

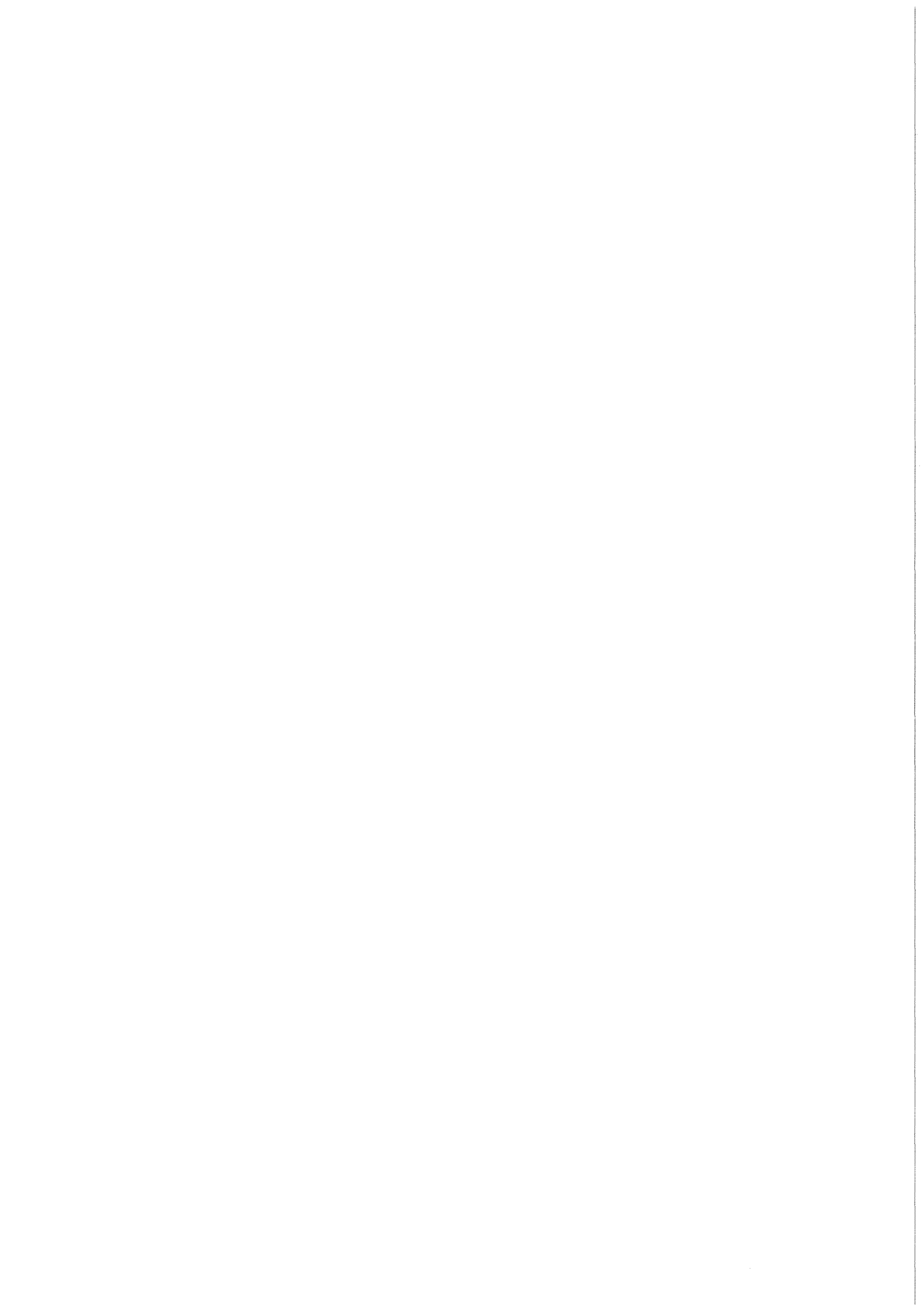


KfK 4651
Dezember 1989

Wissensbasierte Bildauswertung – Entwurfsaspekte und Anwendungsmöglichkeiten

H.-W. Kelbassa
Institut für Datenverarbeitung in der Technik

Kernforschungszentrum Karlsruhe



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE
Institut für Datenverarbeitung in der Technik

KfK 4651

Wissensbasierte Bildauswertung -
Entwurfsaspekte und Anwendungsmöglichkeiten

Hans-Werner Kelbassa

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

ZUSAMMENFASSUNG

Wissensbasierte Bildauswertung - Entwurfsaspekte und Anwendungsmöglichkeiten

Die vorliegende Arbeit untersucht den Einsatz von Wissensverarbeitungstechniken für die Entwicklung und Anwendung von Bildauswertungssystemen im Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK). Zunächst wird der Entwicklungsstand unterschiedlicher Anwendungssystementwicklungen des Kernforschungszentrums untersucht, wobei das für die softwaretechnische Bereitstellung von Bildauswertungssystemen erforderliche Expertenwissen in ‚low level‘ Konfigurationswissen und ‚high level‘ Interpretationswissen gegliedert wird. Dieser Anwendungsanalyse von KfK-Bildauswertungssystemen wird der internationale Forschungs- und Entwicklungsstand prototypischer Architekturen wissensbasierter Konfigurations- und Interpretationssysteme für Bildauswertungsanwendungen gegenübergestellt. Hierauf aufsetzend werden zweckmäßige Anwendungsmöglichkeiten wissensbasierter Konfigurations- und Interpretationssysteme in - nicht nur KfK-relevanten - Anwendungsbereichen (Konfiguration von Bildverarbeitungsmodulen für Auswertungen in der experimentellen Teilchenphysik, Verarbeitung und Interpretation von Satellitenbildern, Sichtsysteme für hochflexible Robotersysteme) aufgezeigt. Aus der Anwendungsanalyse resultiert insbesondere die Erkenntnis, daß der aufwendige experimentelle Entwurf von Bildauswertungssystemen durch den Einsatz von wissensbasierten Konfigurationssystemen unterstützt werden sollte. Für diese Bereitstellung von Konfigurationswissen wird systemanalytisch ein allgemeines Wissensverarbeitungskonzept für ein Konfigurationsberatungssystem entworfen und dessen Realisierbarkeit mit den Möglichkeiten der objektorientierten Programmierung beschrieben.

ABSTRACT

Knowledge-based Picture Analysis - Design Aspects and Application Possibilities

This report investigates the use of knowledge processing techniques for the development and application of picture analysis systems at the Karlsruhe Nuclear Research Center (KfK). At first, the development state of different application systems at KfK is evaluated. The expert knowledge which is necessary for the production of the picture analysis software is divided into ‚low level‘ configuration knowledge and ‚high level‘ interpretation knowledge. This investigation of KfK-picture analysis systems is evaluated against the international research and development state of prototypical architectures of knowledge-based configuration and interpretation systems for picture analysis applications. Based on this, useful application possibilities of knowledge-based configuration and interpretation systems for some application areas (configuration of picture processing modules for the analysis of particle physics experiments, processing and interpretation of satellite pictures, vision systems for high-flexible robot systems) are pointed out, which are KfK-relevant not only. In particular, the application analysis leads to the insight, that the expensive experimental design of picture analysis systems should be supported by the use of knowledge-based configuration systems. For making available configuration knowledge a generalized knowledge processing concept for a configuration consulting system is designed in a system-analytical manner. The way how to realize the approach by using the possibilities of object oriented programming is described.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	1
2	Analyse von Anwendungsbereichen	5
2.1	Bildauswertung im KfK	5
2.2	Prototypen wissensbasierter Bildauswertungssysteme	8
2.2.1	Produktionstechnik	8
2.2.2	Medizin	12
2.2.3	Luftbildauswertung	13
2.2.4	Satellitenbildauswertung	14
2.2.5	Robotik	14
2.3	Neue Anwendungsmöglichkeiten im KfK	15
2.3.1	Satellitendatenauswertung	15
2.3.2	Konfiguration von Bildverarbeitungsmodulen	17
2.3.3	Robotik	19
2.4	Resümee	20
3	Systemanalyse	22
3.1	Konfigurationsproblematik	22
3.2	Wissensrepräsentation	28
3.2.1	Bildverarbeitungsalgorithmenbasis	28
3.2.2	Algorithmenkonfigurationswissen	31
3.2.3	Anlagenkonfigurationswissen	38
3.3	Wissensverarbeitung	39
3.3.1	Basissequenz	39
3.3.2	Alternative Verarbeitungssequenzen	41
	Danksagung.....	43
4	Literatur	44

ABBILDUNGEN UND TABELLEN

Abb. 1-1 :	Idealisierte Struktur eines wissensbasierten Bildinterpretationssystems.	2
Abb. 1-2 :	Gesamtstruktur eines integrierten wissensbasierten Bildauswertungssystems.	4
Abb. 2.1-1 :	Der CATROB-Versuchsaufbau im HTL des KfK.	6
Abb. 2.1-2 :	Der MANUTEC-Arm bei der Ansteuerung einer Schraubposition.....	6
Abb. 2.1-3 :	Ring-Schichtenmodell des interaktiven IDT-Bildverarbeitungssystems (1986).	7
Abb. 2.2.1-1 :	Ausschnitt aus einer XRAY/PLAKON-Begriffshierarchie.....	9
Abb. 2.2.1-2 :	XRAY-Framerepräsentation eines Bildverarbeitungsoperators.....	9
Abb. 2.2.1-3 :	Schematische Darstellung der Softwarekonfiguration von PLAKON (TEX-K).....	11
Abb. 2.3.1-1 :	ISYS-Satellitenbild mit Wolkenrändern.....	16
Abb. 2.3.2-1 :	Parabelspur eines KALIF-Experimentes (Ausgangsbild).....	17
Abb. 2.3.2-2 :	Parabelspursegmente nach Vergrößerung (Auswertungsbild).	18
Abb. 3.1-1 :	Idealisiertes Datenflußschema eines wissensbasierten Konfigurationssystems.....	24
Abb. 3.1-2 :	Datenflußschema für einen iterativen Konfigurationslauf.....	26
Abb. 3.2.1-1 :	SPIDER-Klassifizierung von Bildverarbeitungsalgorithmen nach Tamura.....	28
Abb. 3.2.1-2 :	Beispiel einer SPIDER-orientierten Gliederung von Skelettierungsoperatoren.....	29
Abb. 3.2.2-1 :	Beispiel für einen Methodengraphen (Ausschnitt).	31
Abb. 3.2.2-2 :	Erweiterungsbeispiel für die Verarbeitungskategorie ‚Ausdünnen‘.....	33
Abb. 3.2.3-1 :	Repräsentation von Komponenten eines Röntgeninspektionssystems.	38
Abb. 3.3.1-1 :	Methodengraph für die Verarbeitungsklasse Segmentierung.	40

1 Einleitung

Die automatische Auswertung von Bildern hat im industriellen wie auch im technisch-naturwissenschaftlichen Anwendungsbereich in den vergangenen Jahren stetig an Bedeutung gewonnen. Es ist abzusehen, daß dieser Trend auch für die Zukunft gelten wird. Gegenwärtig werden zahlreiche neue Anwendungen erschlossen, die interdisziplinäre Innovationsimpulse erzeugen. Als Beispiele seien hier die Anstrengungen im Bereich Robotik sowie im Bereich Fernerkundung hervorgehoben. Die Entwicklung von Aktionsplanungssystemen für autonome mobile Roboter- und Fahrzeugsysteme stützt sich entscheidend auf die Auswertung von Daten optischer Sensoren [Wel 87; Bra 85; ReLe 88; KPH 86]. Fortschritte in der Bildauswertungstechnologie wirken sich hier direkt auf die Leistungsfähigkeit des Anwendungssystems aus.

Dies ist bei der meteorologischen Auswertung von Satellitendaten ebenso. Vor dem Hintergrund einer sich verschärfenden Umweltproblematik kommt insbesondere auch der Auswertung von Luftbildern eine wachsende Bedeutung zu [WMLL 88; JGP 89]. Ein Beispiel für diesen Anwendungsbereich ist die Auswertung von Luftaufnahmen zur schnellen Erfassung von gewässerverschmutzenden Schiffen.

Es ist offensichtlich, daß innerhalb des Kernforschungszentrums (KfK) ein zunehmendes Interesse unterschiedlicher Anwendergruppen an Bildauswertungssystemen besteht. Dies läßt sich mittelfristig auch für Auswertungsprobleme aus dem Umweltbereich prognostizieren: im November 1989 fand in Karlsruhe die 1. Fachtagung 'Visualisierung von Umweltdaten in Supercomputersystemen' statt. [1] Seit 1986 existiert im KfK eine Interessengruppe Bildverarbeitung (IGBV), die in regelmäßigen Sitzungen den derzeitigen und potentiellen Anwendern als Forum des Erfahrungsaustausches dient [Rup 87]. Bereits heute ist abzusehen, daß die KfK-Interessengruppe Bildverarbeitung mit dem verstärkten Einsatz von automatischen Bildauswertungssystemen expandieren wird, wobei sich einzelne Entwicklungsteams in wachsendem Maße den Möglichkeiten der von der Forschungsdisziplin Künstliche Intelligenz (KI) entwickelten Wissensrepräsentations- und -verarbeitungstechniken zuwenden.

Die vorliegende Ausarbeitung befaßt sich mit dem Potential der wissensbasierten Bildauswertung: In welchen Anwendungsfeldern fördert bzw. ermöglicht die Einführung von wissensbasierten Systemen fortschrittliche Bildauswertungsverfahren? In welchen Anwendungsbereichen lassen sich die klassischen Bildauswertungsverfahren durch den Einsatz von Expertensystemtechnologie rationalisieren? Welche Strukturen weisen die heutigen KI-basierten Systemarchitekturen für Bildauswertungsanwendungen typischerweise auf?

Das Ziel dieser Studie ist es, bekannte und neue Anwendungsfelder im Bereich der wissensbasierten Bildauswertung aufzudecken, und - hierauf aufsetzend - zu untersuchen, welche für die künftigen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten des KfK Bedeutung besitzen. Hierbei sollen fortschrittliche Forschungsansätze exemplarisch umrissen werden. Zunächst werden die bereits in der Literatur bekannten Systementwicklungen aufgenommen und deren Leistungspotential, soweit dies aus dem verfügbaren Material ersichtlich ist, umrissen. Im weiteren werden bisher nicht hinreichend beachtete Anwendungsmöglichkeiten für die wissensbasierte Bildauswertung im KfK aufgezeigt.

Für eine Anwendungsklasse wird die Problematik eingegrenzt und ein Lösungsansatz vorgeschlagen. Die vorliegende Arbeit gliedert sich somit in zwei Teile: in eine anwendungs- sowie eine systembezogene Untersuchung.

Der Begriff 'Bildauswertung' wurde bislang ohne eine weitere Abgrenzung gegen die wissenschaftlichen Termini Bilddeutung, Bildanalyse, Szenenanalyse und Mustererkennung verwandt. Nun hat offensichtlich eine Bildauswertung, sei es die einer Röntgenaufnahme oder die Aufnahme eines für meteorologische Zwecke eingesetzten Satelliten, regelmäßig zum Ziel, gewisse Charakteristika (oder deren Nichtvorhandensein) zu identifizieren. Derjenige, der ein Bild auswertet, versucht meistens, spezielle Eigenschaften des Bildmaterials zu erfassen, weil diese eben Rückschlüsse erlauben. Man folgert also z.B. von einzelnen Bildattributen, die oftmals nur diffizil verbalisierbar sind, auf Ausprägungen und Zustände des sondierten Objektes.

[1] Die Proceedings sind als Informatik-Fachbericht 230 des Springer-Verlag Heidelberg erhältlich.

Dies gilt für die natürliche Bildinterpretation durch den Menschen wie für die automatisierte technisch-wissenschaftliche Bildauswertung. Wenn wir in unserem Blickfeld ein Telefon *sehen*, so schließen wir auf die Existenz des Telefons (visueller Sensor); im Zweifelsfalle überzeugen wir uns hiervon, indem wir das Telefon anfassen (taktile Sensor). In vergleichbarer Weise interpretiert der Arzt beispielsweise einen Knochenbruch und der Werkstoffkundler einen Haarriß oder einen Lunker, weil sie wissen, wie ein ungebrochener Knochen oder ein rißfreies Werkstück in der Aufnahme aussieht (Referenzbild). Ähnlich verhält es sich mit der wissensbasierten Bildauswertung in der technischen Informatik. Hier sucht man ebenfalls definierte symbolische Beschreibungen.

Im wissenschaftlichen Sprachgebrauch bezeichnet man die aus der Umwelt oder einem technischen System aufgenommenen physikalischen Größen (Sensorsignale) als Muster. Die Verarbeitung und Deutung sensorischer Muster bezeichnet der Wissenschaftler als Mustererkennung (Pattern Recognition). Nun kann man ganz offensichtlich eine physikalische Größe in eine andere wandeln, das heißt z.B. ein akustisches Signal in ein Lichtsignal transformieren, weil es im Hinblick auf bestimmte Gegebenheiten leichter auszuwerten ist. Das ausgewertete Muster muß also nicht dem erfaßten Sensormuster entsprechen. Den optisch auswertbaren Bildern müssen keineswegs stets optische Sensormuster zugrunde liegen, was beispielweise bei der Kernspintomographie der Fall ist [Tol 87]. Entscheidend für die in der vorliegenden Arbeit thematisierte *Bildauswertung* ist, daß aufgezeichnete Sensorinformationen optisch bzw. visuell *ausgewertet* werden. Die Auswertung von optisch wahrnehmbaren Bildern ist die Verarbeitung und Interpretation von Mustern einer speziellen Sensorklasse; und zwar einer überaus wichtigen.

Man kann zwischen zwei semantischen Kategorien von Wissen unterscheiden, wenn man den Terminus *wissensbasierte Bildauswertung* präzisieren möchte: Konfigurationswissen und Interpretationswissen.

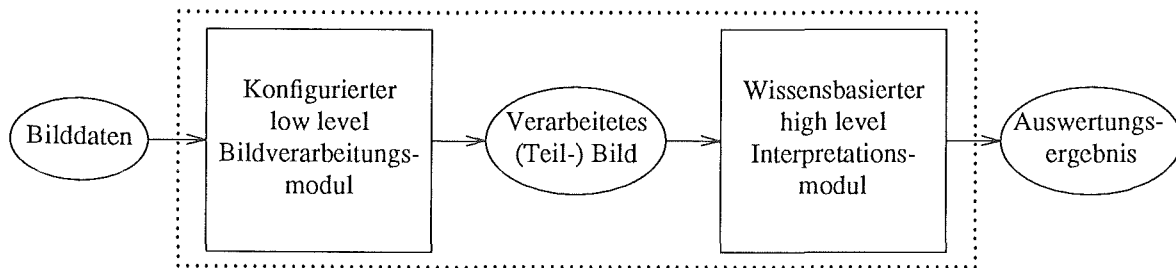


Abb. 1-1: Idealisierte Struktur eines wissensbasierten Bildinterpretationssystems.

