

# Forschungszentrum Karlsruhe

Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 5982

## Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

Hubert B. Keller, K. Christoph Ranze<sup>1</sup> (Hrsg.)

Institut für Angewandte Informatik  
Projekt Schadstoff- und Abfallarme Verfahren

<sup>1</sup>Technologie-Zentrum Informatik, Universität Bremen

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

1998



## **Zusammenfassung**

Am 5.3.1997 fand in Bad Honnef bei Bonn auf der 4. Tagung „Expertensysteme“ der 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umwelthanwendungen" statt. Ziel dieses Workshops war es, den Erfahrungsaustausch über die Entwicklung und Anwendung von wissensbasierten Systemen in den Bereichen Umweltschutz, Umweltforschung und Umweltplanung zu unterstützen. Dabei sollten gezielt Entwicklungen angesprochen werden, die sich mit den umweltrelevanten Auswirkungen menschlichen Handelns im betrieblichen Umfeld oder kommunalen Bereich beschäftigen.

## **Workshop "Knowledge based Systems in Environmental Applications"**

### **Abstract**

On March, 5<sup>th</sup>, in 1997 the 1<sup>st</sup> workshop "Knowledge based Systems in Environmental Applications" took place at Bad Honnef near Bonn at the 4<sup>th</sup> conference "Expert Systems". The aim of this workshop was to support the exchange of experience in development and application of knowledge based systems in environmental protection, research and planning. Systems related to environmental effects of human activities in operational or municipal areas should be addressed primarily.

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

## Vorwort

Ziel dieses Workshops war es, den Erfahrungsaustausch über die Entwicklung und Anwendung von wissensbasierten Systemen in den Bereichen Umweltschutz, Umweltforschung und Umweltplanung fortzusetzen. Dabei sollten gezielt Entwicklungen angesprochen werden, die sich mit den umweltrelevanten Auswirkungen menschlichen Handelns im betrieblichen Umfeld oder im kommunalen Bereich beschäftigen. Mögliche Anwendungsgebiete entsprechender Systeme sind beispielsweise:

- Emissionsminderung:  
Wissensbasierte Steuerung und Regelung technischer Prozesse (Produktion, Müllverbrennung),
- Wissensbasierte Systeme im Verkehrsbereich:
- Abfallvermeidung:  
Unterstützung von Demontage-, Sortier- und Recyclingprozessen durch wissensbasierte Systeme
- Abwasserbehandlung/Trinkwassergewinnung:  
Prognose, Steuerung und Regelung der Wasserqualität bei anthropogenen Veränderungen (Schadstoffeinleitung usw.), Steuerung von Kläranlagen
- Land- und Forstwirtschaft:  
Diagnose von Schädlingsbefall und Pflanzenkrankheiten, Integrierter Pflanzenschutz, Minimierung des Pestizideinsatzes
- Unfälle/Störfälle:  
Expertensysteme zur Risikoabschätzung, Störfallmanagementsysteme
- Altlasten:  
Expertensysteme zur Beurteilung der Risiken und zur Erstellung von Sanierungsplänen
- Umweltrecht:  
Wissensbasierte Unterstützung von Genehmigungsverfahren
- Umweltmonitoring:  
Wissensbasierte Analyse von Satellitenbildern zur Erkennung von Umweltzuständen (Landnutzungsklassifikation, Erkennung von Vegetationsschäden)

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

Der Workshop soll den Stand der Entwicklung und Anwendung der wissensbasierten Systeme im Umweltbereich diskutieren. Insbesondere erscheint uns der kritische Diskurs im Spannungsfeld zwischen der akademischen Entwicklung von Prototypen und der Anwendung in der Praxis notwendig. Bisher sind eine Reihe vielversprechender Ansätze und auch Prototypen in diesem Bereich entstanden, von denen es aber nur die wenigsten bis zur Produktreife geschafft haben. Bewußt soll dieser Workshop die Ergebnisse von früheren Veranstaltungen zu diesem Thema aufnehmen und weiterführen (XPS 93, Umweltinformatik-Symposien 94-96, Bremer KI-Pfingstworkshop 96).

Aufgrund der Aktualität und der Umweltsrelevanz des Themas ist geplant, diesen Workshop unter der Thematik „Wissensbasierte/intelligente Systeme in Umweltsanwendungen“ fortzusetzen, insbesondere mit einem Augenmerk auf den Methoden- und Systemanforderungen aus den Anwendungen.

Hubert B. Keller, K. Christoph Ranze (Veranstalter)

## Inhaltsverzeichnis

1	PROBLEM STATEMENTS .....	13
2	DER EINSATZ DES WISSENSBASIERTEN SYSTEMS XUMA-GEFA ZUR GEFÄHRDUNGSABSCHÄTZUNG VON ALTLASTEN IN SACHSEN UND BADEN-WÜRTTEMBERG .....	19
2.1	Einführung.....	19
2.2	Das Baden-Württemberger Bewertungsverfahren .....	19
2.3	Das Expertensystem „Umweltgefährlichkeit von Altlasten“: XUMA-GEFA.....	20
2.4	Das Programm zur Bewertung von Altlastverdachtsflächen GEFA .....	22
2.5	Die Einordnung der Komponenten des Systems XUMA-GEFA in die Struktur der Altlastenbehandlung des Landes Sachsen.....	25
2.6	Schlußbemerkungen .....	26
2.7	Literatur .....	26
3	PEMOSYS - EIN VALIDIERTES HYBRIDES EXPERTENSYSTEM ZUM PFLANZENSCHUTZMITTEL- MONITORING .....	31
3.1	Zusammenfassung .....	31
3.2	Einige Ergebnisse der Technikbewertung .....	32
3.3	Probleme beim Einsatz von PEMOSYS .....	33
3.4	Literatur .....	33
4	KONZEPTUELLE UND QUALITATIVE MODELLIERUNGSMETHODEN FÜR INTEGRIERTE ENTSCHEIDUNGSUNTERSTÜTZUNG IM UMWELTBEREICH .....	37
4.1	Einleitung .....	37

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umwelthanwendungen"

4.2	Aufgabenbereiche der Entscheidungsunterstützung im Umweltbereich.....	38
4.3	Konzeptuelle Modellierung.....	40
4.4	Qualitative Modellierung.....	41
4.5	Schlußfolgerungen mit den Modellen .....	43
4.6	Diskussion und Ausblick.....	46
4.7	Danksagungen .....	47
4.8	Referenzen.....	47
5	<b>EXPERTENSYSTEM ZUR UNTERSTÜTZUNG DER UMWELTFREUNDLICHEN UMGESTALTUNG VON PRODUKTIONSPROZESSEN AM BEISPIEL DER LACKIERTECHNIK .....</b>	<b>51</b>
5.1	Einleitung .....	51
5.2	Die objektorientierte Wissensbank und die Methode.....	52
5.3	Ein praktisches Beispiel .....	56
5.4	Literatur .....	59
6	<b>CORBA-BASIERTE AKTIVE REGELVERARBEITUNG UND KLASSIFIKATION AKTIVER FUNKTIONALITÄT FÜR EINSATZMÖGLICHKEITEN IN UMWELTINFORMATIONSSYSTEMEN .....</b>	<b>63</b>
6.1	Einleitung .....	63
6.2	Systemarchitektur.....	65
6.3	Aktive Mechanismen in UIS: Klassifikation - Beispiele .....	68
6.4	Zusammenfassung und Ausblick.....	69
6.5	Literatur .....	70
7	<b>WO WÄCHST WAS? - EINSATZ VON DATA MINING- TECHNIKEN ZUR ANALYSE ÖKOLOGISCHER STANDORT- UND PFLANZENDATEN .....</b>	<b>75</b>
7.1	Beschreibung von Standortansprüchen .....	76
7.2	Terra Botanica .....	78
7.3	Automatische Extraktion von Standortansprüchen .....	79
7.4	Durchführung der Experimente im Data Mining-System Kepler .....	80
7.5	Lernläufe und Ergebnisse .....	82
7.6	Zusammenfassung und Ausblick.....	84
7.7	Literaturverzeichnis.....	84

8	<b>ELWIRA - ELEMENTE EINES WISSENSBASIERTEN SYSTEMS ZUR REDUZIERUNG UMWELTRELEVANTER AUSWIRKUNGEN</b> .....	89
8.1	Motivation .....	89
8.2	Wissensbasierte Methoden .....	91
8.3	Ein Ansatz zur Behandlung von Abwasser .....	97
8.4	Aufbau des wissensbasierten Systems.....	103
8.5	Diskussion und Ausblick.....	105
8.6	Literatur .....	106
9	<b>AUTOMATISCHE REGELGENERIERUNG ZUR BESCHREIBUNG DYNAMISCHER SYSTEME</b> .....	109
9.1	Einleitung .....	109
9.2	Maschinelles Lernen.....	109
9.3	Anwendung Maschinellen Lernens im C3R-System .....	111
9.4	Zusammenfassung und Ausblick.....	113
9.5	Literatur .....	113
10	<b>ARTIFICIAL INTELLIGENCE MEETS ARTIFICIAL INSEMINATION - THE IMPORTANCE AND APPLICATION OF SYMBOLIC RULE EXTRACTION FROM TRAINED ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS</b> .....	117
10.1	Introduction .....	117
10.2	The Importance of Rule Extraction Algorithms.....	118
10.3	A Classification Schema for Rule Extraction Algorithms .....	119
10.4	Examples of Decompositional, Pedagogical, & Eclectic Techniques.....	120
10.5	The Problem Domains.....	122
10.6	Conclusion and Open Research Problems.....	129
10.7	References .....	130
11	<b>ABSCHLUßDISKUSSION</b> .....	135
11.1	Kernaussagen der Vorträge .....	135
11.2	Diskussionspunkte.....	137
12	<b>TEILNEHMER UND REFERENTEN DES WORKSHOPS</b> .....	143

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

# **Problem Statements**

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

## 1 Problem Statements

Anhand des folgenden Punktekatalogs wurden zu Beginn des Workshops von allen Referenten eine kurze Darstellung der wesentlichen Aspekte des Vortrags gegeben.

### 1. Methode

- Anwendbarkeit
- Wechsel
- Kombination

### 2. Projekt

- Status
- Ergebnisse
  - Tool
  - Anwendung
  - Methode
  - Zeitplan

### 3. Tool

- Erfolg
  - wirtschaftlich
  - wissenschaftlich
- Produktivität
- Erweiterbarkeit
- Portierbarkeit der Regelbasen
- Toolwechsel

### 4. Integrationsaspekt

- WBS-Komponente versus Einzelsystem
- Client/Server

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

### **W. Ferse:**

Die Überführung eines Expertensystems in die Praxis ist nahezu gescheitert und doch erfolgreich. Das Expertensystem XUMA ist nicht für eine Praxisanwendung in dem Sinne geeignet, wohl aber als ein akademischer Erfolg anzusehen.

Nicht „KI-Methoden in die Praxis“ darf die Herangehensweise sein, sondern ausgehend von Problem-/Aufgabenstellungen ist eine richtige Methodenauswahl wichtig, der richtige Methodenmix entscheidend.

Das Management veränderbarer Wissensbasen und eine korrekte Versionshaltung incl. eines Änderungsmanagements sind entscheidende Anforderungen an Wissensbasen aus den Problembereichen, in denen Wissensbasen zur Standardisierung von Arbeitsschritten führen sollen.

### **I. Timm:**

Wissensakquisition ist eine weit schwierigere Aufgabe (für die Studierenden) als erwartet. Die anzuwendenden Methoden müssen ausführlicher vermittelt und erprobt werden. Für bestimmte Problemklassen und Aufgabenstellungen sind unterschiedliche WA-Techniken notwendigerweise anzuwenden. Automatische Verfahren sind nur da anwendbar, wo entsprechende Fälle bzw. Daten in genügend großer Zahl vorliegen.

### **U. Heller:**

Die Integration verschiedener Aufgaben in einer Wissensbasis ist möglich. Dabei scheint die Verwendung qualitativer Modelle in vielen Bereichen möglich und sinnvoll. Voraussetzung dafür sind allerdings verstandene und anerkannte Theorien. Ebenfalls kann kein einzelnes Systemmodell für alle anfallenden Aufgaben des Problembereiches allein ausreichen.

### **Matthew Corley:**

Sicht des Anwenders. Er ist der Meinung, daß sich viele manuelle Verfahren als XPS auf den Rechner bringen lassen. Er hatte jedoch keine Zeit, bei seinem Vorgehen eine ausführliche Methodenauswahl durchzuführen. Selbst in der Lackiertechnik, in der er selbst Experte ist, ist die Wissensakquisition ein schwieriges Unterfangen. Eine typische Aussage anderer Experten ist oft 'Ja, daß kann man nur im Einzelfall sagen'.

*Ofimals scheint man bei der WA auch lange Zeit nur an der Oberfläche zu kratzen.*

Eine andere Frage ist, wie man einen Prozeß der kontinuierlichen Verbesserung einer Wissensbasis erreichen kann. Welche Mechanismen gibt es, ausgehend von einer 'Rohfassung' einer Wissensbasis neue Erkenntnisse einzuarbeiten? Welcher Aufwand ist dazu notwendig, welche Methoden gibt es hier?

### **Matthias Kirsten:**

Manuelle WA ist in den meisten Fällen zu aufwendig.

Automatische Wissenserhebung führt nicht nur zu Regeln und damit Wissen in den Systemen. Vielmehr wird es auch dem Menschen möglich, dieses Wissen für sich in seiner manuellen Tätigkeit zu nutzen.

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

Das Problem der automatisierten Wissenserhebung ist, daß es eine Vielzahl von Methoden gibt um Regeln oder Konzepte aus Datenmengen zu extrahieren. Die Frage ist, welche dieser Methoden für welches Problem die richtige ist.

Es bleibt für die jeweilige Problemstellung auch die Frage, ob man in der Lernphase die richtigen Testdatensätze gewählt hat.

Viele Daten liegen nur in Papierform und nicht in maschinenlesbaren Formaten vor.

### **Andreas Fick:**

Problem der Wissensakquisition. Er nutzt automatische Verfahren des Wissenserwerbs, weil er in seiner Domäne die Erfahrung gemacht hat, daß Experten das benötigte Wissen nicht liefern können, obwohl sie dieses Wissen zum Teil implizit haben.

In seiner Anwendung gibt es jedoch noch kein Verfahren, was diese automatische Wissensakquisition leisten kann (Modellierung dynamischer Systeme).

### **Christoph Ranze:**

Es sind neue technologische Ansätze zu liefern, die den Einsatz und die Wartung wissensbasierter Systeme vereinfachen. Zum einen ist hier die Bedienbarkeit der Systeme zu nennen. Es muß dem normalen Benutzer möglich sein, solche Systeme zu bedienen und in der gesamten Breite zu durchdringen. Oftmals haben XPS die Tendenz, nur von eingearbeiteten Experten nutzbar zu sein, obwohl sie doch gerade deren Wissen für 'normale' Anwender nutzbar machen sollen.

Auf der anderen Seite ist der Prozeß der Wissensakquisition zu vereinfachen. Es ist für XPS unabdingbar, daß neues Wissen leicht einarbeitbar ist und Updates in der Wissensbasis möglichst einfach eingespielt werden können.

### **Frau Schramme, TH Darmstadt:**

In der Phase der Wissensakquisition funktionieren Interviews aus ihrer kognitionspsychologischen Sicht und Erfahrung heraus nur unzureichend. Besser funktioniert hier ein Mix unterschiedlicher Methoden zur Wissensextraktion, der zu jeder Phase für jede Situation die richtige Methode bereitstellt. Ihrer Meinung nach ist z.B. die Strukturlegetechnik bestens geeignet, nicht nur deklaratives sondern auch prozedurales Wissen hervorzubringen.

Aus ihrer Sicht stellt sich dabei die Frage der Integration von unsicheren und unscharfen Sachverhalten und Daten.

Andererseits ist es eines ihrer Anliegen, die zu schaffenden Daten- und Wissensbasen ständig updaten zu können. Ja sie plädiert sogar für einen Prozeß der ständigen Verbesserung einer solchen Basis - angefangen von einer initialen Rohfassung bis hin zu einer sich ständig verbessernden Wissensbasis.

Dabei ist ihre Erfahrung, daß Entwickler die Rahmenbedingungen des künftigen Systemumfeldes nicht oder nur unzureichend beachten. Typischerweise sollte ein Entwicklungsteam sowohl aus Systementwicklern und Experten als auch aus Anwendern und Psychologen bestehen.

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

Dies wiederum bedeutet aber aus unserer Sicht einen viel zu hohen Aufwand an Ressourcen zur Systementwicklung.

### **Resümee I:**

Ob man einen modellbasierten oder Daten-/Verhaltens-basierten Ansatz wählt, hängt davon ab, welche Datensätze oder welches Expertenwissen für einen Problem- und Anwendungsbereich vorhanden ist.

Es gilt in diesem Zusammenhang also zu analysieren, welche Problemklassen und welche Systemklassen es gibt. Diese müssen dann aufeinander abgebildet werden. Nur WA-Techniken, die auf einen bestimmten Bereich passen, sollen für diesen Bereich auch genutzt werden.

(In einer Veranstaltung WA sollte dargestellt werden, welche WA-Methode für welchen Problem- und Methodenbereich hinreichend und adäquat ist.)

**Der Einsatz des wissensbasierten  
Systems XUMA-GEFA zur  
Gefährdungsabschätzung von  
Altlasten in Sachsen und Baden-  
Württemberg**

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

## 2 Der Einsatz des wissensbasierten Systems XUMA-GEFA zur Gefährdungsabschätzung von Altlasten in Sachsen und Baden-Württemberg

W. Ferse, U. Schneider  
Forschungszentrum Rossendorf

W. Geiger, M. Reißfelder, R. Weidemann  
Forschungszentrum Karlsruhe

T. Reitz  
TU Dresden

### 2.1 Einführung

Die große Anzahl der altlastverdächtigen Flächen in Deutschland stellt eine akute oder zumindest latente Gefährdung für die menschliche Gesundheit und alle Schutzgüter der Umwelt dar. Aufgrund der z.T. sehr aufwendigen und kostenintensiven Untersuchungen und Sanierungen ergibt sich die Notwendigkeit, die Bearbeitung von Altlasten möglichst effektiv durchzuführen, d.h. einen maximalen Sanierungseffekt mit den zur Verfügung stehenden finanziellen Mitteln zu erreichen.

Grundlegende Voraussetzungen für ein solches Ziel sind

- die systematische Erfassung und Erkundung der Altlastverdachtsfläche,
- das Schaffen einer einheitlichen Bewertungsmöglichkeit des Gefährdungspotentials durch die Ermittlung einer Risikokennziffer und
- die Möglichkeit, damit den Handlungsbedarf und eine Abarbeitungsreihenfolge festzulegen.

Da die Altlastenbewertung nach dem Gesetz unter Landeshoheit fällt, gibt es in der Bundesrepublik Deutschland a priori kein einheitliches Bewertungssystem. Mehrere Bundesländer stützen sich jedoch auf das Baden-Württemberger Bewertungsverfahren, welches im folgenden Abschnitt kurz vorgestellt wird.

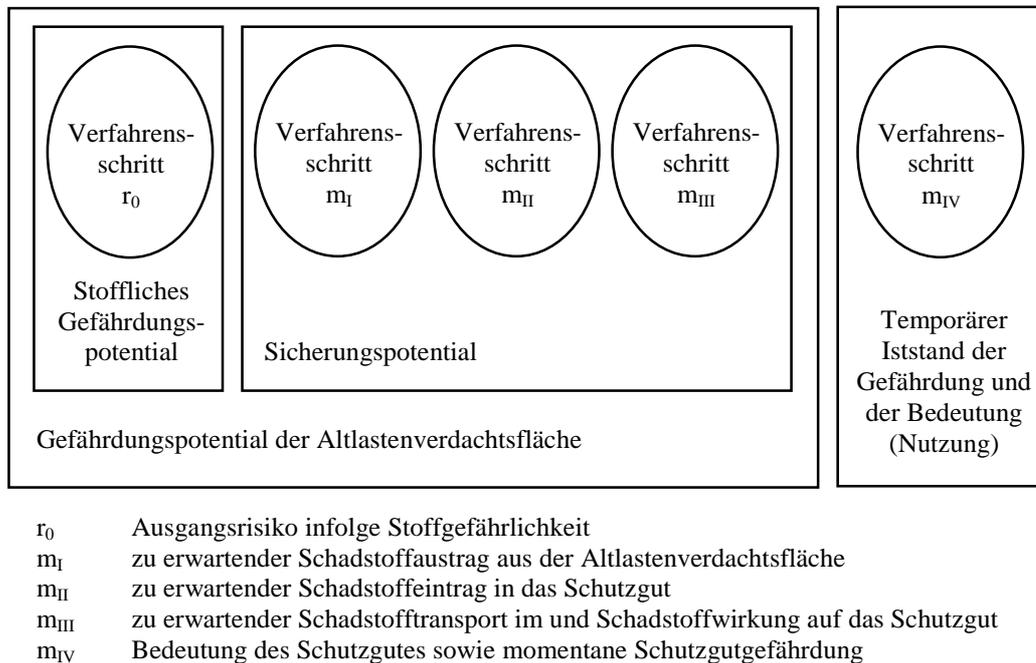
### 2.2 Das Baden-Württemberger Bewertungsverfahren

Bei diesem Verfahren werden auf verschiedenen, nacheinander abzuarbeitenden Beweismustern, die jeweils dem Kenntnisstand der zugeordneten Erkundungsstufe entsprechen, das Gefährdungspotential der Altlastverdachtsfläche bewertet und ein entsprechender Handlungsbedarf abgeleitet. Auf dieser Grundlage wird entschieden, ob eine Altlastverdachtsfläche aus dem Altlastenkataster entlassen werden kann, nur zur Überwachung verbleibt, oder ob weiterer Erkundungsbedarf vorhanden ist /1,2/.

Die Bewertung auf jedem Beweismuster gliedert sich in einzelne Verfahrensschritte, die in Abbildung 1 dargestellt werden. Der Bewertung wird eine definierte Vergleichslage zugrunde gelegt. Ausgehend von  $r_0$ , der Stoffgefährlichkeit, die toxikologische Eigenschaften der abgelagerten Stoffe berücksichtigt, gehen in die nachfolgenden drei Verfahrensschritte die Parameter ein, die angesichts des Schadstoffaustrages ( $m_I$ ), des Schadstoffeintrages in das Schutzgut ( $m_{II}$ ) sowie des Schadstofftransportes und der Wirkung im Schutzgut ( $m_{III}$ ) relevant sind. Hierbei wird jeder bewertungsrelevante Sachverhalt hinsichtlich seines risikoerhöhenden

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

bzw. risikomindernden Einflusses bewertet. Der sich ergebende relative Risikowert wird in einem fünften Verfahrensschritt entsprechend der Bedeutung des Schutzgutes und dessen derzeitiger Schadstoffbelastung ( $m_{IV}$ ) gewichtet.



**Abb. 1: Verfahrensschritte bei der Altlastenbewertung**

Es erfolgt eine getrennte Betrachtung der Schutzgüter Grundwasser, Oberflächenwasser, Luft und Boden.

Insgesamt sind im Rahmen der Altlastenbewertung vier Beweismniveaus definiert. Das beschriebene Bewertungsverfahren wird ausschließlich für die ersten beiden Beweismniveaus mit der oben beschriebenen Zielsetzung eingesetzt.

Im folgenden wird im Abschnitt 3 zunächst eine Übersicht über die Komponenten des Expertensystems XUMA-GEFA für die Erfassung, Erkundung und Bewertung von Altlasten gegeben. In den Abschnitten 3 und 4 erfolgt dann eine Beschreibung des Bewertungsprogrammes GEFA und die Einbettung der Komponenten in die Altlastenbewertung Sachsens.

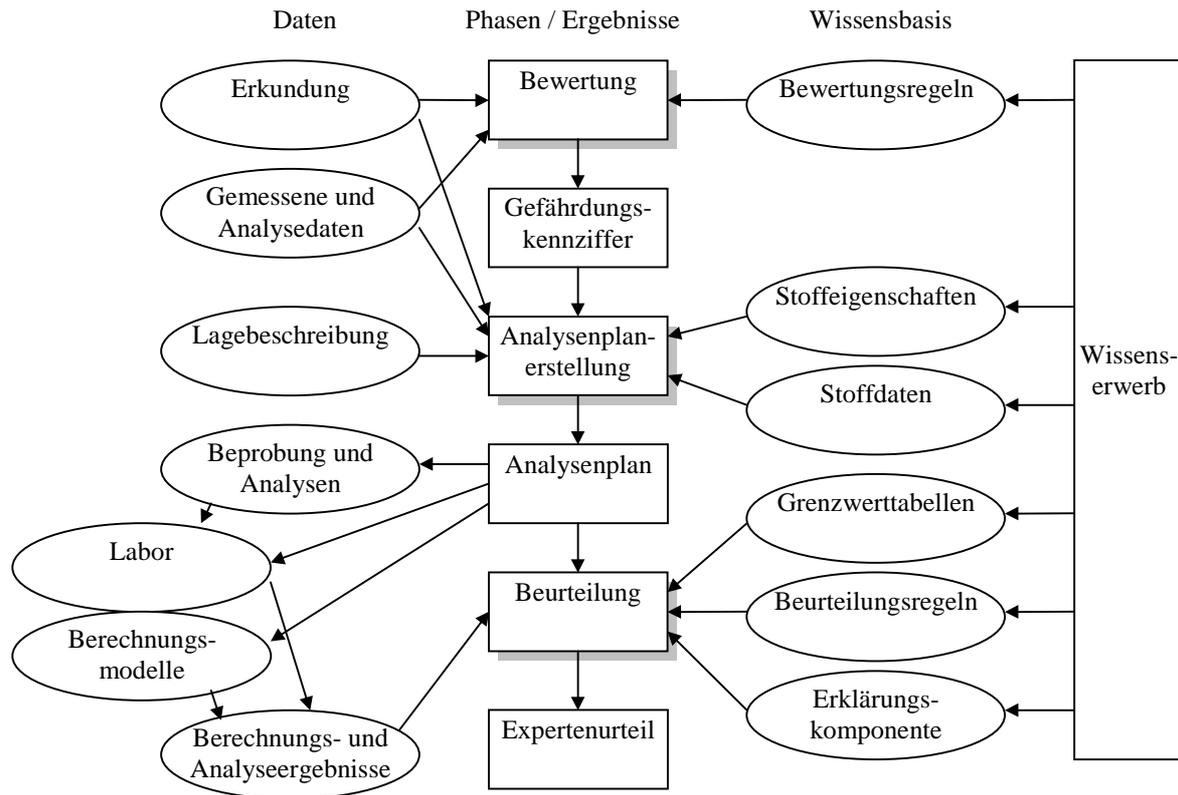
### 2.3 Das Expertensystem „Umweltgefährlichkeit von Altlasten“: XUMA-GEFA

Das wissensbasierte System XUMA-GEFA ist eine Gemeinschaftsentwicklung der Forschungszentren Karlsruhe und Rossendorf (FZK, FZR) und der Technischen Universität Dresden in Zusammenarbeit mit der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU) und dem Sächsischen Landesamt für Umwelt und Geologie (LfUG). Es handelt es sich um ein Werkzeug

- zur Erfassung der Altlastverdachtsflächen,
- der einheitlichen Bewertung des Gefährdungspotentials,
- der Einschätzung des Handlungsbedarfes und
- dem Festlegen einer Abarbeitungsreihenfolge (Priorität) sowie
- der Analysenplanerstellung.

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

Ausgangspunkt der Arbeiten war ein vom FZK entwickelter Prototyp des Expertensystems XUMA, der die Komponenten Bewertung, Analysenplanerstellung, Erfassung von Analyse-  
daten und Beurteilung umfaßte sowie für einige dieser Komponenten über einen Wissens-  
erwerb und eine Erklärungskomponente verfügte (siehe Abbildung 2). Dieses komplexe  
System benötigte jedoch eine anspruchsvolle Hard- und Software-Umgebung (z.B.  
Expertensystemumgebung, Datenbank) und hatte eine sehr komplexe Bedienungsstruktur.  
Daraus ergab sich bei einem Einsatz von XUMA ein hoher Investitions- und  
Schulungsbedarf, der einer dezentralen Verbreitung des Programmsystems entgegenstand.  
Die ausschließliche innerbehördliche Anwendung hätte außerdem den Nachteil, daß alle  
Datenerfassungsarbeiten von den Fachbehörden geleistet werden müßten.



**Abb. 2: Das Expertensystem XUMA**

Die Grundlage für die weitere Entwicklung war deshalb ein neues Einsatzkonzept, das vorerst nur die Nutzung der Bewertungs- und Analysenplankomponenten vorsieht. Im Ergebnis wurden die Programme für die Bewertung und die Analysenplanerstellung separiert und damit deren dezentraler Einsatz ermöglicht. Beim Bewertungsprogramm wurden gegenüber der ursprünglichen, in XUMA integrierten Bewertungsstruktur generelle fachliche und strukturelle Erweiterungen vorgenommen.

XUMA besteht jetzt aus den folgenden, für das neue Einsatzkonzept relevanten Komponenten:

Die eine Komponente ist die **objektorientierte Wissensbasis**, welche aus zwei Teilen besteht. Der erste Teil enthält die Merkmale, Tabellen und Regeln für die Bewertung der Altlastverdachtsflächen nach dem oben beschriebenen Bewertungsverfahren. Der zweite Teil bildet die Grundlage für die Erstellung der Analysenpläne. Er beinhaltet z.B. verschiedene Branchen mit ihren spezifischen Abfällen, eine Stoffliste und verschiedene Analyseparameter.

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

Die zweite Komponente von XUMA ist eine **Wissenserwerbskomponente**, die es den Fachbehörden ermöglicht, die oben genannten Teile der Wissensbasis ohne zusätzlichen Programmieraufwand fachlich zu erweitern und zu aktualisieren. Damit besteht die prinzipielle Möglichkeit, in XUMA landesspezifische Beurteilungen einzuarbeiten und sie jederzeit dem aktuellen Kenntnisstand anzupassen.

Zusätzlich wurde ein **Programmgenerator** entwickelt, der zwei separate Anwendungsprogramme aus der Wissensbasis von XUMA erzeugt. Das sind

- das Programm zur Bewertung von Altlastverdachtsflächen und
- das Programm zur Erstellung von Analysenplänen.

Diese vollständig unabhängig von XUMA lauffähigen Programme gestatten den Vor-Ort-Einsatz auf einem MS-Windows-PC. Durch das direkte Generieren der Programme aus der Wissensbasis von XUMA ist gewährleistet, daß die erzeugten Programme dem aktuellen Wissensstand in XUMA entsprechen und damit das gesamte Programmsystem konsistent arbeitet.

Ebenfalls aus XUMA wird ein externes Datenstrukturfile generiert, mit dem es möglich ist, die Datenbanken, in denen die Bewertungsergebnisse gespeichert und verwaltet werden, an die jeweils neue Bewertungsstruktur anzupassen. Damit wird auch hier ein konsistentes „Mitwachsen“ der angeschlossenen Datenbanken mit dem sich dynamisch erweiternden Fachwissen der Altlastenbewertung garantiert.

Die einzelnen Komponenten des Systems XUMA-GEFA und ihr Zusammenspiel beim Prozeß des Wissenserwerbs und der Programmgenerierung zeigt Abbildung 3.

Die Altlastenbewertungsverfahren der Länder Baden-Württemberg und Sachsen basieren auf dem gleichen Ansatz, unterscheiden sich aber in verschiedenen Details. Dementsprechend gibt es vom generierten Programm zur Bewertung von Altlastenverdachtsflächen eine sächsische (GEFA) und eine Baden-Württemberger (XUMA-Bewertung) Version. In den folgenden Kapiteln wird das Programm zur Bewertung von Altlastenverdachtsflächen am Beispiel der sächsischen Version (GEFA) vorgestellt.

### **2.4 Das Programm zur Bewertung von Altlastverdachtsflächen GEFA**

Das Programm GEFA, welches auf MS-Windows-PC's lauffähig ist, erlaubt

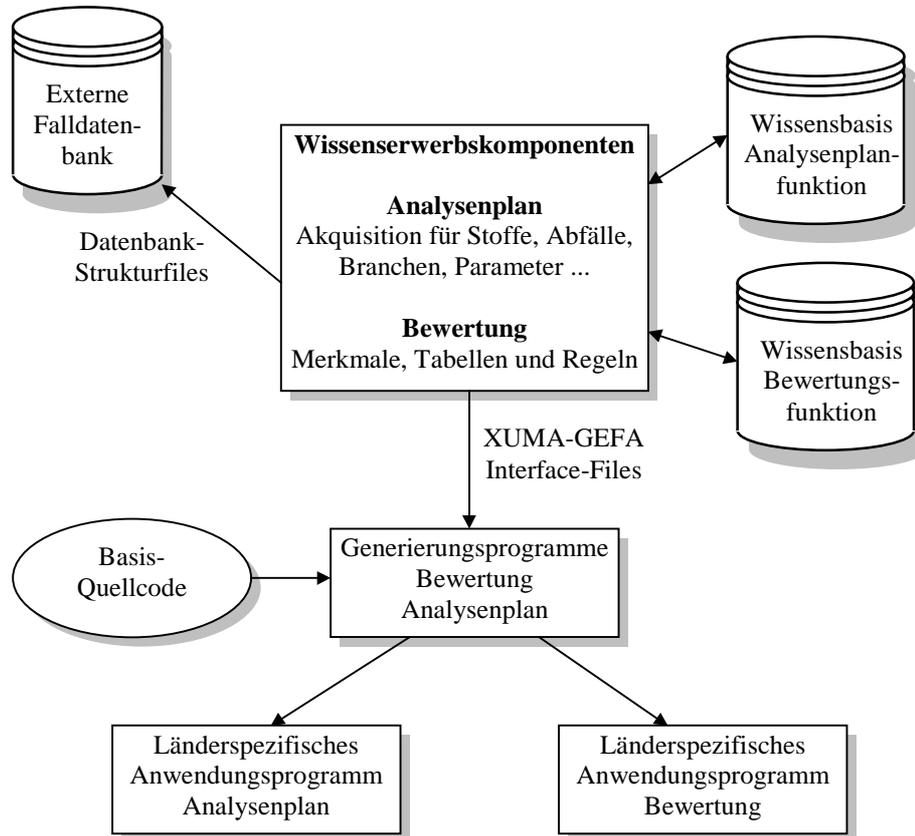
- die systematische, dezentrale Erfassung aller zu bearbeitenden Altlastverdachtsflächen,
- eine Konsistenzprüfung der eingegebenen Daten,
- die Ermittlung einer vergleichenden Gefährdungskennziffer und
- die Bestimmung einer Handlungsbedarfsstufe.

Im ersten Teil des Programmes, dem Altlastenmanagement, werden die Altlastverdachtsflächen systematisch erfaßt und verwaltet. Um auch sehr große oder inhomogene Flächen sinnvoll bewerten zu können, kann die Altlastverdachtsfläche emissionsseitig in Teilflächen untergliedert werden. Eine Untergliederung auf der Immissionsseite ist ebenfalls möglich, wenn z.B. mehrere Schutzobjekte bedroht sind. Aus diesen Bausteinen werden dann eigenständige Bewertungsfälle gebildet.

Im Bewertungsteil, der nach dem Baden-Württemberger Altlasten-Bewertungsverfahren arbeitet, werden dem Nutzer in den einzelnen Verfahrensschritten altlastenbeschreibende Merkmale angeboten, die er mit den entsprechenden Erkundungsdaten belegt.

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsystemen"

Innerhalb jedes Verfahrensschrittes sind die Merkmale nach einem regelgesteuerten Ablaufplan angeordnet, der durch den Wissenserwerb in XUMA definiert wurde. Die Anzeige der Merkmale erfolgt kontextsensitiv, d.h. je nach Belegung der vorherigen Merkmale, werden folgende Merkmale nach fachlichen Kriterien angezeigt oder ausgeblendet. Es gibt sowohl optionale Merkmale, über deren Belegung der Nutzer entscheiden kann, als auch Pflichtmerkmale, die der Nutzer mit einem Merkmalswert belegen muß. Abbildung 4 zeigt einen Ausschnitt aus dem Merkmals-Ablaufplan für den Verfahrensschritt II des Schutzgutes Grundwasser.



**Abb. 3: Wissenserverwerb und Programmgenerierung**

Bei der Belegung und Bewertung der Merkmale bietet GEFA die Möglichkeit, verschiedene Datenqualitäten (z.B. unsichere oder exakt bekannte Daten) zu verarbeiten. So kann der Bearbeiter bei den entsprechenden Merkmalen wählen, ob er nur einen Bereich angibt oder den konkreten Wert einträgt oder ein Programm zur Berechnung des Wertes nutzen möchte.

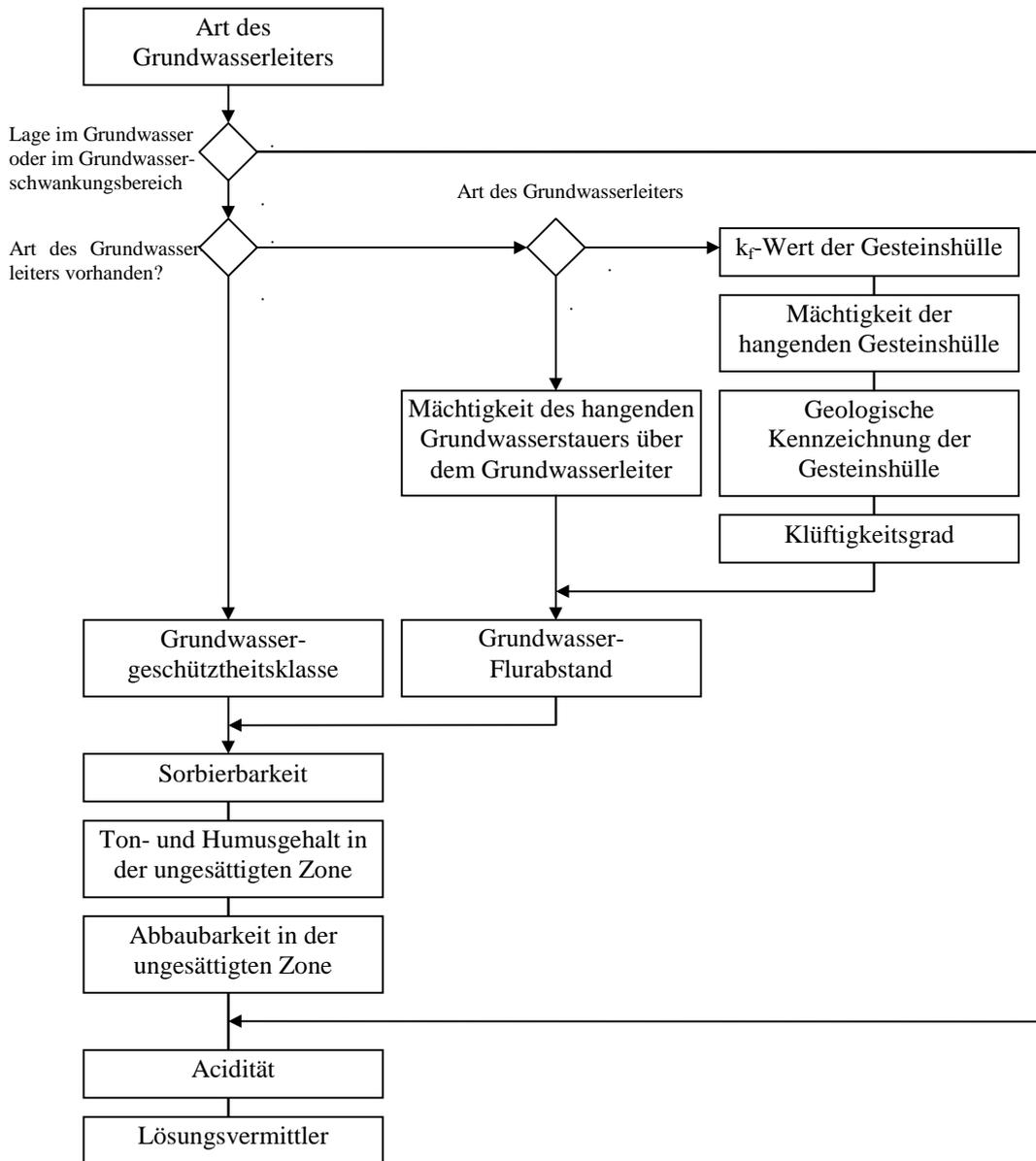
Die Merkmale werden unter Auswertung der vom Nutzer eingegebenen Daten von GEFA separat mit einer Bewertungszahl bewertet. Sie besteht aus einem minimalen und einem maximalen Wert und dem zugehörigen Mittelwert. Das Programm paßt dabei die Bewertung der jeweiligen Datenqualität an, indem es den Bereich der Bewertungszahl entsprechend variiert.

Einige Merkmale erlauben zusätzlich eine Benutzerbewertung, bei welcher der Gutachter die vom Programm ermittelte Bewertungszahl, in vorgegebenen Grenzen, überschreiben kann.

Stehen für ein optionales Merkmal keine Daten zur Verfügung, erfolgt die Bewertung über eine Standardbewertung. Damit wird sichergestellt, daß fehlende Daten nicht zu einer Verminderung der Risikokennziffern führen.

# 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltanwendungen"

Innerhalb jedes Verfahrensschrittes werden die Bewertungszahlen der einzelnen Merkmale mit ihren Bereichen entsprechend den in GEFA implementierten Regeln zu einer Risikokennziffer zusammengefaßt. Danach wird, unter Berücksichtigung der Risikokennziffern der Verfahrensschritte, eine Gesamt-Risikokennziffer ermittelt, die analog zu den Merkmals-Bewertungszahlen aus drei Zahlenwerten besteht. Der Maximalwert der Gesamt-Risikokennziffer wird zur Ermittlung des Handlungsbedarfes herangezogen, während der Mittelwert für die Festlegung der Abarbeitungsreihenfolge maßgeblich ist. Die Größe des Bereiches zwischen Minimal- und Maximalwert ist ein Maß für die Datenqualität.



