Repräsentation technologischer Wissensbasen für die Wissensakquisition durch Maschinelles Lernen in der generierenden Arbeitsplanerstellung

Wolfgang Ewert, Frank Leidholdt, Holger Dürr
Lehrstuhl für Fertigungslehre, Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik,
TU Chemnitz-Zwickau, PF 964
09009 Chemnitz
{w.ewert, f.leidholdt, h.duerr}@mb2.tu-chemnitz.de

1. Einleitung

Der Wissenserwerb erschwert bisher häufig den Einsatz wissensbasierter Systeme der Arbeitsplanerstellung in der industriellen Praxis. Die meisten Anwendungen gestatten nur das Erfassen und Editieren des durch aufwendige Erhebung, Systematisierung und Formulierung gewonnenen fachspezifischen Planungswissens.

Im Rahmen eines DFG-Projektes soll die Anwendbarkeit bekannter maschineller Lernverfahren auf technologische Reihenfolge- und Zuordnungsprobleme im Rahmen der generierenden Arbeitsplanerstellung von Teilefertigungsprozessen im Maschinenbau nachgewiesen werden. Dazu wird ein Prototyp mit Hilfe eines verfügbaren Softwarewerkzeuges entwickelt, der das maschinelle Lernen aus vorgegebenen Beispielen ermöglichen und mit einem existierenden Prototypen der wissensbasierten Arbeistplanung kommunizieren soll. Der folgende Beitrag gibt einen Überblick über das mit Lernverfahren zu behandelnde Planungswissen und stellt mögliche Repräsentationsmöglichkeiten des Wissens zur Diskussion.

2. Wissensbasierte Arbeitsplanung

2.1. Überblick

Die Arbeitsplanung als Teil der Produktionsplanung überführt die Zeichnung eines Werkstückes in Produktionsunterlagen, wie Arbeitsplan, Arbeitsunterweisung und NC-Programm für den zur Herstellung eines Werkstückes notwendigen Fertigungsablauf. Die Problemstellung der Arbeitsplanung ordnet sich prinzipiell in die Problemklasse "Syntheseaufgaben" ein. Insbesondere die Ausarbeitung von Teilefertigungsprozessen im Maschinenbau läßt sich in folgende Planungsfunktionen grob gliedern:

- Bestimmung eines günstigen Anfangszustandes (Rohteil) und notwendiger Zwischenzustände des Werkstückes,
- Bestimmung von günstigen Bearbeitungsfolgen,
- Bestimmung günstiger Möglichkeiten der Realisierung der Zustandsübergänge (z. B. Zuordnung von Fertigungsmitteln),
- Berechnung erforderlicher Fertigungszeiten und anfallender Fertigungskosten.

Vornehmlich die ersten drei Funktionen legen es nahe, die Vorteile der Wissensverarbeitung gegenüber konventionellen Vorgehensweisen der Rechnerunterstützung zu nutzen, da die Generierung und

Auswahl möglicher Lösungsvarianten zumeist auf Kriterien beruht, die vielfach firmenspezifisch gültig und teilweise unvollständig sind.

Die Nutzung konkreter wissensbasierter Arbeitsplanungssysteme (z. B. AVOGEN [Tönshoff], GENOA [HeldJüttner]) setzt stets eine Wissensbasis voraus. Sie zu füllen erfordert in jedem Fall zunächst Arbeiten zur Wissenserhebung, -systematisierung, -strukturierung und -formulierung in eingabegerechter Form, was allgemein als der "Flaschenhals des Knowledge Engineering" bekannt ist. Dies gilt besonders für die Arbeitsplanung nach dem Generierungsprinzip [Warnecke], [Rozenfeld].

Die die Wissensakquisition unterstützenden Experten vermögen leichter, zu vorgegebenen Beispielsituationen konkrete Planungslösungen zu wählen oder zu finden, als Verallgemeinerungen auf eine Situationenmenge z. B. in Form von Regeln verbindlich zu formulieren. Unter diesem Aspekt sind lernfähige Wissenserwerbskomponenten gefragt, die aus eingegebenen Beispielfällen selbst Verallgemeinerungen generieren und auf neue Fälle anwenden können. Mit der Verlagerung des Schwerpunktes der Lernaktivität vom Systemanwender zum System selbst kommt der Vorteil der Flexibilität wissensbasierter Systeme erst voll zum Tragen.