Eine Verarbeitung von *Interpretationswissen* liegt vor, wenn die Auswertung des Bildmaterials sich nicht in der Anwendung von sogenannten *low level* Bildmanipulationsroutinen (z.B. für die Verstärkung von Kontrasten, die Extraktion von Kanten), die anerkannte Autoren häufig unter die Phasen *Vorverarbeitung* und *Segmentation* subsumieren, erschöpft, sondern das Bildauswertungssystem darüber hinaus *explizit* repräsentiertes Wissen für die Auswertungsprozedur nutzt. Man wird also nicht bereits bei ‚einfachen‘ Fällen von einer wissensbasierten Bildauswertung sprechen, wenn lediglich die Farben eines optischen Musters interessieren, oder wenn man herausfinden möchte, ob ein vorliegendes Bild rechteckige oder kreisförmige Strukturen enthält, die man *algorithmisch unmittelbar klassifizieren* kann. Vielmehr liegt eine wissensbasierte Bildauswertung erst vor, wenn die Ergebnisse der numerischen Vorverarbeitungsphase semantisch weiterverarbeitet werden. Der Übergang von der rein numerischen Verarbeitung des Bildes auf der *low level* Ebene zur symbolischen *high level* Verarbeitung wird in dem vierstufigen *Phasenmodell* von NIEMANN und BUNKE (Vorverarbeitung, Segmentierung, Analyse, Schlußfolgerungen) idealisierend mit dem Übergang von der Segmentierung zur Analyse beschrieben. [2] Die Bildauswertungssoftware operiert nach der Segmentationsphase nicht mehr direkt auf den Daten einzelner Pixel, sondern auf symbolischen Objekten. Typische Segmentationsobjekte einfacher Art sind Linien, Flächen, Formelemente (z.B. Kreis, Ellipse); Bildsegmente müssen allerdings nicht notwendigerweise

[2] Vgl. Niemann und Bunke [NiBu 87], S. 10 ff.

leicht analytisch beschreibbar sein, es kann sich auch um bizarre Strukturen handeln. Ein wesentliches Ergebnis der Segmentierung sind oft Bildregionen, aus denen sich problemrelevante Eigenschaften ermitteln lassen [Nag 85].

Läßt sich in einem gegebenen Interpretationskontext *Luftbild* ein blauer Bildbereich als *Ozeanwasser*, ein nahezu ellipsenförmiger Bereich einer wohldefinierten Größe als *Schiff*, und ein bräunlicher Kontrast als *Insel* auffassen, so kann man die relative Lagevariation der ellipsenartigen Bildregion in zwei aufeinanderfolgenden Aufnahmen als Fortbewegung des Schiffes interpretieren und einen zurückgelegten Weg für eine gegebene Bildfolge ableiten.

An diesem einfachen Beispiel kann man demonstrieren, daß sich die Komplexität dieser Interpretationsaufgabe nahezu beliebig steigern läßt, wenn man darüber hinaus berücksichtigt, daß militärische Kreuzer möglicherweise Tarnfarben besitzen, die eben nicht eindeutig aufgrund der Farbinformation eine korrekte Objektidentifikation zulassen (Objektgrößenanalyse, Umgebungsbetrachtung). Auch ist es denkbar das bei Bildern aus großer Höhe Flugkörper über dem Wasser (z.B. Hubschrauber) nicht eindeutig als solche identifiziert werden können. Hierzu bedarf es der Einbeziehung von weiterem bereichsspezifischem Wissen, dessen strukturierte Gesamtheit in der Literatur als *Weltmodell* betrachtet wird.

Die *wissensbasierte Interpretation* von optischen Mustern, die Luftaufnahmen, Straßenszenen oder etwa Roboteraktionsräume darstellen, ist ein Teilgebiet der Forschungsdisziplin *Künstliche Intelligenz*, die danach strebt, diesen kognitiven Prozeß über die geeignete Einbeziehung (Akquisition) und Repräsentation von bereichsspezifischem Wissen auf einem möglichst hohen Niveau zu automatisieren, welches dem eines *Fachexperten* entspricht. Die wissenschaftliche Literatur spricht in diesem Zusammenhang auch häufig von Bildverstehen oder Bilddeutung; verschiedene Autoren bevorzugen den Begriff Bildinterpretation. [3]

Die Interpretation von Bildmaterial setzt regelmäßig eine *low level* Verarbeitung der Sensordaten voraus, die eine definierte Konfiguration der Bildverarbeitungsoperationen erfordern. Wichtige Arten derartiger Bildverarbeitungsoperationen sind beispielsweise die Filterung oder die geometrische Entzerrung. Eine *high level* Bildauswertung hängt entscheidend von der in diese low level Operationen investierte Expertise ab. Die Konfiguration einer leistungsfähigen Vorverarbeitungs- und Segmentationssequenz wirft in vielen Fällen beträchtliche Probleme auf, weil die Wirkung einzelner Bildverarbeitungsprozeduren hinsichtlich der gegebenen Auswertungsproblematik nicht befriedigend antizipierbar ist, sondern *Experimentieren* erfordert. Die Bereitstellung einer leistungsfähigen low level Bildverarbeitungsfolge stützt sich in diesem Sinne prinzipiell auf eine *Konfigurationsexpertise*.

Deshalb reicht es nicht aus, eine wissensbasierte Bildauswertung allein über den Interpretationsaspekt zu charakterisieren, sondern man muß auch den Konfigurationsaspekt einbeziehen. Die *wissensbasierte Konfiguration* von Bildauswertungssystemen erstreckt sich in erster Linie auf die Bestimmung der jeweils relevanten *anwendungsspezifischen* und *anwendungsneutralen* Bildverarbeitungsalgorithmen und deren Anwendungsfolge, insbesondere auch der Festlegung von deren Parameterwerten [Tam 83].

[3] Der an dieser Thematik besonders interessierte Leser sei auf die 1988 bei Morgan Kaufmann Publ., Inc. San Mateo, California erschienen Proceedings des im April 1988 von der DARPA veranstalteten *Image Understanding Workshop* hingewiesen.

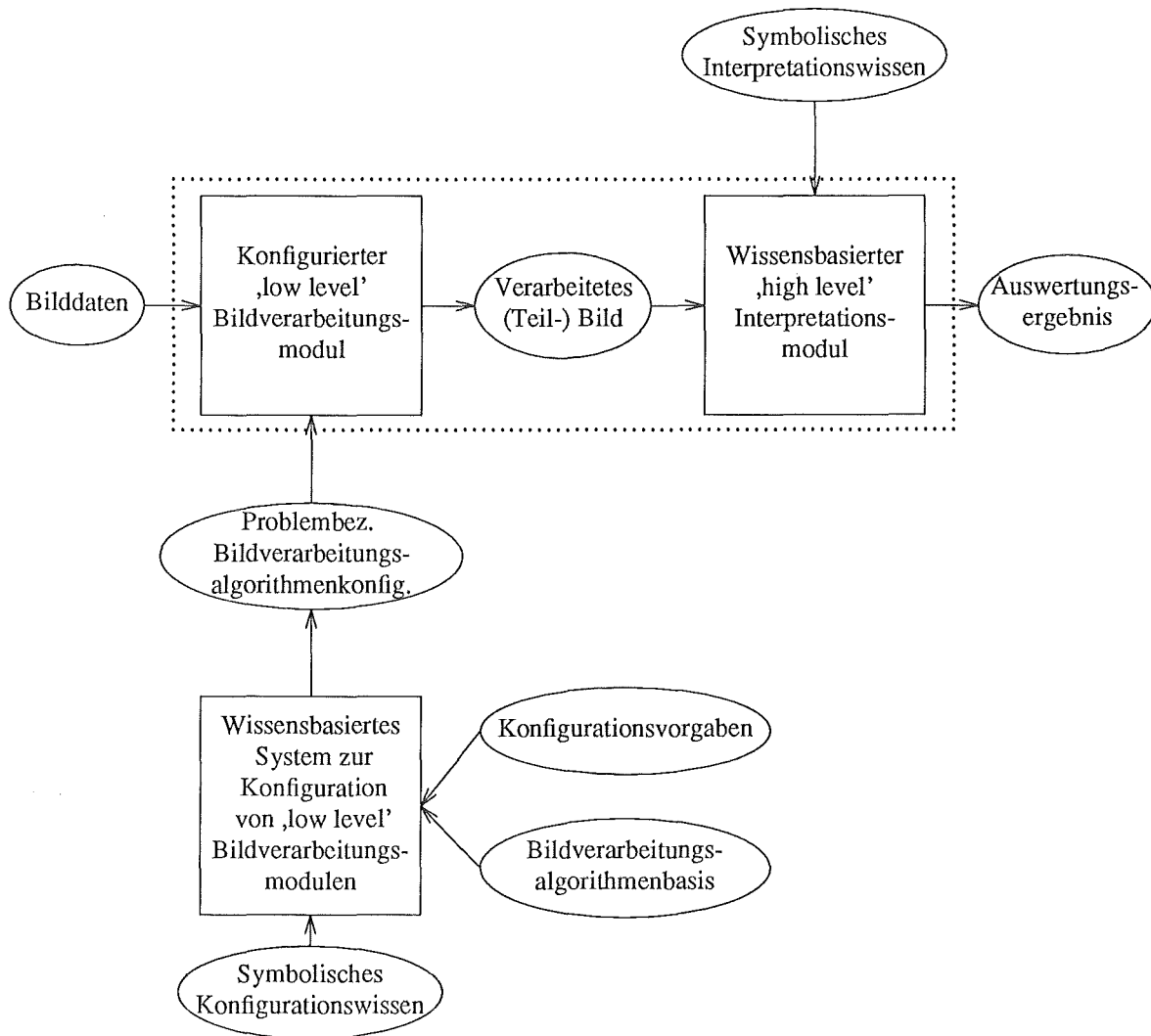


Abb. 1-2: Gesamtstruktur eines integrierten wissensbasierten Bildauswertungssystems.

Somit ist es sinnvoll, den Begriff der wissensbasierten Bildauswertung in der vorliegenden Arbeit auf die wissensbasierte Konfiguration von Bildauswertungssystemen zu erweitern, weil das Konfigurationswissen entscheidend die Qualität der Auswertungsergebnisse mitbestimmt. Die Konfiguration von Bildverarbeitungssystemen und die symbolische Interpretation bzw. *Interpretierbarkeit* algorithmischer Verarbeitungsergebnisse sind hochgradig interdependent. Man kann sich ein zur Klassifikation einfacher Muster einsetzbares Bildverarbeitungssystem ohne eine *symbolische* Interpretationskomponente vorstellen, doch ein Bildauswertungssystem wird nicht funktionstüchtig, ohne daß *problembezogenes Konfigurationswissen* in den Entwurf des Bildverarbeitungsmodules eingeht. Der häufig zu beobachtende experimentelle Entwurfsprozeß einer Bildverarbeitungssequenz dokumentiert geradezu: mit dem sich vertiefenden Erfahrungsschatz des Systementwicklers hinsichtlich der Bildmaterialeigenschaften verbessert dieser seine Fähigkeit, die geforderte Verarbeitungsfolge zu konfigurieren. Im weiteren Sinne beinhaltet die Konfigurationsproblematik bei Bildauswertungssystemen auch eine hardware- und anlagentechnische Festlegung der Systemkomponenten (z.B. Bestimmung des Linsen- und Mikroskopsystems) [TKP 89]. Im Vordergrund der folgenden Betrachtungen steht der softwaretechnische Konfigurations- und Interpretationsaspekt.

2 Analyse von Anwendungsbereichen

In diesem Abschnitt wird der Stand der automatisierten Bildauswertung innerhalb des KfK untersucht, wobei aus zeitlichen Gründen nur ein Teil der KfK-Institute einbezogen werden konnte. Darüber hinaus werden prototypische Entwicklungen exemplarisch anhand der Literatur klassifiziert und neue - nicht nur - KfK-relevante Anwendungsbereiche für die wissenschaftliche Bildauswertung eingegrenzt.

2.1 Bildauswertung im KfK

Automatisierte Bildauswertung wird innerhalb des KfK in verschiedenen Instituten betrieben. Zum Teil handelt es sich um Aktivitäten, in denen das IDT (Institut für Datenverarbeitung in der Technik) projektmäßig involviert ist.

Auf der Basis von verfügbarem Material (Veröffentlichungen, Berichte) sowie Interviews mit Institutsmitarbeitern wurde versucht, Aktivitäten in einzelnen Bereichen aufzunehmen. Wegen der diesbezüglich gegebenen zeitlichen Beschränkung konnten einige Institute nicht hinreichend untersucht werden, so daß die folgende Auflistung möglicherweise ergänzungsbedürftig ist.

Entwicklungsanstrengungen im Bereich Bildauswertung konnten in folgenden KfK-Instituten festgestellt werden:

- IMF: Das IMF (Institut für Material- und Festkörperforschung) befaßt sich mit der Weiterentwicklung des bereits seit längerem im Ausbau befindlichen Systems PACOS [VFPS 86; FrSi 88; FVS 88]; dieser Name steht für ‚Pattern Considering System‘. Weiterhin wird im IMF das System TAS der Fa. Leitz zur Qualitätsprüfung von Kernbrennstoffkeramik, Fusions-Blanketkeramik und ihren Ausgangspulvern (Gefügeanalyse) eingesetzt. [4]
- IRE: Das IRE (Institut für Reaktorentwicklung) befaßt sich gegenwärtig im Projekt CATROB [5] mit der Entwicklung von intelligenten CAD-gestützten Fernhandhabungssystemen, insbesondere wird derzeit ein Bildauswertungssystem zur Referenzmarkenerkennung für die Steuerung eines (mobilen) Schraubroboters erprobt [BLSW 88].

Die beiden Abbildungen auf der folgenden Seite stellen einen Versuchsaufbau im Handhabungstechnischen Labor (HTL) des KfK dar.

Der MANUTEC-Roboterarm soll sensorgestützt Flansche automatisch verschrauben. Hierzu entnimmt er zunächst aus der automatischen Werkzeugwechseleinrichtung die Kamera, um aus zwei unterschiedlichen Positionen das Referenzmarkenobjekt aufzunehmen. Aus beiden Bildern wird stereometrisch die Istposition für den jeweiligen Verschraubungsvorgang ermittelt. Danach fährt der Roboterarm zur Werkzeugwechseleinrichtung, um die Kamera gegen den Schrauber auszutauschen. Das Bildauswertungsproblem, welches diese Verschraubungsaufgabe aufwirft, ist die Einbeziehung der a-priori nicht hinreichend genau bekannten Lage und Orientierung des Objektes relativ zum Montagewerkzeug. Denn die Bahn des Roboterarmes kann nur approximativ aus CAD-Modellen hergeleitet werden.

[4] Vgl. hierzu das 11. Sitzungsprotokoll der IGBV (24.10.1988).

[5] Dieser Name steht für Computer Aided Teleoperation with Robots. Eine neuere Beschreibung der CATROB-Architektur enthält [BTW 89]. Für die CATROB-Entwicklung wurde PACOS zugrundegelegt und an die CATROB-Belange angepaßt [VFPS 86].

Das erste Bild zeigt den Roboterarm beim Aufnehmen des Werkzeuges aus der Werkzeugwechseleinrichtung; die zweite Aufnahme stellt den Schrauber bei der Annäherung an das Verschraubungsobjekt dar.

Abb. 2.1-1 : Der CATROB-Versuchsaufbau im HTL des KfK.

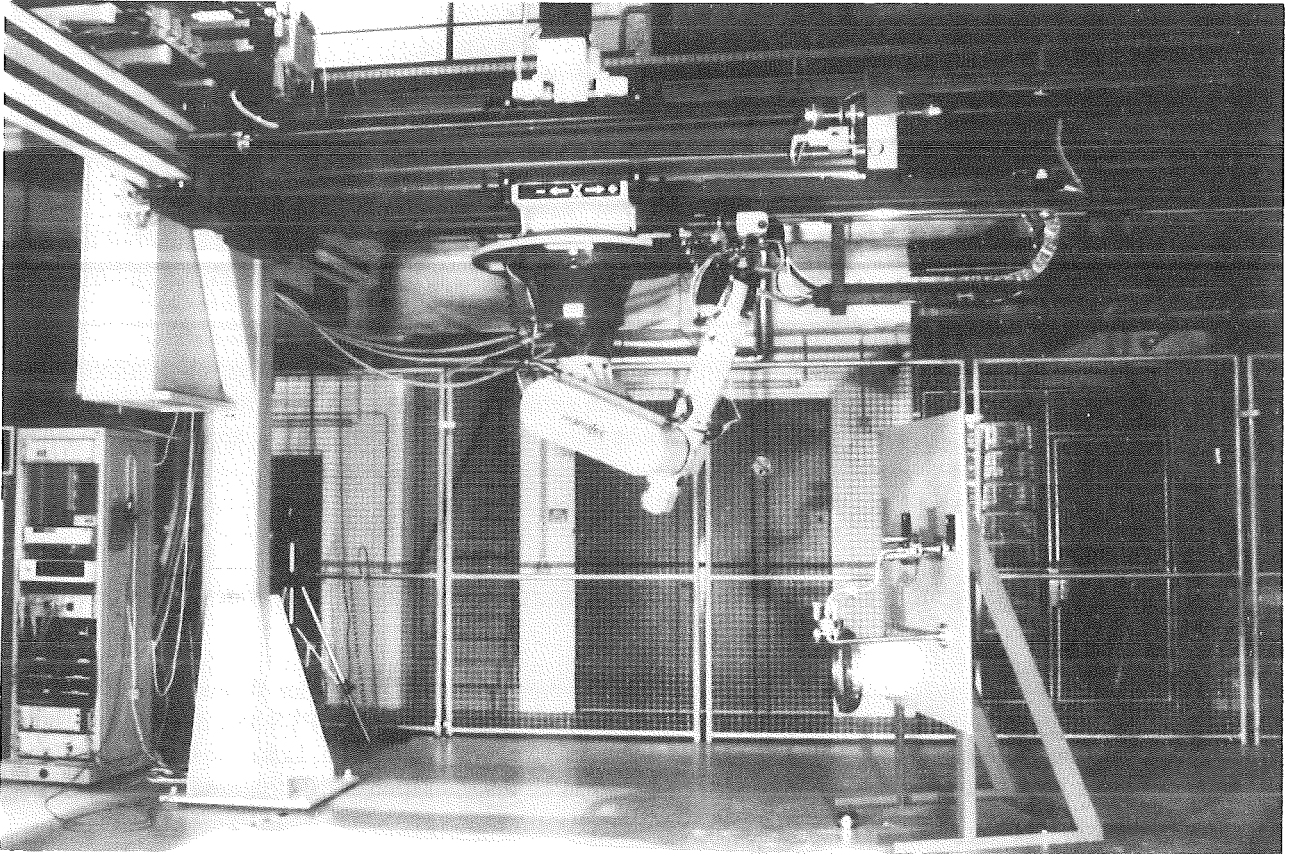
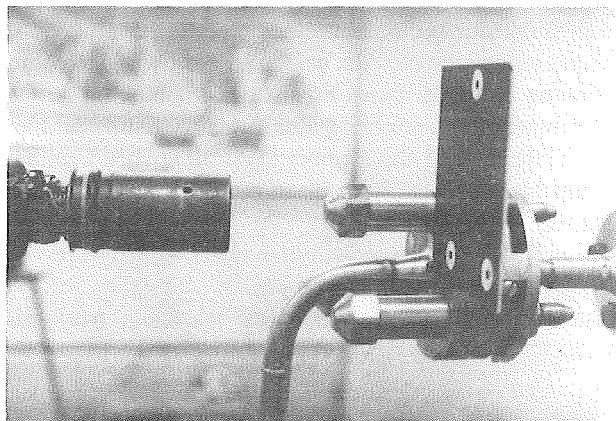


Abb. 2.1-2 : Der MANUTEC-Arm bei der Ansteuerung einer Schraubposition.