**Abb. 4: Ausschnitt aus dem Bewertungsablauf in GEFA**

Neben der Ausgabe eines ausführlichen Bewertungsprotokolls (Liste alle Merkmale mit ihren Merkmalswerten und Bewertungszahlen) und des KONTA-Blattes (graphische Darstellung der Ergebnisse) speichert GEFA die erfaßten Daten und die Ergebnisse in speziellen Dateien ab. Zusammen mit dem Gutachten liegen damit die Daten in einem einheitlichen computerlesbaren Format vor und können sofort in die Datenbanken der Landratsämter eingelesen werden.

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umwelthanwendungen"

Das Programm GEFA wurde ausschließlich für die Anwendung des Altlastenbewertungsverfahrens auf dem ersten und zweiten Beweismiveau entwickelt. Gegenwärtig existiert eine exakte Quantifizierung dieses Bewertungsverfahrens nur für die Schutzgüter Grundwasser und Boden. Entsprechend ist auch nur dieser Teil in XUMA-GEFA implementiert. Alle Erweiterungen, die zukünftig für die Bewertung bezüglich anderer Schutzgüter durch die Fachbehörden der Länder erstellt werden, sollen direkt in das Programm XUMA-GEFA übernommen werden.

### 2.5 Die Einordnung der Komponenten des Systems XUMA-GEFA in die Struktur der Altlastenbehandlung des Landes Sachsen

Das Programmsystem XUMA-GEFA wird in den Ländern Baden-Württemberg und Sachsen als offizielles Programm der jeweiligen Umweltministerien eingesetzt. Der Einsatz des Programmsystems soll am Beispiel Sachsens vorgestellt werden (Abbildung 5).

Im Landesamt für Umwelt und Geologie wird die Sächsische Altlastenmethodik über die Wissenerwerbskomponente in XUMA implementiert und ständig aktualisiert. Über den Programmgenerator werden die aktuellen Versionen des Programmes GEFA und des Analysenplanprogrammes erzeugt.

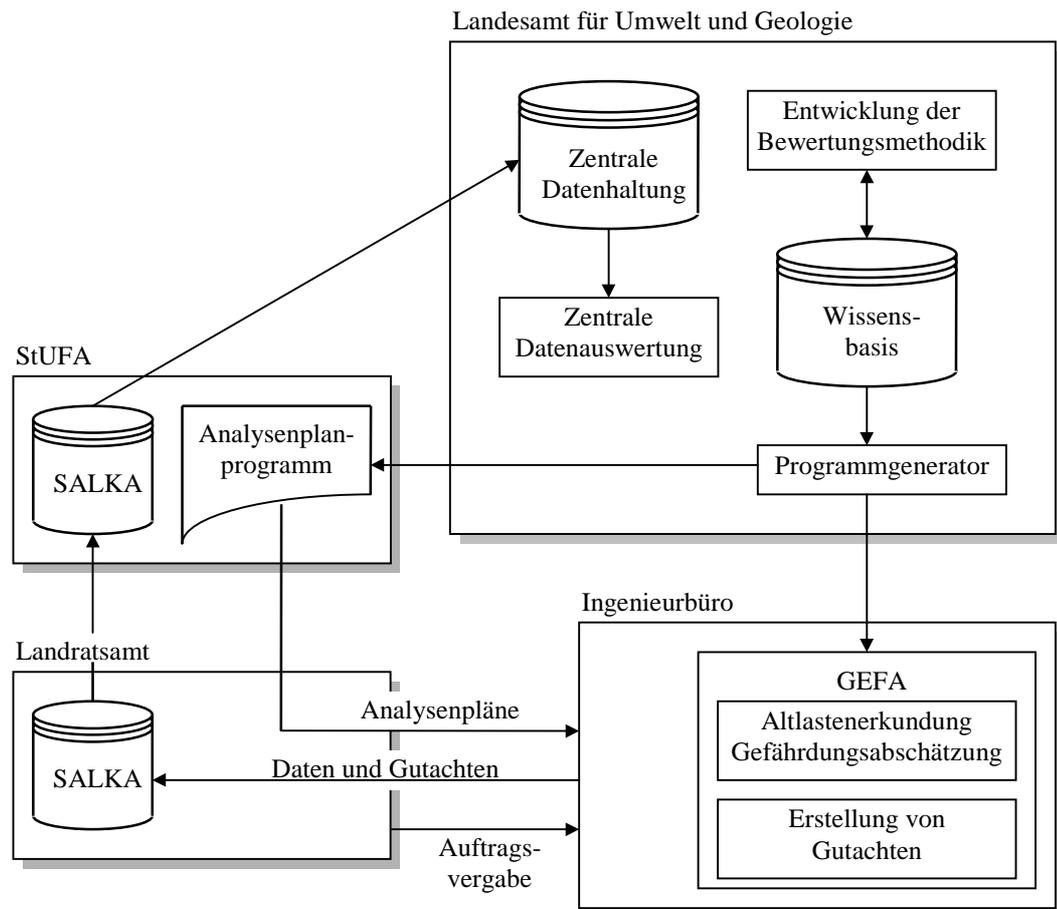


Abb. 5: DV-Struktur der Altlastenerfassung und -Bewertung in Sachsen

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umwelthanwendungen"

An den Staatlichen Umweltfachämtern sollen mit Hilfe des generierten Analysenplanprogrammes die Analysenpläne für die Altlastenerkundung erzeugt werden. Diese werden von den Landratsämtern bei der Auftragsvergabe an die Ingenieurbüros weitergegeben. Daneben erhalten die Auftragsnehmer sowohl die bisher erfaßten Daten der Altlastverdachtsfläche als auch die neueste Version des Bewertungsprogrammes GEFA.

Nach durchgeführter Erfassung und Bewertung der Altlastverdachtsfläche liefern die Ingenieurbüros zusammen mit den Gutachten die GEFA-Ausgabeprotokolle und die GEFA-Dateien an die Landratsämter. Die GEFA-Dateien werden in die Datenbank SALKA (Sächsisches Altlastenkataster) eingelesen. Dabei erfolgt der Datenfluß gerichtet von den Landratsämtern über die Staatlichen Umweltfachämter zum LfUG.

Das System stellt somit über seine Wissenserwerbskomponente sicher, daß neue Erkenntnisse sowie Erfahrungen unverzüglich in die Bewertung einfließen können, entlastet die Sachbearbeiter der Behörden von Routinearbeiten (Dateneingabe) und führt zu vergleichbaren Ergebnissen. Die Anwender vor Ort unterstützt GEFA über vielfältige Konsistenzprüfungen bei der Erstellung einer konsistenten Bewertung. Gleichzeitig sind die mit dem Bewertungsprogramm erstellten Protokolle Bestandteil des Gutachtens.

### **2.6 Schlußbemerkungen**

Mit dem System XUMA-GEFA verfügen die Länder Baden-Württemberg und Sachsen für die Altlastenbewertung auf den Beweismiveaus 1 und 2 über einen geschlossenen Informationskreislauf, der ohne Programmieraufwand dynamisch der Bewertungsmethodik der jeweiligen Länder angepaßt werden kann. Mit einem derartigen Ansatz für ein behördenübergreifendes, computergestütztes Altlastenbewertungssystem nehmen diese Länder eine Pilotrolle in Deutschland ein. Durch die beschriebene Flexibilität des Programmsystems ist es möglich, daß auch andere Länder, die eine Variante des Baden-Württemberger Bewertungsverfahrens verwenden, das Programmsystem XUMA-GEFA nutzen können.

### **2.7 Literatur**

- /1/ Altlasten-Handbuch, Teil 1: Altlasten-Bewertung  
Ministerium für Umwelt Baden-Württemberg (Hrsg.), Wasserwirtschaftsverwaltung, Heft 18, Dezember 1988
- /2/ Handbuch zur Altlastenbehandlung in Sachsen  
Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landesentwicklung, 1994
- /3/ W. Ferse, W. Geiger, T. Reitz, M. Reißfelder, F. Schröder, R. Weidemann  
Struktur der Altlasten-Bewertung in XUMA und GEFA  
Unveröffentlichter Bericht, Forschungszentrum Rossendorf, 1996
- /4/ J. Höß; PC-gestützte Bewertung von Altlasten  
Lehrgangsunterlagen „Systematische Altlastenbearbeitung in Baden-Württemberg“, 6.-7.11.1995, Technische Akademie Essen

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

### **Email- und WWW-Adressen der Autoren:**

ferse@fz-rossendorf.de

geiger@iai.kfk.de

reissfel@iai.kfk.de

weideman@iai.kfk.de

<http://www.fz-rossendorf.de/FWS/FWSA/fwsa.d.html>

<http://www.iai.fzk.de/Institut/UI/XUMA/>

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

**PEMOSYS - ein validiertes  
hybrides Expertensystem zum  
Pflanzenschutzmittel-Monitoring**

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

### **3 PEMOSYS - ein validiertes hybrides Expertensystem zum Pflanzenschutzmittel-Monitoring**

J. Zhao  
FB Mathematik/Informatik  
Universität Bremen  
Bibliothekstr. (MZH)  
D-28359 Bremen

#### **3.1 Zusammenfassung**

Unter den derzeitigen ökonomischen Rahmenbedingungen intensiver Pflanzenproduktion kann auf den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln (=Herbizide, Fungizide, Insektizide und sonstige, Abk.: PSM) in der Landwirtschaft kaum verzichtet werden. Aus ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten ist eine bestimmungsgemäße und sachgerechte Anwendung von PSM gefordert, um die Ertragsleistungen der Landwirtschaft sicherzustellen und zugleich mögliche Nebenwirkungen auf den Naturhaushalt, eine Schädigung von Nachbarkulturen oder einen potentiellen Eintrag in das Grundwasser zu verhindern. Ausgehend von dieser Situation wurde von dem KI-Labor der Universität Bremen und dem Institut für ökologische Chemie der Biologischen Bundesanstalt (Prof. Dr. W. Pestemer) ein Expertensystem zum Pflanzenschutzmittel-Monitoring PEMOSYS (PEstizid-MONitoringsSYstem), entwickelt, das Hilfen zu Einsatz von PSM und zur Beurteilung des Abbau- und Einwaschungsverhaltens sowie Auswirkungen der Rückstände im Boden auf Nachbarkulturen geben soll.

PEMOSYS gliedert sich nach seinen Funktionen in fünf Module:

- CHEMPROG:  
standortspezifische Abschätzung der Grundwassergefährdung
- ANPROG:  
PSM-Abbausimulation und Prognose Nebenwirkungen im Boden
- VARLEACH:  
Simulation der PSM-Einwaschung im Boden
- VOLPROG:  
Prognose der Volatilisation von Boden- und Blattoberflächen sowie
- GIS:  
Komponente eines geographischen Informationssystems

Wissenschaftliche Aspekte und technische Merkmale von PEMOSYS wurden in [Zhao et al. 1994] detailliert beschrieben.

Die Validierung des Systems erfolgte durch zahlreiche Verträge zwischen den Entwicklern und Benutzern. Die Benutzer können in drei Gruppen aufgeteilt werden: Landwirte und Berater von landwirtschaftlichen Genossenschaften PSM - Hersteller Forschungsinstitute im Bereich ökologischer Chemie

Zwei Aspekte wurden bei der Validierung herangezogen: Validierung der inhaltlichen Funktionalität und Technikbewertung

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umwelthanwendungen"

PEMOSYS befindet sich seit mehr als drei Jahren im praktischen Test. Die Ergebnisse der inhaltlichen Validierung von PEMOSYS sind in einer Reihe von Veröffentlichungen enthalten:

Rückstandsverhalten und Prognose der Persistenz von PSM mit ANPROG und VARLEACH

Das Rückstandsverhalten von PSM wurde sowohl in Kleinparzellenversuchen als auch auf Versuchsflächen der Biologischen Bundesanstalt (BBA) und in verschiedenen Praxisbetrieben untersucht. Zur Validierung der Modellansätze wurden Simulationsrechnungen durchgeführt und die gemessenen Rückstandswerte mit den berechneten verglichen. Die Ergebnisse wurden in [Gottesbüren 1991] dargestellt.

Abschätzung der potentiellen Grundwassergefährdung mit CHEMPROG

Wegen einer geringen Anzahl von zur Verfügung stehenden Versuchsergebnissen wurde zur Kalibrierung ein zusätzlicher Vergleich der Abschätzung der potentiellen Grundwassergefährdung mit einem einfachen Screening-Verfahren nach RAO et al. (1985) durchgeführt (siehe auch [Gottesbüren 1991]).

### 3.2 *Einige Ergebnisse der Technikbewertung*

Die Wartbarkeit aufgrund der modularen Systemarchitektur wird die Systemwartung bzw. -pflege sehr erleichtert. Die Arbeit der Systemwartung wird hauptsächlich von Domänen-Experten der Biologischen Bundesanstalt übernommen. Die Domänen-Experten geben an die Systementwickler (KI-Labor der Universität Bremen) Rückkopplungen bezüglich

- der Korrektheit des Systems
- neuer Vorschläge zur Verbesserung der Funktionalität und des Laufzeitverhaltens und der
- Verbesserung der Bedienungen für fachliche Praxisanforderungen. Darüber hinaus ist der Domäne-Experte zuständig für die Aktualisierung
- der Datenbanken (neu zugelassene PSM oder Verbot eines PSM) sowie
- der Wissensbasen (neue Modelle, neue Erkenntnisse aus der Forschung). Dies ist eine wichtige Voraussetzung für die praktische Akzeptanz.

Die Transferierbarkeit des Systems wird ebenfalls durch die modulare Architektur unterstützt:

- In PEMOSYS kann man die gewünschte Landersprache wählen. Z. Zt. gibt es Versionen in Englisch, Deutsch und Chinesisch. PEMOSYS kann leicht an andere Sprachen angepaßt werden.
- PEMOSYS ist z. Zt. in 56 Pilotinstallationen weltweit getestet oder eingesetzt (z.B. Deutschland, Österreich, China, USA, Neuseeland und Australien).

Ergonomische Aspekte

- Dialogführung: Eine große Zielklasse von Benutzern von PEMOSYS sind Landwirte, die in der Regel kaum über EDV-Kenntnisse verfügen. Daher ist PEMOSYS in seiner Bedienbarkeit sehr einfach konzipiert und implementiert und verfügt über umfangreiche Online-Hilfen zur Handhabung und zur Beantwortung von Fragen.
- Die Benutzeroberfläche berücksichtigt die wichtigsten Konventionen von graphischen Benutzeroberflächen

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

- Die Erklärungen von Ergebnissen können sowohl graphisch als auch in natürlicher Sprache dargestellt werden. Die Anwendung von multimedialen Techniken erhöht die Akzeptanz von PEMOSYS in fachlicher Praxis.
- Durch die Unterstützung des Dynamic Data Exchange (DDE) können Daten von PEMOSYS ggf. an andere kommerzielle Softwares übergeben werden. Z.B. die graphische Darstellung von Kurven kann in MS-EXCEL erfolgen.

### **3.3 Probleme beim Einsatz von PEMOSYS**

Trotz der o.g. vielversprechenden Aspekte des Systems wird das System PEMOSYS z. Zt. nur eingeschränkt in der Zielgruppe Forschungsinstitute angewendet. Einige Hindernisse für den breiten Einsatz von PEMOSYS sind hierbei aufzuzählen:

- Diskontinuität des Personals beim Entwicklungsteam: der Personalwechsel findet fast alle halbes Jahr einmal aufgrund der Vertragsausläufe der jeweiligen federführenden ProjektmitarbeiterInnen statt. Dies bringt immer einen Gedankenabbruch mit sich.
- Kostspielige Daten: für einen erfolgreichen Realeinsatz von PEMOSYS sind neben den eigenen Bodendaten (Corg, pH, Ton, etc.) und Witterungsdaten noch einige individuelle Parameter maßgebend. Z. B. ist für die Abbau- sowie Einwaschungssimulation von PSM die Ermittlung von Abbauparametern (Ea, A, B) erforderlich. Die Kosten hierfür sind sehr hoch ( 10 TDM).
- Systempflege und -wartung sind bekannte Probleme für eine universitäre Einrichtung.

### **3.4 Literatur**

Gottesbüren, B. 1991: Konzeption, Entwicklung und Validierung des wissensbasierten Herbizid-Beratungssystems HERBASYS, Dissertation, Uni. Hannover.

Rao, P.S.C., HORNSBY, G. & JESSUP, R.E. 1985: Indices for ranking the potential of pesticide contamination of groundwater. -Soil and Crop Science Society of Florida, Proceedings, 44, 1-8.

Zhao, J.; Wischnewsky, M.; Wang, K.; Novopashenny, I.; Pestemer, W.; Günter, P.: PEMOSYS - ein validiertes hybrides Expertensystem zum Pflanzenschutzmittel-Monitoring, in G. Barth, A. Günter, B. Neumann (Hrsg.) KI-94: Anwendungen der Künstlichen Intelligenz, Springer-Verlag, 1994.

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

**Konzeptuelle und Qualitative  
Modellierungsmethoden für  
integrierte  
Entscheidungsunterstützung im  
Umweltbereich**

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

## **4 Konzeptuelle und Qualitative Modellierungsmethoden für integrierte Entscheidungsunterstützung im Umweltbereich**

Ulrich Heller, Peter Struss

Model-based Systems and Qualitative Reasoning Munich (MQM)

Institut für Informatik, Technische Universität München

Orleansstr. 34, 81667 München

{heller, struss}@informatik.tu-muenchen.de

### **Zusammenfassung**

Die Modellierung von Ökosystemen ist eine wichtige Basis für die verschiedenen Aufgaben einer Unterstützung von Entscheidungsfindung im Umweltbereich. Von der Situationsbeurteilung und dem Monitoring über Diagnose zur Planung und Simulation der Auswirkungen von Handlungsalternativen setzen alle diese Aufgaben eine interne Darstellung des Systemverhaltens voraus. Wir argumentieren für eine explizite Repräsentation von Wissen über die Domäne, das Ökosystem, die Situationen und die Einflüsse von außen. Dabei müssen die spezifische qualitative Natur des Wissens über Systemzusammenhänge und die unvollständige Kenntnis des Systemzustandes berücksichtigt werden. Außerdem werden die Möglichkeiten konzeptueller Modellierung in der Form von qualitativen Beschreibungen von Prozessen illustriert an Beispielen aus der Situationsanalyse und Planung in einer konkreten Anwendung.

### **4.1 Einleitung**

Entscheidungsfindung im Umweltbereich umfaßt vielfältige Aufgaben, die in ihrer Natur wissensintensiv sind und ein Verständnis des Systemverhaltens voraussetzen. Für eine computerbasierte Unterstützung ist es notwendig, Repräsentationsformen dieses Wissens zu finden, die möglichst auch über die unterschiedlichen Schlußfolgerungsweisen hinweg bei der Situationsanalyse, der Überwachung, Diagnose und der Maßnahmenplanung zum Einsatz kommen können.

Wir argumentieren für eine explizite Repräsentation von Wissen über die Domäne, das spezifische Ökosystem und die momentane Situation in Form von konzeptuellen und qualitativen Modellen.

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsystemen"

Die Forderung nach einer konzeptuellen Ebene der Modellierung (etwa in Form von kompositionalen Prozeßmodellen) ergibt sich aus den Anforderungen an die Kommunikation mit dem Benutzer bei Modellerstellung und Modellverwendung (z. B. in Form von Erklärungskomponenten) und der Verfügbarkeit und Überprüfbarkeit vorhandenen Wissens und gemachter Ableitungen.

Qualitative Modelle bieten sich aufgrund der inhärenten Beschränkungen des Wissens über komplexe natürliche Systeme an. Zum einen ist das vorhandene Wissen oft qualitativer Natur und findet sich in Form von prinzipienhaften Zusammenhängen und vermuteten Abhängigkeiten, zum anderen ist der Systemzustand immer nur beschränkt beobachtbar, weil weder eine hinreichend vollständige räumliche und zeitliche Abdeckung garantiert werden kann, noch jede wichtige Beobachtung überhaupt in quantitativer Form vorliegt.

Das Ziel ist die Verwendung von qualitativem und unvollständigem Wissen in einer formalen Weise, wie es in den Techniken des qualitativen Schließens zur Anwendung kommt (siehe [Heller/Struss 96a]).

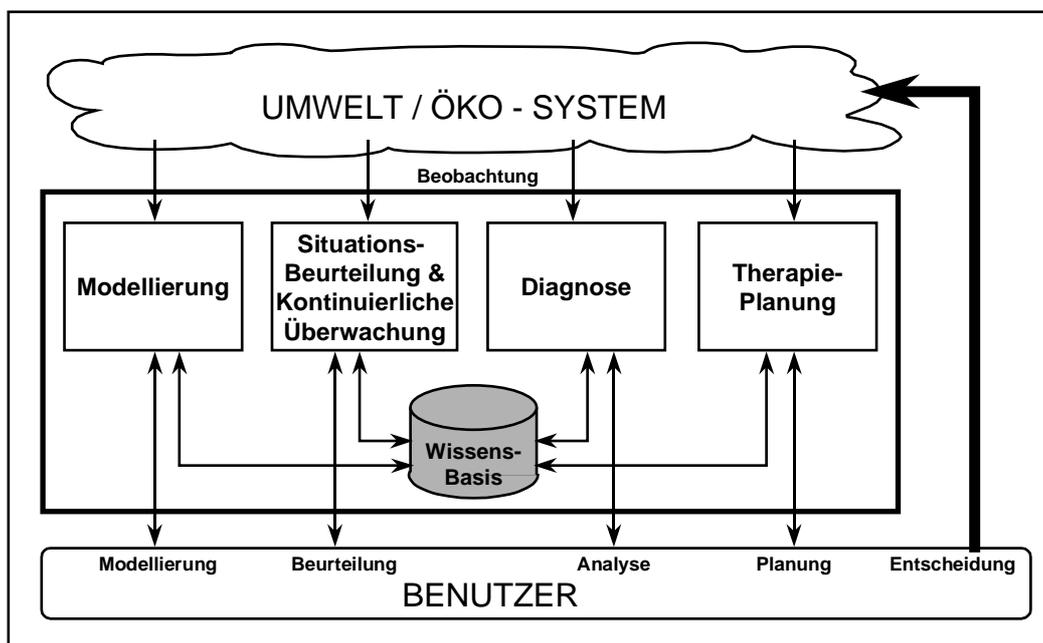


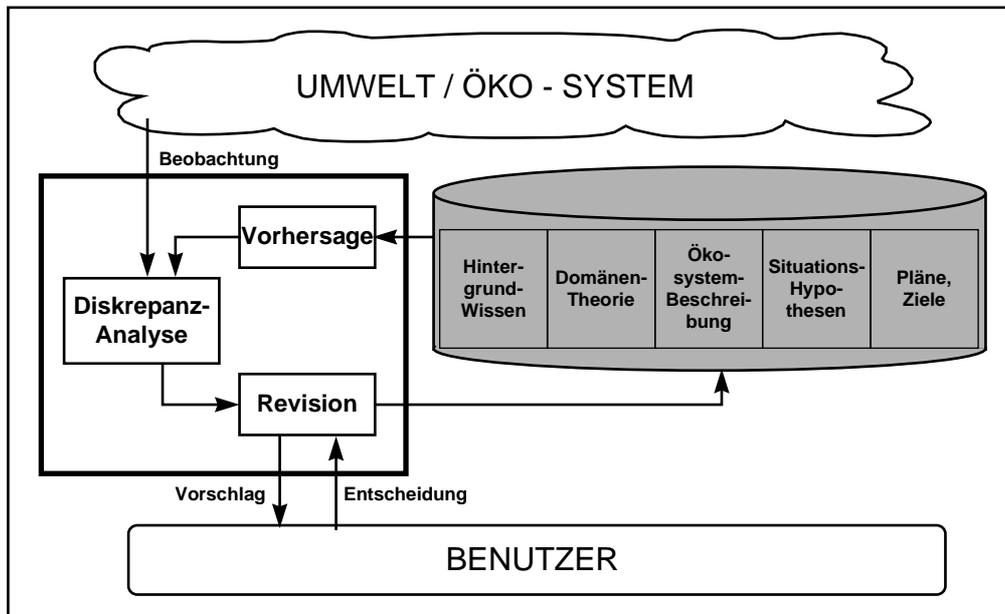
Abb. 6: Architektur für integrierte Entscheidungsunterstützung im Umweltbereich

### 4.2 Aufgabenbereiche der Entscheidungsunterstützung im Umweltbereich

In Abb. 6 ist veranschaulicht, wie eine gemeinsame Wissensbasis die Integration für die verschiedenen Aufgabengebiete der Entscheidungsunterstützung leisten soll.

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsystemen"

Jedes der Module zur Modellbildung, Situationsbeurteilung, Diagnose und Planung agiert auf der gemeinsamen Wissensbasis, wobei Beobachtungen aus dem realen System in der Interaktion mit dem Benutzer verarbeitet werden. Dabei gibt es auch eine gemeinsame abstrakte Charakterisierung der den einzelnen Aufgabenmodulen zugrunde liegenden Problemlösungsstrategien, den Modell-Revisions-Zyklus, der in Abb. 7 dargestellt ist.



**Abb. 7: Der grundlegenden Modell-Revisions-Zyklus**

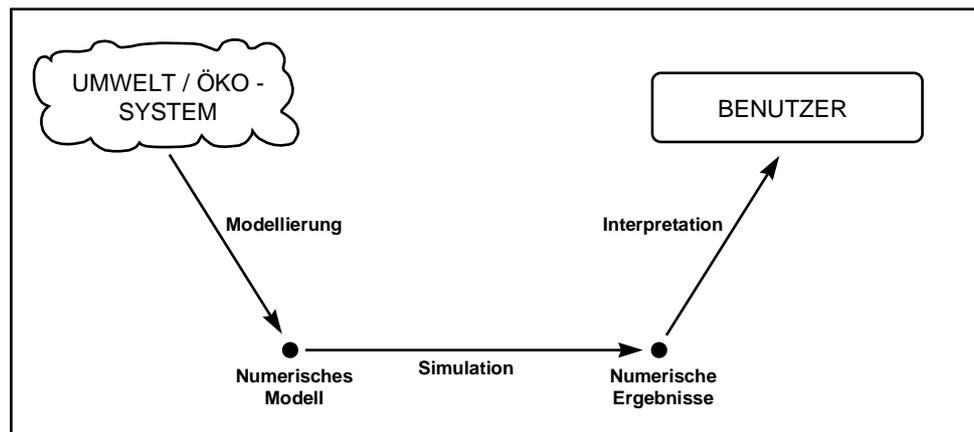
Es gilt, die in der Wissensbasis repräsentierte Beschreibung möglichst mit dem realen System zur Deckung zu bringen. Solange sich Diskrepanzen zwischen Vorhersagen und Beobachtungen ergeben, muß nach einer speziellen Revisionsstrategie auf die an der Entstehung der Diskrepanz beteiligten Modellelemente eingewirkt werden.

Die Revisionsstrategie unterscheidet sich nach den Zielsetzungen. Bei der Modellbildung wird auf die Domänentheorie oder auf die Beschreibung des Ökosystems eingewirkt, beispielsweise indem neue Theorien über das Verhalten einzelner Spezies generiert werden oder aber das Vorhandensein oder die Abwesenheit einer bestimmten Spezies hypothetisiert wird. Bei der Situationsanalyse oder Diagnose wird auf die Situationshypothesen eingewirkt, schließlich werden auch Pläne festgelegt, die dann in ihrer Ausführung simuliert und anhand definierter Ziele auf ihre Tauglichkeit überprüft werden können.

Zwei kleine Beispiele zu den Schlußweisen in diesem Kontext werden im Abschnitt 4.5 vorgestellt.

### 4.3 Konzeptuelle Modellierung

Beim klassischen Vorgehen der Simulation wird vom realen System ausgehend ein numerisches Modell erstellt. Auf dessen Grundlage werden dann mit einem Simulationsverfahren numerische Ergebnisse (die zukünftige oder hypothetische Zustände darstellen) generiert und müssen dann interpretiert werden, um für den Benutzer bedeutsame Aussagen (beispielsweise alarmierende Entwicklungen oder Hypothesen über deren Ursachen) zu erhalten. Dieses Vorgehen ist in Abb. 8 diagrammatisch gezeigt.

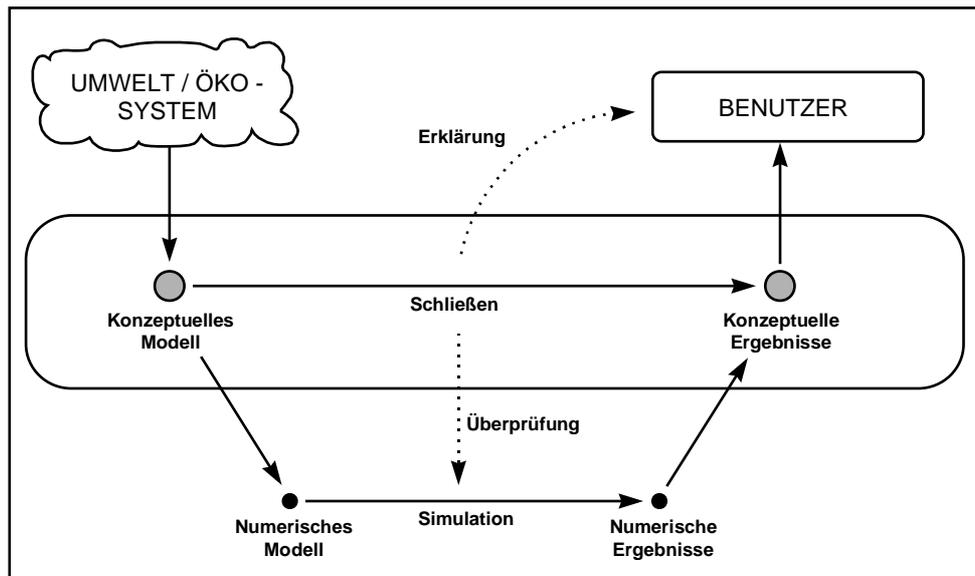


**Abb. 8: Numerische Simulation**

Wir argumentieren für die Einführung einer konzeptuellen Ebene, die explizit Konzepte aus der Begriffswelt der Domänen-Experten darstellt und somit an mehreren Stellen dieses Vorgehen unterstützen kann, wie in Abb. 9 dargestellt ist.

Zum einen wird die Modellierung als solche unterstützt, da im Gegensatz zu numerischen Verfahren intuitive Beschreibungs-Konzepte benutzt werden können. Wir verwenden Prozesse als Modellelemente, wie etwa in der qualitativen Prozeßtheorie (vgl. [Forbus 84]). Diese können dann bei einer gegebenen Szenario-Beschreibung in generischer Weise zu einem Systemmodell komponiert werden oder auch numerische Gleichungen generieren. Aber als wesentlicher Vorteil bleibt die Verfügbarkeit und Zugreifbarkeit auf die eingebrachten Konzepte, z. B. Auswahl an relevanten Effekten und Phänomenen oder Annahmen über Rahmenbedingungen.

Zum anderen wird die Interpretation von Ergebnissen unterstützt, da auch hier wieder Aussagen auf der konzeptuellen Ebene eine Rolle spielen. Nötig ist eine Rücktransformation auf diese Ebene, etwa indem abgeleitet wird, welche Prozesse denn aktiv sein können.



**Abb. 9: Die konzeptuelle Ebene**

Weiterhin können viele Schlüsse schon auf der konzeptuellen Ebene geschehen und daher mit relativ geringem Aufwand wichtige Aussagen gemacht werden. Zu den Vorteilen, Aussagen gleich über ganze Klassen von Situationen oder Zusammenhängen auf diese Weise zu gewinnen siehe Abschnitt 4.

Möglich wird auch die dynamische Überprüfung der Gültigkeit der numerischen Modelle und die automatische Modelltransformation (Abstraktion, Approximation oder andere) mit der für verschiedene Zwecke Modelle unterschiedlicher Granularität (zeitlich und räumlich) und verschiedenen Detailreichtums (z. B. Anzahl der Systemvariablen) erzeugt werden können (siehe [Heller/Struss 96c]).

Nicht zuletzt gewinnt die Kommunikation mit menschlichen Experten eine neue Dimension. Erklärungen der gezogenen Schlußfolgerungen können generiert werden, die dem Benutzer ermöglichen, die einbezogenen aber vielleicht weniger offensichtlichen Abhängigkeiten nachzuvollziehen, oder aber bei unerwarteten oder sogar falschen Ableitungen einzugreifen und die Modell-Revision gezielt zu fokussieren. Eine explizite Repräsentation von gemachten Vereinfachungsannahmen hilft auch bei deren Überprüfung und Revision.

#### **4.4 Qualitative Modellierung**

Das verfügbare Wissen im Umweltbereich ist notwendigerweise in mehrfacher Hinsicht beschränkt. Das Expertenwissen ist zu einem großen Teil charakterisiert durch die Kenntnis prinzipieller Zusammenhänge und Einflüsse, ohne daß genaue Parameter (z. B.

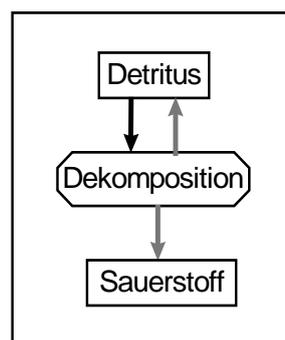
## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltanwendungen"

Wirkungskoeffizienten) und funktionale Abhängigkeiten bekannt sein könnten. Wir finden also sowohl parametrische Unsicherheit, als auch unvollständig bekannte Abhängigkeiten. Oft werden daher generelle Tendenzen und Grenzfälle zum Schließen über reale Systeme verwendet.

Auch das Wissen über den aktuellen Systemzustand ist durch die eingeschränkte Beobachtbarkeit zwangsläufig unvollständig. In kaum einem realistischen Szenario ist eine vollständige räumliche und zeitliche Abdeckung durch Messungen denkbar. Auch sind einige relevante Beobachtungen inhärent qualitativer Natur, wie zum Beispiel das Sichten von Fischpopulationen und dem Gesundheitszustand einzelner Fische.

Geeignete Abstraktionsebenen der Beschreibung von Systemverhalten können auch in der Wissensbasis nachgebildet werden. Die Methoden des qualitativen Schließens, wie zum Beispiel die qualitative Prozeßtheorie (siehe [Forbus 84]), bieten geeignete Modellierungsparadigmen und Schlußverfahren, um das vorhandene Wissen verarbeiten zu können.

Eine Grundidee des qualitativen Schließens ist es, ausschließlich die relevanten Unterscheidungen zu treffen, also Klassen von sich gleichartig verhaltenden oder sich ähnlich auswirkenden Fällen zu bilden, über die dann geschlossen wird. Das können Intervalle von Parameterwerten, abstraktere Charakterisierungen von Funktionen oder rein durch das Vorzeichen bestimmte Einflußfaktoren sein. Damit gewinnt man auch entsprechend Aussagen über solche Klassen von Situationen und somit auch möglicherweise Aussagen großer Robustheit und Stabilität gegenüber Parameterabweichungen



**Abb. 10: Abstrakte Repräsentation eines Prozesses**

Nach diesem Ansatz verwenden wir in den Prozeßbeschreibungen in flexibler Weise abstrakte Beschreibungen von Einflüssen, etwa in Form von monotonen oder linearen funktionalen Zusammenhängen (vgl. [Heller/Struss 96b]). Auf einem noch höheren Abstraktionsniveau sind nur noch die Tendenzen der Einflüsse der Systemvariablen auf die

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsystemen"

Rate des Prozesses und die der Einflüsse des Prozesses auf weitere Systemvariablen. In Abb. 10 ist eine einfache graphische Repräsentation einer solchen Beschreibung gezeigt, wobei Systemvariablen als Kästen dargestellt sind, Prozesse als Achtecke, schwarze Pfeile für positive Einflüsse und graue für negative stehen.

Aber auch wenn detailliertere numerische Modelle notwendig erscheinen, sollten sie in einen konzeptuellen Rahmen eingebettet werden, in dem qualitative Schlüsse über Anwendbarkeit, Rahmenbedingungen und Gültigkeitsbereiche die Analyse unterstützen. Diese wichtigen Schlußfolgerungen liegen außerhalb des Bereichs der klassischen numerischen Lösungsverfahren.

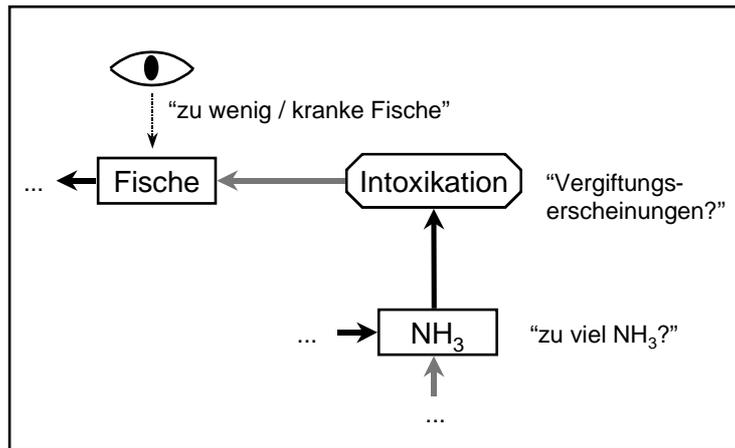
### 4.5 **Schlußfolgerungen mit den Modellen**

Wir wollen die Ansätze zur Situationsanalyse und Maßnahmenplanung anhand von zwei kleinen illustrativen Beispielen aus unseren Arbeiten an der Modellierung von Algenblüten in subtropischen Gewässern illustrieren (vgl. [Heller et al. 95]). Dabei geht es um die vielfältigen Faktoren, die zur explosionsartigen Vermehrung von Algen führen können, und um die Auswirkungen, die eine solche Blüte auf das Ökosystem hat. In den Beispielen werden toxische Stoffe herangezogen, die entweder direkt aus dem Stoffwechsel der Algen hervorgehen oder aber im chemischen Ungleichgewicht entstehen, das mit großen Algenblüten einhergeht.

#### 4.5.1 5.1 Situationsanalyse am Beispiel der Algenblüten

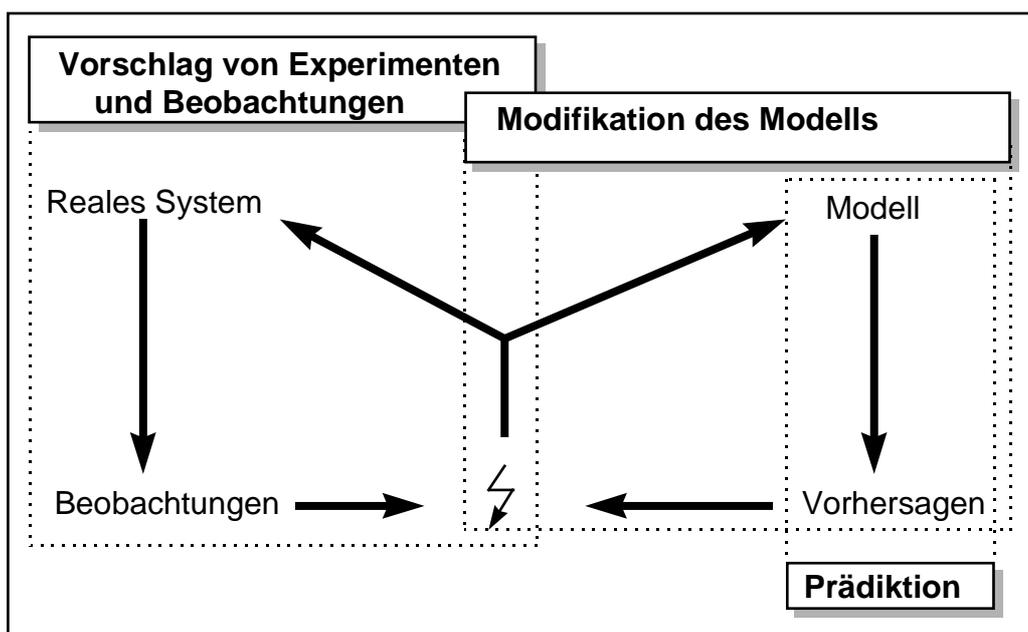
Bei der Situationsanalyse (bzw. "Diagnose") geht es um die Analyse von Störungen im System, die sich an den beobachteten Symptomen zeigen (meist auch in Form von Abweichungen von einem Normalverhalten bzw. einem gewünschten Bereich). Ein einfaches Beispiel soll das Vorgehen illustrieren (siehe Abb. 11):

Wird ein deutlicher Rückgang der Fischpopulation beobachtet, so kann über die darauf einwirkenden Prozesse auf mögliche Ursachen geschlossen werden. Dabei ergeben sich Vermutungen über andere Abweichungen (im Beispiel: zu viel  $\text{NH}_3$ ) oder aber über Prozesse, die "ungewöhnlicherweise" aktiv sind. Dafür kommen externe Einflüsse (z. B. Einleitung von Schadstoffen in den Wasserkörper) in Frage.



**Abb. 11: Beispiel für Situationsanalyse/Diagnose mit Prozeßabstraktionen**

Um diese Schlüsse zu formalisieren, wird ein Vorgehen aus der abhängigkeitsbasierten Diagnose vorgeschlagen, das sich in der technischen Domäne inzwischen vielfach bewährt hat und weitverbreitete Anwendung findet (vgl. [Reiter 87], [Hamscher et al. 92]). Das Grundprinzip ist in Abb. 12 veranschaulicht: die Vorhersagen aus einem Systemmodell werden mit den Beobachtungen des realen Systems verglichen, und aus den entdeckten Diskrepanzen sollen dann Revisionsvorschläge für das Modell abgeleitet werden. Diese Revisionsvorschläge richten sich auf die Annahmen, die in die Vorhersagen eingegangen sind, und die daraufhin untersucht werden, ob sie zurückgezogen bzw. modifiziert werden müssen.



