

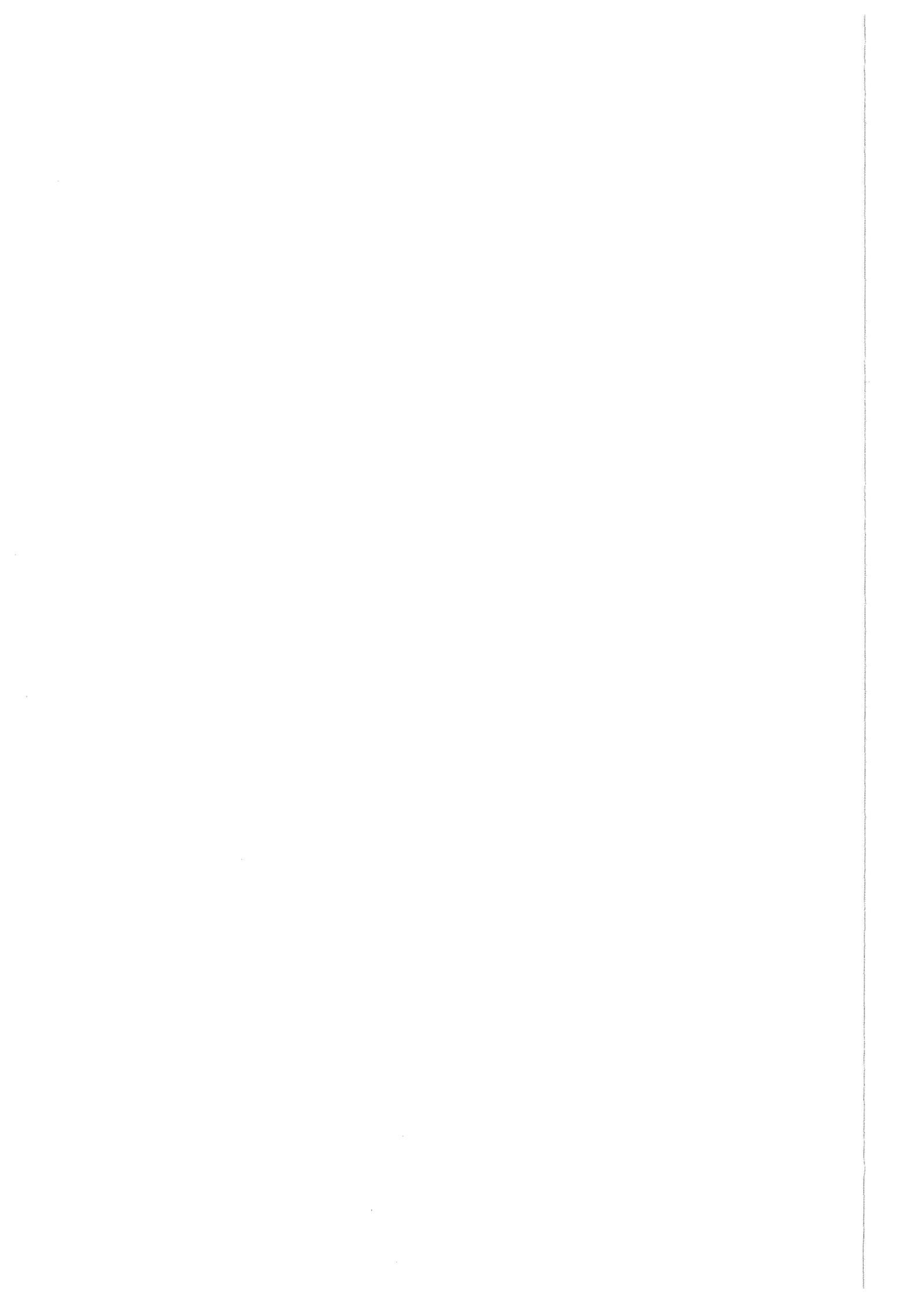
Forschungszentrum Karlsruhe
Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 6252

Workshop
Wissensbasierte/Intelligente
Systeme in Umweltanwendungen

A. Fick, H. B. Keller, (Hrsg.)
Institut für Angewandte Informatik

März 1999



Forschungszentrum Karlsruhe

Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 6252

Workshop

**Wissensbasierte / Intelligente Systeme
in Umweltsanwendungen**

im Rahmen des

12. Symposiums Informatik für den Umweltschutz (UI'98)

Andreas Fick,

Hubert B. Keller (Hrsg.)

Institut für Angewandte Informatik

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

1999

Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft
Deutscher Forschungszentren (HGF)

ISSN 0947-8620

Zusammenfassung:

Dieser Bericht stellt die Zusammenfassung der Beiträge dar, welche auf dem Workshop „Workshop Wissensbasierte / Intelligente Systeme in Umwelthanwendungen“ im Rahmen des 12. Symposiums Informatik für den Umweltschutz (UI'98) in Bremen, gehalten wurden.

Knowledge based / Intelligent Systems in Environmental Applications

Abstract:

This report comprises the papers of the workshop Knowledge based / Intelligent Systems in Environmental Applications, which took place at the 12th symposium Computer Science in Environmental Protection (UI'98), Bremen.

Vorwort

Der vorliegende Bericht enthält die Beiträge des Workshops „Wissensbasierte / Intelligente Systeme in Umwelthanwendungen“, der am 16. September 1998 im Rahmen des 12. Internationalen Symposiums Informatik für den Umweltschutz (UI '98, 16.09-18.09.98) in Bremen stattfand.

Ziel des Workshops war es, den Erfahrungsaustausch über die Entwicklung und Anwendung von Wissensbasierten und Intelligenten Systemen in den Bereichen Umweltschutz, Umweltforschung und Umweltplanung zu intensivieren. Dabei knüpfte er an ähnliche Workshops im Rahmen von XPS '93 und '97 sowie UI '94 bis '96 an.

Da im Rahmen der Erforschung und Entwicklung neuer Systeme oft der Aspekt der Anwendung in den Hintergrund tritt, bildete neben den Fachbeiträgen (Kapitel 2 bis 7) das Thema „Akzeptanz von Wissensbasierten Systemen in Umwelthanwendungen“ einen Schwerpunkt des Workshops.

Neben einem einführenden Vortrag zu psychologischen Aspekten bei der Einführung neuer Systeme (Kapitel 1) und der Diskussion der vorgestellten Systeme unter dem Aspekt „Akzeptanz“ ist dabei vor allem der mit viel Engagement betriebene Arbeits- und Diskussionsteil des Workshops hervorzuheben, dessen Ergebnisse Kapitel 8 kurz zusammenfaßt.

An dieser Stelle sei auch den Organisatoren der KI/UI 98 für die hervorragende Unterstützung bei der Veranstaltung des Workshops gedankt.

Andreas Fick, Hubert B. Keller und Simone Schramme (Veranstalter)

Inhalt

1 PSYCHOLOGISCHE ASPEKTE DES UNTERSTÜTZUNGSBEDARFS VON KONSTRUKTEUREN BEI DER ENTWICKLUNG UMWELTGERECHTER PRODUKTE.....	9
1.1 Rechnergestützte Konstruktionsumgebung	9
1.2 Arbeits- und organisationspsychologische Aspekte der umweltgerechten Produktentwicklung ...	10
1.3 Rechnerunterstützte Produktentwicklung	10
1.4 Wissensgewinnung.....	12
1.5 Literatur	14
2 HEXPROSA- EIN HYBRIDES EXPERTENSYSTEM ZUR PROZESSKONTROLLE UND STÖRFALLANALYSE VON ABWASSERBEHANDLUNGSANLAGEN- ERFAHRUNGEN BEI DER EVALUIERUNG EINES PROTOTYPS	15
2.1 Aufgabenstellung	15
2.2 Lösungsansätze	16
2.3 Ergebnisse	18
2.4 Ausblick.....	21
2.5 Literatur	21
3 WISSENSBASIERTE EXTRAKTION VON OBJEKTEN AUS TOPOGRAPHISCHEN KARTEN UNTER VERWENDUNG VON ATKIS-DATEN... 	23
3.1 Einleitung	23
3.2 Architektur des wissensbasierten Interpretationssystems	24
3.3 Vorverarbeitung und Verwaltung der Daten.....	24
3.4 Wissensrepräsentation	25
3.5 Ablauf der Interpretation	27
3.6 Schluß	30
3.7 Danksagung.....	30
3.8 Literatur	30
4 COMPUTERGESTÜTZTE KLASSIFIKATION VON WILDBIENEN MIT METHODEN DER BILDANALYSE	31
4.1 Einleitung	31

1. Workshop „Wissensbasierte / Intelligente Systeme in Umwelthanwendungen“ UI '98

4.2	Hierarchische Klassifikation der Bienen	32
4.3	Aktuelle Arbeiten und Ergebnisse	34
4.4	Zusammenfassung und Ausblick.....	37
4.5	Literatur	37
5	EFFIZIENTE INTERPRETATION MULTIPLER MESSDATEN MITTELS ENTSCHEIDUNGSBAUMINDUKTION	39
5.1	Einleitung und Motivation.....	39
5.2	Grundprinzip	40
5.3	Entscheidungsbauminduktion mit Attributen kontinuierlicher Funktionen	42
5.4	Intervallbasierte Entropie-Minimalisierungs-Heuristik	42
5.5	Diskussion und Ausblick.....	46
5.6	Literatur	47
6	ÜBER DEN OPTIMALEN ZUKUNFTSVERTRÄGLICHEN ENERGIEMIX	49
7	EINSATZ VON COMPUTATIONAL INTELLIGENCE METHODEN IN DER THERMISCHEN ABFALLBEHANDLUNG	63
7.1	Einleitung	63
7.2	Fuzzy Control zur Ausbrandsteuerung	65
7.3	Neuronale Netze zur Modellierung und Simulation.....	66
7.4	Schluß	69
7.5	Literatur	69
8	AKZEPTANZPROBLEME BEI DER EINFÜHRUNG VON WISSENSBASIERTEN SYSTEMEN ZUR UNTERSTÜTZUNG DER UMWELTGERECHTEN PRODUKTENTWICKLUNG	71
8.1	Einleitung	71
8.2	Methode und Untersuchungsaufbau.....	72
8.3	Ergebnisse	73
8.4	Diskussion.....	75
8.5	Literatur	75

1 Psychologische Aspekte des Unterstützungsbedarfs von Konstrukteuren bei der Entwicklung umweltgerechter Produkte

Dipl.-Psych. S. Schramme, Prof. B. Rüttinger
Sonderforschungsbereich 392 „Die Entwicklung umweltgerechter Produkte“

Wie erste Untersuchungen zum Status Quo des betrieblichen Umweltschutzes belegen berücksichtigt die derzeitige Konstruktionspraxis lediglich Teilaspekte einer umweltgerechten Produktentwicklung, da sie nur in geringem Ausmaß über Methoden, Arbeitsmittel und Instrumente für eine ganzheitliche, umweltorientierte Konstruktion verfügt. Deswegen ist das Erarbeiten von Methoden, Arbeitsmitteln und Instrumenten für das ganzheitliche Entwickeln umweltgerechter Produkte, ihre Integration in die derzeitige Konstruktionsmethodik und das Realisieren einer rechnerunterstützten Konstruktionsumgebung (siehe Abbildung 1) vorrangiges Ziel des interdisziplinären Sonderforschungsbereichs „Die Entwicklung umweltgerechter Produkte“ an der TU Darmstadt, an dem acht Institute mitwirken.

1.1 Rechnergestützte Konstruktionsumgebung

Die rechnergestützte Konstruktionsumgebung soll den/die Konstrukteur/in effektiv und effizient bei umweltgerechten, ganzheitlichen Konstruktionstätigkeiten unterstützen.

Ergebnis: Konstruktionsumgebung

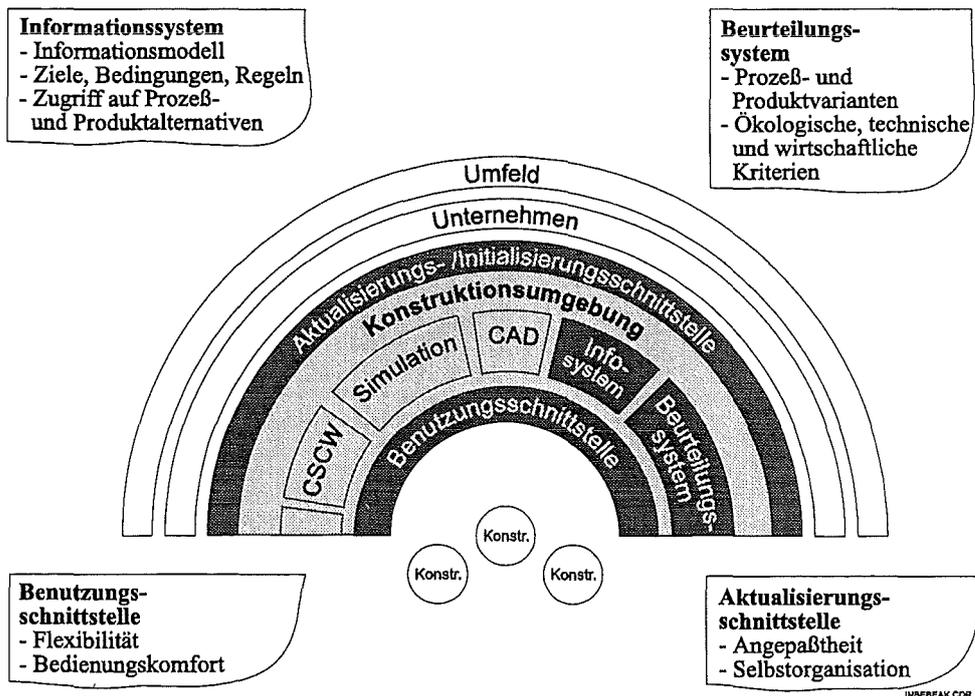


Abbildung 1: Konstruktionsumgebung und Instrumente

Die Konstruktionsumgebung basiert auf einer offenen Integrationsplattform, die ein flexibles Zusammenwirken der in diesem Forschungsvorhaben neu entwickelten Instrumente der Konstruktionsumgebung ermöglicht und die Einbindung fremdbezogener Instrumente erlaubt.

Neu zu entwickelnde Instrumente der Konstruktionsumgebung sind ein Informationssystem für konstruktionsrelevantes Umweltwissen, ein Beurteilungssystem für Produkte und Prozes-

se, eine einheitliche Benutzungsschnittstelle und eine Aktualisierungsschnittstelle. Die Konstruktionsumgebung soll in Beispielsunternehmen implementiert und evaluiert werden.

1.2 *Arbeits- und organisationspsychologische Aspekte der umweltgerechten Produktentwicklung*

Arbeits- und organisationspsychologische Fragestellungen bei der Gestaltung einer Konstruktionsumgebung für die umweltgerechte Produktentwicklung, die Erkenntnisse über Art der Unterstützung des Konstrukteurs geben können, ergeben sich aus:

- der Vielfalt und Vagheit von Daten, die bei einer umweltgerechten Produktentwicklung berücksichtigt werden müssen,
- und die nur durch Rechnerunterstützung zu bewältigen und zu verarbeiten sind,
- und schließlich aus dem Zwang zu ständiger Zusammenarbeit mit vor- und nachgelagerten Abteilungen.

Die zur Ermittlung des Unterstützungsbedarfs gebildeten Arbeitsbereiche sind: Status quo des betrieblichen Umweltschutzes, Wissensgewinnung, rechnerunterstützte Produktentwicklung und Datenanalyse (Abbildung 2). Sie können nach obigen Ausführungen unter dem Aspekt Verbesserung des Umgangs mit komplexem Umweltwissen betrachtet werden.

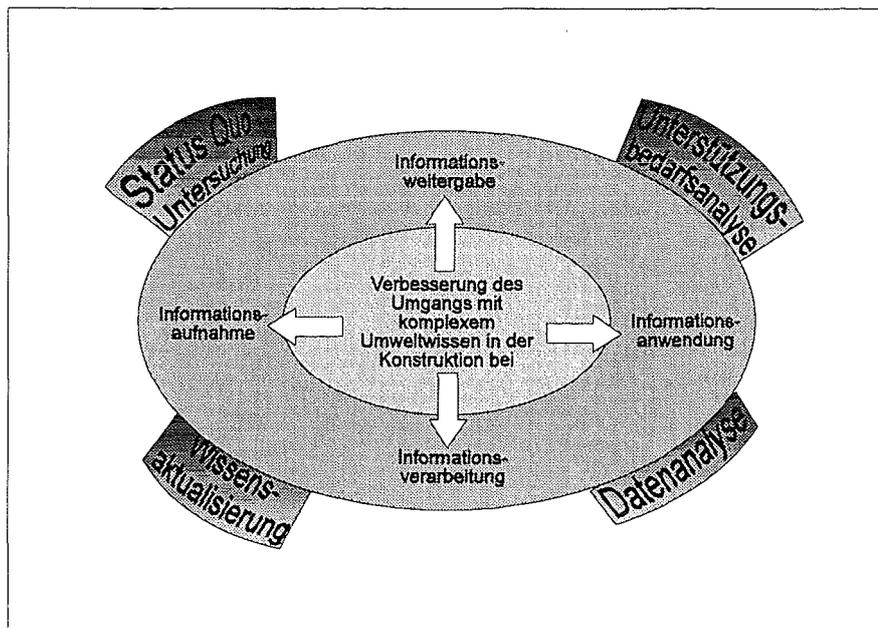


Abbildung 2: Arbeits- und organisationspsychologische Fragestellungen

Die ersten Forschungsergebnisse der Projekte rechnerunterstützte Produktentwicklung und Wissensgewinnung sollen im folgenden kurz dargestellt werden.

1.3 *Rechnerunterstützte Produktentwicklung*

Da noch keine wissensbasierten Systeme zur Unterstützung der ganzheitlichen umweltgerechten Produktentwicklung und Konstruktion vorliegen, wurde zur prospektiven Untersuchung der Auswirkungen von wissensbasierten Systemen auf die Konstruktionstätigkeit das Szenario eines solchen Systems für ein ausgewähltes Alltagsprodukt ausgearbeitet. Das Szenario, das in schriftlicher Form vorliegt, wurde nach den Phasen des Methodischen Konstruierens entwickelt. Es besteht aus zwei Komponenten: Einer „interaktiven“ Oberfläche und einer

Analyse-Komponente. Die „interaktive“ Oberfläche unterstützt den Konstrukteur beim Methodischen Konstruieren, indem sie für die jeweilige Konstruktionsphase ein entsprechendes Oberflächenmodul zur Verfügung stellt. Die Module betreffen das Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung (Anforderungsliste), das Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen (Funktionsstruktur), das Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen (Prinzipielle Lösungsstruktur), das Gliedern in realisierbare Module (Modulare Struktur), das Gestalten der maßgebenden Module (Vorentwürfe) sowie das Gestalten des gesamten Produkts (Gesamtentwurf). Durch die Analyse-Komponente wird eine Bewertung der Konstruktionsvorschläge nach Umweltkriterien ermöglicht. Die notwendigen Informationen über das zu konstruierende Gerät werden von Anfang an über die interaktive Oberfläche gesammelt und zu einem Produktmodell zusammengesetzt.

In einer Simulationsstudie mit Konstruktionsingenieuren wurde mit Hilfe des Szenarios die Akzeptanz einer umweltgerechten und rechnergestützten Konstruktionsumgebung untersucht. Im Rahmen der Theorie der geplanten Handlung (Ajzen, 1991 [1]) wurde die Akzeptanz als Einstellung definiert, die sich vor allem aus den handlungsbezogenen Überzeugungen und den Bewertungen dieser Überzeugungen ergibt, d.h. insbesondere aus den Vorteilen bzw. Nachteilen, welche nach der Einführung einer umweltgerechten und rechnergestützten Produktentwicklung für die Konstruktionstätigkeit erhofft bzw. befürchtet werden.

Als wesentliches Ergebnis läßt sich zunächst festhalten, daß die Ingenieure die umweltgerechte Konstruktion, das Vorgehen nach den Phasen des Methodischen Konstruierens und die Unterstützung durch wissensbasierte Systeme allgemein positiv einschätzen. Durch den Einsatz von wissensbasierten Systemen erhoffen sie sich eine bessere Strukturierung und Dokumentation der einzelnen Arbeitsprozesse und eine stärkere Standardisierung der Routineaufgaben. Dadurch wird der Informations- und Ergebnisaustausch im Konstruktionsteam und die wechselseitige Aufgabenübernahme erleichtert. Allerdings sollten durch das System nur die Routinetätigkeiten unterstützt werden, Zwischenschritte gespeichert werden können und insbesondere die Informationsbeschaffung erleichtert werden.

Die beschriebene Befragung gibt allerdings keinen Aufschluß über die konkreten Auswirkungen des rechnergestützten Arbeitens auf die umweltgerechte Konstruktionstätigkeit. Erkenntnisse darüber, welche dann auch Hinweise für die Gestaltung der Konstruktionsumgebung geben, können nur durch experimentelle Untersuchungen mit Prototypen wissensbasierter Systeme in Umwelthanwendungen gewonnen werden.

Ein Experiment mit dem Prototypen eines wissensbasierten Systems wird im folgenden dargestellt. Bei dem Experiment wurde eine neue Methode zur Erfassung von kognitiven Prozessen beim Konstruieren eingesetzt. Dieses Verfahren richtet sich auf die Gruppenproblemlöseprozesse. Da bei der Gruppenarbeit über das gemeinsame Vorgehen kommuniziert wird, erlauben die verbalisierten Kommunikationen eine direkte Beobachtung der kognitiven Prozesse. Aufgrund der Dialoge können die Prozesse der Aufmerksamkeitssteuerung, der Problemlösung und der Gruppenstrukturierung unmittelbar erfaßt werden. Die Brauchbarkeit dieser Methode erwies sich der Methode des Lauten Denkens, die üblicherweise eingesetzt wird, deutlich überlegen.

Versuchsteilnehmer des Experimentes waren 24 Maschinenbaustudenten im Hauptstudium, die durch ein Praktikum und ein Training Erfahrung im Umgang mit dem wissensbasierten System hatten. Sechs Zweier-Teams konstruierten eine Antriebswelle nach der konventionellen Vorgehensweise mit Papier und Bleistift, sechs Zweier-Teams gingen rechnergestützt mit Hilfe des wissensbasierten Systems vor. Dabei wurden sie mit Video aufgenommen.

Untersucht wurden die Unterschiede zwischen konventioneller und rechnergestützter Vorgehensweise in folgenden Variablen: Lösungsgüte, Effizienz, Dauer ausgewählter Konstruktionsphasen, Zielorientierung, Detaillierungstiefe, verbalisierte Kognitionen und Iterations-

schritte. Es folgt eine zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse. Zunächst läßt sich feststellen, daß die Rechnerunterstützung den Konstrukteur von Routinetätigkeiten entlastet und ihn bei einem strukturierten Vorgehen nach den Phasen des Methodischen Konstruierens unterstützt. Dies wirkt sich wahrscheinlich negativ auf die qualitativen Bereiche der Aufgabenlösung aus. Bei Rechnerunterstützung generiert der Konstrukteur nicht mehr mehrere Lösungsmöglichkeiten, die er dann durchdenkt, bewertet und miteinander vergleicht. Stattdessen richtet er sich tendenziell nach den Inhalten des eingesetzten, wissensbasierten Rechnersystems und entscheidet sich im Rahmen der vorgegebenen Inhalte des Systems recht schnell für eine Lösung. Damit legt er sich sehr schnell quantitativ ohne ausreichende qualitative Prüfung fest. Dieses Vorgehen ist nicht systembedingt, denn das eingesetzte wissensbasierte System läßt ihm alle Möglichkeiten offen. Dies weist darauf hin, daß Konstrukteure dazu neigen, sich am System zu orientieren, sich auf dieses zu verlassen. Einhergehend damit schränken sie ihre selbständigen kognitiven Aktivitäten und ihren Entscheidungsspielraum ein. Als Schlußfolgerung läßt sich hieraus für die Gestaltung von wissensbasierten Systemen ziehen, daß die kognitiven, schöpferischen Aktivitäten des Konstrukteurs gezielt gefördert werden müssen. Es genügt demzufolge nicht, wie bislang angenommen, kreative Denkprozesse durch systembedingte Eigenheiten nicht einzuschränken. Vielmehr müssen diese bei Rechnerunterstützung gezielt gefördert werden. Wie dies effizient möglich ist, erfordert weitere Untersuchungen.

Ein anderer Effekt, der beim rechnergestützten Arbeiten auftritt, bedarf ebenfalls weiterer Forschung. Bei Rechnerunterstützung neigen Konstrukteure dazu, schnell im quantitativ festgelegten Bereich zu arbeiten und dabei perfektionistisch vorzugehen. Sie arbeiten alles bis ins kleinste Detail sehr genau aus, was sehr zeitintensiv ist. Die Zeit, die durch die Entlastung bei Routinetätigkeiten gewonnen wurde, wird dadurch verbraucht. Unternehmen bestätigten bei einer Befragung diesen Effekt. Er tritt immer bei Systemumstellungen oder Neueinführungen auf und verursacht hohe Kosten bis er nach ca. sechs Monaten schwächer wird. Dieser Effekt muß bei der Gestaltung der rechnergestützten Konstruktionsumgebung bedacht werden.

1.4 Wissensgewinnung

Für die rechnergestützte Konstruktionsumgebung muß eine Wissensbasis erstellt werden, die laufend aktualisiert und adaptiert werden muß, weil sich der Wissensstand ständig erweitert, sich die Halbwertszeit des Wissens immer mehr verkürzt und weil sich aber auch die Konstruktionsaufgaben und der Qualifikationsstand der Konstrukteure/innen wandeln. Für diese Wissensaktualisierung sind effektive und effiziente Methoden zu entwickeln (Rothe, 1994 [3]).

Die neuesten Erkenntnisse und Informationen im Umweltschutz liegen oft nicht in schriftlicher Form oder allenfalls in Form von „Grauen Papieren“ vor. Dies bedeutet, daß Experten/innen zur Erstellung einer aktuellen Wissensbasis befragt werden müssen. In mehreren Experimenten wurde deshalb untersucht, mit welchen Methoden und Medien bei Experten/innen umweltrelevantes Erfahrungswissen am effektivsten erhoben werden kann. Das umweltrelevante Wissen wurde mit zwei bekannten Erhebungsmethoden, nämlich der Struktur-Lege- (Bonato, 1990 [1]) und der Interview-Technik bei Experten in einer Gruppensituation ermittelt. Die Gruppensituation wurde nach der Art des Kommunikationsmediums variiert, wobei die drei Bedingungen Face-to-Face-, Computer- und Multimedia-Konferenzen untersucht wurden.

Der Versuch bestand aus einer Schulungs- und einer Wissensakquisitionsphase. In der Schulungsphase wurden alle Teilnehmer (Ingenieurstudienten im Hauptstudium) in ein Informationssystem über die Konfiguration von PCs eingeführt. Anschließend wurde ein Teil der Vpn zu Experten im Bereich umweltgerechte PCs geschult, ein anderer Teil zu Befragern mit no-

vizenhaften Kenntnissen über umweltgerechte PCs. In der Wissensakquisitionsphase befragte ein „Novize“ mit der jeweils erlernten Befragungstechnik zwei Experten zu umweltgerechten PCs entweder in einer Face-to-Face-, Computer- oder Multimedia-Konferenz. Anschließend war es Aufgabe des „Novizen“ das Informationssystem auf Basis des akquirierten Umweltwissens zu aktualisieren. Die Lösungen wurden von Experten nach den Kriterien Quantität und Qualität bewertet sowie weiterhin nach der Effizienz (Zeitdauer) und der Art der kommunikativen Prozesse ausgewertet.

Die Ergebnisse des Experimentes belegen zunächst, daß die Struktur-lege-Technik (Dauer: 82 Min.; Note: 3) zwar in der Durchführung ca. 17 Minuten länger dauert als die Interview-Technik (Dauer: 65,8; Note: 4), aber qualitativ besser zur Wissensakquisition geeignet ist als die Interview-Technik. Auffallend ist, daß bei der Interview-Technik weniger systematische Zusammenhänge zwischen den Hardwarekomponenten und dem Umweltwissen hergestellt werden und damit das Themengebiet weniger strukturiert wird.

Den Wissensakquisiteuren fiel es auch leichter, mit der Struktur-lege-Technik umzugehen als mit der Interview-Technik. Dies lag vor allem daran, daß bei der Struktur-lege-Technik die Experten von sich aus bessere Informationen gaben. Sie wurden durch diese Technik stärker zu spontanen und eigenständigen Beiträgen aktiviert, während sie bei der Interview-Technik nicht über die Beantwortung der vorgelegten Fragen hinausgingen. Bei der Interview-Technik nahmen die Experten also eher eine passive Rolle ein. Aus diesem Ergebnis läßt sich schlußfolgern, daß die Lösungsqualität bei der Struktur-lege-Technik mehr vom Wissen der Experten und weniger vom Vorgehen des Wissensakquisiteurs abhängt, während bei der Interviewtechnik das Ergebnis stärker von der Fähigkeit des Akquisiteurs abhängt, die richtigen Fragen zu stellen. Diese Fähigkeit wiederum setzt beim Akquisiteur ein relativ umfangreiches Wissen voraus.

Wie erwartet, dauern die Multimedia-Konferenzen (82 Min.) länger als die Computer- (77,8 Min.) und Face-to-Face-Konferenzen (62,3 Min.). Überraschend ist aber, daß die Lösungen bei den Multimedia-Konferenzen (Note: 3,8) qualitativ denen der Face-to-Face-Konferenzen (Note: 3,9) entsprechen und damit schlechter sind als die Lösungen der Computer-Konferenzen (Note: 2,9). Dies ist vermutlich auf ein Übungsdefizit im Umgang mit Multimedia-Konferenzen zurückzuführen, welche das Ausführen einer Mehrfach-Aufgabe erfordern: Lesen des Textes, Anschauen von Videobildern, Sprechen über Mikrophone, Hören über Kopfhörer und Schreiben. Dies alles geschieht in einer ungewohnten Anordnung auf dem Computerbildschirm. Bei einfachen Computer-Konferenzen, bei denen die gleichzeitige Beanspruchung mehrere Sinneskanäle entfällt, tritt hingegen keine Minderung der Lösungsqualität ein. Im Gegenteil mit den Computer-Konferenzen wurden die qualitativ besten Ergebnisse erzielt.

Eine Erklärung für diesen Effekt läßt sich aus den Befunden früherer Untersuchungen zu Unterschieden zwischen Face-to-Face- und Computer-Konferenzen ableiten (Rüttinger, Letter und Schramme, 1994 [4]). Bei Computer-Konferenzen liegt eine sog. depersonalisierte Situation vor. Man setzt sich mit geschriebenen Argumenten am Bildschirm und nicht mit Personen auseinander. Die Ausblendung nonverbaler und sozialer Informationen führt zu einer Versachlichung der Diskussion. Die Sympathie oder Antipathie gegenüber einem Diskutanten spielt keine Rolle mehr. Es werden nur noch die Sachargumente bewertet.

Die Computer-Konferenzen scheinen zunächst weniger effizient als Face-to-Face-Konferenzen zu sein. Wenn allerdings die 15 bis 20 Minuten, die für das Schreiben statt Sprechen der Beiträge benötigt werden, von der Gesamtdauer abgezogen werden, dauern Computer-Konferenzen genauso lange wie Face-to-Face Konferenzen und sind damit genauso effizient wie diese.

Aus den Ergebnissen läßt sich die Empfehlung ableiten, zumindest den Beginn der Akquisition von Expertenwissen mit Computer-Konferenzen und der Struktur-lege-Technik durchzuführen.