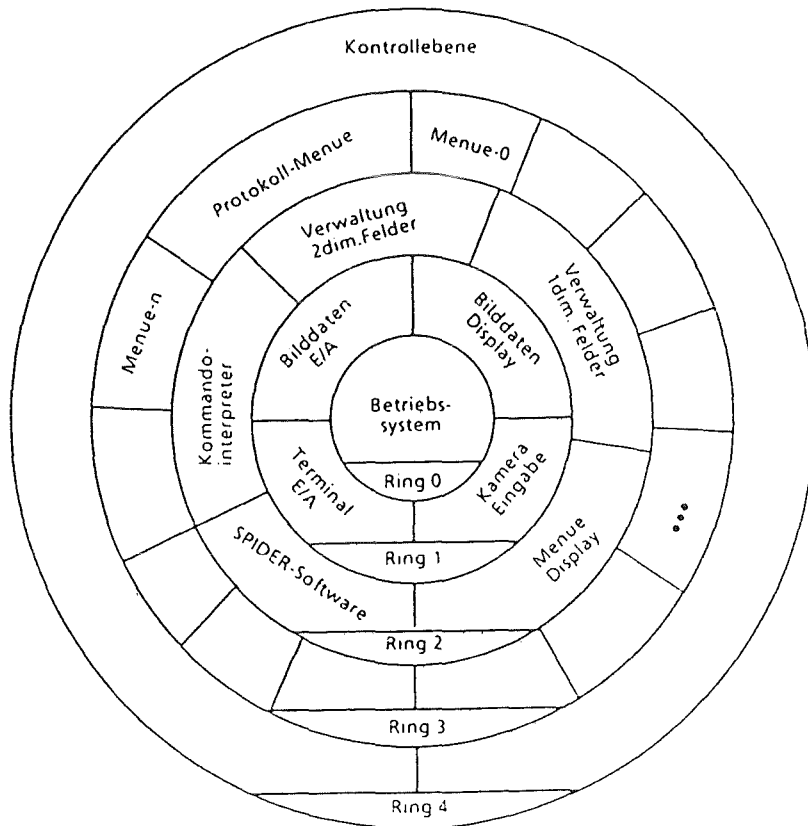


● **IMK:** Ein Arbeitsschwerpunkt des IMK (Institut für Meteorologie und Klimaforschung) liegt auf der Entwicklung von Fernerkundungsverfahren, die dazu dienen, Feldverteilungen von Landoberflächenparametern sowie Vertikalprofile meteorologischer Zustandsgrößen aus Satellitendaten herzuleiten. Zur Verarbeitung von Satellitendaten betreibt das IMK ein Satellitenbildverarbeitungssystem ISYS (Interaktives System für Satellitendatenverarbeitung), welches radiometrische Aufnahmen von meteorologischen Satelliten (u.a. NOAA-Serie, METEOSAT) auf der Basis physikalischer Modelle verarbeitet. Diese Satellitendatenauswertung dient der Bestimmung von Wolken [OIGr 85], von Oberflächentemperaturen und der Ableitung von Vegetationsdichtemaßen [IMK 88].

● **IMT:** Am IMT (Institut für Mikrostrukturtechnik) soll langfristig ein am IDT in der Entwicklung befindliches Realzeit-Bildverarbeitungssystem für die automatische Qualitätsprüfung von Mikrostrukturen eingesetzt werden [IDT 88; IDT 89]. Dieses Transputer-System verarbeitet Grauwertbilder von Mikrostrukturen, die nach dem LIGA-Verfahren gefertigt wurden [BGH 89]. Die in den aufgezeichneten Grauwertbildern enthaltenen Strukturen werden auf der Grundlage einer CAD-basierten Solldatendatei vollautomatisch vermessen und verifiziert [BüHe 87; Bür 88]. Dieses System wird mit anwendungsneutralen Routinen arbeiten, die keine softwaretechnische Anpassung an die jeweils zu verifizierende Mikrostruktur erforderlich machen.

● **INR:** Für das INR (Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik) wird gegenwärtig am IDT ein System entwickelt, welches zur Auswertung von ionenempfindlichen CR39-Filmen (u.a. Massenspektrometeraufnahmen), die bei KALIF-Experimenten (Karlsruhe Light Ion Facility) anfallen, eingesetzt werden soll [EcGu 84; BHKR 86]. Eine Darstellung der Ziele und des Entwicklungsstandes des Systems IODA (ION Density Analysis) findet der interessierte Leser in [IDT 88; IDT 89]. Bereits 1986 wurde im Rahmen dieses Projektes am IDT ein interaktives Bildverarbeitungssystem realisiert (Abb 2.1-3), welches es dem Anwendungssystementwickler ermöglicht, die Wirkung selektierter Bildverarbeitungsalgorithmen (u.a. SPIDER-Bibliotheksfunktionen) mit wenig Aufwand zu testen [EcGu 86].

Abb. 2.1-3 : Ring-Schichtenmodell des interaktiven IDT-Bildverarbeitungssystems (1986).



Die Bildauswertungsaktivitäten weiterer KfK-Institute konnten im Rahmen dieser Untersuchung aus Zeitgründen nicht einbezogen werden.

2.2 Prototypen wissensbasierter Bildauswertungssysteme

Wenn im folgenden einige prototypische Entwicklungen dargestellt werden, so liegt dieser exemplarischen Sicht der Versuch zugrunde, Forschungsansätze für wissensbasierte Konfigurations- und Interpretationssysteme gegen jene vielfältigen Einzelbeiträge zu isolierten Fragestellungen abzuheben. Die nachfolgende Darstellung von in der Literatur behandelten Systemen orientiert sich an einer Unterscheidung zwischen Konfigurations- und Interpretationssystemen und ordnet diese einzelnen Anwendungsklassen zu.

2.2.1 Produktionstechnik

Eine prototypische Labormusterimplementierung ist das am Philips Forschungslaboratorium in Hamburg im Rahmen des BMFT-geförderten Verbundprojektes TEX-K entwickelte Konfigurationssystem XRAY, welches in OPS 5 auf DEC VAX 8600 implementiert wurde [StPf 88].

XRAY wurde für den Entwurf von automatischen Bildanalyse-Systemen für die Röntgenprüfung in der Qualitätskontrolle konzipiert. Hinsichtlich dieses Problems vermerken STRECKER und PFITZNER: ‚Für die Entwicklung von Konfigurierungs-Expertensystemen im Bereich der automatisierten Röntgenprüfung gibt es gegenwärtig eine starke Motivation: Vollautomatische Prüfsysteme werden zwar allmählich realisierbar, jedoch erweist sich ihre Anpassung an neue oder geänderte Prüfaufgaben als äußerst zeitaufwendig und schwierig. Die Leistungsfähigkeit eines resultierenden automatischen Prüfsystems hängt weitestgehend von der Geschicklichkeit und der Expertise seines Entwerfers ab.‘ [6]

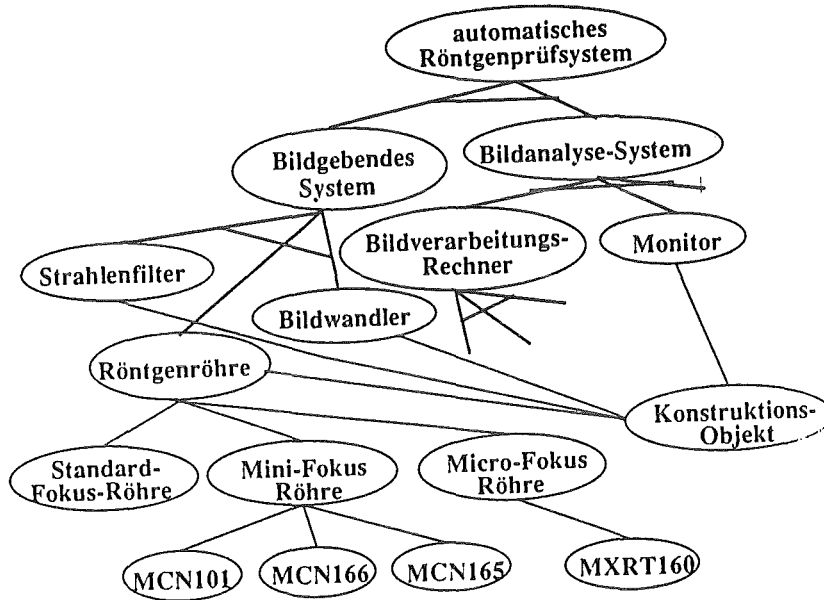
Die Entwickler beschreiben die Anwendung von XRAY anhand von zwei Beispielen zur Auswertung von Röntgenaufnahmen von *Aluminium-Gußfelgen* im Hinblick auf eventuell vorhandene Risse oder Gaseinschlüsse.

XRAY repräsentiert die einzelnen Bildverarbeitungsoperatoren einschließlich der entsprechenden Parametersätze in einer frameartigen Datenstruktur [7], auf welcher die OPS 5-Regeln operieren. Zu Beginn der Systemnutzung erfragt XRAY vom Benutzer eine Spezifikation der Prüfaufgabe [Pfi 89], worüber eine hierarchisch strukturierte Aufgabenbeschreibung instanziiert wird. Auf diesem fallspezifischen Akquisitionswissen aufsetzend leitet XRAY, vom Abstrakten ins Detail gehend, eine Kandidatenmenge möglicher Bildverarbeitungsoperatoren ab. Diese Kandidatenmenge wird mit weiteren speziellen Regeln, die eine zwingende Notwendigkeit bzw. eine nicht mögliche Einsetzbarkeit von einzelnen Operatoren festlegen, bis zur Selektion einer endgültigen Systemkonfiguration eingegrenzt [PfSt 87].

[6] Strecker und Pfitzner [StPf 88], S. 4

[7] Vgl. hierzu auch Brownston et al. [Bro et al. 85], p. 39 ff.: ‚Compound Data Types‘ (Klassen-Attribute-Werte)

Abb. 2.2.1-1: Ausschnitt aus einer XRAY/PLAKON-Begriffshierarchie.



Der weitere Systemausbau von XRAY zielt auf die Erprobung eines Bedingungsabreitungs-systems [Güs 88; SGCP 88] sowie auf eine Blackboard-Kontrollstruktur [EnMo 88] als Bestandteile einer *hybriden* (modularen) PLAKON-Architektur [Str 89]. Die XRAY-Version umfaßte Anfang 1988 etwa 700 Kontrollregeln und ca. 100 anwendungsspezifische Regeln; die Datenbasis bestand seinerzeit aus etwa 150 Frames, wovon 30 diverse Bildverarbeitungsoperatoren darstellten.

Abb. 2.2.1-2: XRAY-Framerepräsentation eines Bildverarbeitungsoperators.

FRAME	HARMO_MEXICAN	FRAME-NAME
IS-A	IMPRO_OPERATOR	ZUGEHÖRIGE-KLASSE
MEMBER_OF	FEATURE_FILTERING	
COMMENT	BAND PASS FILTER WITH A DIFFERENCE-OF-GAUSSIAN KERNEL (MEXICAN HAT)	
COSTS	7	KOSTEN-FAKTOR
PAR_SET	PAR_HARMO_MEXICAN	ZUGEHÖRIGER PARAMETER FRAME
SELECTION	(NECESSARRAY, POSSIBLE etc.)	AUSWAHL-STATUS
SELECTED_BY	(USER, RULE_XYZ etc.)	ERKLÄRUNGEN
REJECTED_BY	NIL	

Ein bemerkenswerter Aspekt der XRAY-Architektur ist der Ansatz, eine interaktive Parameteradaption für Beispielbilder durchzuführen. Das System XRAY ist in der Lage, die Parameter der jeweiligen Bildanalyseoperatoren in begrenztem Umfang aufgabenspezifisch zu justieren; bei diesen Parametern handelt es u.a. um Schwellwerte oder Fenstergrößen. Die Architektur des Systems XRAY, so wie sie von STRECKER und PFITZNER 1988 publiziert wurde, sollte allerdings nicht als prinzipielles Vorbild für die Entwicklung von wissensbasierten Bildauswertungssystemen angesehen werden, weil sie die weiteren Akquisitionsaspekte nicht im erforderlichen Umfang berücksichtigt. Ein versierter Kenner der amerikanischen Expertensystemforschung wird das System XRAY in der erwähnten Darstellung eher als einen Beleg für die mangelnde Fähigkeit der TEX-K Verbundpartner heranziehen, veröffentlichte empirische Resultate in eigene Problemlösungsstrategien einzubeziehen. Denn die Problematik der Akquisition von OPS 5-Regelwissen wurde bereits von McDERMOTT am Beispiel des legendären Konfigurationssystems diskutiert. [8] Leider geht aus den verfügbaren Veröffentlichungen nicht im Detail hervor, in welcher Weise die Wissensbasis von XRAY zu *erweitern* und zu *modifizieren* ist. [9]

Das Problem, die einmal eingegebene Regel- und Framestruktur auszubauen, wird nicht behandelt. Das Wissensakquisitionsmodul von XRAY ist offensichtlich lediglich ein Wissenseditor, der keine höheren Debugging- oder Verfeinerungsfunktionen besitzt [GWP 88].

Da das System XRAY auch Regeln der Art

```
Rule  Non-Homogenous-and-Noisy
  IF
    NOT (BACKGROUND VALUE HOMOGENEOUS)
    NOT (NOISE VALUE LOW)
  THEN
    (FEATURE-FILTERING SELECTION NECESSARY)
    (HARMO-MEXICAN SELECTION ADVISABLE)
    (HARMO-SIMPLE SELECTION NOT ADVISABLE)
```

verarbeitet, die keine quantitativen Größen beinhalten, sondern aus rein qualitativen Bedingungs- und Folgerungsklauseln bestehen, benötigt man für die Erweiterung der XRAY-Regelbasis einen Verfeinerungsansatz, der diesem Regelwissen gerecht wird.

Derartige Schwächen des XRAY Labormusters scheinen den Entwicklern aber bewußt zu sein, denn sie schließen ihren Beitrag mit dem Vermerk ab: "Das System kann und will in dieser Form noch nicht den Anspruch erheben, praktisch nutzbringend einsetzbar zu sein." [10]

[8] Van de Brug et al. [BBD 85]: 'The most recent account of R1's development draws attention to the fact, that as R1 has grown to be a system of several thousand rules, the task of maintaining and continuing to develop it has become substantially more difficult..... The problem solving method provides no vocabulary to allow an expert to describe the various roles knowledge will play in the performance of that task. It is thus hard to communicate to the variety of people adding knowledge to R1 what is required of them. R1 has an approach to configuration that is obscure; one has to know the system well in order to modify its behavior in some desired fashion.' (p. 244 f.)

[9] Auch die Entwickler des Expertensystemkerns PLAKON detaillierten 1989 anlässlich der GWAI in Ehringerfeld noch keinen empirisch erfolgreich erprobten Akquisitionssystemansatz [SCGB 89]. Diesbezüglich lesenswert ist auch der kritische Beitrag von Haag [Haag 89], S. 88 f: Erfahrungen und Probleme.

[10] Strecker und Pfitzner [StPf 88], S. 8

Die Abbildung unten zeigt eine aktuelle Darstellung der PLAKON-Softwarekonfiguration, die in [Str 89] beschrieben wurde.