**Abb. 12: Grundprinzip der abhängigkeitsbasierten Diagnose**

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

Bei der Diagnose technischer Systeme handelt es sich typischerweise um Annahmen der Form "Komponente X funktioniert korrekt", die entsprechend zurückgezogen werden können (d. h. die Komponente verhält sich in beliebiger Weise unkorrekt) oder aber modifiziert werden (etwa in der Form "Komponente X hat Fehler Y", was der Instanziierung eines Fehlermodells entspricht, das dann auf Konsistenz mit den Beobachtungen überprüft wird). Das Ziel ist in jedem Fall, das Modell iterativ an die real gegebene Situation anzupassen, bis es in der zugehörigen Annahmenmenge eine abstrakte Sicht dieser Realität widerspiegelt.

Im Fall von prozeßorientierter Situationsanalyse treten Annahmen über die (Nicht-)Aktivität von Prozessen und eventuell über die Einhaltung bestimmter Bereiche bei den exogenen Variablen auf. Dabei können zuerst abstraktere Repräsentationen der modellierten Prozesse verwendet werden, und die detaillierteren Modelle werden erst dann auf Konsistenz überprüft, wenn die abstrakteren keine Widersprüche mehr liefern. Für unsere Illustrationen verwenden wir vorläufig eine Abstraktion, die Prozesse nur nach der Tendenz ihrer Einflüsse auf Systemvariablen charakterisiert. In den Abbildungen stehen graue Pfeile für negative Einflüsse, schwarze für positive.

### 4.5.2 5.2 Ein Therapie-Szenario für Algenblüten

Bei ungewöhnlich großen Algenblüten können gewisse toxische Stoffwechselprodukte das Ökosystem gefährden. In solchen Fällen können beispielsweise Algizide (Giftstoffe, die speziell auf Algen wirken) eingesetzt werden, um die Algenblüte zurückzudrängen. Eine solche Maßnahme muß jedoch auf ihre weiteren Auswirkungen untersucht werden, um sie möglicherweise zu verwerfen, zu modifizieren oder aber durch begleitende Maßnahmen zu unterstützen.

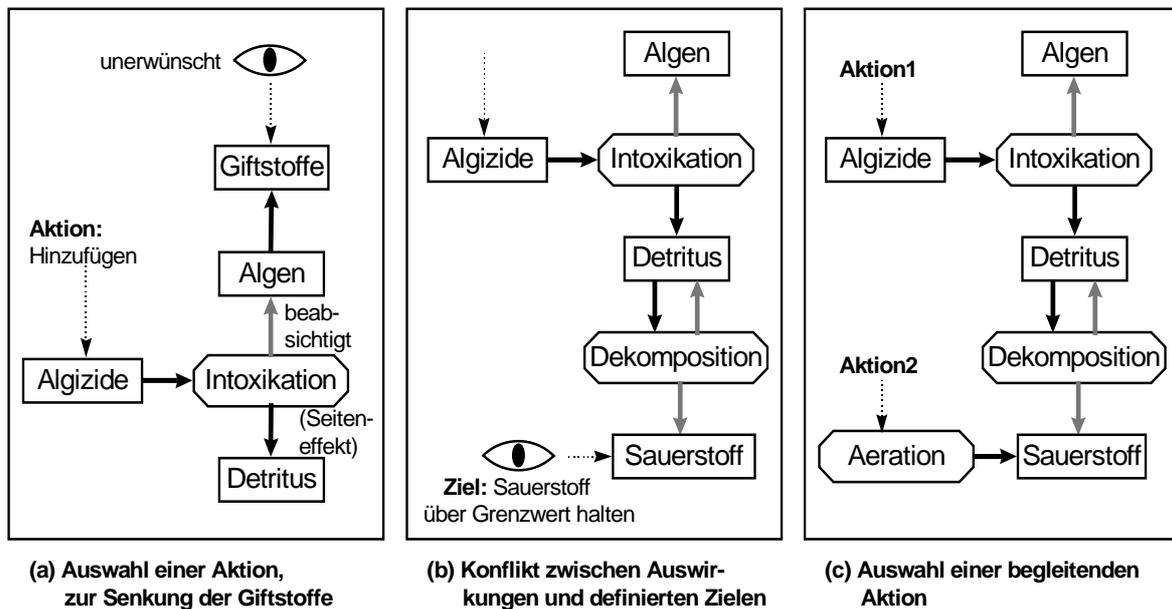
Im Falle eines Einsatzes von Algiziden etwa wird als Nebeneffekt die tote Biomasse (Detritus) im Ökosystem lokal ansteigen, was günstige Wachstumsbedingungen für einige sich schnell vermehrende Bakterien bietet. Diese werden unter erhöhtem Sauerstoffverbrauch den Detritus zersetzen. Die Sauerstoffkonzentration aber darf nicht unter einen gewissen Grenzwert fallen, um nicht die Fisch- und Pflanzenpopulationen zu gefährden. Eine mögliche begleitende Maßnahme ist daher die künstliche Belüftung des Wasserkörpers mit Aeratoren.

In einem prozeßorientierten Modell können diese Schlußfolgerungen automatisiert und Entscheidungsvorschläge formal abgeleitet werden, wie kurz in den folgenden Illustrationen veranschaulicht werden soll. Wieder können abstrakte, qualitative Sichten auf die

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltanwendungen"

modellierten Prozesse verwendet werden, die etwa nur die (möglichen) Auswirkungen in Form von Tendenzen der beeinflussten Variablen charakterisieren.

Um ein schädliches Stoffwechselprodukt der Algen einzudämmen, können einerseits senkend darauf wirkende Maßnahmen (falls vorhanden) vorgeschlagen werden, andererseits aber auch die positiv beitragenden Faktoren (in diesem Fall die Biomasse der Algen) als Angriffspunkt gewählt werden. Unter den möglichen Aktionen, die diese senken findet sich die Zugabe von Algiziden, die mit ihren relevanten Effekten instantiiert wird (siehe Abb. 13(a)).



**Abb. 13: Beispiel für Therapieplanung mit Prozeßabstraktionen**

Die Effekte werden weiterpropagiert und mit vorgegebenen Zielen verglichen (hier z. B. eine Variable oberhalb eines Grenzwerts zu halten, siehe Abb. 13(b)). Eventuell ergeben sich weitere Aktions-Vorschläge, die begleitend, oder auch in zeitlicher Reihenfolge ausgeführt werden sollen (siehe Abb. 13(c)).

### 4.6 Diskussion und Ausblick

Ein oft gehörter Einwand gegen qualitative Schlußmethoden ist das Auftreten von Ambivalenzen in den vorhergesagten Verhalten. Beispielsweise könnte die Möglichkeit einer zu geringen Sauerstoff-Konzentration vorausgesagt werden, während numerische Methoden abhängig von den gewählten (geschätzten) Parametern einen Zahlenwert für die Konzentration zu einem bestimmten Zeitpunkt herleiten. Damit ist aber nichts über die Verlässlichkeit

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

dieser Aussage gesagt und es können im Normalfall auch nicht die Begründungen und verwendeten Annahmen ausgegeben werden, um die Vorhersage kritisch zu überprüfen.

Denkbar ist es, unnötige Ambivalenzen, die gerade im Fall vergleichbarer einander entgegenwirkender Einflüsse auftreten können, durch eine Integration numerischer Methoden zu verringern, wobei die quantitativen Methoden von qualitativen Schlüssen (z. B. über Anwendbarkeit, Randbedingungen und die geeignete Abstraktionsebene) kontrolliert werden.

### **4.7 Danksagungen**

Wir danken Prof. Waldir Leite Roque von der Universität in Porto Alegre, Brasilien und Dr. Guerrin vom Institut National de Recherche Agronomique in Toulouse, Frankreich, die wertvolle Ideen zur grundlegenden Architektur einer integrierten Entscheidungsunterstützung im Umweltbereich beigetragen haben.

### **4.8 Referenzen**

[Forbus 84]

Ken Forbus: Qualitative Process Theory. *Artificial Intelligence* 24 (1-3), 1984.

[Hamscher et al. 92]

Walter Hamscher, Luca Console, Johan de Kleer: *Readings in Model-Based Diagnosis*. Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo, 1992.

[Heller et al. 95]

Ulrich Heller, Peter Struss, François Guerrin, Waldir Roque: *A Qualitative Modeling Approach to Algal Bloom Prediction*. In Workshop Notes of "Artificial Intelligence and the Environment" of IJCAI-95, Montreal, Canada, 1995.

[Heller/Struss 96a]

Ulrich Heller, Peter Struss: *Qualitative Modeling for Environmental Decision Support*. 10. Internationales Symposium Informatik für den Umweltschutz (Umweltinformatik-96), Hannover, erschienen in der Reihe "Umweltinformatik Aktuell", Band 10, Metropolis Verlag, Marburg, 1996. (S. 358-367)

[Heller/Struss 96b]

Ulrich Heller, Peter Struss: *Qualitative Model Composition and Transformation for Improving Environmental Decision Support*. Intelligente Methoden zur Verarbeitung von Umweltinformationen, 2. Bremer KI-Pfingstworkshop, erschienen in der Reihe "Umweltinformatik Aktuell", Band 9, Metropolis Verlag, Marburg, 1996. (S. 9-24)

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

[Heller/Struss 96c]

Ulrich Heller, Peter Struss: *Transformation of Qualitative Dynamic Models - Application in Hydroecology*. 10<sup>th</sup> International Workshop on Qualitative Reasoning (QR-96), TR-96-01, AAAI Press, Stanford, 1996. (pp. 83-92)

[Reiter 87]

Raymond Reiter: *A Theory of Diagnosis from First Principles*. *Artificial Intelligence*, 32(1):57-96. 1987. (Auch in [Hamscher et al. 92], pp. 29-48)

**Expertensystem zur  
Unterstützung der umwelt-  
freundlichen Umgestaltung von  
Produktionsprozessen am  
Beispiel der Lackiertechnik**

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

## 5 Expertensystem zur Unterstützung der umweltfreundlichen Umgestaltung von Produktionsprozessen am Beispiel der Lackiertechnik

Matthew S. Corley, FhG-ISI, Karlsruhe

### Abstrakt

Ein PC-basiertes hybrides objektorientiertes Expertensystem wurde entwickelt, das Hilfestellung bei der umweltfreundlichen Umgestaltung von Produktionsbetrieben leistet. Im ersten Schritt wird der Benutzer unterstützt, der zu verbessernde Prozeß am Bildschirm zu modellieren. Im zweiten Schritt werden anhand der betriebspezifischen Rahmenbedingungen alle zulässigen alternativen Prozeßkonfigurationen generiert. Im letzten Schritt werden diese Alternativen bewertet und davon die besten daraus identifiziert. Bestandteile der branchenspezifischen Wissensbank sind objektorientierte Repräsentationen der Komponenten eines Produktionsbetriebs sowie ein regelbasierter Filter, der die Einhaltung von betriebspezifischen Rahmenbedingungen überwacht. Eine entsprechende Wissensbank wurde für die Lackiertechnik entwickelt. Die Güte des Systems wird an einem Beispiel demonstriert.

### 5.1 Einleitung

PAINT (Planung von abfallarmen Produktionsverfahren im Hinblick auf die Integration neuere umweltfreundlicher Technologien) ist ein objektorientiertes Flowsheeting Programm, das Hilfestellung bei der Modellierung, grafischen Darstellung und Optimierung von Prozessen leistet /I/. PAINT wurde unter Microsoft Windows mit der Entwicklungsumgebung Kappa-PC von der Firma Intellicorp implementiert. PAINT ist z.Z. mit einer Lackiertechnikwissensbank ausgestattet: die Grundstruktur des Systems ist jedoch branchenunabhängig, so daß ein Wissensbankmodul für andere Branchen entwickelt werden kann, ohne grundlegende Änderungen am Programm durchführen zu müssen.

Eine typische Sitzung mit PAINT läuft folgendermaßen ab:

1. Der Benutzer baut ein Modell des Produktionsbetriebs im Rechner mit Hilfe des PAINT-eigenen grafischen Editors auf. Hier werden Prozeßkomponenten und -ströme sowie ihre relevanten Eigenschaften aufgenommen;
2. Der Benutzer legt fest, welche Komponenten des Prozesses auch im optimierten Prozeß vorhanden sein müssen (z.B. das Produkt). Anschließend erfolgt die Generierung von Prozeßalternativen. Während diese Prozeßalternativen erzeugt werden, wird dem Benutzer zusätzliche Fragen gestellt, die die einzuhaltenden Rahmenbedingungen des angestrebten optimierten Prozesses weiter definieren. Am Ende dieses Syntheseschritts steht ein komplex-verflochtenes Netzwerk, das alle möglichen Prozeßalternativen enthält;
3. Der Optimierungsschritt beinhaltet die Identifikation des „besten“ Pfads oder Prozesses innerhalb des Netzwerks. Nachdem der Benutzer die Gewichtung der Optimierungskriterien festlegt (z.B. Abfallmenge, Kosten, etc.) setzt PAINT ein leistungsfähiges binäres Suchalgorithmus ein, das den optimalen Prozeß innerhalb des Netzwerks identifiziert.

Die Motivation, das hier beschriebene System zu entwickeln, entstand aus der Erstellung einer Reihe von Berichten zum Thema Abfallvermeidung und -verwertung aus den Jahren 1991-1993 (z.B. /II/, /III/, /IV/, /V/). In diesen Berichten, die im Auftrag des baden-

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umwelthanwendungen"

württembergischen Umweltministeriums und der baden-württembergischen Abfallberatungsagentur (ABAG) entstanden, wurden für umweltrelevante Produktionsbranchen „typische“ kooperierende Betriebe ausgewählt, für die detaillierte betriebspezifische Abfallvermeidungs- und -verwertungskonzepte ausgearbeitet wurden.

Die Arbeitsschritte wurden für diese Berichte manuell durchgeführt. Der Gedanke liegt aber nahe zu untersuchen, wie weit sich diese Arbeitsschritte mit Hilfe eines Computers durchführen lassen.

PAINT ist geeignet für alle Benutzer, die schnell abschätzen wollen, welche abfall- und emissionsmindernden Maßnahmen für einen Lackierbetrieb in Frage kommen und v. a. welche von diesen Maßnahmen die "beste" ist. Diese sind auf der einen Seite Anwender wie in diesem Beispiel Lackieranlagenanbieter, Lackhersteller oder Lackverarbeiter, die eine Vorplanung durchführen müssen oder auf der anderen Seite Genehmigungs- oder Überwachungsämter, die eine bereits bestehende Anlage oder einen Genehmigungsantrag beurteilen müssen.

PAINT wird z.Z. im Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI) und der ABAG zur Unterstützung der Bearbeitung diverser Projekte und Fragestellungen der Abfallwirtschaft eingesetzt. PAINT ist bereits mit sehr positiven Ergebnissen in mehreren Lackieranlagen erprobt worden. Bevor PAINT kommerziell angeboten wird, sind weitere Erprobungen geplant.

### **5.2 Die objektorientierte Wissensbank und die Methode**

Die Wissensbank enthält Beschreibungen der relevanten Verfahren und Stoffe der Lackiertechnik. Die Wissensbank ist objektorientiert; das bedeutet, daß die Wissensbank in Form von hierarchischen Klassen strukturiert ist. In der Wissensbank sind als Verfahrensklassen u.a. abgebildet: Dreißig Lackierverfahren, 5 Trocknerverfahren sowie mehrere Verfahren zur Abscheidung von Overspray, zum Recycling von u.a. Lack, Lackschlamm, verbrauchtem Reiniger, zur Abfallentsorgung und zur Behandlung von luft- und wasserseitigen Emissionen. Unter den Lackierverfahren gibt es u.a. 5 Pulververfahren sowie 10 verschiedene handgehaltene Spritzpistolenarten (Bild 14). Verschiedene Stoffströme sind ebenfalls in der Wissensbank als Klassen beschrieben: das Werkstück, 9 Lacksorten (wie Wasserlacke, 2K-Lacke, Pulverlacke, etc.) plus Verdünner und Härter, sowie die notwendigen Hilfsmittel (Reiniger, Filtermatten, Koagulierungsmittel) und die anfallenden Zwischenprodukte, Abfälle und Emissionen (wie Overspray, Lackschlamm, Restlacke, verbrauchte Reiniger, etc.).

Der Vorteil der objektorientierten Darstellung besteht darin, daß alle Informationen, die eine Verfahrenskomponente (z.B. eine Spritzpistole) betreffen, sehr systematisch und alle an einer Stelle in der Wissensbank gespeichert werden. Für ein Verfahren sind solche Informationen in Bild 15 zusammengefaßt:

Für die Stoffe und Energien in der Wissensbank müssen ebenfalls Informationen verwaltet werden wie **Attribute** (Menge, Konzentration, Zähigkeit, etc.) sowie geeignete **Erzeuger- und Empfängerverfahren**.

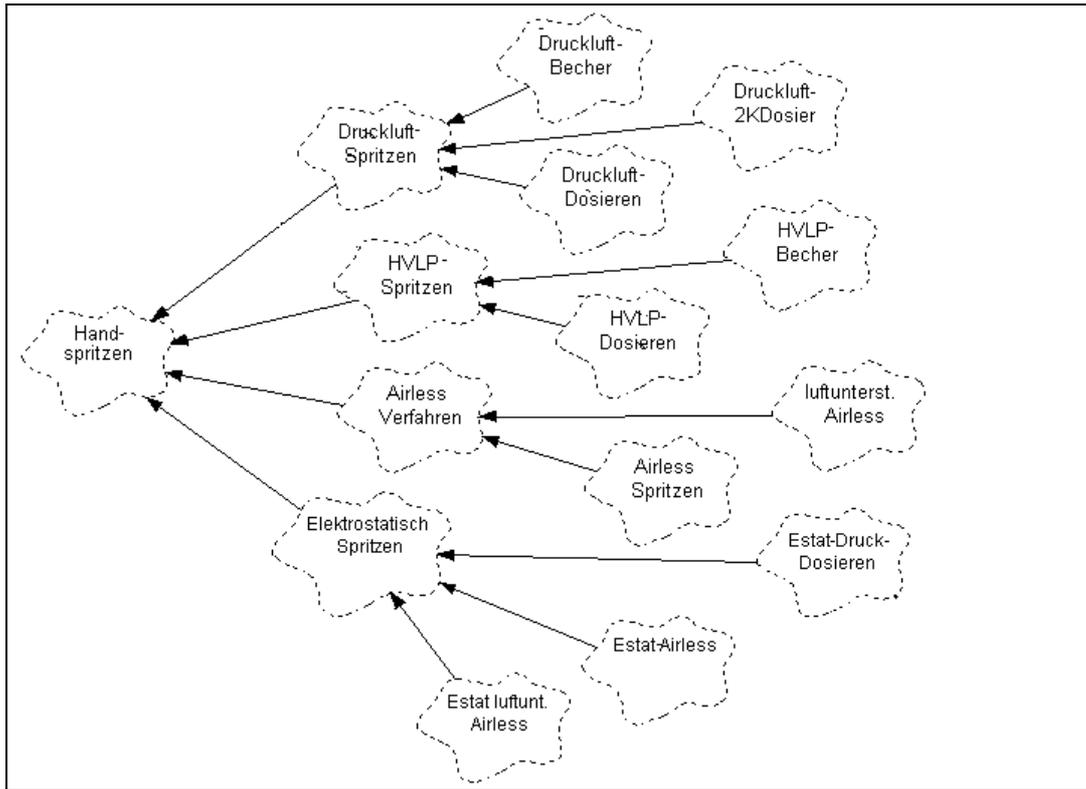


Abb. 14: Die handgehaltenen Spritzverfahren als Booch-Diagramm /VI/

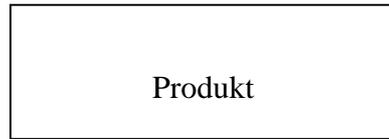
Information	Beschreibung
Attribute	wie Art, Größe, Durchmesser, Durchsatz, Kapazität.
Anzahl der Inputs und Outputs	Um funktionieren zu können, wird ein Verfahren mit Stoff- und Energieströme verknüpft. Jedes Input erfüllt einen bestimmten Zweck und werden in den Outputs umgewandelt. Ziel des Verfahrens sind die Produkte zu erzeugen, wobei Abfälle zwangsweise entstehen. Die Anzahl dieser Inputs und Outputs ist für das Verfahren festgelegt.
Stoffe und Energieträger	Jedes Input und Output eines Verfahrens wird einen begrenzten Liste von Stoffen oder Energieträger zugeordnet. Nur die Einträge in diese Liste sind geeignet, die Funktionen der Inputs und Outputs zu erfüllen.
Funktionen	Für die Bestimmung von Attributwerten (können quantitativ oder qualitativ sein) z.B. für die Bilanzierung von Stoffströmen (Berechnung der benötigten Lackmenge für x Werkstücke oder Berechnung der Lackschlammmenge für einen Auftragswirkungsgrad y).
Technische oder betriebliche Rahmenbedingungen	Diese müssen eingehalten werden, damit ein bestimmtes Verfahren in einen Lackierprozeß eingesetzt werden kann. Sie können qualitativer oder quantitativer Natur sein.

Abb. 15: Tabelle relevante Informationen zur Darstellung eines Verfahrens



## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

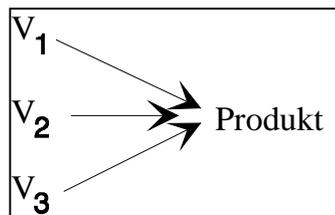
Prozeß vorhanden sein soll und ist i.d.R. das Produkt, das z.B. nur das lackierte und vernetzte Werkstück enthält (Bild 17).



**Abb. 17: Kernprozeß**

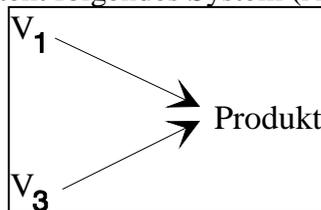
Im ersten Schritt werden alle Verfahren identifiziert, die dieses Produkt (das lackierte Werkstück) erzeugen können und mit diesem verknüpft (Bild 18).

Hierfür werden die Strukturparameter und ihre Werte herangezogen. Die Erzeuger (z.B. hier Trocknungs- und Vernetzungsverfahren), die direkt von den Strukturparametern stammen, repräsentieren die *denkbaren Verknüpfungen*. Diese Verfahren sind denkbar, weil sie, rein technisch betrachtet, in der Lage sind, das Produkt zu erzeugen. Die betriebs- oder anlagenspezifischen Rahmenbedingungen (Oberflächenqualität, Durchsatz, etc.) wurden noch nicht berücksichtigt.



**Abb. 18: Denkbare Erzeuger von Produkt**

Im zweiten Schritt wird die Einhaltung der betriebsspezifischen Rahmenbedingungen bei jeden von diesen denkbaren Erzeugern überprüft und bei Nichteinhaltung werden sie entfernt. Hierfür werden die Regeln eingesetzt. Im Bild 18, z.B., wenn  $V_1$  und  $V_3$  gegen keine Rahmenbedingungen stoßen,  $V_2$  aber doch, dann wird  $V_2$  vom Netzwerk entfernt. Dies könnte z.B. der Fall sein, wenn das Werkstück aus Holz ist und  $V_2$  ein Einbrenntrockner ist. Nach Beenden des zweiten Schritts entsteht folgendes System (Abb. 19).



**Abb. 19: Darstellung nach der Entfernung von unzulässigen Verknüpfungen**

Anschließend wird der erste Schritt wiederholt, wobei alle denkbaren Rohstoffe, Produkte und Abfälle von  $V_1$  und  $V_3$  identifiziert werden. Nachdem die unzulässigen Verknüpfungen anschließend entfernt werden, ist ein Netzwerk entstanden, das so aussieht (20).

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltanwendungen"

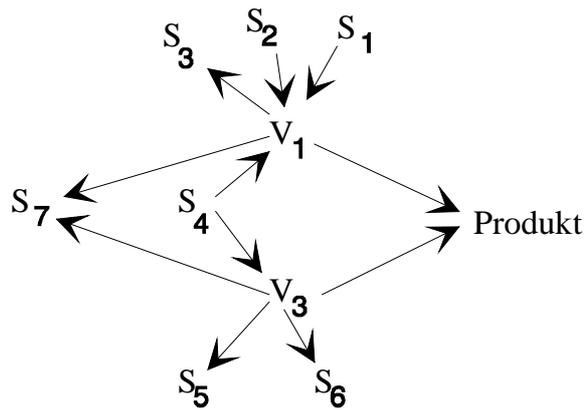


Abb. 20: Darstellung nach der erneuten Erzeugung von zulässigen Verknüpfungen

Diese zwei Schritte werden so oft nacheinander wiederholt, bis keine Verknüpfungen oder Komponenten mehr eingefügt werden können. Am Ende steht ein Netzwerk, das mehrere Hundert Verknüpfungen und 1000+ Prozeßalternativen, die sich z.T. nur geringfügig von einander unterscheiden, enthalten kann. Die Generierung dauert ca. 5-10 Minuten auf ein Pentium/100 Mhz PC. Am Ende dieser Generierung verfügt man über ein Netzwerk, das alle zulässige Prozeßalternativen enthält. Unterschiedliche Pfade durch dieses Netzwerk stellen unterschiedliche Prozeßalternativen dar.

Obwohl der Netzwerk alle zulässigen Alternativen enthält, enthält er auch unzulässige Pfade. Die Aufgabe der Optimierung ist es deshalb, erst die zulässigen Prozeßalternativen festzustellen, sie anhand der Kriterien zu bewerten und basierend auf dieser Bewertung die „beste“ Alternative zu identifizieren. Welche Alternative am besten ist, hängt von der Güte der einzelnen Alternativen ab. Die Güte einer Alternative wird anhand von fünf Bewertungskriterien festgelegt:

- minimale Abfallmenge,
- minimale luftseitige Emissionen,
- minimale Abfalltoxizität,
- minimaler Energiebedarf und
- minimale Kosten.

Vor der Optimierung gewichtet der Benutzer, je nach subjektiver Bedeutung, jedes dieser fünf Kriterien. Hierfür wird ein fünfstufiger absoluter Maßstab verwendet. (5=äußerst wichtig, 4=sehr wichtig, 3=wichtig, 2=weniger wichtig, 1=unwichtig). Die Optimierung (das Suchen nach der optimalen Prozeßalternative) erfolgt gemäß der „Branch-and-Bound“-Methode. Die Optimierung, sowie sie von PAINT durchgeführt wird, dauert, je nach Größe des Netzwerks und Anzahl der zu suchenden Lösungen, zwischen einigen Sekunden und 30 Minuten auf einem Pentium/100 Mhz PC.

### 5.3 Ein praktisches Beispiel

PAINT wurde erfolgreich für mehrere Lackierbetriebe eingesetzt. Um die Funktion des Programms zu erläutern, soll jetzt einer von diesen Einsätzen beschrieben werden. Gegenstand dieses Einsatzes ist ein mittelständischer Hersteller von Autoparksystemen. Das sind Geräte für die Unterbringung von einigen Autos auf engem Raum. Diese Geräte sind relativ voluminös und weisen viel Leerraum und Öffnungen auf, so daß geometriebedingt viel Overspray bei der Spritzlackierung entsteht. Durch die gegenwärtige zweischichtige Spritzlackierung mit 1K-Lösemittellacken entstehen z.Z. ca. 75 t/a Lackschlämme sowie



## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

dabei werden nur diejenigen in der Wissensbank enthaltenen Objekte in Prozeßkombinationen eingebaut, die im Prozeß zulässig sind (z.B. wegen der komplexen Geometrie der Autoparkgeräte würde man für diesen Betrieb keinen UV-härtenden Lack einsetzen und ebenfalls wegen der relativ großen Lackmenge wäre eine Trockenabscheidung des Lacknebels nicht sinnvoll). I.d.R. sind maßgebende Rahmenbedingungen die Eigenschaften des Werkstücks, die Größe oder bestimmte organisatorische Strukturen des Betriebs. Die Erfüllung der Rahmenbedingungen wird mit Hilfe eines eingebauten regelbasierten Expertensystems überprüft.

Gestellte Frage	Antwort
6. Wird das Lacknebelabscheidesystem saubergehalten werden?	JA
7. Wird jede Lackschicht in einer getrennten Spritzkabine aufgebracht bzw. ist es möglich die Spritzkabine nach jedem Spritzvorgang oder Farbwechsel komplett zu reinigen?	JA
8. Dürfen Recyclinglacke aus einem Lackschlammrecyclingverfahren mit dem applizierfertigen Lack vermischt werden im Sinne einer Oversprayverwertung?	JA
9. Wird der Lacklieferant Rest- oder Altlack wieder zurücknehmen und womöglich aufarbeiten zu Neulack?	NEIN
10. Gibt es die Möglichkeit, verschmutzte oder veraltete Lacke bei einem minderwertigen Einsatz zu verwenden?	NEIN

**Abb. 22: Tabelle, Ausschnitt aus der Liste der während der Alternativengenerierung gestellten Fragen**

Während der Generierung von Prozeßalternativen werden meistens weitere Informationen von PAINT benötigt. Wenn dies der Fall ist, erscheint am Bildschirm eine Frage mit Bitte um Informationseingabe (Abb. 22). In der Regel stellt PAINT ca. 20 Fragen während der Generierung. Am Ende der Generierung stehen mehrere Hundert bis 1000+ verschiedene Anlagenkonfigurationen, die sich z.T. nur geringfügig voneinander unterscheiden.

Es ist Aufgabe von PAINT jetzt, alle diese Alternativen systematisch zu untersuchen und zu evaluieren. Hierfür wird eine spezielle binäre Such- und Optimierungsmethode (Branch-and-Bound) herangezogen. Um diese Optimierung zu steuern, legt der Benutzer fest, wie 5 Bewertungskriterien untereinander gewichtet werden sollen.

Die „beste“ Alternative ist diejenige, die diese Kriterien anhand der Gewichtungen am besten erfüllt.

Nachdem diese Schritte durchgeführt sind, schlägt PAINT eindeutig vor, das Lackieren auf Pulver umzustellen (Bild 23). So können die Lackschlämme völlig vermieden werden und insgesamt können die Abfallmengen dadurch deutlich reduziert werden.

Von diesem Punkt aus kann man die Analyse weiter treiben. Wir können z.B. Pulver von der Analyse ausschließen, so daß nur Naßlacke berücksichtigt werden können und die Optimierung nochmal durchführen. PAINT schlägt in diesem Fall für die Grundierung Fluten oder Tauchlackierung mit einem wasserverdünnbaren Lack vor. Für den Decklack wird Spritzlackieren mit einem wasserlöslichen Wasserlack gewählt, wobei die Rückgewinnung

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umwelthanwendungen"

des Kabinenwassers mittels Ultrafiltration erfolgt. Als Spritzverfahren wird das elektrostatische Airless-Verfahren mit Luftunterstützung vorgeschlagen. Man kann ebenfalls die Krieteriengewichte ändern, um zu untersuchen, welchen Einfluß sie auf die Optimierung nehmen. Wenn man die Kosten höher bewertet und den Umweltbelangen weniger Bedeutung beimißt, schlägt PAINT vor, daß Grundierung und Decklack mit einem Spritzverfahren mit Ultrafiltration des Kabinenwassers durchgeführt werden sollen.

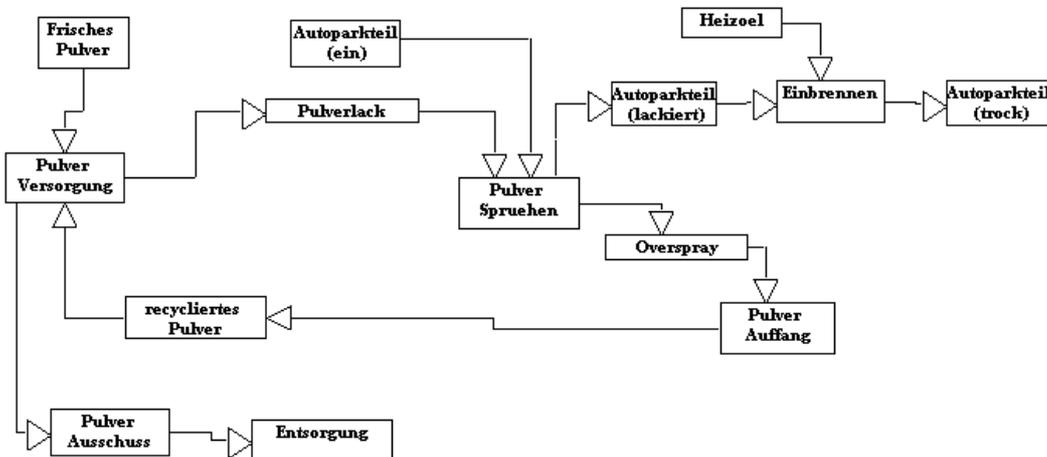


Abb. 23: Der optimierte Lackierbetrieb für Autoparkgeräte: Pulverlackieren

**Fazit:** Das Erscheinen auf dem Markt von leistungsfähiger Software Werkzeugen, die Prinzipien der künstlichen Intelligenz (KI) mit herkömmlichen Programmieretechniken integrieren, haben eine ganze Reihe neuer EDV-Anwendungen ermöglicht, die vor 10 Jahren kaum denkbar gewesen wären. Auch von Bedeutung ist die Tatsache, daß sich viele Software-Entwicklungs-Werkzeuge mit einem für den Nicht-Informatiker zumutbaren Aufwand erlernen lassen. So wird es ermöglicht, daß der Fachexperte selbst seine Anwendungen entwickelt. So kann das viel erwähnte „Information-Bottleneck“ oder die Probleme der Kommunikation zwischen Fachexperte und Systemprogrammierer z.T. umgangen werden. Jetzt besteht die Aufgabe, diese Möglichkeiten zu untersuchen und die sinnvollen Anwendungen zu identifizieren und auszuschöpfen im Dienste der Optimierung der betrieblichen Abläufen und des Umweltschutzes.

### 5.4 Literatur

/I/ Corley, M.: Entwicklung einer wissensbasierten Methodik zur abfallarmen Gestaltung von Produktionsprozessen am Beispiel der Lackiertechnik. Dissertation eingereicht an der Universität Stuttgart 1997 (erscheint demnächst).

/II/ Corley, M.; Toussaint, D.: Vermeidung von Abfällen durch abfallarme Produktionsverfahren - Autoreparaturlackierung. Im Auftrag der ABAG-Abfallberatungsagentur Baden-Württemberg. 2. Ausgabe, Karlsruhe, FhG-ISI, 1993.

/III/ Sordo, M.; Toussaint, D.: Vermeidung von Abfällen durch abfallarme Produktionsverfahren - Feuerverzinkerereien. Im Auftrag des Ministeriums für Umwelt Baden-Württemberg. Stuttgart, IPA, 1993.

/IV/ Obst, M.; Siegfried, F.: Vermeidung von Abfällen durch abfallarme Produktionsverfahren - Holzlackierung. Im Auftrag des Ministeriums für Umwelt Baden-Württemberg. Stuttgart, IPA, 1993.

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

/V/ Toussaint, D.; Bars, P.; Winterhalter, J.; Mauersberger, G.: .: Vermeidung von Abfällen durch abfallarme Produktionsverfahren - Gießereialtsande aus Eisen-, Stahl- und Tempergießereien. Im Auftrag des Ministeriums für Umwelt Baden-Württemberg. Stuttgart, IPA, 1992.

/VI/ Booch, G.: Objektorientierte Analyse und Design. 2. Aufl, Bonn: Addison-Wesley, 1994.

/VII/ Corley, M.; Grupp, Th.; Schmid, J.: EDV-System hilft bei der Optimierung von Lackierprozessen. Oberfläche + JOT (1997) Nr. 1, S. 18 ff.

**CORBA-basierte aktive  
Regelverarbeitung und  
Klassifikation aktiver  
Funktionalität für  
Einsatzmöglichkeiten in  
Umweltinformationssystemen**

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

## 6 CORBA-basierte aktive Regelverarbeitung und Klassifikation aktiver Funktionalität für Einsatzmöglichkeiten in Umweltinformationssystemen

Arne Koschel

Forschungszentrum Informatik (FZI)

Haid-und-Neu-Str. 10-14,

D-76131 Karlsruhe

e-mail: koschel@fzi.de, 0721 9654 723

### 6.1 Einleitung

Die Integration heterogener Informationsquellen in einem einheitlich nutzbaren, verteilten Informationssystem wird in vielen Anwendungsbereichen benötigt. Übergreifende Umweltinformationssysteme (UIS) /HJPS94, KM95, MFJ95, MFJ96/ sind derartige Informationssysteme. In diesen Systemen müssen Daten und Berechnungsfunktionalität aus Informationsquellen vieler Teildisziplinen integriert werden, wie z.B. Meßwerte, geographische Informationen, Ausbreitungsrechnungen usw.

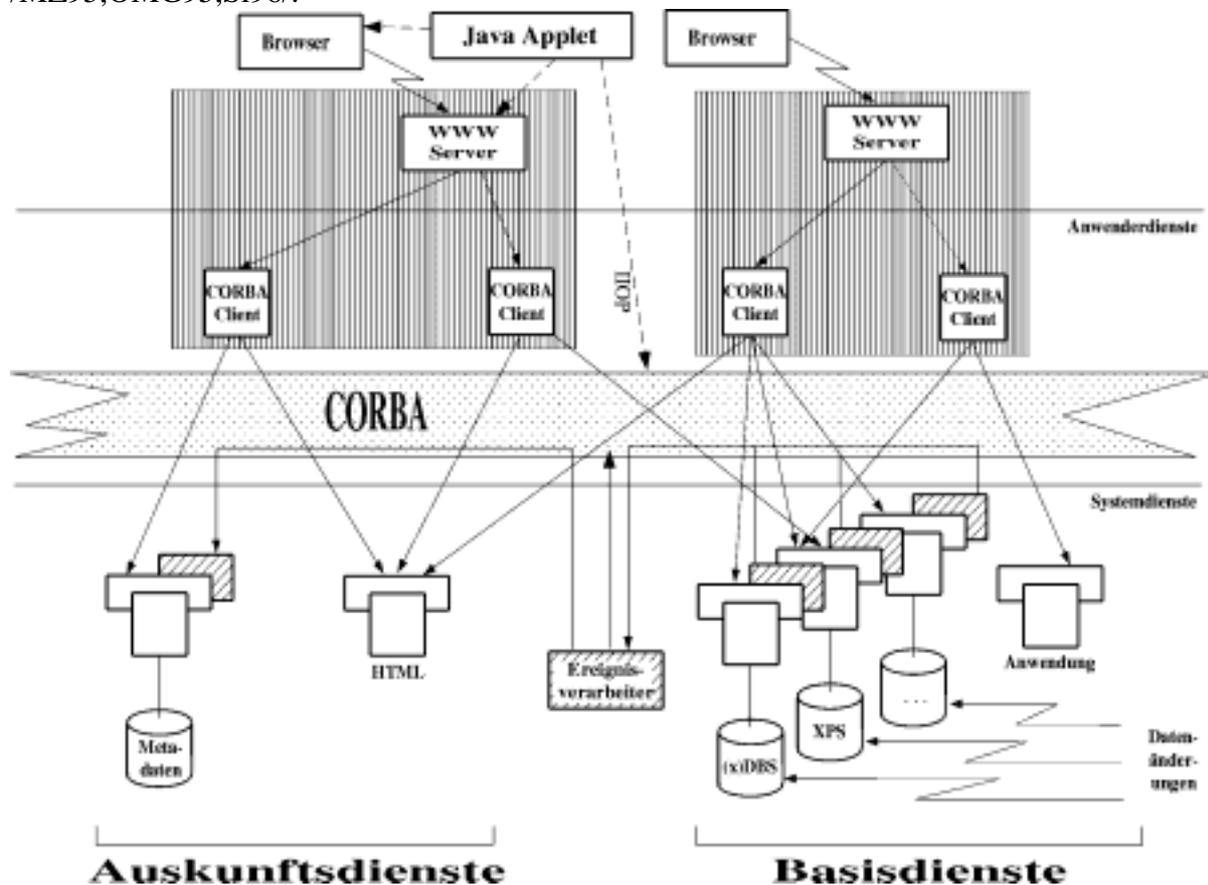
Neben dem reinen Zugriff auf die Informationsquellen wollen Benutzer oft auch automatisch informiert werden, wenn z.B. neue, für ihre Arbeit relevante Informationen, eintreffen. Beispielweise möchte ein Benutzer informiert werden, wenn ein Luftmeßwert einen bestimmten Grenzwert überschreitet, wobei die entsprechenden Daten (Meßwerte und Grenzwerte) häufig in unterschiedlichen Quellen (Datenbanken o.ä.) gehalten werden. Dementsprechend erfordert die Entdeckung solcher übergreifenden Situationen die Beobachtung einer Reihe verschiedener Informationsquellen.

Zur Bewältigung derartiger Anforderungen wurde am FZI eine Föderationsarchitektur (siehe Abb. 24), basierend auf den Ideen föderierter Datenbanksysteme /BHP92/, mit folgenden Komponenten entwickelt:

- CORBA wird zur einheitlichen, technischen Integration der Informationsquellen genutzt. Aufbauend auf diesen Quellen werden eine Reihe von Diensten bereitgestellt. Diese beinhalten Navigations- und Informationsdienste (Metadaten des sog. Umweltdatenkatalogs) und Datendienste (Meßwertdatenbanken, geographische Informationen) etc. Entsprechend müssen technisch heterogene Quellen wie relationale und objektorientierte Datenbanksysteme und GeoInformationssysteme integriert werden. Zu ihnen kommen noch Quellen ohne Datenhaltungscharakter, wie z.B. Ausbreitungsrechnungen.
- WWW-Technologie inklusive Java wird für den Client-seitigen Informationszugriff bzw. die Informationsdarstellung genutzt. Diese Technologien werden in der Föderationsarchitektur miteinander kombiniert, „klassisch“, bspw. in Form von CORBA-Objekten, die HTML-Seiten generieren, oder „modern“, mittels Java/CORBA ORBs (sog. Orblots), die sich direkt aus einem Browser mit einer Server-seitigen CORBA-Umgebung verbinden.

# 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsystemen"

Im Rahmen dieser Föderationsarchitektur wurden prototypisch bereits eine Reihe von Informationsquellen einheitlich mittels CORBA über sog. IDL-Wrapper integriert<sup>1</sup>. Ausführlichere Darstellungen der Föderationsarchitektur finden sich u.a. in /KKN+96, KKT+96/. Als dem Leser vertraut betrachtet werden die Konzepte von WWW /W3C/, Java /Jav/ und besonders CORBA /MZ95,OMG95,Si96/.



