentiert. Anhand der Attributbeziehungen dieser Informationseinheit wird der gewählte Modellierungsansatz deutlich, einen Fertigungsschritt durch die Zuordnung eines Betriebsmittels, eines Bearbeitungsvorgangs, einer vorgangsbezogenen Gestalt und einer Zerlegung in Teilarbeitsvorgänge zu definieren.

Das Attribut *Maschine* zu *Prozessfeature* referenziert auf das Entity *Betriebsmittel*, das im *Betriebsmittel_Schema* repräsentiert wird. Das Attribut *Prozess* verweist auf das Entity *Bearbeitungsvorgang* im *Vorgangs_Schema*. Als optionale Liste wird auf das Entity *Aufspannung* referenziert, um eine Folge von

Spannsituationen eines zerspanenden Fertigungsprozesses abzubilden. Die vorgangsbezogene Gestalt wird über die Attribute *Deltavolumen* bzw. *Ausgangs- und Endzustand* als Referenz auf das Entity *Gestalt* repräsentiert.

Die Abbildung einer Prozeßzerlegung in Teilarbeitsvorgänge erfolgt über das Attribut *Operationsfolge*, das auf eine geordnete Liste des Entity *Operationsfeature* referenziert. Ein *Operationsfeature* kombiniert in Analogie zum Entity *Prozessfeature* die Entities *Bearbeitungsvorgang*, *Betriebsmittel* und *Gestalt*. In dieser Detaillierungsebene werden die o.g. Entities über die Attribute *Operation*, *Werkzeug* und *Deltavolumen* referenziert. *Spannlage* und *Tischposition* bilden zusätzliche optionale Attribute. Charakteristisch für das Produktdatenmodell sind die Konstrukte zur Repräsentation von Gestaltdaten. Die Gestaltrepräsentation kann sowohl über eine ungeordnete Liste *Externes_Dokument*, die auf das Entity *Modell* referenziert, als auch über eine ungeordnete Liste *Zerlegung* als Referenz auf das *Form_Feature_Schema* erfolgen. Das *Form_Feature_Schema* bildet konzeptionell die Schnittstelle des Produktdatenmodells zu featurebasierten Anwendungssystemen. Das Entity *Form_Feature* ist die zentrale Informationseinheit des gleichnamigen Schemas. Im *Form_Feature_Schema* werden sowohl signifikante Gestaltparameter eines *Form_Feature* als auch semantikbehaftete Parameter repräsentiert.

Als Primärdatenquellen für die Instanziierung des Produktdatenmodells mit werkstückbeschreibenden Daten dienen CAD-Volumenmodelle der zu klassifizierenden Werkstücke. Dabei kann es sich sowohl um featurebasierte Modelle als auch um konventionelle Volumenmodelle handeln, deren Gestalt ausschließlich über Geometrie- und Topologieinformationen bestimmt wird. Gemäß der Forderung nach einer formelementorientierten Repräsentation der Produktdaten müssen konventionelle Volumenmodelle in eine featurebasierte Repräsentationsform überführt werden. Jedes Feature, mit dem die Gestalt eines Werkstücks beschrieben wird, verfügt zusätzlich über eine semantische Komponente. Die semantische Komponente beinhaltet technologische Daten, bei denen es sich im wesentlichen um Toleranz- und Oberflächenangaben handelt. Ausgehend von der featurebasierten Beschreibung der Werkstücke, deren Eigenschaften als Instanzen des Produktdatenmodells vorliegen, erfolgt die Ableitung der Klassifizierungsmerkmale.