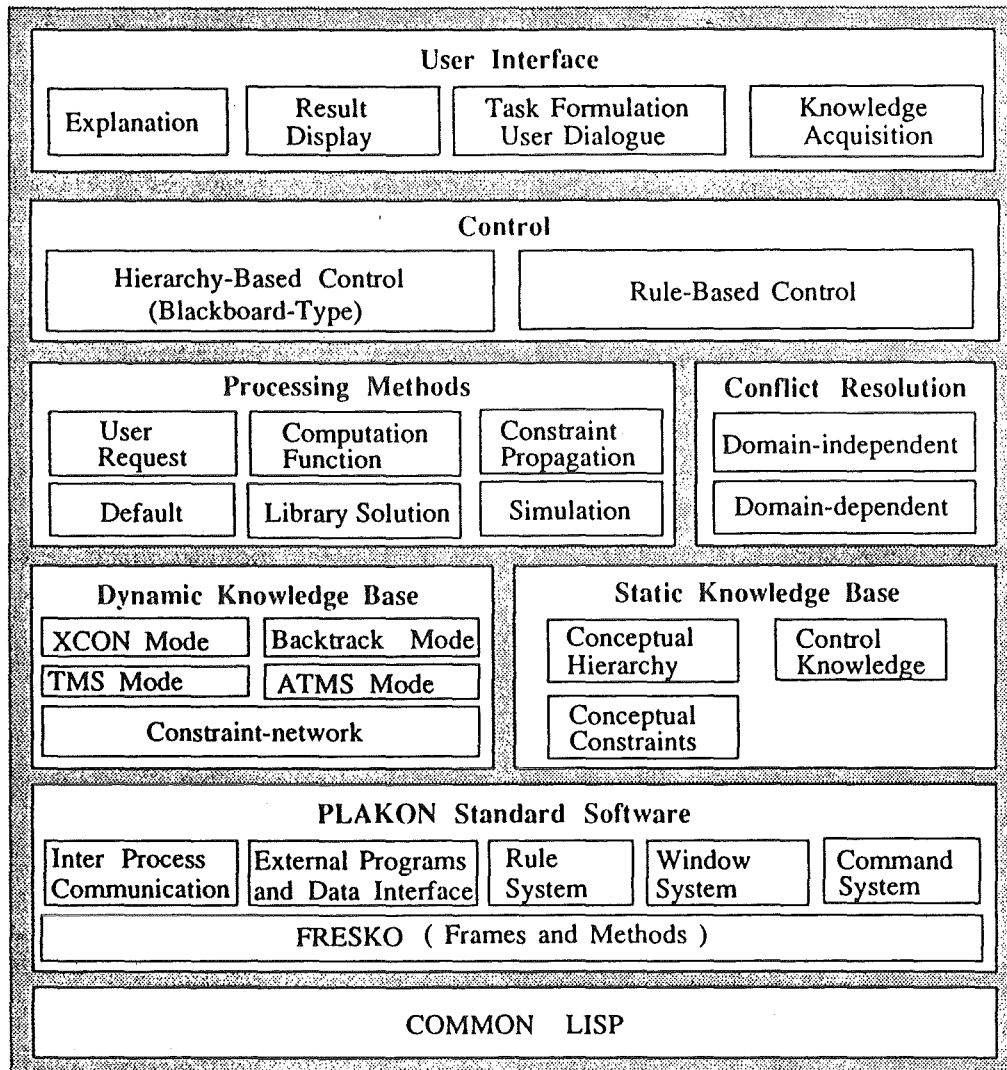


Abb. 2.2.1-3 : Schematische Darstellung der Softwarekonfiguration von PLAKON (TEX-K).

Ein weiteres regelbasiertes System, welches ebenfalls für Qualitätssicherungszwecke entwickelt wurde, ist der Prototyp von DARWISH und JAIN [DaJa 88]. Diese Implementierung eines Interpretationssystems zielt auf die Inspektion von sogenannten Printed Circuit Boards (PCBs).

2.2.2 Medizin

Ein starkes Interesse finden wissensbasierte Bildauswertungssysteme im medizinischen Anwendungsbereich. Eine beachtenswerte Implementierung ist das von SAGERER (Universität Erlangen) vorgestellte Expertensystem für die Interpretation von nuklearmedizinischen Sequenzintigrammen [Har 86]; diese Arbeit wurde 1986 mit dem DAGM-Preis ausgezeichnet. [11]

Ein weiteres System ist das an der Universität Pennsylvania entwickelte Bildauswertungssystem ANGY zur Interpretation von Angiogrammen [Sta 86]. ANGY wurde in OPS 5 und Lisp geschrieben und läuft auf einer VAX 11/750 unter Berkley UNIX. Die ANGY-Architektur integriert Vorverarbeitungsschritte sowie low-level und high-level Verarbeitungsoperationen.

Ebenfalls mit einem DAGM-Preis ausgezeichnet wurde die Entwicklung von TOLXDORFF (RWTH Aachen) zur wissensbasierten Diagnoseunterstützung bei der gewebecharakterisierenden Kernspintomographie [Tol 87; Tol 87b].

Neben derartigen Arbeiten an Interpretationssystemen scheinen im medizinischen Anwendungsbereich offensichtlich keine Versuche stattzufinden, wissensbasierte Konfigurationssoftware für Bildauswertungsanwendungen zu implementieren. Diesbezüglich konnten keinerlei Entwicklungsanstrengungen für den klassischen Bereich der medizinischen Röntgenbildauswertung festgestellt werden.

Auch die medizinische NMR-Spektroskopie scheint bislang keinerlei Entwicklungsunterstützung durch wissensbasierte Konfigurationssysteme zu erhalten. Wissensbasierte Interpretationssysteme scheinen für diese relevante Anwendungskategorie noch nicht in spürbarem Umfang praktisch erprobt zu werden. [12]

Ein Grund für diesen entwicklungsbedürftigen Anwendungsstand der wissensbasierten Bildauswertung in der medizinischen Diagnostik ist offenbar die schwache Forschungsförderung des BMFT. Die Bundesregierung plant allerdings, im Rahmen des Programms ‚Forschung und Entwicklung im Dienste der Gesundheit‘ einen neuen Förderungsschwerpunkt zur Bildverarbeitung in Diagnostik und Therapie einzurichten. [13]

[11] Für Einzelheiten (Datenstrukturen) wird der interessierte Leser auf die 1985 im Springer-Verlag erschienene Dissertation von G. Sagerer (Darstellung und Nutzung von Expertenwissen für ein Bildanalysesystem) hingewiesen.

[12] Eine gut lesbare Darstellung des Aachener ‚Nuclear Magnetic Resonance‘-Spektroskopieansatzes ‚RAMSES‘ findet der Leser in [Tol 87].

[13] Vgl. BMFT-Journal Nr. 4 vom August 1989, S. 15

2.2.3 Luftbildauswertung

Für den Anwendungsbereich Luftbildauswertung wurden in der jüngsten Vergangenheit sowohl auf nationalen Fachtagungen (DAGM-Symposien; Umweltschutzkonferenzen [JaPa 87]) wie auch auf internationalen KI-Tagungen (z.B. AAAI / IJCAI) Beiträge vorgestellt. Hervorgehoben sei hier auch das starke Interesse des Ministeriums für Umwelt des Landes Baden-Württemberg ('Luftbilder enthalten noch ungenutztes Informationsmaterial') an der Auswertung von Luftbildern für die Altlastenerkundung. [14] Bei amerikanischen Veröffentlichungen handelt es sich oft um von der DARPA gestützte Forschungsarbeiten, wie beispielsweise die in [HCN 87] dargestellte Entwicklung. [15]

Der Ansatz von HUERTAS et al. verfolgt die Interpretation von Flughafenszenen und basiert auf der Ausnutzung von linearen Segmentationstechniken.

An ähnlichen Problemen Arbeiten die Japaner NAGAO, MATSUYAMA und MORI [NMM 88], wobei sie eine sogenannte Blackboard-Architektur zugrunde legen. Das zentrale Interesse sowohl von HUERTAS et al. wie auch von NAGAO et al. liegt in der Identifikation von diskreten Objekten in natürlichen Szenen, also z.B. der Bestimmung von Rollbahnen oder Straßenzügen in Luftaufnahmen. Diese Interpretationsproblematik führt auf diffizile Segmentationsfragen und eine modellbasierte Einbeziehung von Referenzobjekten.

Auch das Forschungsinstitut für Mustererkennung (FIM) in Ettlingen arbeitet an wissensbasierten Systemen für die Luftbildauswertung. Für den Beitrag "Ein wissensbasiertes System für die Analyse von Luftbildern" wurde FIM-Autoren K. BEHRENS, H. und R. GABLER, B. NICOLIN und M. STIES 1986 der DAGM-Preis zuerkannt [Har 86].

Die Motivation von BEHRENS et al. war insbesondere der Wunsch, die 'relativ engen Grenzen, innerhalb derer Segmentations- und Klassifikationsverfahren erfolgreich auf natürlichen Szenen operieren' durch einen flexiblen Ansatz zu erweitern. [16] Die erste Version des Bildauswertungssystems verarbeitete ein digitalisiertes Bild bis zu einer symbolischen Beschreibung; aus pragmatischen Gründen wurde seinerzeit zunächst auf die Verarbeitung von Farb-, Stereo-, 3D- sowie Bildsequenzdaten verzichtet. Die Wissensrepräsentation und -verarbeitung wird in der neueren Arbeit von NICOLIN und GABLER [NiGa 87] erläutert (u.a. Verarbeitung des semantischen Netzes, Segmentation).

Neben dieser Entwicklung verfolgt das FIM eine weitere, die sich auf einen Blackboard-Ansatz stützt: das System BPI [LFGJ 87; LFGJ 87b].

[14] Vgl. hierzu das vom Ministerium für Umwelt Baden-Württemberg im Dezember 1988 neu herausgegebene 'Altlasten-Handbuch' (Teil II: Untersuchungsgrundlagen); Heft 19, S. 13 f.: "Die Interpretation von Luftbildern, besonders die multitemporale Auswertung konventioneller Reihenmeßbilder, stellt ein wichtiges Instrumentarium zur Lokalisierung und Erkundung von Altlasten dar. Das in den Luftbildern enthaltene Informationsmaterial sollte genutzt werden."

[15] Erwähnt seien diesbezüglich speziell die 1988 bei Morgan Kaufmann Publ., Inc. San Mateo, California erschienen Proceedings des im April 1988 von der DARPA veranstalteten *Image Understanding Workshop*.

[16] Behrens et al. [Har 86], S. 224

2.2.4 Satellitenbilddauswertung

Die Satellitenfernerkundung gehört mittlerweile zu einem der typischen Bereiche mit hoher Bildverarbeitungsintensität [JGP 89]. Eine Institution, die sich speziell mit der Auswertung und Verarbeitung von Satellitenbilddaten befaßt, ist das Dt. Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) der Dt. Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Oberpfaffenhofen (u.a. Auswertung von LANDSAT- und NOAA-Daten) [DFD 88; Win 87].

Ein interessanter Bestandteil der DFD-Rechnerlandschaft [Kel 89] ist ein SUN-Rechner, der CommonLisp für die Entwicklung eines Expertensystems zur wissensbasierten Klassifizierung von Satellitenbilddaten für Waldkartierungen verfügbar macht. ‚Man verspricht sich von dieser Forschungsaufgabe insbesondere, daß neben der Nutzung der spektralen Reflexion der Satellitenbilddaten die Einbeziehung von Textur und Kontext sowie Fachkenntnisse die Klassifizierungsergebnisse für Landnutzungskartierungen verbessern.‘ [17]

Einen ersten Einblick in diese prototypischen Arbeiten bietet LOHMANN [Loh 87].

2.2.5 Robotik

Ein starkes Anwendungsinteresse finden wissensbasierte Bildauswertungssysteme in der Robotikforschung. Ein typisches System für diesen Anwendungsbereich ist das an der Sheffield University von der AI Vision Research Unit entwickelte System TINA. Es ermöglicht die modellbasierte Identifikation (und Lagebestimmung) von Objekten und wird an Pick-and-Place-Tasks erprobt. TINA repräsentiert die Objekte des Umweltmodells mittels eines 3D-Drahtmodells [PBMF 87]. Die mit zwei Kameras aufgenommene Szene wird stereometrisch verarbeitet, nachdem u.a. ein von CANNY entwickelter Operator für die Kantenfindung genutzt wurde. Die Autoren geben an, daß typischerweise 90 % der Objektidentifikationen korrekt sind.

An ähnlichen Problemen wird auch am Forschungszentrum Informatik der Universität Karlsruhe (TH) gearbeitet. In einer von MAJUMDAR et al. [MLR 89] veröffentlichten Arbeit wird ein prototypischer Ansatz für die sensorgestützte Montage vorgestellt. Der Bildauswertungsansatz zielt auf die Anwendung eines Zweiarmeroboters, der in einer Hand eine Kamera führt, die auf ein Handhabungsobjekt gerichtet ist, welches mit der anderen Hand gegriffen werden soll. Da die Handhabungsobjekte nicht stets eine wohldefinierte Lage haben, ist es erforderlich zunächst sensorgestützt die Orientierung des Werkstückes sowie dessen wohldefinierte Lage zu erfassen. Das System ‚betrachtet‘ hierzu die Handhabungsobjekte aus verschiedenen Ansichten und leitet aus diesen regelbasiert jeweils eine zweckmäßige Greif-, Wende- oder Steckoperation ab.

Die Werkstücke sind als ROMULUS CAD-Modell repräsentiert und ermöglichen eine Identifikation von Begrenzungsflächen und Operationsmerkmalen im Kamerabild; Details dieses *Objektidentifikationsansatzes* werden in [MLR 88; MLR 89] erläutert. Dieser Ansatz ist Bestandteil einer übergeordneten Blackboard-Architektur für die KAMRO-Entwicklung.

[17] Winter [Win 87], S. 421

2.3 Neue Anwendungsmöglichkeiten im KfK

Aus der Zusammenschau der prototypischen Entwicklungen und der KfK-Aktivitäten in einzelnen Bereichen ergeben sich hinsichtlich einer wissensbasierten Bildauswertung die folgenden ‚neuen‘ Anwendungsmöglichkeiten:

- Wissensbasierte Satellitendatenauswertung (IMK);
- Wissensbasierte Konfiguration von Bildverarbeitungssequenzen (IDT);
- Wissensbasierte Objektidentifikation (IRE).

Deren KfK-Relevanz wird im folgenden aufgezeigt.

2.3.1 Satellitendatenauswertung

Ein tatsächlich innovatives Anwendungsfeld für die wissensbasierte Bildauswertung bietet die *Satellitenmeteorologie*.

Bislang gibt es für diesen doch relativ jungen Bildverarbeitungssektor in vielen Bereichen noch keine befriedigenden Systemlösungen. Die Befürchtung, die hohen Datenraten der Fernerkundungssatelliten nicht vollständig auswerten zu können, veranlaßte die Dt. Forschungsgemeinschaft (DFG) vor zehn Jahren zur Förderung eines Schwerpunktprogrammes, welches vor allem auch weitere Grundlagen für die Satellitenbildverarbeitung bereitstellen sollte [HMR 87]. Ein nach wie vor nur *teilweise* gelöstes Problem der Satellitenmeteorologie ist die Wolkenerkennung. Es gibt bislang keine mesoskalige Bildauswertungssoftware, die fehlerfrei beliebige Wolkenstrukturen (z.B. Cirrus) identifiziert. Ein Softwarepakt, welches im IMK zum Einsatz kommen soll, ist das von SAUNDERS entwickelte System APOLLO [Sau 86]. Allerdings weiß man bereits heute, daß APOLLO [18] u.a. Küstenregionen in Satellitenbildern nicht korrekt und optimal auswertet. Das Programm verarbeitet radiometrischen Daten *pixelweise*, d.h. es wertet die *spektrale* Information in den Messungen aus. Während die Wolkenerkennungsalgorithmen für radiometrisch homogene Erdregionen (z.B. nur Wasser) hinreichende Auswertungsqualität gewährleisten, werden Küsten-/Inselbereiche mit wechselnden Reflektionseigenschaften von den Wolkenerkennungsverfahren häufig fehlerhaft verarbeitet.

Für diesen Anwendungsbereich, der sich auf die Problematik Wolkenverfolgung („Cloud Tracking“) erweitern läßt, bieten sich prinzipiell im Bereich der wissensbasierten Konfiguration von Bildsequenzen wie auch im Bereich der wissensbasierten Bildinterpretation fruchtbare Lösungsmöglichkeiten an. Durch die Einbeziehung von meteorologischem Fachwissen läßt sich die Segmentierung *kritischer* Bereiche deutlich verbessern. Weiterhin lassen sich die Daten der einzelnen Spektralkanäle interpretativ verknüpfen. Das spezielle Problem dieser Anwendung liegt in den nicht ohne weiteres analytisch eingrenzbaaren Wolkenstrukturen; hierüber ergeben sich beträchtliche Segmentationsprobleme, denn Wolken können sich zwar bis zu einem gewissen Maße *ähneln*, doch sind identische Wolkenstrukturen eben eine Ausnahme.

[18] APOLLO ist das Akronym für AVHRR Processing over Land cLoud and Ocean. [SaKr 88]

Bei der Durchsicht der Literatur (u.a. der Proc. IJCAI-87, AAAI-86, AAAI-88) wie auch der ESPRIT-Statusberichte [CEC 87] fanden sich - abgesehen von [Loh 87] - für den Anwendungsbereich Satellitenbildverarbeitung *keine* prototypischen Entwicklungen. Ganz offensichtlich handelt es sich hier um ein relativ stark vernachlässigtes Forschungsgebiet, welches aber sehr wohl attraktive Einsatzmöglichkeiten für Wissensverarbeitungstechniken bietet. Dies ist umso bemerkenswerter, als Wissenschaftler der IMK-Gruppe Satellitendatenverarbeitung darauf hinweisen, daß es sich hier um ein meteorologisches Kernproblem handelt, dessen Lösung einen spürbaren Fortschritt bedeutet.

Abb. 2.3.1-1 : ISYS-Satellitenbild mit Wolkenrändern.



Auswertungsfehler

2.3.2 Konfiguration von Bildverarbeitungsmodulen

Ein attraktiver Bereich für den Einsatz von Wissensakquisitions- und -verarbeitungstechniken ist die Konfiguration von anwendungsspezifischen *low level* Bildverarbeitungsmodulen, wie sie am IDT entwickelt werden [Bür 88; EcGu 84; BGH 89; Gut 88]. Hieran wird bereits in unterschiedlichen Instituten außerhalb des KfK gearbeitet [End 87]. Es liegt ein typisches KI-Forschungsproblem vor: *die Assimilation von Fachwissen*. Die Bereitstellung von Bildverarbeitungsmodulen durch einen Bildverarbeitungsfachmann erfordert regelmäßig eine beträchtliche Konfigurationsexpertise, die durch experimentelle Vorgehensweise gekennzeichnet ist. Für die Konfiguration von *low level* Bildverarbeitungsmodulen existiert keine klare Strategie, die man als ‚Theorie der Bildverarbeitungssequenz‘ ansehen könnte; es handelt sich hier um einen klassischen (‚ill-structured‘ oder) *diffusen* Anwendungsbereich [Rau 83]. Gelingt es, die in die Konfiguration von Bildverarbeitungsmodulen investierte Expertise *reproduzierbar* zu machen, so läßt sich die Bereitstellung von ähnlichen Bildverarbeitungsmodulen beschleunigen.

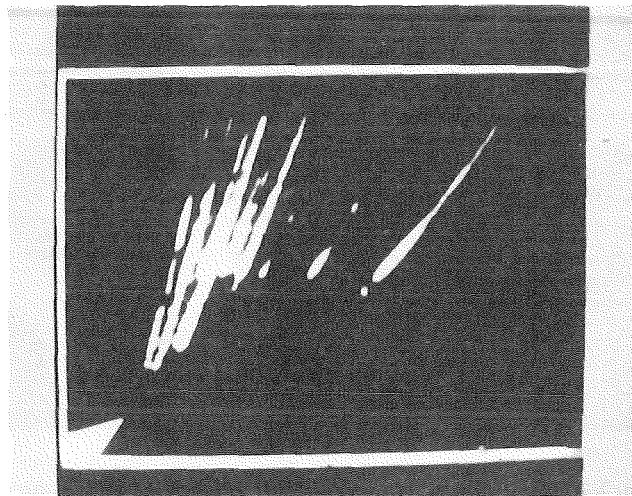


Abb. 2.3.2-1: Parabelspur eines KALIF-Experimentes (Ausgangsbild).