Verfahren auf der Grundlage wissensbasierter Darstellungen, bei denen ein Bezug zu Maschinellen Lernverfahren gesehen werden kann, werden für Planungsaufgaben in der Produktion in folgenden Bereichen untersucht und eingesetzt:

Im Sonderforschungsbereich SFB 314 an der Universität Kaiserslautern werden fallbasierte Lösungsverfahren unter anderem für die Reihenfolgeplanung in Arbeitsplänen für rotationssymmetrische Drehteile angewandt [PaulokatWeß]. Als System wird das im SFB – Projekt X9 – entwickelte System CabPlan verwandt. CabPlan ist ein Planungssystem, das erlaubt, aufgrund der anfänglichen Aufgabenbeschreibung in Form eines zu fertigenden Werkstücks aus einer Fallbasis geeignete Fälle auszuwählen und Fallwissen in die aktuelle Situation zu übernehmen [Richter]. Die strukturierte Übernahme weiterer Fälle in die Fallbasis stellt eine Form des "Lernens" dar.

Das Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik (wbk) der Uni Karlsruhe setzt ein selbst entwickeltes System Maschineller Lernverfahren, CAKETool, ein [Steuernagel]. Mit diesem System soll das Wissen aus Daten, die (z. B. firmenspezifisch) heterogen und verteilt gehalten werden, gewonnen werden. Die Arbeitsplanung wurde als wichtiger zu untersuchender Bereich mit genannt, jedoch lagen Ergebnisse dazu noch nicht vor.

Die Arbeiten der Forschungsgruppe "Planungsmethodik" am Lehrstuhl Fertigungslehre (Leiter: Prof. H. Dürr) sind langfristig auf Grundlagenuntersuchungen zur Fertigungsgestaltung sowie die Entwicklung von Lösungen zur rechnerunterstützten Vorbereitung und Durchführung der Fertigung für CAD/CAM- und CIM-Konzepte konzentriert [DürrWeber], [WarDüWaMu]. Auf der Grundlage eines allgemeingültigen Modells der Arbeitsplanerstellung für die spanende Fertigung wurde ein Prototyp für die rechnerunterstützte Arbeitsplanerstellung für rotationssymmetrische Werkstücke erarbeitet (Bild1). Das technologische Wissen konnte in Form von Produktionsregeln repräsentiert werden. Das Regelwerk ist starr vorgegeben [WauerBöhm].

