



**Deutsches
Forschungszentrum
für Künstliche
Intelligenz GmbH**

**Research
Report**
RR-93-36

**Von IDA bis IMCOD:
Expertensysteme im CIM-Umfeld**

**Michael M. Richter, Bernd Bachmann,
Ansgar Bernardi, Christoph Klauck
Ralf Legleitner, Gabriele Schmidt**

Juli 1993

**Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz
GmbH**

Postfach 20 80
67608 Kaiserslautern, FRG
Tel.: + 49 (631) 205-3211
Fax: + 49 (631) 205-3210

Stuhlsatzenhausweg 3
66123 Saarbrücken, FRG
Tel.: + 49 (681) 302-5252
Fax: + 49 (681) 302-5341

Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz

The German Research Center for Artificial Intelligence (Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz, DFKI) with sites in Kaiserslautern and Saarbrücken is a non-profit organization which was founded in 1988. The shareholder companies are Atlas Elektronik, Daimler-Benz, Fraunhofer Gesellschaft, GMD, IBM, Insiders, Mannesmann-Kienzle, Sema Group, and Siemens. Research projects conducted at the DFKI are funded by the German Ministry for Research and Technology, by the shareholder companies, or by other industrial contracts.

The DFKI conducts application-oriented basic research in the field of artificial intelligence and other related subfields of computer science. The overall goal is to construct systems with technical knowledge and common sense which - by using AI methods - implement a problem solution for a selected application area. Currently, there are the following research areas at the DFKI:

- Intelligent Engineering Systems
- Intelligent User Interfaces
- Computer Linguistics
- Programming Systems
- Deduction and Multiagent Systems
- Document Analysis and Office Automation.

The DFKI strives at making its research results available to the scientific community. There exist many contacts to domestic and foreign research institutions, both in academy and industry. The DFKI hosts technology transfer workshops for shareholders and other interested groups in order to inform about the current state of research.

From its beginning, the DFKI has provided an attractive working environment for AI researchers from Germany and from all over the world. The goal is to have a staff of about 100 researchers at the end of the building-up phase.

Dr. Dr. D. Ruland
Director

**Von IDA bis IMCOD
Expertensysteme im Maschinenbau**

**Michael M. Richter, Bernd Bachmann,
Ansgar Bernardi, Christoph Klauck
Ralf Legleitner, Gabriele Schmidt**

DFKI-RR-93-36

Eine verkürzte Fassung des vorliegenden Berichts erscheint im Tagungsband "Rechnerunterstützte Wissensverarbeitung in Entwicklung und Konstruktion 1993", VDI-Verlag.

This work has been supported by a grant from The Federal Ministry for Research and Technology (FKZ ITWM-8902 C4).

© Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz 1993

This work may not be copied or reproduced in whole or part for any commercial purpose. Permission to copy in whole or part without payment of fee is granted for nonprofit educational and research purposes provided that all such whole or partial copies include the following: a notice that such copying is by permission of the Deutsche Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz, Kaiserslautern, Federal Republic of Germany; an acknowledgement of the authors and individual contributors to the work; all applicable portions of this copyright notice. Copying, reproducing, or republishing for any other purpose shall require a licence with payment of fee to Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz.

ISSN 0946-008X

Von IDA bis IMCOD

Expertensysteme im Maschinenbau

Michael M. Richter, Bernd Bachmann, Ansgar Bernardi,
Christoph Klauck, Ralf Legleitner, Gabriele Schmidt

Zusammenfassung

Kürzer werdende Produktzyklen bei höher werdenden Qualitätsansprüchen erfordern flexiblere und intelligentere Systeme für komplexere Aufgaben. Die im Sinne der CIM-Idee fortschreitende Integration unterschiedlicher Aufgabenbereiche und ihrer jeweiligen Systeme stellt hohe Anforderungen an die Informationstechnologie. Die Künstliche Intelligenz und speziell die Expertensystemforschung liefern hier erfolgversprechende Ansätze und Perspektiven. Die Systeme MOLTKE und IDA stehen als Beispiele für einzelne Expertensysteme in Diagnose und Konfiguration. Die Ergebnisse des ARC-TEC Projekts erreichen zwischen Konstruktion und Planung bereits eine stärkere Integration. Das Projekt IMCOD untersucht schließlich die Möglichkeiten der Verbindung verschiedener Systeme mit beschränkten Kompetenzbereichen, um einen besseren Produktentwurf zu erzielen.

Abstract

The shortness in product cycles with increasing quality demands requires more flexible and more intelligent systems for very complex tasks. The proceeding integration of the many different task areas within the CIM-idea and their individual systems requests high demands to the information technology. AI, especially expert system research, provides a successful approach and perspectives. The examples for single expert systems in diagnostics and configuration are the systems MOLTKE and IDA. The results of the ARC-TEC projects already reach a strong integration of construction and planning. The project IMCOD finally surveys the possibility of connecting different systems with limited competence areas to obtain better products.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Die Ausgangssituation | 1 |
| 2 | Der Ansatzpunkt der Künstlichen Intelligenz | 1 |
| 3 | Bisherige Expertensystemtechnologien | 3 |
| 3.1 | Diagnose | 3 |
| 3.2 | Planung | 5 |
| 4 | Ansätze am DFKI | 6 |
| 4.1 | ARC-TEC | 7 |
| 4.2 | IMCOD | 9 |
| 5 | Abschlußbetrachtung | 12 |

1 Die Ausgangssituation

Die gegenwärtige Lage ist durch eine Vielzahl sich entwickelnder „intelligenter Technologien“ gekennzeichnet, von der intelligenten Kommunikations-Technik bis zur intelligenten Umwelt-Technik. Auf dem Gebiet der Informationsverarbeitung ist hier an vorderer Stelle die Künstliche Intelligenz und speziell die Expertensystemtechnologie zu nennen.