Dies wurde schon 1986 von NEUMANN anlässlich des 8. DAGM-Symposiums herausgestellt. NEUMANN hob hervor, daß die Einführung, Einsatzanpassung und Umstellung von konfigurierten Bildverarbeitungsmodulen (z. B. für Qualitätsprüfsysteme) bislang nur durch Heranziehen eines Bildverarbeitungsexperten, der die erforderlichen Modifikationen am System vornimmt, durchführbar ist: ‚Der Umstellungsprozeß ist meist mit viel Probieren verbunden und ist eher eine kreative denn eine planmäßige Tätigkeit. Natürlich tritt das Konfigurierungsproblem in verschärfter Form bereits bei der Ersteinrichtung des Qualitätsprüfstandes auf (...) Ähnlich problematisch können ungeplante Veränderungen oder Variationen in einem Bildauswertesystem sein, etwa eine Beleuchtungsänderung durch Verschmutzung der Lichtquelle oder Rostflächen auf Gußteilen. Kleine Änderungen dieser Art können unbeabsichtigte Effekte zur Folge haben, z.B. Zurückweisungen von Objekten bei einer Qualitätsprüfung. Das Problem liegt hier nicht so sehr in der Beseitigung des Fehlverhaltens (...), sondern in der Schwierigkeit, das Fehlverhalten vorzusehen. Wir sprechen deshalb von einem Prädiktionsproblem. Beide Problemkreise, Konfigurierung und Prädiktion haben offenbar miteinander zu tun: könnte man das Verhalten einer Systemkonfiguration exakt vorhersagen, so wäre ein Teil der Konfigurierungsproblematik gelöst (...) Beiden Problemkreisen ist eine tieferliegende Ursache gemeinsam: ein Mangel an Formalisierung und theoretischer Durchdringung der Expertise, die beim Einrichten einer Bildverarbeitungsanlage erforderlich ist.‘ [18]

Diese Beobachtungen lassen sich auch auf die gegenwärtige Systementwicklung für die Analyse von KALIF-Bildern (Impulsexperimente) übertragen: bislang existiert keine Software, die dem Systemanwender eine

[18] Neumann [Neu 86], S. 206 f.; Auslassungen wurden mittels (...) gekennzeichnet.

selbstständige Anpassung der Konfiguration für wechselnde Auswertungsfälle ermöglicht.

Aus dem Fehlen einer analytischen Formalisierungsgrundlage ('Theorie der Bildauswertung') leitet sich unmittelbar die Notwendigkeit für einen *wissensbasierten* Ansatz ab. Es wäre für die künftige Entwicklungsarbeit des KfK rationell, wenn ein Expertensystem die anwendungsspezifische Konfiguration von Bildverarbeitungssystemen durch einen Beratungsdialo g unterstützt, und dem Konfigurator von Bildverarbeitungsroutinen nicht lediglich systematisch *verfügbare* Routinen zu präsentiert, sondern auch deren *Konfiguration* für *individuelle* Bildauswertungsprobleme ableitet. Programmpakete - wie etwa das bekannte SPIDER-Package - dokumentieren lediglich die *verfügbaren* Routinen, ohne deren *gezielte Nutzbarkeit* in Abhängigkeit von Auswertungsvorgaben aufzuzeigen.

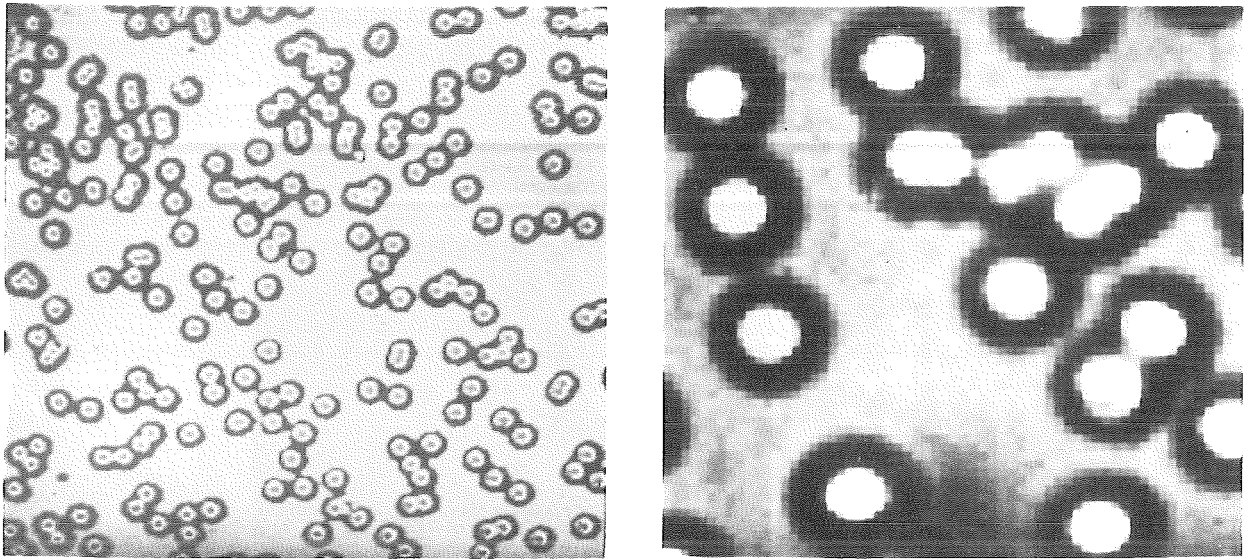


Abb. 2.3.2-2 : Parabelspursegmente nach Vergrößerung (Auswertungsbild).

Hieran sollte demnächst nicht nur im Rahmen der PLAKON-Entwicklung an der Universität Hamburg gearbeitet werden, sondern auch am IDT [SCGB 89]. Ein Anwendungsbedarf besteht diesbezüglich speziell für die Bildauswertung im Rahmen der KALIF-Experimente (Parabelspuranalyse) .

[19] Ein derartiges Konfigurationssystem ließe sich nicht allein institutsintern fruchtbar einsetzen, sondern über die existierende vernetzte Rechnerstruktur KfK-weit nutzen. Dies wird beispielsweise in den USA im Bereich der wissensbasierten Turbinenüberwachung in ähnlicher Weise längst erfolgreich praktiziert [Os b 86]. Der Vorteil eines *zentralen netzfähigen* Beratungssystems für die wissensbasierte Konfiguration von Bildverarbeitungssequenzen liegt nicht nur in der größeren Nutzbarkeit bzw. Anwendbarkeit, sondern vor allem auch in in der größeren Assimilationskapazität, die eine rapidere Kompetenzsteigerung ermöglicht, wenn hierzu die adäquaten Dialog- und Akquisitionstechniken bereitgestellt werden.

Eine andere Möglichkeit, die Wissensakquisition zu beschleunigen und zu verbreitern ist die, den interessierten Anwendern ein *portables* Konfigurationssystem anzubieten und die *erweiterten und modifizierten Wissensbasen periodisch zu aggregieren*.

2.3.3 Robotik

Neue Anwendungsmöglichkeiten für eine wissensbasierte Bildauswertung ergeben sich am IRE im Bereich Robotik. Das oben erwähnte Verschraubungsproblem läßt sich mit *ähnlichen* wissensbasierten Ansätzen lösen, welche derzeit an der Sheffield University (TINA) wie auch an der Universität Karlsruhe (Zweiarmroboter) erprobt werden [LeMa 87; MLR 89; Por et al. 87]. [21]

Eine gegenwärtig noch nicht befriedigend bewältigte CATROB-Problematik ist die Berücksichtigung der Reflektionen des metallischen Flansches. Die Automatisierung dieses Verschraubungsvorganges erfordert momentan eine Verarbeitung von *künstlich* angebrachten Referenzmarken. Wie in dem Beitrag von MAJUMDAR et al. [MLR 89] aufgezeigt wurde, lassen sich derartige *Orientierungsinformationen* durch die Einbeziehung eines wissensbasierten Objekterkennungsansatzes (Weltmodell) einsparen.

Doch die CATROB-Objektidentifikationsproblematik bietet nicht allein Anwendungsmöglichkeiten für die wissensbasierte Bildinterpretation. Da das CATROB-System für unterschiedliche Handhabungsfälle (Teileaus-tausch, Inspektion, Reinigung, Montage) eingesetzt werden soll, sind eigens für die Verschraubungsproblematik konfigurierte Bildverarbeitungs-algorithmen nur begrenzt übertragbar. Im Regelfall muß das Bildauswertungssystem des Roboters für jeden Einsatzfall eine spezifisch konfigurierte Bildauswertungssequenz auf der low level (wie auch auf der high level) Ebene ausführen [BLSW 88]. Diese resultiert aus den unterschiedlichen Operationsmerkmalen wie auch aus den individuellen Szeneninhalten [BTW 89]. Hieraus ergibt sich eine einsatzspezifische Konfigurationsproblematik: in Abhängigkeit der Szene und der Handhabungskontexte (Operationskriterien, Zugänglichkeit) müssen individuelle Bildverarbeitungsfolgen ermittelt werden. Vorteilhaft für das CATROB-System wäre dementsprechend eine wissensbasierte (Teil-) Automatisierung des Konfigurationsproblems. Voraussetzung hierfür ist, daß *konditionales* Expertenwissen über die Wieder-verwendbarkeit und Verwertbarkeit von bekannten Prozeduren reproduzierbar gemacht wird.

[21] Die Bildverarbeitungsprozeduren dieses KAMRO-Systems enthalten auch SPIDER Routinen.

2.4 Resümee

Die Literatur zum Themenkreis wissensbasierte Bildauswertung behandelt in großem Umfang algorithmische Fragestellungen (z.B. Stereoalgorithmen) [Moh 87]; es gibt relativ wenige Arbeiten, in denen empirische Resultate aus gereiften Systementwicklungen diskutiert werden. Vielfach wird über noch auszubauende Labormuster berichtet [Win 84; Win 85; HTH 89]. Zu den beachtenswerten Entwicklungen, die bereits seit mehreren Jahren kontinuierlich weiterverfolgt werden, zählt das UMASS Schema System der Gruppe um RISEMAN und HANSON zur Interpretation natürlicher Szenen [RiHa 84; KHR 87; EnMo 88].

Eine vergleichbare Entwicklung scheint es im Bereich wissensbasierter Konfigurationssysteme noch nicht zu geben; zumindest nicht für Bildauswertungsanwendungen. Eine auf diese Anwendungsproblematik zielende typische Labormusterentwicklung ist das System IPAX (Universität Erlangen), welches mittlerweile immerhin die Integration von neuen / zusätzlichen Bildverarbeitungsoperatoren ermöglicht, ohne allerdings eine Reihenfolge von Verarbeitungsalgorithmen für definierte Bildauswertungsvorgabe generieren zu können. Hieran wird in Erlangen noch intensiv gearbeitet [BrNi 88]. Eine ähnliche Konzeption wird mit dem System HORUS an der TU München verfolgt [Eck 88].

An der Entwicklung von Konfigurationsexpertensystemen arbeitet bereits seit mehreren Jahren im Rahmen der BMFT-geförderten TEX-K-Projektes vor allem das KI-Labor der Universität Hamburg (B. NEUMANN und Mitarbeiter). Dessen PLAKON-Aktivitäten stellen wertvolle Beiträge und Meilensteine in der Entwicklung von wissensbasierten Konfigurationssystemen dar, die vor allem den Nutzen *hybrider* Wissensrepräsentations- und -verarbeitungsmechanismen für den Bildauswertungsbereich demonstrieren [HTH 89; Str 89].

Insgesamt gesehen befindet sich die Entwicklung von wissensbasierten Bildauswertungssystemen noch in einem relativ frühen Stadium. Die in der Literatur erwähnten Prototypen haben keine einheitliche Grundarchitektur; neben Blackboard-Ansätzen findet man häufig regelbasierte Implementierungen [SCGB 89]. Die Hauptanwendungen liegen im medizinischen Bereich, in der Robotik und im produktionstechnischen Bereich. Daneben existieren starke Anstrengungen im Bereich Luftbildanalyse; eine diesbezüglich typische regelbasierte Implementierung ist SPAM [MHM 85]. Ein Prototyp oder Labormuster eines wissensbasierten Bildauswertungssystems für ein der ‚Parabelspananalyse‘ verwandtes physikalisches Bildverarbeitungsproblem konnte nicht gefunden werden. Ganz allgemein darf man feststellen, daß die Anwendung von Wissensverarbeitungstechniken in der Physik bei weitem nicht einen Umfang angenommen hat, wie dies in der Chemie bereits der Fall ist.

Bislang gibt es kein ausgereiftes Expertensystem für die Auswertung von Satellitenbildern. Auch in der Robotik scheinen heute noch keine Konfigurationsexpertensysteme in der Erprobung zu sein. Allerdings wird im Rahmen des ESPRIT-Projektes VIDIMUS intensiv daran gearbeitet. [22] Für die Auswertung von Bildern, denen Experimente der Teilchenphysik zugrunde liegen, wurden ebenfalls keine wissensbasierten Systemansätze gefunden.

Innerhalb des KfK sind recht verschiedenartige Aktivitäten im Bereich Bildanalyse wahrzunehmen, gegenwärtig wird allerdings in *keinem* KfK-Labor an der Entwicklung eines wissensbasierten Bildauswertungssystems gearbeitet. Dieser Bericht soll dazu beitragen, die Anwendungsmöglichkeiten der Expertensystemtechnik, genauer, die Akquisition und Verarbeitung des für die softwaretechnische Bereitstellung von Bildauswertungssystemen erforderlichen Konfigurations- und Interpretationswissens, für die Bildauswertung in unterschiedlichen Anwendungsbereichen aufzuzeigen.

[22] Vgl. hierzu die Projektbeschreibung von Risk und Boemer [RiBo 89], S. 477 : "The Projekt will be used to prove the feasibility of designing vision systems for industrial applications such as IC inspection or 3D component assembly..... The first stage of vision system construction will be to use a Knowledge Based System (KBS) to convert the ‚user-supplied‘ information about the inspection task into a Functional Representation, which will express the task as a series of operations (or functions) that are executable by an Image Interpretation System (IIS). An Intelligent Application Mapper (IAM) will then produce an IIS system for each particular function by ‚mapping‘ this Functional Representation onto a Vision Framework (VF), and this ‚mapping‘ will be achieved by selecting specific algorithms based on information in an Algorithm Performance Library (APL)....."

Für eine interdisziplinäre Großforschungseinrichtung wie das KfK bieten sich - wie dieser Bericht darlegt - im Bereich der wissensbasierten Bildauswertung bemerkenswerte Möglichkeiten, deren Forschungspotential insbesondere sehr praxisrelevant ist. Denn eine begrenzte anwendungsbezogene Problemanalyse zeigt bereits einen starken Bedarf an wissensbasierten Bildauswertungssystemen in mehreren Instituten auf. Es lassen sich mindestens drei ‚innovative‘ KfK-Anwendungsfelder eingrenzen, die pragmatischen Kriterien gerecht werden. In zwei Instituten - IMK und IRE - bieten sich fruchtbare Anwendungsmöglichkeiten für ein integriertes Konfigurations- und Interpretationsexpertensystem im Sinne der Abb. 1-2, denen ein dringender praktischer Bedarf gegenübersteht.

Im IDT, das nach wie vor regelmäßig gleichzeitig in mehrere Bildauswertungsprojekte involviert ist, besteht ein Bedarf an einem wissensbasierten Konfigurationsberatungssystem zur Unterstützung der Softwareproduktion im Bildverarbeitungsbereich [IDT 89]. Entwickelt man dieses, so ergibt sich aufgrund der existierenden institutsinternen und -externen Kooperationsbeziehungen eine natürliche Entwicklungsverkürzung für künftige Bildauswertungsvorhaben des KfK, speziell für solche, die einen größeren Entwicklungsaufwand erfordern. [23]

[23] Die bereits erwähnte interaktive Testumgebung des IDT bietet gute Voraussetzungen für die schnelle Prototypentwicklung, weil die Schnittstelle für eine wissensbasierte Konfigurationskomponente nicht vollständig neu, sondern hierauf ‚aufsetzend‘ entwickelt werden kann [EcGu 86].

3 Systemanalyse

Die Klassifizierung der KfK-relevanten Anwendungen ergab einen vordringlichen Entwicklungsbedarf für wissensbasierte Systeme zur Unterstützung des Entwurfes von Bildverarbeitungsmodulen. Hierbei handelt es sich um eine Klasse wissensbasierter Systeme, die als Beratungssysteme einzuordnen sind. Der Zweck eines derartigen Systems, welches im folgenden analysiert werden soll, ist es, die Anwendbarkeit von gespeicherten Bildverarbeitungsoperatoren für *unterschiedliche* Bildauswertungsprobleme aufzuzeigen, wobei insbesondere auch deren Hintereinanderausführung abzuleiten ist. Akquiriert und verarbeitet wird eine Wissensbasis, die *Konfigurationswissen* enthält, welches sowohl aus Laborarbeiten wie auch aus Einsatzerfahrungen in den verschiedenen Anwendungsgebieten gewonnen wurde bzw. werden kann.

3.1 Konfigurationsproblematik

Das Problem, für eine gegebene Bildauswertungsaufgabe einen low level Bildverarbeitungsmodul zu konfigurieren, besteht darin, eine Menge von Konfigurationsvorgaben (Attribute und deren Ausprägungen) auf eine Bildverarbeitungsoperatorenmenge abzubilden. Wären die Konfigurationsattribute wie auch die Bildverarbeitungsalgorithmen als nicht veränderbare Mengen vorgegeben, so läge ein klassisches Zuordnungsproblem vor; dies ist jedoch nicht der Fall. In einer Vielzahl von Bildauswertungen wird es sich als notwendig erweisen, zusätzliche Bildverarbeitungsprozeduren bereitzustellen und/oder vorhandene in modifizierter Form anzuwenden, weil die gegebene Bildverarbeitungsoperatorenbasis spezielle Verarbeitungsschritte nicht abdeckt. Hierbei wird es sich vor allem um anwendungsspezifische Routinen handeln. Weiterhin genügt es nicht, allein die aufgabenrelevante Operatorenmenge einzugrenzen (Selektionsproblem); es muß auch eine richtige Verarbeitungssequenz ermittelt werden (Reihenfolgeproblem). Dabei kann eine Bildverarbeitungsroutine durchaus mehrfach auftreten. Für eine bestimmte Auswertungsproblematik sollten auch alternative Bildverarbeitungs(teil-)sequenzen ableitbar sein.