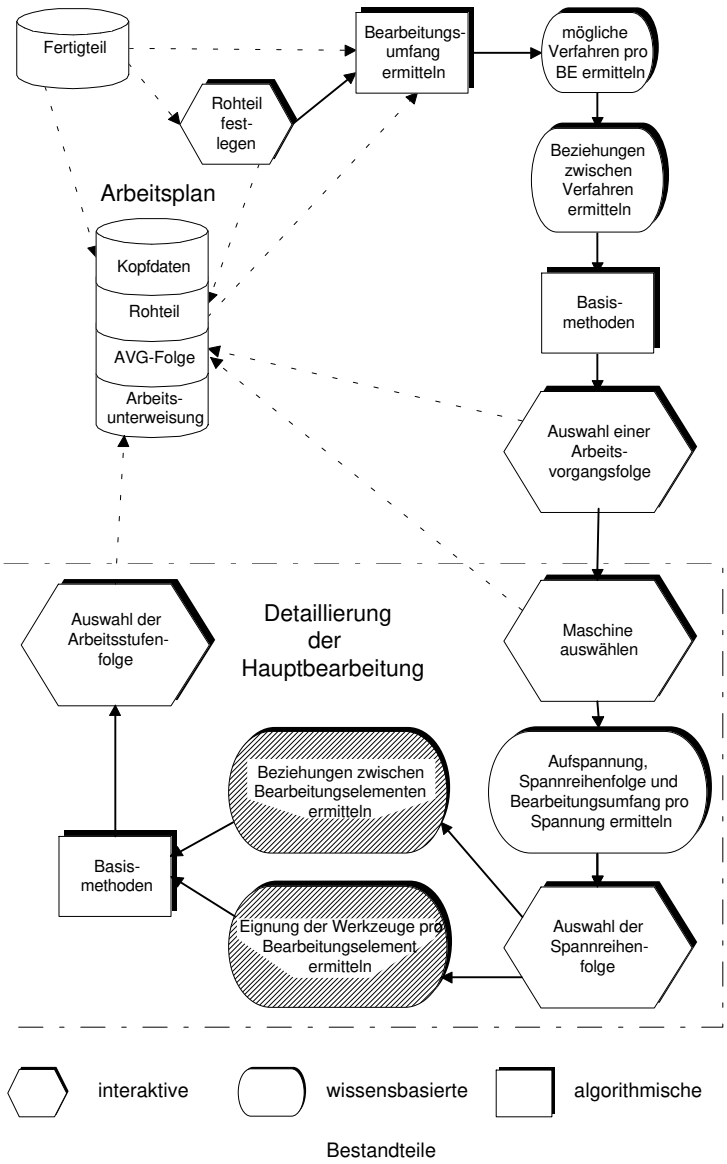

Bild1: Realisierungskonzept des Prototyps für die generierende Arbeitsplanerstellung.

2.2. Lernkomponenten in der Arbeitsplanung

Der Erwerb technologischen Wissens durch maschinelles Lernen wird in unserem Falle eingegrenzt auf die Bildung von Bearbeitungsreihenfolgen und die Zuordnung von Fertigungsmitteln betrachtet. Die angestrebte automatische Modifizierung der Wissensbasis soll auf die Teile der Wissensbasis, die unmittelbar die Bildung der Planungsergebnisse bewirken, auf technologische Regeln (Bild 3), eingeschränkt bleiben.