**Abb. 24: Föderationsarchitektur auf Basis CORBA,WWW/Java**

Schwerpunkt dieses Beitrags werden unsere Arbeiten zu aktiven Mechanismen für CORBA-basierte heterogene Informationssysteme sein, eingesetzt als neue Technologie für heterogene Umweltinformationssysteme. In die Föderationsarchitektur integriert sind Komponenten zur Ereignisentdeckung und zur aktiven Ereignisverarbeitung auf Basis sog. ECA-Regeln (Event, Condition, Action rules), also Datenbank-Trigger ähnliche Mechanismen, bekannt aus aktiven Datenbanksystemen /Daya88,DGG95, WC96/. Diese Komponenten sind für eine CORBA-Umgebung entwickelt und können bspw. zur Benachrichtigung über die oben genannte Grenzwertüberschreitung eingesetzt werden. Sie ermöglichen u.a. die Beobachtung heterogener, verteilter Informationsquellen, eine Überprüfung übergreifender Bedingungen mit Rückgriffen auf Informationsquellen und eine entsprechende Aktionsausführung durch CORBA-Methodenaufrufe.

Im folgenden Abschnitt werden überblicksartig die Komponenten von Coffein (CORBA-basierte Funktionseinheiten für ereignisgetriebene Informationsweitergabe und Notifikation)

<sup>1</sup> Teile unserer Arbeiten entstehen im Rahmen des UIS Baden-Württemberg. Eine erste Version des Systems, die rein auf WWW-Technologie basiert, aber bereits für CORBA und den Einsatz aktiver Mechanismen entworfen wurde bzw. vorbereitet ist, befindet sich zur Zeit bei der Landesanstalt für Umweltschutz, Baden-Württemberg in der Erprobungsphase.

vorgestellt (für eine ausführliche Darstellung der Komponenten und Diskussion verwandter Arbeiten s.a. /KK96,vBKK96/ ). Der zweite Teilbeitrag der Arbeit beschreibt eine Reihe von Anwendungsmöglichkeiten aktiver Funktionalität in UIS anhand von Beispielen. Erstmals für UIS wird hieraus ein Klassifikationsschema abgeleitet, das für Umweltinformationssysteme einsetzbare aktive Mechanismen nach ihrer Komplexität klassifiziert. Diese Komplexität kann von einfacher Ereigniserkennung und Weitergabe bis hin zur kompletten ECA-Regelverarbeitung für heterogene, verteilte UIS reichen. Den Abschluß der Arbeit bilden eine Zusammenfassung und ein Ausblick.

### 6.2 Systemarchitektur

Das System Coffein ermöglicht es, regelgesteuert Ereignisse und komplexe Situationen in CORBA-basierten Informationssystemen mit heterogenen, verteilten Informationsquellen zu erkennen und zu verarbeiten bzw. über ihr Eintreten zu benachrichtigen. CORBA-basiert bedeutet hier, daß davon ausgegangen wird, daß die Quellen und Senken in diesen Informationssystemen mittels CORBA über Wrapper für Ereigniserkennung und Lesezugriffe integriert, also über entsprechende IDL-Schnittstellen ansprechbar sind. Wesentlich ist hierbei, daß die Quellen ihre Autonomie weitgehend behalten, d.h. eigenständig, also unabhängig von Coffein, „im Tagesgeschäft,“ weiterarbeiten. Sie müssen nur über die genannten Wrapper (ggf. zusätzlich) gekapselt sein, um in Coffein genutzt werden zu können.

Coffein baut auf den Konzepten aktiver Datenbanksysteme (aDBMS) auf, die ECA-Regeln für derartige Situationserkennung bereitstellen, dies allerdings normalerweise nicht für heterogene, verteilte Informationsquellen bzw. CORBA-Umgebungen. In /DGG95,WC96/ werden Kernfunktionalität (Regelmodell) und Ausführungssemantik (Ausführungsmodell) solcher Regeln für aDBMS festgelegt. Als wohldefiniert und bewährt wird deren Funktionalität und Semantik übernommen wo das möglich ist, wobei aber anzumerken ist, daß das Konzept der ECA-Regeln in ähnlicher Form auch in anderen Arbeitsgebieten der Informatik eingesetzt wird, wie Data Warehouse Systeme [Wid95], (verteilte) Monitoring- und Debugging-Systeme [Sch95, Sch96b] (mit Fokus Ereigniserkennung) sowie (reaktive) Agentensysteme der verteilten künstlichen Intelligenz [Mül93] (mit Fokus Planungs- und Kooperationsfunktionen).

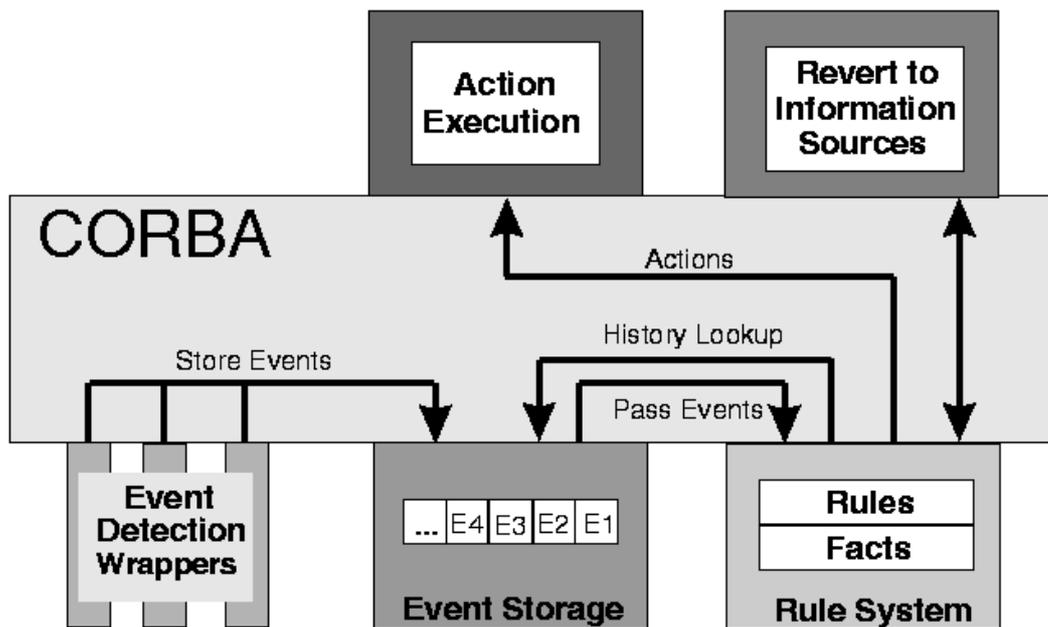
Funktionalität und Einschränkungen von Coffein gegenüber aDBMS sind ausführlich in /vBKK96/ beschrieben. Wesentliches Merkmal des Systems ist jedoch seine wesentlich größere Flexibilität als aDBMS in drei Bereichen:

1. Coffein bietet Ereigniserkennung (und -verarbeitung) für prinzipiell beliebige (gekapselte) heterogene, verteilte Informationsquellen, also insbesondere heterogene Ereignistypen. Gekapselte Quellen können z.B. über Trigger zur Ereigniserkennung integrierte Datenbanksysteme sein oder auch Berechnungsprogramme, die Ereignisse in Form von Statusmitteilungen melden, oder auch Quellen (z.B. Mail-Systeme), deren Zustand durch Polling Mechanismen abfragbar ist.
2. In Bedingungsprüfungen kann auf ebenfalls heterogene Informationsquellen zurückgegriffen werden, und Ergebnisse der Rückgriffe können in die Bedingungsauswertung aufgenommen werden. Z.B. kann eine Datenbankanfrage gestellt oder eine Berechnungsmethode (Ausbreitungsrechnung) aufgerufen werden, deren Ergebnis dann in die Bedingungsprüfung eingeht. Prinzipiell kann es sich hierbei, wie auch bei der Ereigniserkennung, um alle gekapselten Quellen handeln, d.h., es können beliebig heterogene Quellen unterstützt werden, sofern für sie eine „sinnvolle Kapsel,“ entwickelbar ist.  
Bedingt durch die Heterogenität der Quellen werden, als eine Einschränkung gegenüber vielen aDBMS, in unserem System keine Transaktionen unterstützt, d.h. es gibt u.a.

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltanwendungen"

keine Rollback-Möglichkeit für eine einmal angestoßene Ereignisverarbeitung. Im Gegensatz zu aDBMS ermöglicht es Coffein hingegen, durch die Kombination „heterogene, verteilte Ereignisquellen und Rückgriffe auf heterogene, verteilte Quellen,, deutlich komplexere Situationen in Regeln zu beschreiben und zu erkennen (Monitoring) bzw. sie zu verarbeiten.

- Das System ist, wie im Anschluß beschrieben, als eine Reihe von Teilfunktionseinheiten implementiert, die als gekapselte CORBA-Objekte zur Verfügung stehen. Dadurch ergibt sich eine flexible Verteilbarkeit von Teilkomponenten innerhalb der CORBA-Umgebung. Abbildung 25 zeigt die funktionalen Komponenten des Systems.



**Abb. 25: Funktionale Komponenten der Regelverarbeitung**

- CORBA-Wrapper werden zur Ereignisentdeckung eingesetzt. Innerhalb der Wrapper werden sowohl Schnittstellen genutzt, die gekapselte Quellen zur Ereignissignalisierung bereitstellen, z.B. Datenbank-Trigger, als auch Polling-Mechanismen eingesetzt. Die einzelnen Wrapper melden ihre Ereignisse der Ereignisverwaltung (synchron).
- Die Ereignisverwaltung „sammelt,, Ereignisse aus den verschiedenen Quellen, speichert sie (künftig) persistent und bildet sie auf ein einheitliches Ereignismodell ab. Künftig wird an dieser Stelle die Entdeckung komplexer Ereignisse, also von Kombinationen einfacher Ereignisse (z.B. UND verknüpft) durchgeführt. Derzeit geschieht dies in der Regelverarbeitung mittels eines wiederum durch Regeln implementierten endlichen Automaten. Die Regelverarbeitung wird aktiv von der Ereignisverwaltung (asynchron) angestoßen.
- Zur Regelverarbeitung wird eine Expertensystem-Shell (CLIPS /CuRD93a/) genutzt. Sie stellt klassische Produktionsregeln zur Verfügung. Coffein's E,C,A-Regeln werden als Menge solcher Produktionsregeln implementiert (deshalb die Aufteilung in E,C,A

Regeln)<sup>11</sup>. Für eine gesamte E,C,A-Regel werden mehrere einzelne CLIPS-Regeln verwendet, die auf durch die Ereignisverwaltung generierte Ereignisfakten reagieren. Innerhalb der Bedingungen von Regeln und als deren Aktionsteil, können Zugriffe auf beliebige mittels CORBA integrierte Quellen durchgeführt werden (implementiert über sog. CLIPS UserDefined Functions).

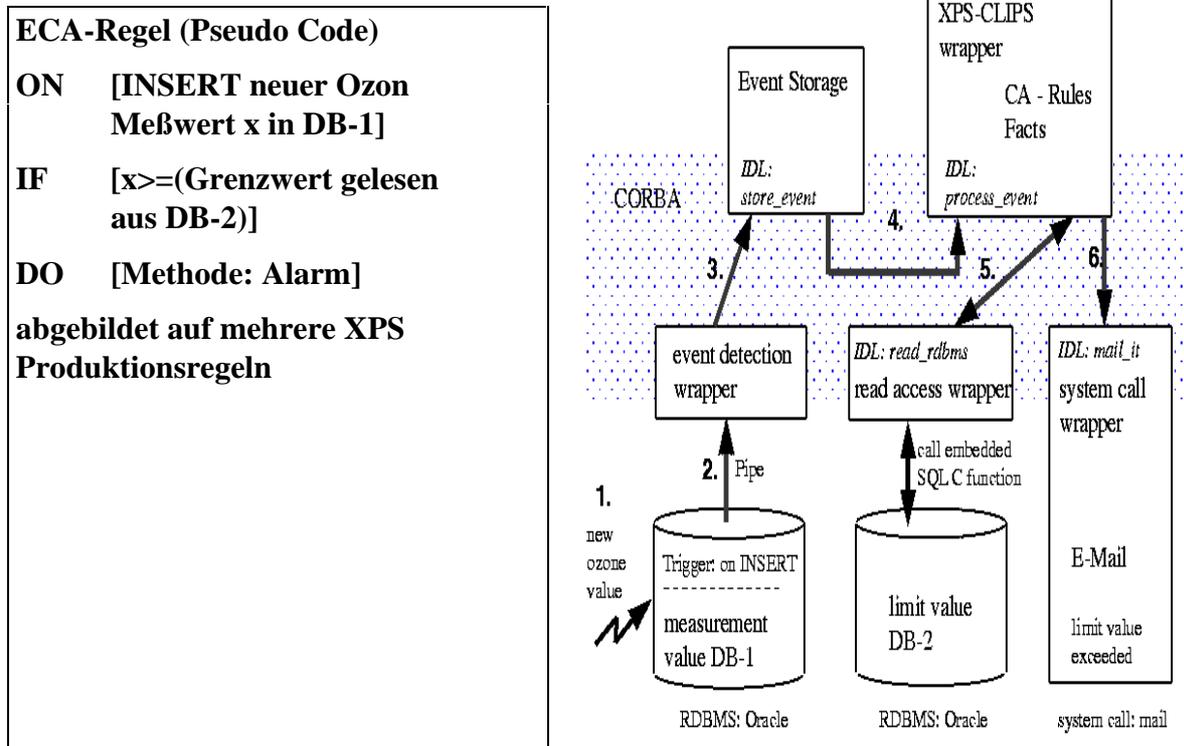


Abb. 26: Beispielverarbeitung einer E,C,A-Regel

Abb. 26 zeigt einen Beispielablauf einer E,C,A-Regelverarbeitung. Ein neuer Ozon-Meßwert trifft in einer Ozon-Datenbank ein (1). Er wird über einen Trigger erkannt und im Wrapper dieser Datenbank (2) der Ereignisverwaltung gemeldet (3). Diese wandelt das Ereignis in eine uniforme Struktur und ruft die Regelverarbeitung auf (4). Im Wrapper der Regelverarbeitung wird zunächst ein entsprechender Ereignisfakt erzeugt und dann die Regelverarbeitung angestoßen. Diese arbeitet eine gesamte E,C,A-Regel ab, indem sie in mehreren Teilregeln die Existenz eines derartigen Ozon-Fakts prüft, eine Datenbankanfrage (5) in einer Grenzwert-Datenbank zum Holen des entsprechenden Ozon Grenzwertes durchführt, in einer weiteren Regel das Ergebnis mit dem Ozon-Meßwert vergleicht und bei Überschreitung als Aktion (6) den Wrapper eines Mail-Programms mit entsprechender Alarmmeldung aufruft.

Durch Einsatz dieser Konzepte und Technologien bietet Coffein eine gute Möglichkeit der effektiven Verarbeitung von Teilregeln, die zusammengenommen ECA-Regeln darstellen.

<sup>11</sup> Eine Verwaltungseinheit zur einheitlichen Definition kompletter ECA-Regeln wird derzeit entwickelt, wobei diese ECA-Regeln dann wieder auf die jetzigen E,C,A-Regeln abgebildet werden, aber eine komfortablere Nutzerschnittstelle bereitstellen.

### **6.3 Aktive Mechanismen in UIS: Klassifikation - Beispiele**

Im vorigen Abschnitt wurde bereits ein Einsatzbeispiel einer ECA-Regelverarbeitung in UIS vorgestellt. In diesem Abschnitt werden nun ein Reihe weiterer Einsatzmöglichkeiten aktiver Mechanismen in UIS beispielhaft vorgestellt. Hierbei werden diese Beispiele nach der Art bzw. Komplexität der für sie sinnvoll einzusetzenden aktiven Funktionalität klassifiziert. Diese Komplexität kann von einfacher Ereignis-erkennung und Weitergabe bis zur kompletten ECA-Regelverarbeitung reichen. Die Klassifikation stellt einen ersten wesentlichen Schritt dar. Ziel künftiger Arbeiten ist es, die jeweils für ein bestimmtes Problem einzusetzende aktive (Teil)funktionalität individuell abzuleiten, also ein vollständiges Klassifikations-schema zu entwickeln, besonders für UIS.

*Reine Ereigniserkennung und -weitergabe:* Hierunter fallen Anwendungen, denen eine Überwachung von Ereignissen ausreicht, die also nur über das Eintreten der Ereignisse benachrichtigt werden müssen. Als aktive Funktionalität genügen hier reine Monitor-Dienste, die also lediglich Ereignisse erkennen und an Interessenten weitergeben. Unterscheidungsmerkmale sind u.a.: einer oder mehrere solcher Dienste; homogene oder heterogene Ereignisquellen. In Coffein entspricht dies etwa einem CORBA-Wrapper für Ereignisquellen. Beispiele für Anwendungen in UIS sind:

- Überwachung einzelner Quellen, wie Protokollierung von DB-Zugriffen, die Meßwerte einfügen.
- Überwachung mehrerer heterogener Quellen bspw. zur Ablaufvisualisierung einer Ausbreitungs-simulation, die wiederum auf Meßwertdatenbanken zugreift.
- Verknüpfen von Ereignissen mehrerer Quellen zu komplexen Ereignissen, also bereits einfachen Bedingungen. Beispiel wäre das Erkennen eines aufeinanderfolgendes Eintreffen von Meßwerten (Sequenz).

*Ereigniserkennung und Aktionsausführung:* Dies sind Anwendungen, die direkt auf ein Ereignis mit einer Aktion reagieren (z.B. durch sog. EA-Regeln, ohne Bedingungsteil). Analog können wieder homogene und heterogene Quellen unterschieden werden und die Arten der Aktionen. Bei klassischen aktiven DBMS sind es oft auf Datenbankoperationen beschränkte Aktionen, teilweise aber auch beliebige Methoden-aufrufe als Aktionen, was den beliebigen CORBA-Methoden in Coffein entspräche. Beispiele für Anwendungen in UIS sind:

- Automatisierte Metadatenfortschreibung von UDK (Umweltdatenkatalog) Objekten, bei Eintreffen neuer Einträge in Datenbanken (homogene Quellen), die UDK-Objekte enthalten (z.B. Luftmeß-netze). Also z.B. das Einfügen einer neuen Meßstation.
- Erweiterungen für heterogene Quellen könnten z.B. auch das Einfügen neuer Geo-Informationen (z.B. neue/veränderte Karte) melden.

*Reine Produktionsregel-Verarbeitung (nur CA-Teil):* Dies entspricht klassischen Expertensystemshells (wie in Coffein CLIPS alleine) mit den entsprechenden Anwendungen im Umweltbereich, wie Altlasten-beurteilung, Gewässerschutz usw. Hierauf wird nicht näher eingegangen.

*Vollständige ECA-Verarbeitung (mit Bedingungsteil):* Diese Klasse von Anwendungen benötigt vollständige ECA-Regelverarbeitungen. Für eher homogene, datenbankzentrierte Umgebungen können z.B. klassische aktive DBMS eingesetzt werden, die oft vollständige Transaktionsunterstützung bieten. Sind heterogene, verteilte Informationsquellen zu überwachen bzw. in Bedingungen auf sie zurückzugreifen, sind Systeme wie Coffein einzusetzen. Klassifikationskriterien sind hier also - aufbauend auf den vor-herigen - u.a.:

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

- Sind homogene oder heterogene Ereignisquellen zu beobachten (s.o.)?
- Sind Quellenrückgriffe in Bedingungsprüfungen nötig? Sind dies ggf. homogene oder beliebig heterogene Quellen, also besonders auch Nicht-Datenquellen?
- Sind Transaktionen notwendig, um bspw. Integritätsbedingungen überwachen zu können („Keine Meßstation mehrfach zulässig,“)?
- Sind verteilte Quellen zu betrachten?
- Welche Art von Aktionen sind auszuführen? Datenbankinterne Aktionen? Beliebige?

Beispiele aus UIS sind hier:

- Die oben genannte Grenzwertüberwachung (mehrere Datenbanken, also homogene Quellen)
- Integritätsbedingungen (s.o.), die bestimmte zulässige Zustände garantieren können, also rücksetzbare Transaktionen benötigen oder zumindest kompensierende Aktionen einleiten können, also bspw. einfügen einer doppelten Meßstation zurückweisen oder doppeltes Vorkommen erkennen mit Nutzerbenachrichtigung oder gar automatisches Löschen vornehmen.
- Komplexe Situationserkennung (heterogene Quellen, Rückgriffe in Bedingungen, verteilte Komponenten): Beispiel: Eintreffen eines neuen Luftmeßwertes (Ereignis) stößt eine Ausbreitungsrechnung an (Bedingungsteil 2) für ein bestimmtes Gebiet (aus GIS oder DB, Bedingungsteil 1). Die Ergebnisse werden wiederum mit Sollwerten verglichen (Bedingungsteil 3) und ggf. eine Benachrichtigung (Aktion) durchgeführt.

Wie aus dieser ersten Klassifikation anhand der UIS Szenarien bereits deutlich wird, sind für verschiedene (UIS)-Anwendungsfälle sehr unterschiedliche Formen aktiver Funktionalität sinnvoll einsetzbar. Die Verfeinerung dieser Klassifikation ist Ziel aktueller Arbeiten von uns.

### 6.4 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde eine Implementierung (Coffein) aktiver Mechanismen (auf der konzeptionellen Basis von ECA-Regeln aus aktiven DBMS) für CORBA-basierte heterogene, verteilte Informationssysteme vorgestellt. Desweiteren wurden Einsatzbeispiele dieser Mechanismen in Umweltinformationssystemen gezeigt, als Grundlage einer ersten Klassifizierung von Einsatzmöglichkeiten verschiedener Ausprägungen dieser aktiven Mechanismen in UIS.

Diese Idee der Konfigurierbarkeit aktiver Funktionalität ist Kern aktueller Arbeiten zu Coffein. Aufbauend auf den erzielten Ergebnissen, werden in diesen Arbeiten *separat nutzbare*, ereignisbasierte Dienste (Komponenten) bereitgestellt, d.h. eine Art Baukasten für derartige Dienste, ein konfigurierbares Coffein. Die Komponenten entsprechen den hier vorgestellten, reichen also von reiner Ereignisentdeckung bis zu ECA-Regelverarbeitung in CORBA-basierten heterogenen, verteilten Umgebungen. anwendungsspezifisch kann die gewünschte (Teil-)funktionalität ausgewählt werden, woraus eine passende Systemkonfiguration erstellt wird. Statt monolithischer funktionsüberladener Systeme wie aDBMS, entstehen individuell passende „schlanke“, Systeme. Durch die Verfeinerung der Klassifizierung der Einsatzmöglichkeiten aktiver Mechanismen in UIS, entstehen ferner Richtlinien für die individuelle, anwendungsspezifische Auswahl von Konfigurationen der ereignisbasierten Dienste.

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsystemen"

### Danksagungen:

Ich danke allen Kollegen des UIS-Teams im FZI, besonders R. Kramer, R. Nikolai und C. Rolker, für die gemeinsamen Projektarbeiten, insbesondere im Rahmen unserer Föderationsarchitektur, und für stimulierende Diskussionen. G. v. Bültzingsloewen danke ich für seine umfangreiche Unterstützung meiner Arbeiten zu aktiven Mechanismen und Prof. P. C. Lockemann für seine kritischen Anmerkungen zu einer früheren Version dieses Papiers. Dank geht an H. Dudat für redaktionelle Mitarbeit.

### 6.5 Literatur

- [BHP92] M. W. Bright, A. R. Hurson und S. H. Pakzad. A Taxonomy and Current Issues in Multidatabase Systems. S. 50–60, März 1992.
- [CuRD93a] C. Culbert, G. Riley, and B. Donnell. *CLIPS Reference Manual Volume 1, Basic Programming Guide, CLIPS Version 6.0*. Software Technology Branch, Lyndon B. Johnson Space Center, NASA, 1993.
- [Daya88] U. Dayal. Active Database Management Systems. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Data and Knowledge Bases: Improving Usability and Responsiveness*, pages 171–179, San Mateo, USA, 1988. Morgan Kaufmann.
- [DGG95] K.R. Dittrich, S. Gatzu und A. Geppert, editors. The Active Database Management System Manifesto: A Rulebase of ADBMS Features. In T. Sellis (Hrsg.), *Proc. Rules in Database Systems, Second International Workshop, RIDS'95, Glyfada, Athens, Greece*, Ausgabe 985 in Lecture Notes in Computer Science, S. 3–17, Berlin, Germany, Sept. 1995. ACTNET, Springer.
- [HJPS94] L.M. Hilty, A. Jaeschke, B. Page und A. Schwabl (Hrsg.). *Informatik für den Umweltschutz; 8.Symposium, Hamburg 1994; Band I*, Umwelt-Informatik Aktuell, Marburg, 1994. Metropolis.
- [Jav] JavaSoft. Homepage. <http://www.javasoft.com/>.
- [KK96] Arne Koschel, Ralf Kramer. Complex Situation Monitoring in a CORBA- and WWW-based Federation Architecture for Heterogenous Information Systems. Kurzfassungen zum 2. Workshop 'Föderierte Datenbanken. W. Hasselbring (editor). Software-Technik Memo Nr.~90, Informatik 10, Universität Dortmund. Universität Dortmund, Germany. Dez. 1996.
- [KKN+96] Arne Koschel, Ralf Kramer, Ralf Nikolai, Wilhelm Hagg und Joachim Wiesel. A Federation Architecture for an Environmental Information System incorporating GIS, the World-Wide Web, and CORBA. In *Third International Conference/Workshop Integrating GIS and Environmental Modeling*, Santa Fe, New Mexico, USA, Jan. 1996.
- [KKT+96] Arne Koschel, Ralf Kramer, Dietmar Theobald, Günter von Bültzingsloewen, Wilhelm Hagg, Joachim Wiesel und Manfred Müller. Evaluierung und Einsatzbeispiele von CORBA-Implementierungen für Umweltinformationssysteme. In *Proc. Umweltinformatik'96*, Hannover, Germany, Sept. 1996.
- [KM95] A. Keitel und M. Müller. Die Integration von Sachdaten, Geodaten und Metadaten im Umweltinformationssystem Baden-Württemberg. In H. Kremers und W. Pillmann (Hrsg.), *Raum und Zeit in Umweltinformationssystemen; Space and Time in Environmental Information Systems; 9th International*

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

*Symposium Computer Science for Environmental Protection CSEP'95*, Ausgabe 7 in Umwelt-Informatik Aktuell, S. 400–407, Marburg, 1995. Metropolis.

- [MFJ95] R. Mayer-Föll und A. Jäschke (Hrsg.). *Projekt GLOBUS; Konzeption und prototypische Realisierung einer aktiven Auskunftskomponente für globale Umwelt-Sachdaten im Umweltinformationssystem Baden-Württemberg; Phase II 1995*. Ausgabe FZKA 5700 in Wissenschaftliche Berichte. Forschungszentrum Karlsruhe Technik und Umwelt, Karlsruhe, 1995.
- [MFJ96] R. Mayer-Föll und A. Jäschke (Hrsg.). *Projekt GLOBUS; Konzeption und prototypische Realisierung einer aktiven Auskunftskomponente für globale Umwelt-Sachdaten im Umweltinformationssystem Baden-Württemberg; Phase III 1996*. Ministerium für Umwelt und Verkehr, Baden-Württemberg, Forschungszentrum Karlsruhe Technik und Umwelt, Karlsruhe, 1996.
- [Mül93] J. Müller (Hrsg.). *Verteilte künstliche Intelligenz*. BI Wissenschaftsverlag, Mannheim, Germany, 1993.
- [MZ95] Mowbray, Thomas J.; Zahavi, Ron: *The Essential CORBA*, New York, 1996.
- [OMG95] Object Management Group: *Common Object Request Broker, Architecture and Specification*, V 2.0, 1995.
- [PH94] B. Page und L.M. Hilty (Hrsg.). *Umweltinformatik - Informatikmethoden für den Umweltschutz und Umweltforschung*, Jahrgang 13.3 of *Handbuch der Informatik*. Oldenbourg-Verlag GmbH, München, 1994.
- [Sch95] B.A. Schroeder. *On-Line Monitoring: A Tutorial*. IEEE Computer, 28(6):72–80, Juni 1995.
- [Sch96b] S. Schwiderski. *Monitoring the Behaviour of Distributed Systems*. PhD Dissertation, Selwyn College, University of Cambridge, University of Cambridge, Computer Lab, Cambridge, United Kingdom, 1996.
- [Si96] Siegel, Jon: *CORBA, Fundamentals and Programming*, New York, 1996.
- [vBKK96] Günter von Bültzingsloewen, Arne Koschel und Ralf Kramer. *Active Information Delivery in a CORBA-based Distributed Information System*. In Karl Aberer und Abdelsalam Helal (Hrsg.), *Proc. First IFCIS International Conference on Cooperative Information Systems (CoopIS'96)*, S. 218–227, Brussels, Belgium, Juni 1996. IFCIS, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, California.
- [W3C] World Wide Web Consortium. Homepage. <http://www.w3.org/pub/WWW>.
- [WC96] J. Widom und S. Ceri (Hrsg.). *Active Database Systems: Triggers and Rules for Advanced Database Processing*. The Morgan Kaufman Series in Data Management Systems. Morgan Kaufmann Publishers, Inc., San Francisco, California, U.S.A, 1996.
- [Wid95] Jennifer Widom. *Research Problems in Data Warehousing*. In *Proceedings of 4th Int. Conference of Information and Knowledge Management (CIKM'95)*, Nov. 1995.

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

**Wo wächst was?  
Einsatz von Data Mining-  
Techniken zur Analyse  
ökologischer Standort- und  
Pflanzenarten**

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

## 7 Wo wächst was? - Einsatz von Data Mining-Techniken zur Analyse ökologischer Standort- und Pflanzendaten

Mathias Kirsten, Stefan Wrobel,  
F. Wilhelm Dahmen und Hans-Christoph Dahmen

*Die Analyse von Zusammenhängen zwischen Standortfaktoren und realem Pflanzenwachstum ist ein wichtiger Bereich der Geobotanik und von erheblicher praktischer Bedeutung für die Landschaftsplanung und Landnutzung. Insbesondere die Erfassung und Beschreibung von Rahmenbedingungen für das Gedeihen bestimmter Pflanzen ist von großem Interesse. Solche Rahmenbedingungen wurden bisher empirisch aus eigenen oder der Literatur entnommenen Geländeaufnahmen ermittelt unter isolierter Betrachtung der einzelnen Faktoren, so daß die Beschreibungen oft unvollständig und unsicher sind. Ein neuer Weg zur Ermittlung der Standortansprüche von Pflanzen wird im folgenden Beitrag beschrieben: Mit Methoden des Data Mining beziehungsweise des maschinellen Lernens wurden Standortansprüche automatisch aus den Daten einer begrenzten Zahl standörtlich interpretierter Vegetationsaufnahmen extrahiert.*

*Mit Hilfe der in der GMD entwickelten Data Mining-Plattform Kepler war es möglich, aus den im Wildpflanzen-Datenbank und -Informationssystem Terra Botanica gespeicherten Daten automatisch Standortansprüche abzuleiten. Diese lassen erwarten, daß auf einer wesentlich breiteren Basis von Vegetationsaufnahmen Standortansprüche von Pflanzen abzuleiten sind, die hinsichtlich Genauigkeit und Berücksichtigung des Synergismus der einzelnen Standortfaktoren die bisherigen Kenntnisse übertreffen.*

Ein genaues Verständnis unserer Umwelt mit ihren Pflanzen und Tieren ist nicht nur aus wissenschaftlicher Perspektive von enormer Wichtigkeit [Ste96], sondern hat auch eine hohe praktische und ökonomische Bedeutung. Konkret sei auf die bei vielen Bauvorhaben vorgeschriebene Umweltverträglichkeitsprüfung verwiesen. Aufgrund heutiger Kenntnis der Standortansprüche der vorgefundenen Pflanzen, kann nur begrenzt beurteilt werden, in welchem Ausmaß und wie weit ausgleichbar ökologischer Schaden zu erwarten ist. Bei Ausgleichsmaßnahmen, zum Beispiel durch Aufforstung oder Neuansiedlung von Pflanzen, können kostspielige Fehler vermieden werden, wenn die Standortansprüche der vorgesehenen Pflanzen genau bekannt sind.

Die Erhebung und geeignete Aufbereitung solchen Wissens war bislang ein aufwendiger Prozeß und setzte langjährige praktische Erfahrungen voraus. Auch die in Terra Botanica bereits elektronisch verfügbaren Daten decken nur einen Teil der heimischen Flora ab. Gerade die besonders seltenen und daher meistgefährdeten Arten fehlen zum Teil noch, da von ihnen nur wenige Vegetationsaufnahmen und sonstige Standortinformationen vorliegen. Zudem mußte durch die isolierte Betrachtung der Einzelfaktoren deren Synergismus weitgehend unbeachtet bleiben. Auf seine wissenschaftliche und praktische Bedeutung hat Dahmen durch

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umwelthanwendungen"

die Formulierung des "Relativitätsprinzips der Ökologie" aufmerksam gemacht. Es besagt: "Die ökologische Bedeutung eines Umwelt(Standort-)faktors für einen Umwelteigner (Lebewesen, Ökosystem) hängt außer von seiner absoluten Größe von der ökologischen Gesamtsituation ab, das heißt von der Größe aller übrigen, gleichzeitig auf den Umwelteigner wirkenden Umwelt(Standort-)faktoren".

Es fragt sich, ob, wie in der "Agenda Systematik 2000" der internationalen Gemeinschaft der Biosystematiker gefordert, die modernen Analysemethoden der Informationstechnik hier einen Beitrag leisten können.

Wir wollen dieser Frage im vorliegenden Artikel für eine Fragestellung der Geobotanik genauer nachgehen und aufzeigen, daß mit Methoden aus den Gebieten des maschinellen Lernens und Data Mining automatische Lösungen möglich werden, deren Qualität hinsichtlich Genauigkeit und Interpretierbarkeit zeitaufwendig manuell erstellter Daten nicht nachsteht. Wir beschäftigen uns dabei mit einer der zentralen Fragen der Pflanzenökologie, nämlich der Beschreibung der Standortansprüche von Pflanzen an ihre realen Wuchsorte. Welche edaphischen (bodenabhängigen) und klimatischen Bedingungen müssen gegeben sein, damit eine bestimmte Art an einem Ort wachsen kann?

### **7.1 Beschreibung von Standortansprüchen**

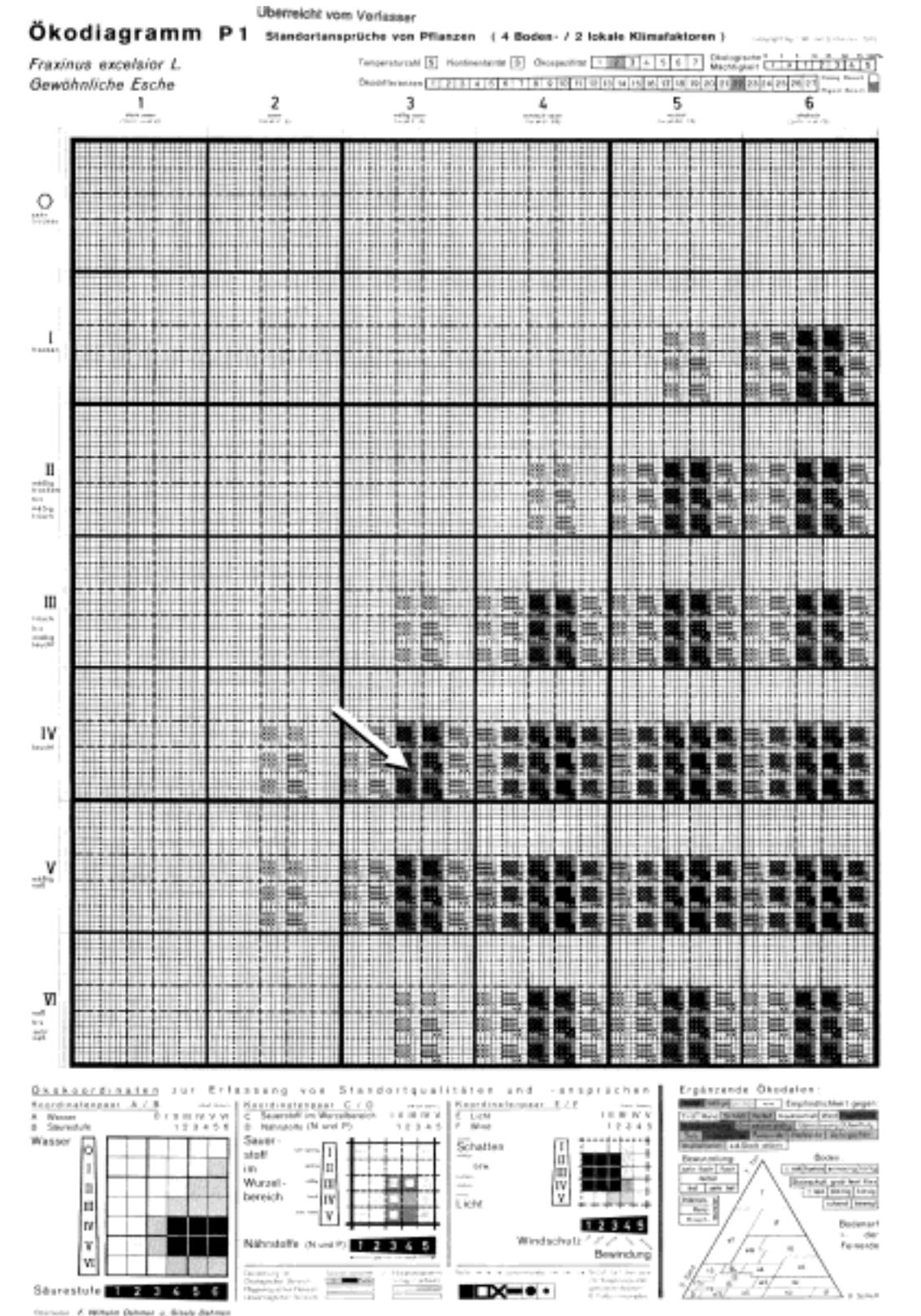
Für die Erfassung und Beschreibung von Standortansprüchen bestimmter Pflanzen gibt es verschiedene gängige Formen. Die erste besteht in rein verbalen Beschreibungen. Sie können den Synergismus der Standortfaktoren in den Text einbeziehen, ohne auf bestimmte Darstellungsarten beschränkt zu sein.

Vom Feld-Ahorn (*Acer campestre*) schreibt M. Ehlers in [Ehl86]: "Er wächst in feuchten Laubmischwäldern der Tiefebenen, in denen er Halbschatten verträgt (Waldränder). [...] Der zweite Wuchsbezirk des Feld-Ahorns sind die sonnigen, trockenen, basenreichen Süd- und Südwesthänge des Hügellandes, [...] Hier tritt, wie bei vielen anderen Gehölzen - an die Stelle der Feuchtigkeit der höhere Kalkgehalt des Bodens."

Eine weitere Form ist die Visualisierung in Ökodiagrammen [DDH75]. Dies sind Diagramme, in denen Standortbedingungen durch Zusammensetzung (Verschachtelung) zweidimensionaler Matrizen für insgesamt vier bis sechs Standortfaktoren dargestellt werden können. Die einzelnen Standortfaktoren werden dabei als Ökokoordinaten eines mehrdimensionalen ökologischen Raumes aufgefaßt. Abbildung 27 zeigt das manuell erstellte Ökodiagramm der Standortansprüche der gewöhnlichen Esche (*Fraxinus Excelsior* L.). Im Großgitter, den großen Kästchen, werden die beiden ersten Standortfaktoren Wasser und Säure dargestellt. Innerhalb eines solchen Kästchens sind dann weitere Dimensionen verschachtelt. Im zugehörigen Mittulgitter sind das Sauerstoffangebot im Wurzelbereich und das Nährstoffangebot (Stickstoff und Phosphor) visualisiert. Das darin eingeschachtelte Kleingitter dient der Darstellung von zwei lokalklimatischen Standortfaktoren: Lichtintensität und Bewindung. Unter dieser Komplexmatrix sind die von der Pflanze unter Konkurrenz besiedelbaren Ausprägungen der Einzelfaktoren in zweidimensionalen Matrizen dargestellt.

Das mit einem Pfeil markierte Kästchen im Kleingitter repräsentiert so gleichzeitig alle Standorte mit der Lichtintensität fünf (= volles Licht) und der Bewindung drei (= geringer Windschutz). Zugleich markiert es im Mittulgitter, dem ein Farbsystem unterlegt ist, Standorte mit guter Durchlüftung des Bodens und einem mittleren Nährstoffangebot. Die Lage im Großgitter bezeichnet schließlich einen feuchten und zugleich mäßig sauren Standort.

# 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"



**Abb. 27: Manuell erstelltes Ökodiagramm für die Gewöhnliche Esche**

Die hervorgehobenen Kästchen bezeichnen im Ökodiagramm den Teilraum des ökologischen Gesamttraumes, den die gewöhnliche Esche unter Konkurrenz besiedeln kann (ökologischer Bereich). Die leeren Kästchen dagegen besagen, daß sie bei der damit gekennzeichneten Faktorenkombination unter Konkurrenz nicht gedeihen kann. Sind diese Kästchen weiß, kann

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltanwendungen"

sie hier ohne oder bei stark verminderter Konkurrenz noch wachsen (physiologischer Bereich). Sind sie grau, kann sie auch ohne Konkurrenz nicht gedeihen.

Solche Ökodiagramme werden empirisch, das heißt auf der Grundlage entsprechender Geländeaufnahmen manuell erstellt, und ermöglichen, wie gezeigt, Synergismen verschiedener Faktoren darzustellen.