1.5 *Literatur*

- [1] Ajzen, I.: *The theory of planned behavior. Some unresolved issues*. Organizational Behavior and Human Decision Processes 50. 1991. pp. 179-211.
- [2] Bonato, M: *Wissensstrukturierung mittels Struktur-Lage-Techniken*. Verlag Peter Lang, Frankfurt. 1990.
- [3] Rothe, H.-J.: *Wissenserfassung bei Konstrukteuren*. In: Pahl, G. (Hrsg.): Psychologische und Pädagogische Fragen beim methodischen Konstruieren. Verlag TÜV Rheinland, Köln. 1994.
- [4] Rüttinger, B.; Letter, B.; Schramme, S.: *Computermedierte Kommunikation und Entscheidungsfindung*. In: Wille R.; Zickwolf, M. (Hrsg.): Begriffliche Wissensverarbeitung. Wissenschaftsverlag; Mannheim. 1994. Seiten 289-300.

2 HExProSA- ein hybrides Expertensystem zur Prozeßkontrolle und Störfallanalyse von Abwasserbehandlungsanlagen- Erfahrungen bei der Evaluierung eines Prototyps

Gerald Volkmann¹, Thomas Linke², Thomas Waschulzik¹, Rick Ohmes¹,
Torsten Schaub², Manfred Wischnewsky¹

2.1 Aufgabenstellung

Die laufende Kontrolle eines Prozesses und die Behandlung von auftretenden Störfällen sind allgemeine Aufgabenstellungen in der Industrie und insbesondere in der Wasserwirtschaft. Der wissensbasierten Prozeßkontrolle und Störfallanalyse kommt im Bereich des produktionsintegrierten Umweltschutzes eine besondere Bedeutung zu, da produktionsintegrierte Ab-

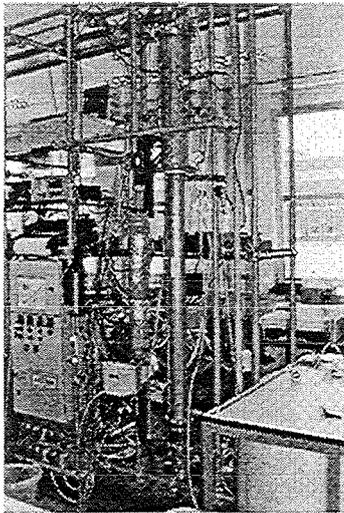


Abbildung 3:
Versuchsaufbau einer für den Produktionsintegrierten Umweltschutz geeigneten Abwasserbehandlungsanlage.

wasserbehandlungsanlagen möglichst eng in den Produktionsprozeß integriert und aus diesem Grund über das Werksgelände verteilt werden müssen. Dies steht im Gegensatz zur zentralen, gesammelten Behandlung der Abwässer am Ende des Produktionsprozesses, den sogenannten „end of pipe“-Systemen. Für die zentrale Abwasserreinigung ist in der Regel ein Klärwerkmeister zuständig, der die Anlage überwacht und Störfälle analysiert und behebt. Für die dezentralen kleinen Abwasserbehandlungsanlagen (Abbildung 3) kann aus Kostengründen in der Regel kein Klärwerksmeister eingestellt werden. Aus diesem Grund muß eine dezentrale Anlage weitestgehend automatisiert arbeiten. Notwendige Eingriffe sind so von dem System zu unterstützen, daß sie in der Regel von nicht speziell auf dem Reaktor geschulten Personal durchgeführt werden können. Nur in Ausnahmefällen darf es notwendig sein, daß der zentrale Klärwerkmeister oder andere für die Wartung Verantwortliche für die Behebung von Störfällen benötigt werden. Damit sich der produktionsintegrierte Umweltschutz gegenüber den heute üblichen „end of pipe“-Systemen durchsetzen kann, muß sich die produktionsintegrierte Abwasserbehandlungsanlage kurzfristig amortisieren und sie muß kostengünstig an veränderte Rahmenbedingungen angepaßt werden können. Um zu erreichen, daß der produktionsintegrierte Umweltschutz von den Entscheidungsträgern präferiert wird, darf die Integration der Abwasserbehandlungsanlage in den Produktionsprozeß nur geringe negativen Auswirkungen auf den bisherigen Produktionsprozeß z.B. durch Störfälle der Reinigungsanlage haben. Entsprechend muß eine in den Produktionsprozeß integrierte Abwasserbehandlungsanlage insbesondere,

- stabil betrieben werden können,
- weitgehend wartungsfrei sein,
- kostengünstig herzustellen und an veränderte Aufgabenstellungen anzupassen sein, und

¹ Universität Bremen, Technologie-Zentrum Informatik, Bibliothekstr. 1, 28359 Bremen

² Universität Potsdam, Institut für Informatik, Postfach 601553, 14415 Potsdam

- ggf. auftretende Probleme müssen von nicht speziell auf die Anlage geschultem Personal behoben werden können.

Dieser Artikel behandelt den Aspekt der Störfallanalyse, die unter das allgemeine Problem der Diagnose fällt. Die in diesem Artikel beschriebenen Ergebnisse entstanden im Rahmen des interdisziplinären Forschungsprojektes ‚Produktionsintegrierter Umweltschutz‘ an der Universität Bremen. Abbildung 3 zeigt den Versuchsaufbau für die Abwasserbehandlung, Abbildung 4 die zugehörige Prozeßgrafik. Die Funktionsweise wird in Schierenbeck, 1997 [7] beschrieben.

2.1.1 Konkretisierung der Aufgabenstellung

Das Diagnosesystem soll den Benutzer bei der Fehlererkennung, -lokalisierung und -behebung unterstützen. Im allgemeinen kann nicht davon ausgegangen werden, daß allein aufgrund der aufgezeichneten Daten alle Fehler sofort festgestellt werden können. Realistischer ist es, für die Diagnose einen Hypothese - Test Zyklus vorzusehen. Aufgrund der gemessenen Daten werden Hypothesen formuliert, welche die Daten erklären. Danach wird der Benutzer aufgefordert, zusätzliche Tests durchzuführen und die so gewonnenen neuen Beobachtungen dem System mitzuteilen. Unter Einbeziehung der durch die Beobachtungen gewonnenen Evidenz, werden neue Hypothesen generiert. Dieser Zyklus wird so lange wiederholt, bis der Fehler diagnostiziert werden kann. Ziel der Entwicklung ist es genau jene Tests durchzuführen, die eine möglichst schnelle, sichere und kostengünstige Diskriminierung zwischen den einzelnen Hypothesen erlaubt. In die Bewertung welcher Diagnose- oder Reparaturschritt als nächstes durchgeführt wird, können aus einem Modell Wahrscheinlichkeiten über Fehlerursachen, Kosten für die Diagnose oder die prophylaktische Reparatur eingehen. Ein mögliches Mittel zur Diagnose ist auch die Einschaltung einer höheren Eskalationsstufe der Wartung (z.B. speziell geschultes Personal oder der Wartungsdienst des Herstellers) sein. Damit für Abwasserbehandlungsanlagen des produktionsintegrierten Umweltschutzes die Bewertung der Alternativen problemangepaßt erfolgen kann, ist eine Modellierung der Wahrscheinlichkeiten, der Ursachen und der Kosten für die Handlungsalternativen erforderlich.

2.2 Lösungsansätze

Bisher wurden eine Reihe verschiedener Systeme zur Diagnose technischer Systeme entwickelt, die logische Inferenzen oder Assumption based Truth Maintenance als zugrunde liegendes Prinzip verwenden (vgl. z.B. de Kleer, 1987 [3]).

Ein Konsistenz-basierter Ansatz zur Fehlerdiagnose geht genau von dieser Situation aus. Falls eine Abweichung vom modellierten Normalverhalten beobachtet wird, liegt ein zu diagnostizierendes Problem vor. Die Lösung dieses Problems besteht in der Identifizierung einer oder mehrerer defekter Systemkomponenten (vorausgesetzt, daß sich die topologische Gesamtstruktur des Systems nicht verändert hat), so daß unter der Annahme daß diese Komponenten defekt sind eine konsistente Beschreibung der beobachteten Situation entsteht.

Neben den Logik-basierten Systemen wurden auch wahrscheinlichkeitstheoretische Verfahren verwendet, um Fehler zu diagnostizieren. Diesen Ansatz verwenden die Bayesschen Netzwerke, die zudem eine graphische Modellierung unterstützen (Pearl, 1988).

2.2.1 Modellierung des Normalverhaltens

Bei der Modellbildung stellen wir das Normalverhalten in den Vordergrund. Man kann durch Rückgriff auf physikalische Gesetzmäßigkeiten und erwartetes Verhalten das Normalverhalten einer technischen Anlage oder ausgezeichneten Komponenten von ihr modellieren. Jede

Abweichung von diesem Normalverhalten kann dann als von einem Fehler verursacht interpretiert werden.

In diesem Fall spricht man von modellbasierter Diagnose, d.h. es ist eine formale Beschreibung, also ein Modell der Anlage oder des technischen Systems gegeben (z.B. in Form einer prädikatenlogischen Formelmengende oder in Form eines graphischen Modells), das deren Normalverhalten beschreibt.

2.2.2 Wissensrepräsentation mit Bayesschen Netzwerken

In den letzten Jahren wurden Bayessche Netzwerke (BN) in einer Reihe von Expertensystemen erfolgreich eingesetzt (Heckerman, 1995 [2]). Mit BN ist es möglich, Unsicherheit mittels mathematisch ‚sauberer‘ Wahrscheinlichkeitstheorie darzustellen und unter Zuhilfenahme von sog. Utility-Funktionen (z.B. Kosten-, Risikofunktionen) lassen sich Entscheidungen optimieren. Den BN liegt in der Regel ein kausales Modell zugrunde, wobei die gerichteten Kanten eines Graphen eine direkte, kausale Beeinflussung zwischen zwei Knoten repräsentiert. Die Knoten geben die Entitäten der Wissensdomäne wieder. In medizinischen Expertensystemen sind dies beispielsweise Symptome, Syndrome oder Komplikationen. Im Fall von technischen Systemen sind dies die verschiedenen Teilkomponenten. Die quantitativen Zusammenhänge werden in Form von lokalen Wahrscheinlichkeitsverteilungen dargestellt. So lassen sich deterministische, aber auch mit Unsicherheit behaftete Zusammenhänge ausdrücken.

Dabei wurden in den letzten Jahren Algorithmen zur effizienten Berechnung entwickelt, für welche die früheren Einschränkungen, die sich durch die simple Verwendung des Bayesschen Theorems ergaben, nicht länger gültig sind. Die im Betrieb anfallenden Meßdaten lassen sich erlernen, und es ist möglich, dadurch eine gute Abbildung des Systemverhaltens auch bei sich ändernden Umweltbedingungen zu realisieren (Spiegelhalter, 1993 [8]). BN stellen Methoden zur Verfügung, um die Wahrscheinlichkeiten der Fehlerhypothesen zu berechnen. Zusammen mit den Kosten für die einzelnen Eingriffe, läßt sich entscheiden, welche Hypothese zuerst überprüft werden soll (Breese, 1996 [1]). Hier nun eine formale Definition von BN (Pearl, 1988):

Gegeben sei ein gerichteter Graph $G = (V, E)$ und eine Wahrscheinlichkeitsverteilung P über eine Menge $X = \{X_1, \dots, X_n\}$ von diskreten Zufallsvariablen. Jede Zufallsvariable aus X kann einen der Zustände x_1, \dots, x_m annehmen. Der Graph G repräsentiert P , wenn jedem Knoten $v \in V$ genau eine Variable aus X zugeordnet ist und die Wahrscheinlichkeitsverteilung P gegeben ist durch

$$P(X_1, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i | \text{Eltern}(X_i)).$$

Ein Bayessches Netzwerk ist dann durch ein Paar $BN = (G, P)$ gegeben. Die wahrscheinlichste Erklärung ist die Kombination von Zuständen x_1, \dots, x_j , mit maximalem $P(X_1 = x_1, \dots, X_n = x_j)$. Bei der wahrscheinlichsten Fehlerhypothese muß zudem mindestens ein Zustand einen Fehler repräsentieren.

Zur Wissensakquisition für das BN wurden die aufgezeichneten Daten, Expertenwissen sowie technische Zeichnungen der Anlage herangezogen. Die Zusammenhänge zwischen den aufgezeichneten Daten wurden mittels „parameter learning“ akquiriert. Werte für die keine Meßdaten vorlagen (z.B.: Druck), konnten in Form einer Normalverteilung approximiert werden.

2.2.3 Wissensrepräsentation mit Default Logic

In den Bereichen, wo wir es statt mit Unsicherheit mit unvollständigem Wissen zu tun haben, ist es günstiger die Modellierung mit anderen Methoden durchzuführen. Bei der Fehlerdiagnose eines technischen Systems befinden wir uns in einer Situation die nur unvollständig bekannt ist, wir wissen daß ein Fehler vorliegt, haben aber keine Information über dessen Ursachen. D.h. wir wissen daß eine oder mehrere Komponenten des Systems defekt sind, wissen aber nicht welche. Hierzu bietet sich die Verwendung von nicht-monotonen Logiken wie z.B. Default Logic (DL) (vgl. Reiter, 1980 [5]) an.

Bei der Modellierung mittels Default-Logiken halten wir uns an die in Reiter, 1987 [6] beschriebene Methode:

Formal sei SB , eine logische Systembeschreibung eines zu betrachtenden Systems, durch eine Menge prädikatenlogischer Formeln gegeben. Das beobachtete Verhalten des Systems ist durch eine Formelmenge von Beobachtungen BEO gegeben. Ferner sei $KOMP$ die Menge der Systemkomponenten. In SB ist für jede Komponente c in $KOMP$ eine logische Beschreibung ihres Normalverhalten $\neg ab(c)$ gegeben, wobei $ab(c)$ als „die Komponente c ist abnormal“ interpretiert werden kann. Eine Diagnose eines Systems $(SB, KOMP, BEO)$ ist eine Teilmenge D der Komponenten $KOMP$, so daß

$$SB \cup BEO \cup \{ab(c) : c \in D\} \cup \{\neg ab(c) : c \in KOMP - D\}$$

konsistent ist, d.h. D beschreibt die abnormal arbeitenden Komponenten.

Wir sprechen von einer minimalen Diagnose genau dann, wenn D eine minimale Menge mit dieser Eigenschaft ist. Um minimale Diagnosen zu erhalten verwendet man spezielle Default-Theorien, wobei für jede Komponente c eine Default-Regel mit der intuitiven Bedeutung „falls nichts dagegen spricht, nehme an daß c nicht abnormal ist“ eingeführt wird. Die minimalen Diagnosen sind dann durch die verschiedenen Extensionen dieser Default-Theorien gegeben (vgl. Reiter, 1987 [6]).

Logische und wahrscheinlichkeitstheoretische Ansätze müssen sich nicht ausschließen, sinnvoll ist eine Integration beider Welten (siehe Poole, 1993 [4]).

2.3 Ergebnisse

Auf der Cebit 98 wurde auf dem Norddeutschen Gemeinschaftsstand das Programm ADDA95 zur Meßdatenerfassung vorgestellt, indem die Diagnosekomponente HExProSA integriert war. Das Wissen wurde mit BN und DL repräsentiert. Kosten blieben dabei unberücksichtigt und es konnten nur Fehler in einzelnen Komponenten der Anlage identifiziert werden (single fault diagnosis). Zur Demonstration wurden aufgezeichnete Daten verwandt, ergänzt mit charakteristischen Fehlerfällen. Diese Fehler konnten richtig diagnostiziert werden. DL zeigte gute Ergebnisse, wenn die Daten genau einen Fehler implizieren. Bei mehreren möglichen Fehlern ermöglichten die Wahrscheinlichkeiten des BN ein differenzierteres Vorgehen bei der Auswahl der zu testenden Komponenten. Allerdings stellte sich die Darstellung der Anlage (Abbildung 3) als zu komplex heraus, um daraus schnell und sicher einen Fehler abzulesen. An dem folgendem komplexen Beispiel lassen sich exemplarisch die Möglichkeiten des vorgestellten Systems sowie dessen Einschränkungen erkennen.

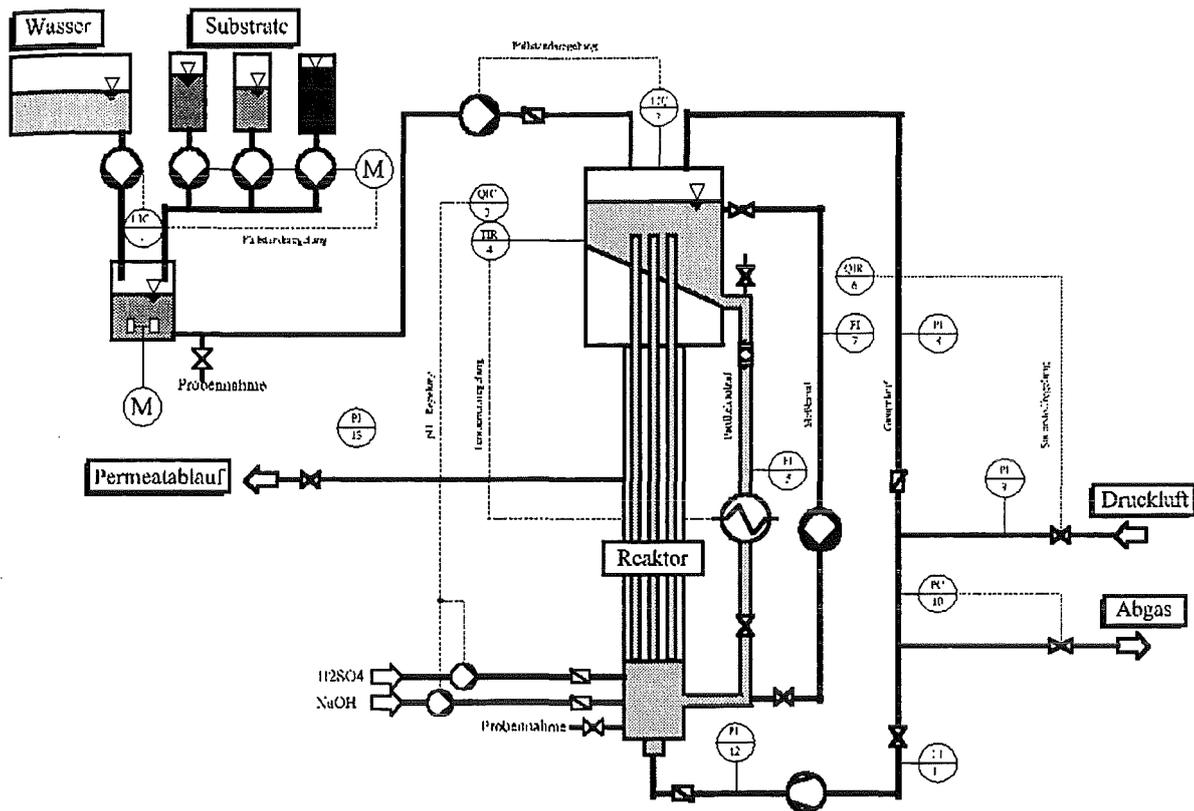


Abbildung 4: Prozessgrafik der in Abbildung 3 abgebildeten Abwasserbehandlungsanlage

2.3.1 Diagnosebeispiel

Abbildung 4 zeigt die Prozessgrafik der Abwasserbehandlungsanlage. Sie bildet die grafische Grundlage für die Diagnosekomponente, die durch die aktuellen Meßwerte ergänzt wurde. Für das Diagnosebeispiel haben wir den Gasumlauf ausgewählt, der im rechten Drittel der Abbildung zu erkennen ist. Abbildung 5 bis Abbildung 7 zeigt den für die Diagnose relevanten Ausschnitt des Gasumlaufs, so wie sie der Benutzer sieht. Dieser Teil der Abwasserbehandlungsanlage realisiert zwei Funktionen. Erstens findet hier die Regulierung des Sauerstoffgehalts statt. Entsprechend der Sauerstoffmessung (QIR 6) wird durch einen stufenlosen Regler Druckluft (Druckluftzufuhrventil) dem Gasumlauf zugeführt (Pfeil ‚Druckluft‘). Zweitens darf der Druck im Reaktor nicht zu hoch werden, sonst wird das Überdruckventil geöffnet, daß durch den Drucksensor (PC 10) gesteuert wird. Die Meßdatenerfassung hat nun einen sehr geringen Sauerstoffwert festgestellt und die Diagnosekomponente aktiviert. Das Druckluftzufuhrventil befindet sich in maximaler Stellung, die zugeführte Druckluft hätte den Sauerstoffgehalt anheben müssen.

Mögliche Erklärungen für die abnormalen Meßwerte:

- Druckluftzufuhrventil defekt (immer geschlossen)
- Es wird keine Druckluft dem System zugeführt, der Sauerstoffgehalt kann nicht angehoben werden
- Fehlerhafte Messung der Stellung des Druckluftzufuhrventils

Das Ventil befindet sich im Gegensatz zu den Meßwerten nicht in maximaler Stellung. Es wird keine oder zu wenig Druckluft zugeführt und der Sauerstoffgehalt nicht (ausreichend) angehoben.

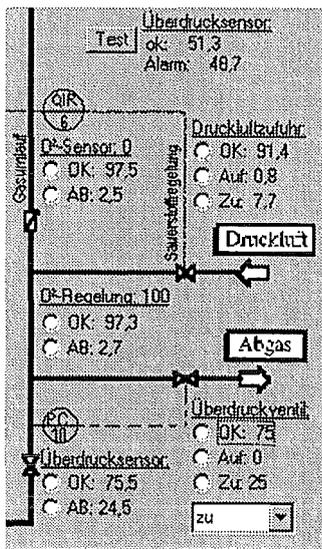


Abbildung 5: 1.Hypothese: Überdruckventil defekt

In Abbildung 5 sind die Wahrscheinlichkeiten für die verschiedenen Defekte angegeben. Man könnte nun die Stellung des Überdruckventils feststellen und seine Funktionsfähigkeit überprüfen (1. Hypothese: „Überdruckventil defekt“). Wenn das Überdruckventil geschlossen ist und funktioniert, dann ergibt sich das Bild in Abbildung 6. Als nächstes würde man den Überdrucksensor testen. Die Wahrscheinlichkeit für einen Defekt beträgt 32,3% („Überdrucksensor: AB“). Der Test hat zum Ziel festzustellen, ob der Druck erhöht ist und der Sensor dies richtig anzeigt (2. Hypothese: „Überdrucksensor defekt“). Nun könnte man das Druckluftzufuhrventil untersuchen (3. Hypothese). Durch das Ausschließen der ersten und zweiten Hypothese ist die Wahrscheinlichkeit für einen Defekt von 8,5% auf 27,2% (= „Auf“ 26,8% + „Zu“ 0,4%) angestiegen (Abbildung 5), die Wahrscheinlichkeit, daß das Ventil in geschlossener Stellung verklemmt ist („Druckluftzufuhr: Zu“), beträgt 26,8%.

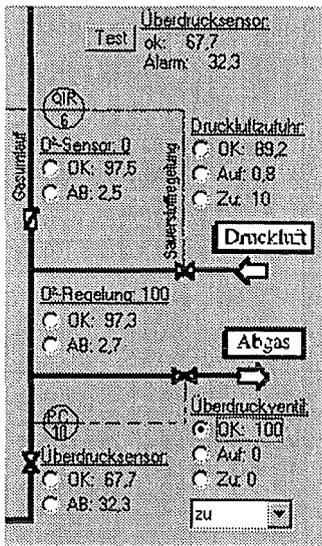


Abbildung 6: 2.Hypothese: Überdrucksensor defekt

$P(\text{Sauerstoffsensor}=\text{defekt}, \text{Druckluftventil}=\text{ok} | \text{Beobachtungen})$
und miteinander verglichen werden.

- Der Benutzer erfährt keine Hilfestellung bei der Auswahl der zu testenden Komponenten. Dies kann dazu führen das Tests durchgeführt werden, welche die Fehlerdiagnose nicht direkt voranbringen: Der leicht erhöhte Reaktordruck führt zu der Annahme, daß das Abgasventil verklemmt ist (immer zu). Damit wird aber die Fehlerur-

- Überdruckventil defekt (immer geöffnet)
Die zugeführte Druckluft, die den Sauerstoffgehalt anheben soll, entweicht sofort wieder.
- Überdrucksensor defekt (signalisiert immer Überdruck)
Das Überdruckventil bleibt immer geöffnet. Dies führt dazu, daß die zugeführte Druckluft, die den Sauerstoffgehalt anheben sollte, sofort wieder entweicht.
- Fehlerhafte Sauerstoffmessung
Dies führt dazu, daß ständig Druckluft zugeführt wird. Dadurch wird der Druck sehr hoch und das Überdruckventil müßte sich regelmäßig öffnen.

2.3.2 Beispiel für einen Hypothese-Test-Zyklus

Durch das sukzessive Ausschließen einzelner Fehlermöglichkeiten und die Eingabe zusätzlicher Beobachtungen wurde der Defekt des Druckluftzufuhrventil als am wahrscheinlichsten diagnostiziert.

2.3.3 Verbesserungsmöglichkeiten

Folgende Defizite lassen sich an diesem Beispiel aufzeigen:

- Der mögliche Fehler, daß die Sauerstoffmessung defekt ist, fällt nicht auf, da sich die Wahrscheinlichkeit nicht verändert. Dies liegt daran, daß eben nur die Fehlerwahrscheinlichkeit einzelner Komponenten betrachtet wird - da es nur einen Sauerstoffsensor gibt, bleibt die Wahrscheinlichkeit konstant, auch wenn andere Fehlerursachen ausscheiden. Hierzu müssen explizit Hypothesen mit mehreren Komponenten formuliert werden, wie

sache „Abgasventil immer offen“ ausgeschlossen. Die Überprüfung des Abgasventils ist damit überflüssig, da dies den Störfall nicht mehr erklären kann. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, dem Benutzer Vorschläge zu generieren, welche Komponente getestet werden sollte.

2.4 Ausblick

Bei dem jetzigen Prototypen modellierten wir die Wissensbasen für DL und BN getrennt voneinander. Wir streben aber eine allgemeine Beschreibungssprache an, die möglichst unabhängig von den verwendeten Inferenzmechanismen existieren soll. Die einzelnen Systemkomponenten müssen zudem modular und generisch gestaltet werden, so daß ein Anlagenmodell schnell aus den einzelnen Systemkomponenten zusammengefügt werden kann. Dies bildet einen Schwerpunkt in unserer Forschungsarbeit.

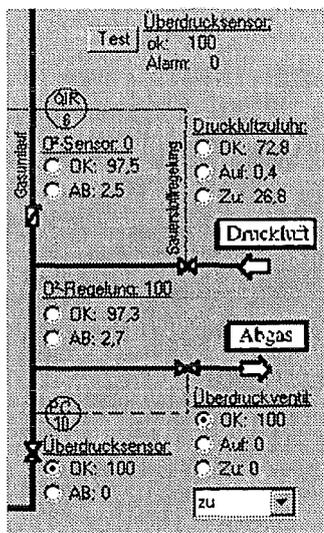


Abbildung 7: 3.Hypothese: Druckluftzufuhr defekt

Ein menschlicher Experte (hier für eine produktionsintegrierte Abwasserreinigung) kann bei der Diagnose auf seine früheren Erfahrungen mit Fehlern zurückgreifen. Wird er mit einer ähnlichen Situation konfrontiert, kann er Verbindungen zu früheren, ähnlichen Fällen herstellen, um so schnell zu einer adäquaten Fehlerdiagnose zu gelangen. Dazu ist es allerdings notwendig fundierte Erfahrungen oder Wissen über auftretende Fehlersituationen zu haben. Wir wollen diesen Ansatz der Fehlermodellierung in unserer zukünftigen Arbeit weiterverfolgen, obwohl sie alleine im Allgemeinen kein ausreichendes Mittel zur Fehlerdiagnose ist, da sie immer unvollständig ist. Das wir jedoch in DL die Möglichkeit haben das Normalverhalten und ein (unvollständiges) Fehlverhalten eines Systems in ein und denselben Formalismus gleichzeitig zu repräsentieren und DL gerade für den Umgang mit unvollständigen Wissen konzipiert wurde, können sich aus diesem Ansatz eine Effizienzsteigerung der Konsistenz-basierten Diagnosekomponenten ergeben. Benutzt man neben akquirierten Expertenwissen noch das BN zum Erlernen eines Fehlermodells ergibt sich eine erste Integrationsmöglichkeit von BN und DL.

Bei der Konzeption des nächsten Prototypen konzentrieren wir uns auf die Entwicklung einer einfachen Benutzeroberfläche, die den Benutzer einerseits übersichtlich über möglich Fehler informiert und Tests, welche die Diagnostik schnell voranbringen, generiert, andererseits die Akzeptanz erhöht, indem die Frage nach den Verursachern des Fehlers direkt beantwortet wird. Zu einem späterem Zeitpunkt werden die Kosten modelliert und zur Entscheidungsunterstützung herangezogen.

2.5 Literatur

- [1] Breese, J. S.; Heckerman, D.: *Decision-Theoretic Troubleshooting: A Framework for Repair and Experiment*. In: Proceedings of the Twelfth Conference in Uncertainty in Artificial Intelligence. August 1996.
- [2] Heckerman, D. E.; Mamdani, E.H.; Wellman, M. P.: *Real-World Applications of Bayesian Networks*. In: Communications of the ACM. Vol. 38, No. 3. March 1995. pp. 24-57.
- [3] de Kleer, Williams: *Diagnosing multiple Faults*. AI, 32.1987. pp. 97-130.
- [4] Poole, D.: *Probabilistic Horn Abduction and Bayesian Networks*. AI, 64(1). 1993. pp. 81-129.

1. Workshop „Wissensbasierte / Intelligente Systeme in Umwelthanwendungen“ UI '98

- [5] Reiter, R.: *A Logic for default reasoning*. AI, 13(1-2). 1980. pp. 81-132.
- [6] Reiter, R.: *A Theory of diagnosis from first principles*. AI, 32. 1987. pp. 57-95.
- [7] Schierenbeck, A.; Rübiger, N.: *Biologische Eliminierung schwer abbaubarer Stoffe mit dem Suspensions-Membranreaktor*. 2. Workshop Produktionsintegrierter Umweltschutz, Universität Bremen. 1997.
- [8] Spiegelhalter, D. J.; Dawid, A. P.; Lauritzen, S. L.; Cowell, R. G.: *Bayesian Analysis in Expert Systems*. In: *Statistical Science*, Vol. 8. August 1993.

3 Wissensbasierte Extraktion von Objekten aus topographischen Karten unter Verwendung von ATKIS-Daten

Hans Koch³, Ralf Tönjes⁴

Zusammenfassung: Es wird ein wissensbasiertes Verfahren zur automatisierten Erfassung von Objekten aus topographischen Karten vorgestellt, das Daten aus einem Geo-Informationssystem in die Interpretation einbezieht. Dazu werden die Landschaftsobjekte mit ihrer Ausprägung in dem GIS und in der topographischen Karte in Form eines semantischen Netzes modelliert. Die Interpretation wird regelbasiert gesteuert und liefert als Ergebnis eine Szenenbeschreibung, die sowohl die Karten- als auch die GIS-Objekte enthält.

Abstract: This paper introduces a knowledge based procedure for the automated extraction of objects from topographic maps which uses a digital landscape model (DLM) to support the interpretation process. The landscape is modelled in a semantic net that contains the representation of the landscape in the DLM and the maps. The interpretation process is controlled by means of a rule base. The result of the interpretation is a scene description consisting of objects derived from the map and the DLM.

3.1 Einleitung

Die Extraktion von Geoinformationen aus mittelmaßstäbigen Karten mit komplexer Kartographie ist ein aktuelles Problem der Kartographie. Hierbei nimmt das seit über hundert Jahren geführte topographische Kartenwerk 1:25000 (TK25) eine wichtige Stellung ein. Aufgrund der großen Datenmengen wird seit einigen Jahren an der Entwicklung von Verfahren für die automatisierte Auswertung topographischer Karten gearbeitet.