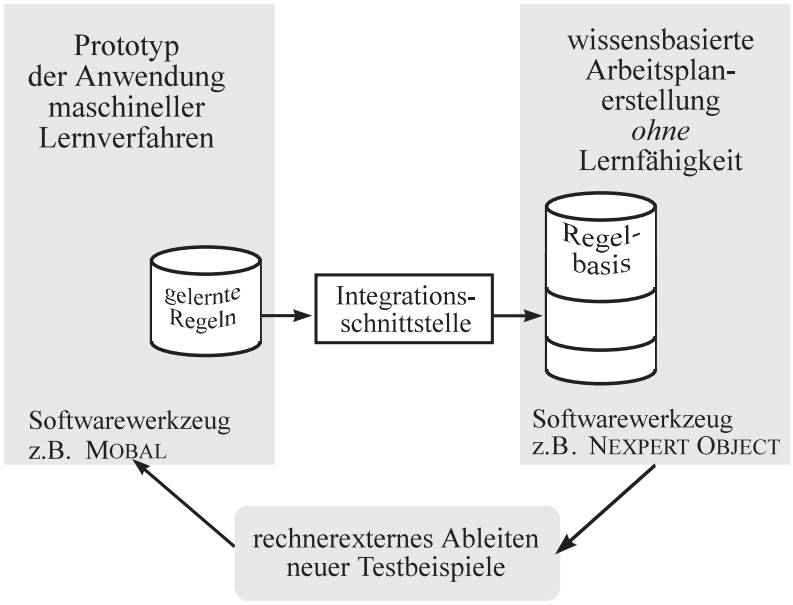

Bild 2: Zur Integration einer Lernkomponente in ein Arbeitsplanungssystem

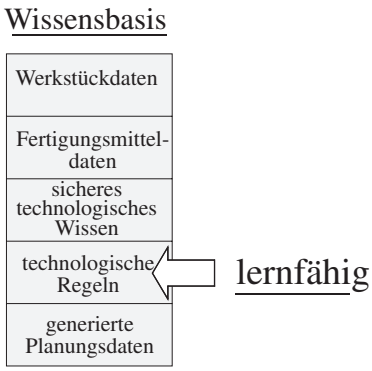

Bild 3: Lernfähige Elemente der Wissensbasis

Zum Neuaufbau der Wissensbasis wird zunächst eine Reihe von Beispielen vorgegeben, d. h., jedes Beispiel enthält als Situationsbeschreibung eine Menge konkreter Eingabedaten der betrachteten Planungsfunktion (z. B. bei der Bildung zeitlicher Reihenfolgebeziehungen konkrete Merkmalswerte von Formelementen) sowie die situationsspezifisch bestätigte oder abgelehnte Ausgabeinformation (z. B. die Präzedenz-Beziehungen zwischen diesen beiden Formelementen). Das Lernsystem soll aus dieser Menge von interaktiv vorgegebenen Trainingsbeispielen selbständig Regeln generieren, die diese Beispiele in komprimierter Form inhaltlich adäquat umfassen. Die so gelernten Regeln werden der Wissensbasis des Prototyps hinzugefügt und gemeinsam mit den bereits vorhandenen Regeln auf neue Testbeispiel-Situationen angewendet. Das gewonnene Resultat wird durch den Nutzer bewertet (Bild 2).

3. Wahl der Darstellungsform der Beispiele und der Lernergebnisse

3.1. Modellbeschreibung

Die hier gewählte Beschreibung der Drehteile, die über eine rein geometrische Darstellung hinausgeht, basiert auf der Zusammensetzung aus einfachen Elementen, nachfolgend Formelemente genannt, da sie nicht nur aus einfachen geometrischen Elementen wie Zylinder, Flächen und Rundungen, sondern auch aus zusammengesetzten Flächen wie zum Beispiel Nuten und Freistiche bestehen. Die sogenannten Hauptformelemente Zylinder, Planflächen und (Flach- bzw. Steil-) Kegel sind dabei die Grundbausteine zur Beschreibung eines Drehteils, aus denen sich durch Addition der Grundkörper für ein Drehteil generieren läßt. Zur Erzeugung von komplexeren Teilen dienen die Neben- (Ringnut und Zentrierbohrung) und Ergänzungsformelemente (Gewinde und Rändelung). Die Erzeugung dieser Formelemente wird durch „Subtraktion von Material“ vom Grundkörper erreicht (Bild 4).

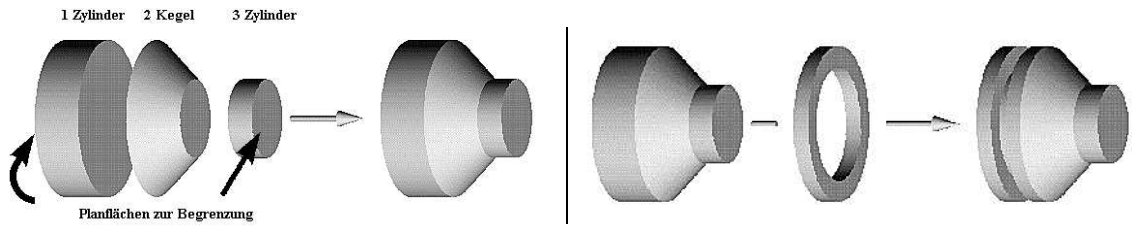

Bild 4: Erzeugung des Grundkörpers und der Ergänzungen

Mit diesem Modell, das eine einfache Erweiterungs- und Anpassungsmöglichkeit zuläßt, lassen sich alle Drehteile des vorgegebenen Teilespektrums darstellen. Dieses Prinzip zur Generierung von Bauteilen, oft als Volumenmodelling oder Featuremodelling bezeichnet, wird auch von modernen CAD-Systemen unterstützt. Somit ist eine unkomplizierte Ankopplung des Lernsystems an ein CAD-System möglich. Technologische Informationen, wie zum Beispiel die Reihenfolge der Bearbeitung oder die Werkzeugauswahl, müssen allerdings zusätzlich beschafft werden.