Hybrides Klassifizierungsverfahren

Wie bereits an anderer Stelle erwähnt, wird für den eigentlichen Klassifizierungsprozeß eine hybride Vorgehensweise gewählt, die multivariante clusteranalytische Verfahren mit einem Künstlichen Neuronalen Netz kombiniert [14]. Zu Beginn der Vorgehensweise steht die systematische Auswahl der Klassifizie-

rungsmerkmale, die populationspezifisch, d. h. in Abhängigkeit vom zu klassifizierenden Werkstückspektrum, erfolgen muß, sowie die Aufbereitung der Analysedaten. Entsprechend den ausgewählten Klassifizierungsmerkmalen werden die als Instanzen des Produktdatenmodells vorliegenden Merkmalsausprägungen in Form einer Rohdatenmatrix bereitgestellt. Den Schwerpunkt der Datenaufbereitung bildet der Nachweis der Fertigungsrelevanz der werkstückbeschreibenden Klassifizierungsmerkmale. Der Nachweis wird auf der Grundlage einer variablenorientierten Clusteranalyse geführt, die zur Identifikation inhaltlicher Abhängigkeiten zwischen fertigungsprozeß- und werkstückbeschreibenden Merkmalen dient. In der Regel müssen mehrere Auswahlsschritte iterativ durchlaufen werden, bis als Ergebnis fertigungsrelevante, werkstückbeschreibende Produktdaten, d. h. die Ausprägungen der festgelegten Klassifizierungsmerkmale, in Form einer Rohdatenmatrix vorliegen.

Auf dieser Grundlage erfolgt der erste Klassifizierungsschritt unter Einsatz hierarchisch-agglomerativer clusteranalytischer Verfahren. Als alternative Gruppierungsalgorithmen kommen abhängig von der Beschaffenheit des Werkstückspektrums sowohl Complete-Linkage als auch Average-Linkage Algorithmus zum Einsatz [27, 28]. Die quadriert euklidische Distanz stellt im Anwendungskontext der Fertigungsfamilienbildung ein geeignetes Proximitätsmaß dar. Als Ergebnis des Gruppierungsprozesses liegt eine hierarchische Partitionsfolge vor, aus der die am besten geeignete Partition, d. h. eine brauchbare Aufteilung des Werkstückspektrums in Fertigungsfamilien, ausgewählt wird. Anschließend wird eine Optimierung der hierarchisch erzeugten Partition auf Basis des K-Means-Algorithmus, bei dem es sich um ein partitionierendes Austauschverfahren handelt, durchgeführt. Die Verbesserung der ursprünglichen Partition zeigt sich in der Verbesserung der Homogenität innerhalb der Fertigungsfamilien sowie in der erhöhten Anzahl Cluster-spezifisch repräsentativer Merkmale. Die Darstellung des Klassifizierungsergebnisses in Form einer sortierten Rohdatenmatrix ermöglicht im Rahmen der Initialplanung die direkte Ableitung von Standardarbeitsplänen für die gebildeten Fertigungsfamilien.

Als komplementäres Verfahren für die Optimierung der hierarchisch erzeugten Partition kommt ein unüberwacht-lernendes Künstliches Neuronales Netz zur Anwendung. Dabei handelt es sich um die Selbst-organisierende Karte nach *Kohonen*, die aufgrund ihrer verfahrenstechnischen Parallelen zum K-Means-Algorithmus sowie der entwickelten Trainingsstrategie Partitionen liefert, die mit den K-Means-Partitionen übereinstimmen [23, 29, 30]. Analog zur Festlegung der Startpartition beim K-Means-Gruppierungsalgorithmus wird im ersten Klassifizierungsschritt die Trainingspopulation bestimmt (Bild 4). Dabei handelt es sich, dem K-Means-Verfahren entsprechend, um die repräsentativen Werkstücke der hierarchisch gebildeten Cluster, die dem Netz in der Trainingsphase als Eingangssignalvektoren präsentiert werden. Vor dem Start des Lern-

algorithmus müssen zunächst die Karten- und Trainingsparameter festgelegt werden. Die Selbst-Organisation der Neuronen in der Kartenschicht erfolgt in Form sogenannter „Nachbarschaftsbereiche“, deren Anzahl den Trainingsvektoren, d. h. der Anzahl der Clusterrepräsentanten, entspricht. Jeder Clusterrepräsentant wird durch ein Neuron in der Mitte eines solchen Bereichs abgebildet. Durch die Beeinflussung der Gewichtungsvektoren der Neuronen im Nachbarschaftsbereich eines Repräsentanten wird der entsprechende Bereich sensitiv für ähnliche Eingangssignalvektoren bzw. Werkstücke.