Bei der dritten, häufig benutzten Beschreibungsart ist dies nicht mehr möglich, denn dabei wird einfach für jeden Standortfaktor ein Intervall angegeben, in dem dieser sich befinden sollte, wenn die Pflanze gedeihen kann. Die wichtigsten edaphischen Standortansprüche der Rotbuche (*Fagus silvatica*) können beispielsweise durch folgende Intervalle ausgedrückt werden:

Faktor	Bedingung	Erläuterung
Wasser	mässig trocken - frisch	Wasserangebote im Boden
Säure	4 - > 7,3	pH-Wert des Bodens
O <sub>2</sub>	ausreichend - gut	Sauerstoffversorgung der Wurzeln
Nährstoffe	mäßig - normal	Versorgung mit Stickstoff und Phosphor

Die Faktoren werden hierbei unabhängig voneinander behandelt. Diese Beschreibung der Standortansprüche einer Pflanze stellt also immer ein Hyperrechteck im mehrdimensionalen ökologischen Standortraum dar, während man in einem Ökodiagramm auch Mengen solcher Hyperrechtecke visualisieren kann. Die vereinfachte Darstellung erleichtert die Handhabung und ermöglicht einfache Modellierungen von Standortansprüchen, zum Beispiel für rechnergestützte Informationssysteme wie Terra Botanica.

### 7.2 Terra Botanica

Ein Beispiel eines solchen Informationssystems ist das von F. Wilhelm Dahmen und Hans-Christoph Dahmen entwickelte ökologische Wildpflanzen-Datenbank und -Informationssystem Terra Botanica [Dah93]. Die Informationen der Datenbank sind in zwei große Blöcke unterteilt, den artbeschreibenden Teil und den standortdokumentierenden Teil.

Der artenbeschreibende Teil enthält artspezifische Informationen zu mehr als 1700 verschiedenen Wildpflanzen Mitteleuropas. Neben allgemeinen Angaben zu Name, Wuchsform, Lebensalter etc. stehen Angaben zu typischen edaphischen und lokalklimatischen Standortfaktoren. Der artenbeschreibende Teil der Datenbank enthält weiter Angaben zu Vegetationstypen und Pflanzengemeinschaften, über die Florenzugehörigkeit, dem Schutz- und Gefährdungsstatus sowie zur Standortbasis (Relief, Gestein, Boden), zur Hauptverbreitung und über landschafts- und tierökologische Funktionen, die Verwendbarkeit im Garten- und Landschaftsbau sowie Empfindlichkeiten gegen natürliche und anthropogene Einwirkungen wie zum Beispiel Frost oder Immissionen.

Der standortdokumentierende Teil stellt eine zunächst leere Datenbank dar, in die vom Benutzer Geländeaufnahmen von Boden und Bewuchs sowie die hierauf basierenden Standortansprüche eingegeben werden. So kann eine breite Datenbasis für die Ermittlung mehrdimensional gefaßter Standortansprüche von Pflanzen aufgebaut werden.

In der von Dahmen benutzten Datenbank befanden sich zur Zeit unserer Bearbeitung rund 1400 solcher Geländeaufnahmen mit zwischen vier und 142 unterschiedlichen Pflanzenarten -

im Schnitt ungefähr 20. Für eine methodische Erprobung mit Kepler genügt diese Menge von Geländeaufnahmen. Für eine endgültige Auswertung mit der oben beschriebenen Zielsetzung muß sie erheblich erweitert werden, sowohl bezüglich der untersuchten Vegetationstypen als auch bezüglich der Herkunft der Geländeaufnahmen aus verschiedensten Teilen Mitteleuropas.

Mit den relativ differenzierten und zahlreiche Standortfaktoren umfassenden Angaben von Terra Botanica ist es erstmals möglich, mit Kepler das Ziel anzugehen, pflanzliche Standortansprüche unter Beachtung des Relativitätsprinzips der Ökologie zu ermitteln. Weder die verbalen Beschreibungen der Standortansprüche durch Oberdorfer noch die von Ellenberg publizierten ökologischen "Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa" bieten hierfür eine geeignete Datenbasis.

### **7.3 Automatische Extraktion von Standortansprüchen**

Während die in Terra Botanica enthaltenen Beschreibungen aus unabhängigen Intervallen die Speicherung erleichtern und eine Groborientierung zulassen, wäre es aus ökologischer Sicht wünschenswert, sie durch eine genauere Beschreibung zu ersetzen, die von ihrer Mächtigkeit her den oben erläuterten Ökodiagrammen entspricht, und dies nach Möglichkeit automatisch aus den empirisch erhobenen Standortaufnahmen. Ziel unserer Arbeiten war es daher, geeignete Methoden zu finden, die genau diese Aufgabe übernehmen können, und nachzuweisen, daß die Qualität ihrer Ergebnisse tatsächlich das erforderliche Niveau erreicht.

Benötigt werden also Verfahren, die als Eingabe alle beobachteten Standorte einer Pflanze, inklusive der Boden- und Klimafaktoren der Standorte, erhalten, und daraus eine allgemeine Beschreibung der Standortansprüche erzeugen. Diese Aufgabe nennt man allgemein auch "Lernen aus klassifizierten Beispielen". Die vom Verfahren erzeugte allgemeine Beschreibung kann dann als Klassifikator verwendet werden, um für einen neuen Standort vorherzusagen, ob die betreffende Pflanze dort wachsen kann oder eben nicht. Um für den Ökologen möglichst leicht verständlich zu sein, sollte das Lernergebnis in einer den Ökodiagrammen entsprechenden Form gehalten, also als Menge von Hyperrechtecken auszudrücken sein.

Erfreulicherweise gibt es im Bereich des maschinellen Lernens und des Data Mining einige Verfahren, die diese Anforderungen erfüllen. Wir haben für unsere Untersuchungen Repräsentanten zweier wichtiger Verfahrensklassen gewählt, den Entscheidungsbaumverfahren und den Nachbarschaftsverfahren. Ein Entscheidungsbaum (siehe das Beispiel in Abbildung 28) wird zur Klassifizierung genutzt, indem der Baum von oben her durchlaufen wird. Bei jedem mit einem Attribut markierten Knoten wird derjenige Ast gewählt, der dem Wert des Attributs im zu klassifizierenden Objekt - hier als dem zu klassifizierenden Standort - entspricht. Die Blätter des Baumes geben dann die vorhergesagte Klasse an. Da jede Klasse durch mehrere Blätter dargestellt werden kann, beschreibt ein Entscheidungsbaum eine Klasse tatsächlich durch eine Menge von Hyperrechtecken. Entscheidungsbaumverfahren sind eine der am häufigsten verwendete Verfahrensklassen, und wir haben für unsere Untersuchungen das bekannte Verfahren C4.5 [Qui93] gewählt.

Bei der zweiten Verfahrensklasse, den Nachbarschaftsverfahren, verwenden wir als verallgemeinerndes Nachbarschaftsverfahren BNGE [WD95]. Dieses Verfahren legt möglichst große Hyperrechtecke um die bisher beobachteten Objekte (Standorte) und sagt für ein neues Objekt die Klasse des am nächsten benachbarten Hyperrechtecks voraus. In der Beispielabbildung 29 (nur zwei Dimensionen sind gezeichnet) würde für Standort 1 also "kann wachsen" vorhergesagt, für Standort 2 dagegen "kann nicht wachsen". Bei diesen Verfahren ist das Lernergebnis also ebenfalls eine Menge von Hyperrechtecken.

1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltanwendungen"

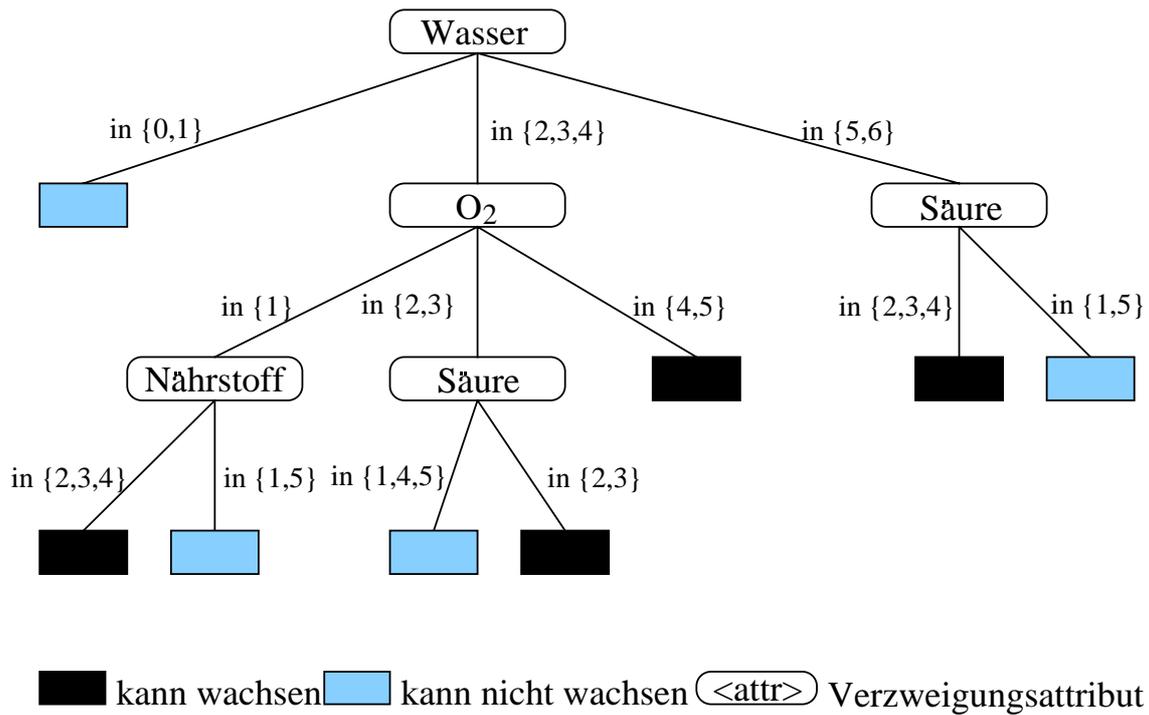


Abb. 28: Entscheidungsbaum

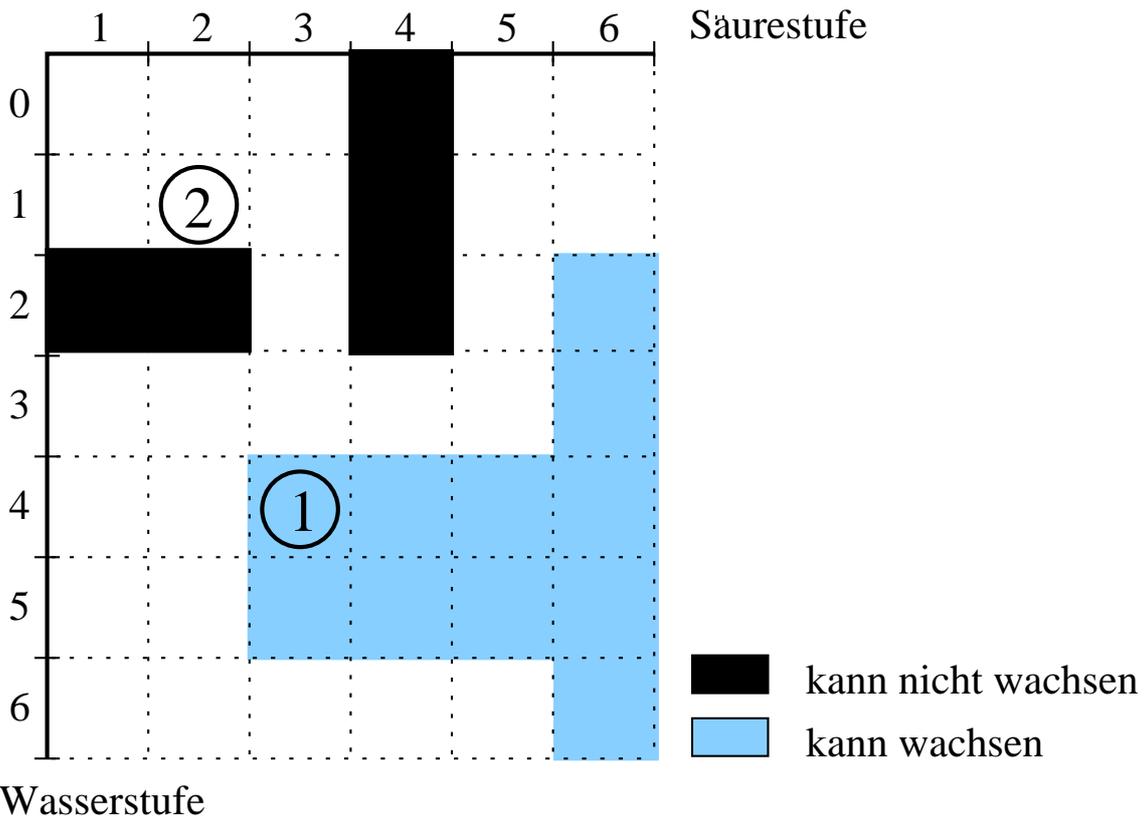


Abb. 29: BNGE-Hyperrechtecke

7.4 Durchführung der Experimente im Data Mining-System Kepler

Zur konkreten Durchführung einer Lernaufgabe, wie der oben beschriebenen, kommen zur eigentlichen Anwendung des Lernverfahrens noch weitere Schritte hinzu, die den eigentlichen Data Mining-Prozeß [FPSS96] ausmachen. Dies sind der Import der Daten aus dem externen

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

Datenbanksystem, die geeignete Selektion, Kombination und Aufbereitung der Daten, die Konvertierung in das für das Analyseverfahren geeignete Format, die Durchführung der Analyse und natürlich die Verwaltung, Visualisierung und Bewertung der Ergebnisse.

Wir haben für die Durchführung dieser Schritte auf das Data Mining-System Kepler [WWSE96] zurückgegriffen, das den gesamten Prozeß des Data Mining in einer einheitlichen grafischen Umgebung unterstützt. Das Aufgabenspektrum des Systems reicht vom Fremdformateimport über Datenaufbereitung bis hin zur Anwendung der Lernverfahren sowie Resultatsvisualisierung und -verwaltung. Besonderes Merkmal des Systems ist seine Erweiterbarkeit durch ein "plug-in" Konzept, das das einfache "Einstecken" von Lernverfahren, Datenaufbereitungsoperatoren und Importfiltern über eine standardisierte Schnittstelle mit deklarativen Toolbeschreibungen ermöglicht. Das Spektrum der derzeit als Plug-Ins verfügbaren Lernverfahren umfaßt neben den hier verwendeten Verfahren C4.5 und BNGE auch neuronale Netze, weitere Nachbarschaftsverfahren, sowie Clustering, Regression, Verfahren der Induktiven Logikprogrammierung und Subgruppensuche.

Im folgenden wollen wir kurz die grundlegenden Schritte der Datenaufbereitung erläutern. Der erste Schritt ist der Transfer aller Terra Botanica-Daten nach Kepler. Dies geschieht mittels der Terra Botanica-Exportfunktion und eines für diese Anwendung realisierten dbase-IV Importfilters als "plug-in" für Kepler. Die verschiedenen Informationsarten (Standortdaten, Pflanzenspezies, Pflanzenindividuen) werden in Kepler durch drei Relationen abgebildet.

Relationsname	Attributanzahl	Tupelanzahl	Beschreibung
standorte_roh	253	1446	Standortdaten
pflanzen_roh	250	1776	Literaturdaten zu Pflanzenarten
wächst_roh	51	26522	Daten der einzelnen Pflanzenindividuen

Für die gewählte Aufgabe benötigen wir aus den obengenannten Ausgangsrelationen allerdings nur einen Teil der verfügbaren Attribute. Die effektiv genutzten Relationen sind:

standorte/15: <Standort-ID>, <Wasser>, <Säure>, <O2>, <Nährstoffwert>, <Lichtintensität>, <Bewindung>, ..., <relative Lufttemperatur>

wächst/2: <Pflanzen-ID>, <Standort-ID>

Die Relation "wächst" enthält nur die tatsächlich an einem Standort beobachteten Pflanzen, das heißt nicht alle, die dort von den Grundfaktoren her wachsen könnten. Welche der potentiell wachsenden Pflanzen tatsächlich an einem Standort vorkommen, hängt von vielfältigen Faktoren ab, die zum Teil gar nicht in der Datenbank erfaßt sind (Verdrängungseffekte, menschliche Eingriffe), so daß das Erlernen der Relation "wächst" aus den gegebenen Beispielen nicht möglich wäre. In der Anwendung stellt sich ohnehin weniger das Problem, aus Boden- und lokalklimatischen Daten die gesamte Vegetation vorherzusagen, als vorherzusagen, ob die Ansiedlung einer bestimmten Pflanze an einem Standort mit bestimmten Grundfaktoren Erfolg haben könnte. Statt "wächst" haben wir deshalb die Relation

kann\_wachsen/15: <Pflanzen-ID>, <Wasser>, <Säure>, <O2>, <Nährstoffwert>, <Lichtintensität>, <Bewindung>, ..., <relative Lufttemperatur>

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

als Grundlage gewählt, die für jeden Standort, an dem eine Pflanze beobachtet wurde, einen Tupel mit den Grundfaktoren dieses Standortes und der Pflanzenbezeichnung enthält. Da jede Wertekombination von Grundfaktoren mit verschiedenen Werten des Pflanzen-ID Attributs vorkommen kann, muß die Relation zur Verwendung mit klassifizierenden Attribut-Wert-Verfahren in Teilrelationen für jede Pflanze aufgespalten werden, da die Verfahren diese Mehrfachvorkommen sonst als Widersprüche in den Daten sehen würden. Für jede Pflanze gibt es also eine eigene Zielrelation:

kann\_wachsen\_<pflanze>/15: <Klasse>, <Wasser>, <Säure>, <O2>, <Nährstoffwert>, <Lichtintensität>, <Bewindung>,....,<relative Lufttemperatur>

wobei "Klasse=Ja" falls ein entsprechendes Tupel in kann\_wachsen vorhanden war (sonst "Klasse=Nein").

Man beachte übrigens, daß in dieser Relation mehrfaches Vorkommen einer Pflanze an verschiedenen Standorten mit identischen Grundfaktoren auch durch mehrere (identische) Tupel repräsentiert wird. Diese Darstellung wurde bewußt gewählt, um den Lernverfahren diese Häufigkeitsinformation zu erhalten (potentiell wichtig zum Beispiel für die Entropieheuristiken von C4.5). Die Größe der entstehenden Relation ist je nach Häufigkeit der Pflanze natürlich unterschiedlich; bei den von uns untersuchten (häufigsten) Pflanzen ergeben sich 12000 bis 19000 Tupel als Lerndaten.

### 7.5 Lernläufe und Ergebnisse

Für die konkrete Durchführung der Lernexperimente werden die acht häufigsten Pflanzen gewählt, deren Daten wie im letzten Abschnitt beschrieben aufbereitet werden. Dies führt zu den folgenden Lernrelationen.

Relationsname	Anzahl Tupel	Relationsname	Anzahl Tupel
Hainbuche	14654	Rotbuche	11306
Stiel-Eiche	14198	Eberesche	15649
Brombeere	15079	Faulbaum	19376
Gewöhnliche Esche	12931	Wald-Geißblatt	19196

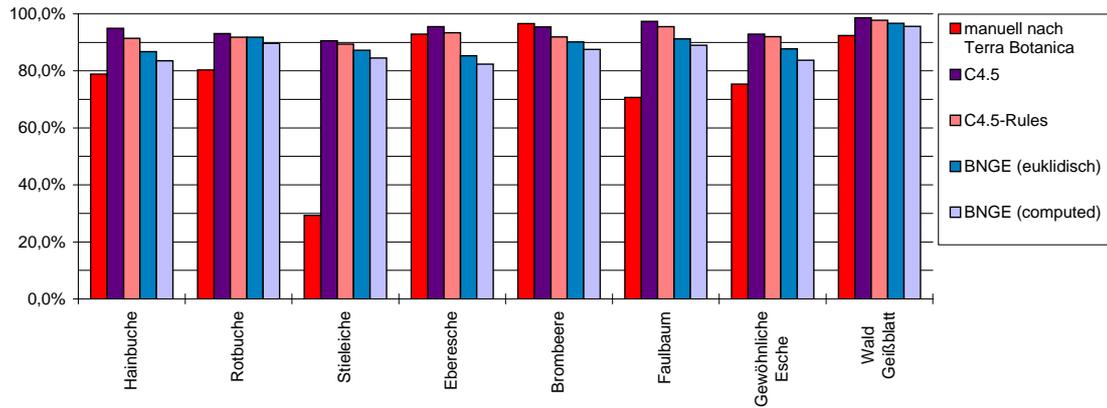
Für jede dieser Relationen wurden in Kepler mit den gewählten Lernverfahren C4.5 und BNGE Experimente durchgeführt. Die C4.5-Klassifikationsgenauigkeiten für Entscheidungsbäume und Regeln (C4.5-Rules) wurden durch zehnfache crossvalidation ermittelt. Auf die gleiche Weise erhielten wir die Resultate für BNGE mit euklidischem Abstandsmaß und BNGE mit berechneten Attributsgewichten.

Abbildung 4 zeigt die mit BNGE und C4.5 erreichten Genauigkeiten für die acht Lernprobleme. Zum Vergleich ist jeweils die Genauigkeit der manuell aufgestellten Standortansprüche aus Terra Botanica angegeben.

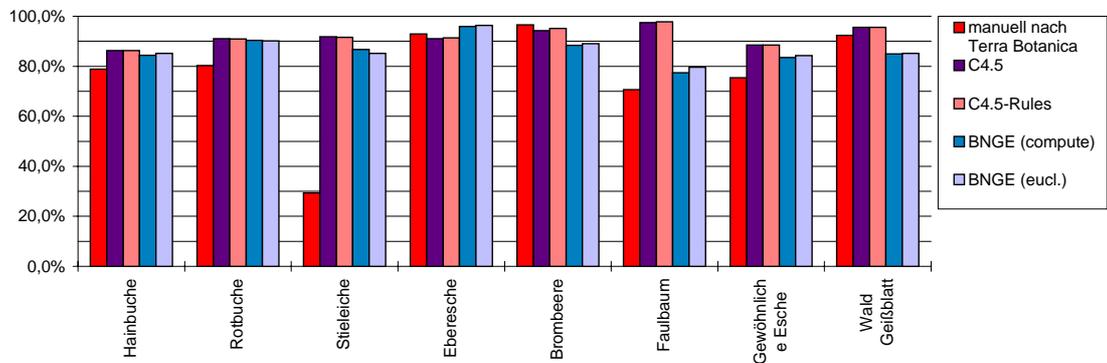
Auffällig ist, daß vor allem C4.5 bei allen Problemen eine mehr als 90-prozentige Genauigkeit erreicht und damit Terra Botanica weit übertrifft. Verzichtet man auf die Verwendung der zehn lokalklimatischen Attribute, verlieren die generierten Vorhersagen an Klassifikationsgenauigkeit (siehe Abbildung 30), sind aber leichter zu visualisieren und durch Experten in gewohnter Weise interpretierbar. Da aus diesem Grunde eine genaue Expertise

# 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umwelthanwendungen"

der 14-dimensionalen Ergebnisse noch aussteht, beziehen sich die nachfolgenden Aussagen auf die Interpretation der vierdimensionalen Resultate.

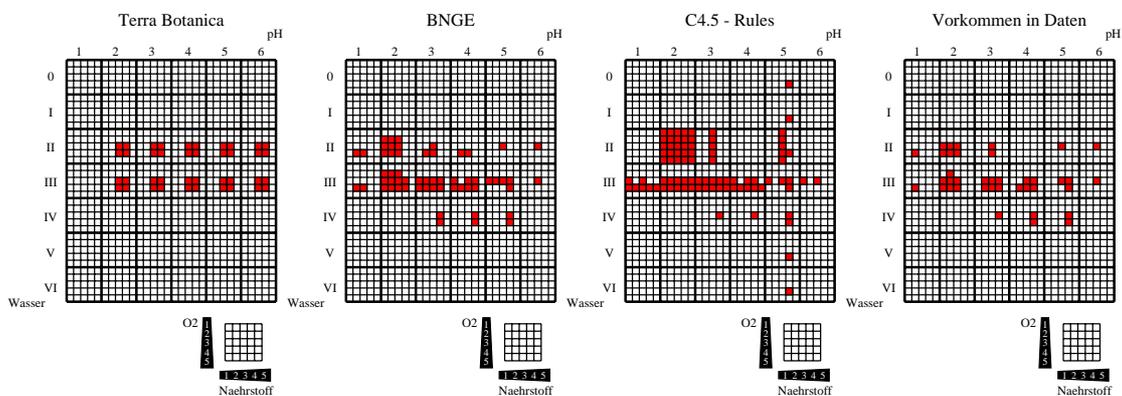


**Abb. 30: Klassifikationsgenauigkeit auf ungesehenen Testdaten mit 14 Faktoren**



**Abb. 31: Klassifikationsgenauigkeit auf ungesehenen Testdaten mit vier Faktoren**

So verdeutlicht Abbildung 31, daß die Verbesserung der Klassifikationsgenauigkeiten durch die mächtigeren Hypothesenräume der Lernverfahren erreicht wird. Während Terra Botanica mit einem Hyperrechteck auskommen muß, können BNGE und C4.5 die tatsächlichen Daten wesentlich besser abbilden. Dabei generalisiert C4.5 als top-down Verfahren stärker als BNGE.



**Abb. 32: Ökodiagramme von verschiedenen Beschreibungsformen der Standortansprüche der Rotbuche**

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltanwendungen"

Aus ökologischer Sicht sind diese Ergebnisse wie folgt zu bewerten. Primäres Einsatzgebiet einer "kann wachsen"-Klassifizierung ist die Planung neuer Anpflanzungen. Die wesentlich höhere Genauigkeit ermöglicht bessere Voraussagen und damit die Vermeidung teurer Fehlanpflanzungen. Hierbei sind, obwohl in der Genauigkeit ähnlich, die Ergebnisse von BNGE vorzuziehen. Zum einen sind die Ergebnisse von ihrer Struktur her den Klassifikationen aus Terra Botanica ähnlicher, zum anderen ist ein die positiven Beispiele weniger stark generalisierendes Ergebnis günstiger, denn falsch positive Aussagen sind in der Planung kostspieliger als falsch negative.

Neben der höheren Genauigkeit ist auch der Inhalt der Lernergebnisse aus ökologischer Sicht interessant. Die feiner aufgegliederten Beschreibungen der Standortansprüche spiegeln beispielsweise einige bekannte, aber in Terra Botanica nicht präzisierte Zusammenhänge wieder, etwa die Tendenz bestimmter Pflanzen zum trocken-alkalischen Bereich. Weiter gibt es interessante "Ausreißer" in den Verallgemeinerungen, die Anlaß für Nachuntersuchungen der zugrundeliegenden Standortaufnahmen sein sollen. Die C4.5 Regeln könnten dadurch interessant werden, daß sie Hauptfaktoren identifizieren, die die Aufnahme weiterer Faktoren obsolet machen könnten. Dies muß jedoch noch genauer untersucht werden.

### 7.6 Zusammenfassung und Ausblick

Wir haben in diesem Beitrag beispielhaft erläutert, wie mit Verfahren des maschinellen Lernens und des Data Mining Klassifikationsprobleme aus dem Umweltbereich gelöst werden können. Hervorzuheben ist dabei, daß bereits die Anwendung von Standardverfahren wie C4.5 und BNGE zu Ergebnissen geführt hat, die von ihrer Qualität und Interpretierbarkeit mindestens genauso gut wie die bisher verfügbaren Beschreibungen von Terra Botanica sind. Dabei ist der Zeitaufwand für ihre Erstellung natürlich ungleich geringer, speziell da nach erfolgter Aufbereitung in einem System wie Kepler die Beschreibungen bei Verfügbarkeit neuer Standortaufnahmen quasi auf Knopfdruck automatisch aktualisiert werden können.

Dennoch stellen die hier berichteten Ergebnisse natürlich nur den Anfang der Arbeit in diesem Anwendungsgebiet dar. Zur Zeit entwickeln wir eine spezielle Variante eines Entscheidungsbaumverfahrens, das die verschiedenen Lernaufgaben für unterschiedliche Pflanzen gleichzeitig bearbeiten kann ("multi-task learning", [Car96]).

Grundidee ist dabei, daß die Wuchsbedingungen verschiedener Pflanzen nicht völlig unabhängig voneinander sind. Bearbeitet man also die Lernprobleme für alle Pflanzen gleichzeitig, so können möglicherweise Gemeinsamkeiten ausgenutzt werden, die für jede einzelne Pflanze dann zu einem besseren Ergebnis führen. Auch könnten die direkten Beziehungen der Pflanzen untereinander verwendet werden, um Vorhersagen zu machen oder typische ökologische Pflanzengesellschaften zu identifizieren.

(Dieser Artikel ist ebenfalls nachzulesen im GMD-Spiegel 4/96, Seite 36–41)

### 7.7 Literaturverzeichnis

- [Car96] Richard A. Caruana. Algorithms and applications for multitask learning. In *The Proceedings of the thirteenth International Conference on Machine Learning*, pages 87–95, 1996.
- [Dah93] F. W. Dahmen, *Terra Botanica, das erste Wildpflanzen- Datenbank- und Informationssystem für Analyse, Diagnose und standortgerechte Planung von Natur und Landschaft*. 1993.

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

- [DDH75] F. W. Dahmen, G. Dahmen und W. Heiss. Neue Wege der graphischen und kartographischen Veranschaulichung von Vielfaktorenkomplexen. *Decheniana (Bonn)*, 129:145–178, 1975.
- [Ehl86] M. Ehlers. *Baum und Strauch in der Gestaltung und Pflege der Landschaft*. 1986.
- [FPSS96] Usama M. Fayyad, Gregory Piatetsky-Shapiro, and Padhraic Smyth. From data mining to knowledge discovery: An overview. In Usama M. Fayyad, Gregory Piatetsky-Shapiro, and Padhraic Smyth, editors, *Advances in Knowledge Discovery and Data Mining*, chapter 1, pages 1–34. AAAI/MIT Press, Cambridge, USA, 1996.
- [Qui93] J. Ross Quinlan, *C4.5 — programs for machine learning*. Morgan Kaufman, San Mateo, CA, 1993. Accompanying software available.
- [Ste96] Fritz Steininger, editor. *Agenda Systematik 2000: Erschliessung der Biosphäre*, Band 22 aus *Kleine Senckenberg-Reihe*. Verlag Waldemar Kramer, Frankfurt, 1996.
- [WD95] D. Wettschereck and T. G. Dietterich. An experimental comparison of the nearest-neighbor and nearest-hyperrectangle algorithms. *Machine Learning*, 19:5–27, 1995.
- [WWSE96] S. Wrobel, D. Wettschereck, E. Sommer and W. Emde. Extensibility in data mining systems. In Evangelos Simoudis, Jia Wie Han, and Usama Fayyad, editors, *Proc. 2<sup>nd</sup> International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, pages 214–219, menlo Park, CA, USA, August 1996. AAAI Press.

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

***Elwira* - Elemente eines  
wissensbasierten Systems zur  
Reduzierung umweltrelevanter  
Auswirkungen**

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

## 8 ***Elwira* - Elemente eines wissensbasierten Systems zur Reduzierung umweltrelevanter Auswirkungen**

H. Stuckenschmidt, I. Timm, J. Schröder,  
studentisches Projekt *cosap*,  
Universität Bremen  
  
Dipl. Ing. D. Hartmann  
Institut für Umweltverfahrenstechnik  
Universität Bremen

### **Zusammenfassung**

Die Komplexität der Aufgabenstellung, einen produktionsintegrierten Umweltschutz mit Methoden der Informatik zu unterstützen übersteigt die Möglichkeiten herkömmlicher Techniken. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit des Einsatzes wissensbasierter Verfahren, die auf eine entsprechende Wissensbasis zurückgreifen und die Möglichkeit zur Behandlung von unsicherem Wissen bieten. *Elwira* untersucht mit der Software *cosap* modellierte Produktionsprozesse unter Verwendung von wissensbasierten Methoden und ökologischen Kriterien auf Umweltverträglichkeit. Das Ziel ist die Anwendung bzw. Optimierung von Methoden des prozeßintegrierten Umweltschutzes. Das erste Anwendungsgebiet, an dem der Versuch unternommen werden soll, den produktionsintegrierten Umweltschutz mit wissensbasierten Methoden zu unterstützen, befaßt sich mit der Wiedergewinnung von Inhaltsstoffen aus vorhandenen Abwasserströmen innerhalb des Produktionsprozesses. Einen ersten Ansatz zur wissensbasierten Unterstützung der Abwasserbehandlung bietet die Fokussierung auf den eigentlichen Vorgang der Behandlung von Abwasserinhaltsstoffen. Die wesentlichen Elemente des dabei verwendeten Modells bilden auf der einen Seite eine Taxonomie potentieller Abwasserinhaltsstoffe und Stoffgruppen und auf der anderen Seite eine entsprechende Taxonomie möglicher Verfahren zur Behandlung dieser Inhaltsstoffe, sowie entsprechender Regeln zur Auswahl von Verfahren. Um zusätzlich die Möglichkeit zu haben, Rahmenbedingungen für die Anwendung bestimmter Verfahren angeben zu können, werden Constraints bezüglich eines Verfahrens formuliert. Der hier gewählte Ansatz zur Bestimmung anwendbarer Verfahren geht davon aus, daß die Überzeugungen in die Anwendbarkeit bestimmter, in einer Taxonomie angeordneten Verfahren zur Behandlung von Abwasser berechnet werden sollen. Hierfür wird die Dempster-Shafer Evidenztheorie verwendet. Die Anwendbarkeit eines Verfahrens wird zusätzlich über die Verifikation seiner Rahmenbedingungen bestimmt. Die Überprüfung wird mit Hilfe eines begründungs-basierten Truth-Maintenance-System (JTMS) vorgenommen. Der hier vorgestellte Ansatz zur Unterstützung der Behandlung von Abwasser innerhalb der Produktion wurde im Rahmen des Projektes in Form eines Prototypen realisiert.

### **8.1 Motivation**

Im Bereich der Umwelttechnologie zeichnet sich schon seit geraumer Zeit der Trend weg vom additiven hin zum produktionsintegrierten Umweltschutz ab. Diese Form des Umweltschutzes bietet ein großes Potential [Brau95], da sie schon innerhalb des Produktionsprozesses die Entstehung umweltgefährdender Stoffe verringert. Hiermit ist jedoch die Notwendigkeit der Entwicklung innovativer Methoden zur Schadstoffreduzierung verbunden. Aufgrund der starken Auswirkungen auf den Produktionsprozeß und die Qualität des Produktes ist dies

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umwelthanwendungen"

nicht unproblematisch. Daher existieren bisher keine allgemeinen Lösungen; es sind nach Aussagen von Experten nur sehr spezialisierte Verfahren bekannt, die mit erheblichem Aufwand entwickelt und evaluiert wurden. Das Ziel dieses Konzeptes soll es daher sein, zu zeigen, daß es mit Hilfe von wissensbasierten Methoden möglich ist, anhand von konkreten Lösungsansätzen allgemein anwendbare Heuristiken zu entwickeln, mit denen ein genereller Ansatz unterstützt werden kann.

Der produktionsintegrierte Umweltschutz stellt als Anwendungsgebiet ein sehr breites Feld dar. Für eine umfassende Betrachtung reicht der Platz daher nicht aus. Es soll lediglich die Notwendigkeit einer produktionsintegrierten Behandlung von Schadstoffen und die sich hieraus ergebende verfahrenstechnische Aufgabenstellung angerissen und für den Bereich der produktionsintegrierten Behandlung von Abwasser konkretisiert werden.

### 8.1.1 Produktionsintegrierter Umweltschutz

Durch die aktuelle und zukünftig zu erwartende Umweltschutzgesetzgebung werden die Verursacher von Abwasseremissionen verpflichtet, für eine innerbetriebliche Rückhaltung von gefährlichen Stoffen aus Abwassergemischen zu sorgen. Die hierbei anzuwendenden Verfahrenstechniken müssen dem Stand der Technik entsprechen.

Zur Lösung einer solchen Aufgabenstellung sind additive Maßnahmen nur unzureichend geeignet. Durch nachgeschaltete Verfahren werden bestimmte Schadstoffprobleme immer nur teilweise behoben (z. B. erneute Emissionen in Form von Klärschlamm). Akute Probleme werden zwar eingedämmt, in der Gesamtwirkung werden die Probleme nicht nachhaltig gelöst, sondern eher stofflich und zeitlich verschoben.

Beim integrierten Umweltschutz (produktions- bzw. prozeßintegriert) geht es darum, Emissionen vorsorgend von vornherein zu vermeiden oder doch zu mindern. Dies beinhaltet notwendigerweise Änderungen der Produktionsprozesse ebenso wie der Produkte und ihrer stofflichen Zusammensetzung. Der Übergang von end-of-pipe-Techniken zu produktionsintegrierbaren Verfahren hat somit einen veränderten Innovationsanspruch zur Folge.

Es besteht das Problem, spezifische, maßgeschneiderte verfahrenstechnische Lösungsansätze zu finden und in einem Betrieb umzusetzen. Dabei steht die Entwicklung von Verfahren zur produktionsintegrierten Minimierung von Schadstoffen, der Schließung von innerbetrieblichen Stoffkreisläufen und die Verringerung von nicht vermeidbaren Emissionen im Vordergrund. Zum anderen ist hierfür die Anwendung von Methoden zur Findung und Bewertung von ökologischen Schwachstellen eine wichtige Voraussetzung.

### 8.1.2 Behandlung von Abwasser

Je nach Industriebranche sind Abwässer mit sehr unterschiedlichen Inhaltsstoffen und Belastungen zu behandeln. Die Entwicklung von Abwasserbehandlungskonzepten bereitet vor allem dort Schwierigkeiten, wo große Abwassermengen anfallen, wie z. B. bei der Zellstoffherstellung, der chemischen Industrie, der Papier- sowie der Textilindustrie.

Die Inhaltsstoffe lassen sich in zwei Hauptgruppen unterteilen: organische und anorganische Bestandteile. Bei den organischen Bestandteilen läßt sich eine Unterscheidung in biologisch gut und in biologisch schwer bzw. nicht abbaubare Verbindungen treffen. Die anorganischen Bestandteile lassen sich grob in vier Arten (Neutralsalze, Säuren, Laugen, Cyanide und Schwermetallionen sowie Stickstoff- und Phosphorverbindungen) unterteilen.

Bei komplexer Zusammensetzung des Abwassers nimmt allgemein auch die Komplexität der Aufbereitung zu. Mehrere Trenn- und Aufbereitungsschritte sind erforderlich. Prinzipiell stehen für die Abwasserreinigung mechanische, chemische, biologische und thermische

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

Verfahren zur Verfügung; hier kann man grob unterscheiden zwischen trennenden und umwandelnden Verfahren.

Eine wichtige Entwicklungsstrategie bei der Behandlung von Abwasserteilströmen mit problematischen Bestandteilen (z. B. biologisch schwer abbaubare Stoffe) stellt zum einen die verbesserte selektive Abtrennung oder Reinigung (z. B. mittels Membrantechnologie oder Adsorptionsverfahren) und anschließend die gesonderte wirksamere Behandlung der zurückgehaltenen Stoffe (z. B. durch chemische Oxidation) dar.

### **8.2 Wissensbasierte Methoden**

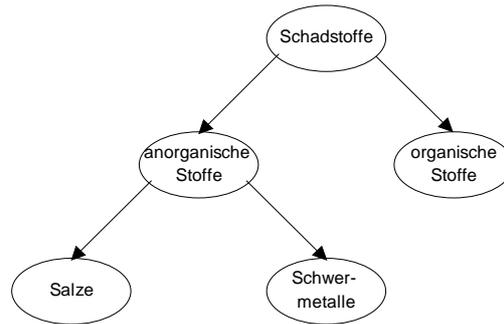
Die Komplexität der Aufgabenstellung, einen produktionsintegrierten Umweltschutz mit Methoden der Informatik zu unterstützen übersteigt die Möglichkeiten herkömmlicher Techniken. Dies liegt zum einen an der Tatsache, daß eine große Menge an verfahrenstechnischem Hintergrundwissen notwendig ist. Auf der anderen Seite sind Daten über einen betrachteten Prozeß meist sehr unvollständig und ungenau. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit des Einsatzes wissensbasierter Verfahren, die auf eine entsprechende Wissensbasis zurückgreifen und die Möglichkeit zur Behandlung von unsicherem Wissen bieten. Im folgenden werden einige dieser Methoden kurz beschrieben, die zur Bearbeitung der Aufgabenstellung eingesetzt werden können.

#### 8.2.1 Taxonomische Wissensrepräsentation

Taxonomien bilden einen Spezialfall der Vererbungssysteme [Bib93]. In einem Vererbungssystem ist Wissen in Form von einzelnen Objekten und Klassen solcher Objekte organisiert. Die daraus resultierende Struktur bietet die Möglichkeit, anhand von Relationen zwischen den einzelnen Klassen, Fragen bezüglich deren Eigenschaften zu beantworten, ohne diese explizit repräsentieren zu müssen [Sha90].

Eine Taxonomie besteht aus mehreren Klassen, die durch Vererbungsrelationen zwischen jeweils einer Oberklasse und ihrer Unterklasse verbunden sind. Dabei hat jede Klasse höchstens eine Oberklasse, wodurch ein gerichteter Baum entsteht. Dieser Baum kann dazu benutzt werden, um die Frage „Ist ein Objekt der Klasse A auch in der Klasse B enthalten“ zu beantworten. Dies geschieht durch die Bildung der transitiven Hülle der Vererbungsrelation. Eine andere wichtige Frage, die durch eine Taxonomie beantwortet werden kann, ist die, nach der Extension einer Klasse. Beide Aufgaben können durch Suche im Taxonomiebaum gelöst werden. Dies ermöglicht eine effiziente Implementierung eines Problemlösers.

Eine sinnvolle Erweiterung dieses sehr einfachen Konzeptes ist die Einführung von Eigenschaften der einzelnen Klassen, die dann an die Unterklassen vererbt werden. Hierdurch wird es möglich, neben der Zugehörigkeit zu einer bestimmten Klasse auch das Vorhandensein bestimmter Eigenschaften mit Hilfe des gleichen Mechanismus zu bestimmen. Des weiteren unterscheiden viele Ansätze taxonomischer Wissensrepräsentation zwischen Konzepten und Instanzen. In diesem Fall sind die Klassen nicht mehr vollständig durch ihre Extension bestimmt. Vielmehr entsteht die Notwendigkeit der Bereitstellung einer beschreibenden (*intensionalen*) Semantik [Bra77].