3.2. Erfassung der Beispieldaten

Bei der Auswahl von Beispielen aus Arbeitsplänen muß sorgfältig überprüft werden, ob sie für die gestellte Aufgabe geeignet sind. Um die Homogenität der Beispieldaten und der zu erwartenden Zusammenhänge zu gewährleisten, wurde das Spektrum der Teile auf folgende Gemeinsamkeiten eingeschränkt:

- Arbeitspläne einer Firma, eines Arbeitsplaners
- gleicher verfügbarer Maschinen- und Werkzeugpark
- kurze Rotateile (Drehteile, die sich im Futter spannen lassen und keine weiteren Hilfsmittel zu Spannung (Spitzen, Pinolen) benötigen)
- nur Formelemente, die durch Drehen herstellbar sind (keine Querbohrungen, Nuten Axialrichtung usw.).

Zu einem späteren Zeitpunkt sollten durch die Verwendung und den Vergleich von Arbeitsplänen anderer Firmen oder Arbeitsplaner die gelernten Regeln in allgemeingültige und firmenspezifische getrennt werden können.

3.3. Darstellung von Konstruktionsdaten und technologischem Wissen in logischen Zusammenhängen

Aussagenlogik

Beispiele und erlernte Konzepte werden in der Aussagenlogik durch eine Menge oder einen Vektor von Attribut-Wert-Paaren repräsentiert. Verfahren dieser Klasse erlauben eine einfache Übernahme von Eingabedaten aus Tabellen oder relationalen Datenbanken. Attribute können diskrete oder kontinuierliche numerische oder symbolische Werte besitzen. Die Einfachheit dieser Formalismen der Aussagenlogik gestatten Systemen, mit großen Datenmengen umzugehen und so statistische Zusammenhänge von Sammlungen von Beispielen auszunutzen. Zugleich ist die Einfachheit der Ausdrucksmöglichkeiten auch die Schwäche der Logik. Um Beziehungen zwischen Objekten darzustellen, ist es in dieser Darstellung notwendig, daß alle relevanten Attribute der jeweils betreffenden Objekte und die Eigenschaften der Beziehungen zwischen den betreffenden Objekten in allen Objektkombinationen auf einen Merkmalsvektor mit festgelegte Dimension abgebildet werden. Auch die Regeln müssen als Funktion dieser Attribute ausgedrückt werden. Besonders bei der Darstellung von Beziehungen und bei netzartig aufgebauten Objekt-Strukturen stößt diese Form der Darstellung schnell an ihre Grenzen [Quinlan90]. Die meisten kommerziell verfügbaren Systeme bauen auf diese Logik auf.

Prädikatenlogik

Gegenüber Attribut-Wert-Sprachen erlauben Sprachen der Logik erster Ordnung sowohl die Repräsentation von strukturellen Beschreibungen durch mehrstellige Prädikatensymbole als auch die Verwendung von Funktionssymbolen. Insbesondere Horn-Formeln (die Repräsentationssprache von Prolog) sowie funktionssymbol-freie Horn-Formeln werden im Maschinellen Lernen als Repräsentationsformalismen verwendet. Selbstverständlich erlauben die FOL-Sprachen auch die Darstellung in Attribut-Wert-Formalismen, die eine Untermenge der prädikatenlogischen Formalismen sind.

Darstellung der Konstruktions- und technologischen Daten

Die Grundelemente eines Teils (Formelemente) und die Fertigungsmittel können durch Sätze von Merkmalen bzw. Attribut-Vektoren beschrieben werden. Der Kopf des Merkmalsvektors enthält die

Identifikation des Formelementes bzw. Fertigungsmittels, der Körper numerisch und symbolisch darstellbare Eigenschaften desselben. Diese Darstellung läßt sich sowohl für Attribut-Wert- als auch prädikatenlogisch orientierte Lernverfahren nutzen. Eine andere nur in der Prädikatenlogik vorhandene Möglichkeit der Darstellung ist die Beschreibung der Eigenschaften bzw. Charakteristik als *Begriff* und die Zuordnung der Objekte (Formelemente / Fertigungsmittel) zu der Eigenschaft, sofern diese Eigenschaft für das entsprechende Objekt existiert:

eigenschaft(Werkstueck, ID-i).

z. B. `steilkegel(buchse, 3).`

„Das Formelement Nr. 3 ist ein Steilkegel."