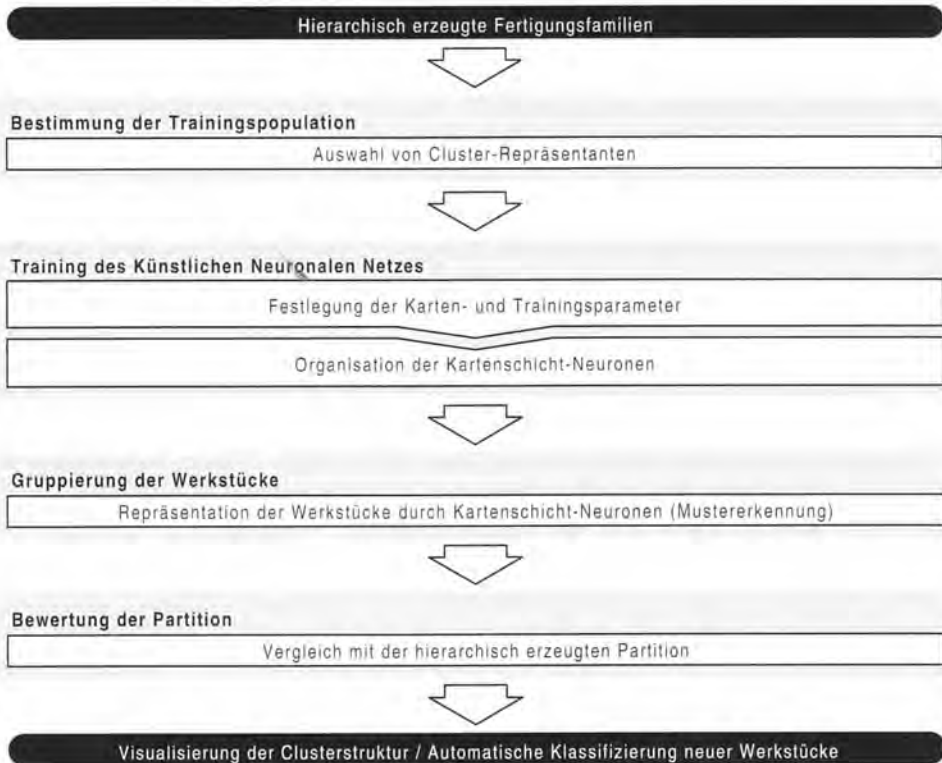


Bild 4 Optimieren einer hierarchisch gebildeten Partition auf Basis Selbst-organisierender Karten

Die eigentliche Gruppierung der Werkstücke erfolgt als Mustererkennung auf Basis des trainierten Künstlichen Neuronalen Netzes. Die Werkstücke der Trainingspopulation werden aus der Rohdatenmatrix ausgeschlossen, da diese bereits in der Karte repräsentiert werden. Darin unterscheidet sich der Ablauf der Klassifizierung vom K-Means-Verfahren. Im trainierten Netz wird ein Werkstück durch das Neuron in der Kartenschicht repräsentiert, dessen Gewichtungsfaktor die geringste Distanz zum Eingangssignalvektor, d. h. zum Mustervektor

des Werkstücks, aufweist. Im Vergleich mit der hierarchisch erzeugten Partition zeigt sich, daß, ähnlich wie bei der Anwendung des K-Means-Algorithmus, Werkstücke zwischen den Fertigungsfamilien ausgetauscht werden.