Auch und gerade der Maschinenbau war und ist Anlaß und Motor für die Entwicklung und Vervollkommnung von technologischen Innovationen. Dies ist zuletzt die Folge eines sich verschärfenden internationalen Wettbewerbs. Heute haben immer mehr Produkte eine kürzere Lebensdauer, und die Anzahl der Produktvarianten steigt in größerem Maße als die gesamte Stückzahl. Um Kundenwünsche mit qualitativ hochwertigen Produkten zu wettbewerbsfähigen Preisen befriedigen zu können, werden vor allem immer größere Anforderungen an eine flexible Fertigungstechnik gestellt. Solche Bedingungen an große Beweglichkeit und hohe Präzision bedeuten nichts anderes als extreme Anforderungen an die Qualität der Informationsverarbeitung.

Die Informationsverarbeitung und -verwaltung ist innerhalb der gesamten Automatisierung von übergreifendem und integrierendem Charakter. Insofern kommt ihr eine Art Schlüsselrolle zu. Die bisherige Datenverarbeitung im Gesamtfeld der Produktion ist immer noch überwiegend durch ihren „Inselcharakter“ gekennzeichnet. Typisch dafür ist die Entwicklung von Programmpaketen für einzelne Teilaspekte des gesamten Produktionsprozesses, wie etwa im CAD-Bereich oder in der Fertigung. Im Bewußtsein der hier liegenden Defizite ist die CIM-Idee aus dem Wunsch geboren, die Inselösungen zu überbrücken und eine uniforme Repräsentation aller auftretenden Daten zu schaffen. Ein solches Modell soll alle Daten über ein Produkt in einheitlicher Form enthalten und es gestatten, diese je nach den Erfordernissen für bestimmte Zwecke nutzbar zu machen. Es ist jedoch nicht ganz klar, welche Informationen dieser Ansatz eigentlich benötigt, insbesondere welches „Wissen“ über die bisher verwendeten Daten notwendig ist, um sie zu dem intendierten Zweck einsetzen zu können.

Insofern ist der Ausgangspunkt zur Verwirklichung der CIM-Idee klar, wenn auch etwas uneinheitlich vorgegeben; er besteht in den gegenwärtig verwendeten Datenmodellen. Ganz und gar nicht klar ist hingegen, zu welchen Strukturen uns die Verwirklichung der CIM-Idee führen soll. Ein wesentlicher Grund hierfür ist, daß wir keine genaue Vorstellung über die Art, den Umfang, die Verwendung von einzubringendem Wissen haben. An dieser Stelle setzen die Methoden der Expertensysteme auf.

2 Der Ansatzpunkt der Künstlichen Intelligenz

Die Künstliche Intelligenz hat die Verwendung von Wissen in Programmen nicht erfunden. Alle klassischen Programme benutzen und verarbeiten Wissen; vielfach sind in ihnen auch Heuristiken, die Behandlung von Unsicherheit u.ä. eingebaut. Man kann die Neuartigkeit der Künstlichen Intelligenz in erster Linie so sehen, daß sie im Gegensatz zur klassischen Programmierung andere Mittel zur Repräsentation und Abarbeitung von Informationen zur Verfügung stellt. In einem traditionellen Programm tritt das Wissen in impliziter und codierter Form auf; die Probleme werden bis zum Ende durchdacht und vollständig in

eine algorithmische Form gegossen, so daß die Problemlösung durch ein (prozedurales) Programm in einer gängigen Programmiersprache erfolgen kann.

Es besteht kein Anlaß, von dieser Vorgehensweise dort abzuweichen, wo sie erfolgreich ist. Für komplexe Problemstellungen, wie sie nicht zuletzt im maschinenbaulichen Bereich auftreten, ist dieser Ansatz jedoch häufig unzureichend. Es bestehen in aller Regel keine globalen Problemlösungen. Vielmehr erschöpft sich das vorhandene und repräsentierte Wissen in einer Vielzahl von lokalen Lösungsvorschlägen, die in dieser oder jener Situation partielle Vorschläge für das weitere Vorgehen machen. Darüber hinaus sind nicht nur einfach Daten bekannt, sondern auch Beziehungen zwischen Daten, Beziehungen über Beziehungen usw. – also ein reich strukturiertes Metawissen. Trotz der (partiellen) Einbeziehung solcher Aspekte sind auch die Lösungen im Expertensystembereich noch durch ihren Inselcharakter bestimmt.

Bei einer reinen Codierung im klassischen Stil würde die vertikale Modularisierung durch die verschiedenen hierarchischen Ebenen, die einem Menschen gerade die Beherrschung einer komplexen Gesamtheit ermöglicht, wieder verschwinden. Man kann den Unterschied zwischen dem, was ein gewöhnliches Programm von einer Situation „versteh“, und nützlichen, darüber hinausgehenden Informationen sehr leicht am Beispiel von CAD-Zeichnungen verdeutlichen.

Eine ganze Reihe von Informationen einer Zeichnung kann das CAD-System zweifellos richtig interpretieren. Andere Informationen sind ihm aber nicht zugänglich; als Beispiele dafür seien genannt:

1. Bereits elementare topologische Zusammenhänge sind dem System nicht geläufig. So verfügt es etwa nicht über die Begriffe „innerhalb“ und „außerhalb“. Man kann so nicht über die triviale Tatsache verfügen, daß sich z.B. ein bestimmter Punkt innerhalb eines gewissen Rechtecks befindet. Natürlich kann man aber jeweils durchaus ein Zusatzprogramm schreiben, das eine einzelne derartige Frage beantwortet; dies geschieht auch vielfach.
2. Ungenauigkeiten in der Linienführung werden nicht als solche erkannt. Stoßen z.B. zwei Linien nicht direkt zusammen, so kann der Mensch aufgrund des intendierten Zweckes in der Regel leicht entscheiden, ob hier ein tatsächlicher Zwischenraum gemeint ist oder ein kleiner Zeichenfehler vorliegt.
3. Die Zuordnung zwischen Beschriftungen und entsprechenden Teilen ist dem System im allgemeinen nicht klar. Bei leichten Variationen von (komplexen) Zeichen kann nicht festgestellt werden, daß es sich um dieselbe Beschriftung handeln soll, auch wenn dies inhaltlich klar ist. Klartexteintragungen beziehen sich in der Regel auf Wissen, das dem System nicht zugänglich ist, aber für die weitere Verwendung der Zeichnung von entscheidender Bedeutung ist.
4. Nicht alle Linien sind bemaßt. Der Ingenieur kennt Maßketten und er kann Toleranzen fortrechnen. Er weiß, wann und wie das zu geschehen hat. Dem System ist das normalerweise nicht möglich.
5. Das System kann nicht ohne weiteres verschiedene Ansichten des gleichen Werkstückes als solche erkennen und richtig zuordnen. Bei einem rotationssymmetrischen Teil

mit einer Nut parallel zur Werkstückachse weiß der Mensch sofort, daß er sie beim Drehen nicht zu beachten hat. Er kann solche Informationen bei der Erstellung eines Arbeitsplanes verwenden.