Falls die Eigenschaft mehrere Ausprägungen (numerische oder symbolische Werte) besitzt, kann die Beschreibung um diese Stelle ergänzt werden.

Wie in [AKMMP] aufgeführt, lassen sich noch weitere Darstellungen eines Sachverhaltes in der Prädikatenlogik finden. Die Eignung einer bestimmten Darstellung muß anhand der Verwendbarkeit in einem Lernsystem und anhand der Interpretierbarkeit der Ergebnisse durch einen Experten geprüft werden. Dies ist noch näher zu untersuchen.

Von Bedeutung für die hier zu lösende Lernaufgabe sind Beziehungen zwischen den Formelementen des Werkstückes untereinander und zwischen Formelementen und Fertigungsmitteln. Das sind

* räumliche Beziehungen, wie
  gleiche_Werstücklage, benachbart, links_von, rechts_von
* Abfolgebeziehungen wie
  vor, unmittelbar_vor, gleiche_Spannlage
* Beziehungen im Produktionsprozeß, Zuordnungen zu Fertigungsmitteln wie
  wird_verwendet_für.

Diese Beziehungen können dargestellt werden als

beziehungsname(*Werkstueck,ID1-i, ID2-j*).

z. B. `gleiche_Werkstuecklage(buchse, 17, 13).`

„Beide Formelemente (Nr. 17 und Nr. 13) liegen innen bzw. beide liegen außen am Werkstück."

Für eine Darstellung in der Attribut-Wert-Logik ist es notwendig, die Attribute der Formelemente, die paarweise in Beziehung gesetzt werden sollen, und gegebenfalls vorhandene Beziehungen (z. B. Nachbarschaftslage) zwischen den beiden Formlementen in jeweils einen Merkmalsvektor zusammenzustellen. Für n Formelemente eines Werkstückes mit jeweils l Eigenschaften und m gemeinsamen Eigenschaften ergeben sich damit $n * (n\text{-}1)$ Kombinationen zu Merkmalsvektoren mit jeweils $2 * l + m$ Merkmalen. Die Darstellung und Untersuchung von Beziehungen von mehr als 2 Formelementen untereinander sowie von paarweisen Beziehungen zwischen Formelementen unter Berücksichtigung von dritten scheiden aufgrund der Komplexität für die Attribut-Wert-Darstellung von vornherein aus.

Für das Lernresultat sind zum einen Regeln für die Zuordnung der Werkzeuge zu Formelementen zum anderen die bereits erwähnten Abfolgebeziehungen von Interesse. Letztere können als Regeln in Horn-Klausel-Logik z. B. folgendermaßen formuliert werden (nach [Steinmüller]):

```
vor(X,Y,Z):- steil(X,Y)& flach(X,Z)& glwsl(X,Y,Z)& glspl(X,Y,Z).
```

Das heißt, „Formelement *Y* des Werkstückes *X* wird vor Formelement *Z* gefertigt, wenn *Y* ein Element mit steiler und *Z* eines mit flacher Fläche darstellt und beide in der gleichen Werkstücklage liegen und beide in einer Spannlage gefertigt werden".

Anhand der hier gezeigten Darstellungsmöglichkeiten ist unschwer zu erkennen, daß die Darstellung des Sachbereichswissens in der Prädikatenlogik eine wesentlich kompaktere und intuitiv

anschaulichere ist als in der Aussagenlogik. Sofern geeignete Lernalgorithmen in der Prädikatenlogik zur Verfügung stehen, sollte dieser Darstellung der Vorzug gegeben werden.