Anders als bei den bisherigen Ansätzen (Ebi, 1993 [2]; Lauterbach, 1993 [5]) werden in dem hier vorgestellten Verfahren Daten aus einem Geo-Informationssystem, dem ATKIS DLM25/1, in die Interpretation einbezogen, und als Vorwissen für die weitere Analyse der betrachteten Szene genutzt. Das ATKIS DLM25/1 steht in der Bundesrepublik Deutschland nahezu flächendeckend zur Verfügung. Es enthält neben einer objektstrukturierten Beschreibung der Landschaft implizit auch die topologischen Relationen zwischen Objekten.

Für die wissensbasierte Interpretation der Karte wird die Landschaft in Form eines semantischen Netzes modelliert, das die Ausprägung der Landschaft in ATKIS und in der Karte berücksichtigt. Das Modell wird genutzt, um zunächst eine Szenenbeschreibung aus den ATKIS-Daten zu generieren. Diese initiale Szenenbeschreibung wird dann als Vorwissen für die anschließende Interpretation der Kartendaten verwendet. Das Ergebnis ist eine Szenenbeschreibung, die sowohl ATKIS-Objekte als auch Kartenobjekte berücksichtigt.

Eine mögliche Anwendung dieses Verfahrens ist die Gewinnung von Informationen zur automatisierten Generierung von Karten aus einem DLM. Denkbar ist auch die Interpretation historischer Karten zur Erfassung von Landnutzungsänderungen.

Im folgenden Abschnitt wird zunächst ein kurzer Überblick über die Architektur des Systems gegeben. Danach werden die verwendeten Ausgangsdaten und eine dafür entwickelte Abfrageschnittstelle beschrieben. In Kapitel 3.4 wird die Repräsentation des Wissens mit semantischen Netzen vorgestellt. Der Ablauf und die Steuerung der Interpretation wird anhand eines Beispiels in Kapitel 3.5 beschrieben.

³ Institut für Kartographie, Universität Hannover, Appelstr. 9A, 30167 Hannover

⁴ Institut für Theoretische Nachrichtentechnik und Informationsverarbeitung, Universität Hannover

3.2 Architektur des wissensbasierten Interpretationssystems

Abbildung 8 zeigt den Aufbau des wissensbasierten Interpretationssystems. Das System wurde zur Interpretation von Luftbildern und Karten entworfen. Es ist am Institut für Theoretische Nachrichtentechnik und Informationsverarbeitung der Universität Hannover unter der Bezeichnung AIDA (Automatic Image Data Analyzer) entwickelt worden.

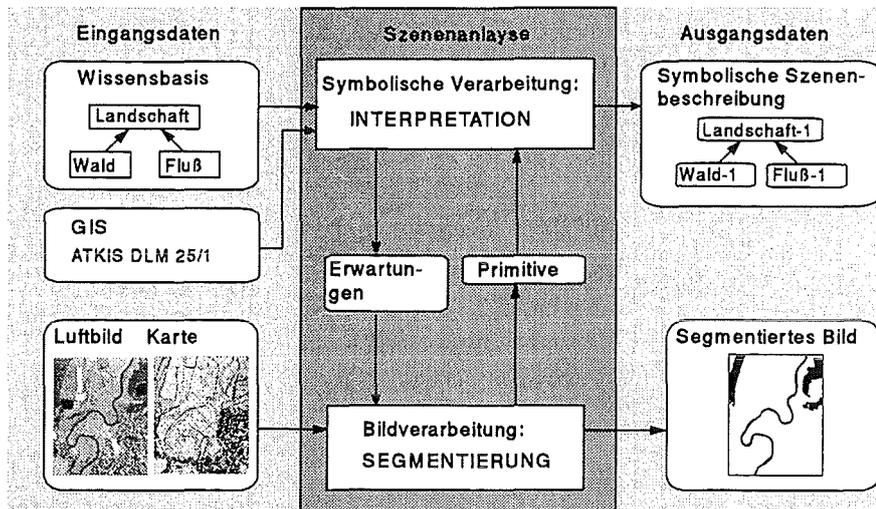


Abbildung 8: Architektur des wissensbasierten Informationssystems

Das Vorwissen über die aus der Karte zu extrahierenden Objekte wird in einer Wissensbasis explizit repräsentiert. Neben diesem allgemeinen Wissen greift die Interpretation auf das ATKIS DLM25 zurück, aus dem eine initiale Szenenbeschreibung abgeleitet wird. Diese symbolische Szenenbeschreibung wird dann zur Generierung von Hypothesen über die aus der Karte zu extrahierenden Objekte genutzt.

Die Hypothesen werden überprüft, indem Erwartungen über Eigenschaften und Geometrie entsprechender Objekte aufgestellt werden. In einem Bildverarbeitungs- und Abfragemodul werden in den Kartendaten Primitive gesucht, die diesen Erwartungen entsprechen. Die Primitive werden mit einem zugehörigen Vertrauensmaß zurückgeliefert. Das Interpretationsmodul gruppiert die Primitive und wertet Beziehungen untereinander aus, um das Vertrauensmaß für konkurrierende Interpretationen zu erhöhen, bzw. zu erniedrigen. Das Ergebnis der Interpretation ist eine symbolische Szenenbeschreibung und ein zugehöriges segmentiertes Bild.

Das Bildverarbeitungs- und Abfragemodul stellt Funktionen für Raster- und Vektordaten zur Verfügung. Bei der Karteninterpretation werden aber überwiegend Vektordaten verwendet.

3.3 Vorverarbeitung und Verwaltung der Daten

Ausgangsdaten waren die topographischen Karten 3522 (Wunstorf) und 3523 (Garbsen) im Maßstab 1:25000. Diese lagen in Form farbgetrennter digitaler Rasterdaten mit einer Auflösung von 320 Linien/cm vor.

Die Daten wurden mit dem Programmpaket RAVEL (Lichtner, 1987 [6]) vektorisiert. Die Vektordaten erhalten dabei Attribute wie ursprüngliche Linienbreite und Linienlänge. Hinzugefügt wurde die Information über die Ursprungsfolie. Die so erzeugten Vektorprimitive werden in dem Geo-Informationssystem Smallworld abgespeichert. Der Zugriff auf die Daten erfolgt über GIS-Operationen, deren Anbindung an das Interpretationssystem über das TICS Toolkit von Smallworld realisiert wird.

Die ATKIS-DLM25/1-Daten werden mit dem Geo-Informationssystem Sicad/open verwaltet. Um aus dem Interpretationssystem einen Zugriff auf die ATKIS-Daten zu ermöglichen, wurde eine Abfrageschnittstelle entwickelt. Diese setzt auf der GDBX-Callschnittstelle von Sicad auf und stellt einen einfachen Befehlssatz zur Formulierung von Abfragen zur Verfügung. Die Funktionalität umfaßt die Selektion von ATKIS-Objekten, Objektteilen und Sicad-Geometrieelementen unter Vorgabe von Attributen und einer Suchregion sowie die Ausgabe von Attributen und Geometrie eines vorgegebenen Elementes. Außerdem können Überführungsrelationen und topologische Vernetzungen verfolgt werden. Die Abfrageergebnisse werden in Form von Listen zurückgeliefert.

3.4 Wissensrepräsentation

Das Wissen über die Objekte der Landschaft und ihre Ausprägung in ATKIS und in der Kartengraphik wird in Form eines semantischen Netzes repräsentiert. Semantische Netze bestehen aus Knoten und Relationen zwischen diesen. Die Knoten des semantischen Netzes repräsentieren die Landschaftsobjekte. Die Knoten enthalten Attribute und ggf. Methoden zur Extraktion der Objekte aus den Daten.

Die Attribute bestehen aus einem Wert und einem Wertebereich, denen jeweils Berechnungsmethoden zugeordnet sind. Der Wertebereich wird modellgetrieben bestimmt und im Verlauf der Interpretation durch die Berechnungsfunktion nach Möglichkeit eingeschränkt. Der Attributwert wird aus den Daten berechnet und an die übergeordneten Knoten propagiert.

Es werden zwei Arten von Knoten unterschieden: Konzepte und Instanzen. Die Konzepte beschreiben das generische Modell für die Objekte. Die Instanzen sind Realisierungen der Konzepte in der betrachteten Szene. Instanzen sind über *instance-of* Relationen mit dem zugehörigen Konzept verbunden. Während der Interpretation kann eine Instanz vier verschiedene Zustände annehmen: Hypothese, partielle Instanz, komplette Instanz und fehlende Instanz. Die Interpretation beginnt mit einer Hypothese, die mit den Attributen des Konzeptes initialisiert wird. Falls die Hypothese durch die Daten verifiziert wird, wird das Objekt partiell und anschließend komplett instanziiert. Eine partielle Instanz beschreibt einen Übergangszustand, bei dem alle untergeordneten obligatorischen Teile, die nicht kontextabhängig sind, vollständig instanziiert wurden. Ein Knoten ist vollständig instanziiert, wenn auch die kontextabhängigen Teile gefunden wurden. Die Falsifizierung durch die Daten ergibt eine fehlende Instanz.

Die Knoten sind durch verschiedene Relationen miteinander verbunden. Die Aufteilung eines Objektes in Teile wird durch die *part-of* Relation dargestellt. Hiermit wird die Objekterkennung auf eine einfachere Aufgabe, die Detektion der Teile, reduziert. Teile die erst erkennbar sind, wenn andere Teile bereits gefunden wurden, werden über die kontextabhängige *cdpart-of* Relation angebunden. Eine Spezialisierung von Objekten wird durch die *is-a* Relation beschrieben. Über diese Relation ist das Prinzip der Vererbung realisiert. Der Übergang von der abstrakten Beschreibung der Objekte in deren konkrete Repräsentation in den Daten wird über die *concrete-of* Relation, abgekürzt *con-of*, realisiert. Die *con-of* Relation ermöglicht die Unterscheidung verschiedener konzeptioneller Ebenen, wie z.B. Szenenebene, ATKIS-Ebene und Kartenebene. Über all diese Relationen werden Informationen vertikal, d.h. modellgetrieben (top-down) oder datengetrieben (bottom-up), propagiert. Eine Ausnahme stellen die *attributed-relations* dar, die auch Beziehungen zwischen Objekten gleicher Hierarchiestufe repräsentieren, wie z.B. die geometrische Beziehung „topologisch verbunden“. Diese Relationen besitzen Attribute, die den Wertebereich der Attribute benachbarter Knoten einschränken. Beispielsweise würde die topologische Vernetzung zweier Objekte in Teilen identische Randkoordinaten erfordern.

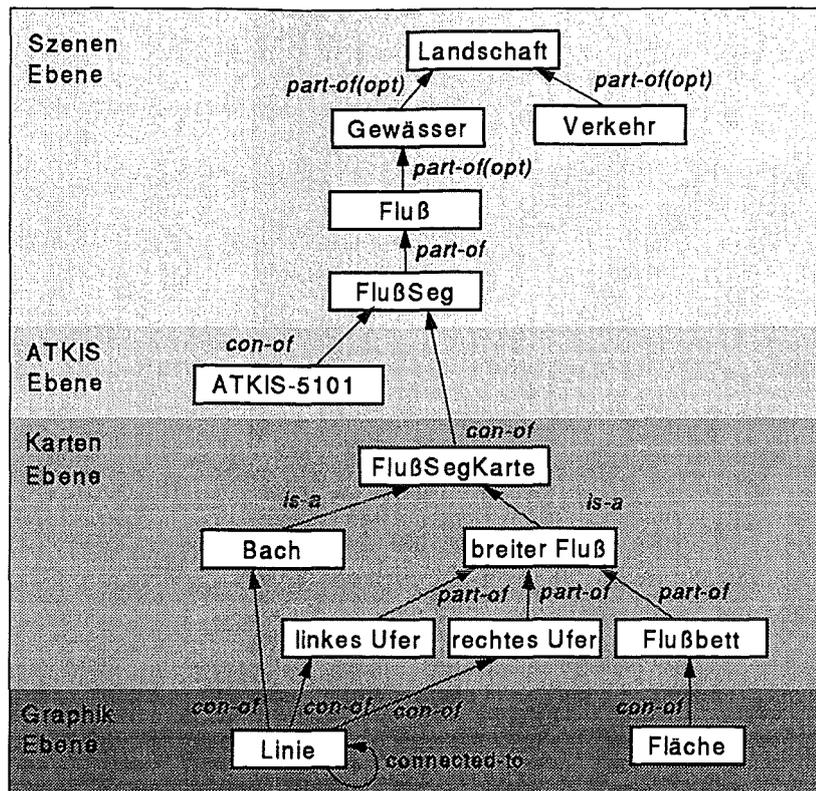


Abbildung 9: Wissensrepräsentation mit einem semantischen Netz

Der Formalismus der Wissensrepräsentation soll an einem einfachen Beispiel erläutert werden. Abbildung 9 zeigt ein semantisches Netz mit der Modellierung eines Flusses. Die ganz oben dargestellte Szenenebene enthält die abstrakte Beschreibung der Landschaft. Die Landschaft teilt sich in die optionalen Bereiche „Gewässer“ und „Verkehr“. Der Übersichtlichkeit halber werden weitere Objektbereiche nicht dargestellt. Der Objektbereich „Gewässer“ kann einen oder mehrere Flüsse enthalten. Das Auftreten dieser Objekte ist optional, was durch die *part-of(opt)* Relation dargestellt wird. Ein „Fluß“ besteht aus mindestens einem Flußsegment („FlußSeg“). Dies ist eine obligatorische Relation, dargestellt durch *part-of*.

Der Übergang von der abstrakten Beschreibung eines Flußsegmentes in der Szenenebene zur konkreten Repräsentation als ATKIS-Objektteil in der ATKIS-Ebene erfolgt durch die *con-of* Relation. Der Übergang zur Ausprägung des Flußsegmentes in der Karte erfolgt ebenfalls durch die *con-of* Relation. In Abhängigkeit von der Breite wird ein Fluß in der Karte als einlinige Signatur („Bach“) oder als doppellinige Signatur mit Flußbett („breiter Fluß“) dargestellt. Diese Aufteilung wird durch die Spezialisierungsrelation *is-a* repräsentiert. Über diese Relation ist das Prinzip der Vererbung realisiert, d.h. die untergeordneten Knoten erben alle Eigenschaften und Relationen des übergeordneten.

Ein „Bach“ besteht auf der Graphikebene aus einer oder mehreren miteinander verbundenen Linien („Linie“). Die Verbindung zwischen den einzelnen Linien wird durch die attributierte Relation *connected-to* modelliert. Ein breiter Fluß besteht aus einem „linken Ufer“ und einem „rechten Ufer“ sowie dem „Flußbett“, die alle als obligatorische Teile (*part-of*) des „breiten Flusses“ modelliert werden. Das „linke Ufer“ und „rechte Ufer“ bestehen auf der Graphikebene jeweils aus einer oder mehreren miteinander verbundenen „Linien“. Das „Flußbett“ wird auf der Graphikebene durch eine „Fläche“ dargestellt.

3.5 Ablauf der Interpretation

Während der Interpretation werden iterativ mit Hilfe von Regeln Hypothesen erzeugt, die modellgetrieben zu den unteren Knoten propagiert werden. Diese verifizieren oder falsifizieren die Hypothesen mittels Bildverarbeitungs- oder Abfragemethoden in den Daten. Die Regeln repräsentieren das prozedurale Wissen, mit dem die Reihenfolge der Analyse gesteuert wird. Eine Regel besteht aus einem Bedingungs- und einem Aktionsteil. Die Bedingung prüft, ob für die über Relationen benachbarten Knoten ein neuer Interpretationszustand vorliegt. Der Aktionsteil ändert den Interpretationszustand des betrachteten Knotens entsprechend. Dabei werden auch die Attribute des betrachteten Knotens neu berechnet, indem die Information der benachbarten Knoten propagiert wird. Bei einer modellgetriebenen Propagierung wird der Erwartungswert der Attribute eingeschränkt, bei einer datengetriebenen wird der aktuelle Attributwert neu berechnet.

Eine Menge von Regeln mit Prioritäten bildet eine Strategie. Die Regeln können in solche für die Instanzierung, Hypothesenpropagierung, Spezialisierung und Bindung von Knoten unterschieden werden. Die Regel zur initialen Instanzierung aus den Daten ruft die Berechnungsfunktion des betrachteten Knotens auf. Liefert die Berechnungsfunktion keine Daten, wird der Knoten als fehlende Instanz gekennzeichnet, anderenfalls als vollständige Instanz. Die Regel für die partielle Instanzierung eines Knotens ändert den Zustand von Hypothese in partielle Instanz, wenn alle obligatorischen, kontextunabhängigen Teile vollständig instanziiert sind. Eine andere Regel kennzeichnet den Knoten als vollständige Instanz, wenn auch die kontextabhängigen Teile gefunden wurden.

Für die Propagierung von Hypothesen gibt es jeweils Regeln für die verschiedenen Relationen (*part-of*, *part-of:inv*, *con-of*, *cdpart-of:inv*, *attributed-relation* usw.). Mit '*inv*' wird die inverse Richtung für die Propagierung bezeichnet. Die inverse Richtung ist modellgetrieben. Das Propagieren von Hypothesen über optionale und kontextabhängige Relationen erfolgt nur modellgetrieben, damit nicht übermäßig viele Hypothesen erzeugt werden.

Die Regel für die Spezialisierungsrelation überprüft die *is-a* Relationen und erzeugt konkurrierende Hypothesen für jede mögliche Spezialisierung. Die Bindungsregel überprüft, ob ein Knoten alle notwendigen Relationen besitzt. Falls Relationen fehlen, wird der Knoten mit einem anderen Knoten verschmolzen, der die komplementären fehlenden Bindungen besitzt. Eine Bindungsmethode, die die komplementären Knoten zurückliefert, muß vom Anwender bereitgestellt werden, ebenso wie die übrigen Berechnungsfunktionen.

Die Priorität der Regeln legt die Strategie der Analyse fest und kann vom Anwender konfiguriert werden. Generell haben Regeln, die einen Knoten partiell oder vollständig instanzieren, eine höhere Priorität als Regeln die neue Hypothesen erzeugen. Um die Analyse modellgetrieben auszuführen, müssen Regeln die Hypothesen modellgetrieben propagieren eine höhere Priorität erhalten, als solche die datengetrieben tun. Da attributierte Relationen den Suchraum einschränken, sollten sie eine hohe Priorität erhalten.

Die Reihenfolge, in der die Regeln ausgeführt werden, wird durch eine Inferenzmaschine gesteuert, die von allen anwendbaren Regeln die geeignetste auswählt. Dies geschieht abhängig von der Priorität der Regel und der Lage des Knotens. Regeln für Knoten, die näher an den Datenknoten liegen, werden bevorzugt, da dadurch eine schnellere Verifizierung der Hypothesen erreicht wird.

Nachdem eine Regel ausgewählt wurde, wird ihr Aktionsteil ausgeführt. Dadurch wird die Szenenbeschreibung verändert, da neue Instanzen und Relationen generiert werden oder der Interpretationszustand geändert wird. Die Szenenbeschreibung wird in einem Suchbaumknoten gespeichert, der alle Konzepte und Instanzen mit ihrem aktuellen Interpretationszustand enthält.

Wenn eine Regel konkurrierende Interpretationen erzeugt, spaltet sich der Suchbaumknoten in entsprechend viele Subsuchbaumknoten auf. Dies tritt auf, wenn eine Regel zur initialen Instanzierung mehrere Datenknoten zurückliefert, ein Knoten spezialisiert wird oder eine Bindungsregel mehrere komplementäre Knoten findet.

Die Inferenzmaschine wählt von den konkurrierenden Suchbaumknoten denjenigen aus, mit dem das Ziel der Interpretation auf dem kürzesten Weg erreichen wird. Dazu müssen die einzelnen instanziierten Knoten bewertet werden, indem die Kompatibilität zwischen den Erwartungswerten und den berechneten Werten bestimmt wird.

Die Interpretation ist vollständig, wenn ein vorher definiertes Zielkonzept vollständig instanziiert ist. Der Ablauf der Interpretation soll nun ansatzweise anhand des oben eingeführten Beispiels vorgeführt werden.

3.5.1 Instanzierung aus ATKIS-DLM25/1

Abbildung 10 zeigt auf der linken Seite einen Ausschnitt des Konzeptnetzes aus Abbildung 9, einen Fluß mit einer Konkretisierung im ATKIS-DLM25/1. Die rechte Seite der Abbildung zeigt eine Szenenbeschreibung. Ausgehend vom Konzept „Fluß“ wird eine hypothetische Instanz „Fluß-1“ generiert, die durch eine *instance-of* (*inst-of*) Relation mit dem Konzept verbunden ist. Modellgetrieben werden dann Hypothesen für ein Flußsegment („FlußSeg“) und das ATKIS-Objektteil („ATKIS-5101“) erzeugt.

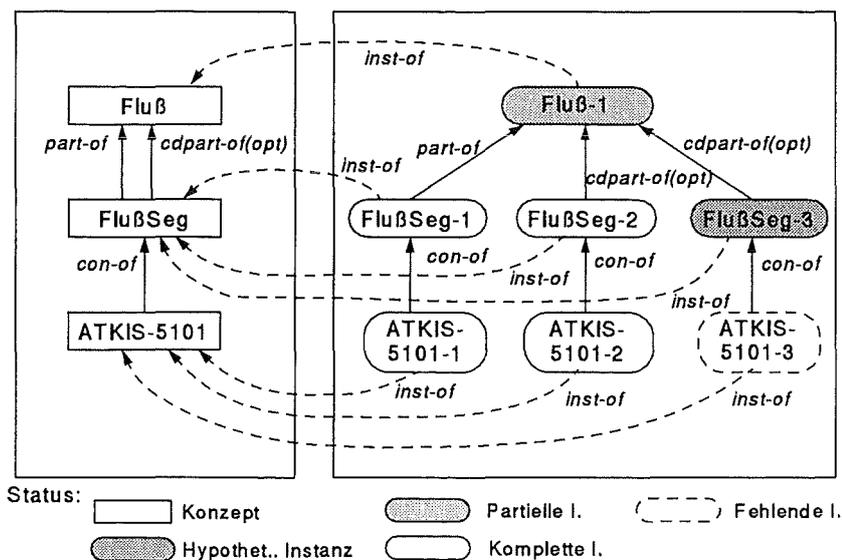


Abbildung 10: Ableitung einer Szenenbeschreibung aus ATKIS-Daten

Der Knoten „ATKIS-5101“ enthält eine Datenfunktion, die in der Szene nach einem entsprechenden Objektteil sucht. Da ein Objektteil gefunden wird, kann die hypothetische Instanz „ATKIS-5101-1“ in eine komplette Instanz umgewandelt werden. Dabei werden die Attributwerte der Instanz aus den Daten abgeleitet. Bottom-up werden dann auch die darüberliegenden Instanzen aktualisiert. Dabei werden Attributwerte datengetrieben propagiert. „FlußSeg-1“ kann vollständig instanziiert werden, „Fluß-1“ wird zunächst in eine partielle Instanz gewandelt, da optional noch weitere Flußsegmente vorhanden sein könnten. Es wird eine Hypothese für ein weiteres Flußsegment aufgestellt und entsprechend in den Daten verifiziert. Bei der Verifikation der Hypothese für ein drittes Flußsegment werden keine Daten gefunden und die Hypothese für das ATKIS-Objektteil wird auf den Status einer fehlenden Instanz gesetzt. Dies ist der Zustand der in Abbildung 10 gezeigt wird. Im weiteren Verlauf der Interpretation wird dann die Hypothese für das dritte Flußsegment als fehlende Instanz markiert. „Fluß-1“

kann jetzt in eine vollständige Instanz umgewandelt werden, da alle obligatorischen Teile gefunden wurden und keine weiteren optionalen Teile mehr vorhanden sind.

3.5.2 Instanziierung aus der Karte

Auf diese Art kann eine vollständige Szenenbeschreibung unter Berücksichtigung der ATKIS-Daten erzeugt werden. Diese initiale Szenenbeschreibung kann nun als Vorwissen für die Karteninterpretation genutzt werden. Dazu wird das semantische Netz aus Abbildung 10 um die Konzepte der Kartenebene ergänzt. Dabei werden automatisch alle Knoten deren Konzepte dadurch neue Teile erhalten auf den Status hypothetische Instanz zurückgesetzt, auch wenn sie bereits vollständig instanziiert wurden. Das ist nötig, um Inkonsistenzen zu vermeiden. Ein Ausschnitt der dadurch entstandenen neuen Szenenbeschreibung ist in Abbildung 11 zu sehen. Es sei darauf hingewiesen, daß die Aufspaltung des Suchbaumknotens durch die Spezialisierung des Flußsegmentes in der Karte als „Bach“ und „breiter Fluß“ in dem Beispiel nicht nachvollzogen wird. Es wird der Suchbaumknoten mit der Hypothese „breiter Fluß“ weiterverfolgt. Aufgrund der Vererbungsregeln ersetzt dieser Knoten den Knoten „FlußSeg-Karte“.

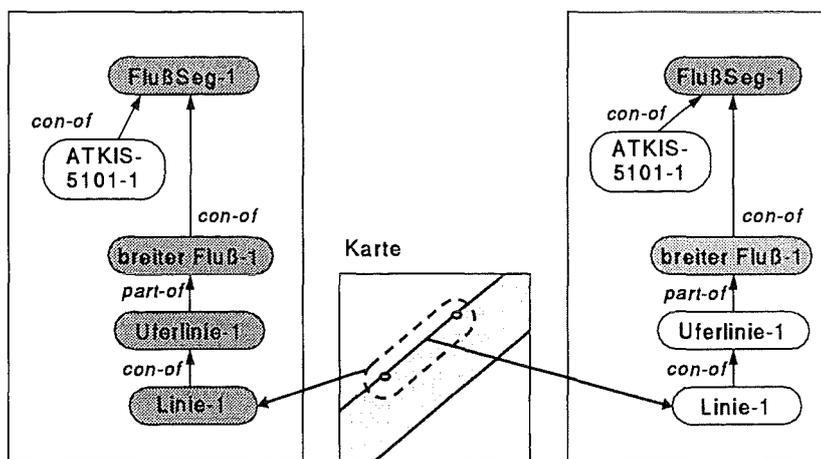


Abbildung 11: Ableitung einer Szenenbeschreibung aus der Karte

Auf der linken Seite wurden modellgetrieben, ausgehend von der nun wieder hypothetischen Instanz „FlußSeg-1“, Hypothesen für „breiter Fluß“, „Uferlinie“ und „Linie“ generiert. Dabei wurden auch die Erwartungswerte der Attribute, entsprechend den aus der vorherigen Instanzierung des Flußsegmentes aus den ATKIS-Daten gewonnenen Werten, top-down propagiert. Die Datenfunktion des Knotens Linie kann auf diese Werte zurückgreifen, um die Abfrageoperation zu konfigurieren. In diesem Fall wird die bekannte Geometrie des ATKIS-Objektteils genutzt, um einen Pufferbereich zu generieren, in dem dann nach Linien gesucht wird. Da die gesuchten Linien Konkretisierungen der Uferlinie darstellen, sind auch Erwartungswerte für die Linienbreite und Ursprungsfolie bekannt. Aus diesen Daten wird eine Abfrage an die Schnittstelle erzeugt. Wenn eine passende Linie gefunden wird, kann die Hypothese vollständig instanziiert werden. Die darüberliegenden Instanzen werden bottom-up aktualisiert. Dabei werden die aus den Daten berechneten Attribute ebenfalls weitergereicht. Der Knoten „breiter Fluß-1“ wird erst vollständig instanziiert, wenn auch die im Beispiel nicht dargestellte andere Uferlinie und das Flußbett gefunden wurden. Dann kann auch das „FlußSeg-1“ vollständig instanziiert werden. Die so erzielte Szenenbeschreibung enthält dann einen direkten Bezug zwischen den ATKIS-Objekten und den Elementen der Karte.

3.6 *Schluß*

Das vorgestellte Verfahren basiert zum eine auf der expliziten Repräsentation des Wissens über die Landschaft mit ihren unterschiedlichen Ausprägungen im DLM25 und in der TK25, zum anderen auf der Möglichkeit des direkten Zugriffs auf die Daten des ATKIS DLM25/1 während der Interpretation. Das wurde durch die Einbindung einer Abfrageschnittstelle für GIS-Daten in das Interpretationssystem ermöglicht.

Das Verfahren wurde für die Extraktion des Gewässernetzes aus der TK25 erfolgreich getestet. Die so gewonnene Szenenbeschreibung enthält explizit die Beziehungen zwischen ATKIS-Objekten und den Elementen der Karte. Dadurch wäre es möglich, in einer nachgeschalteten Analyse Unterschiede zwischen dem DLM25 und der TK25 zu untersuchen. Diese Beziehungen könnten auch verwendet werden, um aus der Karte Objekte zu extrahieren, die im ATKIS DLM25/1 noch nicht erfaßt wurden. Diese Kartenobjekte könnten, z.B. über Nachbarschaftsbeziehungen, in einen Bezug zum DLM gesetzt werden und zur automatisierten Ableitung von Karten verwendet werden.

3.7 *Danksagung*

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des von der DFG geförderten Projektes „Wissensbasiertes System für die automatisierte Erfassung von Objekten aus Sensordaten und Karten“, das an der Universität Hannover gemeinsam vom Institut für Kartographie, dem Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen sowie dem Institut für Theoretische Nachrichtentechnik und Informationsverarbeitung bearbeitet wird.

3.8 *Literatur*

- [1] AdV (Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland): *Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem ATKIS*. Gesamtdokumentation Teil D, Hannover. 1995.
- [2] Ebi, N.: *Eine Methodik zur frame-basierten Modellierung und Bildinterpretation von topographischen Karten mittleren Maßstabs*. In: G. Bahrenberg u. a. (Hrsg.): „Bremer Beiträge zur Geographie und Raumplanung“, Heft 26, Universität Bremen, Bremen. 1993
- [3] Hake, G., Grünreich, D.: *Kartographie*. 7. Auflage, de Gruyter, Berlin - New York, 1994.
- [4] H. Koch, K. Pakzad, R. Tönjes: *Knowledge Based Interpretation of Aerial Images and Maps Using a Digital Landscape model as Partial Interpretation*. In: Semantic Modeling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps SMATT'97, Ed. Förstner/Plümer, Birkhäuser Verlag. Mai 1997. pp. 3-19.
- [5] Lauterbach, H.: *Extraktion attributierter Strukturprimitive aus kartographischen Vorlagen auf der Basis einer multispektralen Bildanalyse*. In: G. Bahrenberg u. a. (Hrsg.): „Bremer Beiträge zur Geographie und Raumplanung“, Heft 27, Universität Bremen, Bremen. 1993.
- [6] Lichtner, W.: *RAVEL - ein Programm zur Raster-Vektor-Transformation*. Kartographische Nachrichten. Heft 2/1987. Seiten 63-68.

4 Computergestützte Klassifikation von Wildbienen mit Methoden der Bildanalyse

Volker Roth⁵, Stefan Schröder⁶, Armin B. Cremers¹, Wilhelm Drescher²,
Volker Steinhage¹, Dieter Wittmann²

4.1 Einleitung

Die biologische Bedeutsamkeit von Wildbienen (*Apidae*, *Hymenoptera*) liegt neben ihrer wichtigen Bestäuberfunktion in der Natur in ihrer hervorragenden Eignung als Bioindikatoren zur Biotopbewertung. Der praktische Einsatz einer solchen Biotopbewertung z.B. in Umweltgutachten war bisher jedoch durch die sehr schwierige Bestimmung der einzelnen Wildbienenarten stark limitiert.