Das zusätzliche Nutzenpotential gegenüber K-Means besteht in der automatischen Klassifizierung neuer Werkstücke. Nach dem Prinzip der Mustererkennung können auf Basis des trainierten Netzes neue Werkstücke bestehenden Fertigungsfamilien bzw. fertigungstechnisch ähnlichen Werkstücken zugeordnet werden. Diese Verfahrenseigenschaft bildet eine notwendige Voraussetzung für die Varianten- und Anpassungsplanung. Darüber hinaus ermöglicht die Ergebnisdarstellung in Form der Topologie-erhaltenden Karte eine anschauliche Visualisierung der Ähnlichkeitsstruktur des analysierten Werkstückspektrums.

Einsatz der Methodik

Zwecks Validierung der vorgestellten Methodik wurden am WZL umfangreiche Fallstudien zur Fertigungsfamilienbildung durchgeführt. Im Vorfeld der Fallstudien erfolgte eine Umsetzung der Methodik in Form eines prototypischen DV-Systems. Die Systemarchitektur des realisierten DV-Prototypen ist von der Kombination marktgängiger Software-Systeme geprägt. Den Kern des Systems bildet das objektorientierte Datenbank-Managementsystem (OODBMS) ONTOS, auf dessen Basis das Produktdatenmodell implementiert ist. Die Kopplung des OODBMS mit einem Internet-Browser ermöglicht den Benutzerzugriff auf die instanziierten Produktdaten. Die weiteren Module des DV-Prototypen sind über entsprechende Datenschnittstellen mit dem OODBMS verbunden (Bild 5).

Als Quelle für feature-basierte, werkstückbeschreibende Produktdaten (❶) dient das CAD-System MicroStation, das sowohl um Funktionalität zur featurebasierten Werkstückmodellierung als auch um einen entsprechenden Feature-Katalog erweitert ist. Die Instanzierung des Produktdatenmodells mit fertigungsprozeßbeschreibenden Produktdaten (❷) erfolgt über die Schnittstelle zum CAPP-System PART. Alternativ zu dem hier genutzten CAPP-System stellen auch PPS- oder NC-Programmiersysteme geeignete Quellen für fertigungsprozeßbeschreibende Daten dar, die ebenfalls mit dem OODBMS gekoppelt werden können. Darüber hinaus wird der Feature-Erkennungs-Mechanismus des Systems PART genutzt, um konventionelle CAD-Volumenmodelle (❸) automatisch in featurebasierte Werkstückmodelle zu überführen.

Die Durchführung multivariater Clusteranalysen erfolgt mit der statistischen Analyse-Software SPSS. Die erforderlichen Rohdatenmatrizen werden mit Hilfe einer konfigurierbaren Ausleseroutine für die Instanzen des Produktdatenmodells (❹) automatisch generiert. Die Repräsentanten der hierarchisch gebildeten

Teilefamilien (5) finden als Trainingspopulation zur Selbst-Organisation des Künstlichen Neuronales Netzes Verwendung. Die Implementierung der Selbst-organisierenden Karte erfolgt als Makro-Programmierung auf Basis des Tabellenkalkulationssystems EXCEL. Neue Werkstücke werden nach dem Prinzip der Mustererkennung mit dem trainierten Künstlichen Neuronales Netz klassifiziert. Die Mustervektoren, d. h. die entsprechenden werkstückbeschreibenden Produktdaten (6), werden aus dem Produktdatenmodell ausgelesen.