6. Das System kann bisher noch keine Arbeitspläne aus einer CAD-Zeichnung erstellen. Ebenso kann ein System aus der reinen CAD-Zeichnung keine Stücklisten erstellen.

Hier haben wir zwei typische Beispiele für „Inseln“ vorliegen, die CAD-Welt einerseits und die Welt der Arbeitspläne andererseits.

Die Verbindung von Dateninseln erfolgt normalerweise durch Schnittstellen, auch Interfaces genannt. Solche Schnittstellen benutzen Umrechnungen für die Daten, welche beispielsweise eine Dimension in eine andere transformieren. Die Lage ist hier aber schwieriger, weil die Daten nicht einfach umgerechnet werden können. Vielmehr werden die Daten in beiden Inseln meist ganz verschieden interpretiert und mit Hintergrundwissen zu anderen Dingen in Relation gestellt. So wird der Begriff „rund“ im CAD-Bereich mit einer Kreisgleichung, im Arbeitsplankontext mit Drehbearbeitungen in Verbindung gebracht. Um dazu benötigtes Wissen in einem System vernünftig darstellen zu können, bedarf es zunächst einer geeigneten Modellierung. Die Modellierung soll eine Repräsentation aller interessierenden Informationsaspekte auf angemessene Weise ermöglichen. Für bestimmte Einzelfragen hat die Expertensystemtechnik hier bereits Lösungen erarbeitet.

3 Bisherige Expertensystemtechnologien

3.1 Diagnose

Die Fehlerdiagnose ist ganz besonders für eine exportorientierte Industrie von erheblichem wirtschaftlichen Interesse. Einzelne komplizierte Maschinensysteme können an verschiedenen Teilen der Welt stehen, und die Verfügbarmachung eines Diagnoseexperten ist im Fehlerfall mit erheblichen Kosten verbunden. Auch in normalen Situationen bedingt ein Maschinenfehler Ausfallzeiten, die möglichst klein gehalten werden sollen.

Diagnoseexpertensysteme zählen bisher zu den relativ erfolgreichsten Anwendungen der Künstlichen Intelligenz. Das liegt vor allem daran, daß es viele ökonomisch interessante, aber strukturell noch relativ einfache Aufgaben gibt, denen man mit Expertensystemen besser als mit der herkömmlichen Programmierung beikommen konnte. Im Prinzip handelt es sich darum, eine Verbindung zwischen den Fehlersymptomen und der Fehlerursache herzustellen. Diese Verbindung geschieht durch eine Kette von Einzelbeziehungen, die sich jeweils in Regeln ausdrücken lassen. Ist die Lage nicht zu kompliziert, so lassen sich diese Regeln in übersichtlicher Form mit einer regelbasierten Sprache (wie z.B. OPS 5 oder Prolog) notieren.

Die weitaus überwiegende Anzahl aller Diagnosesysteme ist von dieser Form. Ein erster Schritt zu erweiterten Ausdrucksmöglichkeiten wurde durch die Darstellung taxonomischer Hierarchien in objektorientierten Ansätzen gemacht. Die meisten der heute kommerziell erhältlichen Expertensystemshells erlauben sowohl Regeln als auch Objekthierarchien. In

einigen von ihnen ist dies sehr verfeinert, und Sprachen wie KL-ONE (Knowledge Language ONE) gestatten es, praktisch alle Sachverhalte hinzuschreiben. Ein wesentliches Defizit, auch im Bereich der Diagnosesysteme, besteht jedoch in der Unfähigkeit, zusätzliches Wissen in bessere und schnellere Problemlösungen umzusetzen. Ein typisches Beispiel hierfür ist die Fehlerdiagnose bei einem CNC-Bearbeitungszentrum. Im Sonderforschungsbereich „Künstliche Intelligenz“ wurde deshalb sowohl die „modellbasierte Diagnose“ wie auch die „Verwertung von Erfahrungswissen“ weiterentwickelt (System MOLTKE: Models, Learning and Temporal Knowledge in an Expert System for Technical Diagnosis).

Zentral für die erste Vorgehensweise ist, sich erst einmal ein Modell der zu diagnostizierenden Maschine zu verschaffen. Dieses Modell soll über die reinen Detaildaten hinaus verschiedenartige abstrakte Informationen enthalten. Zwei davon sind von besonderer Wichtigkeit:

- **Die komponentenorientierte Repräsentation:**

Hier wird die Maschine als ein statisches Objekt betrachtet, welches in verschiedene Komponenten und wiederum deren Teile zerfällt. Diese stehen in ganz bestimmten Relationen zueinander und repräsentieren strukturelle Abhängigkeiten. Die Dekomposition geht dabei nur soweit, wie die Möglichkeit der Austauschbarkeit von Teilen gegeben ist.

- **Die prozeßorientierte Repräsentation:**

Hier wird das dynamische Verhalten einer Maschine modelliert, und die auf ihr ablaufenden Prozesse werden auf verschiedenen Abstraktionsstufen dargestellt.

Die prozeßorientierte Darstellung soll sich dabei auf die komponentenorientierte beziehen, was insbesondere einer Kompatibilität der Abstraktionsebenen bedarf. Nach dem Vorbild eines menschlichen Diagnostikers, der sich seine jeweilige Argumentation in einem konkreten Fall aus seiner Maschinenvorstellung heraus aufbaut, ist es nun die Aufgabe eines Modelles \mathcal{M} , in einem Fehlerfall \mathcal{F} das Regelsystem $\mathcal{R} = M(F)$ überhaupt erst zu generieren. Damit wird versucht, das Verhalten eines Systems aus seinem Aufbau heraus abzuleiten.