Ziel des Projektes ist die automatisierte morphometrische Identifikation von Wildbienen durch computergestützte Bildverarbeitungs- und Klassifikationstechniken. Das Identifikationssystem von Wildbienen soll als Feldmethode zur Erhebung und Bewertung von Naturräumen einsetzbar sein. Die heutigen umweltpolitischen Rahmenbedingungen verlangen für die Planung und Bewertung von Landschaftsbestandteilen, sowie Eingriffe in diese, immer präzisere Daten in immer kürzerer Zeit bei knapper werdenden Geldmitteln. Die automatisierte Identifikation soll die Zahl an Wildbienenenerhebungen erhöhen, um die drastischen Lücken in unserem faunistischen Kenntnisstand zu schließen. Dieses bildet die Grundlage für nachvollziehbare Bewertungen von Naturzuständen im Rahmen der Landschaftsplanung, es ermöglicht den indikatorischen Einsatz dieser Tiergruppe (siehe Schröder, 1996 [5]) und kann durch die objektive Feststellung der Gefährdung von Wildbienenarten zu Artenschutzprogrammen (Westrich und Schwenninger, 1997 [9]) führen. Als Feldmethode mit der Möglichkeit einer Lebendbestimmung eröffnet sie die Anwendung von Methoden zum Abschätzen von Populationsgrößen und für die Durchführung umfangreicher Monitoringuntersuchungen im Rahmen von Biotopentwicklungsstudien und Effizienzkontrollen. Eine Reihe von innovativen Methoden, insbesondere Methoden der Biochemie und der Molekulargenetik, erlauben es dem Biologen heute, die bisherigen Grenzen der klassischen Taxonomie zu überschreiten. Gegenüber diesen relativ aufwendigen und nur unter Laborbedingungen verfügbaren Verfahren bieten computergestützte Verfahren der Bildverarbeitung jedoch eine Reihe von Vorteilen:

- Geringer apparativer Aufwand, dadurch sind diese Verfahren kostengünstig
- Verwendung transportabler Apparate, dadurch wird der Einsatz unter Freilandbedingungen möglich
- Lebendbestimmung an betäubten Tieren möglich
- einfache Bedienbarkeit, keine Spezialkenntnisse erforderlich

Diese Vorteile exponieren computergestützte Verfahren der Bildverarbeitung als Bindeglied zwischen klassischer Taxonomie und Verfahren der Biochemie und Molekulargenetik. Ausgangspunkt unserer Untersuchungen sind digitalisierte Bilder von Bienenflügeln, in denen bei einer Durchlichtaufnahme deutlich eine Aderstruktur sichtbar. (siehe Abbildung 12).

⁵ Institut für Informatik, Römerstr. 164, 53117 Bonn

⁶ Institut für Landwirtschaftliche Zoologie und Bienenkunde, Melbweg 42, 53127 Bonn

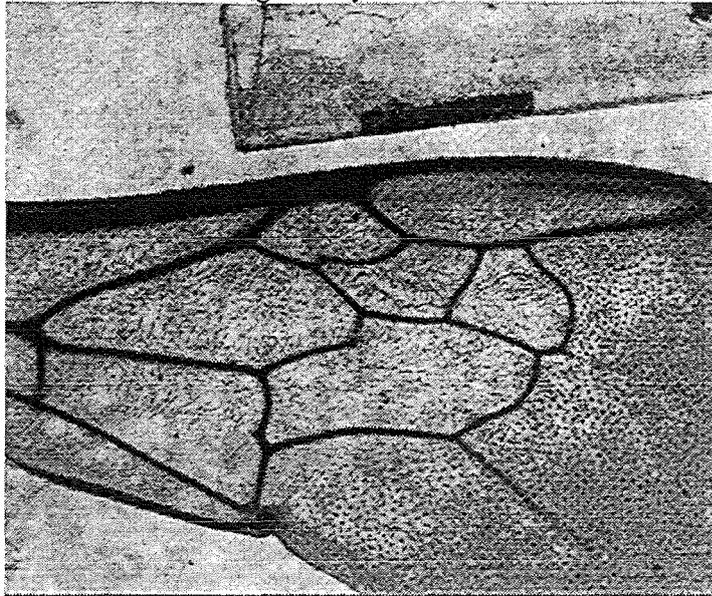


Abbildung 12: Durchlichtaufnahme eines Bienenflügels unter dem Mikroskop

Es konnte eindrucksvoll gezeigt werden, daß die genaue Form dieses Adermusters stark genetisch fixiert ist und zur Identifikation der einzelnen Arten herangezogen werden kann. An den Bienen gewonnene morphometrische Daten müssen zusammen mit den systematischen, biogeographischen, ökologischen und sammlungsspezifischen Daten nicht nur gespeichert werden, sondern es muß anderen Interessierten ein direkter und standardisierter Zugang zu diesen Daten ermöglicht werden. Dieses Problem ist nicht projektspezifisch, sondern ist z.Z. eines der dringendsten Anliegen von Systematikern, Biologen, Naturschützern und den Leitern von Sammlungen. Zügige Fortschritte in der Systematik und der Kenntnis der Arten, wie in *AGENDA SYSTEMATIK 2000* (Steininger, 1996 [7]) gefordert, sind in den nächsten Jahrzehnten nur dann zu erwarten, wenn es gelingt, die Informationen der biologischen Sammlungen der Welt in elektronischen Datenbanken den Interessierten der weltweit zur Verfügung zu stellen. Für den Datenaustausch ist hierbei besonders wichtig, anerkannte Standards für die Datenstruktur zu schaffen (z.B. Berendson et al., 1996 [2]; Askevold und O'Brien, 1994 [1]).

4.2 Hierarchische Klassifikation der Bienen

Angelehnt an die hierarchische Klassifikation in der zoologischen Systematik wurde auch hier ein hierarchisches Strategiekonzept gewählt. In der klassischen Taxonomie werden die Wildbienen zuerst anhand von Entscheidungstabellen in Gruppen eingeteilt. Anschließend wird dann innerhalb dieser Gruppen eine Artbestimmung durchgeführt. Die Umsetzung dieses Ansatzes führte dann zu einem mehrstufigen Klassifikationssystem. Es entstand das in (Steinhage et al., 1997 [6]) beschriebene Prototyp-System (s. Abbildung 13), welches eine dreistufige Klassifikationshierarchie verwendet

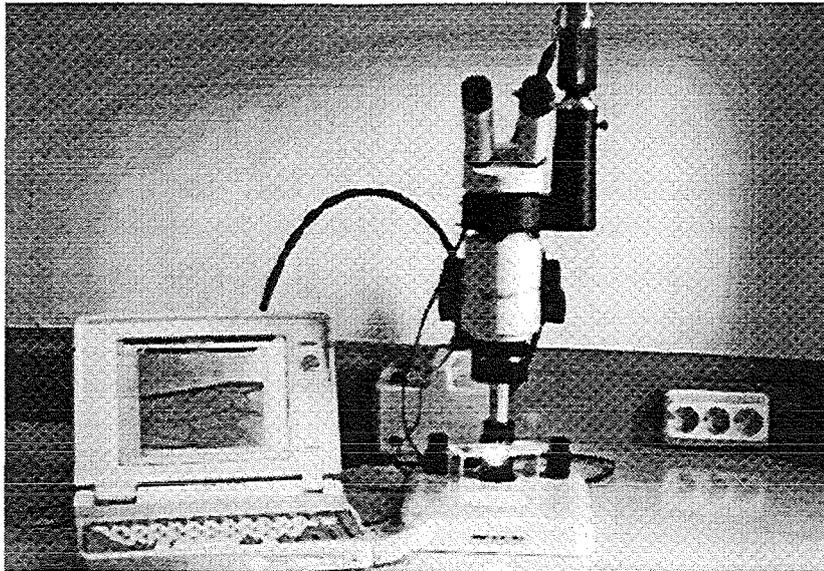


Abbildung 13: Das Prototypsystem im Überblick

Der Klassifikation geht der Prozeß der Merkmalsextraktion voraus: Ausgehend von markanten Punkten im Flügelbild wird das vollständige Adernetz per Linienverfolgung extrahiert. Es entsteht der sog. Adergraph. Innerhalb aller 550 in Mitteleuropa vorkommenden Wildbienenarten konnten wir 9 topologisch verschiedene Graphtypen identifizieren, die mitsamt der Benennungen ihrer Einzelbestandteile (Labels) in einer Datenbank abgelegt wurden.

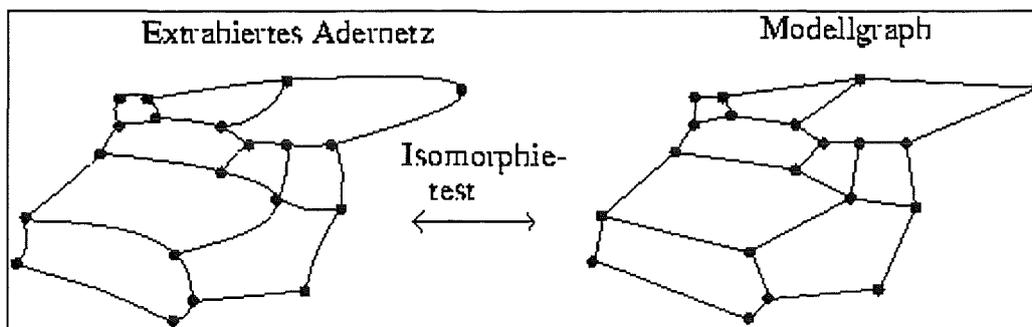


Abbildung 14: Isomorphietest zwischen extrahiertem Adernetz und einem Modellgraphen

Der aktuelle Graphyp einer zu untersuchenden Biene wird in der ersten Klassifikationsstufe mittels eines Isomorphietests einem der Mustergraphen zugeordnet. Dadurch ist es möglich, auch die Labels des Mustergraphen (d.h. die zoologischen Bezeichnungen der Kanten, Knoten und Zellen) zu übernehmen. Dies ist in Abbildung 14 verdeutlicht. Die somit identifizierten Bestandteile werden dann anhand der extrahierten Bilddaten vermessen, und es entsteht ein attributierter, planarer Graph, der den Ausgangspunkt für die nächste Hierarchiestufe darstellt: Eine Biene wird anhand von leicht zu beobachtenden Flügelmerkmalen einer Gattung bzw. einer Gruppe von Gattungen zugeordnet. Die dazu verwendeten Merkmale werden auch in der klassischen Taxonomie verwendet und sind in umfangreichen zoologischen Schlüsseln abgelegt. Die abschließende Klassifikationsstufe bildet eine einfache Version einer statistischen

Diskriminanzanalyse, die *Lineare Diskriminanzanalyse* nach FISCHER (siehe Duda und Hart, 1973 [3]).

4.3 Aktuelle Arbeiten und Ergebnisse

Unsere aktuellen Arbeiten konzentrieren sich auf eine Erweiterung des Diskriminanzmodells und auf eine Erhöhung des Automatisierungsgrades der Bildverarbeitung.

Die Methodik der Diskriminanzanalyse läßt sich allgemein als *überwachtes statistisches Lernproblem* formulieren: Gesucht ist ein funktionaler Zusammenhang zwischen morphometrischen Flügeldaten und der Artzugehörigkeit unter Verwendung einer begrenzten Anzahl von Beobachtungen. Diese Beobachtungen sind hier extrahierte Flügelnetze von Wildbienen, deren Artzugehörigkeit von einem „Lehrer“ (Zoologen) vorhergesagt wurde. Bei der im oben erwähnten Prototypen verwendeten *Linearen Diskriminanzanalyse* werden die verschiedenen Klassen (Arten) durch lineare Diskriminanzfunktionen getrennt. Diese linearen Funktionen bestimmen klassentrennende Hyperebenen im Raum der Merkmale. Formal ableiten läßt sich dieses Modell unter der Annahme, daß die zu einer Klasse gehörenden Objekte multivariat-normalverteilt sind mit einer über alle Klassen identischen Kovarianzmatrix.

Dieses einfache Modell erwies sich bei vielen Arten als ein geeignetes Klassifikationswerkzeug und erlaubt aufgrund der damit einhergehenden niedrigdimensionalen Datenrepräsentation eine gute *Visualisierung* der Daten. Datenstrukturen werden dadurch einer intuitiven Interpretation seitens des Anwenders zugänglich. Aktuelle Untersuchungen haben insbesondere gezeigt, daß dieses Modell auch sehr gut zur *Vorklassifikation auf Gattungsniveau* einsetzbar ist. Dies führte zu einer Neugestaltung der zweiten Hierarchiestufe des Gesamtsystems mit Methoden der statistischen Klassifikation.

Bei solchen Bienenarten, die in Sozialgemeinschaften leben und daher aufgrund von Kastenunterschieden eine große innerartliche Variabilität aufweisen, wie z.B. bei den verschiedenen Arten der Gattung *Bombus* (Hummeln), zeigten unsere neueren Untersuchungen, daß ein lineares Diskriminanzmodell nicht ausreichend sensitiv für eine gute Klassentrennung ist. Eine wesentliche Verbesserung zeigten die modernen Klassifikationsmethoden mit *Support Vector Machines* nach Vapnik, 1995 [8] und Methoden der Merkmalsextraktion durch *Nichtlineare Eigenwertanalyse* nach Schölkopf et al., 1997 [4]. Die Nichtlineare Eigenwertanalyse kann ähnlich wie die klassische Eigenwertanalyse (oder *Principal Component Analysis*, PCA) zur Extraktion von Strukturen in Daten herangezogen werden. Im Gegensatz zu PCA-Verfahren, kann ein solches nichtlineare Verfahren auch Korrelationen höherer Ordnung in den Daten berücksichtigen und somit evtl. Merkmale mit höherem Informationsgehalt extrahieren. Die Klassifikatoren nach dem *Support Vector*-Prinzip sind nicht auf die Klassentrennung mittels linearer Funktionen angewiesen, sondern wählen aus einem großen Set unterschiedlicher Trennfunktionen (z.B. polynomiale Funktionen bis zur 10. Ordnung) diejenige Funktionenklasse aus, die im Sinne einer wahrscheinlichkeitstheoretisch definierten *Risikominimierung* optimal ist.

Diese nichtlinearen Verfahren wurden im Rahmen einer weiteren Hierarchiestufe bei schwer zu trennenden Artenkomplexen in das Gesamtsystem integriert. Das so modifizierte Diskriminanzmodell führte zu hervorragenden Klassifikationsergebnissen, die mit den Resultaten einer klassischen taxonomischen Klassifikation durch einen erfahrenen Systematiker mindestens vergleichbar sind.

Im Detail seien im Folgenden unsere Untersuchungen am Beispiel der Gattungen *Bombus* und *Colletes* dargestellt. Abbildung 15 gibt einen Überblick über die Vorklassifikation auf Gattungsniveau. Einem Klassifikator wurden Lernexemplare von jeweils neun *Bombus*- und *Colletes*-Arten zur Verfügung gestellt. Gezeigt ist die zweidimensionale Repräsentation der

mittels eines linearen Diskriminanzmodells getrennten Arten. Deutlich erkennt man zwei ausgeprägte Häufungspunkte, oben den der *Bombus*-Arten, unten denjenigen der *Colletes*-Arten. Die Trennung beider Gattungen war problemlos möglich, eine *Leave-one-out Cross-Validierung* ergab eine Klassifikationsrate von 100 % .

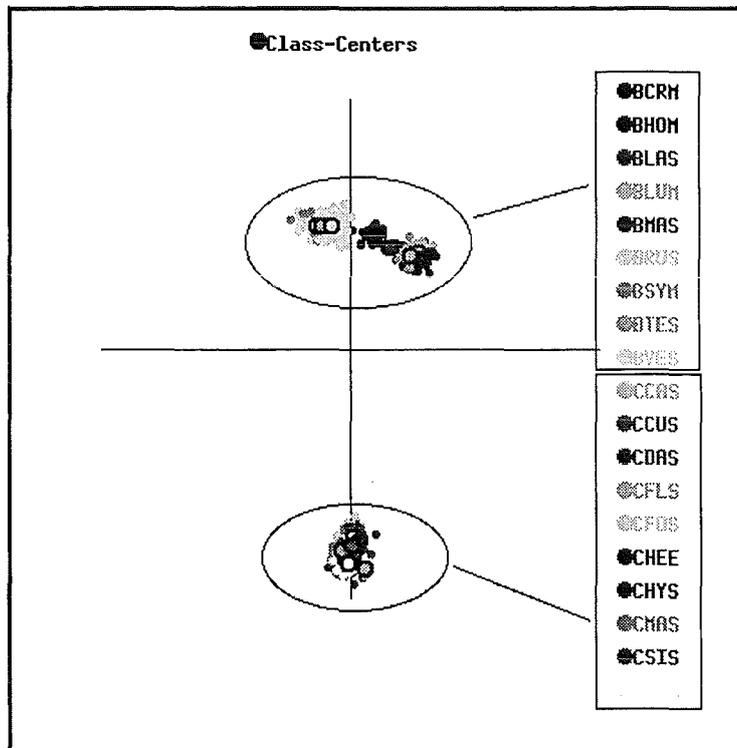


Abbildung 15: Klassifikation von jeweils 9 Arten der Gattungen *Bombus* und *Colletes*. Gezeigt sind die 2 größten Dimensionen eines tatsächlich 17 dimensional Graphen. (Bei 18 Klassen werden 17 Hyperebenen zur Klassentrennung berechnet). Die großen Kreise markieren die Klassenmittelpunkte. Rechts im Bild erkennt man die Abkürzungen für die jeweiligen Bienenarten, z.B. steht BTES für die Art *Bombus terrestris*. Analog beginnen die Arten der Gattung *Colletes* mit dem Buchstaben C.

Ziel der weiteren Klassifikationsstufen ist die Trennung der einzelnen Arten innerhalb der jetzt separierten Gattungen. Abbildung 16 gibt einen Überblick über die Klassifikation der neun *Colletes*-Arten mit dem gleichen Diskriminanzmodell wie in Abbildung 15. Ein erneuter Klassifikationstest mittels einer *Leave-one-out Cross-Validierung* zeigte hierbei jedoch nicht völlig zufriedenstellende Klassifikationsergebnisse von 97.1% .

Durch den Einsatz einer verbesserten Merkmalsextraktion mit einer nichtlinearen Eigenwertanalyse nach Schölkopf et al., 1997 [4] konnten die Arten wesentlich besser separiert werden, was Klassifikationsraten von 99.3% (entsprechend 2 fehlklassifizierte Bienen von insgesamt 301) zur Folge hatte. Die nichtlineare Eigenwertanalyse basiert auf folgendem Prinzip: Die Datenvektoren, die die einzelnen Flügel repräsentieren, werden durch eine nicht-lineare Transformation in einen hochdimensionalen Raum transformiert, in dem man sich eine bessere Trennung der Arten erhofft. In diesem Raum erfolgt dann wieder eine Dimensionsreduktion.

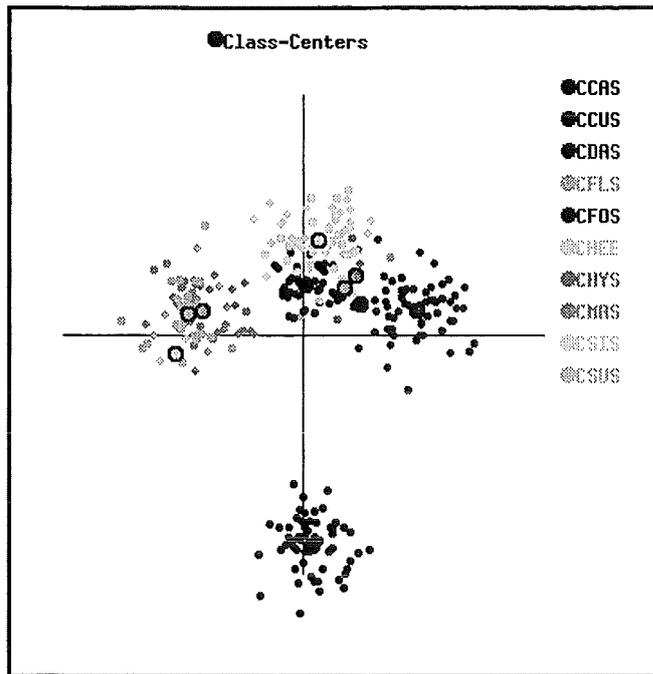


Abbildung 16: Klassifikation von 9 Arten der Gattung *Colletes*. Diese Darstellung zeigt die Trennung des in Abbildung 15 kaum auflösbaren unteren Artenkomplexes.

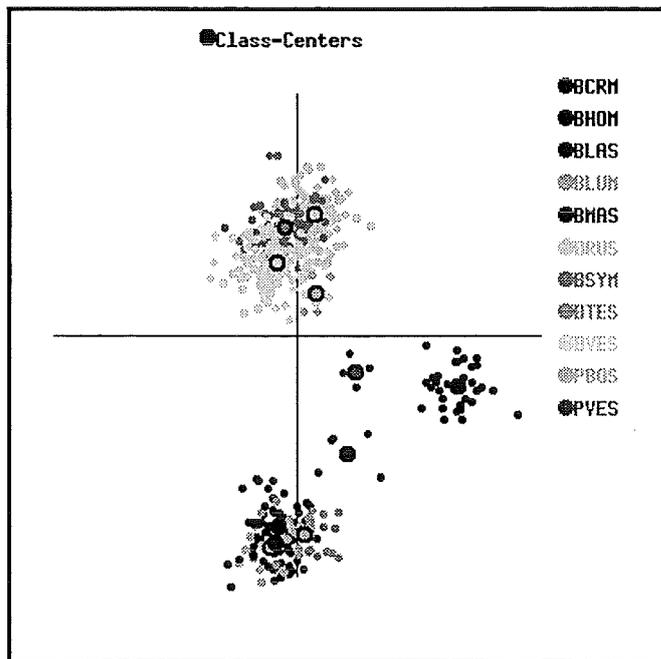


Abbildung 17: Klassifikation von 9 Arten der Gattung *Bombus*.

mittels einer Hauptachsentransformation, die die für eine Artentrennung relevanten Merkmale, d.h. diejenigen Merkmale mit der größten Varianz, extrahieren soll. Die Probleme der Berechnung von Hauptachsen in solch hochdimensionalen Räumen werden durch die Verwendung einer sog. *Kernel-Methode* gelöst, die Autoren nennen dieses Verfahren *Kernel Principal Component Analysis*. Analog zu Abbildung 16 Abbildung 5 zeigt Abbildung 17 die Trennung der *Bombus*-Arten mittels des einfachen linearen Modells. Man erkennt (ähnlich wie in Abbildung 15 auf Gattungsniveau) zwei ausgeprägte Häufungspunkte bzw. Artenkomplexe,

die zoologisch eng verwandte Arten beinhalten. Zusätzlich sind noch 3 weitere Arten zu sehen, die zu keinem der beiden Komplexe gehören. In einer zusätzlichen Hierarchiestufe wurden zuerst diese drei Arten und die zwei Komplexe voneinander getrennt; die Trennung der Arten innerhalb der Komplexe geschah dann wieder durch eine vorhergehende nichtlineare Eigenwertanalyse. Somit konnten auch die Arten der Gattung *Bombus*, die in der Zoologie als sehr schwierig zu trennen gelten, mit einer Klassifikationsrate von 98.1% bestimmt werden. Untersucht wurden 483 Bienenexemplare, 9 wurden fehlerhaft klassifiziert.

Untersuchungen zum zweiten Schwerpunkt unserer Tätigkeit, der weitestgehenden Automatisierung der Graphextraktion, sollen in erster Linie eine Standardisierung der Bildverarbeitung ermöglichen. Die Entkopplung der gegenwärtig interaktiv gesteuerten Extraktion des Adergraphen vom Benutzer soll in Zukunft die Austauschbarkeit erhobener Daten garantieren. Insbesondere sollen bereits bearbeitete Datensätze verschiedenen Benutzern in einer Datenbank zugänglich gemacht werden, was die Verbreitung des Systems und den Übergang von unserem Prototypen zu einem benutzerfreundlichen Werkzeug ermöglichen soll. In diesem Zusammenhang bestehen bereits Kontakte zum Museum *Alexander Koenig*, Bonn, mit dem Ziel, die Flügelbilder der Bienen aus den vorhandenen Museumsbeständen mit in die gerade im Aufbau befindliche Museums-Datenbank aufzunehmen. Die zentrale Speicherung der Bilddateien hätte zudem den Vorteil, daß Ergebnisse unseres automatisierten Bestimmungssystems jederzeit von Taxonomie-Experten validiert werden können.

4.4 Zusammenfassung und Ausblick

Unsere Untersuchungen haben gezeigt, daß Wildbienen mit hoher Bestimmungssicherheit durch computergestützte Methoden der Bildverarbeitung und der statistischen Klassifikation identifiziert werden können. Die bei den als schwer bestimmbar geltenden Arten der Gattungen *Colletes* und *Bombus* erzielten Klassifikationsergebnisse von 99.3 % bzw. 98.1% sind als zumindest gleichwertig zur Bestimmung durch erfahrene Taxonomen anzusehen. Im Gegensatz zu herkömmlichen Bestimmungsmethoden erfordert unser Ansatz, eine Lernmaschine anhand von bereits bestimmten Musterexemplaren zu trainieren, taxonomisches Spezialwissen jedoch nur während der Lernphase. Nach und nach entsteht so ein auch vom „Laien“ zu bedienendes Bestimmungswerkzeug. Insbesondere könnte dadurch der Einsatz von Wildbienen als Bioindikatoren für Umweltgutachten wesentlich populärer werden, da dies momentan meist an den zu hohen Kosten aufgrund der schwierigen und nur wenigen Experten vorbehaltenen Bestimmung scheitert. Das von uns entwickelte System ist durch den Einsatz eines Notebook-PCs und einer kleinen CCD-Kamera transportabel und ermöglicht somit eine sichere Lebendbestimmung der Bienen (nach Betäubung) im Freiland. In Zukunft soll die Erhöhung der Robustheit der Bildverarbeitung die Bedienungsfreundlichkeit wesentlich erhöhen, und somit den Übergang von unserem Prototypen zu einem universell einsetzbaren Bestimmungswerkzeug erleichtern.

4.5 Literatur

- [1] Askevold, I.; O'Brien, C.: *DELTA, an invaluable computer program for generation of taxonomic monographs*. Ann. Entomol. Soc. Am. 87. 1994. pp. 1-16.
- [2] Berendson, W.; Greilhuber J., Anagnostopoulos A., Bedini G., Jakupovic J., Nimis P.L., Valdes B.: *A comprehensive datamodel for karyological databases*. Plant Syst. Evol. 205. 1996. pp. 85-98.
- [3] Duda, R. O., Hart P.E.: *Pattern Classification and Scene Analysis*. Wiley & Sons. 1973.

1. Workshop „Wissensbasierte / Intelligente Systeme in Umwelthanwendungen“ UI '98

- [4] Schölkopf, B.; Smola, A.; Müller, K. R.: *Kernel Principal Component Analysis*. ICANN 1997, Springer Lecture Notes in Computer Science. 1997. pp. 583.
- [5] Schröder, S.: *Untersuchungen der Wildbienenfauna (Hymenoptera, Apidae) im Naturschutzgebiet „Düsseltal“*. Insecta, Berlin 4. 1996. Seiten 105-111.
- [6] Steinhage, V.; Kastenholz, B.; Schröder, S.; Drescher, W.: *A Hierarchical Approach to Classify Solitary Bees Based on Image Analysis*. In: Mustererkennung 1997, 19. DAGM-Symposium, Braunschweig, Informatik Aktuell, Springer. 1997. Seiten 419-426.
- [7] Steininger, F. F.: *AGENDA SYSTEMATIK 2000*. Erschließung der Biosphäre. Kleine Senckenberg-Reihe Nr. 22, Waldemar Kramer Verlag, Frankfurt am Main. 1996.
- [8] Vapnik, V.: *The Nature of Statistical Learning Theory*. Springer: New York. 1995.
- [9] Westrich, P.; Schwenninger, H. R.: *Habitatwahl, Blütennutzung und Bestandsentwicklung der zweizelligen Landbiene (Andrena lagopus Latr.) in Südwest-Deutschland (Hymenoptera, Apidae)*. Z. Ökologie und Naturschutz 6. 1997. Seiten 33-42.

5 Effiziente Interpretation multipler Meßdaten mittels Entscheidungsbauminduktion

Michael Boronowsky*

Abstract: Das automatische Bestimmen von Zusammenhängen in Zeitreihen ist ein Themengebiet, das eine große Relevanz besitzt. In diesem Artikel wird ein Verfahren vorgestellt, mit dem qualitative Zusammenhänge in Zeitreihen kontinuierlicher Funktionen gefunden werden können. Das Verfahren basiert auf der Induktion von Entscheidungsbäumen unter Verwendung kontinuierlicher Funktionsverläufe, die durch stückweise lineare Funktionen approximiert werden.

Der hier vorgestellte Ansatz resultiert aus einer Kooperation innerhalb eines interdisziplinären Forschungsvorhabens an der Universität Bremen, das sich mit der Umsetzbarkeit produktionsintegrierter Umweltschutztechnik auseinandersetzt.

5.1 Einleitung und Motivation

Im Rahmen der FNK-Forschungsförderung wird an der Universität Bremen ein Projekt durchgeführt, das sich mit der Untersuchung der Umsetzbarkeit *produktionsintegrierter Umweltschutztechnik* auseinandersetzt. Insgesamt sind elf Teilprojekte mit natur- und geisteswissenschaftlicher Ausrichtung an dem Gesamtvorhaben beteiligt.

Zentraler Forschungsgegenstand der naturwissenschaftlichen Teilprojekte ist ein Suspensions-Membranreaktor (Räbiger et. al., 1996 [9]), der für die selektive Elimination gefährlicher Stoffe aus Industrieabwässern eingesetzt wird. Eine wichtige Kooperation innerhalb des Gesamtprojektes ist die Zusammenarbeit zwischen Mikrosystemtechnik und Informatik, also zwischen Sensorentwicklung auf der einen und Sensordatenverarbeitung auf der anderen Seite. Die Mikrosystemtechnik wird durch das Institut für Mikrosensoren, -aktuatoren und -systeme (IMSAS), und die intelligente Meßdateninterpretation wird durch das Technologie-Zentrum Informatik (TZI) - Bereich Intelligente Systeme - vertreten, beides Institute der Universität Bremen.

Das Teilprojekt der Sensorentwicklung befaßt sich mit der Entwicklung spezieller Sensorik auf Basis von *Interdigitalstrukturen (IDS)* für die Bestimmung des 3-Chlorbenzoesäuregehaltes in Industrieabwässern. Interdigitalstrukturen sind fächerartige Elektrodenstrukturen, mit denen Leitfähigkeit und Kapazität von Flüssigkeitsgemischen mit hoher Sensitivität bestimmt werden können. Da IDS-Sensoren auf einem physikalischen Meßprinzip beruhen, ist es nicht ohne weiteres möglich, Konzentrationen bestimmter chemischer Verbindungen selektiv zu bestimmen. Um die Selektivität - also das Maß für die Exklusivität einer erfaßten Größe - eines IDS-Sensors zu steigern, ist es notwendig, die Daten des Sensors in einem breiteren Kontext zu interpretieren. An diesem Punkt setzt das Projekt für die intelligente Interpretation der Sensordaten an. Die intelligente Meßdateninterpretation verfolgt im wesentlichen das Ziel, vorhandene Zusammenhänge zwischen den Meßdaten des IDS-Sensors und den restlichen Meßdaten, die im Rahmen der Meßdatenakquisition am Suspensions-Membranreaktor erfaßt werden, aufzudecken und explizit darzustellen. Die zwi-

* Technologie-Zentrum Informatik, Universität Bremen, FB 3, Postfach 33 04 40, 28334 Bremen,
e-mail: michaelb@informatik.uni-bremen.de

schen den Meßdaten gefundenen Zusammenhänge sollen dabei in regelhafter Form angegeben und in zwei Anwendungsrichtungen eingesetzt werden:

1. *Qualitative Substitution bestimmter erfaßter Meßgrößen durch die IDS-Sensorik.*

Bei der Überwachung umwelttechnischer Prozesse, wie zum Beispiel dem Suspensions-Membranreaktor, wird man typischerweise mit dem Problem konfrontiert, daß bestimmte Meßgrößen nur mit hohem Kostenaufwand direkt erfaßt werden können. In Verbindung mit den in den Meßdaten gefundenen Zusammenhängen bieten die IDS-Sensorsignale eine Möglichkeit, teure Meßtechnik in gewissen Grenzen zu ersetzen.