4. Einsatz von Lernverfahren

Werkzeuge des Maschinellen Lernens aus Beispielen wurden Anfang der 80er Jahre entwickelt und werden mit Erfolg eingesetzt. Die meisten und meist sehr effektiven Algorithmen gehören zu der Klasse der "Entscheidungsbaum-generierenden Algorithmen" (Top-down-Induction of Decision Trees - TDIDT), deren größter Teil von dem Basisalgorithmus ID3 [Quinlan83], [Quinlan86] abgeleitet wurden. Aus den als Attribut-Vektor vorliegenden Eingabedaten wird unter Zuhilfenahme einer allgemeinen Bewertungsfunktion ein Entscheidungsbaum konstruiert, der es erlaubt, unklassifizierte Eingabedaten den aus den Beispieldaten erlernten Klassen zuzuordnen. Diese induzierten Entscheidungsbäume stellen ein Ergebnis mit hoher Klassifikationsqualität dar. Allerdings kann die Richtigkeit des Lernergebnisses nur in Bezug auf die Eingabedaten beurteilt werden, da diese Verfahren ausschließlich statistisch signifikante Korrelationen zwischen den Eingabedaten und ihren Klassifikationen liefern und die somit erzeugten Bäume bzw. Regeln nicht notwendigerweise kausale Abhängigkeiten widerspiegeln [Quinlan83], [Hoppe]. Da für diese Gruppe der Lernverfahren die Beispiele als Attribut-Vektor vorliegen müssen, ergeben sich die Schwierigkeiten in der Darstellung der Beispielsituation wie erläutert. Aus diesem Grunde haben wir die Anwandung von Lernverfahren dieser Gruppe nicht weiter verfolgt.

Geeignete Lernverfahren in der Prädikatenlogik sind erst in den letzten 4 Jahren bekannt geworden. Diese bauen im wesentlichen auf ähnliche Vorgehensweisen wie in der attributiven Logik auf. Zusätzlich unterscheiden sich die Verfahren noch voneinander in der Art, wie sie den unendlichen Hypothesenraum beherrschen und auf endliche Größe einschränken. Einen Überblick über Lernverfahren, die auf der Prädikatenlogik beruhen, findet sich in [Muggleton].

Als eines der ersten umfassenden Systeme auf der Basis der Prädikatenlogik, die unterschiedliche Methoden der Wissensakquisition und des Maschinellen Lernens integrieren, ist das System Mobal der FIT KI der GMD bekannt. Es beinhaltet unter anderem die intergrierten Lernalgorithmen RDT und CLT sowie eine Kopplung zu den Werkzeugen Cigol, Golem und FOIL [SEKMW]. Wir schätzen ein, daß die von Mobal unterstützten Repräsentationsformalismen der Darstellung des für uns zu umreißenden technologischen Wissens, wie in den vorangegangenen Punkten beschrieben, genügen. Über Beispieldaten hinaus können bekannte kausale technologische Zusammenhänge, wie Nachbarschaftsbeziehungen und hierarchische Strukturen explizit in der Wissensbasis dargestellt und als Hintergrundwissen verwendet werden. Durch die Beschränkung auf Prädikate, zwischen denen vorgegebene topologische Beziehungen bestehen, kann der Suchraum eingeschränkt werden. Für die zu lernenden Regeln werden Meta-Prädikate als Strukturvorgabe angegeben.

An den bisher gelernten Regeln fällt auf:

- die Regeln ähneln den bereits in [Steinmüller] formulierten und auch in [WauerBöhm] verwendeten Regeln. In beiden Quellen werden jedoch weitere Beziehungen zwischen Formelementen auf ihre Gültigkeit abgefragt. Dies sollte nachvollzogen werden.
- Es werden sehr viele Regeln gelernt. Aufgrund der geringen Beispielzahl tritt hier der Effekt der Übergeneralisierung auf. Bei dieser geringen Zahl an Beispielen sind zufällige von regulären Kombinationen noch zu wenig unterscheidbar.
- Inkonsistenzen bezüglich der hierarchischen Begriffsstruktur. Prinzipiell dürften Regeln, die sich auf Gruppen von Formelementen beziehen, nur dann gelernt werden, wenn der Sachverhalt, der durch die Regeln repräsentiert wird, für alle Formelemente dieser jeweiligen Gruppe gilt. Hier besteht Handlungsbedarf.