Um so etwas erfolgreich bewältigen zu können, müssen mindestens zwei Kriterien erfüllt sein:

1. Die *Lokalität der Effekte* bedeutet, daß nicht jedes Teil mit jedem in einem direkten Ursache-Wirkung Zusammenhang steht, sondern daß man Wirkungen entlang lokaler Verbindungen propagieren kann.
2. Die *Zusammensetzbarkeit der Effekte* besagt, daß sich die Verhaltensweise eines Systems in ähnlicher Weise wie das System selbst zerlegen läßt.

Diese beiden Kriterien sind in einfacher Weise bei Schaltkreisen erfüllt, die auch sonst strukturell nicht zu kompliziert sind. Deshalb ist es nicht verwunderlich, daß sich die Anwendungen modellbasierter Diagnose vor allem mit diesem Bereich auseinandergesetzt haben; für MOLTKE mußten spezielle Mechanismen entwickelt werden.

Der zweite Punkt ist, Erfahrungen einbringen zu können. Erfahrungen bieten keine absoluten Sicherheiten, aber gute heuristische Vorgehensweisen. Abstrakt gesehen liegen hier Analogieschlüsse

zugrunde. Man orientiert sich an ähnlichen gelösten Problemen und transformiert die damaligen Lösungen in geeigneter Weise. Zwei Hauptprobleme zeigen sich:

1. Definition eines geeigneten Ähnlichkeitsbegriffes.
2. Transformation der Lösung.

Zu beiden Fragen wurden in MOLTKE grundsätzliche Lösungen erarbeitet.

Vom Standpunkt eines Gesamtmodelles aus gesehen steht die Diagnose zunächst in engem und direkten Zusammenhang mit der „Reparatur“ und darüber hinaus mit der Wartung. Dies gliedert sich wieder in den weiteren Rahmen der Qualitätssicherung ein und ist somit nicht von der Meßtechnik zu trennen. Wir wollen zwei Aspekte hervorheben, die in diesem Zusammenhang die Expertensystemtechnologie beeinflussen:

1. Diagnose ist kein reines Erkenntnisproblem, sondern mit nachfolgenden Handlungen verbunden. Letztere können den Erkenntnisprozeß wesentlich beeinflussen oder sogar suspendieren.
2. Der Einsatz von Meßtechnik verlangt die schnelle Aufnahme, Verarbeitung und teilweise Deutung von Signalen. Hier kommen Realzeitanforderungen ins Spiel, ohne deren Lösung die Qualität eines Expertensystems gewisse Schranken nicht überwinden wird. Es bleibt aber fraglich, ob das in der Symbolverarbeitung ausgedrückte Paradigma der Künstlichen Intelligenz der Behandlung von Sensordaten angemessen ist.

3.2 Planung

Planungssysteme wurden allgemein und so auch im Maschinenbau weit weniger behandelt als Diagnosesysteme. Das hat nicht zuletzt mit der ungleich größeren Komplexität von Planungsaufgaben zu tun; Planungsexpertensysteme sind dementsprechend auch nur an relativ einfacheren Anwendungsgegenständen realisiert worden.

Die meisten Planungsaufgaben in der Technik fielen in den Bereich der Konfigurierung. Hier ist das zu planende Objekt in seiner Struktur mehr oder weniger fest vorgegeben, bestimmt werden müssen die Werte von gewissen Parametern (die aber selber noch gegebenenfalls eine Struktur haben können). Die Werte der Parameter unterliegen dabei gewissen allgemeinen oder auch speziell vom Benutzer gewünschten Restriktionen. Diese Restriktionen können auf einem mehr oder weniger hohen Abstraktionsniveau formuliert werden. Solche Konfigurationsaufgaben wurden früher in regelbasierter Form entworfen; heute stehen dafür die entsprechend flexibleren kommerziellen Systeme und Werkzeuge zur Verfügung.

Eine der Hauptplanungsaufgaben im Maschinenbau besteht in der Konstruktion. Der Konstruktionsprozeß läßt sich in mehrere Phasen zerlegen:

- Planen,
- Konzipieren,

- Entwerfen und
- Ausarbeiten.

Jeder Schritt stellt dabei Informationen für die nachfolgenden Phasen bereit. Die ökonomisch interessanteste Phase ist dabei die der Konzeption, weil hier die strukturell und finanziell wichtigsten Entscheidungen getroffen werden. Globale Einflußgrößen spielen eine wesentliche Rolle, getroffene Entscheidungen können Auswirkungen haben, welche sich durch die gesamte Konstruktion hin ausbreiten und u.U. eine Vielzahl vorher getroffener Entscheidungen rückgängig machen.

Im Gegensatz zur Konfiguration ist bei der Konstruktion die Struktur des herzustellenden Objekts keineswegs klar. Ausgangspunkt ist vielmehr die vom Benutzer gewünschte Funktionalität, die in eine technische Realisierung überführt werden muß. Das System IDA (Intelligent Design Assistant) und seine Nachfolger IDA-I/II sowie IDAX, die ebenfalls im Sonderforschungsbereich „Künstliche Intelligenz“ in Kaiserslautern entwickelt wurden, gehen hier einen neuartigen Weg, indem sie gerade diese Funktionalität als Ausgangspunkt nehmen.

Die Vorgehensweise ist dabei so, daß die gewünschte Funktion top-down in kompliziertere Funktionsstrukturen aufgelöst wird. Dies führt auf eine funktionale Spezifikation des gesuchten Objektes, welche spätestens auf der Ebene der primitiven Funktionen in eine technische Realisierung überführt werden muß. Die Abhängigkeiten der betroffenen Realisierungsentscheidungen werden dabei explizit in symbolischer Form verwaltet und ermöglichen auf diese Weise ihre eventuelle „intelligente“ Revision. Die Detaillierung ist dabei einfach erweiterbar, z.B. im Hinblick auf eine geometrische Modellierung der Lösung in einem CAD-System oder die Verwendung verschiedener Konstruktionsmethodiken. Die Systeme wurden inzwischen auch so erweitert, daß sie aus früheren Prototypen „lernen“ können.