Konkret soll dieses Verfahren für die Substitution einer DOC⁷-online Messung innerhalb des Suspensions-Membranreaktors eingesetzt werden. Der DOC-Gehalt kann online durch eine UV-Absorptionsmessung bestimmt werden. Auch wenn in den letzten Jahren die Preise für dieses Meßverfahren gesunken sind, dominieren die Kosten für diese Meßdaten im Vergleich zu den Kosten der restlichen Meßdaten. In Kalinowski et. al., 1997 [6] wurde durch Konzentrationsmessung von 3-Chlorbenzoesäure in einem synthetischen Abwasser gezeigt, daß ein Sensor auf Basis von Interdigitalstrukturen prinzipiell sensitiv für DOC ist. Diese Sensitivität ist wichtige Voraussetzung für die Substitution der DOC-online Messung. Die Steigerung der Selektivität der IDS-Sensoren wird dabei durch einen breiteren Interpretationshorizont erzielt, der die restlichen Meßdaten in die Auswertung der IDS-Sensordaten mit einbezieht.

2. *Rückkopplung zwischen Sensorentwicklung und Sensoranwendung.*

Bei der Weiterentwicklung der IDS-Sensorik ist es wichtig, daß relevante Querempfindlichkeiten auf das IDS-Sensorsignal, die innerhalb der Anwendungsdomäne vorhanden sind, benannt werden können. Hierdurch wird eine gezielte Modifikation der Sensorstrukturen ermöglicht, um den Sensor besser an seine Meßaufgabe anpassen zu können. Die automatische Bestimmung der Zusammenhänge ermöglicht es, diesen Prozeß effizienter zu gestalten – besonders wenn man davon ausgeht, daß die Interpretation der Meßdaten bisher manuell ausgeführt wurde.

Auch wenn die Anwendungsfälle sich unterscheiden, können die Zusammenhänge in den Meßdaten nach dem gleichen Prinzip ermittelt werden. Zu diesem Zweck wurde eine Erweiterung des C4.5-Algorithmus (Quinlan, 1993 [8]) entwickelt, die es ermöglicht, kontinuierliche Funktionen adäquat in einer Entscheidungsbauminduktion zu behandeln. Ein wichtiger Aspekt des entwickelten Verfahrens ist die Approximation der kontinuierlichen Funktionsverläufe durch lineare Splines mit variablen Knoten (Goodrich, 1995 [4]), auf deren Basis die Effizienz der Entscheidungsbauminduktion gesteigert werden kann.

5.2 Grundprinzip

In einem technischen System werden Meßgrößen in der Regel als Zeitreihen erfaßt. Auf einer abstrakten Ebene können diese Zeitreihen durch kontinuierliche Funktionen modelliert werden, die zu bestimmten Zeitpunkten abgetastet werden. Diese Funktionen werden im folgenden als *Meßwertverläufe* bezeichnet und die Menge aller erfaßten Meßwertverläufe wird mit F bezeichnet.

Der Hauptgedanke des vorgestellten Verfahrens ist es, aus einem Meßwertverlauf $r \in F$ qualitative Eigenschaften abzuleiten und in den restlichen Meßwertverläufen $F \setminus \{r\}$ nach Bedingungen, für das Vorhandensein dieser qualitativen Eigenschaften zu suchen. Eine mögliche

⁷ DOC ist ein Summenparameter für die im Abwasser gelösten Kohlenstoffe.

Form qualitativer Eigenschaften - mit dem Ursprung im qualitativen Schließen (zum Beispiel Kuipers, 1994 [7]) - stellt die qualitative Abstraktion der Ableitung von r nach der Zeit dar:

$$[r'(t)] = \begin{cases} inc & \text{wenn } r'(t) > 0 \\ std & \text{wenn } r'(t) = 0 \\ dec & \text{wenn } r'(t) < 0. \end{cases}$$

Eventuell vorhandene Zusammenhänge zwischen der qualitativen Steigung von r und den restlichen Meßwertverläufen aus F werden durch eine Entscheidungsbauminduktion bestimmt. Ein wichtiger Aspekt dabei ist es, den Entscheidungsbaum nicht als Klassifikator zu verwenden, sondern seine Struktur zu interpretieren, um so relevante Attribute für bestimmte qualitative Eigenschaften von r zu entdecken.

Für die Entscheidungsbauminduktion wird eine Menge von Beispielen benötigt, die aus den individuellen Meßwertverläufen aus F gebildet wird. Hierfür werden die Funktionen an bestimmten Zeitpunkten t_i innerhalb eines Zeitintervalls $t_i \in [t_{start}, t_{end}]$ abgetastet. Die $f_j(t_i)$ mit $f_j \in F \setminus \{r\}$ entsprechen den Attribut-Wert Paaren, die qualitative Steigung $[r'(t_i)]$ repräsentiert die Klasse, der die Attribut-Wert Paare zugeordnet sind. Die Klasse aus der Menge $\{dec, std, inc\}$, die zu einem Zeitpunkt t_i gilt, wird als *einem Meßwertverlauf zugewiesen* bezeichnet.

Auf diese Weise werden die in Tabelle 1 gezeigten Beispieldaten für die Entscheidungsbauminduktion erzeugt (mit $t_1 = t_{start}$ und $t_m = t_{end}$).

Zeit	f_1	f_1'	...	f_n	f_n'	Klasse
t_1	$f_1(t_1)$	$f_1'(t_1)$	...	$f_n(t_1)$	$f_n'(t_1)$	$[r'(t_1)]$
t_2	$f_1(t_2)$	$f_1'(t_2)$	...	$f_n(t_2)$	$f_n'(t_2)$	$[r'(t_2)]$
\vdots	\vdots	\vdots	...	\vdots	\vdots	\vdots
t_m	$f_1(t_m)$	$f_1'(t_m)$	...	$f_n(t_m)$	$f_n'(t_m)$	$[r'(t_m)]$

Tabelle 1: Erzeugte Beispieldatensätze aus einer Menge von Meßwertverläufen

Neben den individuellen Funktionen f_j werden die Ableitungen $f_j'(t_i) = df_j(t_i)/dt$ als zusätzliche Attribute in der Beispielmenge verwendet. Das ist eine interessante Eigenschaft des hier vorgestellten Ansatzes, da so neben den Meßwertverläufen auch Transformationen der Meßwertverläufe in die Entscheidungsbauminduktion einfließen können. Auf diese Weise ist es zum Beispiel möglich, nicht nur Zusammenhänge zwischen den originalen Meßwertverläufen, sondern auch Zusammenhänge zwischen den Ableitungen der Meßwertverläufe zu entdecken. Besonders in dynamischen Systemen kann oftmals ein Zusammenhang zwischen den Meßwertverläufen erst bei Betrachtung der Ableitungen entdeckt werden.

Die Verwendung der qualitativen Eigenschaften als Klassen, der Meßwertverläufe und der Transformationen als Attribut-Wert Paare ermöglichen bei der Interpretation des Entscheidungsbaumes einen Einblick in die Dynamik des untersuchten Systems.

5.3 *Entscheidungsbauminduktion mit Attributen kontinuierlicher Funktionen*

Die Beispielmengende, mit der der Entscheidungsbaum induziert wird, basiert auf Attributen kontinuierlicher Funktionen, deren Attributwerte aus einer Diskretisierung der entsprechenden Attribute erzeugt werden. Die Repräsentation einer Beispielmengende auf Basis kontinuierlicher Funktionsverläufe ist insofern problematisch, da die Charakteristik der Funktionsverläufe durch die Diskretisierung erhalten bleiben muß. Dieses führt dazu, daß eine große Zahl von Zeitpunkten für die Bildung der Beispielmengende verwendet werden müssen.

Es stellt sich generell die Frage, wie diese Diskretisierung sinnvoll realisiert werden kann - in welchen Zeitabständen sollten die Meßwertverläufe abgetastet werden? Auch wenn die Meßwertverläufe bereits durch eine Datenakquisition diskretisiert als Zeitreihen vorliegen, ist es sinnvoll, über eine Reduzierung der Zeitpunkte nachzudenken, an denen die Meßwertverläufe repräsentiert werden. Denn je mehr Zeitpunkte für die Repräsentation eines Meßwertverlaufes innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls verwendet werden, desto mehr Beispiele müssen für die Entscheidungsbauminduktion untersucht werden. Gerade die Anwesenheit kontinuierlicher Attribute⁸ macht die Entscheidungsbauminduktion ineffizient (Fayyad und Irani, 1992). Je mehr unterschiedliche Attributwerte ein Attribut besitzt, desto ineffizienter wird die Entscheidungsbauminduktion. In Fayyad und Irani, 1992 [3] wird eine Methode vorgestellt, die die effiziente Behandlung kontinuierlicher Attribute in der Entscheidungsbauminduktion ermöglichen soll. Das Verfahren führt aber nur unter bestimmten Vorbedingungen zu einer Effizienzsteigerung: dann, wenn ein bestimmter Attributwert in der gesamten Beispielmengende nur genau einer Klasse zugeordnet wird. Hierbei handelt es sich um eine sehr strenge Vorbedingung, die innerhalb der hier betrachteten Problemstellung eher die Ausnahme darstellt. Aus diesem Grund wird in dem hier vorgestellten Ansatz eine alternative Methode verwendet. Sie basiert nicht auf einer Abtastung der Meßwertverläufe an diskreten Zeitpunkten, sondern beruht auf einer Diskretisierung der Meßwertverläufe durch Zeitintervalle.

5.4 *Intervallbasierte Entropie-Minimalisierungs-Heuristik*

Eine wichtige Heuristik, die bei der Induktion von Entscheidungsbäumen verwendet wird, ist die *entropy minimalization heuristic*, die zum Beispiel in dem System C4.5 (Quinlan, 1993 [8]) eingesetzt wird. In diesem Abschnitt wird eine Erweiterung dieser Heuristik vorgestellt, die nicht auf der diskreten Repräsentation der Beispielmengende beruht, sondern Beispielmengende auf Basis von Zeitintervallen behandeln kann. Zuerst wird eine intervallbasierte Repräsentation der Meßwertverläufe diskutiert, und danach wird die intervallbasierte Heuristik vorgestellt.

⁸ Darunter fallen auch die Attribute kontinuierlicher Funktionen.

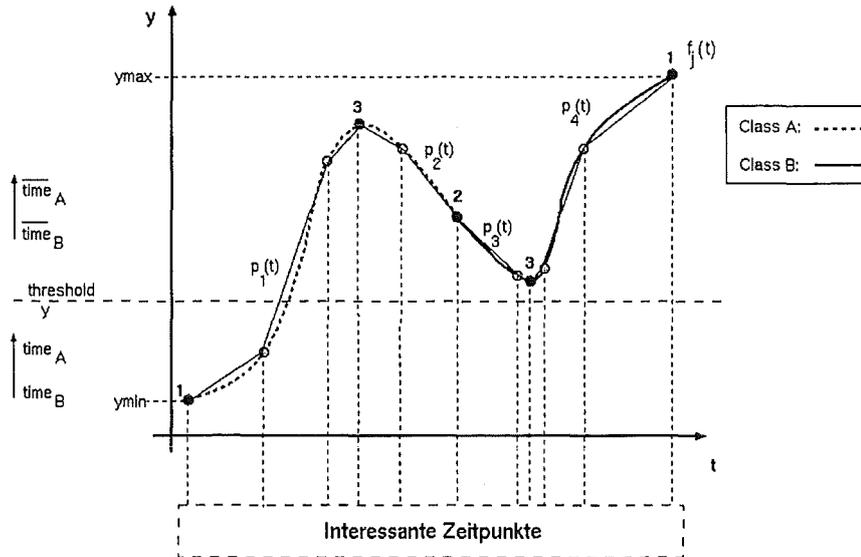


Abbildung 18: Interessante Punkte eines Meßwertverlaufes, die zugewiesenen Klassen und schematisches Beispiel einer stückweisen linearen Approximation

5.4.1 Repräsentation der Meßwertverläufe

In dem Zeitintervall $[t_{start}, t_{end}]$ werden die Meßwertverläufe $f \in \mathbf{F}$ an jeweils n Zeitintervallen $[t_{si}, t_{ei}]$, $t_{si}, t_{ei} \in [t_{start}, t_{end}]$ durch die Struktur

$$I_i = (\langle t_{si}, f(t_{si}) \rangle, \langle t_{ei}, f(t_{ei}) \rangle)$$

repräsentiert; mit $t_{si} < t_{ei}$, $t_{ei} = t_{si+1}$, $t_{start} = t_{s1}$ und $t_{end} = t_{en}$. Ferner sei $\{t_{s1}, t_{s2}, \dots, t_{sn-1}, t_{en}\}$ die Menge der *interessanten Zeitpunkte* \mathbf{T} . An einem interessanten Zeitpunkt wird der Meßwertverlauf f korrekt repräsentiert und zwischen den interessanten Zeitpunkten abstrahiert.

Im folgenden wird geklärt, welche Zeitpunkte die interessanten Zeitpunkte eines Meßwertverlaufes sind.

Eine wichtige Anforderung an die gewählte Repräsentation ist es, daß ein Entscheidungsbaum, der auf Basis der Intervallrepräsentation erlernt wurde, innerhalb des untersuchten Zeitintervalls $[t_{start}, t_{end}]$ auch den tatsächlichen Meßwertverlauf $f(t)$ korrekt klassifizieren muß.

Um das zu erreichen wird angenommen, daß die folgenden Zeitpunkte t_k Element von \mathbf{T} sein müssen⁹:

- Der Start- und Endpunkt des untersuchten Zeitintervalls t_{start}, t_{end} .
- Die Zeitpunkte, an denen sich die Klassenzuweisung - die durch $[r'(t_i)]$ festgelegt wird - ändert. Hieraus folgt, daß einem Meßwertverlauf während eines Intervalls $[t_{si}, t_{ei}]$ nur eine Klasse aus der Menge $\{dec, std, inc\}$ zugewiesen sein kann.
- Die Zeitpunkte, an denen $f(t)$ minimal bzw. maximal wird, also die t_k bei denen $f'(t_k) = 0$ gilt. Auf diese Weise wird der Meßwertverlauf in monoton steigende bzw. fallende Segmente eingeteilt.

⁹ Dieses wurde auch durch empirische Untersuchungen bestätigt.

Eine Repräsentation der Meßwertverläufe an diesen Zeitpunkten scheint ausreichend, um korrekte Entscheidungsbäume - bezogen auf $f(t)$, $t \in [t_{start}, t_{end}]$ - zu erlernen. Um eine Anwendung der Entropie-Minimalisierungs-Heuristik zu rechtfertigen, reicht eine Repräsentation der Meßwertverläufe ausschließlich an diesen Zeitpunkten nicht aus.

Wie oben beschrieben, wird f in monoton steigende bzw. fallende Segmente eingeteilt. Wenn nun f innerhalb dieser Segmente durch *stückweise lineare Funktionen* (piecewise linear approximation) p_k - den sogenannten linearen Splines mit variablen Knoten - approximiert wird führt das zu einer geeigneten Abstraktion der Meßwertverläufe. Die Zeitpunkte, die an den Ecken der p_k liegen¹⁰, sind ebenfalls Elemente der interessanten Zeitpunkte T . Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 18 dargestellt.

Die Approximation von Funktionen oder einer Menge von Datenpunkten durch stückweise lineare Funktionen wurde in einigen Arbeiten untersucht, siehe zum Beispiel Hakimi und Schmeichel, 1991 [5] oder Goodrich, 1995 [4]. In Hakimi und Schmeichel, 1991 [5] wird ein $O(n)$ -Algorithmus vorgestellt, der innerhalb eines gegebenen Approximationsfehlers ε die lineare Approximation mit der geringsten Anzahl von Knoten bestimmt, wenn die Chebyshev-Metrik zur Berechnung des Fehlers zugrunde gelegt wird.

5.4.2 Intervallbasierte Heuristik

Nachdem die Repräsentation der Meßwertverläufe beschrieben wurde, wird nun näher auf die intervallbasierte Entropie-Minimalisierungs-Heuristik eingegangen. Die Heuristik wird verwendet, um den günstigsten Schwellwert (*threshold*) zu bestimmen, an dem ein Meßwertverlauf entlang der Ordinatenachse in zwei Teilmengen aufgespalten werden kann. Da im Vergleich zu dem System C4.5 die Beispielmenge auf Zeitintervallen basiert, muß die Heuristik in der Lage sein, diese Intervalle entsprechend zu verarbeiten.

Die im folgenden eingeführten Begriffe sind in Abbildung 18 illustriert. Die Menge der interessanten Zeitpunkte T eines Meßwertverlaufes f teilt den Meßwertverlauf in eine Anzahl Intervalle auf. Diese Intervalle werden verwendet, um eine Reihe von Funktionen $time_c$ zu definieren - eine für jede Klasse, die f zugewiesen sein kann. In dem hier vorgestellten Ansatz entstehen durch die qualitative Ableitung die drei Klassen $\{dec, std, inc\}$, aus diesem Grund werden drei Funktionen $time_{dec}$, $time_{std}$ und $time_{inc}$ definiert. Diese Funktionen bestimmen für f die Zeitdauer einer bestimmten Klassenzuweisung, bei denen die Funktionswerte $f(t)$, $t \in [t_{start}, t_{end}]$ unterhalb oder gleich eines bestimmten Schwellwertes y sind.

Da die funktionalen Zusammenhänge von $f(t)$ bezogen auf die Zeit t durch die Approximation auf lineare Zusammenhänge reduziert wurden, können die individuellen Funktionen $time_c$ relativ leicht bestimmt werden. Alle Funktionen $time_c$ haben gemeinsame Eigenschaften:

- $time_c$ sind ebenfalls stückweise lineare Funktionen, die monoton steigen, aber nicht zwingend stetig sein müssen.
- $time_c(y)=0$ für $y \leq y_{min}$, wobei y_{min} das absolute Minimum von $f(t)$, $t \in [t_{start}, t_{end}]$ darstellt.

¹⁰ Also die nicht differenzierbaren Punkte von p_k .

- $\text{time}_c(y) = \text{tmax}_c$ für $y \geq y_{\max}$, wobei y_{\max} das absolute Maximum von $f(t)$, $t \in [t_{\text{start}}, t_{\text{end}}]$ darstellt. tmax_c entspricht dabei der Gesamtdauer, in der dem Meßwertverlauf f die Klasse c zugewiesen wurde.

Neben den Funktionen time_c werden eine weitere Anzahl von Funktionen $\overline{\text{time}}_c$ definiert, die quasi das Komplement zu time_c bilden. Diese Funktionen geben für einen Meßwertverlauf f an, für wie lange die Klasse c zugewiesen wurde und die Funktionswerte $f(t) > y$, $t \in [t_{\text{start}}, t_{\text{end}}]$ sind:

$$\overline{\text{time}}_c(y) = \text{tmax}_c - \text{time}_c(y)$$

Die Funktionen time_c , $\overline{\text{time}}_c$ und die Konstanten tmax_c werden innerhalb der Heuristik verwendet, um die Entropie zu berechnen, die sich ergibt, wenn ein Meßwertverlauf entlang eines Schwellwertes y aufgespalten wird.

Im folgenden werden die Funktionen zur Berechnung der Entropie definiert. Diese können als die *kontinuierlichen Versionen* der Funktionen verstanden werden, die in Quinlan, 1993 [8] beschrieben wurden. Ein Schwellwert y teilt einen Meßwertverlauf f in einen unteren und einen oberen Teil. Darüber hinaus sei C die Menge möglicher Klassen, die f zugewiesen werden können, dann berechnen die folgenden Funktionen

$$\text{info}(y) = - \sum_{i \in C} \frac{\text{time}_i(y)}{\sum_{k \in C} \text{time}_k(y)} \ln \left(\frac{\text{time}_i(y)}{\sum_{k \in C} \text{time}_k(y)} \right)$$

$$\overline{\text{info}}(y) = - \sum_{i \in C} \frac{\overline{\text{time}}_i(y)}{\sum_{k \in C} \overline{\text{time}}_k(y)} \ln \left(\frac{\overline{\text{time}}_i(y)}{\sum_{k \in C} \overline{\text{time}}_k(y)} \right)$$

den Informationsgehalt des unteren bzw. des oberen Teils des Meßwertverlaufes. Die gesamte Entropie - wenn f entlang des Schwellwertes y aufgespalten wird - wird dann mit der folgenden Formel bestimmt:

$$\text{entropy}(y) = \frac{\sum_{i \in C} \text{time}_i(y) \text{info}(y) + \sum_{i \in C} \overline{\text{time}}_i(y) \overline{\text{info}}(y)}{\sum_{i \in C} \text{tmax}_i}$$

Der Schwellwert y , an dem $\text{entropy}(y)$, $y_{\min} \leq y \leq y_{\max}$ das absolute Minimum hat, wird als der beste Schwellwert bezeichnet. Entlang dieses Schwellwertes sollte der Meßwertverlauf aufgespalten werden.

Der Aufbau des Entscheidungsbaumes geschieht analog zu dem System C4.5. Zuerst werden für alle Meßwertverläufe die Schwellwerte ermittelt, für die die Entropie das absolute Minimum erreicht. Der Schwellwert mit der geringsten Entropie wird verwendet, um den entsprechenden Meßwertverlauf in zwei Mengen aufzuteilen. Die Zeitabschnitte, in denen der Meßwertverlauf unterhalb des Schwellwertes verläuft, werden verwendet, um alle anderen Meßwertverläufe ebenfalls in zwei Teilmengen aufzuspalten. In diesem Fall werden die restlichen Meßwertverläufe und die qualitative Steigung - also die zugewiesenen Klassen - entlang der

Zeitachse partitioniert. Die durch diese Aufspaltung entstandenen oberen und unteren Meßwertverläufe und Klassenzuweisungen werden zu zwei neuen Beispielmengen zusammengefaßt, auf die nun die Entropiebestimmung rekursiv angewendet wird. Dieser Vorgang wiederholt sich, bis in einer Beispielmenge nur noch eine einzelne Klasse zugewiesen wird.

5.5 *Diskussion und Ausblick*

Der hier gezeigte Ansatz stellt eine interessante Möglichkeit dar, eine Menge von Zeitreihen auf regelhafte Zusammenhänge hin zu untersuchen. Besonders in den Anwendungsfällen, in denen Meßwertverläufe manuell interpretiert werden – so wie bei der Weiterentwicklung der IDS-Sensoren – ist das automatische Erzeugen von Hypothesen über die Zusammenhänge zwischen Meßgrößen eine wichtige Unterstützung des Interpretationsprozesses.

In Hinblick auf eine Substitution bestimmter Messungen ist die Validierung der gefundenen Zusammenhänge durch einen Experten unerläßlich. Auch wenn bestimmte entdeckte Regelmäßigkeiten für einen großen Teil der Beispiele Gültigkeit besitzen, sollte die Verantwortung für die Anwendung dieser Regeln bei dem Experten liegen. An diesem Punkt besteht jedoch die Möglichkeit, die Arbeit des Experten durch ein wissensbasiertes System zu unterstützen, in dem die gefundenen Regeln gegen bekanntes Domänenwissen abgeglichen werden können.

Ein wichtiger Aspekt der Substitution ist, daß in der Lernphase nicht eine totale Funktion ermittelt wird, die bestimmte Meßwerte numerisch auf die zu substituierende Meßgröße abbildet. Vielmehr findet eine Substitution durch Aussagen über die betrachteten Meßwertverläufe statt. So könnte zum Beispiel die Aussage *“wenn der Wert von A steigt und der Wert von B fällt, dann steigt der Wert von C“* eine Regel darstellen, um mit den Meßgrößen *A* und *B* die Meßgröße *C* partiell zu substituieren. Um Aussagen über die zu substituierende Meßgröße machen zu können, muß zumindest die Prämisse einer gefundenen Regel erfüllt sein. Es ist somit möglich, daß in einer Situation keine Aussage über den Verlauf der zu substituierenden Meßgröße gemacht werden kann.

In einer ersten Phase wurde das Verfahren prototypisch in einer konstruierten Domäne evaluiert. Durch diesen Prototyp konnte die prinzipielle Funktionsfähigkeit des Verfahrens nachgewiesen werden. Innerhalb der untersuchten Domäne konnten neben sehr speziellen auch interessante allgemeingültige Zusammenhänge gefunden werden.

In der zweiten Phase wird das Verfahren zur Zeit auf die realen Meßdaten des Suspensions-Membranreaktors angewendet. Bei der Vorbereitung dieser Phase hat sich gezeigt, daß die Abstraktion der Funktionsverläufe einen wichtigen Aspekt des verwendeten Ansatzes darstellt, da sich durch die große Anzahl einzelner Meßwerte auf konventionelle Weise mit C4.5 in akzeptabler Zeit kein Entscheidungsbaum erzeugen ließ.

Es muß angemerkt werden, daß die Entscheidungsbäume auf Basis approximierter Funktionsverläufe sich theoretisch von den Entscheidungsbäumen unterscheiden können, die auf Basis der exakten Funktionsverläufe erzeugt werden würden. Dieses führt zwar nicht zu fehlklassifizierenden Entscheidungsbäumen, kann aber dazu führen, daß komplexere Entscheidungsbäume gebildet werden. Der Einfluß des Approximationsfehlers auf die Güte des induzierten Entscheidungsbaumes ist Gegenstand aktueller Untersuchungen.

Eine grundlegende Einschränkung des verwendeten Ansatzes liegt bisher in dem Problem begründet, daß keine zeitlich versetzten Zusammenhänge in den Daten entdeckt werden können. Aktuell wird untersucht, wie sich das Verfahren um diesen Aspekt erweitern läßt.

5.6 Literatur

- [1] Boronowsky, M.: *Automatic Measurement Interpretation of a Physical System with Decision Tree Induction*. Accepted for IDEAL'98: International Symposium on Intelligent Data Engineering and Learning, Hong Kong, China. 1998.
- [2] Brauer, H.: *Handbuch des Umweltschutzes und der Umweltschutztechnik*. Band 2: Produktions- und produktintegrierter Umweltschutz, Berlin. 1996.
- [3] Fayyad, U.M.; Irani, K. B.: *On the Handling of Continuous-Valued Attributes in Decision Tree Generation*. Machine Learning, 8. 1992. pp. 87-102.
- [4] Goodrich, M. T.: *Efficient Piecewise-Linear Function Approximation Using the Uniform Metric*. Discrete & Computational Geometry, 14. 1995. pp. 445-462.
- [5] Hakimi, S. L.; Schmeichel E. F.: *Fitting Polygonal Functions to a Set of Points in a Plane*. CVGIP: Graphical Models and Image Processing, 53(2). 1991. pp. 132-136.
- [6] Kalinowski, T.; Boronowsky, M.; Binder, J.: *Mikrosystem zur Zustandsüberwachung eines Suspensions-Membranreaktors*. Kolloquium Produktionsintegrierter Umweltschutz, 1997. D115-D122.
- [7] Kuipers, B.: *Qualitative Reasoning: Modeling and Simulation with Incomplete Knowledge*. MIT Press. 1994.
- [8] Quinlan, J. R.: *C4.5 Programs for Machine Learning*. Morgan Kaufmann. 1993.
- [9] Rübiger, N.; Schierenbeck, A.: *Suspensions-Membranreaktor – biologische Eliminierung schwer abbaubarer Stoffe*. Preprints GVC-Kongreß: Verfahrenstechnik der Abwasser- und Schlammbehandlung, Band 3. 1996.

6 Über den optimalen zukunftsverträglichen Energiemix

Björn Ludwig

Zusammenfassung

Die Struktur des globalen Energieversorgungssystems besteht aus Anteilen unterschiedlicher Primärenergieträger. Der Hauptanteil ist sowohl in globaler Hinsicht als auch in den einzelnen Ländern zu etwa 90% fossiler Herkunft. Der restliche Anteil wird durch nukleare und regenerative Energieträger gedeckt. Aufgrund unterschiedlicher Bewertungen etwa der Reichweite der Primärenergieträger und der jeweiligen Betriebsgefahr der einzelnen Energiewandlungstechniken kann die gegenwärtige Energieversorgungsstruktur nicht die zukünftig tragfähige sein. Eine wesentliche Frage der Menschheit wird sein, in welcher Weise eine nachhaltige zukunftsverträgliche Energieversorgung sichergestellt werden kann.

Derartige Fragestellungen werden in Studien zur Technikfolgenabschätzung und Technikbewertung (TA) behandelt. Die Ergebnisse solcher TA-Studien sind inhärent unsicher und bestehen oftmals aus unscharfen und/oder verbalen Informationen und Wissen. Die Nutzung derartigen Wissens für Fragen der Optimierung und Bewertung solcher multikriteriellen Systeme ist mit klassischen Optimierungsmethoden nur eingeschränkt möglich. Optimierung zielt in diesem Beispiel auf die Nachhaltigkeit eines zukünftigen Energieversorgungssystems unter Berücksichtigung konkurrierender Kriterien wie etwa die Reichweite des Primärenergieträgers, die Materialintensität, die Umweltbeeinträchtigung oder der Flächenbedarf der jeweiligen Technologie.

Im vorliegenden Beitrag wird die hybride Methode der rekursiven Optimierung vorgestellt. Die Methode gestattet es, unsichere Sachverhalte durch eine Fuzzy Fitness Funktion zu bewerten und diese dann durch einen Genetischen Algorithmus zu optimieren. Die Vorgehensweise wird am Beispiel des ganzheitlichen Problems des optimalen Energiemixes unter Berücksichtigung verschiedener Bewertungskriterien demonstriert. Ziel ist die Bestimmung optimaler Anteile der einzelnen Primärenergieträger, die den optimalen Energiemix bilden.

1 Einleitung

Die derzeitige globale Entwicklung läßt Probleme wie etwa die Zunahme der Bevölkerung, des Energiebedarfs oder des Verkehrs und damit der Umweltverschmutzung zunehmend deutlicher werden. Diese 'Kollision zwischen der menschlichen Zivilisation und dem Ökosystem' (Gore, 1993) offenbart zwei Erkenntnisse:

1. Wohlstands- und Umwelterhaltung sind nicht unabhängig voneinander und gegenwärtig sogar konkurrierende Ziele, da die Probleme aufgrund extensiver Nutzung nicht erneuerbarer Ressourcen durch zunehmende Technisierung verursacht sind.
2. Weltweit wachsender Ressourcenbedarf macht vermehrt Technikanwendung notwendig.

"It is generally accepted that we should integrate the human being into our patterns of nature, especially not to treat earth and nature as something separate from human civilization." (Gore, 1994). Unter dem Leitbild einer nachhaltig zukunftsfähigen Entwicklung (Enquete, 1994,

S. 32) untersucht das Konzept Technikbewertung (TA) etwa, welche Technologien in der Lage sind, eine nachhaltige Entwicklung der Menschheit zu ermöglichen (Ludwig, 1997b, Jischa, 1997). Dies sind letztlich Angepaßte Technologien, die nach Kaplan (Kaplan, 1994)

- in die jeweilige nationale Infrastruktur passen,
- bezahlbar sind,
- angemessen instand gehalten werden können und
- nicht umweltzerstörend wirken.

Um derartige Technologien zu gestalten, ist es zunächst Ziel von TA, Wissen über technische Systeme sowie über Wirkungen und Verknüpfungen zwischen technischen Systemen und ihrer Systemumwelt bereitzustellen. Weitere Ziele sind Technologiebeobachtung und Technologiefrüherkennung sowie Entscheidungsunterstützung.

Ähnliche Anforderungen werden an die Umweltwissenschaften gestellt. Die Problematik dieser Fragestellungen ist gekennzeichnet durch multikriterielle Entscheidungssituationen, Aggregation von Sachverhalten, Zielpriorisierung, unsichere Informationen sowie die Berücksichtigung mehrerer Personen bei Entscheidungsfindungen. Das Problem ist dabei nicht der Mangel an Daten, sondern vielmehr die Wissensgenerierung aus einer großen Menge von teils unsicheren, teils unscharfen, teils schlecht strukturierten Daten und Informationen.