Während man bei Echtzeitsystemen regelmäßig die Systemarchitektur stark nach zeitlichen Performanzkriterien auslegt, um zu gewährleisten, daß die Verarbeitungsergebnisse innerhalb einer bestimmten Zeitspanne bereitgestellt werden, sollten Konfigurationssysteme vor allem die Assimilation von ‚neuem‘ Wissen unterstützen, um mit einer sich vergrößernden und detaillierenden Wissensbasis auch über eine wachsende Beratungskompetenz zu verfügen. In diesem Sinne rückt bei der Gestaltung eines *erweiterbaren* Beratungssystems das Wissensakquisitionsproblem in den Vordergrund.

Die erwähnten *Konfigurationsvorgaben (Konfigurationsattribute, -kriterien)* bestehen in erster Linie aus den vom Benutzer zu akquirierenden Anlagenbeschreibungsdaten, den aufgabenspezifischen Auswertungsvorgaben und den Bildeigenschaften. Sie werden primär symbolisch erfragt (z.B. Oberflächenbeschaffenheit: rauh / glatt?). Dabei sind Auswertungsmerkmale und Bildeigenschaften nicht immer unabhängig voneinander akquirierbar, was sich speziell an Bildfolgenauswertungsproblemen veranschaulichen läßt: wenn man Veränderungen in zwei aufeinanderfolgenden Bildern interpretieren will, so ist zu spezifizieren, welche Merkmale und Ausprägungsvariationen in dem jeweiligen Bild zu prüfen sind. [24]

Zu akquirierende mögliche *Anlagenbeschreibungsattribute (Gerätebeschreibungsattribute)* sind beispielsweise Auflösungsangaben (96 x 96 Bildpunkte, 256 x 256 Bildpunkte, 512 x 512 Bildpunkte,...), die Anzahl der darstellbaren Grauwertstufen (z.B. 64 oder 256 Grauwerte) und möglichen Farbdarstellungen, die Art des optischen Sensors (z.B. Fernseh- oder Diodenzeilenkamera, Laserscanner) wie auch Performanzinformationen (z.B. 100 M Pixeloperationen/Sekunde); hierunter fallen ebenso die technischen Daten von Mikroskopen einschließlich der Genauigkeit ihres verfahrbaren Tisches für die Bildvorlage.

Beispiele für *Bildattribute (Bildmaterialattribute)* sind u.a. relativ allgemeine kategorische Angaben wie

[24] Der interessierte Leser wird in diesem Zusammenhang auf die an der Universität Hamburg 1986 erschienene Dissertation von V. Haarslev : (*Interaktion in Systemen zur Bildfolgenauswertung basierend auf einem objektorientierten Ansatz*) hingewiesen, in welcher verschiedene Prototypen erläutert werden.

Luftaufnahme, Werkstattfoto oder Satellitenbild, inhaltliche Charakterisierungen wie ‚Natürliche Szene‘ oder ‚Texturbild‘, Angaben über die Darstellungsart und die spektrale Information (Binärbild, monochromatische oder multispektrale Aufnahme, Grauwertbild) oder etwa Rauschintensitäten.

Als Beispiele für (grobe) akquisitionsrelevante *Auswertungsvorgaben* (*Auswertungsziele*) seien hier Objektidentifikation, Sollformüberprüfung, Lageprüfung, Strukturverifikation, Vermessung, Bewegungsanalyse, Abstandsbestimmung, Elementezählen oder Szeneninterpretation genannt. Es ist einsichtig, daß man Auswertungsziele nach Möglichkeit *ergebnisabhängig* eingeben sollte. Eine abstrakte Vorgabe ‚Geometriemessung‘ läßt sich nur sinnvoll einbeziehen, wenn man dem Konfigurationssystem z.B. weiterhin vorgibt, daß die *Länge* oder die *Formmaße* des interessierenden Objektes als *Ergebnis* erwartet werden.

Prinzipiell werden als Konfigurationsattribute (Konfigurationsvariablen, Konfigurationskriterien) hier diejenigen Attribute betrachtet, die zu einer Bestimmung der relevanten Bildverarbeitungsalgorithmen und Anlagenkonfiguration (insbes. Geräteaufbau) beitragen. Sie lassen sich flexibel über einen menügestützten Akquisitionsdialog erfragen, der jeden Konfigurationsprozeß einleitet. Die Konfigurationsbreite und -tiefe sollte sowohl über die *Auswertungsmerkmale* wie auch über die *Bildverarbeitungsanlagenattribute* vorgebar sein, d.h. man muß dem Systembenutzer sowohl die Möglichkeit geben, bestimmte Arten von Bildverarbeitungsoperationen wie auch Gerätevorgaben als Bestandteil einer Auswertungsproblematik *isoliert* zu integrieren, wie auch die Konfigurationsvorgaben ‚beliebig‘ abstrakt bzw. konkret zu halten. Gelingt es dem System nicht, diese Restriktionen konsistent zu verarbeiten, so muß es eine entsprechende ‚Widerspruchsmeldung‘ oder *Inkompatibilitätsangabe* generieren.

Formal läßt sich die Konfigurationsproblematik wie folgt beschreiben:

Sei $A := \{a_1, a_2, \dots, a_j\}$ mit $j \in \mathbb{N}$ die Menge der Anlagenbeschreibungsattribute, $B := \{b_1, b_2, \dots, b_k\}$ mit $k \in \mathbb{N}$ die Menge der Bildeigenschaften und $V := \{v_1, v_2, \dots, v_p\}$ mit $p \in \mathbb{N}$ die Menge der Auswertungsvorgaben, so ergibt sich die gesamte Menge der akquirierbaren Konfigurationsattribute K aus $K := A \times B \times V$. Der Systembenutzer soll stets Attribute aller drei Kategorien angeben; es wird ihm nicht ermöglicht, die Akquisitionssphase z.B. ohne Anlagenbeschreibungseingaben zu beenden.

Da die für eine konkrete Bildauswertungsproblematik relevanten Konfigurationsattribute ganz offensichtlich eine Teilmenge hiervon darstellen, gilt für die Menge der *fallspezifisch relevanten* Konfigurationsattribute oder -vorgaben $k^* := \{(a^*, b^*, v^*)\} \subset K$ mit $a^* \subset A$, $b^* \subset B$ und $v^* \subset V$. Ein Konfigurationsattribut sei *relevant*, wenn das Konfigurationssystem *ohne dessen Vorgabe* nicht die geforderte Bildverarbeitungssequenz ableiten kann (Diskriminationslücke). In diesem Sinne ist die Menge a^* als die Gesamtheit der relevanten Anlagenbeschreibungsattribute, die Menge b^* als die Gesamtheit der relevanten Bildmaterialattribute und die Menge v^* als die Gesamtheit der relevanten Auswertungsvorgaben für ein diskretes Auswertungsproblem aufzufassen.

Bezeichnet $\Omega := \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_z; 1 \leq i \leq z, z \in \mathbb{N}\}$ eine Bildverarbeitungsalgorithmenbasis, bestehend aus *diskreten* Bildverarbeitungsoperatoren $\omega_i \in \Omega$, so beschreibt $S := (\omega_t \mid t = 1, 2, \dots, n; n \in \mathbb{N}) \in \Theta$ eine *spezielle* Bildverarbeitungssequenz (oder Bildverarbeitungsfolge) aus der gesamten Menge der konfigurierbaren Sequenzen Θ , in welcher *nicht* notwendigerweise gilt $\omega_t \neq \omega_{x+t}(x, t \in \mathbb{N})$. Denn eine Routine kann *mehrfach* in einer Bildverarbeitungssequenz auftreten; die natürliche Zahl n gibt die Anzahl der Sequenzalgorithmen an (Anzahl der Bildverarbeitungsoperationen \neq Zahl der Sequenzalgorithmen). Da die Sequenz S aus Ω -Routinen konfiguriert wurde, gilt $\forall \omega_t : \exists i \in \{1, 2, \dots, z\}$ mit $\omega_t \equiv \omega_i$.

Das (low level) Konfigurationsproblem besteht also darin, eine Menge von relevanten Konfigurationsvorgaben $k^* \subset K$ auf (mindestens) eine Bildverarbeitungssequenz $S^* \in \Theta(S^{i^*}$ mit $l \in \mathbb{N}$) [25] abzubilden. Aufgrund der Vielzahl der voneinander abhängigen und stark vernetzten Bestimmungsfaktoren sollte diese Abbildung nicht direkt analytisch-funktional erfolgen, sondern auf der Basis eines heuristischen Wissensverarbeitungsansatzes. Das Ergebnis des Konfigurationsprozesses ist nicht nur eine den Konfigurationskriterien k^* genügende ‚low level‘ Bildverarbeitungssequenz S^* , sondern auch die eine derartige Verarbeitung *realisierende* (Bildverarbeitungs-) Anlagen- bzw. Gerätekonfiguration $G^* \in \Lambda := \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_y; 1 \leq h \leq y, y \in \mathbb{N}\}$, bestehend aus Konfigurationselementen λ_h .

[25] Vgl. Abschnitt 3.3.2: Alternative Verarbeitungssequenzen

Sind für zwei Bildauswertungsprobleme δ und π die Mengen der relevanten Konfigurationsvorgaben (Konfigurationskriterien) k^δ und k^π identisch, hat man also $k^\delta \equiv k^\pi$, so sollen die Mengen der ableitbaren Bildverarbeitungsfolgen S^δ und S^π gleich sein. Unterscheiden sich die relevanten Konfigurationsvorgaben zweier Auswertungsprobleme, hat man also $k^\delta \neq k^\pi$, so sollen die Mengen der konfigurierten Bildverarbeitungsfolgen $\{S^{1\delta}, S^{2\delta}, \dots\}$ und $\{S^{1\pi}, S^{2\pi}, \dots\}$ in der Regel ebenfalls nicht identisch sein.

Ein wissensbasiertes Konfigurationssystem *differenziert* immer nur in dem Umfang zwischen Bildverarbeitungserfordernissen, in welchem entsprechend *diskriminierende Konfigurationsvorgaben* eingebracht werden. Prinzipiell sind Auswertungsfälle denkbar, für welche die Bildverarbeitungssequenzen S^δ und S^π gleich sind ($S^\delta \equiv S^\pi$), obwohl die Konfigurationskriterien *nicht identisch sind* ($k^\delta \neq k^\pi$). Derartige Ableitungen der Form $\{(k^\delta, k^\pi) \mid k^\delta \neq k^\pi\} \vdash \{(S^\delta, S^\pi) \mid (S^\delta \equiv S^\pi)\}$ werden hier als Ausnahmen und nicht als Regelfälle angesehen. [26]

Der hier gefundene Ansatz stützt sich - besonders hinsichtlich der Algorithmenauswahl - auf die folgende **Konfigurationshypothese**:

Für jedes reale Bildauswertungsproblem sind relevante Konfigurationsvorgaben $k^ \subset K$ explizit als Bestandteile einer Zielheterarchie symbolisch repräsentierbar, so daß aus deren inkrementeller (lokaler) Verarbeitung als Selektionsbedingungen eine Sequenz von Bildverarbeitungsoperationen $S^* \subset \Theta$ ableitbar ist, die durch eine Anlagenkonfiguration G^* realisierbar ist ($k^* \vdash S^*, G^*$).*

Dem nunmehr zu erläuternden Entwurf liegt die folgende Anwendungsvorstellung zugrunde: hat der Systembenutzer nach dem Login die fallspezifisch relevanten Konfigurationsattribute eingegeben, so ist erforderliches Konfigurationswissen für die erste Ableitung der gesuchten Bildverarbeitungssequenz im Sinne einer Aufgaben- oder Problemspezifikation bekannt. Bei der Gestaltung dieses Akquisitionsprozesses wird zunächst *vereinfachend* angenommen, daß die akquirierbaren Attribute hinreichen, um die gesuchte Konfiguration herzuleiten.

Diese Vorgehensweise soll zu einem ersten Vorschlag führen, der allerdings wegen existenter Wissenslücken in vielen Beratungsfällen revidiert werden muß.

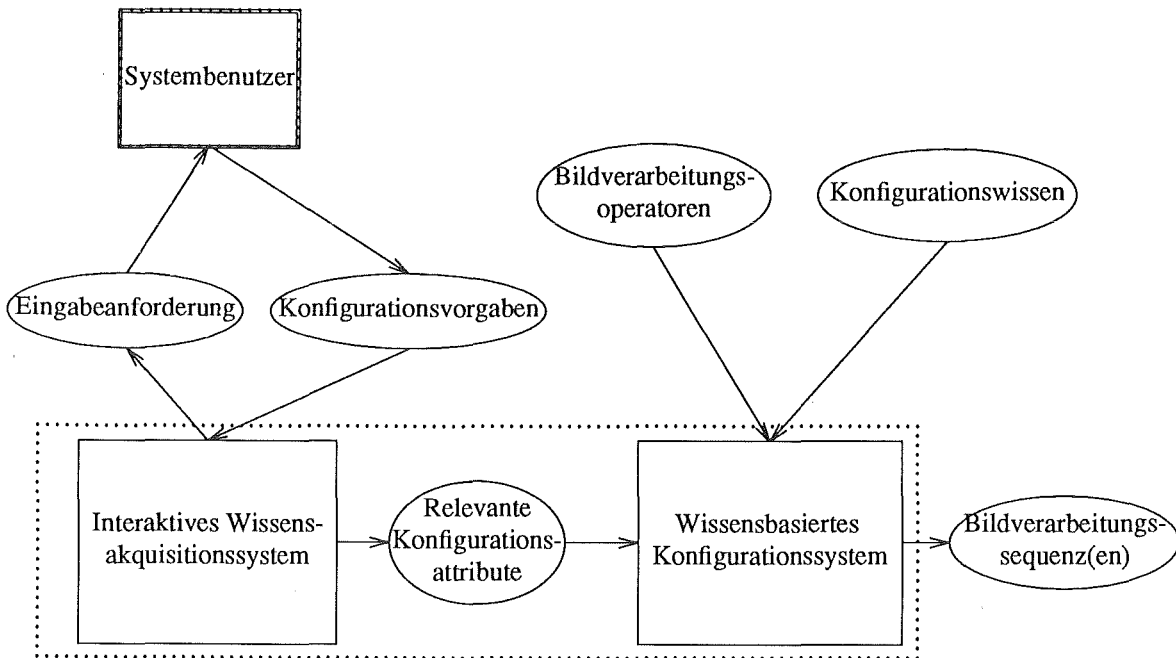


Abb. 3.1-1 : Idealisiertes Datenfluschema eines wissensbasierten Konfigurationssystems.

[26] Das Symbol \vdash stellt die Ableitbarkeitsimplikation dar: $A \vdash B$ bedeutet, daß B aus A ableitbar ist.

Die obige Abbildung 3.1-1 zeigt ein abstraktes Datenflußbild dieser Systemstruktur. Nicht *explizit* angegeben sind in dieser Darstellung die Akquisitionsanforderungen des Konfigurationssystems. Wenn im folgenden zwischen Eingabe- und Akquisitionsanforderungen unterschieden wird, so wird hiermit berücksichtigt, daß sich der Beratungsdialoq nicht nur im Rahmen von Interdependenzen ausdrägen kann, die zwischen Konfigurationsvorgaben existieren, sondern auch (dynamisch) durch vom Problemlöser erzeugte Ableitungsergebnisse fokussierbar ist.

Die fallspezifisch relevanten Konfigurationsvorgaben werden also im Rahmen eines interaktiven Wissensakquisitionsdialoges vom Systembenutzer aufgenommen und an das Konfigurationssystem weitergegeben. Dessen Wissensbasis enthält neben einer Repräsentation der einsetzbaren Bildverarbeitungs-algorithmen vor allem *kon-ditionales* Konfigurationswissen zur Anwendung derselben. Als Ergebnis eines abgeschlossenen Konfigurationslaufes erhält der Systembenutzer eine Ausgabe der möglichen (alternativen) Bildverarbeitungssequenz(en).

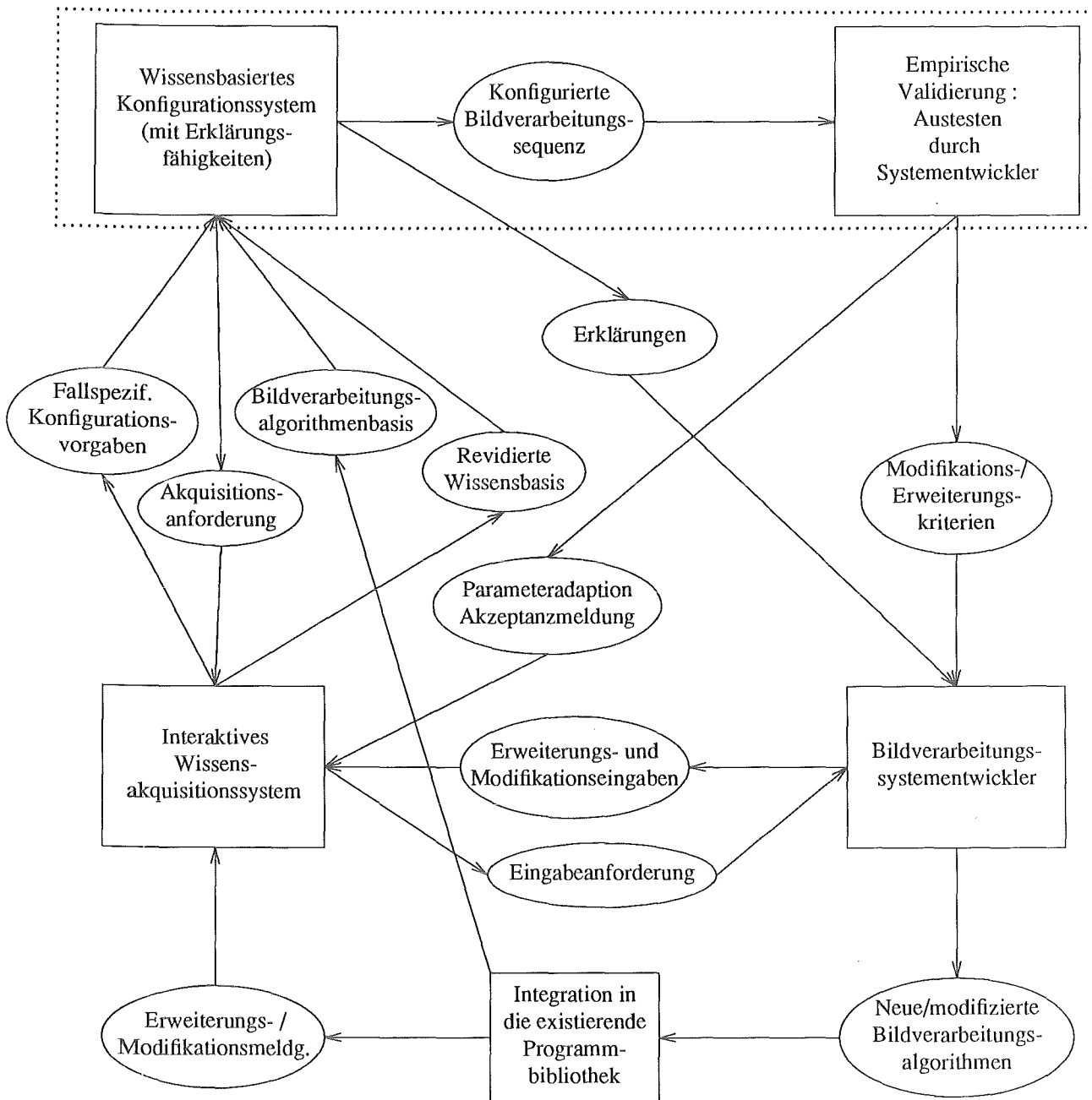


Abb. 3.1-2: Datenflußschema für einen iterativen Konfigurationslauf.