**Abb. 33: Abbildung 1: Beispiel einer Taxonomie**

Die Prädikatenlogik [Shö92] bietet die Möglichkeiten zur Definition einer solchen Semantik. Der Vorteil einer logikbasierten Semantik liegt in einer allgemein anerkannten Bedeutung und Notation. Um diese Vorteile nutzen zu können bildet man die Konzepte der Taxonomie auf prädikatenlogische Formeln ab. Dabei werden Konzepte durch einstellige Prädikate, Eigenschaften durch Funktionen und Vererbungsrelationen durch universal quantifizierte Implikation ausgedrückt. Instanzen eines Konzeptes können dann durch Konstanten ausgedrückt werden, die sich in entsprechenden Konzeptrelationen befinden.

Taxonomische Vererbungssysteme bieten nicht die Ausdrucksfähigkeit einer vollständigen Logik, sie stellen vielmehr eine Spezialisierung dar, die es erlaubt effizient Probleme zu lösen. Außerdem können sie leicht um Konzepte erweitert werden, die durch klassische Logik nicht ausgedrückt werden können. Ein Beispiel hierfür ist die Frame-basierte Repräsentation von Wissen [Min75], die zum einen mit Default-Werte umgehen kann und zum anderen die Möglichkeit bietet, Handlungswissen in Form von Prozeduren (Dämonen) zu integrieren.

### 8.2.2 Die Dempster-Shafer Evidenztheorie

Die Dempster-Shafer Evidenztheorie ist ein numerisches Verfahren zur Verarbeitung von unsicherem Wissen und geht auf Überlegungen von Dempster zurück [Dem68], die von dessen Schüler Glenn Shafer zu einer umfassenden Evidenztheorie weiterentwickelt [Sha76] wurde.

Die Theorie entstand als Antwort auf die fehlende Möglichkeit klassischer Wahrscheinlichkeitstheorie, das Fehlen von Informationen adäquat auszudrücken. Um diesem Problem zu begegnen, wird in der Evidenztheorie auf die Additivität des Wahrscheinlichkeitsmaßes verzichtet. Als Konsequenz erhält man, anstatt eines einzelnen Wertes für die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses ein Vertrauensintervall, dessen Grenzen für eine skeptische bzw. eine optimistische Einschätzung des Zutreffens stehen. Grundlage dieses sog. *transferable belief Modells* [Sme88] bildet ein endlicher *Betrachtungsrahmen*  $\Omega$ , dessen Elemente verschiedene, disjunkte Hypothesen darstellen. Es wird davon ausgegangen, daß genau eine der Hypothesen wahr ist (*closed-world-assumption*). Eine weitere wichtige Charakteristik besteht darin, daß eine Menge von Hypothesen als wahr gilt, wenn sie die gesuchte Hypothese enthält.

#### 8.2.2.1 Belief-Funktionen und Masseverteilungen

Die Darstellung der Überzeugung, daß sich die richtige Hypothese in einer bestimmten Teilmenge des Betrachtungsrahmens befindet, erfolgt mit Hilfe einer speziellen Art von Funktionen. Diese sogenannten *Belief-Funktionen* besitzen folgende Eigenschaften:

# 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

## Ausdruck 1: Belief-Funktion

$$Bel(\emptyset) = 0$$

$$Bel(\Omega) = 1$$

$$Bel(A_1 \cup A_2) \geq Bel(A_1) + Bel(A_2) - Bel(A_1 \cap A_2)$$

Diese Eigenschaften lassen sich intuitiv nachvollziehen: Da die wahre Hypothese sich nicht in der leeren Menge befinden kann, muß die Überzeugung Null sein. Im Betrachtungsrahmen hingegen ist sie nach Definition stets enthalten, was zu einer Überzeugung von 1 führt. Die dritte Eigenschaft besagt, daß die Überzeugung in die Vereinigung zweier Mengen mindestens so groß sein muß, wie die Summe der beiden Mengen. Allerdings muß von diesem Wert noch die Überzeugung in den Schnitt der beiden Mengen abgezogen werden, da diese ansonsten doppelt berücksichtigt werden würde.

Oben genannte Forderungen legen zwar die Eigenschaften der zur Modellierung benutzten Funktionen fest, eignen sich jedoch nicht zur direkten Festlegung von Überzeugungen, da die dritte Eigenschaft schwierig zu überprüfen ist und daher bei einer direkten Festlegung der Überzeugungswerte leicht Inkonsistenzen auftreten. Diesem Problem kann man begegnen, indem statt dessen eine Masseverteilung [KSH91] (*basic belief mass* [Sha76]) auf der Potenzmenge von  $\Omega$  festgelegt wird. Diese ist eine Abbildung  $m: 2^\Omega \rightarrow [0,1]$ , so daß

## Ausdruck 2: Masseverteilung

$$m(\emptyset) = 0$$

$$\sum_{A \subseteq \Omega} m(A) = 1$$

Die Masse, die einer Teilmenge von  $\Omega$  zugeordnet ist, steht für den Anteil der Überzeugung, der unterstützt, daß die betrachtete Teilmenge die wahre Hypothese enthält. Die Zuordnung von Masse zu einer Menge sagt jedoch nichts über die Massen der enthaltenen Teilmengen aus. Diese Konvention ermöglicht es, Unwissenheit auszudrücken. Diejenigen Teilmengen  $A_i \subseteq \Omega$  mit  $m(A_i) > 0$  werden *fokale Elemente* genannt, da sie für eine Lösung in Frage kommen. Mit Hilfe der Masseverteilung kann nun eine Funktion definiert werden, welche die Eigenschaften einer Belief-Funktion erfüllt.

## Ausdruck 3: Überzeugung

$$Bel_m(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B)$$

Diese Funktion gibt nun die Überzeugung in das Zutreffen aller Teilmengen von  $\Omega$  basierend auf der unterliegenden Masseverteilung an. Zusätzlich ist es auf Basis der Masseverteilung ebenfalls möglich anzugeben, wieviel Vertrauen darin besteht, daß eine Teilmenge als Lösung nicht ausgeschlossen wird. Der hierzu ermittelte Wert  $1 - Bel(\Omega - A)$  wird auch als Plausibilität von  $A$  bezeichnet und kann direkt aus der Masseverteilung gewonnen werden.

## Ausdruck 4: Plausibilität

$$Pl_m(A) = \sum_{A \cap B \neq \emptyset} m(B)$$

Aus der Definition der Funktionen ergibt sich, daß stets  $Bel(A) \leq Pl(A)$  gilt. Im Gegensatz zu einer Wahrscheinlichkeit gilt das Gesetz der Additivität für diese nicht. Es gilt vielmehr  $Bel(A) + Pl(A) \leq 1$ , so daß die Werte ein Intervall bilden, welches den Bereich des Vertrauens in eine Menge von Hypothesen angibt.

Das mathematische Modell der Dempster-Shafer Theorie besteht demnach aus drei Maßen, die prinzipiell die gleiche Information enthalten, diese aber aus verschiedenen Perspektiven

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umwelthanwendungen"

beleuchten. Während die Masse die direkte Unterstützung einer Menge beschreibt, mißt die Funktion *Bel* den Grad der vollständigen, sowie *Pl* den der maximalen Überzeugung. Da diese Werte sich jeweils paarweise ineinander übersetzen lassen [KSH91], kann im Prinzip jede der Funktionen zur Modellierung der Unsicherheit verwendet werden. In der Praxis bietet sich jedoch die Modellierung in Form einer Masseverteilung an, da sich diese am leichtesten konsistent formulieren läßt.

### 8.2.2.2 Dempsters Kombinationsregel

Ein weiterer Vorteil der Modellierung der Unsicherheit in Form einer Masseverteilung besteht darin, daß das Modell die Kombination unterschiedlicher Informationsquellen in Form verschiedener Masseverteilungen auf der gleichen Potenzmenge erlaubt. Die Kombination erfolgt mit Hilfe einer von Dempster entwickelten Verallgemeinerung der Bernoulli-Regel zur Kombination von Wahrscheinlichkeiten.

Dempsters Kombinationsregel erhält zwei Masseverteilungen  $m_1$  und  $m_2$  und berechnet aus diesen eine neue Masseverteilung  $m = m_1 \oplus m_2$ . Für den Fall, daß sich die Evidenzen nicht widersprechen [KC93], ist diese gegeben durch

Ausdruck 5: Dempsters Kombinationsregel

$$(m_1 \oplus m_2)(\emptyset) = 0$$
$$(m_1 \oplus m_2)(C) = \frac{\sum_{A \cap B = C} m_1(A) \cdot m_2(B)}{\sum_{A \cap B \neq \emptyset} m_1(A) \cdot m_2(B)}$$

Der Zähler dieses Bruchs entspricht der Bildung einer *orthogonalen Summe*, d.h. der Summe aller Konjunktionen der beiden Verteilungen, welche die Menge unterstützen. Der Nenner stellt eine Normalisierungskonstante dar, die sicherstellt, daß die Eigenschaften einer Masseverteilung erhalten bleiben. Auf das Prinzip der Kombination soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden. (Eine geometrische Interpretation findet sich in [Sha76]).

Eines der größten Probleme bei der praktischen Anwendung der Dempster-Shafer Theorie liegt in der Komplexität von Dempsters Kombinationsregel. Die Berechnung einer neuen Masseverteilung besitzt eine exponentielle Zeitkomplexität, gemessen an der Größe des Betrachtungsrahmens. Da sogar die NP-Vollständigkeit der durch Dempsters Regel berechneten Funktion nachgewiesen wurde [Orp90], ist nicht zu erwarten, daß ein effizienter Algorithmus zur Berechnung des allgemeinen Ansatzes gefunden wird. Hieraus entsteht die Forderung nach akzeptablen Einschränkungen des Modells.

### 8.2.3 Nichtmonotone Inferenz

Bei der Anwendung wissensbasierter Methoden auf Probleme der realen Welt tritt häufig die Situation auf, daß nicht alle relevanten Eigenschaften oder Zusammenhänge der Welt zu dem Zeitpunkt bekannt sind, in dem eine Entscheidung getroffen werden muß. Herkömmliche Prädikatenlogik eignet sich von Natur aus nicht für diese Aufgabe, da sie folgende Eigenschaften aufweist (vgl. [Goe95]).

- Vollständigkeit
- Konsistenz
- Monotonie

Vollständigkeit besagt, daß alle benötigten Fakten über die Welt bekannt und in der Aussagenmenge enthalten sind. Aus dieser Annahme folgt, daß alle Aussagen, die sich nicht

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

aus den vorhandenen Aussagen ableiten lassen als falsch gelten. Konsistenz bedeutet, daß die Aussagenmenge keine Aussagen enthält, die niemals gleichzeitig wahr sein können (z.B.  $p$  und  $\neg p$ ). Diese Annahme ist notwendig, da ein auf der Resolution [Shö92] basierender Schlußfolgerungsmechanismus aus einer Aussagenmenge, welche diese beiden Aussagen enthält, jede beliebige Aussage ableiten könnte. Monotonie ist die Eigenschaft der Logik, daß eine Folgerung aus einer Menge von Aussagen immer wahr bleibt, wenn man neue Aussagen zu der Aussagenmenge hinzufügt.

Ausdruck 6: Monotonie

$$(A \rightarrow q) \Rightarrow (A \cup \{p\} \rightarrow q)$$

Dies bedeutet, daß eine einmal bewiesene Aussage ungeachtet dessen, was man zusätzlich über die Welt erfährt, immer wahr bleibt.

### 8.2.3.1 Ansätze der Nichtmonotonen Inferenz

Alle Ansätze nichtmonotonen Schließens gehen von einer gegebenen Weltbeschreibung  $W$  aus und versuchen einzugrenzen, welche Aussagen sich aus dieser Beschreibung folgern lassen. Da von einem unvollständigen Modell ausgegangen wird, besteht die Aufgabe darin, Annahmen über die Welt zu generieren, um das Modell zu vervollständigen. Eine Annahme ist dabei nach [Bib93] eine Aussage, für die gilt:

Ausdruck 7: Annahmen

$$A \subseteq \{S | W \rightarrow S \wedge W \rightarrow \neg S\}$$

Die verschiedenen Ansätze unterscheiden sich jedoch in der Festlegung gültiger Annahmen. Dabei lassen die Ansätze sich grob in konservative und optimistische Ansätze unterteilen. Die konservativen Ansätze lassen nur eine minimale Menge von Folgerungen zu. Zu diesen Ansätzen zählen die *closed-world Annahme* und die *Zirkumskription*. Diese gehen davon aus, daß alle, oder wie im Fall der Zirkumskription, bestimmte Grundaussagen schon dadurch falsch sind, daß sie nicht in der Weltbeschreibung anzutreffen sind. Die optimistischen Ansätze, zu denen das *Modale-* und das *Default-Schließen* gehören, werten eine Annahme demgegenüber bereits als wahr, wenn sie keiner bekannten Aussage widerspricht.

#### 8.2.3.1.1 Die closed-world Annahme

Die radikalste Lösung für das Problem der Vervollständigung des Weltmodells bildet die closed-world Annahme. Diese besagt, daß alle Aussagen, die sich nicht aus den vorhandenen Aussagen ableiten lassen, automatisch als falsch gelten.

Ausdruck 8: Die closed-world Annahme

$$W \rightarrow A \Rightarrow \neg A$$

Zur Vervollständigung des Modells wird die entsprechende negierte Aussage zum Modell hinzugefügt und vervollständigt dieses. Dieses Prinzip wird in PROLOG unter der Bezeichnung *negation as failure* zum Beweis von Aussagen benutzt: kann eine Aussage nicht durch Resolution bewiesen werden ist sie falsch.

#### 8.2.3.1.2 Zirkumskription

Die Zirkumskription beschränkt das oben genannte Prinzip auf einzelne, speziell ausgezeichnete Prädikate. ( $W \rightarrow P(a) \Rightarrow \neg P(a)$ ) Diese Definition wird häufig dazu benutzt, um auszudrücken, daß eine Regel normalerweise gilt. Will man beispielsweise die Regel "normalerweise gilt  $P(x) \Rightarrow Q(x)$ " formulieren, so benutzt man das Prädikat *abnormal*, um Objekte, für welche die Regel nicht gilt, auszuschließen. Die resultierende Regel lautet:

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

Ausdruck 9: Zirkumskription

$$P(x) \wedge \neg abnormal(x) \Rightarrow Q(x)$$

Auf das zusätzliche Prädikat wird dann die Zirkumskription angewendet. Dadurch lassen sich alle Objekte bestimmen, für die diese Regel nicht gilt.

### 8.2.3.1.3 Modale Ansätze

Der Ansatz der modalen Logik bildet eine Erweiterung der Sprache der Prädikatenlogik um einen modalen Operator  $M$ , der dann wahr ist, wenn die folgende Aussage mit dem bisher bekannten Modell konsistent ist.

Ausdruck 10: Modaloperator

$$P(x) \wedge M Q(x) \Rightarrow Q(x)$$

Intuitiv kann man diese Regel lesen als: Aus  $P(x)$  folgt  $Q(x)$ , falls dies nicht dem bisherigen Wissen widerspricht. Es werden also alle Annahmen zugelassen, die nicht explizit als falsch identifiziert werden können.

### 8.2.3.1.4 Default-Schließen

Während der modale Ansatz die logische Sprache selbst erweitert, werden beim Default-Schließen lediglich die Ableitungsregeln verändert. Es werden Annahmen zugelassen, die bestimmte Bedingungen erfüllen. Diese Bedingungen sind dabei in der Regel Negationen und gelten als erfüllt, wenn sie konsistent mit dem bisherigen Wissen sind. Die neu eingeführten Ableitungsregeln haben die Form

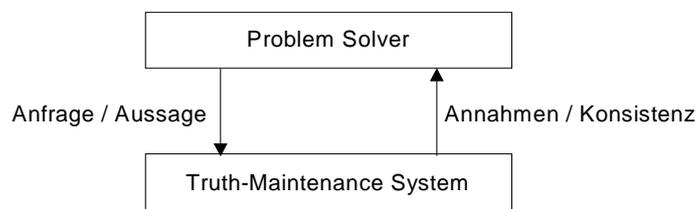
Ausdruck 11: Default-Regel

$$\frac{A : B}{C}$$

und besagen, daß aus der Aussage  $A$   $C$  folgt, falls die Bedingung  $B$  gilt.

### 8.2.3.2 Justification-Based Truth-Maintenance-Systeme (JTMS)

Alle bekannten Systeme, die nichtmonotones Schließen unterstützen, realisieren dies durch das Zusammenspiel zweier Komponenten: der eigentlichen Inferenzmaschine und einem sogenannten *Truth-Maintenance System (TMS)*, dessen Aufgabe die Verwaltung und Verifizierung der Folgerungen, sowie die Behandlung von Inkonsistenzen darstellt.



**Abb. 34: Realisierung nichtmonotonen Schließens**

Ein JTMS verwaltet neben den getroffenen Annahmen für jede dieser Annahmen eine Begründung. Diese hat die Form einer Implikation.

Ausdruck 12: Justification

$$(A_1 \wedge \dots \wedge A_n) \wedge (B_1 \wedge \dots \wedge B_m) \Rightarrow C$$

Die  $A_i$  stehen dabei für positive und die  $B_i$  für negierte Aussagen. Eine Begründung entspricht somit im Prinzip den bereits erwähnten Default-Regeln. Besitzt eine Rechtfertigung ausschließlich positive Aussagen, so ist die Folgerung monoton. Treten jedoch negierte Aussagen auf, kann die Erweiterung der Wissensbasis um eine dieser Aussagen die Rechtfertigung aufheben und die Annahme als falsch identifizieren. Aufgrund dieser Besonderheiten werden positive und negierte Aussagen getrennt verwaltet. Die Annahmen bilden Knoten in einem Begründungsnetz. Diese Knoten haben die Form

Ausdruck 13: Begründungsknoten

$$\gamma_C: \langle C; inlist; outlist \rangle$$

und enthalten neben der Annahme  $C$  eine Liste positiver Aussagen (*inlist*) und eine Liste negativer Aussagen (*outlist*). Auf der Basis dieser Listen und deren Interpretation als Begründung wird berechnet, ob eine Annahme zur Zeit gilt oder nicht. Ist dies der Fall, wird sie mit IN, ansonsten mit OUT markiert. Diese Markierungen bilden auch die Grundlage für die Überprüfung von Begründungen. Konkret bedeutet dies, daß eine Annahme genau dann IN ist, wenn alle Aussagen der entsprechenden *inlist* IN und alle Aussagen der *outlist* OUT sind. Dabei gelten Aussagen, deren *inlist* und *outlist* leer sind stets als IN und Aussagen, die nicht in der Wissensbasis enthalten sind stets als OUT. Nach außen gibt das JTMS alle Aussagen als wahr an, die zu dem Zeitpunkt mit IN markiert sind.

### 8.3 Ein Ansatz zur Behandlung von Abwasser

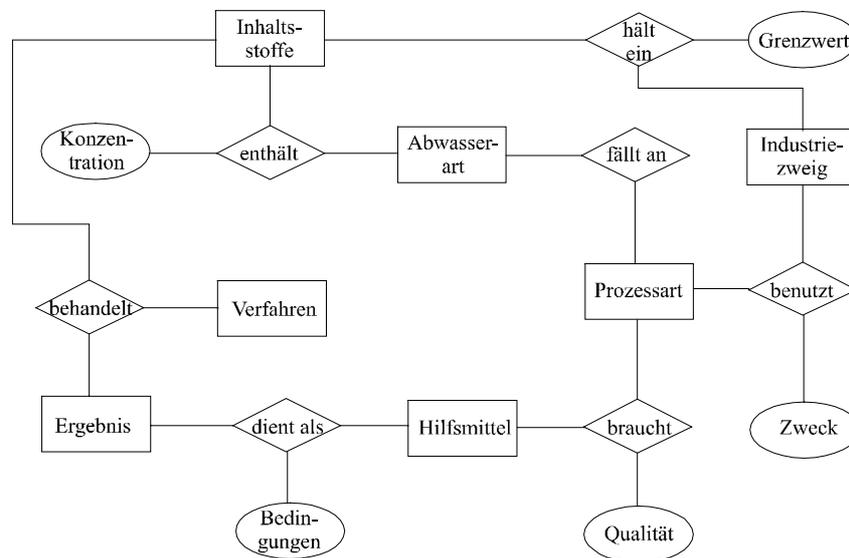
Das erste Anwendungsgebiet, an dem der Versuch unternommen werden soll, den produktionsintegrierten Umweltschutz mit wissensbasierten Methoden zu unterstützen, befaßt sich mit der Wiedergewinnung von Inhaltsstoffen aus vorhandenen Abwasserströmen innerhalb des Produktionsprozesses. Dazu werden bereits in der Praxis bewährte Behandlungsverfahren zum Einsatz kommen, wenn sie sich für das Problem eignen. An diesem Gebiet soll die Machbarkeit (*feasibility*) des Systemkonzeptes *Elwira* gezeigt werden. Die Bearbeitung dieser konkreten Aufgabenstellung umfaßt folgende Schritte.

1. Festlegung zu behandelnder Inhaltsstoffe
2. Bestimmung geeigneter Behandlungsschritte
3. Bewertung möglicher Behandlungsverfahren
4. Prüfung auf Anwendbarkeit des Verfahrens und optional
5. Mögliche Wiederverwendung des Inhaltsstoffes.

Die Überprüfung der Bedingungen wird exemplarisch auf Stoffe beschränkt, die in Wechselwirkung mit den Behandlungsverfahren stehen und diese negativ beeinflussen. Diese Schadstoffe können den Einsatz eines bestimmten Verfahrens behindern. Erst wenn eine Möglichkeit gefunden wird, durch ein anderes Behandlungsverfahren diesen Stoff zu entfernen, kann daß Verfahren angewendet werden. In der Realität spielen neben vorhandenen Stoffen und ihren Wechselwirkungen auch andere Parameter wie Temperatur und Druck eine Rolle. Für reale Anwendungen müssen diese zusätzlichen Einflußfaktoren berücksichtigt werden.

### 8.3.1 Das Domänenmodell

Ausgangspunkt für ein Modell der Domäne Abwasserbehandlung bilden gesetzliche Bestimmungen, die Grenzwerte für bestimmte Abwasserinhaltsstoffe, bzw. Stoffgruppen festlegen [Bre90]. Diese Grenzwerte unterscheiden zwischen Abwässern aus verschiedenen Industriezweigen, was mit dem Vorkommen unterschiedlicher Abwasserarten der verschiedenen Zweige zu erklären ist. Ausgehend von der Abwasserart sind typischerweise unterschiedliche Inhaltsstoffe anzutreffen. Welche dies sind wird wiederum durch die Art des erzeugenden Prozesses bestimmt. Ziel ist es nun, die enthaltenen Stoffe mit Hilfe bestimmter Verfahren zur Abwasserbehandlung derart zu behandeln, daß das Resultat als Hilfsmittel in einer der Prozeßarten wiederverwendet werden kann, so daß ein Stoffkreislauf innerhalb der Produktion geschlossen werden kann. Sowohl für die Anwendung von Behandlungsverfahren als auch für die Wiederverwendung der Stoffe als Hilfsmittel gelten bestimmte Einschränkungen in Form von Prozeßrahmenbedingungen auf der einen und Qualität der erzeugten Stoffe auf der anderen Seite. In A5 werden die Zusammenhänge graphisch dargestellt.



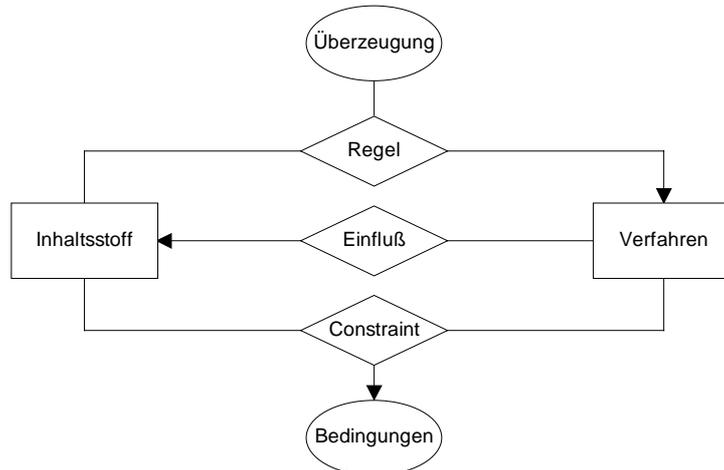
**Abb. 35: ADomänenmodell Abwasser**

Zur Realisierung eines ersten Ansatzes zur wissensbasierten Unterstützung der Abwasserbehandlung ist es sinnvoll obiges Domänenmodell zunächst zu vereinfachen. Ein Ansatz hierfür bietet die Fokussierung auf den eigentlichen Vorgang der Behandlung von Abwasserinhaltsstoffen. Der gesetzliche Rahmen wird dabei zunächst vernachlässigt. (Es ist denkbar, diesen Teil in Form eines Informationssystems zu realisieren, welches ohne die Verwendung wissensbasierter Methoden auskommt und daher an dieser Stelle nicht näher betrachtet werden soll).

Die Einschränkung der Aufgabenstellung führt zu einem vereinfachten Domänenmodell, welches als Grundlage für die Erstellung einer taxonomischen Wissensbasis dienen kann. Die wesentlichen Elemente des Modells bilden auf der einen Seite eine Taxonomie potentieller Abwasserinhaltsstoffe und Stoffgruppen (vgl. Abschnitt 8.1.2) und auf der anderen Seite eine entsprechende Taxonomie möglicher Verfahren zur Behandlung dieser Inhaltsstoffe. Die Aufgabe besteht nun darin, eine Verbindung zwischen diesen beiden Taxonomien herzustellen. Zu diesem Zweck enthält das Modell Regeln, die jeweils ein Konzept der Schadstofftaxonomie mit einem der Verfahrenstaxonomie verbindet. Wird ein Verfahren angewendet, so hat dies durch die Umwandlung von Stoffen wiederum Einfluß auf die Inhaltsstoffe im Strom. Um zusätzlich die Möglichkeit zu haben, Rahmenbedingungen für die

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

Anwendung bestimmter Verfahren angeben zu können, besteht die Möglichkeit, Constraints bezüglich eines Verfahrens zu formulieren. Ein Constraint bezieht sich dabei neben dem Verfahren selbst stets auf einen zu behandelnden Schadstoff, sowie zu erfüllende Rahmenbedingungen in Form von vorhandenen und abwesenden Kombinationen von Schadstoffen im betrachteten Abwasserstrom. Aus diesen Überlegungen ergibt sich das unten dargestellte, vereinfachte Domänenmodell.



**Abb. 36: Vereinfachtes Domänenmodell**

Die zusätzlich eingeführten Relationen zwischen den Konzepten der beiden Taxonomien des Domänenmodells bilden die Grundlage für die Inferenzschritte des Systems, die in den folgenden Abschnitten erläutert werden.

### 8.3.2 Auswahl möglicher Verfahren

Der hier gewählte Ansatz zur Bestimmung anwendbarer Verfahren geht davon aus, daß die Überzeugungen in die Anwendbarkeit bestimmter, in einer Taxonomie angeordneter Verfahren zur Behandlung von Abwasser berechnet werden sollen. Masseverteilungen auf den verschiedenen Verfahren werden durch spezielle Regeln induziert, die für sich genommen jeweils eine *simple support function* (vgl. [Sha76]) darstellen. Sie unterstützen genau ein Verfahren. Der Rest der Masse wird dem Wurzelknoten der Taxonomie zugeordnet.

$$R = ( \text{Schadstoff } S, \text{ Verfahren } V, \text{ Überzeugung } s_V \in [0,1] )$$

Ausgehend von den im betrachteten Stoffstrom enthaltenen Schadstoffen werden die entsprechenden Regeln der obigen Form aufgesammelt und nacheinander auf die Verfahrenstaxonomie angewendet. Dabei werden auch Regeln benutzt die sich auf Oberklassen der vorhandenen Schadstoffe beziehen. Auf diese Weise wird die Masseverteilung auf der Taxonomie sequentiell aktualisiert. Die einzelnen Aktualisierungsschritte werden mit Hilfe einer Vereinfachung von Dempsters Kombinationsregel durchgeführt.

# 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umwelthanwendungen"

## 8.3.2.1.1 Bestimmung der relevanten Parameter

Für jedes der betroffenen Verfahren muß nun eine Menge von Verfahren bestimmt werden, die bei der Neuberechnung der Masse berücksichtigt werden müssen. Die Menge dieser Verfahren wird mit  $Rel_V$  bezeichnet, wobei  $V$  das Verfahren ist, dessen Masse berechnet werden soll. Hierzu wird zunächst eine Hilfsmenge  $R_V$  bestimmt, für die gilt  $R_V = \{X | X \cap V = V\}$ .  $R_V$  enthält die Verfahren, die bei der Verwendung von Dempsters Regel benötigt werden (vgl. [Stu97]). Bei der Bestimmung von  $R_V$  profitieren wir wiederum von der Verwendung fester Teilmengenbeziehungen in der Taxonomie, da diese so aufgebaut sind, daß sich die Menge der relevanten Verfahren auch durch  $R_V = \{X | V \subseteq X\}$  darstellen läßt. Mit Hilfe der Darstellung der Taxonomie läßt sich  $R_V$  durch Suche im Baum bestimmen, da die Knoten der Verfahren, welche die Bedingung erfüllen genau die direkten und indirekten Väterknoten von  $V$  sind. Um überflüssige Berechnungsschritte zu vermeiden werden vor der Berechnung noch alle Verfahren entfernt, deren Masse 0 ist. Hierdurch ergibt sich die Menge der für die Berechnung relevanten Verfahren.

Ausdruck 14: Menge relevanter Verfahren

$$Rel_V = R_V \cap \{A \subseteq \Omega | m(A) = 0\}$$

## 8.3.2.1.2 Berechnung der neuen Verteilung

Bei der Berechnung der neuen Verteilung wird zunächst nur der Zähler des Bruches bestimmt. Dieser ergibt sich für das unterstützte Verfahren durch Addition der Produkte aus unterstützender Masse  $s_V$  und alter Masse  $m_2$  der relevanten Knoten. Zur Vereinfachung kann man die neue Unterstützung aus der Summe herausziehen und erhält Ausdruck 15. Prinzipiell müßte auch die neue Masse von  $\Omega$  auf diese Weise ermittelt werden. Man kann jedoch leicht feststellen, daß die Berechnung von  $m(\Omega)$  mit dem zweiten Fall aus Ausdruck 16 übereinstimmt.

Ausdruck 15: Masse des unterstützten Verfahrens

$$m(V) = s_V \cdot \sum_{R \in Rel_V} m_2(R)$$

Die neue Masse der übrigen betroffenen Verfahren ergibt sich aus Fall 2. Demnach muß die Summe der Produkte aus alter Masse des betrachteten Knotens und der neuen Masse aller relevanten Knoten gebildet werden. Da die neue Verteilung jedoch eine simple support function darstellt, kann die Menge der relevanten Verfahren höchstens in dem unterstützten Verfahren, sowie der Wurzel des Taxonomiebaums bestehen. Die Massen dieser beiden Knoten sind durch die angewendete Regel gegeben und können daher direkt benutzt werden.

Ausdruck 16: Masse der übrigen Verfahren

$$m(U) = \begin{cases} (1 - s_V) \cdot m_2(U) + s_V \cdot m_2(U), & U \in Rel_V \\ (1 - s_V) \cdot m_2(U), & \text{sonst} \end{cases}$$

Ausdruck 16 zeigt die beiden Fälle, die auftreten können. Die Wurzel der Taxonomie ist immer relevant, da sie stets Vaterknoten aller Knoten der Taxonomie ist und aufgrund der Eigenschaften der gewählten Masseverteilungen stets zu den fokalen Elementen zählt. Demnach stellt das Produkt aus alter Masse des betrachteten Knoten und  $1 - s_V$  stets einen der Summanden dar. Für den Fall, daß auch  $U$  relevant ist, muß noch das Produkt aus alter Masse  $m_2(U)$  und  $s_V$  addiert werden.

### 8.3.3 Verifizierung von Rahmenbedingungen

Die Anwendbarkeit eines Verfahrens wird über die Verifikation seiner Rahmenbedingungen bestimmt. Die Überprüfung wird mit Hilfe eines begründungsbasierten Truth-Maintenance-System (JTMS) vorgenommen. Hierbei wird das bekannte Wissen, wie in einem Strom vorhandene Schadstoffe, Temperatur, Druck, als Fakten in das JTMS eingefügt.

Sowohl die Verfahren, als auch deren Konsequenzen werden als Justifications der folgenden Form in dem JTMS verwaltet (vgl. Abschnitt 8.2.3.2):

$$(A_1 \wedge \dots \wedge A_n) \wedge (B_1 \wedge \dots \wedge B_m) \Rightarrow C$$

Für jedes Verfahren, das Anwendung finden soll, werden nun die entsprechenden Constraints gesucht. In jedem Constraint gibt es eine *inlist* und eine *outlist*, die Schadstoffe angeben, die vorhanden sein müssen, bzw. nicht vorhanden sein dürfen. Für jedes Constraint eines Verfahrens wird eine Justification in das JTMS eingefügt. Hierbei entsprechen die  $(A_1 \wedge \dots \wedge A_n)$  der *inlist* und die  $(B_1 \wedge \dots \wedge B_m)$  der *outlist*. Als C wird das Verfahren eingetragen. Die Konsequenzen sind sehr viel einfacher aufgebaut. Hier gibt es bei jedem Verfahren eine Liste mit Schadstoffen, die durch das Verfahren hinzugefügt werden und eine Liste mit Schadstoffen, die durch die Anwendung des Verfahrens entfernt werden. Die Schadstoffe werden je als Konsequenz (C) einer Justification in das JTMS eingefügt. Die Begründungen der Schadstoffe, sind davon abhängig, ob die Schadstoffe hinzugefügt oder entfernt werden. Wird ein Schadstoff hinzugefügt, so muß die Liste der Ausschlußkriterien  $(B_1 \wedge \dots \wedge B_m)$  leer sein und in der Liste der Einschlußkriterien  $(A_1 \wedge \dots \wedge A_n)$  ist genau das Verfahren enthalten. Analog dazu werden bei Schadstoffen die entfernt werden, die Ausschlußkriterien genau das Verfahren enthalten und die Liste der Einschlußkriterien leer sein.

Ferner sind als Konsequenzen auch Veränderungen der Rahmenbedingungen, z.B. der Temperatur des Abwasserstromes denkbar.

Das Problem bei der Implementierung eines JTMS ist, daß bei jeder neuen Aussage die eingefügt wird, jede vorhandene Aussage, die von der neuen Aussage gestützt wird, neu beurteilt werden muß. Hierfür werden meist aufwendige Funktionen benötigt. Shoham hat in [Sho94] einen optimierten Algorithmus vorgestellt, der mit zwei Arten von Zählern arbeitet und so auf komplexe Berechnungen verzichtet.

Auf der einen Seite wird für jede Justification, auf der anderen Seite für jeden Begründungsknoten ein Zähler verwaltet. In dem Justification-Zähler wird die Anzahl der unsicheren Begründungen gezählt. Als unsicher gelten alle Begründungen, die nicht erfüllbar sind, oder noch überprüft werden müssen. Ist dieser Zähler Null, ist trivialerweise die Konsequenz richtig. Dieser Zähler mißt also das Mißtrauen in einen Knoten.

Der Zähler an den Begründungsknoten hat genau die entgegengesetzte Aufgabe. Er zählt die Justifications, die erfüllt sind, oder noch überprüft werden, also die Möglichkeit, daß es eine Begründung für diesen Knoten gibt. Ist dieser Zähler Null, so wird der Knoten aus dem JTMS geschrieben.

### 8.3.4 Bewertung von Regeln und Verfahren

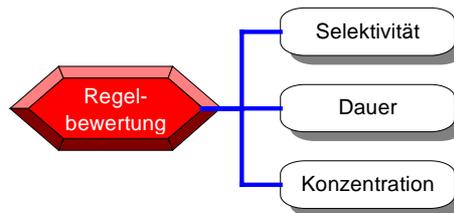
Die Bewertung von Regeln und Verfahren soll einem Produktionsbetrieb die Möglichkeit bieten, die Vorschlagsgenerierung auf seine individuellen Anforderungen anzupassen. So muß ein Verfahrensvorschlag, für den eine neue Halle gebaut werden muß, bei einer Firma, die räumlich nicht expandieren kann, eine schlechtere Bewertung erhalten, als ein etwas

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umwelthanwendungen"

ineffizienteres Verfahren ohne neuen Platzbedarf. Der Betrieb muß selbst entscheiden können, welche Parameter für die Vorschlagsgenerierung wichtig sind.

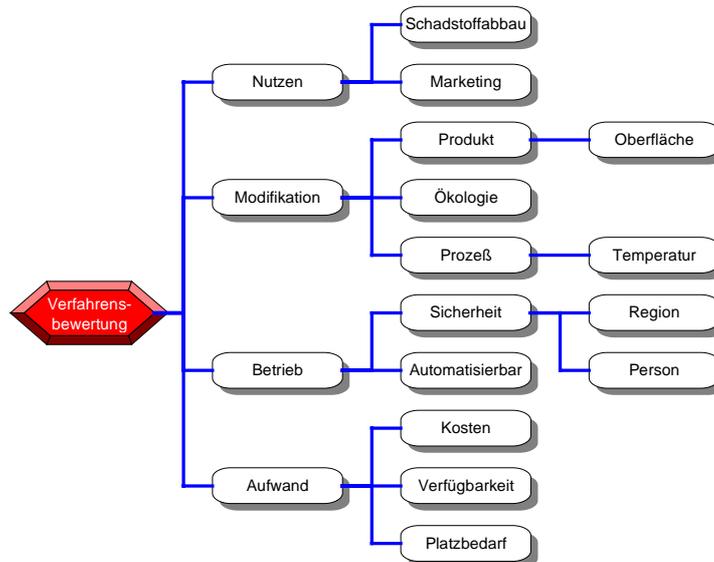
### 8.3.4.1 Bewertungsbäume

Für die Bewertung werden zwei Bäume definiert, die auf der einen Seite die Regel (s. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**), also ein Verfahren in Bezug auf den zu behandelnden Schadstoff, und auf der anderen Seite die vom Schadstoff unabhängigen Faktoren (s. Abb. 38), wie Platzbedarf, Verfügbarkeit, beschreiben.



**Abb. 37: Bewertungsbaum für Regeln**

Hierbei entspricht jedes Blatt und jeder Knoten einer Eingabegröße. Wird ein Knoten für die Bewertung verwendet, haben die Blätter unter diesem Knoten keine Bedeutung mehr. Jede Eingabe erfolgt über zwei Parameter.



**Abb. 38: Bewertungsbaum für Verfahren**

Der erste Parameter wird vom Knowledge-Engineer, bzw. dem Experten selbst, bei der Eingabe des Verfahrens und der Regel eingetragen. Hierbei handelt es sich um eine möglichst objektive Beschreibung der Verfahrenseigenschaften. Die Beurteilung soll fünf Stufen umfassen, die auf diskrete Werte abgebildet werden.

Die Betriebseigenschaften und die Anforderungen eines Betriebes fließen als zweiter Parameter in die Eingabe ein. So wird eine Gewichtung der Blätter bzw. Knoten individuell für den Betrieb erreicht. Die Aggregation der beiden Werte in einem Knoten erfolgt über Multiplikation, um dem Betrieb die Möglichkeit zu geben, einen für ihn irrelevanten Aspekt aus der Bewertung zu entfernen.

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

Die einzelnen Blätter werden nach noch zu definierenden Funktionen in den Knoten aggregiert, z.B. über Addition. Der Wurzelknoten aggregiert seine direkten Nachkommen über eine Funktion, die die Bewertung auf ein Intervall zwischen Null und Eins abbildet.

Wenn die Regeln und Verfahren für einen Produktionsbetrieb so bewertet wurden, dienen die Bewertungsergebnisse als initiale Massen und werden so direkt in den Inferenzprozeß mit eingebunden.

### 8.3.4.2 **exupro**

*exupro* ist ein integriertes Werkzeug zur Unterstützung von Bewertungen, das in dem gleichnamigen Projekt an der Universität Bremen entwickelt wird. Dieses Werkzeug unterstützt die Modellierung von Bewertungsbäumen mit der Integration von Aggregationsfunktionen. Es ist vorgesehen, in diesem Werkzeug die vorhandenen Bewertungsmodelle zu modellieren und die Bewertung über *exupro* zu realisieren. Hierfür müssen nur die Taxonomien mit den betrieblichen Eigenschaften in *exupro* importiert und die Bewertungsergebnisse wieder exportiert werden. So bleiben die Bewertungsschemata auch sehr flexibel, da eine Änderung nur in der Modellierung erfolgen muß.

## 8.4 **Aufbau des wissensbasierten Systems**

In den vorherigen Abschnitten wurden die theoretischen Grundlagen vorgestellt, die in dem *Elwira* - Konzept praktisch umgesetzt werden. Der Abschnitt 8.4.1 gibt einen Überblick über den wissensbasierten Ansatz zur Optimierung von Produktionsprozessen. Das Software-Tool *cosap* wird kurz in Abschnitt Die Software *cosap* vorgestellt. Ein erster Prototyp für die Domäne Abwasser wurde bereits implementiert und wird in Abschnitt 8.4.3 diskutiert.