2 Methodische Aspekte

Ziel der Umweltinformatik ist es, Informationsverarbeitungsverfahren zu bearbeiten, die sich mit Umweltbelastungen beschäftigen (Page, 1994, S. 13ff). Bei der Behandlung derartiger Fragestellungen handelt es sich um kognitive Informationsverarbeitung. Die hierbei gewünschte systematische Vorgehensweise erfordert die Anwendung von Methoden, die uns helfen, unser Wissen über komplexe (technische) Systeme zu organisieren und zu erweitern. Gewöhnlich werden aufgabenspezifische Methodenkombinationen angewendet. Methodische Probleme und Defizite ergeben sich in der Regel durch die Komplexität des Prozesses oder durch die Komplexität der betrachteten Einflußgrößen. Probleme bei der Beschreibung komplexer dynamischer Systeme ergeben sich durch Nichtlinearitäten in den Wechselwirkungen und den Randbedingungen, durch zeit- und lösungsabhängige Randbedingungen sowie durch stark unterschiedliche Zeitkonstanten in den Subsystemen.

2.1 Defizit Analyse

Wissen über technische Systeme erhält man gewöhnlich durch Analyse der zugrundeliegenden Wechselwirkungen, was wesentlich durch die Entwicklung von Modellvorstellungen gekennzeichnet ist. Zumeist handelt es sich um mathematische Modelle, die gezielte Simulationen erlauben, wodurch mögliche, im unerwünschten Fall als Folgen bezeichnete Reaktionen des Systems identifiziert werden können.

Werden jedoch die Bilanzgrenzen, wie es für Systembetrachtungen notwendig ist, um alle betroffenen Bereiche erweitert, treten Interaktionen und Einflußgrößen auf, die einer formalistischen Beschreibung meist nicht zugänglich sind. Die zugrundeliegenden, meist hochaggregierten Größen werden als Entitäten bezeichnet und folgendermaßen definiert (Ludwig, 1995):

Entitäten sind Größen, bei denen

- a) keine eindeutigen Basisvariablen identifizierbar,
- b) keine eindeutigen Zusammenhänge zwischen den Basisvariablen erkennbar sind, oder
- c) im Falle bekannter Wechselwirkungen keine meßbaren Indikatoren zur Festlegung der Wechselwirkungen bestimmt werden können.

Es handelt sich um Einflußgrößen wie beispielsweise Risiko, Lebensqualität oder Bildung, die bei der Diskussion um Nachhaltigkeit bzw. Zukunftsfähigkeit eine herausragende Rolle spielen. Die Berücksichtigung von Entitäten in Modellen erfolgt im wesentlichen über Randbedingungen oder durch verbale Diskussion. Nichtberücksichtigung oder Rückführung solcher Größen auf andere verfügbare Variablen führen in jedem Fall zu einem Informationsverlust, so daß insgesamt die Komplexität eines realen Systems nicht vollständig abgebildet wird.

2.2 Defizit Synthese

Komplexe Systeme werden daher in der Praxis durch zusammengesetzte Kennzahlen oder Indikatoren beschrieben, oder zumindest in ihrer Zugänglichkeit erhöht. Dies ist etwa aus der Verfahrenstechnik bekannt. Im Unterschied zu dem Informationsgehalt einzelner Meßwerte erzeugt ein derartiger Indikator neues Wissen durch Aggregation von Einzelinformationen. Man kann von einem „Verkleinerungsglas“ sprechen, das Informationsgewinn durch Zusammenfassung ermöglicht (BUND, 1996, S. 38).

Indikatoren spielen eine große Rolle z. B. für die Information der Öffentlichkeit über Umweltbedingungen und die erreichten Verbesserungen, bei der Formulierung von Handlungsoptionen, als Mittel zur Beurteilung ihrer Effizienz, zur Überprüfung normgerechten Verhaltens oder als Basis von Entscheidungen. Abhängig von Zielen und Anwendergruppe unterscheiden sich die Indikatoren durch die Aggregation, d. h. durch den Detaillierungsgrad, mit dem sie den gleichen Informationsinhalt vermitteln. In der Umweltdiskussion kommt Indikatoren eine entscheidende Rolle zu. Um eine Bewertung durchzuführen oder eine Entscheidung zu treffen, benötigt man unterschiedlich aggregierte Indikatoren, die einen Prozeß oder einen Zustand charakterisieren und eine Entscheidung unterstützen können. Erst mit ihrer Hilfe können quantitativ überprüfbare Ziele formuliert werden, vgl. hierzu den pressure-state-response Ansatz der OECD (BUND, 1996, S. 40).

Beim Vorgang der Bewertung stellt man nun methodische Defizite aufgrund von Vergleichbarkeitsproblemen bezüglich der Transformation auf hochaggregierte Bewertungsmaßstäbe fest. Andererseits ist diese Vorgehensweise jedoch vonnöten, was auch als Aggregationsproblem bezeichnet wird. Dies wird z. B. bei der monetären Quantifizierung von Einflußgrößen besonders deutlich. Beispielhaft für Umweltindikatoren seien Kennzahlen genannt, die die Verschmutzung von Umweltmedien, im wesentlichen Luft, unter Berücksichtigung schadstoffspezifischer Wirkungen quantifizieren (z. B. Ludwig und Tulbure, 1996).

Obwohl solche Indikatoren die Gefahr bergen, nur die Phänomene anstatt deren tieferliegende Ursachen zu beschreiben, sind sie jedoch notwendig, um überhaupt die Mächtigkeit einer betrachteten Problemstellung einschätzen zu können. Sie stehen daher im Rahmen der Bestandsaufnahme am Anfang ganzheitlicher Betrachtungsweisen.

2.3 Defizit Bewertung

Ein multikriterielles Bewertungsproblem kann als logische Meßoperation aufgefaßt werden. Das Bewertungsproblem kann als die optimale Anordnung der Menge der zur Auswahl stehenden Alternativen auf einer Skala angesehen werden. Zu berücksichtigen sind vorgegebene Restriktionen im Hinblick auf die relevanten Ziele und die diesbezüglichen Präferenzen des Entscheidungsträgers (Ludwig, 1995). Ziel der Bewertung ist es, je Alternative eine Maßzahl zu ermitteln, die die absolute oder relative Vorteilhaftigkeit der einzelnen Alternativen in einer einzigen Größe ausweist. Solche eindimensionalen aggregierten Indikatoren sind notwendig als Entscheidungsunterstützung, etwa für Unternehmer, Politiker oder andere Entscheidungsträger. Die Lösung dieses Auswahlproblems ist insbesondere bei folgender Problemstruktur schwierig:

- Viele Ziele sind zu berücksichtigen.
- Es treten unterschiedliche Zielmaße auf.
- Die Ziele werden unterschiedlich stark gewichtet.
- Die Informationen sind unsicher und/oder unscharf.
- Das Problem ist zeitabhängig.
- Mehrere Personen müssen bei der Entscheidungsfindung berücksichtigt werden.
- Es existiert kein eindeutiges Entscheidungskriterium.

Gewöhnlich hat man es mit komplexen nichtlinearen Systemen zu tun, bei denen nicht-meßbare Größen auftreten und die Wechselwirkungen zumindest zum Teil unsicher oder unbekannt sind. Darüber hinaus kann im Gegensatz zu den meisten anderen naturwissenschaftlichen Problemen nicht davon ausgegangen werden, daß die Randbedingungen zeitlich konstant sind. Eine Aussage über das Systemverhalten ist daher inherent nur für begrenzte Zeiten gültig.

Beteiligte Variable, etwa Risiko oder Lebensqualität, sind nicht technischer oder physikalischer Art, sondern komplex, kaum meßbar und schwer zu erfassen, da sie oftmals zu einem hohen Grad aggregiert sind. Sie stellen heterogene unscharfe Ausdrücke dar, oft mit vielen unterschiedlichen Einflüssen, die nicht weiter aufgespalten werden können. Dies erschwert eine Vergleichbarkeit, besonders, wenn unterschiedlich hoch aggregierte Faktoren beteiligt sind. Jede Bewertung muß daher subjektiv sein. Dennoch sind diese Einflüsse zur Beschreibung realer Systeme unabdingbare Größen.

2.4 Ziel

Für die Gestaltung von innovativen Technologien unter Aspekten wie etwa der Nachhaltigkeit müssen in Gestaltungs-, Bewertungs- und Entscheidungsprozesse Umweltinformationen einfließen. Die hierbei auftretenden oben geschilderten methodische Defizite haben ihre Ursachen in der Erfassung sowie in der Bewertung von Entitäten. Die Problematik liegt in der Nichtvergleichbarkeit und Aggregation von systemcharakterisierenden Größen begründet. Neue methodische Ansätze müssen daher die Komplexität der zu beschreibenden Größen in geeigneter Form berücksichtigen. Notwendige Subjektivitäten müssen dabei zum einen aus Transparenzgründen deutlich sichtbar gekennzeichnet und zum anderen möglichst zu Beginn eines Algorithmus eingeführt werden, damit eine bewußte Manipulation des Analytikers am Endergebnis vermieden wird.

Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich mit Anforderungen an Optimierungsverfahren unter Berücksichtigung des Aggregationsproblems. Insbesondere wird die Methode der rekursiven Optimierung vorgestellt, die auf den Verfahren des *soft computing* basiert. Ziel ist die Reduktion eines multikriteriellen Entscheidungsproblems auf einen Vergleich von aggregierten eindimensionalen Kennzahlen. Dies wird erreicht durch die Verknüpfung der Vorteile von menschlichen Denkstrukturen und biologischen Prozessen mit den Vorteilen logisch-analytischer Genauigkeit von Computern.

3 Ansatz mit weichen Methoden

Auf einer nicht bewußtseinspflichtigen Ebene unseres Denkens benutzen wir Wissen, dessen Konturen alles andere als scharf ist, und das sich nur schwer explizit formulieren läßt. Unschärfe ist dabei nicht die Eigenschaft der Dinge, sondern unserer Wahrnehmung (Spies, 1993). Das kennzeichnende Merkmal dieses Wissens ist der Umgang mit unvollständigen und ggf. schlecht strukturierten Mustern und Informationen. Dabei stellt sich die Frage nach der Modellsprache für die Unsicherheit.

Die beschriebenen methodischen Defizite können durch die Anwendung der Methoden des sogenannten *soft computing* zumindest vermindert werden. Neben Neuronalen Netzen bieten vor allem die unscharfe Logik (Fuzzy Logic) sowie Evolutionsstrategien und Genetische Algorithmen erfolgversprechende Ansätze durch ihr Potential, Komplexität in die kalkulatorische Betrachtung zu integrieren. Zunächst dient eine allgemeine Einführung in die Theorie unscharfer Mengen und die Genetischen Algorithmen zum weiteren Verständnis der Anwendung (Ludwig, 1995).

3.1 Fuzzy Logic

Von den beiden Zweigen der unscharfen Logik ist im folgenden nur die Theorie unscharfer Mengen (Fuzzy Set Theory) von Interesse, da die hier wesentlichen Aspekte sich nicht mit der regelungstechnischen Fragestellung der Zustandserhaltung betrachten lassen.

Die unscharfe Logik ermöglicht die Bearbeitung verbaler und damit unscharf vorliegender Information mit mathematisch exakten Mitteln. Bei der Beschreibung treten unter anderem zwei Arten inhaltlicher Unsicherheit auf, die eine exakte Systembeschreibung behindern: Unter der lexikalischen oder linguistischen Unsicherheit versteht man die undefiniertheit von Wörtern und Sätzen einer Sprache. Hingegen betrifft die informationale Unsicherheit hochaggregierte Begriffe, die durch einen Überfluß an Information beschrieben werden müssen (Zimmermann, 1993).

Unschärfe Logik gründet auf der Erkenntnis, daß die Realität eher unscharf als präzise ist, da alle Aussagen einen gewissen Interpretationsspielraum haben, also meist nicht in vollem Umfang zutreffen. Die traditionelle zweiwertige Logik ist als Spezialfall in der unscharfen Logik enthalten. Im Gegensatz zur scharf abgegrenzten Menge in der Mengenlehre sind die in der Realität auftretenden Mengen eher unscharf begrenzt, was im wesentlichen durch die lexikalische Unsicherheit der von Menschen verwendeten linguistischen Begriffe hervorgerufen wird. Eine Menge ist unscharf begrenzt, wenn die Zuordnung nicht für alle ihre Elemente gleich eins ist. Derartige Mengen werden über sogenannte reellwertige Zugehörigkeitsfunktionen definiert, die beliebige Werte annehmen können, jedoch vorzugsweise in das Intervall $[0,1]$ normiert werden.

Kern der Modellbildung auf der Basis der Fuzzy Set Theorie ist der Begriff der *linguistischen Variablen*. Im Gegensatz zu mathematisch präzise quantifizierbaren Gleichungen enthalten sprachliche Handlungsbeschreibungen unscharf formuliertes Wissen und Eigenschaftsbezeichnungen mit weichen Übergängen zwischen den Abstufungen. Sprachlich formulierte Größen sind im allgemeinen verständlicher, haben jedoch einen höher aggregierten Informationsgehalt. Zu der hier ohnehin vorhandenen linguistischen Unsicherheit tritt damit die informationale Unsicherheit noch hinzu. Derartige Entitäten sind daher schwieriger zu quantifizieren, so daß mit einer klassisch-mathematischen Beschreibung meist ein Informationsverlust einhergeht.

Das Konzept der linguistischen Variablen verknüpft nun die verbale Beschreibung von komplexen und unscharfen Sachverhalten mit mathematischer Exaktheit. Die Werte einer linguistischen Variablen sind sprachliche Ausdrücke, sogenannte Ausprägungen oder linguistische Terme. Jede Ausprägung wird inhaltlich mit einer unscharfen Menge identifiziert und über die jeweilige Zugehörigkeitsfunktion μ auf eine dazugehörige numerische Werteskala abgebildet und damit quantitativ zugänglich gemacht. Diese sogenannte scharfe Basisvariable ist dabei allen Ausprägungen einer linguistischen Variablen gemeinsam. Die unscharfen Mengen bilden demnach die Verknüpfung zwischen linguistischem Ausdruck und numerischer Information.

Zur Verarbeitung von unscharf formuliertem Wissen müssen nun mehrere linguistische Variablen mit Hilfe linguistischer Operatoren verknüpft werden. Die Verknüpfungsvorschriften stellen das Wissen dar, das in der Wissens- oder Regelbasis ähnlich den Expertensystemen abgelegt ist. Als Ergebnis einer Verknüpfung erhält man eine Ausprägung einer neuen linguistischen Variablen, aus der wieder ein scharfer Ausdruck gewonnen werden kann. Der Ablauf erfolgt in den Schritten Fuzzifizierung, Inferenz und Defuzzifizierung (Ludwig, 1997a, Mayer, 1993, Zimmermann, 1991).

Der Schritt der Fuzzifizierung stellt die linguistische Interpretation einer scharfen Eingangsgröße dar. Es wird in diesem Schritt also festgestellt, mit welchem Beitrag die einzelnen linguistischen Ausprägungen beteiligt sind.

Nach der Fuzzifizierung folgt die Inferenz mit der Aufgabe, aus den Aussagen und dem Wissen Schlußfolgerungen zu ziehen. Das in Form von WENN-DANN-Regeln formulierte Wissen wird auf die Aussagen in Form der jetzt unscharfen Eingangsgrößen angewandt.

Aus den entsprechenden Werten der Zugehörigkeitsfunktionen werden dabei unscharfe Schlußfolgerungen gebildet. Inferenz bedeutet damit die Bewertung der einzelnen Regeln aufgrund der unterschiedlichen Vorbedingungen. Für den Fall, daß als Ergebnis ein scharfer Wert gefordert wird, schließt sich der Schritt der Defuzzifizierung an, deren Aufgabe es ist, für eine unscharfe Menge einen dafür charakteristischen scharfen Wert zu erzeugen. Eines der am häufigsten angewandten Verfahren zur Defuzzifizierung ist die Schwerpunktsmethode (Center of Gravity). Als scharfer Wert der Variable wird dabei der Abszissenwert des Flächenschwerpunktes unter der entstandenen Zugehörigkeitsfunktion berechnet.

Durch die Verwendung eines linguistischen Ordnungsbegriffs erlaubt die unscharfe Logik demzufolge durch eine verbale Beschreibung von Zusammenhängen die simultane Einbindung von Entitäten und technisch meßbaren Größen. Die Ergebnisse eines Schritts werden auf dieselbe Skala mit verbalen Ausprägungen abgebildet und damit vergleichbar.

3.2 Genetische Algorithmen

Eine der wesentlichen Ideen von TA ist das Aufzeigen von alternativen Lösungsmöglichkeiten für eine bestimmte technische Anwendung. Dies schließt die stetige Verbesserung von erreichten technischen Lösungen mit ein. So begriffene TA kann als Optimierungsproblem aufgefaßt werden, wobei die Optimierung einer Anwendung zum Beispiel hinsichtlich Energieeffizienz, Materialintensität oder beispielsweise Zukunftsverträglichkeit angestrebt wird.

Gängige Optimierungsverfahren wie die Hill-Climbing-Methoden, die Simplexmethode oder das Dynamische Programmieren, gelangen an ihre Grenzen bei nichtlinearen Problemen sowie bei Problemen mit vielen Parametern und vielen Restriktionen hinsichtlich des Programmieraufwands und des Speicherbedarfs (Hoffmann, 1971).

Ein Algorithmus besteht aus einer Folge von Befehlen, die wiederholt ausgeführt wird, um ein Problem zu lösen. Natürliche Optimierungsverfahren orientieren sich an Prinzipien der Evolutionsbiologie und werden als selektive, genetische oder evolutionäre Verfahren bezeichnet (Kinnebrock, 1994, Rechenberg, 1973, Schöneburg, 1994). Derartige Verfahren stellen an das zu lösende Optimierungsproblem keine Anforderungen hinsichtlich Linearität, Differenzierbarkeit oder einer bestimmten Struktur des Lösungsraums und haben überdies meist einen vielfach geringeren Programmieraufwand als klassische Verfahren.

Die Evolution stellt aus der Sicht des Ingenieurs und Naturwissenschaftlers ein äußerst leistungsfähiges Optimierungsverfahren dar. Es findet Entwicklung statt nach dem Prinzip des Survival of the fittest, bei dem Problemlösungen entsprechend ihrer Fähigkeiten beibehalten oder verändert werden. Dabei findet die Suche nach leistungsfähigeren Lösungen mit höherer Wahrscheinlichkeit dort statt, wo eine überdurchschnittliche Zunahme dieser Fähigkeiten zu erwarten ist. Diese Eigenschaften werden u. a. in Genetischen Algorithmen (GA) angewendet, indem systematisch erzeugte neue Lösungen bewertet werden.

Grefenstette definiert GA als eine iterative Prozedur, die eine Population aus möglichen problemspezifischen Lösungen aufrecht erhält (Grefenstette, 1982). Jede mögliche Lösung wird als Individuum oder Chromosom bezeichnet. Analog zu biologischen Systemen kann ein Chromosom sich selbst kopieren, wobei das Ergebnis sich vom Original leicht unterscheiden kann. Während jedes Zeitschritts, genannt Generation, werden die Individuen bezüglich ihrer Effektivität als Problemlösung bewertet. Auf der Basis dieser Bewertung wird eine neue Population erzeugt mittels der am häufigsten verwendeten spezifischen genetischen Operatoren Reproduktion, Crossover und Mutation (Turban, 1995).

- Reproduktion: Durch Reproduktion produziert ein GA verbesserte Lösungen, indem Eltern mit höherer Fitness ausgewählt werden oder diesen eine größere Wahrscheinlichkeit zugeordnet wird, am Fortpflanzungsprozeß beteiligt zu werden.
- Crossover: Gewöhnlich werden die Lösungen in GA binär kodiert. Crossover bedeutet nun, daß zufällig die Position eines Digit in dieser binär dargestellten Lösung ausgewählt wird, und anschließend der rechte oder linke Restteil dieser Lösung mit dem entsprechenden Teil eines anderen Individuums ausgetauscht wird.
- Mutation: Dieser genetische Operator bewirkt die Umwandlung eines beliebigen Bits einer binär kodierten Lösung. Hierbei wird eine 1 in eine 0 gewandelt und umgekehrt. Dies bewahrt den Algorithmus davor, daß er in einem lokalen Gebiet stecken bleibt.

Die unterschiedlichen Verfahren der natürlichen Optimierung können durch ihre Hauptoperatoren unterschieden werden. Im Fall der GA ist dies der Crossover, der mit einer Wahrscheinlichkeit von 80-100% zur Anwendung kommt. Im Gegensatz dazu ist die

Mutation von untergeordneter Bedeutung. Solche Bit-Umwandlungen kommen mit einer Wahrscheinlichkeiten zwischen 1 und 10% vor.

GA durchlaufen folgenden dreistufigen Iterationsprozeß:

1. Test einer Lösung, um zu prüfen, wie gut sie ist,
2. Auswahl der besten Eltern, und
3. Erzeugung von Nachkommen.

GA stellen damit speziell für komplexe Problemstellungen effiziente Suchheuristiken zur Verfügung. Der GA erhält Informationen, die ihn in die Lage versetzen, minderwertige Lösungen abzulehnen und gute Lösungen zu akkumulieren. Nur GA und ähnliche Verfahren stellen mächtige Methoden bereit, um komplexe Problemstellungen zu optimieren. Traditionelle Optimierungsmethoden sind nicht anwendbar.

4 Anwendung Energieversorgung

Abnehmende Ressourcen fossiler Primärenergieträger haben vor dem Hintergrund eines im weltweiten Mittel steigenden Pro-Kopf-Verbrauchs und wachsender Bevölkerungszahlen eine Diskussion darüber ausgelöst, auf welche Weise und mit welcher Technik die zukünftige Energieversorgung gesichert werden kann. Das Beispiel betrifft die unterschiedliche Einschätzung der Nachhaltigkeit der Energieversorgung.

Ein Energieversorgungssystem liefert Energie aus verschiedenen Energiewandlungsverfahren. Das gegenwärtige globale Energieversorgungssystem deckt den Bedarf zu 90 % aus fossilen Primärenergieträgern. Wachsender Energiebedarf und zunehmend deutlicher werdende Umwelteinflüsse erfordern zukünftig andere Formen der Energieversorgung, insbesondere im Hinblick auf zukünftige Generationen und die schnell wachsenden Wirtschaften der Schwellenländer; dies wird auch als inter- und intragenerationelle Gerechtigkeit bezeichnet.

Aus dem Blickwinkel der Nachhaltigkeit stellt sich als eine der wichtigsten Fragen, welche Primärenergieträger, die stellvertretend für eine Technologie stehen, unter Berücksichtigung begrenzter Ressourcen und potentieller Risiken mit welchem Anteil genutzt werden sollten. Dies ist die Frage nach der optimalen Primärenergiestruktur, bzw. nach dem optimalen Energiemix.

Die hier vorgestellte rekursive Optimierung besteht aus einer zweistufigen iterativen Prozedur. Zunächst wird eine gegebene Primärenergieversorgungsstruktur bezüglich der beteiligten Techniken bewertet. Im zweiten Schritt wird diese Struktur variiert bis die höchstbewertete Kombination gefunden ist.

4.1 Bewertung: Die Fuzzy Fitness Funktion

Die Bewertung, i. e. die Bestimmung der Güte einer bestimmten Primärenergiestruktur, wird in diesem Fall durch eine Funktion vorgenommen, die mit Hilfe der unscharfen Logik systematisch (Umwelt-)Wissen in den Abbildungsprozeß integriert und auch die Aggregation vornimmt (Ludwig, 1997a). Grundlage der Bewertung ist ein mehrdimensionaler Kriterienvektor, der eine Technik entsprechend des beschriebenen Aggregationsgrads charakterisiert. Ziel sind Aussagen der Form „Energiestruktur X ist gut, schlecht, wünschenswert, einzuführen, etc.“ Diese Art von Aussagen können als Ergebnis logischer Operationen aufgefaßt werden.

Das Konzept linguistischer Variablen erlaubt die Formulierung von Werteskalen mit linguistischen Termen als Abstufungen. Der eigentlich kritische Vorgang ist die formalistische Zuordnung von menschlichem Wissen auf unscharfen Mengen. Subjektive Prämissen, die immer eine Rolle spielen, werden bei diesem Ansatz jedoch auf jeder Stufe transparent in einer Weise eingebunden, die eine bewußte Einflußnahme auf das Ergebnis nicht zuläßt.

Der Bewertungsschritt fungiert hier als Fitness Funktion des Genetischen Algorithmus. Bei dem Verfahren handelt es sich um einen Top-Down-Ansatz, der in folgender Weise abläuft und in **Abb. 1** graphisch verdeutlicht wird.

1. Definition eines Bewertungsmaßstabs.

Die interessierende Größe ist hier die Nachhaltigkeit oder Zukunftsverträglichkeit (Sustainability) einer Technik zur Energiewandlung, was auf die Betrachtung des entsprechenden Primärenergieträgers reduziert wird.

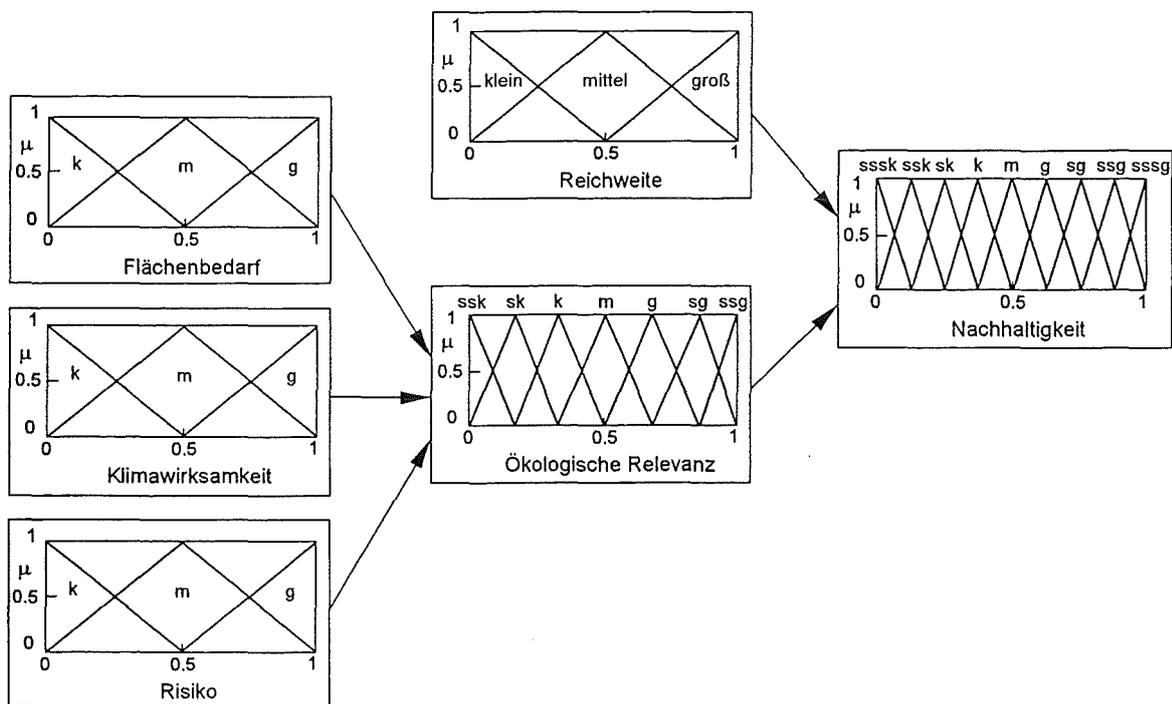


Abbildung 1: Fuzzy Logic unterstützte Technikbewertung (FLATA). Das Beurteilungsproblem Nachhaltigkeit einer Energiewandlungstechnik ist hier als Top-Down-Ansatz mit zwei Aggregationsstufen dargestellt. Gezeigt sind die linguistischen Variablen mit ihren jeweiligen verbalen Ausprägungen sowie deren Zugehörigkeitsfunktionen (z. B.: sk: sehr klein, k: klein, m: mittel, g: groß, sg: sehr groß)

2. Festlegen von untergeordneten Einflüssen zur Einstufung auf der Skala der Nachhaltigkeit. Es muß die Frage beantwortet werden, welche möglichst unabhängigen Faktoren und Kriterien die Nachhaltigkeit beeinflussen.
3. Schrittweise Segregation der Basiseinflüsse. Die untergeordneten Einflüsse werden nun je nach Kenntnisstand auf beliebig vielen Aggregationsstufen weiter segregiert, so daß insgesamt eine Aggregationshierarchie der unterschiedlichen Einflüsse entsteht. Allgemein wird in den Schritten 2 und 3 die Frage beantwortet, welche weniger aggregierten, möglichst unabhängigen Einflüsse auf welchem Aggregationsniveau auf die nächst höhere Aggregationsstufe wirken. Je nach Art einer

Einflußgröße kann diese auf einer vorgelagerten Stufe durch eine meßbare Größe beschrieben werden oder sie behält den Charakter einer Entität bei. Beide Größenarten können nebeneinander berücksichtigt werden.

4. Festlegen der Systemspezifikationen der Fuzzy Logic.

Dies beinhaltet die Festlegung von Anzahl und verbalen Benennungen der Ausprägungen aller linguistischen Variablen, der Form der Zugehörigkeitsfunktionen für die einzelnen Ausprägungen (hier: Dreieck) sowie der logischen Verknüpfungsoperatoren. Um Eindeutigkeit bei der Zuordnung innerhalb der Regelbasis zu erreichen, wurde die Anzahl der Ausprägungen der jeweiligen Ausgangsvariablen entsprechend der Anzahl der möglichen Kombinationen der Ausprägungen der Eingangsvariablen gewählt.

5. Formulierung der Regelbasis.

Die phänomenologischen Abhängigkeiten zwischen den Variablen werden in einer Wissens- oder Regelbasis in Form von Regeln beschrieben. Die Regeln geben an, welche Ausprägungen der einzelnen Eingangsvariablen mit welchen Ausprägungen der Ausgangsvariablen verknüpft sind.

Beispiel:

1. Aggregationsstufe:

WENN Flächenbedarf = klein UND Klimawirksamkeit = klein UND Risiko = klein DANN Ökologische Relevanz = sehr sehr klein.

2. Aggregationsstufe:

WENN Ökologische Relevanz = sehr sehr klein UND Reichweite = groß DANN Nachhaltigkeit = sehr sehr sehr groß.

Jeder betrachtete Primärenergieträger kann nun durch einen Einflußvektor charakterisiert werden, dessen Elemente die Werte der Eingangsgrößen auf einer bestimmten Aggregationsstufe darstellen. Die Möglichkeit, verbale Ausprägungen als Elemente des Kriterienvektors zu verwenden, ist ebenfalls gegeben. Die Gesamtheit aller Aggregationsstufen stellt eine Wissensbasis in Form von Regeln dar, über die mit hoher Wahrscheinlichkeit ein Konsens erzielt werden kann, da man sich eher darauf verständigen kann, was etwa *gut* oder *vertretbar* ist, als auf konkrete Zahlenwerte. Das Ergebnis der Bewertung ist ein verbaler oder numerischer Wert der Ausgangsvariablen.

Damit lassen sich nun etwa folgende Fragestellungen untersuchen:

1. Wie lautet die Einordnung einer Technik auf der Skala der Nachhaltigkeit?
2. Wie muß der Einflußvektor aussehen, damit für die Nachhaltigkeit ein zufriedenstellendes Ergebnis erreicht wird?
3. Welche Technik erfüllt diese Kriterien, oder wie ist eine Technik zu konzipieren, wenn sie diese Kriterien erfüllen soll?
4. Welche Elemente sind bei der Bewertung sensitiv?