Die Konstruktion im engeren Sinne ist nun wieder nicht von weiteren Prozessen wie Arbeitsplanung, Prüfplanung, Montage, Fertigung usw. zu trennen: Sie hat sich in die Produktionsplanung und -steuerung zu integrieren. Eine zentrale Forderung ist in diesem Kontext die Integration in Standardsoftware.

4 Ansätze am DFKI

Das wichtigste langfristige Ziel im Deutschen Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI) ist die Schaffung eines *intelligenten Fachsystems*. Die bisherigen Ansätze der Künstlichen Intelligenz allgemein, wie auch speziell bei den Expertensystemen, teilen mit der traditionellen Datenverarbeitung wie oben bemerkt das Defizit, daß ihre Lösungen zu isoliert sind. Die Expertensysteme haben stets einen sehr eingeschränkten Kompetenzbereich und benehmen sich in zu vielen Situationen noch „dumm“. Dieser Mangel an Intelligenz ist nicht dadurch zu beheben, daß man das System mit noch mehr Detaildaten versieht. Es müssen vielmehr Maßnahmen ergriffen werden, deren Effekt sich darin auswirkt, daß sich das System so benimmt, als wenn es mehr gesunden Menschenverstand hätte.

In diesem Sinne wurde in einem Bereich des DFKI ein *intelligentes Ingenieursystem* geschaffen. Ein Ingenieur

- kennt Daten und technische Einzelheiten,
- kennt Methoden und Verfahren und weiß, wo er sie einzusetzen hat,
- weiß darüber hinaus seine Kenntnisse in Kontexte einzuordnen und sie in einem alltäglichen Sinne vernünftig zu gebrauchen.

Diese Fähigkeiten versetzen ihn z.B. in die Lage, eine CAD-Zeichnung richtig zu interpretieren und sinnvoll zu verwenden. Viele seiner Fähigkeiten und Kenntnisse stammen nicht aus Fachlehrbüchern, sondern stellen ganz alltägliches Wissen dar. Dazu gehören etwa so einfache Begriffe wie „innen“ und „außen“, „rechts“ und „links“.

4.1 ARC-TEC

Das erste größere Projekt war in diesem Kontext ARC-TEC: Akquisition, Repräsentation und Compilation von technischem Wissen. Ausgangspunkt von ARC-TEC ist eine Symbiose der CIM-Idee und der Expertensystemtechnologie. Damit ist der Zielpunkt klar definiert: Angestrebt wurde ein umfassendes Wissensmodell. Dieses sollte zunächst in Teilen des Maschinenbaus approximiert werden. Ausgegangen wurde zwar schon von einfacheren Situationen, die sich aber nicht nur auf einen speziellen Aspekt wie Diagnose, Wartung oder Planung beschränken.

Das mit einem Objekt in einem Fertigungsprozeß zusammenhängende Wissen wurde vielmehr zunächst in zusammenhängender Form dokumentiert und dann erst für einzelne Zwecke zur Verfügung gestellt. Während bisher die Funktionalität der Maschine nach ihrer Konstruktion „vergessen“ wurde, wurde jetzt der Tatsache Rechnung getragen, daß gerade aus der Funktionalität einer Maschine im Fehlerfall wesentliche Rückschlüsse auf die Fehlerursachen gemacht werden können.

Allgemein ermöglicht das Wissensmodell auch, Daten und Informationen, die in einer Periode der Lebensdauer einer Maschine anfallen, in einer anderen Periode sinnvoll zu verwenden. Dies geht aber in der Regel nicht durch einfachen Kopierprozeß, sondern bedarf einer Interpretation und meistens auch einer Transformation des repräsentierten Wissens.

Modelle spielten in allen Teilen von ARC-TEC eine herausragende Rolle. Die Akquisition kann in komplizierten Fällen überhaupt erst anhand von Modellen vorgenommen werden. Bei der Repräsentation wurde auf vorhandenen Modellvorstellungen, wie sie u.a. auch in IDA oder MOLTKE ihren Ausdruck finden, aufgebaut.

Bei den verschiedenen Modellaspekten wurde einer besonders betont, und zwar derjenige der technischen Organisation. Dieser beinhaltet eben mehr als die rein physikalische Beschreibung eines System. Der letzteren ist Genüge getan, wenn man die Grundbausteine und die prinzipiellen Zusammensetzungsmöglichkeiten des Systems vorstellt. In der Technik interessiert aber gerade die Art und Weise, wie dieses zu geschehen hat. Die Organisationsformen stellen einen wesentlichen Punkt in der Modellierung des *intelligenten Ingenieursystems* dar. Eine wichtige Rolle spielten dabei pragmatische Aspekte wie die erwähnte Funktionalität sowie Art, Ort und Häufigkeit des Einsatzes.

Der Einsatz von KI-Produkten in der Praxis ist bisher häufig an Effizienzdefiziten gescheitert. Hier liegt ein klassisches Problem, nämlich der Trade-off zwischen Allgemeinheit und Effizienz. Als weitere Problematik haben wir die Frage der Verwendung von Standardsoftware genannt; hier liegt das Problem der Amalgamierung der Verarbeitung von deklarativem und prozeduralem Wissen. In ARC-TEC sind zu diesem doppelten Zweck Wissenscompilationsmethoden zur Transformation deklarativer, höherer Repräsentationen in sowohl effizientere Formen auf der gleichen Ebene wie auch in prozedurale, niedere Rechnerimplementationen erfaßt. Nur durch eine geeignet flexible Vorgehensweise konnte hier den Eigenheiten verschiedener Aufgabenstellungen Rechnung getragen werden.

Es ist ersichtlich, daß es sich bei dem Bemühen, Wissen aus einem Gebiet formal zu repräsentieren, um eine interdisziplinäre Aufgabe handelt. Neben den „normalen“ Techniken der Informatik und ihren Weiterentwicklungen in der Künstlichen Intelligenz ist die Expertise des Fachmannes, in diesem Falle des Maschinenbauingenieurs, gefragt. Es handelt sich keineswegs darum, daß nur „Maschinenbauwissen“ abgegeben wird (etwa durch einen Briefschlitz eingeworfen), sondern es muß gemeinsam erarbeitet und strukturiert werden. Aus diesem Grunde ist das ARC-TEC Projekt ein Gemeinschaftsprojekt zwischen dem DFKI und dem CIM-Center Kaiserslautern (Prof. Dr. G. Warnecke). Diese Zusammenarbeit ist richtungsweisend für zukünftige Forschungen auf diesem Gebiet, nur so können wirkliche Innovations sprünge erreicht werden.