Die Abbildung 3.1-2 zeigt eine erweiterte Datenflußdarstellung des Konfigurations- bzw. Beratungsablaufes, in welchem auch die Erweiterung (und Modifikation) des wissensbasierten Konfigurationssystems aufgenommen wurde.

Die jeweils vorgeschlagene Bildverarbeitungssequenz wird zunächst vom Systementwickler experimentell überprüft und getestet. Besitzt das wissensbasierte Konfigurationssystem für einen Anwendungsfall eine hohe Beratungskompetenz, so ist es möglich, daß der empirische Validierungsprozeß direkt erfolgreich terminiert und der Systementwickler sein low level Verarbeitungsmodul unmittelbar dokumentieren kann. Dieser, nicht zu einer Systemerweiterung bzw. -modifikation führende seltene Fall schließt mit einer Akzeptanzmeldung (z.B. in Form einer dokumentationswürdigen prototypischen Version) ab.

Vielfach wird die empirische Validierung der generierten Bildverarbeitungssequenz auf Modifikationserfordernisse führen, d.h. der Systementwickler wird gezwungen sein, nicht nur eine Parameteradaptation vorzunehmen, sondern auch die vom Konfigurationssystem ausgegebene Bildverarbeitungssequenz abzuändern. Um dieses experimentelle Konfigurationswissen reproduzierbar zu machen, übermittelt der Systementwickler seine Änderungsergebnisse interaktiv dem Wissensakquisitionssystem. Wesentlich hierbei ist, daß die Erweiterungs- und Modifikationseingaben *konditional* erfolgen. [27] Das heißt, die als gültig erkannten Änderungsbedingungen müssen so eingegeben werden, daß die *Bedingungen und Restriktionen*, die zu der modifizierten Bildverarbeitungssequenz führten, nach der Revision der Wissensbasis verarbeitet werden, und die Assimilation des gerade experimentell gewonnenen Konfigurationswissens dadurch sichtbar wird, daß der wissensbasierte Konfigurationslauf nun mit der Ausgabe einer Bildverarbeitungsfolge, für die eine Akzeptanzmeldung gegeben werden kann, abschließt.

Gelingt es nicht, eine vorhandene Bildverarbeitungsalgorithmenbibliothek durch entsprechende Parametereinstellungen und Reihenfolgeanpassungen erfolgreich zur gewünschten vollständigen oder teilweisen Lösung eines Bildauswertungsproblems zu nutzen, so muß der Systementwickler die Programmbibliothek entsprechend erweitern bzw. vorhandene Routinen abändern und für diese - wie soeben erwähnt - auch eine entsprechende Modifikation der Wissensbasis des Konfigurationssystems durchführen.

Mit der nunmehr vorgestellten Struktur eines Konfigurationssystems- und -prozesses wurde ein Datenfluß bzw. Wissenstransfer diskutiert, ohne zu hinterfragen, mit welcher Qualität die Konfigurationsexpertise denn tatsächlich auch praktisch akquirierbar ist. Diese Frage, die angesichts der Möglichkeiten heutiger graphik- und menügestützter Editiertechniken von Systementwicklern vielfach leider nicht im vollen Umfang problematisiert wird, ist nur eingeschränkt positiv zu beantworten. Tatsächlich ist das Wissensakquisitionsproblem heute mit den bekannten Techniken nur wenig befriedigend zu bewältigen. [28] Die Erfahrung von namhaften KI-Forschern dokumentiert: sogenannte Bereichsexperten ‚vergessen‘ vielfach, ihnen selbstverständliches Fachwissen wie auch wichtige Faktoren zu explizieren, sie verarbeiten dieses zu Teilen darüber hinaus ‚unbewußt‘, und können - was speziell auch für den visuellen Bereich gilt - Wahrnehmungen häufig unbefriedigend Verbalisieren [Pup 88]. Oft bereitet es den Bereichsexperten Schwierigkeiten, ihre Problemlösetechniken zu erläutern und zu begründen; aus der psychologischen Forschung ist darüber hinaus bekannt, daß Personen - auch dann wenn diese entsprechend motiviert sind - ihr Denken und Handeln im Nachhinein oftmals nicht korrekt wiedergeben können (verzerrte Selbstwahrnehmung) [EnMo 88].

Hieraus ergibt sich die ‚mindestens‘ Notwendigkeit, den ohnehin bereits problematischen Wissenserwerb durch geeignete Modifikations- und Erweiterungstechniken flexibel zu unterstützen.

[27] Ein Beispiel für eine derartige Modifikation zeigt die Dokumentation von Bürg [Bür 88]. Der von Bürg verarbeitete Deutsch-Operator besitzt die gleiche Funktionalität wie die entsprechende SPIDER-Routine THNG3, wurde aber aus Laufzeitgründen umgeschrieben.

[28] Vgl. hierzu auch den Artikel von C. Lischka (1987): ‚Über die Blindheit des Wissensingenieurs.....‘ in: Künstliche Intelligenz 4, S. 15-20.

Natürlich soll hier keineswegs übersehen werden, daß die neueren Vertreter der psycholinguistischen Forschungslinie die Verbalisierungsproblematik realitätsnah analysiert haben, und auch neue Ansätze zur Wissensrepräsentation vorlegten [Wac 89]. Doch liegen bislang hierzu noch keine ausgereiften Systemanwendungen vor.

Hinsichtlich der Realisierung des mit den obigen Abbildungen 3.1-1 und 3.1-2 dargestellten Entwurfes lassen sich mindestens die folgenden Anforderungen zusammenfassen: da nur ein Bildverarbeitungsexperte über das Konfigurationswissen verfügt, muß er mittels eines geeigneten *Akquisitionseditors* selbst in die Lage versetzt werden, die Wissensbasis aufzubauen, zu erweitern und zu verfeinern. Die von dem Konfigurationssystem für eine bestimmte Bildauswertungsproblematik hergeleitete Bildauswertungsfolge sollte *mit Systemunterstützung* änderbar sein. Diesbezüglich ist der Erklärungskomponente eine nicht zu unterschätzende Bedeutung beizumessen [Popp 88]. Die Erklärungen sollten über den Trace hinausgehen, dem Systementwickler also neben Ablaufinformationen auch domänenspezifische Erklärungen liefern [Hub 88]. Das System sollte portierbar und anwendungsunabhängig sein. Für die Erweiterungs- und Manipulationsmöglichkeiten sollte eine flexible Repräsentation bestimmt werden, welche bezüglich der Operatorenauswahl wie auch der Verarbeitungssequenz leicht Verallgemeinerungen und Spezialisierungen zuläßt.

Der Leser beachte, daß der oben dargestellte Datenfluß auch berücksichtigt, daß *bei der Entwicklung des Interpretationsmodules* nach einer (versionsspezifischen) Akzeptanzmeldung erkannte *Ergänzungen und Korrekturen* der Bildverarbeitungssequenz inkrementell berücksichtigt werden können: der Systementwickler hat die Möglichkeit, den Konfigurationslauf z.B. durch die Eingabe von zusätzlichen Konfigurationsvorgaben abzuwandeln, außerdem kann er die Ableitungsbedingungen für die Operatorenfolge ändern.

Die Umsetzung dieses Konfigurationsansatzes in eine ‚Rapid Prototyping‘-Vorgabe führt auf zwei Hauptaufgaben:

- Festlegen einer Wissensrepräsentation für die Bildverarbeitungsoperatoren und das Konfigurationswissen.
- Ermitteln einer Ablaufsteuerung für den Konfigurationsprozeß bzw. die eigentliche Wissensverarbeitung.

Auf diese wird nun eingegangen.

3.2 Wissensrepräsentation

Für die Konfiguration von Bildverarbeitungssequenzen muß das erforderliche Wissen zweckmäßig repräsentiert werden. Zum einen muß bestimmt werden, in welcher Weise die existenten *Bildverarbeitungsalgorithmen* dem Wissensverarbeitungssystem bekannt gemacht werden, zum anderen muß das *Konfigurationswissen* flexibel hierauf anwendbar sein. Nicht zuletzt ist zu klären, in welcher Weise die fallspezifischen *Konfigurationsvorgaben* für den Konfigurationsprozeß vom Benutzer zu erfragen sind.

3.2.1 Bildverarbeitungsalgorithmenbasis

Eine wertvolle Basis für den Aufbau der Bildverarbeitungsoperatorenbibliothek ist das von TAMURA verfaßte SPIDER Manual (Subroutine Package for Image Data Enhancement and Recognition), welches etwa 400 Bildverarbeitungs-routinen enthält [Tam 83]. Welche Repräsentation ist für die Bildverarbeitungsprozeduren als sinnvoll anzusehen ?

Die Bildverarbeitungsprozeduren lassen sich vorteilhaft in einer Framestruktur repräsentieren, welche eine lokale Ausnutzung von Vererbungsrelationen für die Argumentlisten ermöglicht. Für die zweckmäßige Gliederung der Bildverarbeitungsoperatorenbibliothek bietet sich der Klassifizierungsvorschlag von TAMURA an [Tam 83].

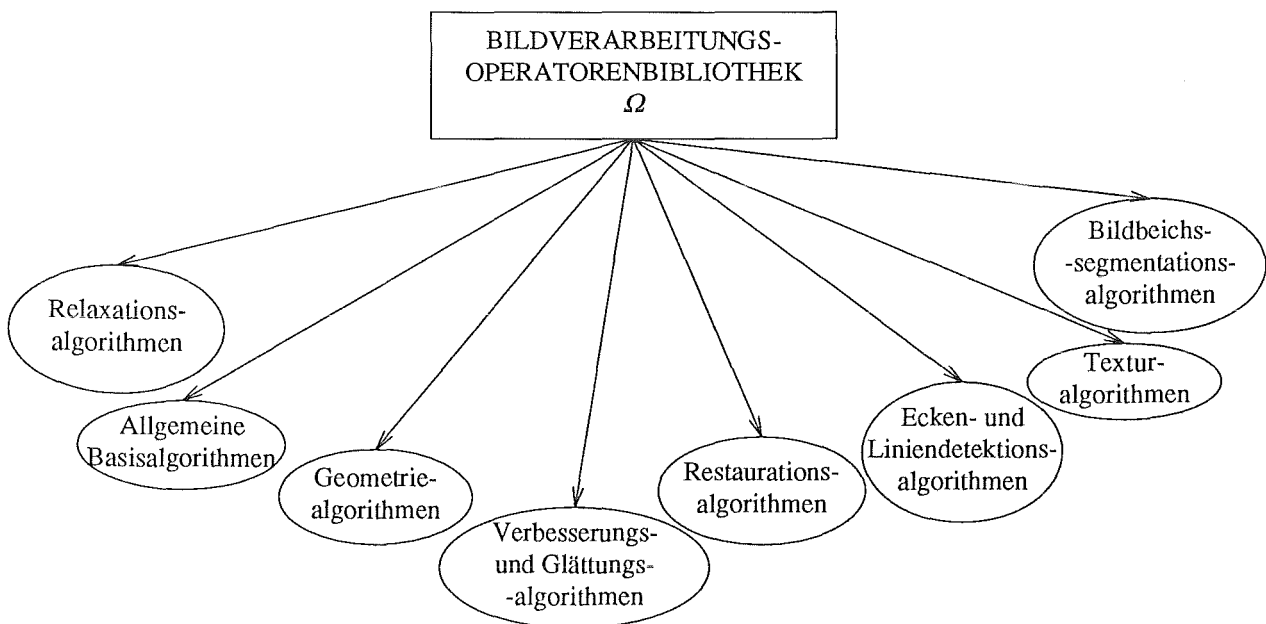


Abb. 3.2.1-1 : SPIDER-Klassifizierung von Bildverarbeitungsalgorithmen nach Tamura.

Ein Beispiel für eine SPIDER-orientierte Klassifizierung von Bildverarbeitungsoperatoren zeigt Abb. 3.2.1-2 für die Kategorie der Skelettierungsalgorithmen. [29]

Die Skelettierungsoperatoren sind der SPIDER-Verarbeitungs-kategorie 'Geometriealgorithmen' zugeordnet. Ein Auswahlkriterium für einen Skelettierungsoperator ist das zu verarbeitende Bild: Skelettierungsoperatoren für Binärbilder unterscheiden sich von denen für eine Grauwertbildskelettierung. Ein weiteres Kriterium ist die sequentielle bzw. parallele Arbeitsweise des Algorithmus; wie man der Abb. 3.2.1-2 entnehmen kann, existiert im SPIDER-Paket kein rein parallel arbeitender Algorithmus für das Grauwertbildskelettieren. Darüber hinaus muß bei der Bestimmung des geeigneten Operators entschieden werden, ob dieser eine 4er oder eine 8er Nachbarschaft verarbeitet.

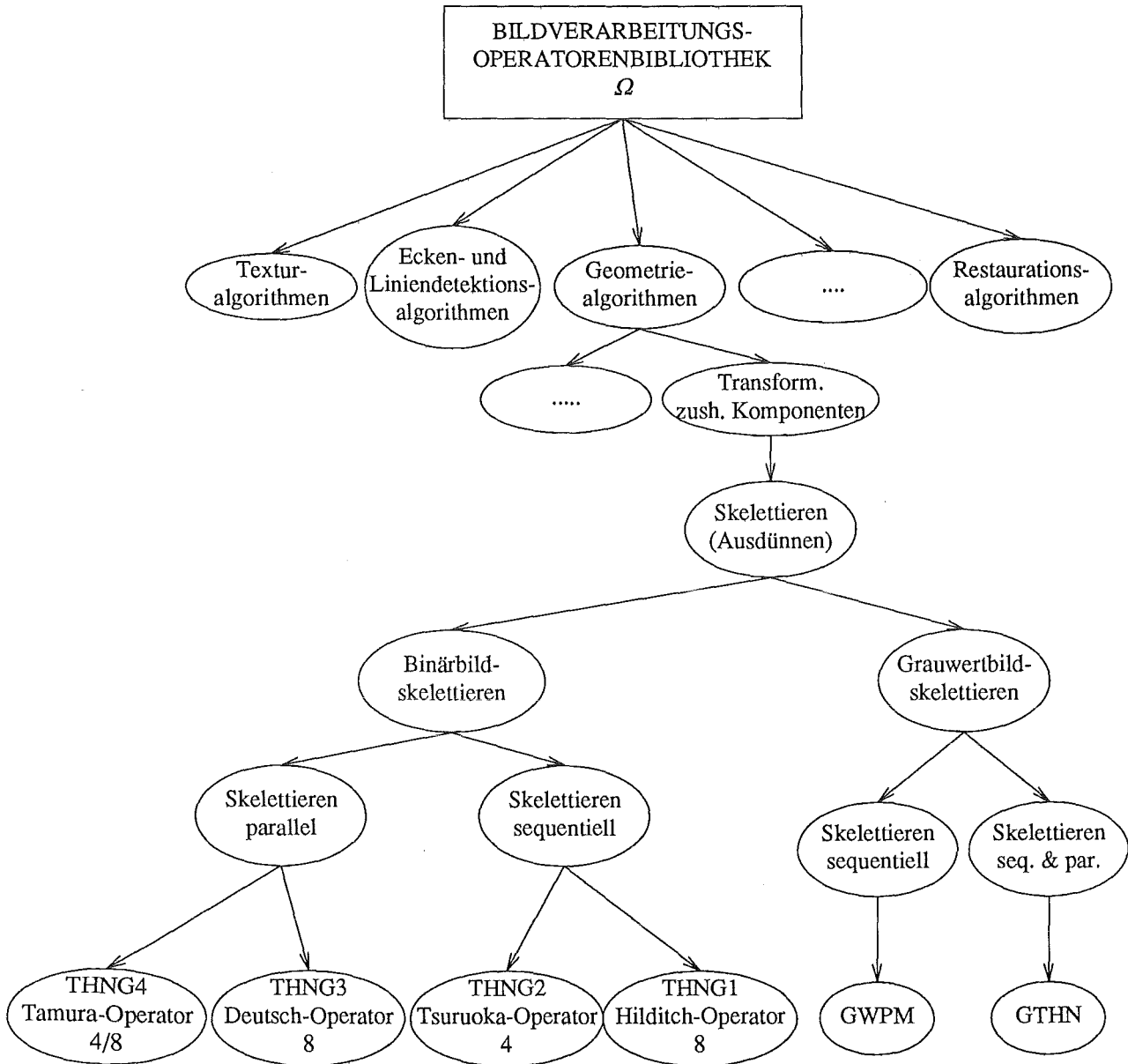


Abb. 3.2.1-2 : Beispiel einer SPIDER-orientierten Gliederung von Skelettierungsoperatoren.

[29] Vgl. SPIDER-Handbuch [Tam 83], S. II-55

Diese Gliederung basiert, wie man sieht, auf rein technischen Kriterien. Sie läßt sich z.B. durch Kriterien wie ‚Implementierungssprache: C, FORTRAN etc.‘ erweitern und detaillieren. Wesentlich ist, das diesbezüglich rein *technisch-funktionale* Klassifizierungskriterien zugrunde gelegt werden können, ohne die Nützlichkeit für konkrete Aufgabenkontexte einzubeziehen. Eine Kriterium wie ‚Implementierungssprache‘ ist *selektions- und sequenzneutral* in dem Sinne, daß es keinerlei direkten Restriktionen hinsichtlich der problemspezifischen Auswahl und Verarbeitungssequenz des betreffenden Operators für ein Bildauswertungsproblem darstellt. Ein selektions- und sequenzneutrales Kriterium gibt nicht direkt preis, ob ein Bildverarbeitungsalgorithmus für eine konkrete Aufgabe relevant ist oder nicht.