Das Verfahren läßt sich auch auf eine Kombination von Technologien anwenden, allerdings müssen dann die Elemente des Kriterienvektors sich aus den entsprechenden Einzelkriterien jeder betrachteten Technik zusammensetzen. Hier ist also ein zusätzlicher Aggregationsschritt zu dokumentieren.

4.2 Das Optimierungsverfahren

Das Optimierungsproblem besteht nun darin, die prozentualen Anteile jeder betrachteten Technologie zu ermitteln, die an der Deckung des Energiebedarfs beteiligt ist. Während des Optimierungsvorgangs muß die folgende Fitness Funktion optimiert werden:

$$F = F(\alpha, \beta, \gamma) \rightarrow \max,$$

wenn der Anteil fossiler Energieträger mit α , der Anteil regenerativer Primärenergieträger mit β und der Anteil der nuklearen Primärenergieträger mit γ bezeichnet wird. Als Schließbedingung gilt $\alpha + \beta + \gamma = 1$.

Die erweiterte Bewertungsstruktur, die die Anteile der betrachteten Wandlungstechnologien an der Energiestruktur berücksichtigt, ist als Fuzzy Fitness Funktion in **Abb. 2** dargestellt. Zunächst werden aggregierte Inputgrößen für den Fuzzy Block bestimmt. Hierzu werden die Einzelkriterien für eine Technologie mit dem jeweiligen Anteil gewichtet und anschließend summiert.

Der so bestimmte Kriterienvektor des Energiemixes dient als Inputvektor für den Fuzzy-Block, der die Gesamtbewertung (Fitnesswert) für die Energiestruktur liefert. Sämtliche linguistischen Terme an den Intervallrändern der Basisvariablen (vgl. **Abb. 1**) wurden so ausgeführt, daß die Ermittlung der Schwerpunkte dieser Ausprägungen die Werte 0 bzw. 1 der Basisvariablen ergeben würden (in **Abb. 1** nicht dargestellt). Der GA variiert die Eingangsanteile der Energiestruktur bis ein Energiemix mit maximaler Fitness gefunden wurde.

5 Ergebnisse und Diskussion

In **Tab. 1** sind zunächst Werte für die zeilenweise dargestellten Kriterienvektoren und einzelne Bewertungsergebnisse aufgelistet.

Tabelle 1: Kriterienvektoren unterschiedlicher Primärenergieträger mit Bewertungsergebnissen bezüglich der Sustainability (S) unter Berücksichtigung der Klimawirksamkeit (KW), des Flächenbedarfs (FB), des Risikos (RI) und der Reichweite (RE). In zwei Testfällen wurden die minimalen und die maximalen Kriterienwerte zur Verifikation des Algorithmus verwendet. Die Kriterienwerte der Einzeltechniken wurden aus der Literatur bestimmt (siehe Ludwig, 1997a). Des weiteren ist die Bewertung der heutigen Primärenergiestruktur angegeben; in Variante (1) ist dabei die herkömmliche Kernenergie, in Variante (2) die Schnelle Brüter Technik eingesetzt.

	KW	FB	RI	RE	S
Test "Max" (Sparen)	0	0	0	1	1
Test "Min"	1	1	1	0	0
fossil (Kohle)	1.0	0.01	0.01	0.3	0.668
nuklear (Uran ²³⁵)	0.1	0.01	0.95	0.1	0.505
nuklear (Schn. Brüter)	0.1	0.01	1.0	0.8	0.65
regenerativ (Solar)	0.1	1.0	0.01	1.0	0.7067
Energiemix 1994 $\alpha=0.895, \beta=0.032, \gamma=0.073$					
(1)	0.906	0.042	0.079	0.308	0.617
(2)			0.082	0.359	0.626
(Quelle: Fischer, 1997)					

Aus der für 1994 gültigen Primärenergiestruktur (Fischer, 1997, S. 1109) wurde der Kriterienvektor für den heutigen Energiemix ermittelt. Dabei wurde der nukleare Anteil einmal als herkömmliche Technik auf der Basis Uran²³⁵ (1) und einmal als Schnelle Brüter

Technik angenommen (2). Der Anteil für fossile Energieträger enthält Kohle, Erdöl und Erdgas; er wurde in diesem Modell nicht weiter aufgespalten. Der Anteil für regenerative Energien besteht zwar zum größten Teil aus Wasserkraft, betrachtet jedoch alle regenerativen Energien als PV-Solarenergie. Für Wasser muß allerdings konstatiert werden, daß sich die Werte für KW und FB ändern müßten.

Die Ergebnisse der Bewertungen in Tab.1 lassen folgende Aussagen zu:

- Das Bewertungsverfahren liefert unter Vorgabe der Kriterienvektoren korrekte Ergebnisse.
- Maximale Nachhaltigkeit kann nicht erreicht werden.
- Aufgrund des hohen Risikos bei gleichzeitig geringer Reichweite wird die herkömmliche Kernenergie auf der Basis von Uran²³⁵ am schlechtesten bewertet.
- Der heutige Energiemix ist hinsichtlich dieser Bewertung zu überdenken.
- Die beste Bewertung ergibt sich für die regenerativen Energien, die aber aufgrund des Flächenbedarfs nicht sehr herausragt.

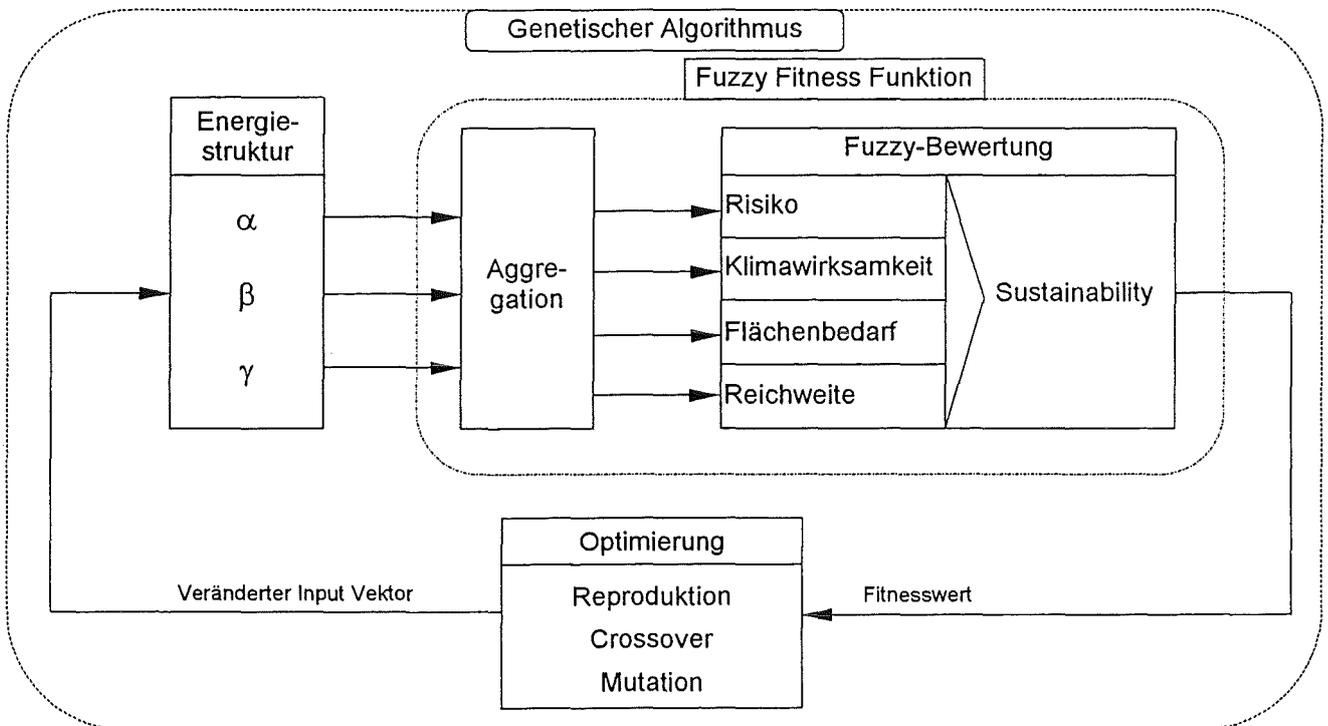


Abbildung 2: Die Struktur des Verfahrens der Rekursiven Optimierung durch einen Genetischen Algorithmus mit einer Fuzzy Fitness Funktion, angewendet auf die Bestimmung der im Sinne der Nachhaltigkeit optimalen Kombination von Energiewandlungstechnologien. (prozentuale Anteile der Primärenergieträger: α : fossil, β : regenerativ, γ : nuklear)

Das betrachtete Modell zur Optimierung von Energiesystemen ergibt einen Lösungsvektor, der die prozentualen Anteile der beteiligten Energiewandlungstechniken enthält. Für die beschriebene Bewertungsfunktion ergibt sich als Optimum (0,1,0), d. h., die beste Lösung wäre die komplette Energieversorgung mit regenerativen Energieträgern. In einem zweiten Fall wurde das Kriterium Risiko nicht mit betrachtet. In diesem Fall ergab der Lösungsvektor (0,0,1), d. h. den alleinigen Einsatz von Kernenergie.

Von Interesse sind Lösungsvektoren mit einer Bewertung, die geringfügig unterhalb des Wertes für regenerative Energien liegt. Dabei überwiegt der regenerative Anteil jeweils noch deutlich, nimmt jedoch mit abnehmender Bewertung ab, wobei die Schwankungen ansteigen.

Gleichzeitig nehmen die Anteile fossil und nuklear wechselseitig bei ebenfalls steigenden Schwankungen zu. Es gibt daher unterhalb des Optimums jeweils mehrere Lösungen, die zum gleichen Bewertungsergebnis führen.

Das Ergebnis ist selbstverständlich stark von den vorher festgelegten Basiskriterien abhängig. In dem hier betrachteten Fall wurden diese Basiskriterien noch sehr aggregiert belassen, um die Einsatzmöglichkeit der Methode zu demonstrieren. Daher wurde die reale Situation nicht genügend differenziert dargestellt, weshalb die Ergebnisse eher trivial sind. Jedoch ist beispielsweise die Unterscheidung von Wüsten- und Waldflächen denkbar, was bereits das Ergebnis beeinflussen sollte. Offensichtlich muß darauf geachtet werden, die realen konkurrierenden Einflüsse im Modell abzubilden.

6 Schlußfolgerungen

Werden bei der Optimierung komplexer Systeme neben technischen und ökonomischen auch Umweltkriterien berücksichtigt, treten methodische Schwierigkeiten auf, da klassische Methoden nicht anwendbar sind. Im vorliegenden Beitrag wurde eine rekursive, auf den Methoden des soft computing basierende Kombination aus Fuzzy Logic und Genetischen Algorithmen vorgestellt.

Im Fall des gewählten Anwendungsbeispiels der Energieversorgung kann die optimale Primärenergiestruktur ermittelt werden, indem verschiedene, durch einen Genetischen Algorithmus systematisch variierte, vorgegebene Strukturen mittels eines Fuzzy Logic unterstützten Bewertungsverfahrens eingestuft werden.

Das Ergebnis zeigt die prinzipielle Anwendbarkeit des Verfahrens. Zukünftig ist es jedoch notwendig, die Wissensbasis mit weiteren Unterscheidungskriterien für die Bewertung weiter aufzugliedern, um damit eine differenzierte Darstellung der Energieträger zu erhalten.

Die Methode ist außerordentlich transparent und vielseitig anwendbar. Je konkreter eine technische Lösung ist, desto detaillierter kann eine Untersuchung begonnen werden, wobei auch Module der Geistes- und Gesellschaftswissenschaften integriert werden können.

Literatur

- BUND, 1996, BUND/MISERIOR (Hrsg.), 1996, „Zukunftsfähiges Deutschland“, Birkhäuser, Basel.
- Enquete, 1994, Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des Deutschen Bundestages (Hrsg.), „Die Industriegesellschaft gestalten“, Economica, Bonn.
- Fischer, 1997, „Der Fischer Weltalmanach 1998“, Fischer, Frankfurt a. M.
- Gore, A., 1993, „Earth in the Balance“, Plume, New York.
- Grefenstette, J., 1982, „Optimization of Control Parameters for Genetic Algorithms“, *IEEE Transactions on Systems Managements and Cybernetics*, Vol. 16, No. 1.
- Hoffman, U. und Hofmann, H., 1971, „Einführung in die Optimierung“, Verlag Chemie, Weinheim.
- Kaplan, G., 1994, „Appropriate Technologies“, *IEEE Spectrum* Vol. 31, No. 10, pp. 32-33.
- Jischa, M. F., 1997, „Das Leitbild Nachhaltigkeit und das Konzept Technikbewertung“, CIT, Vol. 69, 12, S. 1695-1703.
- Kinnebrock, W., 1994, „Optimierung mit genetischen und selektiven Algorithmen“, Oldenbourg, München.

1. Workshop „Wissensbasierte / Intelligente Systeme in Umwelthanwendungen“ UI '98

- Ludwig, B., 1995, „Methoden zur Modellbildung in der Technikbewertung“, Dissertation, Technische Universität Clausthal; siehe auch: CUTEC-Schriftenreihe Nr. 18, Papierflieger, Clausthal-Zellerfeld, 1995.
- Ludwig, B. und Tulbure, I., 1996, „Ein fuzzy-unterstützter Ansatz zur Erfassung und Bewertung von Umweltinformationen am Beispiel der Luftverunreinigung“, in: Ranze, C. et al. (Hrsg.): „Intelligente Methoden zur Verarbeitung von Umweltinformationen“, 2. Bremer KI-Pfingstworkshop, Metropolis, Marburg, S. 181-192 (ISBN 3-89518-111-0).
- Ludwig, B., 1997a, „On the sustainability of future energy systems“, J. Energy Conversion and Management, Vol. 38, No. 15-17, pp. 1765-1776.
- Ludwig, B., 1997b, „The Concept of Technology Assessment - An Entire Process to Sustainable Development“, *Sustainable Development*, vol. 5, part 3, pp. 111-117.
- Ludwig, B., 1997c, „Optimization of energy systems under the aspect of sustainability“, Proceedings of the 32nd Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Honolulu, July 27-August 1, 1997, pp. 2070-2075.
- Mayer, A., Mechler, B., Schlindwein, and A., Wolke, R., 1993, „Fuzzy Logic“, Addison-Wesley, Bonn.
- Page, B. und Hilty, L. M., 1994, „Umweltinformatik“, Oldenbourg, München.
- Rechenberg, I., 1973, „Evolutionsstrategie“, Frommann-Holzboog, Stuttgart.
- Schöneburg, E., Heinzmann, F. und Feddersen, S., 1994, „Genetische Algorithmen und Evolutionsstrategien“, Addison-Wesley, Bonn.
- Spiess, M., 1993, „Unsicheres Wissen“, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- Turban, E., 1995, „Decision Support and Expert Systems“, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Zimmermann, H.-J., 1991, „Fuzzy Set Theory and its Applications“, Kluwer Academic Publishers, Boston.
- Zimmermann, H.-J., 1993, „Fuzzy Technologien“, VDI, Düsseldorf.

7 Einsatz von Computational Intelligence Methoden in der Thermischen Abfallbehandlung

Bernd Müller, Hubert Keller
Forschungszentrum Karlsruhe
Institut für angewandte Informatik
76344 Eggenstein Leopoldshafen

Die theoretische/analytische Modellierung und Steuerung komplexer dynamischer Systeme scheitert oft an der hohen Anzahl schlecht bestimmbarer Parameter und der extremen Vernetzung der schwer abgrenzbaren Systemkomponenten.

Eine vollkommen neue Art des Zugangs bieten Methoden der Computational Intelligence, welche entweder von Experten akquiriertes oder automatisch aus Daten/Zeitreihen abgeleitetes Wissen auf dem Rechner repräsentieren und auswerten. Verfahren wie Fuzzy Regelung, Neuronale Netze oder Maschinelles Lernen definieren eine neue Methodik in der Modellierung und Steuerung dynamischer Systeme.

Der vorliegende Artikel stellt konkrete Entwicklungen in den Bereichen Fuzzy Control, Neuronale Netze und den Einsatz von Evolutionären Algorithmen in der Arbeitsgruppe MICS – *Machine Intelligence in Complex Systems Control* - des Instituts für Angewandte Informatik vor.

7.1 Einleitung

7.1.1 Was ist Computational Intelligence?

Computational Intelligence umfaßt die heuristischen Ansätze Fuzzy Control, Neuronale Netze und Genetische/ Evolutionäre Algorithmen. Das Gebiet der Computational Intelligence geht aus der künstlichen Intelligenz hervor, wobei der Aspekt der Selbstorganisation bzw. das Verarbeiten von unscharfen Wissens über das zu bearbeitende Problem eine tragende Rolle spielt.

Im folgenden werden die Methoden der CI sowie ihr Anwendungsgebiet kurz beschrieben. Dann folgen Anwendungen dieser Methoden in der Thermischen Abfallbehandlung.

Fuzzy Logik verarbeitet unscharfes Wissen durch Repräsentation über stetige Zugehörigkeitsfunktion. D.h. eine Information wird nicht mehr einem Wahrheitswert 0 oder 1, sondern auch dazwischen liegenden Werten zugewiesen. Die Weiterverarbeitung erfolgt über unscharfe Regeln in Form von arithmetischen Operationen, die nicht mehr Boolesche Variable, sondern Zugehörigkeitswerte verarbeiten. Mehr dazu in Bothe, 1993 [1].

Fuzzy Logik eignet sich zur Modellierung und zu Steuerung von Prozessen. Der Vorteil beim Einsatz von Fuzzy Logik liegt in der relativ leichten Erstellung einer Regelbasis, da die Eingangsgrößen als linguistische Variable vorliegen. Eine *Fuzzy-Steuerung* ist ein i.d.R. nichtlineares Kennfeld, das aber durch direktes Umsetzen von qualitativem Erfahrungswissen erzeugt wurde. Somit kann Expertenwissen schnell in eine Reglerkonstruktion überführt werden..

Künstliche **Neuronale Netze** imitieren biologische Neuronale Netze hinsichtlich des informationsverarbeitenden Aspekts. Ein Neuronales Netz besteht aus den über gewichtete Verbindungen miteinander verbundenen informationsverarbeitenden Einheiten, den Neuronen. Analog zum biologischen Vorbild sind selbstorganisierende Prozesse gegeben, die über Lernverfahren implementiert sind. Nachdem in der Trainingsphase eine Problemlösung durch Konvergenzverfahren „gelernt“ wurde, kann das trainierte Netz auf die Problemlösung ange-

wendet werden. Verschiedene Netztypen unterscheiden sich durch ihre Topologie sowie durch den Typ der eingesetzten Neuronen.

Neuronale Netze werden zur Funktionsapproximation, zur Optimierung zur Prädiktion und zur Klassifikation verwendet (siehe Ritter et al., 1990 [9]).

Evolutionäre Algorithmen (EA) werden wie Genetische Algorithmen (GA) zur Optimierung eingesetzt. Hierzu werden potentielle Lösungen als Individuen einer Population gesehen, die durch die Operatoren Mutation und (bei GA) Crossover verändert werden. Eine Gütefunktion (Fitness function) bestimmt die Qualität der Individuen bzgl. ihres Problemlösungspotentials.

Durch Verwendung einer Population wird parallel im ganzen Suchraum gesucht. Dies macht evolutionäre Algorithmen z.B. zur Optimierung kombinatorische Probleme attraktiv. Hierbei wird nicht das globale Optimum gesucht, sondern „gute“ Lösungskandidaten. Die Stecknadel im Heuhaufen kann durch diesen Ansatz auch nicht gefunden werden.

Der Vorteil bei Evolutionären Algorithmen liegt in der Anwendbarkeit auf nichtstetige Gütefunktionen.

Folgende Übersicht zeigt die Struktur der Wissensverarbeitung dieser Methoden.

	Fuzzy Logik	Neuronale Netze	GA/EA
Form der Struktur	Regeln	Topologie	keine Struktur
Adaptivität	nicht adaptiv	adaptiv	maximal adaptiv

7.1.2 Thermische Abfallbehandlung

Im Rahmen der Abfallverarbeitung stellt die **thermische Abfallbehandlung (TAB)** einen wesentlichen Prozeßschritt dar, sei es zur Kompaktierung der Reststoffe vor einer Deponierung oder als Vorverarbeitungsphase für eine Recyclierung (siehe z. B. Braun, 1990 [2]). Eine Optimierung bzgl. minimaler Schadstoffemission und maximaler Reduktion der Müllmengen durch optimalen Ausbrand wird durch folgende Gegebenheiten erschwert:

- das Brenngut ist heterogen bezüglich seiner chemischen Zusammensetzung, der Konsistenz und bei festen Produkten der Geometrie der Stückung,
- die Zusammensetzung des Brennguts variiert zeitlich u. U. sprunghaft und
- die Zusammensetzung des Brennguts kann meßtechnisch nicht vollständig erfaßt werden.

Da keine präzise, geschlossene Beschreibung des technischen Prozesses und des Prozeßverhaltens existiert, obliegt es dem menschlichen Bediener, den Prozeß als übergeordneter Regler zu führen. Der Operateur bedient sich hierbei einer Vorgehensweise, die auf vagem (unpräzise) und heuristisch gewonnenem, aber stabilem Erfahrungswissen basiert (vgl. Keller und Jaeschke, 1996 [6]). Moderne Prozeßführungsmethoden versuchen, diese Vorgehensweise zu nutzen, und beziehen ebenfalls vages und heuristisches Wissen in die Prozeßführung ein. Die Nutzung von Verfahren der Maschinellen Intelligenz (siehe z.B. Keller, 1998 [3]) hat dann gegenüber der menschlichen Prozeßführung den Vorteil, daß im Prozeßführungssystem das Wissen aus unterschiedlichen Quellen akkumuliert und standardisiert werden kann, permanent verfügbar ist und konsistent sowie vollständig zur Auswertung kommt.

7.2 *Fuzzy Control zur Ausbrandsteuerung*

7.2.1 Problem

In der TAB treten immer wieder Situationen auf, bei denen unverbrannte Müllanteile aus dem Hauptverbrennungsbereich in den Ausbrandbereich wandern. Bei größeren Anteilen übernimmt normalerweise der Operateur die Aufgabe, im zugehörigen Bereich entsprechend die Luft zu erhöhen und evtl. die Rostgeschwindigkeit zu reduzieren. Wird nicht korrigierend eingegriffen, so fallen nicht vollständig verbrannte Müllanteile in den Schlackekasten. Dies kann dazu führen, daß die gesetzlichen Anforderungen an die Reststoffe (Schlacke) hinsichtlich einer Wiederverwertbarkeit nicht eingehalten werden können.

Zur automatischen Sicherstellung des Ausbrandgrades und der Erfüllung der TA Siedlungsabfall in der TAB wurde ein System entwickelt, das visuelle Informationen verarbeitet (Keller und Albert, 1997 [4]). Eine Videokamera liefert ein perspektivisches Bild der Ausbrandzonen. Die auszuwertenden Bereiche werden durch graphisch frei konfigurierbare Segmente (Zonen und Unterteilungen) definiert. Innerhalb eines Zyklus werden die Operationen Bilderfassung, Bildverarbeitung, Regelalgorithmus und Prozeß-Leitsystem-Kommunikation durchgeführt. Zur Optimierung der Luftsteuerung wurde ein Fuzzyregler entwickelt und in dieses System integriert.

7.2.2 Der Fuzzyregler

Der Fuzzyregler soll unverbranntes Material anhand der brennenden Fläche und der auf diese Fläche bezogenen Intensität erkennen und danach die Luftzufuhr verändern. Mit Hilfe der Änderung der Summe der Intensitäten soll die Luft so lange erhöht werden, bis der Müll maximal brennt. Ist dies der Fall, so ändert sich die Intensität nicht mehr wesentlich. Mit Hilfe der vergangenen Werte der Änderung der Luftzufuhr sollen unnötig große Stellgrößenänderungen vermieden werden, die durch Verpuffungen und Flackern entstehen könnten. Der eingesetzte Fuzzyregler besitzt vier Eingangsgrößen und eine Ausgangsgröße. Die Eingangsgrößen sind die erkannte Fläche (Größe des Brandherdes ΣA), die darauf bezogene Intensität (Intensität des Brandherdes $\Sigma I/\Sigma A$), die Änderung der Summenintensität ($\Delta \Sigma I$) und die Änderung der Luftzufuhr (ΔL_{alt}).

Die Ausgangsgröße ΔL_{neu} ist eine Änderung der Luft, die zum absoluten Wert der Luftzufuhr hinzugerechnet wird und zwischen den Größen MIN und MAX liegt. Im Prozeßleitsystem wird dieser Wert in eine additive Komponente umgerechnet, die zu einem Luftgrundwert addiert wird.

Die maßgeblich für das Regelverhalten entscheidenden Größen sind die Zugehörigkeitsfunktionen für die Fläche und die Intensität. Abbildung 19 zeigt den Aufbau des Fuzzyreglers.

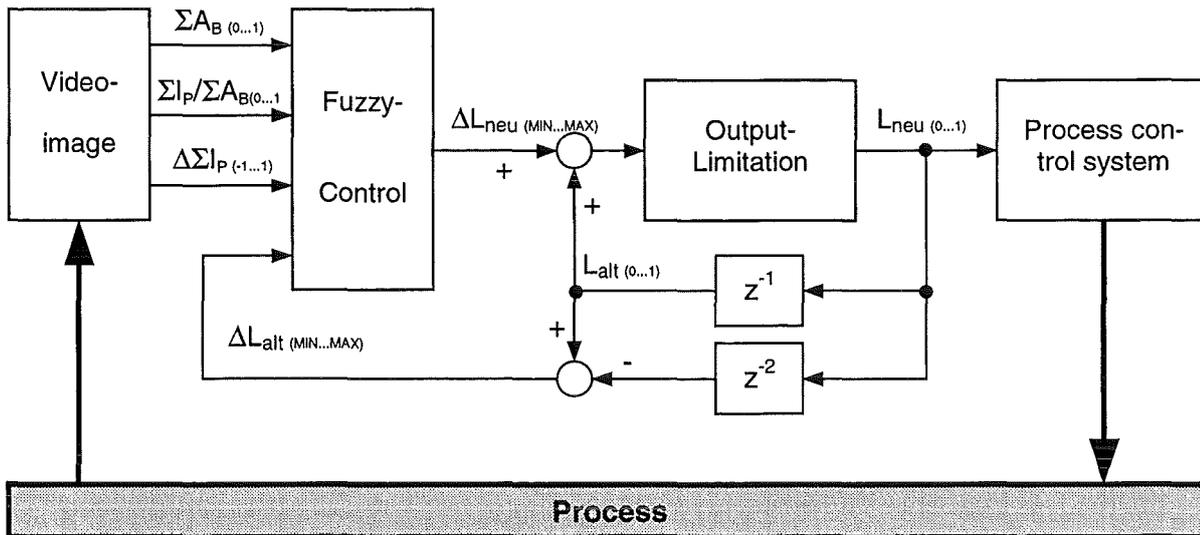


Abbildung 19: Systemstruktur

Eine weitere Verbesserung des Regelungsverhaltens lässt sich durch die Einbeziehung der Rostgeschwindigkeit erreichen. Allerdings kann die Rostgeschwindigkeit nur in einem bestimmten Umfang geändert werden, da es sonst zu Stauungseffekten auf den davor liegenden Rosten kommt.

7.2.3 Zusammenfassung

Das vorgestellte System läuft seit einiger Zeit im on-line closed-loop Betrieb an einer großindustriellen Müllverbrennungsanlage (MVA) mit großem Erfolg. Bei wechselnder Müllzusammensetzung treten immer wieder Situationen auf, in denen nicht vollständig verbrannte Müllanteile in den Ausbrandbereich wandern. Hier greift das System frühzeitig ein und berechnet für die eingesetzten konventionellen Luftregler neue Sollwerte entsprechend der vorliegenden Situation. Dadurch wird der Ausbrand deutlich verbessert.

7.3 Neuronale Netze zur Modellierung und Simulation

7.3.1 Einführung

Im EU-Projekt CLEAN werden die Schadstoffemissionen von Anlagen zur thermischen Abfallbehandlung durch die Modellierung / Simulation und Regelung des Verbrennungsprozesses mit Hilfe von Neuronalen Netzen verringert. Die Ursache bei der Entstehung von Schadstoffen wie CO oder NO_x liegt z. T. in einem ungleichmäßig verlaufenden Verbrennungsvorgang. Neuronale Netze versprechen eine Verringerung dieser Schwankungen in Form einer modellbasierten Regelung. Aus vorgegebenen Datensätzen wird ein (neuronales) Modell erzeugt und darauf basierend ein neuronaler Regler für Eingriffsvorschläge entwickelt. Dieser bietet Vorschläge für Änderungen der Stellgrößen der realen Anlage, die von einem Benutzer zur Steuerung der Anlage benutzt werden können (siehe Keller und Müller [7] sowie Müller und Keller [8]).

7.3.2 Simulation / Modellierung

Das Prozeßleitsystem der MVA liefert alle 10 sec einen Datensatz aus 28 Prozeßparametern. In einer einwöchigen Meßkampagne wurden somit ca. 40000 Datensätze erfaßt. Eine Abschätzung der für die Prozeßdynamik einzubeziehenden Prozeßhistorie liefert ein zeitliches

Intervall der jeweils letzten 10 Minuten, in dem Daten zur Eingabe an ein Neuronales Netz gegeben werden.

Nach einer Reduktion der Daten durch Vorverarbeitung und a priori Selektion der Parameter repräsentieren die Datensätze einen internen Systemzustand. Ein Neuronales Netz übernimmt in diesem Fall die Abbildung des Systemzustands in einen Folgezustand, so daß die Ausgabe des Netzes auf die Eingabe zurück gekoppelt werden kann (Mehrschrittprädiktion). Neben dem Systemzustand erhält das Netz zusätzlich die Stellgrößen des Prozesses als Eingabe.

Um ein möglichst kleines Netz mit minimaler Redundanz zu erhalten, wurde das Netz bzgl. seiner Topologie (Verbindungen, Eingabeneuronen) optimiert. Es wurde vorerst versucht, mit Pruning (Ausdünnen des Netzes bzgl. Gewichten und Neuronen) die Topologie zu minimieren. Dies war nicht erfolgreich, da sich der Netzfehler nach kurzer Zeit stark erhöhte. Evolutionären Algorithmen bieten bessere Suchstrategien für diese Anwendung, wie im folgenden Absatz beschrieben wird. Die Simulationen wurden mit dem Stuttgarter Neuronaler Netz-Simulator durchgeführt, die Optimierungen mit Evolutionären Algorithmen entstanden mit ENZO (Universität Karlsruhe).

7.3.3 Evolutionäre Algorithmen zur Optimierung von Neuronalen Netzen

Um zur Strukturoptimierung ein möglichst kleines Netz mit minimaler Topologie bei einem geringen Fehler zu erhalten, wird das trainierte neuronale Modell mit ENZO optimiert. Ausgang ist eine Population von (an)trainierten Netzen. Diese werden in einer Trainingsphase trainiert, und dann mit einer Fitness Funktion bewertet. Es gibt verschiedene Strategien bei der Auswahl der Individuen, die in die nächste Generation übernommen werden. Wählt man nur Individuen mit einer guten Fitness, so kann es zu einer zu schnellen Spezialisierung der Population und somit zu einer nicht vollständig entwickelten Optimierung kommen. Daher ist es sinnvoll, auch schwächere Individuen in die Folgegeneration zu übernehmen. Durch die größere Streuung der Ausprägungen wird somit der Suchradius vergrößert.

Veränderungen der Population finden bei ENZO durch Mutation statt. Hierbei können Gewichte sowie Neuronen hinzugefügt und gelöscht werden.