Die Resultate dieses auf breiter Front integrierenden Ansatzes sind mannigfach: Die im ARC-TEC Projekt entwickelten Werkzeuge und Verfahren sind auf die spezifischen Erfordernisse des technischen Anwendungsgebiets abgestimmt. Am Beispiel der Erzeugung von Arbeitsplänen und insbesondere von NC-Programmen für rotationssymmetrische Teile, ausgehend von CAD-Zeichnungen, wurde ihre Brauchbarkeit demonstriert: Die Kombination aus Akquisitionstools und Repräsentationssprachen erlaubt es, auch sehr spezielles Expertenwissen – ggf. in Abhängigkeit von den Gegebenheiten der einzelnen, konkreten industriellen Umgebung – zu ermitteln, und darzustellen. Die Verarbeitung wurde im System PIM (Planning in Manufacturing) realisiert.

Zentraler Gedanke bei der Wissensmodellierung ist dabei die Vorgehensweise des menschlichen Experten: Aufgrund seiner Expertise erkennt der Mensch in der gegebenen CAD-Zeichnung geometrisch/technologische Einheiten, mit denen er konkretes Wissen über den zu erstellenden Arbeitsplan und die Gestalt des NC-Programms verbindet. Diese Einheiten, die sogenannten *Features*, entsprechen der speziellen Fachterminologie des jeweiligen Experten und werden in einer geeigneten Sprache repräsentiert. Das mit den Features verbundene Wissen des Experten findet seinen Niederschlag in sogenannten *Skelettplänen*. Auf der Basis dieses repräsentierten Wissens kann der Arbeitsplan durch eine Folge von Abstraktion, Assoziation und Verfeinerung erzeugt werden: Die Featureerkennung erzeugt auf der Basis der CAD-Zeichnung die Featurestruktur des Werkstücks. Damit liegt eine Beschreibung des Werkstücks in der problemorientierten Terminologie des Experten vor. Anhand dieser Struktur werden dann die passenden Skelettpläne selektiert und zum fertigen Arbeitsplan zusammengefügt. Nach dem Einsetzen der konkreten Maße des Werkstücks und der eigentlichen Codeerzeugung liegt das gewünschte Resultat vor.

Die effizienten Verfahren zur Abarbeitung des repräsentierten Wissens führen zu kurzen Laufzeiten des fertigen Systems: Für gängige Wellen erzeugt PIM den fertigen Plan in

Sekunden.

Die Einbindung in die Welt konventioneller Software gelingt über die Verwendung genormter Austauschformate (STEP, CLDATA) und die Einbindung kommerzieller NC-Programmier-systeme (UNC).

Darüberhinaus zeigen die entwickelten Werkzeuge und Verfahren die erwünschte Flexibilität in mehrfacher Hinsicht: Das Anwendungsspektrum konnte auf andere Fertigungsverfahren (Frästeile) ausgeweitet werden. Im Projekt TOOCON fanden Werkzeuge und Methoden Anwendung im Bereich der Konfiguration. Schließlich erwiesen sich die Repräsentationsformalismen als geeignet zur Darstellung von Konstruktionswissen. Die Ähnlichkeiten und Unterschiede von Fertigungs- und Konstruktionsfeatures wurden zum Gegenstand eigener Untersuchungen und führten zu interessanten Ergebnissen.

Insgesamt demonstrierte ARC-TEC in überzeugender Weise die Vorteile einer intensiv integrierenden und interdisziplinären Vorgehensweise über einen längeren Zeitraum. Vor dem Hintergrund der großen CIM-Idee stellen Systeme wie das in ARC-TEC entwickelte PIM freilich auch nur einzelne Inseln im Gesamtkomplex dar. Ein möglicher Schritt in Richtung auf eine weitergehende Integration ist, die Existenz vielfältiger separater Systeme, die jedes für sich den Produktionsprozeß partiell unterstützen, als gegeben hinzunehmen. Im Sinne der CIM-Idee gilt es dann, den Benutzer bei der Anwendung der Einzelsysteme zu unterstützen und durch optimalen Einsatz dieser Systeme die Problemlösung zu vereinfachen. Dieser Ansatz ist Gegenstand des Projekts IMCOD.

4.2 IMCOD

Das Projekt IMCOD (Intelligent Manager for Comprehensive Design), das die Idee von ARC-TEC in spezieller Weise weiterentwickelt, befaßt sich mit der Entwicklung eines *Designmanagers*. Dieses Nachfolgeprojekt von ARC-TEC wurde im Mai dieses Jahres begonnen. Zentrale Aufgabe des IMCOD-Systems ist es, die Ratschläge mehrerer selbständiger Experten vor dem Hintergrund eines globalen, aufgabenbezogenen Wissens zu bewerten und zu integrieren. Das ist ein ganz normales Problem eines großen Betriebes, für welches eine Computerunterstützung wünschenswert wäre. Damit wird eine für die Designaufgabe global vernünftige Lösung unter maximaler Berücksichtigung der verschiedenen Experten erreicht.

Der Beitrag jedes einzelnen Experten, z.B. für Konstruktion, Fertigung, Montage, Wartung oder Recycling, besteht in der Bereitstellung seines speziellen professionellen Wissens und seiner Entscheidungsvorschläge. Prinzipiell gilt dies unabhängig davon, ob der einzelne Experte ein Mensch, ein Expertensystem oder ein konventionelles Programm ist, das in einem Teilbereich des Produktentwurfs irgendeine Unterstützung liefert.