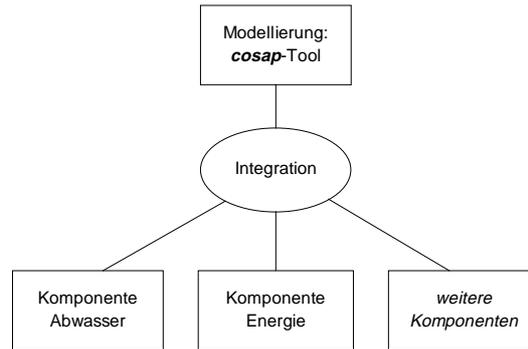
### 8.4.1 Das *Elwira* - Konzept

Das studentische Projekt *cosap* im Studiengang Informatik der Universität Bremen entwickelte in Zusammenarbeit mit dem dort ansässigen Institut für Umweltverfahrenstechnik (IUV) die Software *cosap* zur ökologischen Bilanzierung und Schwachstellenanalyse. Die Grundlage der sich gerade in einer Einsatzstudie befindlichen Software bildet eine stoffstromorientierte Modellierung von Produktionsprozessen. Das Prozeßmodell dient als Grundlage für das Systemkonzept *Elwira*.

*Elwira* untersucht mit der Software *cosap* modellierte Produktionsprozesse unter Verwendung von wissensbasierten Methoden und ökologischen Kriterien auf Umweltverträglichkeit. Das Ziel ist die Anwendung bzw. Optimierung von Methoden des prozeßintegrierten Umweltschutzes. Als Grundlage dient eine Bilanzierung der Prozeßeinheiten hinsichtlich ihrer Inhaltsstoffe. Die Ergebnisse der Untersuchung fließen direkt in wissensbasierte Komponenten ein, wo separat Vorschläge zur Reduzierung der ökotoxikologischen Auswirkungen generiert werden.

Der prozeß- bzw. produktionsintegrierte Umweltschutz dient dem Einsatz bestimmter Verfahren, die Luft, Wasser und Boden schon während der Produktion möglichst wenig belasten. Er umfaßt ein sehr weites und komplexes Gebiet. Daher gibt es oft nur Experten für spezielle Teilbereiche. Zusätzlich unterscheiden sich die Konzepte zur Optimierung von Produktionsprozessen in diesen Teilgebieten. Zur adäquaten Repräsentation des Wissens in *Elwira* ist es daher sinnvoll, die Wissensgebiete zu trennen und unabhängig voneinander zu formalisieren. Ein weiterer Vorteil dieser Kapselung stellt die Reduktion der Komplexität dar, da die Wissensbasen der einzelnen Komponenten einfacher zu bearbeiten sind, als eine heterogene Gesamtwissensbasis.

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltanwendungen"



**Abb. 39: Das Elwira Konzept**

Das System *Elwira* sieht drei voneinander unabhängige Komponenten, Abwasser, Energie und Kühlschmierstoffe vor, die im Rahmen des Projektes realisiert werden sollen. Zur Zeit erfolgt die Umsetzung der Domäne Abwasser und die Erarbeitung von Konzepten für Kühlschmierstoffe und Energie.

### 8.4.2 Die Software *cosap*

Die Software *cosap* wurde im ersten Teil des studentischen Projektes entwickelt und bietet Unterstützung bei der ökologischen Schwachstellenanalyse von Produktionsprozessen [Ran96]. Die Hauptfunktionalität umfaßt:

1. Hierarchisch absteigende grafische Modellierung der Prozeßeinheiten von der kompletten Fertigungseinheit herunter bis zu einzelnen Prozessschritten. Ziel ist die Schaffung eines Strukturmodells der Fertigungseinheit in verschiedenen Hierarchiestufen.
2. Modellierung der Stoff-/Energieströme in den einzelnen Ebenen für die darin enthaltenen einzelnen Prozeßeinheiten und die eventuell vorhandene Vernetzung zwischen diesen Strömen.
3. Aufschlüsselung der Einzelströme hinsichtlich ihres stofflichen Inhaltes, der entsprechenden (Fluß-) Mengen und Stoffmerkmale. Das Ziel ist die Bilanzierung der Stoffe und Energien.
4. Berechnung der Toxizitätsäquivalente (Te) für jeden Einzelstoff in jedem Einzelstrom für jedes Modellelement nach einem vorgegebenen Berechnungsschema. Daraus wird eine ökologische Bewertungszahl für jeden Prozessschritt ermittelt.
5. Generierung eines grafischen Kurvenverlaufes der Bewertungszahlen (oder mehrerer Verläufe) über einzelne Prozessschritte. Aus dem Kurvenverlauf wird die ökologische Schwachstelle ermittelt.

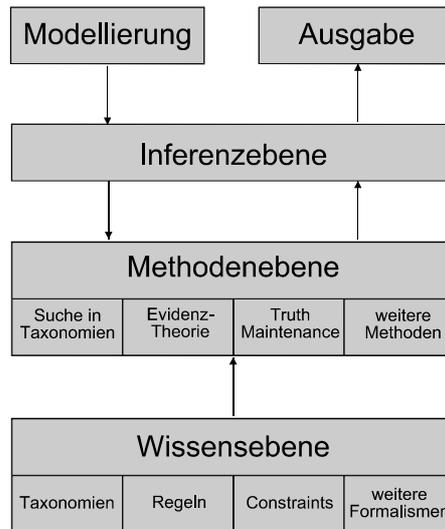
Die Software kann auf unterschiedlichen Rechnerplattformen wie Windows 95, Windows NT und Unix eingesetzt werden.

### 8.4.3 Der Abwasser Prototyp

Der im vorigen Kapitel beschriebene Ansatz zur Unterstützung der Behandlung von Abwasser innerhalb der Produktion wurde im Rahmen des Projektes in Form eines Prototypen realisiert. Durch die Kopplung mit dem bereits vorhandenen Tool zur ökologischen Schwachstellenanalyse bietet dieser die Möglichkeit, Vorschläge zur Behandlung von Abwasserströmen des modellierten Prozesses zu generieren. Hierdurch konnte gezeigt werden, daß eine Unterstützung des produktionsintegrierten Umweltschutzes durch

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

wissensbasierte Methoden möglich ist und weiterhin als Forschungsziel verfolgt werden sollte.



**Abb. 40: Systemarchitektur**

In Abb. 40 ist die Systemarchitektur des Abwasser-Prototypen dargestellt. Diese beruht auf der Unterteilung des Systems in vier logische Ebenen. Die Modellierungsebene stellt die Schnittstelle zur Software *cosap* dar. Alle für das aktuelle Prozeßmodell ermittelten Daten werden hierüber der Inferenzebene zur Verfügung gestellt, die den Ablauf der Inferenz im System steuert. In der Wissensebene stehen verschiedene Wissensbasen für die verschiedenen Anwendungsbereiche des produktionsintegrierten Umweltschutzes zur Verfügung; zur Zeit gibt es nur eine Wissensbasis für den Bereich Abwasser. Für die Anwendung verschiedener wissensbasierter Problemlösungsmethoden verwendet die Methodenebene die verfügbaren Daten der jeweiligen Wissensbasis. Diese Ebene wurde zusätzlich in das klassische Expertensystemkonzept der Trennung von Oberfläche, Inferenzmaschine und Wissensbasis eingeführt, da besonderen Wert auf die Erweiterbarkeit der Methoden- und Wissensebene gelegt wurde. Hierdurch wird das System-Konzept flexibler gegenüber Änderungen und Ergänzungen. Aufgrund der vorgenommenen Kapselung der wissensbasierten Methoden lassen sich neue Methoden und Wissensbasen somit problemlos integrieren. Zum Schluß wird das in der Inferenzebene ermittelte Ergebnis für den Anwender visualisiert und in der Ausgabe dargestellt.

### 8.5 Diskussion und Ausblick

Das Ziel des Prototyps war es, die Machbarkeit des *Elwira*-Konzeptes zu zeigen. Dieses ist gelungen. Jedoch fehlen noch wesentliche Aspekte, um den Prototypen in der Praxis anwenden zu können. Es handelt sich hierbei um die drei Bereiche Wissensbasis, Verifikation der Randbedingungen und Festlegung des Vertrauens in Regeln und Verfahren. Im Prototyp wird derzeit nur aus der Literatur von Wissensakquisiteuren selbst extrahiertes Wissen verwendet. Hier muß sich eine intensive Wissensakquisitionsphase anschließen, in der die gängigen Verfahren und Regeln formalisiert werden. Die Verifikation der Randbedingungen beschränkt sich derzeit auf die Überprüfung von Schadstoffkombinationen. Hier muß, auf der einen Seite, eine Ausweitung auf die Randbedingungen wie Temperatur, Druck, Durchflußgeschwindigkeit, Konzentration des Schadstoffes, stattfinden. Andererseits müssen bei der Überprüfung von Schadstoffkombinationen auch die Mengen der Schadstoffe beachtet werden. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Integration der Bewertung, um das Vertrauen in Regeln und Verfahren nicht nur zufällig einzugeben. Bis auf diese Punkte ist ein Prototyp

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umwelthanwendungen"

entstanden, der durch seine flexible Architektur auch leicht an neue Anforderungen angepaßt werden kann.

### 8.6 Literatur

- [Bib93] W. Bibel. *Wissensrepräsentation und Inferenz*. Vieweg Verlag, 1993.
- [Bra77] R.J. Brachman. *What's in a Concept: Structural Foundations for Semantik Networks*. International Journal of Man-Machine Studies. 9: 127 - 152, 1977
- [Brau95] H. Brauer, Hrsg. *Handbuch des Umweltschutzes und der Umweltschutztechnik*, Band 2: Produktions- und produktintegrierter Umweltschutz. Springer Verlag 1995.
- [Bre90] K. J. Bredtmann. *Öffentliches Umweltrecht als sachliche Grundlage zur Gestaltung einer Benutzeroberfläche für ein Umweltinformationssystem*. Schriftenreihe des PC-Labor der Universität Bremen, 1990.
- [Dem68] A.P. Dempster. *A Generalisation of Bayesian Inference*. Journal of the Statistical Society, 30: 205 - 245, 1968.
- [Goe95] G. Görtz, Hrsg. *Einführung in die Künstliche Intelligenz*. Kapitel „Nichtmonotones Schließen“. Seite 59 - 86. Addison-Wesley, 2. Auflage 1995.
- [KC93] P. Krause und D. Clark. *Representing Uncertain Knowledge: An AI Approach*. Kluwer Academic Publishers, 1993.
- [KSH91] R. Kruse, E. Schwecke und J. Heinsohn. *Uncertainty and Vagueness in Knowledge-based Systems*. Series Artificial Intelligence. Springer Verlag 1991.
- [Min75] M.L. Minsky. *A Framework for Representing Knowledge*. In P.H. Winston The Psychology of Computer Vision. McGraw-Hill, 1975.
- [Orp90] P. Orponen. *Dempster's Rule of Combintaion is NP-complete*. Artificial Intelligence, 44: 245 - 251 1990
- [Ran96] Computerunterstützte ökologische Schwachstellenanalyse in produzierenden Betrieben. In K.C. Ranze, Hrsg. *Intelligente Methoden zur Verarbeitung von Umweltinformationen*. Beiträge zum 2. Bremer KI-Pfingstworkshop. Universität Bremen 1996.
- [Sha76] G. Shafer. *A Mathematical Theory of Evidence*. Princeton University Press, 1976.
- [Sha90] S. Shapiro. *Encyclopedia of Artificial Intelligence*. Kapitel „Inheritance Hierarchies“. Wiley and Sons, 1990.
- [Shö92] U. Schöning. *Logik für Informatiker*. BI-Wissenschaftsverlag, 3. überarbeitete Auflage 1992.
- [Sho94] Y. Shoham. *Artificial Intelligence Techniques in Prolog*. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, 1994.
- [Sme88] P. Smets. *Belief Functions*. In P. Smets, A. Mamdami, D. Dubois and H. Prade, Hrsg. *Non-standard Logics for Automated Reasoning*. Academic Press, 1988.
- [Stu97] H. Stuckenschmidt. *Dempster-Shafer Evidenztheorie in Taxonomien: Komplexitätsreduktion durch Spezialisierung der Konzepte*. Internes Arbeitspapier, Projekt *cosap*. Universität Bremen, 1997.

**Automatische Regelgenerierung  
zur Beschreibung dynamischer  
Systeme**

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

## 9 Automatische Regelgenerierung zur Beschreibung dynamischer Systeme

Hubert B. Keller, Andreas Fick  
Forschungszentrum Karlsruhe  
Institut für Angewandte Informatik  
Postfach 3640, D-76021 Karlsruhe  
e-mail: [keller@iai.fzk.de](mailto:keller@iai.fzk.de)  
www: <http://iai.fzk.de/>

### Zusammenfassung:

Komplexe Problemstellungen aus umwelttechnischen oder ökologischen Bereichen sind einer Analyse und Beschreibung oft nur schwer zugänglich. Ökologische Systeme sind stark vernetzt, das Wissen für eine analytische Modellierung ist lückenhaft. Existierende, umweltbezogene technische Systeme sind durch eine stärkere Abgeschlossenheit (interne Rückführungen) deutlich komplexer geworden, viele Prozeßparameter lassen sich nicht direkt bestimmen. Der Einsatz von Verhaltensmodellen oder Handlungsstrategien auf Basis von Expertenwissen kann zu Problemen führen. Hier bieten sich moderne Verfahren der Informatik wie Maschinelles Lernen zur selbsttätigen Ableitung von kategorischem, kausalem oder funktionalem Wissen an.

### 9.1 Einleitung

Die klassische Systemanalyse erfolgt auf Basis chemisch-physikalischer, biologischer etc. Beziehungen und führt zu einer mathematischen Beschreibung des untersuchten Gegenstands. Diese Vorgehensweise in der klassischen Modellbildung scheidet aber dann, wenn nicht alle Systemzusammenhänge bekannt sind, zu wenig Daten verfügbar sind oder die Systemkomplexität zu hoch ist. Die Übernahme von Expertenwissen als eine weitere Möglichkeit um Verhaltens- oder Handlungsmodelle zu realisieren, führt zum Problem der Wissensakquisition. Menschliches Expertenwissen ist nicht immer bewußt verfügbar, es kann unvollständig oder als explizite Formulierung sogar falsch sein, was durch reale Projekte deutlich belegt wird [1, 6]. Dies erfordert den Einsatz von Verfahren, welche es erlauben, implizit vorliegende Beziehungen automatisch abzuleiten oder aus Beispielen, Datensätzen oder Meßwerten Informationen selbsttätig zu erkennen.

Bei den symbolorientierten Verfahren (z. B. Expertensysteme) wird die Aneignung von Wissen im allgemeinen als Wissensakquisition bezeichnet und man kann die (direkte oder indirekte) manuelle und die (überwachte oder nicht- überwachte) automatische Wissensakquisition unterscheiden. Bei subsymbolischen Verfahren (z. B. neuronale Netze) bezeichnet man den Vorgang des Wissenserwerbs als Lern- bzw. Trainingphase. Ein umfassendere Einführung in die genannten Verfahren ist in [4] und [5] zu finden.

### 9.2 Maschinelles Lernen

Das Gebiet des Maschinellen Lernens beschäftigt sich mit rechnerbasierten Methoden zum Erwerb neuen Wissens, neuer Fähigkeiten und neuartiger Wege der Organisation des bestehenden Wissens. Unter dem Begriff Maschinelles Lernen werden sowohl symbolorientierte, als auch konnektionistische Verfahren verstanden. Maschinell lernende Systeme können nach ihrer Lernstrategie eingeordnet werden: Beim **mechanischen Lernen und der**

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltanwendungen"

**direkten Implantation neuen Wissens** werden vom (lernenden) System weder Schlußfolgerungen noch Transformationen des Wissens verlangt; das Wissen muß lediglich abgespeichert werden. Hierbei findet keinerlei Inferenz oder irgendwie anders geartete Wissenstransformation seitens des Lernenden statt. Im Extremfall artet der Lehrer zu einer passiven Informationsquelle aus.

Beim **Lernen durch Instruktion** (Unterweisung) erfolgt der Wissenserwerb mit Hilfe eines Lehrers oder einer anderen „strukturierten„ Quelle. Das System transformiert das Wissen aus der Eingabedarstellung in seine intern verwendbare Darstellung, und die neuen Informationen werden für einen späteren, effizienten Einsatz in bereits vorhandenes Wissen integriert. Fehlende Detailinformationen werden entweder durch Hypothesenbildung gefunden oder von einer externen Wissensquelle, z.B. dem Lehrer, angefordert.

Beim **Lernen durch Analogie** werden neue Fakten oder Fähigkeiten durch Transformation und Erweiterung bestehenden Wissens abgeleitet. Um eine effektive Nutzung des bestehenden Wissens in der neuen Situation zu gewährleisten sind starke Ähnlichkeiten zum gewünschten neuen Konzept oder der neuen Fähigkeit erforderlich. Somit bedeutet Lernen durch Analogie, daß für das neue Problem keine komplett neue Lösung gefunden werden muß, sondern es genügt, eine bestehende „ähnliche„ Lösung den Anforderungen entsprechend zu modifizieren. Um entscheiden zu können, wie ähnlich sich bestehendes Wissen und Konzepte sind, muß das lernende System über ein Ähnlichkeitsmaß (Metrik) auf konzeptioneller Ebene verfügen. Wird zu einem gewünschten Konzept oder einer Fähigkeit kein analoges Wissen im Speicher gefunden, so werden andere (heuristische) Lösungsmethoden, wie z. B. Trial-and- Error, angewandt. Die Verfahren zum induktiven Lernen können aufgrund der ihnen unterlagerten Form der Wissensrepräsentation in zwei grundlegende theoretische Ansätze eingeteilt werden:

1. symbolische und
2. subsymbolische

induktive Lernverfahren. Charakteristisch für alle induktive Lernverfahren ist das Lernen allgemeiner (Klassifikations-) Regeln oder Hypothesen anhand vorgegebener multipler Beispiele. Hierzu basieren induktive Methoden typischerweise auf einer großen Anzahl von Trainingsbeispielen. Neben der hier dargestellten Subklassifikation induktiver Lernstrategien können diese auch in überwachtes Lernen und nicht-überwachtes Lernen eingeteilt werden.

Beim **Lernen aus Beispielen** ist eine Menge von vorklassifizierten positiven Beispielen und Gegenbeispielen (negativen Beispielen) eines Konzeptes gegeben. Das System folgert auf der Basis der Objekteigenschaften dieser Beispiele durch Aufstellung und evtl. sogar Bewertung von Hypothesen ein allgemeines Konzept, das alle positiven und keines der Gegenbeispiele beschreibt. Das somit gewonnene Wissen kann nachfolgend zur Klassifikation, Bewertung oder zur Lösung von Problemsituationen eingesetzt werden. Lernen aus Beispielen kann anhand des Ursprungs der Beispiele (Lehrer, Umwelt, System) noch weiter unterteilt werden. Man kann es auch durch den präsentierten Typ der Beispiele, z.B. nur positive Beispiele, subklassifizieren.

Beim **Lernen durch Operationalisieren** handelt es sich um eine weitere Strategie zum Maschinellen Lernen. Diese Lernstrategie kann von einem System eingesetzt werden, das bereits über Wissen aus seinem Anwendungsgebiet verfügt. Von einem „intelligenten„ externen Beobachter seines Verhaltens wird ihm ein Ratschlag, Tip oder ein Hinweis zur Nachhilfe erteilt. Dieser erfolgt durch eine Eingabe in einer Weise, die das System nicht direkt befolgen kann und muß, d. h. es wird kein uneingeschränkter Gehorsam beabsichtigt. Der Lernprozeß besteht darin, daß das System die Anweisung in eine Folge von Operationen oder in geänderte Heuristiken übersetzt, die dann bestimmte Operationsfolgen bevorzugen.

Das **Lernen durch Beobachtung und Entdeckung** ist die allgemeinste Form des induktiven Lernens. Sie beinhaltet u.a. die Entwicklung von Systemen, theoriebildende Aufgaben und die Erzeugung von Klassifikationskriterien zur Bildung taxonomischer, d. h. systematischer Hierarchien, ohne Unterstützung durch einen externen Lehrer. Die Aufgabe besteht darin, allgemeine Beschreibungen (eines Gesetzes, einer Theorie) zu bestimmen, die eine Ansammlung von Beobachtungen charakterisieren. Durch Auswertung der symbolischen Informationen der Beobachtungen werden Beschreibungen erzeugt, die Eigenschaften von Objekten spezifizieren, die eine bestimmte Klasse (ein Konzept) repräsentieren. Die Strategie des Lernens durch Beobachtung kann man nach dem Grad der Wechselwirkung mit der externen Umgebung in die passive Beobachtung und in das aktive Experimentieren unterteilen.

Ein lernendes System, das die Strategie des **Lernen durch Deduktion** (analytisches Lernen) verwendet, führt deduktive (wahrheitserhaltende) Schlüsse entweder auf bereits vorhandenem oder auf speziell zur Verfügung gestelltem Wissen aus. Dies geschieht mit dem Ziel der Restrukturierung des gegebenen Wissens in nützlichere, effektivere Formen oder zur Ableitung wichtiger Konsequenzen (z. B. maschinelles Beweisen in der Logik). Deduktive Lernmethoden lernen allgemeine Regeln oder Theoreme aus speziellen, vorgegebenen Beispielen. Hierzu benötigen sie eine Theorie (Hintergrundwissen) als gültige Basis für die Generalisierungen. Für eine detaillierte Darstellung existierender Verfahren sei auf [4] verwiesen.

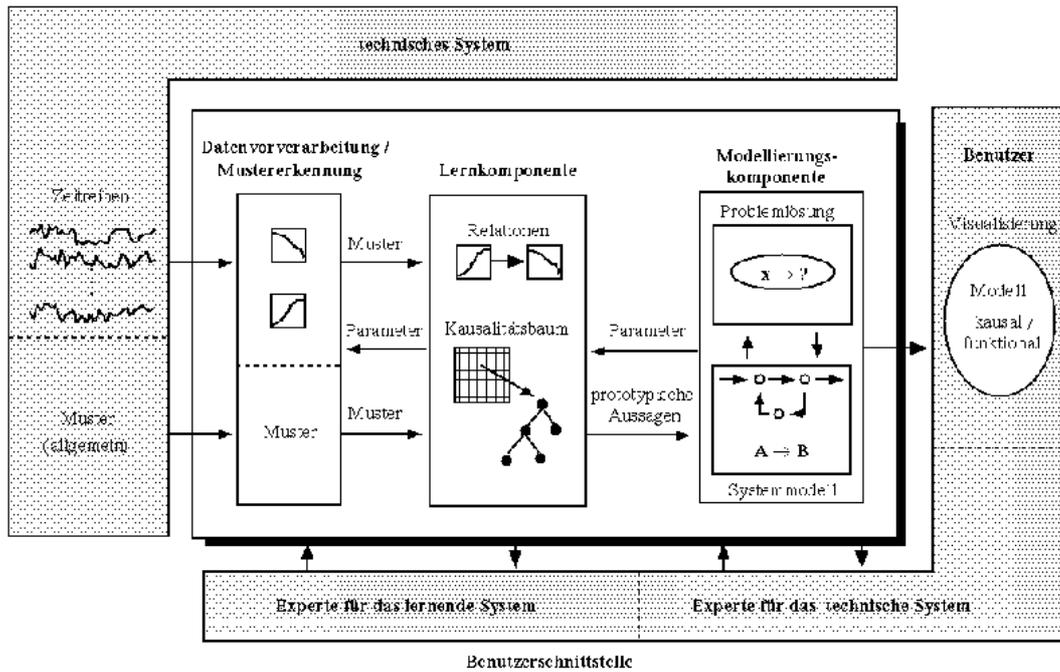
### **9.3 Anwendung Maschinellen Lernens im C3R-System**

Maschinelle Lernverfahren können eingesetzt werden, um in Datensätzen bestimmte Abhängigkeiten automatisch zu erkennen. Die maschinelle Modellierung von Prozeßabhängigkeiten erfolgt im C3R-System (Childrens Cognitive Learning for Causal Reasoning about Dynamic Systems) durch die Kombination von symbolischen (maschinelles Lernen), subsymbolischen (analog neuronalen Netzen) und rein numerischen (Clustering) Verfahren [2, 7]. Als Eingabe in das C3R-System dienen Zeitreihen der gemessenen Größen oder direkt Muster von beobachtbaren Größen aus dem (technischen) System. Initialisierungswerte für die adaptiven dynamischen Systemparameter des C3R- Systems oder auch Vorwissen können eingegeben werden. Die Ausgabe des C3R-Systems besteht aus einer Visualisierung der erkannten kausalen Abhängigkeitsbeziehungen in Form eines (gerichteten) Kausalitätsgraphen und eine Darstellung der funktionalen Abhängigkeitsbeziehungen durch eine Menge unscharfer bereichsweiser Transformationsregeln (Fuzzy-Regeln).

Die Vorgehensweise des Systems soll anhand von Abbildung 41 verdeutlicht werden. Zunächst wird zur Elimination stochastischer Störungen und zur Unterstützung des nachfolgenden Segmentierungsschrittes eine Glättung (Datenvorverarbeitung) vorgenommen. Der folgende Segmentierungsprozeß dient der Erkennung und Isolierung signifikanter, zusammenhängender Werteveränderungen (Muster) in den geglätteten Meßkurven, was man als Übergang von einer numerischen, subsymbolischen zu einer symbolischen Beschreibung deuten kann.

Anschließend werden Relationen zur Darstellung von Ursache- Wirkungsbeziehungen zwischen jeweils zwei Systemgrößen gebildet. Diese Relationenbildung erfolgt auf Basis der erkannten signifikanten Muster und geschieht mehr oder weniger kombinatorisch. Um von den Relationen zu ersten prototypischen Kausalitätsaussagen zu kommen, werden Relationen mit gemeinsamen Ursache- und Wirkungsmeßgrößen inkrementell in einen C3R-Kausalitätsbaum eingefügt und verarbeitet. Der Baum dient dazu, wiederholt auftretende „ähnliche,, Relationen zu erkennen und aus empirisch bestätigten Relationen bereichsweise Aussagen zu bilden.

# 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltanwendungen"



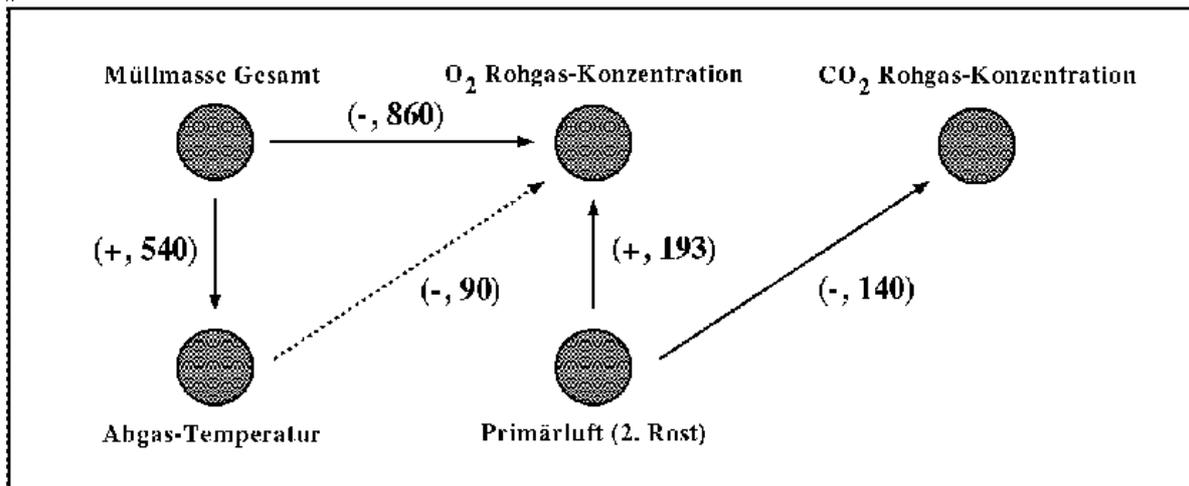
**Abb. 41: C3R-System**

Der letzte Schritt besteht in der Ableitung und Visualisierung des funktionalen und strukturellen Systemmodells (Transformationsregeln und Kausalitätsgraph) aus den verdichteten prototypischen Kausalitätsaussagen. Wie aus Abbildung 1 außerdem hervorgeht, gehen in den Modellierungsvorgang zahlreiche Systemparameter ein, die von einem Experten initialisiert werden können und anschließend vom System während des Modellierungsvorgangs laufend selbst angepaßt werden. Ergebnisse wurden aus Beispieldaten der halbtechnischen Versuchsanlage TAMARA zur thermischen Abfallbehandlung abgeleitet. Ein Ergebnis war das dynamische Übergangsverhalten von Prozeßgrößen; nach der Verringerung der Gesamt-Müllmasse ergab sich eine Zunahme der O<sub>2</sub>-Rohgas-Konzentration. Dieser Zusammenhang ist durchaus plausibel; wird weniger Müll verbrannt, so wird auch weniger Sauerstoff verbraucht, folglich steigt die Sauerstoffkonzentration im Rohgas. Im folgenden ist die für diesen Übergang in den stationären Zustand vom System maschinell abgeleitete und auch dem Kausalitätsgraphen zugrundeliegende Regel wiedergegeben:

```

WENN Müllmasse _Gesamt in [43,5; 44,2]
    UND Veränderung=Abnahme nach [43,5; 44,1]
    innerhalb von 33,4 ± 9,5 Sekunden
    UND O2_1 in [13,6; 16,4]
DANN Veränderung=Zunahme nach [15,4; 15,5]
    mit einer Verzögerung von 860.0 ± 28,3 Sekunden
    innerhalb von 231.8 ± 14,7 Sekunden.
Vertrauensgrad: 0,8.
    
```

Die Angaben in eckigen Klammern geben die Wertebereiche an, in denen die Größen liegen. Weitere Ergebnisse, wie z. B. der Zusammenhang zwischen einer Abnahme (bzw. Zunahme) der Gesamt-Müllmasse und einer fallenden (bzw. steigenden) Abgas-Temperatur, wurden ebenfalls abgeleitet.



**Abb. 42: Kausalitätsgraph**

Alle abgeleiteten Zusammenhänge werden in einem Kausalitätsgraphen (Abbildung 42) visualisiert. Die Kanten dieses Kausalitätsgraphen sind durch eine qualitative Beschreibung des Veränderungsverhaltens (gleichartig +, gegenläufig -) und durch die abgeleitete Verzögerungszeit gewichtet. Als Ergebnisse ergaben sich:

- Die Müllmasse Gesamt und die Primärluft sind exogene Größen.
- Die Abgas-Temperatur, die O<sub>2</sub>- und CO<sub>2</sub>-Rohgas-Konzentrationen sind endogene Größen.

Die vom C3R-System beispielhaft erkannten Beziehungen zeigen die Leistungsfähigkeit maschineller Lernverfahren in der automatischen Ableitung von Prozeßzusammenhängen. Auf diese Weise abgeleitete Regeln können als Wissensbasis für eine effizientere und umweltorientierte Prozeßführung genutzt werden.

#### 9.4 Zusammenfassung und Ausblick

Die modellmäßige Beschreibung analytisch schwer zugänglicher Systeme oder Handlungsstrategien wird durch die modernen Verfahren der Informatik wie maschinelles Lernen auf eine neue Basis gestellt. Beratungssysteme, Verhaltensmodelle oder Steuerungsstrategien basieren dabei auf maschinell gewonnenem und standardisiertem Wissen. Werden diese Beschreibungen/Modelle auf Basis der Verfahren der maschinellen Intelligenz einer entsprechenden Validierung unterzogen (hier tritt das Problem der Nachvollziehbarkeit auf), so bieten die genannten Verfahren eine echte Möglichkeit zur automatisierten Wissensakquisition.

#### 9.5 Literatur

- [1] Bloy, U.: Entwurf eines Fuzzy-Controllers zur Ausbrandsteuerung einer Müllverbrennungsanlage. Diplomarbeit, Institut für Angewandte Informatik, Forschungszentrum Karlsruhe und Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme, Universität Karlsruhe, 1996.
- [2] Keller, H. B. et al: Maschinelle Modellierung komplexer dynamischer Systeme. In [3].
- [3] Keller, H. B. et al.: 4. Treffen des AK „Werkzeuge für Simulation und Modellbildung in Umweltsanwendungen,, Bericht FZKA 5552.
- [4] Keller, H. B.: Maschinelle Intelligenz. Vieweg, erscheint.

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

[5] Russel, S. et al.: Artificial Intelligence. Prentice Hall, 1995.

[6] Weidemann, R. et al.: Das Altlasten-Expertensystem XUMA. In: ist - intelligente Software-Technologien. Oldenbourg, 2 (3), 1992, S. 5-10.

[7] Weinberger, T.: Ein Ansatz zur maschinellen Modellierung dynamischer Systeme. VDI Verlag, 1995.

# **Artificial Intelligence Meets Artificial Insemination**

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

## 10 Artificial Intelligence Meets Artificial Insemination - The Importance and Application of Symbolic Rule Extraction From Trained Artificial Neural Networks

**Robert Andrews** *robert@fitmail.fit.qut.edu*

**Joachim Diederich** *joachim@fit.qut.edu.au*

**Emanoil Pop** *pop@fit.qut.edu.au*

**Alan B. Tickle** *tickle@fitmail.fit.qut.edu*

Neurocomputing Research Centre  
Faculty of Information Technology  
Queensland University of Technology  
GPO Box 2434 Brisbane, Qld. 4001

### Abstract

In a recent article Andrews et al. [1995] describe a schema for classifying neural network rule extraction techniques as either decompositional, eclectic, or pedagogical. Decompositional techniques require knowledge of the neural network architecture and weights. Each hidden and output unit is interpreted as a Boolean rule with the antecedents being a set of incoming links whose summed weights guarantee to exceed the unit's bias regardless of the activations of the other incoming links. Pedagogical techniques on the other hand treat the underlying neural network as a 'black box' using it to both classify examples and to generate examples which a symbolic learning algorithm then converts to rules. Eclectic techniques combine elements of the two basic categories. In this paper we describe some reasons why rule extraction is an important area of research. We then briefly describe three rule extraction algorithms, RULEX, DEDEC & RULENEG, these being representative of each of the abovementioned groups. We test these algorithms using two classification problems; the first being a laboratory benchmarking problem while the second is drawn from real life. For each problem, each of the rule extraction techniques previously described is applied to a trained neural network and the resulting rules presented.

### 10.1 Introduction

Using a set of examples from a given problem domain comprising inputs and their corresponding outputs, an artificial neural network, (ANN), can be trained to learn the relationships between the input-output pairs. The knowledge acquired about the problem domain during the training process is encoded within the ANN in two forms; (i) the network architecture itself, (eg, the number of 'hidden' units), and (ii) a set of numeric parameters, (weights). The trained network can then be used to generalise over a previously unseen set of examples.

The concepts learned by the ANN are difficult to understand however, as they are hidden in the network's architecture and weights. The ANN functions as a 'black box' with inputs being presented on one side and decisions/classifications being produced at the other side. Because of this 'opaqueness' it is difficult for an ANN to provide an 'explanation' for decisions it has made. Such a capability is mandatory if, for example, the ANN is to be used in what are termed 'safety critical' systems such as air traffic control and power stations. One approach in understanding the

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltanwendungen"

classification behavior of ANN's is to extract symbolic rules from the trained ANN which describe this behavior. Rule extraction techniques seek to clarify to the user how the network arrived at its decision by decoding the internal state of the ANN into, most frequently, *if..then* conjunctive rules.

A topic which is closely allied to rule extraction is rule 'refinement'. The starting point in the rule refinement process is an initial knowledge/rule base which may be only partially complete and/or partially correct. The ANN is first initialised according to the rules in the knowledge base and then trained with a set of examples drawn from the problem domain. After training has been completed, a set of 'refined' symbolic rules which form a 'better' representation of the problem domain than was encoded in the original knowledge base can be extracted from the ANN.

The adaptation of ANN's to the twin tasks of rule extraction and rule refinement has greatly improved the versatility and applicability of ANN solutions. ANN's can be used in conjunction with an Expert System to create a hybrid system that is both rule based and capable of dynamic learning thus allowing modification of the knowledge/rule base as new example data is acquired. ANN's can also be used in a pure system capable of both decision making as well as being able to justify/explain the decision it has made. Further, as Towell and Shavlik, (1993), have shown, rule refinement can lead to situations where the rules extracted from a trained ANN actually outperform the ANN on which they were based.

In section 1 we will present a short discussion delineating the reasons why rule extraction from ANN's is important. In section 2 we will briefly describe a three category classification schema for rule extraction techniques. In section 3 we will describe three rule extraction techniques, one from each classification category. In section 4 we will outline two classification problems; the first being a laboratory benchmarking problem while the second is drawn from real life. For each problem, each of the rule extraction techniques previously described is applied to a neural network trained in the relevant problem and the resulting rules presented.

### **10.2 The Importance of Rule Extraction Algorithms**

Rule extraction algorithms can be of benefit to both connectionist and symbolic AI techniques in the following ways:

#### 10.2.1 Provision of an Explanation Component

Symbolic AI systems represent knowledge about the problem domain declaratively, often in the form of *if..then..else* rules. Such systems have an inherent ability to deliver an explanation of decisions made by the system Davis, Buchanan & Shortcliffe, (1977), showed that the ability of an AI system to generate even limited explanations is absolutely crucial to the user acceptance of such systems. Further Gallant, (1988), observes that an explanation capability provides a check on the internal logic of the system as well as being able to give a novice insight into the problem. ANN's have no declarative knowledge structures and therefore have considerable difficulty in providing an explanation component.

#### 10.2.2 Knowledge Acquisition for Symbolic AI Systems

One of the principal reasons for introducing machine learning algorithms over the past decade was to overcome the so called 'knowledge acquisition' problem for symbolic AI systems. (Saito & Nakano, 1988), (Sestito & Dillon, 1991) Further as Sestito & Dillon, (1994), observe, the most difficult and time consuming task in building an expert system is constructing and debugging its knowledge base. Rule extraction algorithms allow a trained ANN to be used as the basis for the construction of a knowledge/rule base. Further, rule extraction as part of a rule refinement

method allows for the improvement of symbolic knowledge/rule bases that are incomplete or only partially correct.

### 10.2.3 Data Exploration and the Induction of Scientific Theories

Over time neural networks have proven to be extremely powerful tools for data exploration with the capability to discover previously unknown dependencies and relationships in data sets. As Craven and Shavlik (1994) observe, '*a (learning) system may discover salient features in the input data whose importance was not previously recognised.*' However, even if a trained ANN has learned interesting and possibly non-linear relationships, these relationships are encoded incomprehensibly as weight vectors within the trained ANN and hence cannot easily serve the generation of scientific theories. Rule-extraction algorithms significantly enhance the capabilities of ANNs to explore data to the benefit of the user.

### 10.2.4 Improving the Generalisation of ANN Solutions

Where a limited or unrepresentative data set from the problem domain has been used in the ANN training process, it is difficult to determine when generalisation can fail even with evaluation methods such as cross-validation. By being able to express the knowledge embedded within the trained Artificial Neural Network as a set of symbolic rules, the rule-extraction process may provide an experienced system user with the capability to anticipate or predict a set of circumstances under which generalisation failure can occur. Alternatively the system user may be able to use the extracted rules to identify regions in input space which are not represented sufficiently in the existing ANN training set data and supplement the data set accordingly.

## 10.3 A Classification Schema for Rule Extraction Algorithms

Andrews *et al.*, (1995), propose a classification schema for rule extraction algorithms which is, in part, based on the 'translucency' of the algorithm. In this case translucency refers to the extent to which the algorithm requires and uses knowledge of the underlying ANN architecture and weights to formulate symbolic rules. The schema defines two basic categories of rule extraction techniques *viz* - *decompositional*' and *'pedagogical*' and a third - labelled as *'eclectic*' - which combines elements of the two basic categories.

The distinguishing characteristic of the *'decompositional*' approach is that the focus is on extracting rules at the level of individual (hidden and output) units within the trained Artificial Neural Network. Hence the *'view*' of the underlying trained Artificial Neural Network is one of *'transparency*'. A basic requirement for rule extraction techniques in this category is that the computed output from each unit in the network must be mapped into a binary (*yes/no*) outcome which corresponds to the notion of a rule consequent. Consequently each hidden or output unit can be interpreted as a *'step*' function or a Boolean rule which reduces the rule extraction problem to one of determining the situations in which the *'rule*' is true *ie* a set of incoming links whose summed weights guarantee the unit's bias is exceeded regardless of the activation value present on other incoming links. The rules extracted at the individual unit level are then aggregated to form the composite rule base for the ANN as a whole. Some examples of decompositional methods include Fu (1991), Towell & Shavlik (1993), Mozer, Smolensky & McMillan (1991), Tresp, Hollatz & Ahmad (1993).

Methods classified as *'pedagogical*' are those rule extraction techniques which treat the trained ANN as a *'black box*', *ie*, the view of the underlying trained Artificial Neural Network is *'opaque*'. Such techniques typically are used in conjunction with a symbolic learning algorithm and the basic motif is to use the trained Artificial Neural Network to both classify examples and to generate examples for the learning algorithm. Some examples of pedagogical methods include Saito & Nakano (1988), Thrun (1994), and Craven & Shavlik (1994).

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

As indicated above the proposed third category in this classification scheme are composites which incorporate elements of both the 'decompositional' and 'pedagogical' (or 'black-box') rule extraction techniques. This is the 'eclectic' group.