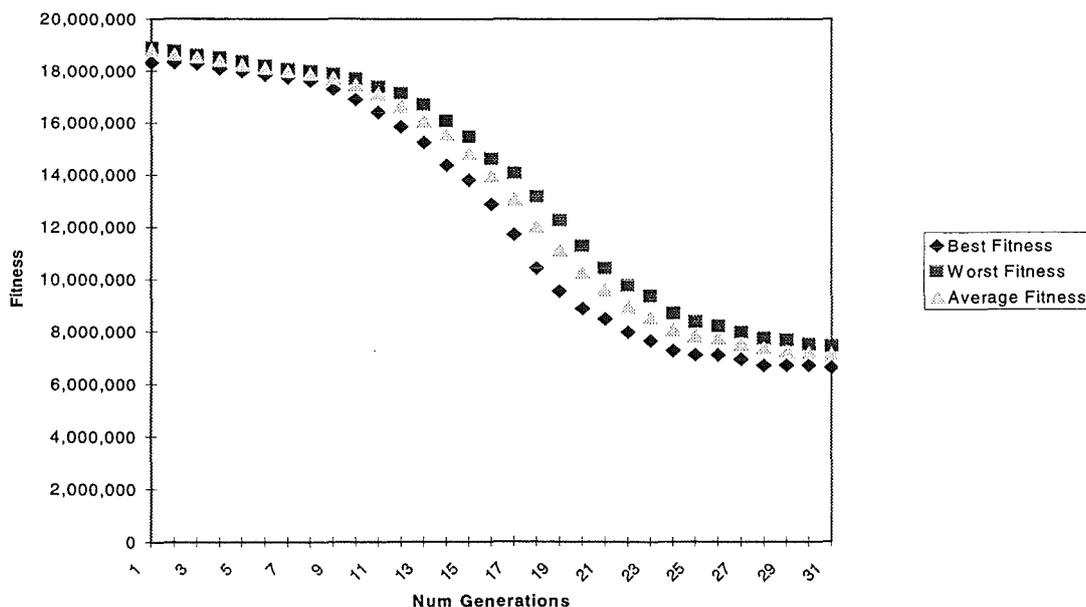


Abbildung 20: Die Fitness der Netze in Abhängigkeit der Zeit.

Die Fitness Funktion enthält zwei Terme - die Netzgröße (Anzahl Gewichte und Anzahl Neuronen) und die Genauigkeit der approximierten Funktion. In der praktischen Anwendung hat sich gezeigt, daß die Gewichtung dieser Terme mit Fingerspitzengefühl durchzuführen ist. Da zwei verschiedene Kriterien optimiert werden sollen, muß die Fitnessfunktion z.B. konvex sein da sonst die Individuen dazu neigen, immer nur ein Kriterium zu optimieren. Abbildung 20 zeigt die Fitness für jedes Individuum einer Generation in Abhängigkeit der Anzahl der Generationen.

Man sieht, daß sich die Fitness der Individuen nicht linear verbessert, sondern daß erst nach einigen Generationen eine signifikante Verbesserung der Individuen erfolgt. Die Parameter für diese Konfiguration: 30 Generationen, 40 Individuen pro Generation, 15 der Individuen bleiben erhalten.

Durch diese Optimierung konnte die Größe des Netzes auf 30% reduziert werden, wobei der Fehler gleichblieb, und sich der Validierungsfehler sogar reduzierte. Dies liegt an einer redundanzfreien Wissensrepräsentation im Netz, die ein Overtraining unterbindet, und somit die Generalisierungsfähigkeit des Netzes erhöht.

7.3.4 Der Steuerungsmechanismus

Um eine einfache modellbasierte Steuerung zu realisieren, genügt die Simulation der wichtigsten Führungsgröße, in diesem Fall der Dampfleistung. Es wird das als Simulator trainierte Neuronale Netz benutzt, um Stellgrößen zu erhalten, die den Prozeß bzgl. der Führungsgrößen in eine Sollvorgabe überführen. Hierzu wird aus der Differenz von Netzausgabe und temporärer Sollvorgabe eine Korrektur für die Stellgrößen rückwärts propagiert. Die Berechnung neuer Stellgrößen geschieht dabei analog dem Lernen neuer Gewichte beim Backpropagation-Algorithmus. Die so ermittelten Parameter umfassen die Vorschubgeschwindigkeit des Rostes, Müllaufgabe und Luftzuführung.

Da die Dynamik des Prozesses zu unerwünschten Nebeneffekten (Schwingverhalten) führen kann, muß die Auswirkung des Eingriffs auf den Prozeß abgeschätzt werden. Dazu wird durch mehrfache Anwendung der Stellgrößen auf die Simulation eine Handlungssequenz aufgebaut. Eine Gütefunktion bestimmt, ob diese Sequenz sinnvoll ist, und die temporäre Sollvorgabe wird modifiziert. Dieser Vorgang läuft iterativ, bis eine zufriedenstellende Handlungssequenz gefunden wurde. Dann erst werden die ermittelten Stellgrößen als Steuerungsvorschlag an das Interface gebracht. Abbildung 21 zeigt den Vergleich zwischen realem Prozeß und (simulierten) Werten aufgrund der neuronalen Regelung.

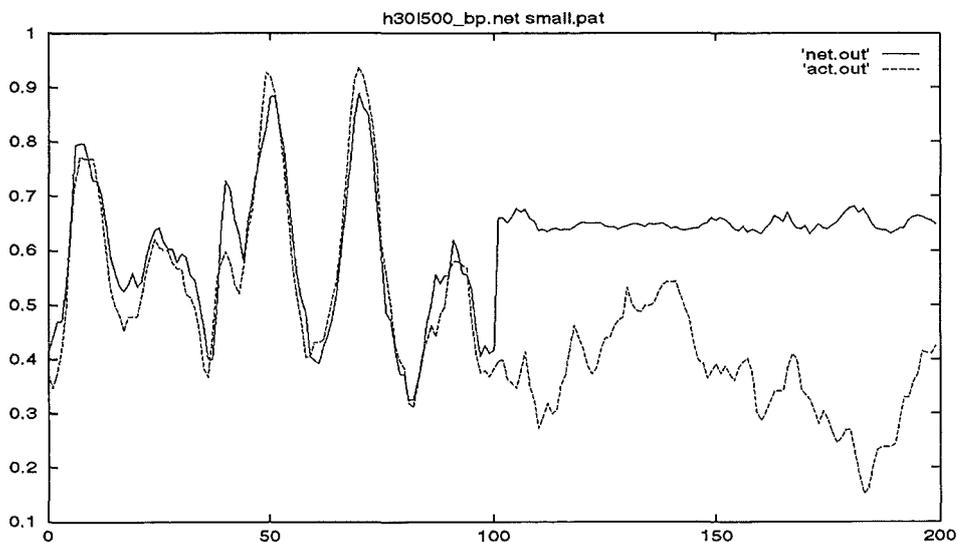


Abbildung 21: Steuerungsverhalten der Simulation bei online Ermittlung der Primärluftzufuhr

7.3.5 Zusammenfassung

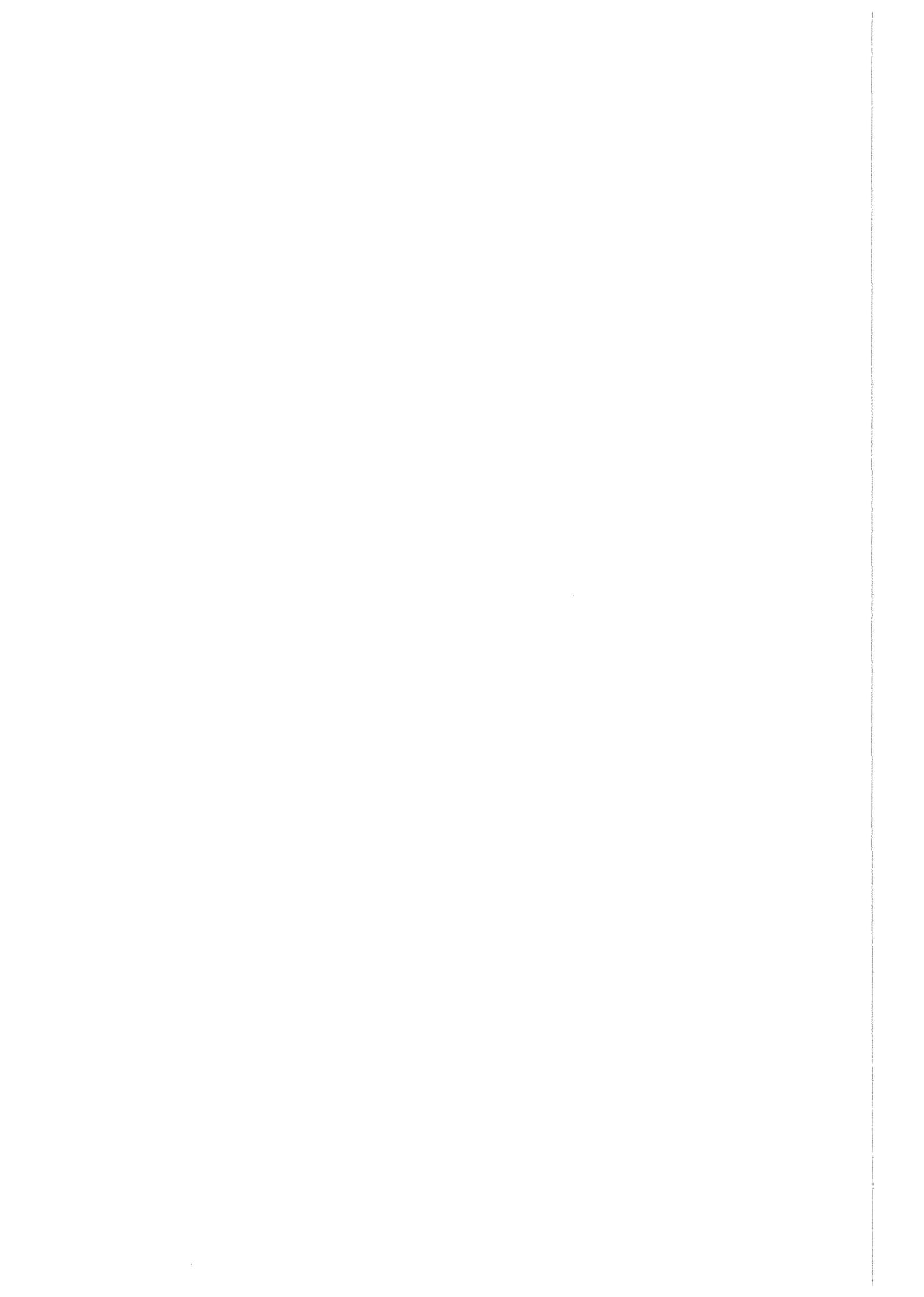
Mit dem entwickelten Prototyp wurde ein on-line Testbetrieb an einer großindustriellen Anlage durchgeführt. Die Ableitung der Eingriffssequenzen konnte eindrucksvoll demonstriert werden, für saisonale Schwankungen der Müllzusammensetzung ist noch ein übergeordnetes Qualitätssicherungskonzept zu realisieren. Für eine frühzeitige Erkennung der thermographischen Auswirkungen der unterschiedlichen Müllzusammensetzung wird ein System zur On-line- Auswertung von Infrarot Kamerabildern entwickelt, aus dem zusätzliche Prozeßgrößen generiert werden, die dem gegenwärtigen System eine höhere Prädiktionsqualität geben.

7.4 *Schluß*

Die Anwendung von heuristischen Verfahren der Computational Intelligence in regelungstechnischen Anwendungen ermöglicht eine neue Qualität in der Automatisierung komplexer Prozesse. Die praktischen Ergebnisse zeigen darüber hinaus einen deutlichen finanziellen Nutzen. Allerdings erfordert der Einsatz dieser Verfahren sowohl ein fundiertes Know-how im Anwendungsbereich als auch in der zu Grunde liegenden Theorie der eingesetzten Verfahren.

7.5 *Literatur*

- [1] Bothe, H.: *Fuzzy Logik*. Springer Verlag Berlin. 1993.
- [2] Braun, H.: *Abfallverbrennung*. In: Umweltforschung Umwelttechnik, Karlsruhe: Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH. 1990. Seiten 3-17.
- [3] Keller, H. B.: *Maschinelle Intelligenz*. Vieweg Verlag, erscheint in 1998.
- [4] Keller, H. B., Albert, W.: Ein Videobild-gestütztes System zur Optimierung des Ausbrandes in der thermischen Abfallbehandlung. Wasser&Boden, 6/97.
- [5] Keller, H. B.; Fick, A.: Maschinelle Lernverfahren am Beispiel der Thermischen Abfallbehandlung. KI, Sonderheft KI und Umwelt, Heft 2/98.
- [6] Keller, H. B.; Jaeschke, A.: *Einsatz neuer Informatik-Konzepte im Umweltbereich am Beispiel der thermischen Abfallbehandlung*. In: Haasis u. a., Reihe Umwelt-Informatik aktuell, Metropolis Verlag. 1996.
- [7] Keller, H. B., Müller, B.: Modellbildung und Simulation in der Müllverbrennung mit Neuronalen Netzen. Meß- und Automatisierungstechnik: Verfahrens- und Fertigungstechnik, Energie, Umwelt, Kommunikation, Mechatronik, Theorie. Kongress, Baden-Baden, 10.-11. Sept. 1996, VDI-Bericht 1282, Düsseldorf: VDI-Verlag. 1996. Seiten 669-674.
- [8] Müller, B.; Keller, H. B.: *Neural Networks for Combustion Process Modelling*. International Conference on Engineering Applications of Neural Networks (EANN 96), London, UK, 17-19 June 1996.
- [9] Ritter, H. et al.: *Neuronale Netze*. Addison Wesley. 1990.



8 Akzeptanzprobleme bei der Einführung von wissensbasierten Systemen zur Unterstützung der umweltgerechten Produktentwicklung

S. Schramme & B. Rüttinger

8.1 Einleitung

In vielen Untersuchungen über die Einführung neuer Informationssysteme in Betrieben werden „Akzeptanzprobleme“ als wichtiges Thema behandelt. Es wird betont, daß Neuerungen, die nicht genutzt werden, teure Fehlinvestitionen sind. Technische Systeme sollten deswegen nicht nur „technikorientiert“, sondern auch „akzeptanzorientiert“ angelegt sein (vgl. Helmreich, 1981 [4]). Die einschlägigen praxisbezogenen Untersuchungen werden allerdings in der Regel nicht theoriegeleitet durchgeführt. Auch ist in diesen Untersuchungen die Verwendung des Akzeptanzbegriffs sehr uneinheitlich. Seine Bedeutung umfaßt teilweise Verhaltensaspekte wie z.B. die häufige und intensive Nutzung eines Systems oder Vorschläge zu seiner Verbesserung, gewöhnlich jedoch Einstellungsaspekte, die von einer zustimmenden bis zu einer duldbaren Einstellung reichen (Schönecker, 1980 [6]). Der jeweilige Akzeptanzbegriff, der den Untersuchungen zugrunde liegt, wird allerdings im allgemeinen so global erfaßt, daß aus den Studien keine differenzierten Maßnahmen zur Akzeptanzverbesserung abgeleitet werden können (Müller-Bölling und Müller, 1986 [5]).

Eine differenziertere und aussagekräftigere Form der Akzeptanzmessung läßt sich im Rahmen der „Theorie der geplanten Handlung“ konzipieren (Ajzen, 1989 [1] und 1991 [2]). Nach dieser Theorie lassen sich sowohl Verhaltens- wie Einstellungsaspekte der Akzeptanz konzeptualisieren, verschiedene individuelle, soziale und situative Bedingungen der Akzeptanz unterscheiden und aufgrund der verschiedenen Ursachen spezifische Vorschläge zur Verbesserung der Akzeptanz ableiten. Die Theorie hat sich in einer Vielzahl angewandter Fragestellungen bewährt (vgl. van der Putte, 1993 [7]; Bamberg und Schmidt, 1994 [3]).

Untersuchungen im Rahmen der „Theorie der geplanten Handlung“ erlauben nicht nur die Feststellung des Ausprägungsgrades der Akzeptanz, sondern auch seiner Determinanten. Erst dadurch können aus den Untersuchungen gezielte Interventionen abgeleitet werden. Darüber hinaus werden in dieser Theorie auch die Realisierungsbedingungen von Neu-Einführungen wie von Verbesserungsmaßnahmen berücksichtigt.

Nach dieser Theorie läßt sich die Akzeptanz als die Absicht oder Intention bestimmen, eine Handlung durchzuführen, d.h. Systeme, Methoden und Instrumente der umweltgerechten Produktentwicklung zu nutzen. Dabei wird folgende kausale Kette der Handlungsentstehung postuliert. Das beobachtbare Handeln wird zunächst unmittelbar durch die Intention oder Absicht, dieses Handeln auszuführen, determiniert. Die Stärke der Handlungsintention hängt von der Stärke dreier theoretisch unabhängiger Konstrukte ab:

- der Einstellung gegenüber der Handlung;
- den wahrgenommenen Erwartungen wichtiger Dritter gegenüber der Handlungsdurchführung (subjektive Norm);
- der wahrgenommenen Schwierigkeit, die Handlung durchzuführen (wahrgenommene Handlungskontrolle).

Die Einstellung, die subjektive Norm und die wahrgenommene Handlungskontrolle werden als kognitive Überzeugungen des Handelnden erfaßt, nämlich als handlungsbezogene Überzeugungen, als normative Überzeugungen und als Kontrollüberzeugungen.

Die Einstellung hängt von Attributen oder Merkmalen ab, die mit dem Einstellungsobjekt verknüpft sind. Diese Attribute sind beliebige Kognitionen, bei Handlungen z.B. erwartete Konsequenzen, Ziele oder Werte. Die Verbindung eines Attributs oder Merkmals mit einem Einstellungsobjekt wird Überzeugung (belief) genannt (z.B. „der Einsatz einer neuen Methode führt zu Zeitverlust“). Die Stärke oder Intensität, mit welcher die Überzeugungen mit dem Einstellungsobjekt verbunden sind, wird als subjektive Wahrscheinlichkeit bezeichnet. Neben der Wahrscheinlichkeit, mit der Merkmale und Einstellungsobjekt verbunden sind, wird jedes Merkmal auf einer Bewertungsdimension als positiv bzw. negativ beurteilt. Diese Bewertungen (evaluations) bestimmen, ob zu einem Objekt eine positive oder negative Einstellung besteht. Die mit einer Einstellung verbundenen Überzeugungen setzen sich also aus einer kognitiven und einer evaluativen Komponente zusammen.

In Anlehnung an die Theorie der geplanten Handlung ist die Handlungsabsicht oder die Akzeptanz um so stärker,

- je positiver die Einstellung zu einer Handlung ist. Diese Einstellung ist um so positiver, je eher eine Person mit der Handlung positiv bewertete Konsequenzen verbindet.
- je stärker eine Person davon überzeugt ist, daß für sie wichtige Dritte diese Handlung erwarten.
- je einfacher eine Person die Ausführung der Handlung einschätzt. Diese subjektiv wahrgenommene Handlungskontrolle ist um so stärker, je größer die Ressourcen und Möglichkeiten für die Handlung sind und je weniger Hindernisse und Barrieren vorliegen.

Im Rahmen der Theorie der geplanten Handlung lassen sich mehrere motivationspsychologische Fragestellungen der Akzeptanz anwendungsorientiert und differenziert untersuchen. Eine mangelnde Akzeptanz kann zurückgeführt werden auf:

- die geringe Attraktivität der Handlungskonsequenzen oder Handlungsergebnisse (z.B. zu hoher Zeitaufwand);
- die geringe Wahrscheinlichkeit, mit der positive Folgen auftreten
- konträre Erwartungen wichtiger Dritter
- mangelnde Ressourcen (z.B. unzureichendes Wissen).

8.2 *Methode und Untersuchungsaufbau*

Bei der Befragung der Anwender treten einige Schwierigkeiten auf, wenn noch nicht realisierte Systeme beurteilt werden sollen. Anwender können visionären Systeme nur schwer entwickeln und realistisch beurteilen. Es fällt ihnen viel leichter, Optimierungswünsche für das System, mit dem sie arbeiten, anzugeben. Legt man ihnen Szenarien von visionären Systemen vor, so bewerten sie diese positiv, wenn sie keine technikfeindliche Einstellung haben. Mit diesem Feedback lassen sich allerdings nur bedingt Erkenntnisse über die handlungsrelevanten Auswirkungen eines neuen Systems gewinnen.

Mit Hilfe von Akzeptanzbefragungen lassen sich Fehler oder Schwächen eines visionären Systems nur dann erkennen und beheben, wenn die Befragung differenziert vorgenommen wird und die Antworten auf einer möglichst wirklichkeitsnahen Vorstellung des neuen Systems beruhen.

Bei diesen Befragungen ist schließlich zwischen Entscheider und Anwender oder Nutzer zu unterscheiden. Häufig kaufen Entscheider eines Unternehmens Systeme ein, die von anderen angewendet werden. Bei Akzeptanzuntersuchungen müssen die Nutzer unbedingt berück-

sichtigt werden, denn ihre Akzeptanz ist eine entscheidende Bedingung für den effektiven Einsatz eines Systems.

Um eine möglichst differenzierte und realitätsnahe Vorstellung über die Akzeptanzprobleme bei der Einführung und Nutzung wissensbasierter Systeme zu gewinnen, wurden bei der vorliegenden Untersuchung zunächst in einer freien Einzelbefragung Aspekte des Themenbereichs erarbeitet und gesammelt, die dann in einer Gruppendiskussion vertieft und nach den theoretischen Vorstellungen der Versuchsteilnehmer geordnet wurden. Die Antworten dienen als Grundlage für die Entwicklung von strukturierten Fragebögen.

An der Untersuchung nahmen 12 Systementwickler, zumeist diplomierte Informatiker aus dem akademischen Forschungsbereich teil. Die meisten sind in der Entwicklung von Prototypen wissensbasierter Systeme im Umweltbereich tätig.

Die Leitfrage für die Untersuchung lautete: „Wie müssen wissensbasierte Systeme in Umwelthanwendungen beschaffen sein, damit sie vom Anwender akzeptiert werden?“ Die Versuchsteilnehmer schrieben zunächst einzeln alle Begriffe auf, die sie im Zusammenhang mit dieser Fragestellung für wichtig hielten. Anschließend wurden diese Begriffe in Gruppenarbeit nach der Metaplantchnik gruppiert und theoretisch eingeordnet.

8.3 *Ergebnisse*

Wie zuvor erwähnt, wurde die Befragung nicht strukturiert nach der Theorie der geplanten Handlung durchgeführt. Sie diente vielmehr als Voruntersuchung zur Entwicklung eines solchen Befragungsinstruments. Die Befragungsergebnisse sind deswegen nicht immer eindeutig im Rahmen der Theorie der geplanten Handlung einzuordnen und zu interpretieren.

Die Versuchsteilnehmer klärten zunächst, was unter Akzeptanz zu verstehen ist. Sie unterschieden auf einem Kontinuum von eher passiver bis zu eher aktiver Akzeptanz zwischen Problembewußtsein, Teilnahme und Unterstützung. Weiterhin differenzierten sie zwischen einer rational begründeten Akzeptanz („Akzeptabilität“), für die vor allem ökonomische Gründe bestimmend sind, und einer eher durch „psychologische“ Kriterien bestimmten Akzeptanz.

Die Versuchsteilnehmer faßten die Fragestellung sehr weit auf. Sie unterschieden zunächst zwischen der Akzeptanz eines Produkts durch die Personen, welche über die Einführung entscheiden und der Akzeptanz durch die Personen, welche das Produkt nutzen.

Weiterhin befaßten sie sich ausführlich mit den Attributen des eines guten Produkts. Bei den Untersuchungen im Rahmen der Theorie der geplanten Handlung geht es gewöhnlich darum, ein vorliegendes Produkt oder System zu beurteilen. Dies ist im vorliegenden Fall nicht der Fall. Die Versuchsteilnehmer beschäftigten sich deshalb zunächst mit den Eigenschaften oder Attributen, welche das Produkt aufweisen sollte, um akzeptiert zu werden. Dabei gingen sie nicht vom System/Produkt allein, sondern vom Nutzer/Anwender-Produkt-System aus. Sie unterschieden dabei zwischen Produktmerkmalen und Voraussetzungen beim Nutzer und differenzierten beim Produkt nochmals zwischen allgemeinen Produktmerkmalen und Merkmalen der Produkt-Nutzer-Schnittstelle, wobei auch die wahrgenommene Qualität des Entwicklers/Anbieters als wichtig angesehen wurde. Um möglichst wenig Informationen zu verlieren, werden in der folgenden Ergebnisdarstellung die Begriffe nach Möglichkeit so dargestellt, wie sie von den Versuchsteilnehmern formuliert wurden.

8.3.1 Allgemeine Produktmerkmale:

Wichtigste Merkmale des Systems/Produkts sind neben den geläufigen Produktmerkmalen wie Preis, Qualität, Funktionalität vor allem die Kontrolle des Produkts bzw. die Kontrollier-

1. Workshop „Wissensbasierte / Intelligente Systeme in Umweltanwendungen“ UI '98

barkeit durch das System und in diesem Zusammenhang auch die Transparenz des Systems sowie die Benutzerfreundlichkeit und die Anpaßbarkeit. Im einzelnen wurden aufgeführt:

Preis;

Qualität;

Ergonomie;

Funktionalität;

Anpaßbarkeit: Flexibilität, Änderungsfreundlichkeit, Kompatibilität;

Kontrolle: Kontrolle des Systems. Kontrolle durch das System;

Transparenz: Einfachheit, Übersichtlichkeit, Vermittelbarkeit, Zugangsmöglichkeit, Verfügbarkeit, Graphische Modellierung;

Benutzerfreundlichkeit: Transparenz der Aussagenfindung, Nachvollziehbarkeit der Methode (Verständnis), Vollständige Datengrundlage, Einfache Anwendung, Gutes Hilfesystem, Schulungssoftware;

Service, Wartungsaufwand.

8.3.2 Anwender-/Nutzermerkmale:

Die Nutzermerkmale oder –voraussetzungen entsprechen teilweise den Produktmerkmalen. Sie betreffen die Transparenz und ökonomische Aspekte:

Transparenz: Vertrautheit, Verständnis

Schulungsaufwand

Einarbeitungszeit.

8.3.3 Verhaltensbezogene Überzeugungen der Entscheider:

Die wichtigen verhaltensbezogenen Überzeugungen der Entscheider beziehen sich zunächst auf erwartete ökonomische Einführungskonsequenzen bzw. ökonomische Kaufentscheidungskriterien. Daneben wird die Qualität hervorgehoben, was aber durch die Nennung einiger eher „irrationaler“ Kriterien relativiert wird. Der Anwender wird nur wenig bedacht.

Ökonomische Kriterien: Ökonomie, Kosten, Kosten-Nutzen-Relation, ökonomische Neben-/Seiteneffekte (z.B. Anpassungen), Zeitgewinn, Aufwand für Wissensakquisition, Änderungen im „normalen Betriebsablauf“;

Qualitative Aspekte: Qualität, Robustheit, Zuverlässigkeit;

Auswirkungen auf Anwender: Arbeitserleichterung, Unterstützung des Anwenders, Ähnlichkeit zu vorhandenen Systemen;

Allgemeine „irrationale“ Gründe: Firmenpolitik, Mode-Erscheinung (Status-Symbol), Reaktion auf Werbung, „Blendwerk“, Wirtschaftsmacht des Anbieters.

8.3.4 Verhaltensbezogene Überzeugungen des Nutzers/Anwenders:

Bei den verhaltensbezogenen Überzeugungen des Anwenders, d.h. den Folgen, die vom Anwender erwartet werden, wurde zwischen „rationalen“ und „irrationalen“ Aspekten unterschieden. Auffallend ist, daß viele negative Konsequenzen formuliert wurden. Die verhaltensbezogenen Überzeugungen des Anwenders implizieren somit tendenziell eine negative Bewertung neuer Systeme. Die genannten Überzeugungen beziehen sich auf folgende Aspekte:

„Rational“ begründbare Konsequenzen:

Negative persönliche Folgen;

Kontrollverlust;

Arbeitsplätze;

Leistungsdruck;

Interessenverschleierung;

Interessenkonflikt;

Aufwand;

Vorbehalte des Experten (bei Entwicklung und Akquisition);

Arbeitsbedingungen.

8.3.5 Überzeugungen über normative Erwartungen wichtiger Bezugspersonen:

Normative Überzeugungen wurden nicht explizit formuliert. Indirekt drücken sie sich in einigen verhaltensbezogenen Überzeugungen aus, die für die Entscheider genannt wurden, z.B. in den sog. irrationalen Kaufkriterien Mode-Erscheinung (Status-Symbol), Reaktion auf Werbung, „Blendwerk“, Wirtschaftsmacht des Anbieters.

8.3.6 Kontrollüberzeugungen:

Fast alle der zuvor angeführten Produkt- und Anwendermerkmale betreffen Aspekte von Kontrollüberzeugungen, d.h. antizipierte Hindernisse bei der Anwendung. Zu ihnen zählen insbesondere die Kontrolle, die Transparenz, die Zugangsmöglichkeit und Verfügbarkeit, die Kompatibilität mit bestehenden Systemen, der Zeitaufwand für Einarbeitung und Schulung, der Service, die Bedienerfreundlichkeit und das Verständnis/Wissen.

8.4 *Diskussion*

Die Antworten der freien Befragung zeigen, daß bei Akzeptanzuntersuchungen eine Vielzahl von Aspekten zu berücksichtigen ist. Die Ergebnisse entsprechen damit den differenzierten Annahmen der Theorie der geplanten Handlung. Auf der Basis der vorliegenden Antworten ist es möglich, strukturierte Fragebögen nach dieser Theorie zu entwerfen. Bei den strukturierten Befragungen müssen die genannten Merkmale und Aspekte gewichtet werden, d.h. nach ihrer Auftretenswahrscheinlichkeit beurteilt und nach ihrer Attraktivität bzw. Wichtigkeit bewertet werden. Ergänzt werden die Fragebögen durch Fragen nach den normativen Erwartungen wichtiger Dritter, die bei der vorliegenden Befragung nicht explizit formuliert wurden.

Aufgrund einer strukturierten Befragung können dann die unterschiedlichen Aspekte priorisiert werden, Vorhersagen über die Akzeptanz getroffen werden und diese Vorhersagen empirisch überprüft werden, wobei zur Optimierung der Systeme mehrere Befragungsdurchgänge erforderlich sind.

8.5 *Literatur*

- [1] Ajzen, I.: *From intention to action: A theory of planned behavior*. In: Kuhl, J.; Beckmann, J. (eds.): *Action-control: From cognition to behavior*. Heidelberg: Springer, 1989. pp.11-39.

1. Workshop „Wissensbasierte / Intelligente Systeme in Umwelthanwendungen“ UI '98

- [2] Ajzen, I.: *The theory of planned behavior. Some unresolved issues*. Organizational Behavior and Human Decision Processes, 50. 1991. pp. 179-211.
- [3] Bamberg, S.; Schmidt, P.: *Auto oder Fahrrad? Empirischer Test einer Handlungstheorie zur Erklärung der Verkehrsmittelwahl*. Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie, 46. 1994. Seiten 80-102.
- [4] Helmreich, R.: *Auf die Akzeptanz kommt es an! Grundlagenforschung zur Akzeptanz neuer Technik im Büro*. Data-Report, 4. 1981. Seiten 5-8.
- [5] Müller-Bölling, D.; Müller, M.: *Akzeptanzfaktoren der Bürokommunikation*. München: Oldenburg. 1986.
- [6] Schönecker, H. G.: *Bedienerakzeptanz und technische Innovation. Akzeptanzrelevante Aspekte der Einführung neuer Bürotechniksysteme*. München: Oldenburg. 1980.
- [7] van der Putte, B.: *On the theory of reasoned action*. Amsterdam: Elsevier. 1993.