Angestrebtes Resultat: Das IMCOD-System (vgl. Abb. 1) unterstützt den umfassenden Produktentwurf, indem es die Kommunikation mit verschiedenen existierenden Unterstützungssystemen bzw. Experten erleichtert. Die Beschleunigung des notwendigen Wissenstransfers und die Verkürzung der Umlaufzeiten sowie die einfachere direkte Rückkopplung mit den einzelnen Experten führen letztlich nicht nur zu erhöhter Flexibilität, sondern auch zu qualitativ besseren Resultaten.

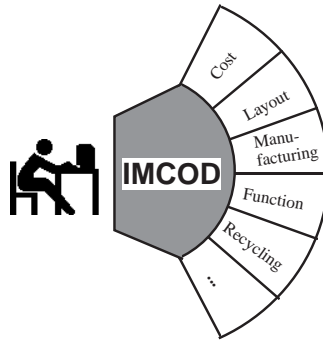


Abbildung 1: Das IMCOD System

Zu diesem Zweck integriert IMCOD spezielle, existierende konventionelle und wissensbasierte Komponenten. Die dabei anfallenden Arbeiten, wie Aufgabenverteilung an die einzelnen Experten, Terminologieabgleich, Ergebnisbewertung und Entscheidung, erfordern ein globales Wissen über die konkrete Aufgabe „Produktentwurf“ ebenso wie Wissen und Techniken eines „Managers“. Unter Einsatz von KI-Techniken werden unter anderen die folgenden Problemfelder behandelt:

- **Kohärenz:** Behandlung divergierender Terminologien, die aus unterschiedlichen Sichtweisen resultieren und vor einem gemeinsamen Hintergrund nur partiell verstanden werden. Jeder Experte nutzt seine fachspezifische Terminologie; der Designmanager muß vermitteln.
- **Entscheidung:** Bewertung konkurrierender Präferenzen und unterschiedlicher Expertise. Die Aussagen des einzelnen Experten gelten von dessen Standpunkt aus absolut. Der Manager muß im Kontext der globalen Aufgabe bewerten und relativieren.
- **Integration:** Kombination und Erweiterung von Expertensystemen und entscheidungsunterstützenden Techniken, um Situationen zu beherrschen, die im einzelnen nur teilweise verstanden sind und bei denen man sich auf Wissenseinheiten stützen muß, über die nur bestimmte Relationen und Konsequenzen bekannt sind.

Die Entwicklung des IMCOD-Systems deckt drei grundlegende Fragestellungen ab:

1. Spezifikation der Anforderungen auf der funktionalen Ebene und der Wissensinhalte der lokalen Experten.
2. Entwicklung von bereichsspezifischen Repräsentationssprachen auf einer abstrakten Ebene zur Beschreibung der Expertise des Designmanagers. Repräsentationsformalismen zur Produktmodellierung müssen im Hinblick auf eine Integration in bestehende betriebliche Strukturen zu existierenden Standards kompatibel sein.

3. Ausarbeitung von Techniken für die Designphase unter dem Paradigma einer umfassenden Problemlösung mit einer zentralen Koordination der kooperierenden Prozesse innerhalb einer Gruppe.

Als ein Beispiel für mögliche abweichende Terminologien betrachten wir die zur Darstellung von *Wissen* verwendete Sprache der **Features**, die im Bereich CIM Verwendung findet.

Die meisten auf diesem Gebiet tätigen Forscher stimmen darin überein, daß ein Feature eine Abstraktion detaillierterer Design- oder Fertigungsinformationen darstellt. In diesem Beitrag wird der Term Feature definiert als ein auf geometrischen und technologischen Daten eines Produkts basierendes Beschreibungselement, mit dem ein Experte in seinem Fachgebiet gewisse Informationen assoziiert.

Features werden erstens nach ihrer Art klassifiziert als *Komplexe Features*, etwa Kugellagersitz oder Bohrung, und als *Atomare Features*, etwa Toroid, Formtoleranz oder Oberflächengüte. Zweitens werden Features nach der Art ihrer Anwendung klassifiziert als *Fertigungsfeatures* (z.B. *Drehfeatures*, wie Schulter oder Absatz, *Fräsfeatures*, wie Stufe oder Tasche etc.), *Designfeatures*, z.B. Kupplung oder Lagersitz, etc. Es ist wichtig zu berücksichtigen, daß die erwähnten Features gewisse geometrische Formen beschreiben und daß sie mit Informationen über diese Form verbunden sind. Damit hat die vorgeschlagene Featuresprache eine Syntax (Formbeschreibung) und eine Semantik (Beschreibung der assoziierten Information).

Anhand einer Lagerung (siehe Abbildung 2) werden nun Features (bzw. deren Syntax) aus den Bereichen Design (CAD) und Fertigungsplanung (CAPP) verglichen. Der Konstrukteur

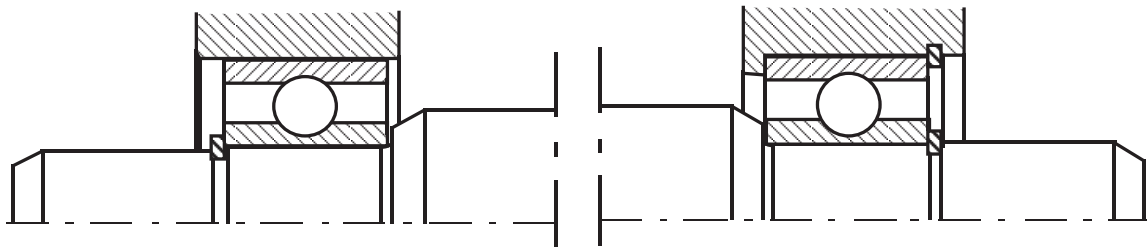


Abbildung 2: Unterschiedliche Terminologie: Lagerung

denkt in Begriffen der Funktionalität, die zu einer geeigneten Featurestruktur des zu entwerfenden Werkstücks führen. Das funktionale Element *Lagerung* besteht aus einem *Loslagersitz* und einem *Festlagersitz*; der *Loslagersitz* wird durch die einfachen Designfeatures *Nut*, *Zylinder* und *Freistich* gebildet.