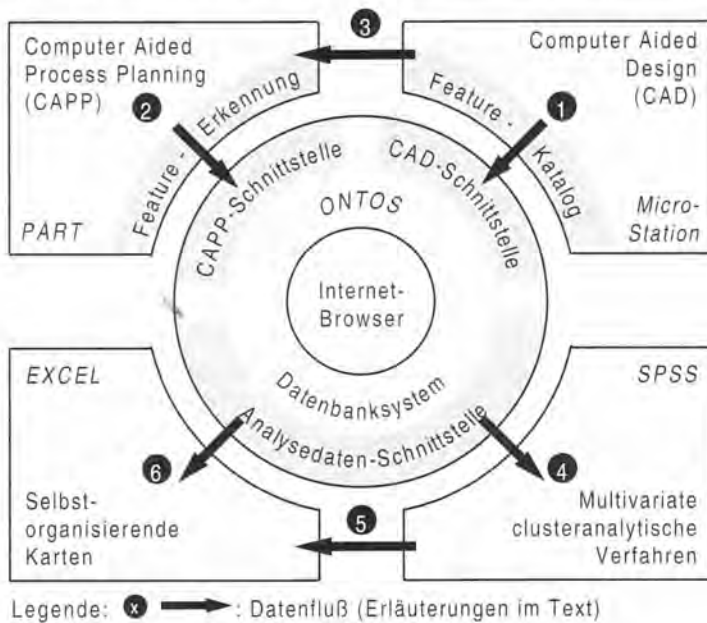


Bild 5 Architektur des prototypischen DV-Systems

Gegenstand einer mit Hilfe des realisierten DV-Systems durchgeführten Fallstudie war die Fertigungsfamilienbildung für ein heterogenes Spektrum unterschiedlich komplexer Werkstücke [20]. Das analysierte Werkstückspektrum umfaßt 180 Teile und reicht von komplexen Führungselementen geringer Baugröße bis hin zu großvolumigen Motorgrundplatten. Die Gemeinsamkeit aller Werkstücke besteht darin, daß die NC-Bearbeitung in einer Flexiblen Fertigungszelle vom Typ Kolb PFZ 2500 VC erfolgt. Dabei handelt es sich um ein Fertigungssystem, das für eine 5-Seiten-Komplettbearbeitung von Werkstücken unterschiedlicher Größe und Komplexität ausgelegt ist.

Die Instanziierung des Produktdatenmodells mit werkstückbeschreibenden Daten erfolgte auf der Grundlage von CAD-Volumenmodellen der zu klassifizierenden Werkstücke. Mittels automatischer Feature-Erkennung wurden die vorliegenden Flächenbegrenzungsmodelle in eine featurebasierte Repräsentations-

form überführt und im Datenbank-Managementsystem archiviert. Die ebenfalls durchgeführte Instanziierung des Produktdatenmodells mit prozeßbeschreibenden Arbeitsplandaten ermöglichte die iterative Auswahl geeigneter werkstückbezogener, fertigungsrelevanter Klassifizierungsmerkmale. Die entsprechenden Merkmalsausprägungen wurden automatisch als Rohdatenmatrix bereitgestellt. Unter Einsatz des Complete-Linkage Algorithmus wurde eine 14-Cluster-Lösung als optimale Partition des zu klassifizierenden Werkstückspektrums identifiziert. Die anschließende Anwendung des K-Means-Austauschverfahrens auf die erzeugte Partition führte zu einer deutlichen Verbesserung der Klassifikationsgüte, insbesondere hinsichtlich der Homogenität der gebildeten Fertigungsfamilien. Im Rahmen der Fallstudie konnten darüber hinaus die verfahrenstechnischen Parallelen zwischen K-Means und Selbst-organisierender Karte anhand der Übereinstimmungen in den erzeugten Partitionen belegt werden. Das Nutzenpotential der gewählten hybriden Vorgehensweise zeigte sich deutlich bei der Klassifizierung neuer Werkstücke auf Basis des trainierten Künstlichen Neuronalen Netzes.