5. Zusammenfassung

Für die Darstellung des technologischen Wissens für Reihenfolge- und Zuordnungsprobleme in der generierenden Arbeitsplanung, das durch Maschinelle Lernverfahren ergänzt werden soll, ist die eingeschränkte Prädikatenlogik erster Ordnung als adäquates Werkzeug geeignet. Sie wird zur Darstellung des Sachbereichswissens eingesetzt. Als geeignetes Lernsystem wird das System Mobal ausgewählt. Es bietet verschiedene Darstellungsmöglichkeiten des Sachwissens an und läßt eine Anpassung der Lernalgorithmen an die Wissensdomäne und an die Beispieldaten zu.

Literatur

[AKMMP] Addis, T.R; Kodratoff,Y.; Mantaras, R.L. de; Morik, K; Plaza, E.: Four stances on knowledge acquisition and machine learning. in: Kodratoff (ed): 5th EWSL 91, Porto. Berlin, Heidelberg, New York, 1991, Seite 514-533

[DürrWeber] Dürr.H.; Weber,H.: Erfahrungen und Probleme mit der Entwicklung wissensbasierter CAP-Systeme.5. Symposium 'Grundlagen und Anwendung der Informatik', TU Karl-Marx-Stadt, 2/1990, Tagungsunterlagen

[HeldJüttner] Held,H.-J.; Jüttner,G.: GENOA - Feature Based Generation and Optimization of Process Plans, Proceedings of the IFIP TC5/WG 5.3 Working Conference on Process Planning for Complex Machining with AI-Methods, Gaußig, Germany, 27.-29. Nov 91

[Rozenfeld] Rozenfeld,H.: Rechnerunterstützte Arbeitsplanerstellung für prismatische Großwerkstücke. Diss. RWTH Aachen, 1988

[SEKMW] Sommer, E., Emde, W., Kietz, J.-U., Morik, K., Wrobel, St.: Mobal 2.2 User Guide, German National Research Center for Computer Science (GMD), St. Augustin, 1993

[Steinmüller] Steinmüller, J.:Möglichkeiten von PROLOG bei der Entwicklung von CAP-Software, in: 5. Symposium Grundlagen und Anwendungen der Informatik Chemnitz, Februar 1990, S. 267 - 270

[Steuernagel] Steuernagel, R.: CAKETool - Ein Werkzeug zur Entdeckung von Wissen in produktionstechnischen Daten, in: Fensel, D.; Nakhaeizadeh, G.: "Maschinelles Lernen: Theoretische Ansätze und Anwenderaspekte" ,Proceedings, KI-Tagung, 1993, Berlin, Uni Karlsruhe 1994.

[Tönshoff] Tönshoff,H.-K.; Becker,M.; Kreutzfeldt,J.: CAPP Based on Advanced Modelling Techniques. Proceedings of the IFIP TC5/WG 5.3 Working Conference on Process Planning for Complex Machining with AI-Methods, Gaußig, Germany, 27.-29. November 1991, S. 67

[WaDüWaMu] Warnecke,H. J.; Dürr, H.; Wauer, A.; Muthsam, H.: Knowledge Based Generative CAPP Overcoming the Constraints of Part Families – an Approach to much more Flexibility in CAPP. In: 22nd North American Manufacturing Research Conference, Northwestern University Evanston, Illinois, 25.-27.5.1994

[Warnecke] Warnecke,H.J.; Mayer,Ch.; Muthsam,H.: New Tools in CAPP. CIRP International Workshop on Computer Aided Process Planning, Hannover, September 1989, S. 169-180

[WauerBöhm] Wauer, A., Böhm, A.: Modellierung des Planungsprozesses für den Einsatz wissensbasierter Komponenten in Systemen zur Arbeitsplanerstellung. Arbeitsbericht zum Fortsetzungsantrag für gleichnamiges DFG-Projekt, TU Chemnitz-Zwickau, 1992, 1993