Der Experte für Fertigungsplanung geht von der geometrisch/technologischer Beschreibung des Werkstücks aus, die das Resultat des CAD ist. Anhand dieser Informationen erkennt der Experte seine eigenen Fertigungsfeatures: Die primitiven Elemente der Basisflächen sind zu fertigungsabhängigen höheren Elementen zusammengefaßt, die der Experte mit Fragmenten des Fertigungsplans, den sogenannten *Skelettplänen*, assoziiert. So wird aus der Kombination einer *Planfläche*, *Fase* und *Langdrehfläche* ein *Zapfen* erkannt, der selbst wieder als ein Bestandteil der *Welle* gesehen wird.

Vergleichen wir die Features der verschiedenen Experten, so ist festzustellen:

1. Einige grundlegende Features treten in beiden Featurestrukturen auf, etwa die *Nut*. Während die damit beschriebenen Elemente in beiden Fällen dieselben sind, verbinden die Experten unterschiedliche Informationen damit.
2. Die domänenspezifische Sichtweise der Experten kann zu unterschiedlichen Namen für das gleiche geometrische Element führen: Die *Abschrägung* des CAD-Experten ist ein funktionsbezogener Begriff – unter dem Gesichtspunkt der Montage – während der Fertigungsplaner dasselbe Element aus Fertigungsgesichtspunkten heraus als *Zapfen* erkennt.
3. Auf höheren Ebenen unterscheiden sich die Features: Die niederen Elemente werden in unterschiedlicher Weise aggregiert. Dies ist das direkte Ergebnis der domänenabhängigen Sichtweise der Experten. Während *Lagerung* als höheres funktionales Feature mehrere Oberflächen zusammenfaßt, die gemeinsam die beiden *Lagersitze* bilden, formen diese Flächen kein einheitliches Fertigungsfeature, da sie im ansteigenden und abfallenden Teil der Welle auftreten und daher im allgemeinen nicht ohne Werkzeugwechsel oder Umspannung hergestellt werden können.

Obwohl also einige Features (bzw. deren Syntax) in beiden Bereichen genutzt werden können, trennen prinzipielle Unterschiede sowohl in den einzelnen Features als auch in den Featurestrukturen die beiden Domänen. Komplexe Features, die mehr Informationen tragen, führen im allgemeinen zu größeren Unterschieden. Die Grundidee eines Features als ein Element, das Detailinformationen zusammenfaßt und Expertenwissen repräsentiert, ist jedoch in beiden Bereichen dieselbe.

Erste Ideen über einen *Übersetzer* zwischen diesen beiden (Feature-) Sprachen wurden bereits mit dem Ziel einer Integration in dem Projekt ARC-TEC entwickelt.

Insgesamt verfolgt IMCOD in homogener Fortführung existierender Entwicklungen die Aufgabe, die Spanne zwischen divergierenden, hochgradig spezialisierten Unterstützungstools einerseits und der Anforderung einer zunehmend global-integrativen Sicht des Produktentwurfs andererseits zu überbrücken, indem spezialisierte Komponenten vor einem globalen Hintergrund integriert und ihre Ergebnisse zu einer globalen Lösung zusammengeführt werden.

5 Abschlußbetrachtung

In diesem Beitrag haben wir das Spannungsfeld diskutiert, in dem der für die CIM-Idee (und nicht nur für diese) zentrale Integrationsaspekt steht. Dieses Spannungsfeld ist durch eine große und ständig steigende Heterogenität gekennzeichnet, die die für Anwendungen so wichtige Verbindung von Insellösungen zunehmend erschwert. Solche Verbindungen lassen sich nicht einfach durch Schnittstellen und Interfaces realisieren. Die Problematik verlangt vielmehr die Einbettung in einen gemeinsamen Hintergrund. Eine Kette von Möglichkeiten, den gemeinsamen Hintergrund durch Expertensysteme zu schaffen, haben wir mit aufsteigender Komplexität vorgestellt. Alle Anzeichen zeigen, daß die Entwicklung weiter in diese Richtung gehen wird.

Literatur

- [1] B. Bachmann, A. Bernardi, C. Klauck, R. Legleitner, M.M. Richter. IMCOD — Intelligent Manager for Comprehensive Design. In *Workshop Notes (ECAI '92): Concurrent Engineering: Requirements for Knowledge-Based Design Support*, 1992.
- [2] A. Bernardi, H. Boley, C. Klauck, P. Hanschke, K. Hinkelmann, R. Legleitner, O. Kühn, M. Meyer, M.M. Richter, F. Schmalhofer, G. Schmidt, W. Sommer. ARC-TEC: Acquisition, Representation and Compilation of Technical Knowledge. In *Proc. 11th International Workshop on Expert Systems & their Applications, Avignon, France*, Band 1, S. 133–145. EC2, 1991.
- [3] A. Bernardi, C. Klauck, R. Legleitner, M. Schulte, R. Stark. Feature Based Integration of CAD and CAPP. In F.-L. Krause, D. Ruland, H. Jansen (Hrsg.), *CAD '92 — Neue Konzepte zur Realisierung anwendungsorientierter CAD-Systeme*, S. 295–311. Springer-Verlag, 1992.
- [4] *Wissensbasierte Systeme für Konstruktion und Arbeitsplanung*. VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb, Gesellschaft für Informatik, VDI Verlag, 1993.
- [5] R. Legleitner, A. Bernardi, C. Klauck. PIM: Skeletal Plan based CAPP. In N.W.M. Ko, S.T. Tan (Hrsg.), *Proc. Int. Conf. on Manufacturing Automation, Hong Kong, 1992*, S. 139–150. The University of Hong Kong, 1992.
- [6] J. Paulokat, H. Ritzer. IDAX — Unterstützung der Kontrolle bei der Konfigurierung durch ein problemklassenspezifisches TMS. In F. Puppe, A. Günter (Hrsg.), *Expertensysteme '93 (XPS-93), Hamburg*, S. 70–83, Berlin, 1993. Springer Verlag.
- [7] T. Pfeifer, M.M. Richter (Hrsg.). *Diagnose von technischen Systemen*. Deutscher Universitäts-Verlag, 1993.
- [8] H. Weule. Expertensysteme im industriellen Einsatz. In F. Puppe, A. Günter (Hrsg.), *Expertensysteme '93 (XPS-93), Hamburg*, S. 1–12, Berlin, 1993. Springer Verlag.