### 10.4 Examples of Decompositional, Pedagogical, & Eclectic Techniques

#### 10.4.1 RULEX - A Decompositional Technique

RULEX, (Andrews & Geva, 1994, 1995), is designed to exploit the manner of construction and consequent classification behaviour of a particular type of multilayer perceptron, the Constrained Error Back-propagation, (CEBP), MLP, (Geva & Sitte, 1992). The CEBP network is a representative of a general class of local response ANN's which perform classification and function approximation in a manner similar to Radial Basis Function, (RBF) networks and is particularly suited to the task of rule extraction. The hidden units of the network are sigmoid-based locally responsive units, (LRU's), that have the effect of partitioning the training data into a set of disjoint regions, each region being represented by a single hidden layer responsive unit. Each hidden layer unit forms a locally responsive basin of attraction in input space and is composed of a set of ridges, one ridge for each dimension of the input. A ridge will produce appreciable output only if the value presented as input lies within the active range of the ridge. The output of an individual LRU is the thresholded sum of the activations of the ridges. In order for a vector to be classified by a LRU each component of the input vector must lie within the active range of its corresponding ridge. Hence the rule derived from an N dimensional LRU will be of the form :

**IF** RIDGE<sub>1</sub> is Active  
**AND** RIDGE<sub>2</sub> is Active  
:  
**AND** RIDGE<sub>N</sub> is Active  
**THEN** Pattern is in the Target Class

The active range for each ridge can be calculated from its centre, breadth, and steepness ( $c_i, b_i, k_i$ ), weights in each dimension. This means that it is possible to directly decompile the LRU parameters into a conjunctive propositional rule of the form:

**IF**  $c_1 - b_1 + 2k_1^{-1} \leq x_1 \leq c_1 + b_1 - 2k_1^{-1}$   
**AND**  $c_2 - b_2 + 2k_2^{-1} \leq x_2 \leq c_2 + b_2 - 2k_2^{-1}$   
:  
**AND**  $c_N - b_N + 2k_N^{-1} \leq x_N \leq c_N + b_N - 2k_N^{-1}$   
**THEN** Pattern x is in Target Class

For discrete valued input it is possible to enumerate the active range of each ridge as an OR'ed list of values that will activate the ridge. In this case it is possible to state the rule associated with the local bump in the form :

**IF**  $v_{1a}$  OR  $v_{1b}$  ... OR  $v_{1n}$   
**AND**  $v_{2a}$  OR  $v_{2b}$  ... OR  $v_{2n}$   
:  
**AND**  $v_{Na}$  OR  $v_{Nb}$  ... OR  $v_{Nn}$   
**THEN** Pattern x is in Target Class

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

(where  $v_{ia}$ ,  $v_{ib}$ , ...,  $v_{in}$  are contiguous values in the  $i$ th input dimension and  $v_{ia} \geq c_i - b_i + 2k_i^{-1}$  and  $v_{in} \leq c_i - b_i + 2k_i^{-1}$ )

The technique provides mechanisms for removing redundant antecedent clauses, (ie, input dimensions that are not used in classification), from the extracted rule, and for removing redundant rules, (ie, replacing two rules with a single more general rule). Unlike other decompositional methods such as *KT*, (Fu, 1991), and *Subset*, (Towell & Shavlik, 1993), which employ variations on 'search and test' techniques, *RULEX* performs rule extraction by directly interpreting weight vectors as rules. Consequently *RULEX* obviates the computational problems of other decompositional techniques and the attendant recourse to heuristics to control the search of the solution space. This technique has been adapted to accommodate both discrete, continuous and mixed data inputs.

### 10.4.2 RULENEG - A Pedagogical Technique

Rule extraction is viewed as a learning task and the target concept is the function to be computed by the network while the input features are the patterns used in training the network. Because every symbolic rule in propositional calculus can be expressed as a disjunction of conjunctions, *RULENEG*, Pop (1994), concentrates on extracting conjunctive rules only.

A conjunctive rule holds only when all the antecedents in the rule are true. In other words, by changing the truth value of one of the antecedents, the outcome of the rule changes. This is the basic idea employed by *RULENEG*. Given a trained ANN and the patterns used for training the net the rules learned by the net are extracted according to the following algorithm:

```
initialise the Rule-Holder to empty
for every pattern 'p' from the training set
    find the class 'C' for 'p' by use of the ANN /*C = ANN(p)*/
    if 'p' is not classified by the existing rules
        initialise a new rule 'r' for class 'C'
        for every input 'i' into the network
            make a copy 'p'' of 'p'
            negate the 'i'-th entry in 'p''
            find the class 'C'' for 'p'' by use of the ANN /*C' = ANN(p'')*/
            if 'C'' is not equal to 'C'
                add 'i'-th input and its truth value to 'r'
        /* end for every input */
    add 'r' to the Rule-Holder
/* end for every pattern */
```

As can be seen from this outline *RULENEG* will always pick only one conjunctive rule per pattern, but will still be able to extract all the rules learned from the patterns.

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltanwendungen"

### 10.4.3 DEDEC - An Eclectic Technique

While DEDEC, (Tickle, Orłowski & Diederich, 1994), use the basic pedagogical motif it also utilises the knowledge embedded in the architecture and weight vectors of the trained network to rank the inputs in order of their relative significance. This additional information is then used to direct the strategy for generating a minimal set of cases for the rule-extraction-as-learning phase. The following is a schematic outline of the DEDEC algorithm:-

- (i) Assign each propositional variable from the problem domain, (ie, a rule antecedent), to an input unit for an ANN based on the 'Cascade' incremental learning algorithm, (Fahlman & Lebiere, 1990). The network output unit corresponds to the decision outcome of the ANN applied to an input vector from the problem domain, ie, in essence the decision outcome corresponds to the rule consequent.
- (ii) Train the ANN
- (iii) Rank the input units in order of the relative share of their contributions to the output prediction using a weight partitioning algorithm based on Garson, (1991).
- (iv) Initialise the set of symbolic rules as the attribute value(s) for the minimum set of input units required to form one valid case/example in the problem domain.

Repeat

select the next input unit from the ranked list (Created at step iii)

use the trained ANN to give the decision/classification for the set of cases/examples from the problem domain involving this input unit and all previously selected input units

for each case/example generated at the previous step

- (a) update the rules for classifying each existing case/example in the presence of this new case;
- (b) determine the rules for classifying the new case/example in the presence of the existing cases;

remove all rules which are not minimal

Until Stopping Criteria Met

(The 'stopping criteria' used are based on the following considerations:

- (a) the significance of the input unit added at the current iteration relative to the unit selected at the previous iteration;
- (b) a 'patience' criterion indicating no change in the set of extracted rules for a specified number of iterations.)

## 10.5 The Problem Domains

The two problems used to demonstrate the above described rule extraction algorithms are the MONK1 problem, (Thrun *et al.*, 1991), and the prediction of milk production from a daughter produced by mating a selected AI sire with a given dam from a particular herd of Friesian dairy cattle in Australia.

### 10.5.1 The MONK's Problem

The MONK's problems are benchmark binary classification tasks in which robots are described in terms of 6 characteristics and a rule is given which specifies the attributes that determine membership of the target class.

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

<u>Robot Characteristics</u>	<u>Nominal Values</u>
$x_1$ : Head Shape	Round, Square, Octagon
$x_2$ : Body Shape	Round, Square, Octagon
$x_3$ : Is Smiling	Yes, No
$x_4$ : Holding	Sword, Flag, Balloon
$x_5$ : Jacket Colour	Red, Yellow, Green, Blue
$x_6$ : Has Tie	Yes, No

The rule determining membership of the target class in the MONK1 problem is :

IF (Head Shape = Body Shape OR Jacket Colour = Red)

THEN Robot is in the Target Class

The rule determining membership of the target class in the MONK2 problem is :

IF Exactly 2 of the Attributes Have Their First Value

THEN Robot is in the Target Class

The rule determining membership of the target class in the MONK3 problem is :

IF (Body Shape is NOT Octagon AND Jacket Colour is NOT Blue)

OR (Holding = Sword AND Jacket Colour = Green)

THEN Robot is in the Target Class

The same training/test set conditions were used in our study as was used in the original Thrun, (1991) study, ie, a training set of 123, 169, 122 examples respectively from the 432 possible input vectors, and the entire 432 input patterns as the test set.

### 10.5.1.1 Rules Extracted By RULEX

In solving the MONK1 problem with the CEBP network, 4 LRU's were required. As RULEX decompiles each LRU into a rule, 4 rules were extracted from the network solution. These rules were:

- |  |   |
|--|---|
| (i) IF Head Shape = Round<br>AND Body Shape = Round<br>THEN Robot is in Target Class       | (ii) IF Head Shape = Square<br>AND Body Shape = Square<br>THEN Robot is in Target Class |
| (iii) IF Head Shape = Octagon<br>AND Body Shape = Octagon<br>THEN Robot is in Target Class | (iv) IF Jacket Colour = Red<br>THEN Robot is in Target Class                            |

In solving the MONK2 problem, 15 LRU's were required giving rise to just 15 rules. Two examples of the rules extracted from the trained network are:

- |   |   |
|---|---|
| (i) IF Head Shape = NOT Round<br>AND Body Shape = Round<br>AND Is Smiling = Yes | (ii) IF Head Shape = Round<br>AND Body Shape = NOT Round<br>AND Is Smiling = No |
|---|---|

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umwelthanwendungen"

AND Holding = NOT Sword	AND Holding = NOT Sword
AND Jacket Colour = NOT Red	AND Jacket Colour = Red
AND Has Tie = No	AND Has Tie = No
THEN Robot is in Target Class	THEN Robot is in Target Class

Each extracted rule has exactly two attributes with their first value and the remaining attributes with NOT their first value. This is an equivalent representation to the original problem statement.

In solving the MONK3 problem, 2 LRU's were required resulting in exactly the two required rules. They were:

(i) IF Holding = Sword	(ii) IF Body Shape = NOT Octagon
AND Jacket Colour = Green	AND Jacket Colour = NOT Blue
THEN Robot is in Target Class	THEN Robot is in Target Class

### 10.5.1.2 Rules Extracted By RULENEG

RULENEG was applied to a standard multilayer perceptron trained using error backpropagation. The following 4 rules were derived for the MONK1 problem:

- (i) MONK :- head round , body round.
- (ii) MONK :- head square , body square.
- (iii) MONK :- head octagon , body octagon.
- (iv) MONK :- jacket red.

For the MONK2 problem RULENEG was applied to a standard backpropagation network with a single hidden unit. 15 rules of the type given below were extracted.

- (i) MONK :- head round, body round, is\_smiling no, NOT holding sword,  
NOT jacket red , has\_tie no.

For the MONK3 problem RULENEG was again applied to a standard backpropagation network with a single hidden unit. Two rules were extracted from the network, these being:

(i) IF NOT body_shape octagon	(ii) IF holding sword
AND NOT jacket_color blue	AND jacket_color green
THEN MONK	THEN MONK

### 10.5.1.3 Rules Extracted By DEDEC

DEDEC was applied to a Cascade Correlation network and uses the attribute-value labelling system described in table 1 below.

Assigned Label	Attribute	Value			
		1	2	3	4
a	head_shape	round	square	octagon	
b	body_shape	round	square	octagon	
c	is_smiling	yes	no		
d	holding	sword	balloon	flag	
e	jacket_colour	red	yellow	green	blue
f	has_tie	yes	no		

**Table 1: Attributes and Their Values for the 3 Monks Problems**

Using the notation of Table 1, the extracted rules from the MONK1 problem were:

- (i) *a1 b1 (head\_shape = round and body\_shape = round); or*
- (ii) *a2 b2 (head\_shape = square and body\_shape = square); or*
- (iii) *a3 b3 (head\_shape = octagon and body\_shape = octagon); or*
- (iv) *e1 (jacket\_colour = red).*

DEDEC extracted 142 rules from the MONK2 solution. Each rule was of the form 2 attributes having their first value and the remaining 4 attributes with a value other than the first. For example:

- (i) *a1b1c2d2e2f2 (head\_shape=round and body\_shape=round and is\_smiling=no and holding=balloon and jacket\_colour=yellow and has\_tie=no)*

DEDEC extracted 13 rules from the MONK3 solution. 5 of these were correct, 7 were correct but sub-optimal, and 1 was partially correct. These rules were:

*Correct*

- (i) *b1 e1 (body\_shape=round and jacket\_colour=red)*
- (ii) *b1 e2 (body\_shape=round and jacket\_colour=yellow)*
- (iii) *b1 e3 (body\_shape=round and jacket\_colour=green)*
- (iv) *b2 e1 (body\_shape=octagon and jacket\_colour=red)*
- (v) *b2 e2 (body\_shape=octagon and jacket\_colour=yellow)*

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umwelthanwendungen"

### *Correct But Sub-Optimal*

- (vi) *a3 b2 e3 (head\_shape=octagon and body\_shape=square and jacket\_colour=green)*
- (vii) *b2 c2 e3 (body\_shape=square and is\_smiling=no and jacket\_colour=green)*
- (viii) *b2 d1 e3 (body\_shape=square and holding=sword and jacket\_colour=green)*
- (ix) *b2 e3 f2 (body\_shape=square and jacket\_colour=green and has\_tie=no)*
- (x) *a1 b2 d3 e3 (head\_shape=round and body\_shape=square and holding=balloon and jacket\_colour=green)*
- (xi) *a3 c2 d1 e3 (head\_shape=octagon and is\_smiling=no and holding=sword jacket\_colour=green)*
- (xii) *a3 d1 e3 f2 (head\_shape=octagon and holding=sword and jacket\_colour=green and has\_tie=no)*

### *Partially Correct*

- (xiii) *a3 c1 d1 e1 f1 (head\_shape=octagon and is\_smiling=no and holding=sword and jacket\_colour=red and has\_tie=no)*

Each of the three rule extraction techniques discussed above arrived at an equivalent albeit less concise forms of the original rule statements. With regard to MONK1, to these author's knowledge, no connectionist rule extraction technique is capable of reducing rules (i) - (iii) to the IF Head Shape = Body Shape ... form. With regard to MONK2 and MONK3, 15 and 2 respectively is the minimum number of conjunctive rules required to express the target concepts. It should also be noted that the rules presented for the DEDEC algorithm are from an early prototypical implementation of the algorithm and therefore have not been refined. The rules are correct and post-processing can be applied to convert them to a more readable format.

### 10.5.2 A Real World Problem - Prediction of Dairy Cow Milk Production

A central issue facing dairy farmers is that of herd improvement, ie, trying to ensure that offspring animals are 'better' than their parents. Typically this is done through a program of selective breeding. However, as each cow in a herd has only a limited number of calvings in its lifetime it is important for the dairy farmer to make best use of each such calving in order to improve his overall herd quality, (where herd quality is measured according to some attribute, say, milk production). Thus it is important that the farmer's cows be mated with bulls that the farmer believes will produce a genetically 'better' daughter, ie, a daughter that is genetically predisposed to producing more milk than its mother.

A selective breeding program typically involves artificially inseminating a cow/s with semen from a bull chosen from among thousands of listed AI sires. The problem for the farmer is finding the best sire to mate with a given cow. The choice is generally made by examining statistics recorded for offspring produced from previous matings of the sire. The sheer volume of such data plus the fact that the recorded data gives no indication of how a given sire is likely to perform with a specific cow means that the selection of the prospective sire is still not an exact science.

A neural network can be constructed which aims at predicting the milk production of an offspring given information about the mother and the herd in which the mother lives. The network itself uses dam-daughter data from previous matings of one individual bull which has

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

been mated with many cows and had a large number of offspring, ie, the network represents a single sire.

In this application the data from one particular Australian sire is used. The mean milk production of daughters for this bull is 5096 litres/year, (SD 1061 litres). The total data set includes 10452 records with data from 648 herds. The largest herd includes 196 dam records, with an average of only 16 dam records per herd. Neural networks were trained with data from one single herd only. The particular set contained 136 sample values which were partitioned into a 'training' set of 131 values and a 'test/ validation' set of 5 values. Preliminary analysis of the data revealed a significant amount of 'noise' in the data.

The following describe the network inputs and outputs. Note that in some networks the data is represented as continuous valued, and for others as discrete valued.

<u>Inputs</u>	Dam Milk	litres/year (or as a Boolean variable - Low, Medium, High)
	Dam Fat	kg/year (or as a Boolean variable - Low, Medium, High)
	Dam Protein	kg/year (or as a Boolean variable - Low, Medium, High)
	Dam Age	In days
	Daught 1st Lactation	Boolean variable - 0 if $\leq 3$ years, 1 otherwise
	Same Year	Boolean variable - 1 if dam and daughter lactate in the same year, 0 otherwise
	Dam 1st Lactation	Boolean variable - 1 if dam's first recorded lactation and if the dam's age $\leq 3$ years, 0 otherwise
	Daughter Age	In days

Output Daughter Milk litres/year (or as a Boolean variable - Low, Medium, High)

### 10.5.2.1 Rules Extracted By RULEX

The CEBP network used required 14 LRU's to achieve a classification error rate of 3%. Some of the LRU's however classified only a single pattern. The rules derived from these LRU's have been omitted as they were deemed to be not general.

- (i) IF Dam Milk IS BETWEEN 4385 AND 5808 litres/yr (HIGH)  
AND Dam Protein IS BETWEEN 1764 AND 2220 kg/yr (HIGH)  
AND Dam Age IS BETWEEN 3577 AND 5069 days (OLD)  
AND Daught 1st Lactation IS  $\leq 3$  years  
THEN Milk Production is +/- 0.5 SD of the Herd Mean
- (ii) IF Dam Milk IS BETWEEN 2960 AND 3605 litres/yr (LOW)  
AND Dam Age IS BETWEEN 1326 AND 2858 (YOUNG)  
THEN Milk Production is +/- 0.5 SD of the Herd Mean
- (iii) IF Dam Milk IS BETWEEN 4772 AND 5033 litres/yr (HIGH)  
AND Dam Age IS BETWEEN 710 AND 1403 days (YOUNG)  
AND Daughter Age IS BETWEEN 700 AND 950 days (YOUNG)  
THEN Milk Production is +/- 0.5 SD of the Herd Mean

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltanwendungen"

- (iv) IF Dam Milk IS BETWEEN 5812 AND 6561 litres/yr (HIGH)  
AND Dam Fat IS BETWEEN 2391 AND 2723 kg/yr (HIGH)  
AND Dam Protein IS BETWEEN 1536 AND 2143 kg/yr (HIGH)  
AND Dam Age IS BETWEEN 710 AND 3843 days  
THEN Milk Production is +/- 0.5 SD of the Herd Mean
- (v) IF Dam Milk IS BETWEEN 4804 AND 5306 litres/yr (HIGH)  
AND Dam Fat IS BETWEEN 2297 AND 2414 kg/yr (HIGH)  
AND Dam Age IS BETWEEN 2582 AND 3135 days (OLD)  
THEN Milk Production is +/- 0.5 SD of the Herd Mean
- (vi) IF Dam Milk IS BETWEEN 4685 AND 5777 litres/yr (HIGH)  
AND Dam Fat IS BETWEEN 2062 AND 2507 kg/yr (HIGH)  
AND Dam Age IS BETWEEN 710 AND 2093 days (MED)  
AND Daughter Age IS BETWEEN 733 AND 821 days (YOUNG)  
THEN Milk Production is +/- 0.5 SD of the Herd Mean

### 10.5.2.2 Rules Extracted By RULENEG

- (i) IF Daughter Age  $\geq$  3 years  
THEN Milk Production is greater than the herd median.
- (ii) IF Daughter Age  $<$  3 years  
THEN Milk Production is less than the herd median.
- (iii) IF Dam Milk is NOT High  
AND Daughter Age  $\leq$  2 years  
THEN Milk Production is less than the herd median.
- (iv) IF Dam Fat is Low  
AND Daughter Age  $\leq$  2 years  
THEN Milk Production is less than the herd median

### 10.5.2.3 Rules Extracted By DEDEC

- (i) IF Daughter Age  $\geq$  3 years  
THEN Milk production is greater than the herd median.
- (ii) IF Dam Milk is High  
AND Dam Protein is High  
THEN Milk production is greater than the herd median.
- (iii) IF Dam Milk is Low  
AND Daughter Age  $\leq$  1 year  
THEN Milk production is less than the herd median.
- (iv) IF Dam Milk is Low  
AND Daughter Age = 2 years  
THEN Milk production is less than the herd median.

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

- (v) IF Dam Protein is Low  
AND Daughter Age  $\leq$  1 year  
THEN Milk production is less than the herd median.
- (vi) IF Dam Protein is Low  
AND Daughter Age = 2 years  
THEN Milk production is less than the herd median.

It is known that milk production of a dairy cow gradually increases with succeeding calvings/lactations and peaks after the 3rd or 4th lactation. Generally this corresponds to the dam's 2nd to 5th years of life. Thus these results seem to show that as well as the *good mother implies good daughter* type rules, the networks have, in some cases, recognised that a young dam with low production is capable of throwing a good daughter, or that a young daughter from a good dam is also likely to eventually show good milk production.

### 10.6 Conclusion and Open Research Problems

One of the most pressing problems in the field of rule-extraction is the formulation of a set of criteria for matching the set of techniques to the requirements of a given problem domain. For example at a practical level, what has not yet emerged is a means of determining which technique is optimum for real valued data as distinct from discrete data. Hence a pressing requirement is for a set of comparative benchmark results across a range of problem domains similar to that undertaken with the original *Three Monks* problem (Thrun *et al.*, 1991).

Issues relating to the complexity of the underlying rule extraction algorithms have also been the subject of discussion. The benefits of such discussion will be realised if as expected, they contribute to a situation in which some of the mistakes of early AI and ANN approaches are obviated. An additional facet of the discussion on algorithm complexity and another area for further investigation is a determination of whether the problem of finding a minimal rule-set which imitates a network with high fidelity is a hard (possibly NP-complete) problem.

In an increasing number of applications there are reports of situations in which the extracted rule-set has shown better generalisation performance than the trained Artificial Neural Network from which the rule-set was extracted (Towell and Shavlik, 1993). Similar observations have also been made in the area of extracting symbolic grammatical rules from recurrent Artificial Neural Networks (Giles *et al.*, 1992; Giles and Omlin, 1993). However Giles and Omlin also report that larger networks tend to show a poorer generalisation performance. While these results are significant, what is not clear at this stage is the extent to which this superior performance can be ascribed to the elimination of the remaining error over the output unit(s) after the Artificial Neural Network training has been completed (*ie. the rest error*). Hence an important research topic is to identify the set of conditions under which an extracted rule set shows better generalisation than the original network.

With the exception of the *RULEX* technique discussed above, the rule extraction techniques surveyed require some form of heuristics to constrain the size of the sample space to be searched. For example in the '*decompositional*' approaches, thresholds are used to filter those inputs which have no significant effect on the final decision produced by the ANN. At issue is a need for closer scrutiny of impact of such heuristics on the quality and efficacy of the rules produced.

This paper provides an overview of the most important features of the set of published techniques for extracting rules from trained Artificial Neural Networks. The *modus operandi*

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltanwendungen"

of three rule-extraction algorithms were discussed, and a new classification schema for rule-extraction methods was outlined.

As evidenced by the diversity of 'real-world' application problem domains in which rule extraction techniques have been applied, there appears to be a strong and continuing demand for the end-product of the rule extraction process *viz* a comprehensible explanation as to how and why the trained ANN arrived at a given result or conclusion. This demand falls broadly within two groups:

- (i) implemented ANN solutions where *ipso facto* the user is interested in identifying and possibly exploiting the potentially rich source of information which already exists within the trained ANN; and
- (ii) a so-called 'green-field' situation where a user has a data set from a problem domain and is interested in what relationships exist both within the data given and what general conclusions can be drawn.

The first group requires the development of rule extraction techniques which can be applied to existing ANNs and it would appear that the 'pedagogical' is well-placed to serve this set. Similarly it could be argued that the second group might well become the province of those rule extraction techniques which use specialised Artificial Neural Network training regimes, given the reported success of, for example, *KBANN/M-of-N*, *RULEX*, etc. However it is also clear that no single rule extraction/rule refinement technique or method is currently in a dominant position to the exclusion of all others.

### 10.7 References

Andrews R. & Geva S., 'Rule Extraction From a Constrained Error Back Propagation MLP' Proc. 5th Australian Conference on Neural Networks, Brisbane Queensland (1994) pp 9-12

Andrews R. & Geva S., 'Inserting and Extracting Knowledge From Constrained Error Back Propagation Networks' Proc. 6th Australian Conference on Neural Networks Sydney NSW (1995) In Print

Andrews R. Diederich J. & Tickle A.B., 'A Survey and Critique of Techniques For Extracting Rules From Trained Artificial Neural Networks', Knowledge Based Systems, Fu L.M. (Ed), In print.

Craven M.W. & Shavlik J.W., 'Using Sampling and Queries to Extract Rules From Trained Neural Networks' Machine Learning: Proceedings of the Eleventh International Conference (San Francisco CA) (1994)

Davis R., Buchanan B.G. & Shortcliff E., 'Production Rules as a Representation for a Knowledge Based Consultation Program', Artificial Intelligence Vol 8 No 1, 1977, pp15-45.

Fahlman S. & Lebiere C., 'The Cascade-Correlation Learning Architecture' in Lippman R, Moody J and Touretzky D (Eds) Advances in Neural Information Processing Systems Vol 3 San Mateo, 1991, pp 190-196

Fu L.M., 'Rule Learning by Searching on Adapted Nets' Proceedings of the Ninth National Conference on Artificial Intelligence, Anaheim CA, 1991, pp 590-595.

Gallant S., 'Connectionist Expert Systems', Communications of the ACM Vol 31 No 2 Feb 1988, pp 152-169

Garson D.G., 'Interpreting Neural-Network Connection Weights' AI Expert, April 1991, pp 47-51

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

Geva S. & Sitte J., 'A Constructive Method for Multivariate Function Approximation by Multilayer Perceptrons', IEEE Transactions on Neural Networks, May 1992.

Giles C.L. Miller C.B. Chen D. Chen H. Sun G.Z. & Lee Y.C. 'Learning and extracting finite state automata with second-order recurrent neural networks' Neural Computation Vol 4 (1992) pp 393-405

Giles C.L. & Omlin C.W. 'Extraction, insertion, and refinement of symbolic rules in dynamically driven recurrent networks' Connection Science Vol 5 Nos 3 and 4 (1993) pp 307-328

Mozer M.C. McMillan C. & Smolensky P., 'The Connectionist Scientist Game: Rule Extraction and Refinement in a Neural Network', Proc of the 13th Annual Conference of the Cognitive Science Society, Hillsdale NJ, 1991.

Pop E., 'RULENEG: Extracting Rules From a Trained Artificial Neural Network By Step-Wise Negation', Semester project, Qld University of Technology, 1994.

Saito K. & Nakano R., 'Medical Diagnostic Expert System Based on PDP Model' Proc. of IEEE International Conference on Neural Networks (San Diego CA) Vol 1, 1988, pp 255-262

Sestito S. & Dillon T., 'Automated Knowledge Acquisition of Rules With Continuously Valued Attributes' Proc. 12th International Conference on Expert Systems and their Applications (AVIGNON'92) (Avignon France) (May 1992) pp 645-656.

Sestito S. & Dillon T., 'Automated Knowledge Acquisition' Prentice Hall, Australia, 1994

Thrun S. et al., 'The MONK's Problems: a Performance Comparison of Different Learning Algorithms', Carnegie Mellon University CMU-CS-91-197, December 1991

Thrun S., 'Extracting Provably Correct Rules From Artificial Neural Networks', Technical Report IAI-TR-93-5, Institut für Informatik III Universität Bonn, 1994.

Tickle A.B. Orłowski M. & Diederich J., 'DEDEC - Decision Detection By Rule Extraction From Neural Networks', QUT NRC, September 1994.

Towell G & Shavlik J, 'The Extraction of Refined Rules From Knowledge Based Neural Networks', Machine Learning Vol 131, 1993, pp71-101.

Tresp V. Hollatz J. & Ahmad S., 'Network Structuring and Training Using Rule-Based Knowledge', Advances in Neural Information Processing Vol 5, 1993, pp 871-878

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

# Abschlußdiskussion

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

## 11 Abschlußdiskussion

### 11.1 Kernaussagen der Vorträge

**Wolfgang Ferse** plädiert in seinem Vortrag für Entscheidungsunterstützungssysteme auch für öffentliche Institutionen. Diese sind dann in den innerbetrieblichen Workflow zu integrieren. Einfache regelbasierte Systeme haben den Nachteil, zeitliche Abläufe, die mit den entsprechenden Aufgaben einhergehen nicht genügend berücksichtigen zu können.

Er spricht auch die Notwendigkeit der einfachen und sicheren Versionsverwaltung beim Austausch von Wissensbasen an. Weiterhin die Client/Server-Architektur, die für eine sinnvolle Integration in die betrieblichen Strukturen unabdingbar notwendig ist. In seinem Resümee befindet er das Expertensystem XUMA als ein akademisch gelungenes Werkzeug, das den Praxistest jedoch nicht bestanden hat.

In Bezug auf das Einsatzziel BEHÖRDE ist die Mehrarbeit bei der Akquisition von Wissen für die Wissensbasen negativ hervorzuheben. Aus seiner Sicht ist in XUMA die Wissenserwerbskomponente eine eigene Programmiersprache, was seiner Forderung nach Einfachheit der Wissensakquisition entgegensteht. Andererseits die Komplexität des gesamten Systems, die nicht an jedem Arbeitsplatz überschaut werden konnte.

Hard- und Softwareanforderungen waren besonderes zu Beginn des Projektes nicht praxistauglich.

FRAGE: Integration verschiedener Bewertungsmethoden?

FRAGE: Bewertungsproblematik, wie kommt man zu einem einheitlichen Bewertungsmodell?

**Heiner Stuckenschmidt** stellte ein prototypisches Expertensystem vor, das innerhalb eines studentischen Projektes an der Uni Bremen entstanden ist. Die Herangehensweise bei der Entwicklung ist wie so oft 'vom System herkommend' und nicht nur 'problemorientiert'. Ein konkretes Anwendungsbeispiel gibt es zur Zeit noch nicht. Es soll in dem Projekt gezeigt werden, daß bestimmte Methoden der KI für das gedachte Problem der Vorschlagsgenerierung zur Behebung ökologischer Schwachstellen geeignet sind.

Problem der Wissensakquisition: Wo bekommt man das Wissen zu den unendlich vielen verfahrenstechnischen Methoden her?

**Uli Heller** arbeitet an einer ökologischen Problemstellung in Brasilien. Seine Experten vor Ort arbeiten normalerweise theoriebasiert, nicht datengetrieben. Es existieren Modelle z.B. über Mangrovenvegetation.

Die verschiedenen Modelle sollen nun in eine Wissensbasis integriert werden. Die Experten befürworten eine solche Modellierung. Daraus sollen Situationsbeschreibungen, Diagnosen und Therapieplanungen gewonnen werden.

Er trennt dabei statische und dynamische Modelle. Um seine Modelle schrittweise zu verbessern und an neue Gegebenheiten anzupassen, hat er in sein System einen Modell/Revisionszyklus eingebaut, den er zur Diskrepanzanalyse zwischen Modell und Wirklichkeit benutzt.

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltanwendungen"

Heller betont seine Thesen aus dem Eingangsstatement:

- Qualitative Modellierung dort, wo es abgesicherte Theorien gibt. Für QM gibt es formale Methoden um auf ihnen zu arbeiten.
- Kompositionale, konzeptuelle Modellierung, denn kein einzelnes Systemmodell kann für alle Aufgaben und Anforderungen geeignet sein.
- Multiple Modellierung, denn kein einzelnes Systemmodell kann für alle Aufgaben und Anforderungen geeignet sein.
- Konzeptuelle Modelle bieten weitere Vorteile:
  - Erklärungen der Schlußfolgerungen
  - Darstellung der Annahmen
  - Modell-Revision

Frage: Wie kann man die Schlußfolgerungen absichern (Stabilität, Qualität)?

Frage: Wie kommt man zu den geeigneten und verifizierbaren Modellen?

Heller provoziert hier bewußt die 'verhaltensorientierten Ansätze': Denn diese haben Probleme der Nachvollziehbarkeit, Überprüfbarkeit? Verbindung zu explizit vorhandenem Expertenwissen / Grenzen der Datengrundlage: Nicht jeder Fall ist in der Datenbasis abgebildet/in den Verhaltensdaten enthalten.

**Matthew Corley** ist Ingenieur und verfolgt einen objektorientierten Ansatz zur Modellierung seines Fachwissens in Zusammenhang mit einem Backward-Chaining Mechanismus zur Verkettung von Regeln. In einer Hierarchischen Objekt/Klassen-Darstellung beschreibt er Stoffe und Verfahren mit seinen Eigenschaften. Sein System arbeitet dann ausgehend von einer Analyse über eine Synthese bis hin zu einer Optimierung von komplexen Lackierprozessen. Basis seiner Implementierung ist die Shell KAPPA. Sein Plädoyer (für die Informatiker) zielt in Richtung einer besseren Nutzbarkeit der zu erstellenden Systeme, damit diese besser für Ingenieure geeignet sind und von diesen möglichst einfach eingesetzt werden können.

Die Verwendung einer Shell ermöglichte ihm dabei eine schnelle Realisierung eines Prototypen. Im weiteren Verlauf schränkte die Shell ihn dann aber auch in seiner Flexibilität ein (räumliche Restriktionen waren nicht abbildbar).

Er befürwortet einen Prozeß der schrittweisen Verfeinerung von Wissensbasen, die ausgehend von einer Rohfassung eine ständige Revision der Konzepte ermöglichen.

**Matthias Kirsten** nutzt als Ausgangspunkt für die Arbeiten waren ökologische und geobotanische Fragestellungen. Es lag Wissen in (graphischer) Form von SAB-Diagrammen und Öko-Diagrammen vor (sog. Vegetationsaufnahmen). Ziel ist es, eine SAB-Beschreibungssprache zu entwickeln und mit Hilfe von DataMining Wissen darüber zu erzeugen. Dieses Wissen soll nicht nur im System selbst, sondern auch den Fachexperten zugänglich gemacht werden.

# 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umwelthanwendungen"

Kritikpunkte für diesen Ansatz :

Um Wissen zu erzeugen bedarf es einer Reihe von Beispieldaten.  
Wo kommen die her?

Es ist nicht ganz klar wohin die Reise geht. Was genau lernt das System?  
Was ist der Output?

Generell fällt dieser Ansatz unter automatische Wissensgenerierung aus Daten.  
Die Frage ist, wo hier das Potential im Rahmen von Umwelthanwendungen liegt.

**Andreas Fick** bewertet die automatische Regel-/Wissensgenerierung /WA Problematik:

Die Probleme bei der Akquisition liegen häufig im Wissen selbst begründet.  
Bei Handlungswissen besteht ein Verbalisierungsproblem, unvollständiges, fehlerhaftes, unsicheres, widersprüchliches Wissen und Motivationsproblematik bei Experten.

Frage: Benutzen wir in den verschiedenen Phasen der Akquisition immer die richtigen Methoden/Techniken?

Frage: Ist es der richtige Weg, bei der automatischen Akquisition vollständig auf die explizite Wissensakquisition beim Experten zu verzichten?

Frage: Welches Hintergrundwissen wird bei dieser Anwendung genutzt, wie fließt es in das Verfahren ein?

Vereinfachung, wenn die Wertemengen diskret statt kontinuierlich sind.

## 11.2 Diskussionspunkte

### 11.2.1 Bereich I

Wissensakquisition

- Wissensbeschaffung
- Jede Problemklasse (Modellbasiert/Datenbasiert) benötigt bestimmte spezifische Wissenserhebungstechniken, es bleibt die Frage, welche wo adäquat sind. Dies kann ein Arbeitsfeld sein!
- Es scheint nicht überall bekannt zu sein, welche WA-Techniken zur Verfügung stehen. Tun wir im Elicitation Prozeß immer das richtige? Es mag manchem der Karbach/Linster empfohlen werden.
- Aufwand für Wissensakquisition in verschiedenen Szenarien höchst unterschiedlich
- automatische Wissenserhebung/Regelgenerierung ist nicht nur für Systeme, sondern auch für den menschlichen Nutzer explizit von Nutzen. Die große Frage bei der automatischen WA ist die Verfügbarkeit entsprechender Daten. Für die Extraktion von Daten aus Zeitreihen gibt es noch keine adäquaten Verfahren.
- Es ist eine Vereinfachung des WA Schrittes erforderlich

### 11.2.2 Bereich II

Überführung von Prototypen in praktische Anwendungen

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

- Anwendbarkeit/Benutzbarkeit der Systeme durch Sachbearbeiter gewährleisten
- Vereinfachung von Benutzbarkeit und Wartbarkeit
- Keine Systemmonolithen, die aus einer System- statt aus einer Problemsicht entstanden sind.
- Einbindung der Systeme in IT Umgebungen (WFMS, C/S-Architektur, Austausch von Wissensbasen)

### 11.2.3 Bereich III

#### Dynamik in Wissensbasen

- Ständiger Update- und Verbesserungsprozeß
- Neues Wissen in eine Wissensbasis, dann Verwaltung der verschiedenen Stati
- Prozeß der kontinuierlichen Verbesserung von Wissensbasen
- Diskrepanzanalyse

### 11.2.4 Bereich IV

- Kombination von Methoden
- Methodenverifikation

### 11.2.5 Bereich V

#### Bewertungsproblematik

- Welches Bewertungsmodell für welche Aufgaben
- Freiheitsgrade für Bewertungsmethoden, benutzerspezifische Modelle
- Verschiedene Bewertungsmethoden zulassen

### 11.2.6 Sonstiges

- Multiple qualitative Modelle
- Wartbarkeit der Wissensbasen vereinfachen
- Vom Problem zum System statt vom System zum Problem
- Problematik der Integration von unsicherem Wissen in die Systeme (Heller, Kirsten, Corley)
- Integration verschiedener Aufgaben in einer Wissensbasis
- Datenbasiert - Modellbasiert im Spannungsfeld

## 1. Wissensakquisition (Wissenselicitation)

- WA-Techniken - psychologisches Herangehen
- Aufwand/Systemschnittstellen
- Machine Learning vs Expertenwissen (von der Problemklasse zum Systemkonzept)
- theorie-/modellbasiert vs. Datenbasiert (von der Problemklasse zum Systemkonzept)

# 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

## 2. Systementwicklung

- IT-Integration (auch von System zu Komponente)
- Vom Prototyp zu Endsystem
- Bedarfsanalyse vor Systemkonzept
- vom Problem zum System !
- Prototypen nur für Informatiker, Endsysteme für Anwender

## 3. Wartung und Weiterentwicklung der Wissensbasen

- Dynamik in Wissensbasen (Vergleich der Ergebnisse, Versionsverwaltung)
- kontinuierliche Verbesserung / Diskrepanzanalyse
- Ergonomische Anforderungen

## 4. Bewertungverfahren

- Ableiten von Fallbeispielen
- Unschärfe
- Theorie die den Methoden zugrunde liegen

Zu 1:

a.)

Strukturlegetechniken besser als Interviewtechniken

besser Computerkonferenz als Face-to-Face Expertenrunde, weil soziale Reibungspunkte ausgeschaltet werden.

Dies gilt jedoch nur für bestimmte Statusgruppen und Szenarien (PC- Erfahrung)

b.)

Machine Learning vs Expertenwissen

Entscheidungskriterien ob modell- oder datenbaiserte Herangehensweise

qualitative Beziehungen zwischen Merkmalen zur Vorstrukturierung und Ansatz zur Extraktion der Beziehungen

Entscheidungen vorstrukturieren

Zu 2:

IT-Integration:

Aufwendig sind Analysen nach der KADS-Methode. Trotzdem kann sich der Aufwand lohnen, da die Reparatur von Fehlern in späten Phasen eines Projektes 10-100fach teurer ist als in der Analyse- oder spezifikationsphase. Entwickelt man Systeme nach der KADS - Methode kann man sicher(er) sein, daß man keinen Aspekt vergißt.

Vom Prototyp zum Endsystem

Projektbezogene Softwareentwicklung anstatt einer Software von der Stange

Ansatz: Erst ein prototypisches System erstellen, das die Machbarkeit des Konzeptes zeigt. Erst danach die Umsetzung in ein professionelles System, ohne den Prototypen wegzuerwerfen.

Dies redet einem Ansatz das Wort, der eine ausführbare, formale Spezifikation vom Abstrakten zum Konkreten enthält.

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

Bei Wegwerfprototypen sind Aufwände für Reimplementierungen zu überdenken. Die Verwendung von KADS scheint zwar zunächst hilfreich, erschlägt das Problem aber mit einem zu mächtigen Werkzeug, das kaum händelbar erscheint.

Formale Verfahren die eine ausführbare Spezifikation auf der Grundlage einer sauberen Analyse ermöglichen Auf der Grundlage dieser formalen Verfahren wird das fertige System erstellt Nutzerschnittstellen müssen in diesem Umfeld ebenfalls formal spezifizierbar sein.

Dieses Werkzeug darf jedoch kein generelles Werkzeug im Sinne von BABYLON sein.

→ Dedizierte Werkzeuge zur Entwicklung.

I. Analyse

II. Prototyp aus formaler Spezifikation und Oberfläche

III. Machbarkeit

IV. professionelles system

Zu 3

Wartung/Weiterentwicklung

b.) Diskrepanzanalysen

Anmerkung:

An vielen Stellen hängt es an der Zeit, daß Systementwicklung nicht ausführlich und gewissenhaft betrieben wird. Dies führt doch zu der Aussage, daß es Verfahren geben muss, die robust sind gegen zeitkritische Aspekte und schon nach kurzer Zeit Ergebnisse liefern. Methodenauswahl muss auch hier zeit-unkritisch sein.

Experten sagen zwar 'Dies ist von einem System nicht leistbar - die KI bietet jedoch eine Vielzahl an Methoden, hier doch etwas zu tun, was über die Vorstellungskraft der Experten hinausgeht. Die Lösung ist also, nicht mit den Experten zu sprechen und das Wissen anderweitig zu besorgen oder aber das mühselige Geschäft mit den Experten zu wagen.

# **Teilnehmer und Referenten des Workshops**

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltsanwendungen"

## 12 Teilnehmer und Referenten des Workshops

Andreas Fick

Forschungszentrum Karlsruhe

Arne Koschel

FZI Karlsruhe

Bernd Stiefel

FH Schmalkalden

K. Christoph Ranze

Uni Bremen

Dietmar Fleischhauer

GMD FIT.KI

Heiner Stuckenschmidt

Student, Bremen

Helge Stieghahn

Student, Bremen

Hubert Keller

Forschungszentrum Karlsruhe

Ingo Timm

Student aus Bremen

Jun Zhao

Uni Bremen

Manfred Domke

GMD FIT.KI

Matthew Corley

Fraunhofer ISI

Matthias Kirsten

GMD FIT.KI

Reinhard Hübler

Professor an der Bauhaus Uni Weimar

Simone Schramme

Psychologin aus Darmstadt

Susanne Meyfahrt

Uni Kaiserslautern

## 1. Workshop "Wissensbasierte Systeme in Umweltanwendungen"

Thomas Reitz

TU Dresden

Ulrich Heller

TU München

Wolfgang Ferse

Forschungszentrum Rossendorf