Eine weitere Fallstudie wurde gemeinsam mit einem Industriepartner in einem Kaltwalzwerk durchgeführt. Gegenstand der Klassifizierung waren ca. 4600 unterschiedliche Bandstahlerzeugnisse, für die sowohl Fertigungsanweisungen in Form von Arbeitsplänen als auch Produktmerkmale in Form von Sachmerkmalen DV-technisch verfügbar waren. Auch in dieser Fallstudie bestand die Zielsetzung in der Bildung von Fertigungsfamilien als Voraussetzung für die Implementierung von Standardprozessen. Auf der Grundlage des mit Arbeitsplandaten und Sachmerkmalen instanziierten Produktdatenmodells wurde der Gruppierungsprozeß nach dem beschriebenen Ablaufschema durchgeführt. Anhand des umfangreichen zu klassifizierenden Erzeugnisspektrums konnte in dieser Fallstudie die Leistungsfähigkeit der eingesetzten Gruppierungsverfahren nachgewiesen werden. Als Ergebnis der Fertigungsfamilienbildung wurden für das klassifizierte Erzeugnisspektrum 163 Standardprozesse mit entsprechenden Fix- und Wahlarbeitsvorgängen in einem PPS-System implementiert. Die Zuordnung neuer Fertigungsaufträge zu Standardprozessen erfolgt über teilefamilienspezifische, erzeugnisbezogene Sachmerkmale.

Fazit

Die im vorliegenden Beitrag vorgestellten Arbeiten belegen am Beispiel der Fertigungsfamilienbildung deutlich das Nutzenpotential, das die Entwicklungen auf dem Gebiet der Produktdatentechnologie hinsichtlich gruppentechnologischer Anwendungen bieten. Insbesondere ist zu erwarten, daß der Fortschritt und die industrielle Umsetzung der ISO 10303 (STEP) erheblich zu einer Erhö-

hung von Transparenz und Aktualität bei der Verwaltung produktbezogener Daten und damit zu einer Erhöhung des Wiederverwendungsgrades von Planungsergebnissen beitragen werden. Vor dem Hintergrund der Produktdatenverwaltung ist auch der Einsatz der entwickelten Klassifizierungsverfahren, insbesondere die Klassifizierung mit Künstlichen Neuronalen Netzen nach dem Prinzip der Mustererkennung, von hoher Relevanz. Darüber hinaus ist deutlich geworden, daß die von *Mitrofanow* und *Opitz* in den 60er Jahren durchgeführten Untersuchungen auch in der heutigen Zeit - gepaart mit Methoden und Hilfsmitteln der Künstlichen Intelligenz und der Informationstechnologie - ein breites Fundament für gruppentechnologische Anwendungen in Forschung und Praxis bilden.

Literatur

- [1] *Vajna, S.*: Gruppentechnologie und CIM. CIM-Management 6/92, S. 4 ff.
- [2] *Opitz, H.*: VDW-Forschungsbericht: Entwicklung eines werkstückbeschreibenden Klassifizierungssystems für den Werkzeugmaschinenbau. Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken (VDW), 1966
- [3] *Mitrofanow, S. P.*: Wissenschaftliche Grundlagen der Gruppentechnologie. VEB Verlag Technik, Berlin 1960
- [4] *Martin, J.*: Gruppentechnologische Fertigungsstrukturen – Planung und Bewertung bei Einzel- und Kleinserienfertigung. Dissertation, Universität Dortmund, 1989
- [5] *Burbidge, J.-L.*: Production flow analysis. Journal of institution of production engineers 42 (1963) 12, S. 742-752
- [6] *Heinz, K.; Burkhardt, M.*: Partialablaufgruppen – Ein Konzept zur ablauforientierten Strukturierung der Einzel- und Kleinserienfertigung. VDI-Z 127 (1985) 18, S. 733-739
- [7] *Eberwein, R.-D.*: Organisation flexibel automatisierter Produktionssysteme. Dissertation, Universität Regensburg, 1988
- [8] *Specht, D.*: Ermittlung von Fertigungsstrukturen in Maschinenbaubetrieben durch Faktoren- und Clusteranalyse. Dissertation, TU Berlin, 1986
- [9] *Granow, R.*: Strukturanalyse von Werkstückspektren – Planungshilfen beim Aufbau flexibler automatischer Fertigungen. Dissertation, Universität Hannover, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 74. VDI Verlag, Düsseldorf 1984
- [10] *Weber, G.*: Gestaltung eines integrierten Produktionssystems für die Sortenfertigung unter Einsatz der Clusteranalyse. Dissertation, Universität Stuttgart, 1983

- [11] *Deich, A.*: Kostenplanung für die Herstellung von Hohlformwerkzeugen: Entwicklung einer Systematik zur kostenoptimalen Fertigungsplanung mit Hilfe multivariater Methoden. Dissertation, RWTH Aachen, 1987
- [12] *Tönshoff, H.-K.; Rotzoll, M. A.; Verweij, M. J.*: Familiengründung, AV 34 (1997) 2, S. 93-97
- [13] *Maßberg, W.; Künzel, R.*: A new Hybrid Method for Part-Family Development. Annals of the CIRP, Vol45/1, 1996, S. 465-470
- [14] *Eversheim, W.; Deuse, J.*: Formation of Part Families based on Product Model Data. Production Engineering 4 (1997) 2, S. 97-100
- [15] *Kao, Y.; Moon, Y. B.*: A Unified Group Technology Implementation using the Backpropagation Learning Rule of Neural Networks. Computers in Industrial Engineering 20 (1991) 4, S. 425-437
- [16] *Kaparthi, S.; Suresh, N. C.*: Machine-component cell formation in group technology: A neural network approach. International Journal of Production Research 23 (1992) 6, S. 1353-1367
- [17] *Moon, Y.; Kao, Y.*: Automatic Generation of Group Technology Families during the Part Classification Process. Int. J. Adv. Manuf. Technol. (1993) 8, S. 160-166
- [18] *Liao, T. W.; Lee, K. S.*: Integration of a feature-based CAD-system and an ART1 neural model for GT coding and part family forming. Computers ind. Engineering 26 (1994) 1, S. 93-104
- [19] *Wu, M. C.; Jen, S. R.*: A Neural Network Approach to the Classification of 3D Prismatic Parts. Int. J. Adv. Manuf. Technol. (1996) 11, S. 325-335
- [20] *Deuse, J.*: Fertigungsfamilienbildung mit feature-basierten Produktmodelldaten. Dissertation, RWTH Aachen, 1998
- [21] *N.N.*: ISO 10303-1: Industrial Automation Systems and Integration – Product Data Representation and Exchange, Part 1: Overview and Fundamental Principles, 1994
- [22] *Anderl, R.*: STEP - Schritte zum Produktmodell. CAD/CAM-Report (1992) 8, S. 48-54
- [23] *Kohonen, T.*: Self-Organizing Maps. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 1995
- [24] *Opitz, H.*: Verschlüsselungsrichtlinien und Definitionen zum werkstückbeschreibenden Klassifizierungssystem. Giradet Verlag, Essen 1968
- [25] *N.N.*: DIN 4000-1: Sachmerkmal-Leisten: Begriffe und Grundsätze. Beuth-Verlag, Berlin 1992
- [26] *N.N.*: ISO 10303-11: Industrial Automation Systems and Integration – Product Data Representation and Exchange, Part 11: Description Methods: The EXPRESS Language Reference Manual, 1994
- [27] *Bock, H. H.*: Automatische Klassifikation. Vandenhoeck & Ruprecht Verlag, Göttingen 1974

- [28] *Fahrmeir, L.; Hamerle, A.; Tutz, G.:* Multivariate statistische Verfahren. De Gruyter Verlag, Berlin, New York 1996
- [29] *Lippman, R. P.:* An introduction to computing with neural networks. IEEE ASSP Magazine 4 (1987) 2, S. 4-22
- [30] *Ripley, B. D.:* Pattern recognition and neural networks. Cambridge University Press, Cambridge 1996.