Genau diese Kriterien sind aber erforderlich, wenn man anwendungsbezogenen Bildverarbeitungssequenzen ableiten will. Um die Verwertbarkeit für spezifische Aufgaben zu repräsentieren, bedarf es also noch weiterer Konstrukte. Diese lassen sich aus den Eigenschaften von Bildverarbeitungsfolgen ableiten.

Gegeben sei eine z -elementige Menge von Bildverarbeitungsalgorithmen Ω [30] entsprechend Abschnitt 3.1, wobei ω_i ($i \in \mathbb{N}$) eine spezielle Bildverarbeitungsroutine aus Ω bezeichne, die als ω_t an t -ter Stelle einer Verarbeitungssequenz $S^\sigma := \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_t, \dots, \omega_n; n \in \mathbb{N}\} \in \Theta$ aktiviert werde. Betrachtet man nun zwei leistungsfähige Bildverarbeitungssequenzen $\{S^\sigma, S^\delta\} \subset \Theta$, die für *unterschiedliche* Auswertungsprobleme aus Ω -Algorithmen konfigurierbar sind, so zeigt ein Vergleich der Bildverarbeitungssequenz S^σ mit beliebigen anderen, durch den Index δ gekennzeichneten Sequenzen $S^\delta \subset \Theta$, daß für einen diskreten Bildverarbeitungsoperator $\omega_t \in \Omega$ *kein eindeutiger Reihenfolgeindex t* für S^σ und S^δ existiert, wenn dieselbe Routine sowohl in S^σ wie auch in S^δ auftritt, *denn dieser ist eben problemabhängig*.

Da für einen diskreten Bildverarbeitungsalgorithmus *immer* gleichbleibende technisch-funktionale Kriterien gelten, folgt hieraus, daß man diese zwar als *notwendige* Bedingungen repräsentieren muß, hierüber aber keine *hinreichende* Bestimmung der Bildverarbeitungsfolge erhält. Es ist erforderlich, für die Ableitung der Bildverarbeitungsfolge *explizites Konfigurationskonzeptwissen* zu repräsentieren.

Anschaulich bedeutet dies, daß man beispielsweise einen Skelettierungsalgorithmus nicht ausschließlich *einer* Verarbeitungsphase (z.B. der Segmentierung) zuordnen kann: seine Nützlichkeit ist *problemabhängig* und nicht an eine bestimmte Verarbeitungsphase geknüpft.

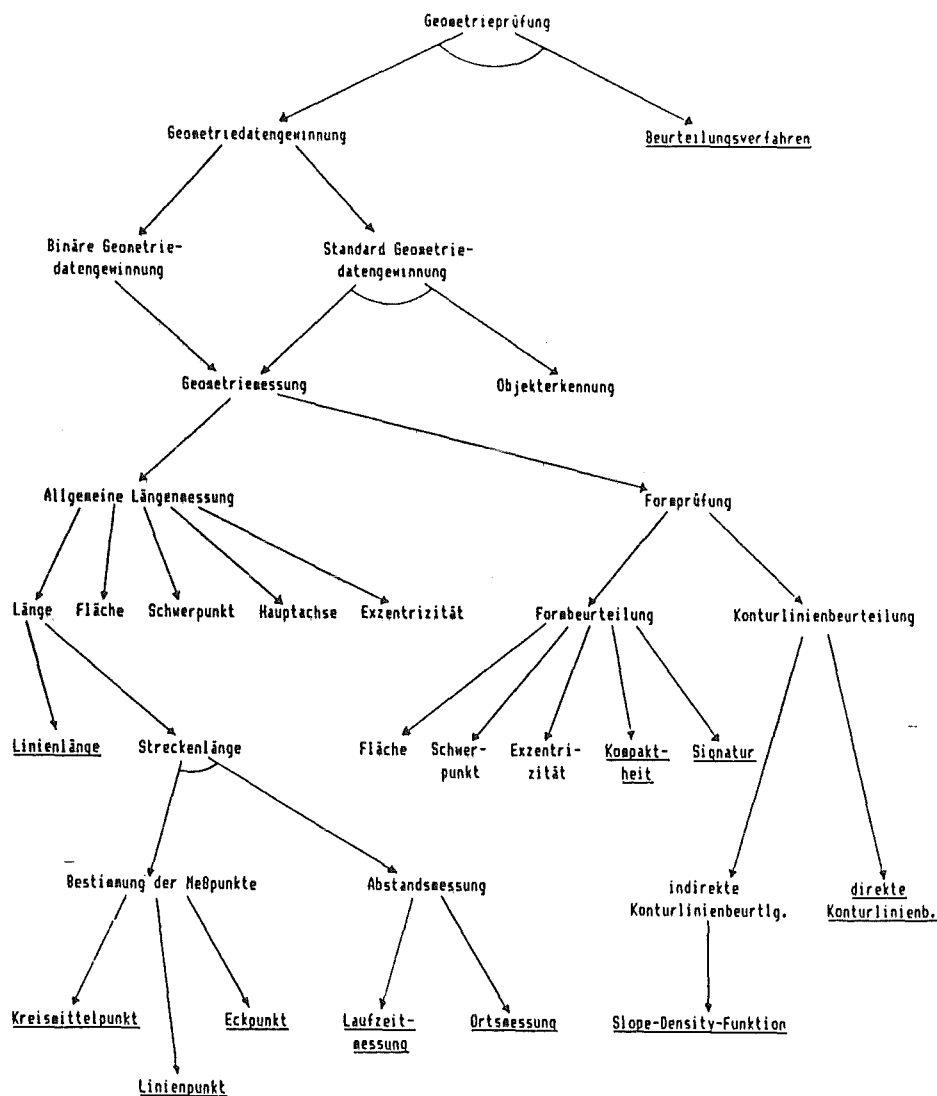
[30] Entsprechend den vorgenommenen Lösch- oder Erweiterungsoperationen verkleinert bzw. vergrößert sich z ; z ist variabel.

3.2.2 Algorithmenkonfigurationswissen

Das Konfigurationswissen lässt sich in Form eines *Methodengraphen* abbilden. Ein Methodengraph stellt zweckbezogen allgemeine Abhängigkeiten von Bildverarbeitungsschritten in Form eines hierarchischen Und-/Oder-Graphen dar und ermöglicht eine Zuordnung der Bildverarbeitungsalgorithmen einer Verarbeitungsklasse zu Verarbeitungszielen. Die Bildverarbeitungssequenz für die Verwirklichung eines abstrakten (Teil-)Zieles einer Bildverarbeitungsgrundklasse leitet sich aus einem Methodengraphen *direkt* ab, indem man die von diesem Verarbeitungsziel ausgehenden Kanten top-down entlanggeht. Jedes Verarbeitungsziel ist in Teilziele untergliedert, die entweder in Form einer Konjunktion oder einer Disjunktion verknüpft sind. Zu den übergeordneten abstrakten Verarbeitungszielen werden in einer untergeordneten Abstraktionsstufe entweder weitere abstrakte Verarbeitungsziele oder *methodisch unmittelbar* realisierbare Teilziele angeführt.

Die folgende Abbildung stellt beispielhaft einen Ausschnitt aus einem Methodengraphen für die Verarbeitungskategorie 'Geometrieprüfung' dar [Neu 86].

Abb. 3.2.2-1: Beispiel für einen Methodengraphen (Ausschnitt).



Betrachtet man die Gliederung des Zweiges "Allg. Längenmessung", so findet sich hier eine Unterscheidung in Linien- und Streckenlänge. [31] Wie man dieser Methodengliederung entnehmen kann, erfordert die Berechnung der Streckenlänge eine Realisierung der beiden Verarbeitungsziele "Abstandsmessung" und "Bestimmung der Messpunkte". Für die Ermittlung der Streckenlänge muß demnach sowohl eine Art der Abstandsmessung als auch eine Art der Meßpunktbestimmung vorgegeben werden. Die Ermittlung einer Eckpunktdistanz mittels einer Ortsmessung ist nur eine Möglichkeit. Während die Pfeile von dem Verarbeitungsziel "Streckenlänge bestimmen" durch eine Und-Verknüpfung gekennzeichnet sind, enthalten die Konkretisierungen dieser abstrakten Bildverarbeitungsschritte *alternative Methoden*. Dies ist auch der Grund, weshalb die Gliederung hier abbricht, denn es existieren keine Verweise auf Teilziele mehr, weil diese Methoden *konkret* sind und sich direkt zur Zielrealisierung anwenden lassen (was durch Unterstreichen gekennzeichnet wurde). Für das Verarbeitungsziel 'Objekterkennung' gilt das nicht.

Die Umsetzung eines in weiten Teilen zwar hierarchischen, aber grundsätzlich *heterarchisch* strukturierten Methodengraphen in eine rechnerinterne Darstellung bietet Vorteile:

- Ordnet man den (abstrakten und konkreten) Methoden des Graphen *Selektionsbedingungen* zu, so kann man hierauf unmittelbar eine Tiefensuche aufbauen: eine Methode wird dann anwendbar, wenn die ihr zugeordneten Bedingungen gültig sind. Ist eine geforderte Methodenbedingung nicht erfüllt, so wird die ,darunter' liegende Konkretisierung nicht weiter verfolgt. Eine entsprechende Verfeinerung ist nur zulässig, wenn alle Methodenbedingungen gelten. Diese top-down Ableitung kann auch Backtracking-Steps enthalten. Sie endet, wenn die realen Methoden des bottom-levels selektiert sind.
- Man kann die vom Benutzer erfragten *Konfigurationsvorgaben* größtenteils unmittelbar als Selektionskriterien für die Methodenauswahl nutzen. Dies läßt sich anschaulich am obigen Graph 'Geometrieprüfung' erläutern: erfragt das Wissensakquisitionssystem, ob z.B. eine Formprüfung vorgenommen werden soll, so kann die eingegebene Ja/Nein-Antwort direkt als Konfigurationsvorgabe verarbeitet werden. Antwortet der Benutzer mit Ja, so erfragt das Akquisitionssystem weiter, ob eine Form- oder eine Konturlinienbeurteilung gewünscht ist etc. Dies gilt nicht allein für die abstrakte Repräsentationsebene, sondern auch für den Bereich der technischen Kriterien (Selektion konkreter Operatoren).
- Eine hierarchische Repräsentation unterstützt - unabhängig von Vererbungskonzepten für Attribute und Methoden - prinzipiell eine *leichte Erweiterbarkeit*. Insbesondere lassen sich Änderungen und Erweiterungen des Methodengraphen weitgehend lokal ausführen, ohne existierende Ableitungswege zu modifizieren. Beispielsweise kann eine Erweiterung der Formbeurteilungsmethoden vorgenommen werden, ohne die existierenden Elemente zu korrigieren. Betrachtet man ein hierarchisches Element des Und-/Oder-Baumes als Methodenklasse, so bieten sich relativ aufwandsarme Möglichkeiten, allgemeinere Methoden als abstraktere Oberklassen bzw. Spezialisierungen als Unterklassen einzubetten und an generische Mechanismen zu binden. Hierarchien lassen sich im Bereich der technischen Kriterien wie auch im Bereich des Konfigurationskonzeptwissens nahezu beliebig verfeinern und verallgemeinern.

Die umseitige Abb. 3.2.2-2 zeigt das Erweiterungsprinzip am Beispiel des Deutsch-Operators, der von BÜRG in einer laufzeitoptimierte Version reimplementiert wurde: es wird eine ,neue' Klasse eingeführt. Im Falle der hier ausgeführten Spezialisierung subsumiert man die Routine THNG3 dann hierunter, die von BÜRG erstellte Version (Deutsch-Bürg-Operator) ebenfalls. In beiden Fällen handelt es sich funktional um Deutsch-Algorithmen; allerdings gilt für die neue Version das Konfigurationskriterium 'Laufzeitoptimierte Version'.

Die Einführung von abstrakten Methoden verläuft analog: die Basisoperation ist auch hier die Einführung einer neuen Klasse [TKP 89].

[31] Eine Linie sei definiert als *beliebige* Verbindung zwischen zwei Punkten.
Eine Strecke sei definiert als *kürzeste* Verbindung zwischen zwei Punkten.

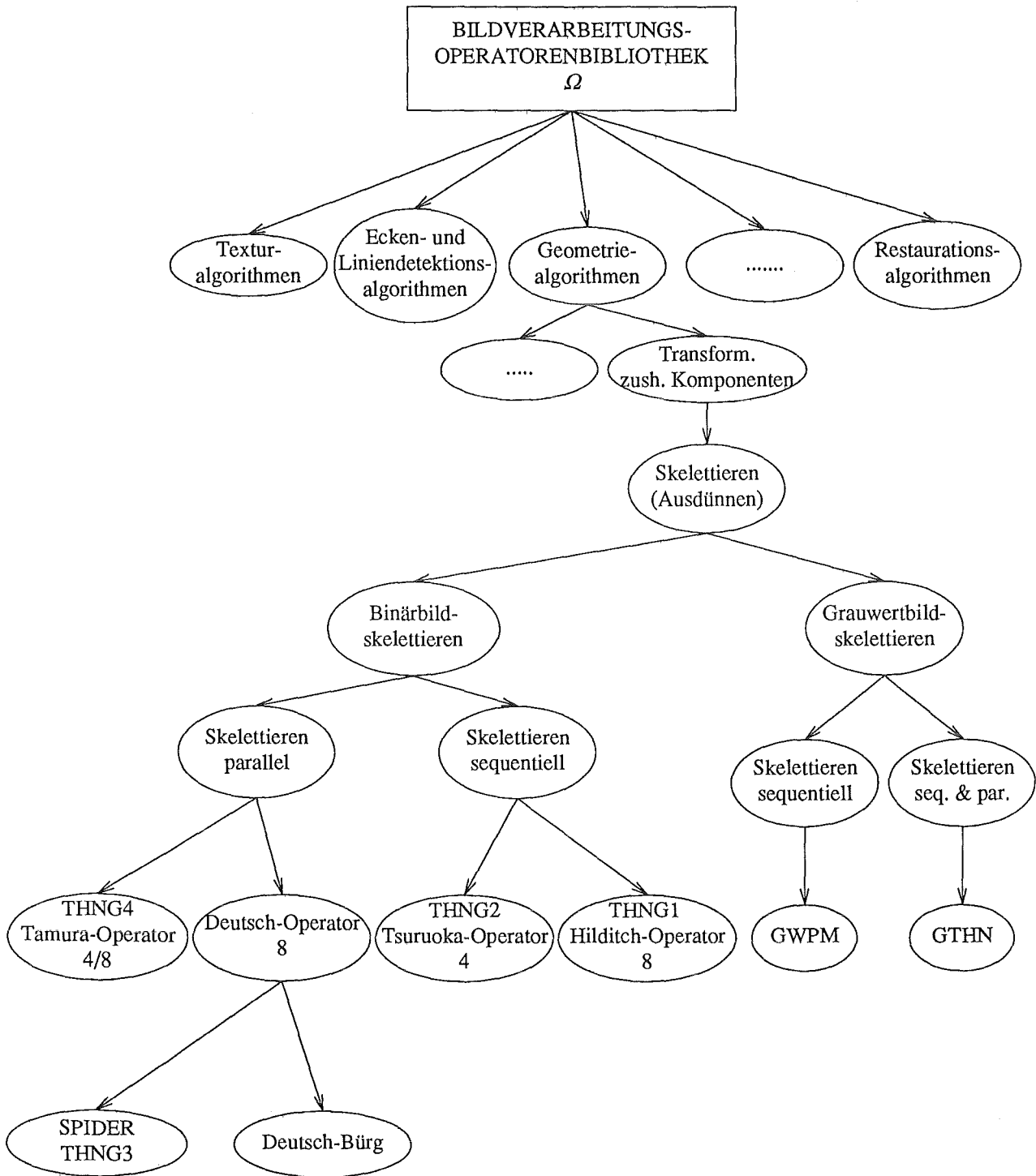


Abb. 3.2.2-2: Erweiterungsbeispiel für die Verarbeitungskategorie ‚Ausdünnen‘.

Eine *zweckmäßige* Darstellung des Methodengraphen läßt sich mit dem nun einzuführenden *generischen Methodenframe* verwirklichen [Sys 86]. Dieses soll die Repräsentation der konkreten Bildverarbeitungsoperatoren wie auch der abstrakten Verarbeitungsziele aufnehmen. Es besteht aus drei *deklarativen* Teilen: einem Basisteil, einem Restriktionsteil und einem Aktionsteil und hat den folgenden *Aufbau*:

Beispiel für ein konkretes Methodenframe:

Basisteil:

[*Methodenname*] Deutsch-Bürg-Operator
[*Funktionsbeschreibung*] Skelettiert Binärbilder parallel in 8er Nachbarschaft laufzeitoptimiert.
[*Methodenklasse*] R-Methode
[*Methodenbestandteile*] ()
[*Alternativen*] THNG3

Restriktionsteil:

[*Systembedingungen*] ()
[*Konfigurationsbedingungen*] (8er-Nachbarschaft laufzeitoptimierter-Algorithmus)

Aktionsteil:

[*Propagationsbedingungen*] ()

Dieses Methodenframe ist das Grundelement des Repräsentations- und -verarbeitungsansatzes: es bietet die Möglichkeit zur Anwendung *generischer Akquisitions- und Ablaufsteuerungsfunktionen*.

Die Slots des *Basisteiles* haben die folgende Bedeutung: Der *Methodenname* bezeichnet das Frame; hier stünde also im Falle des Tamura-Algorithmus "Tamura-Operator". Der zweite Slot des Methodenframes enthält eine knappe *Funktionsbeschreibung* (z.B. "Paralleler Binärbildskelettierungsoperator für 4/8er Nachbarschaft").

Als weiteres Repräsentationselement ist die *Methodenklasse* aufzunehmen. Eine Klassenkennung ist eine wichtige Ausgangsinformation für die Ablaufsteuerung. Denn diese muß zwischen drei Grundfällen differenzieren: A-Methoden, T-Methoden und R-Methoden. Unter R-Methoden werden solche subsumiert, die konkrete Operationen repräsentieren. In diesem Sinne stellt auch der Tamura-Operator eine R-Methode dar, was nicht zuletzt dadurch zum Ausdruck kommt, daß keine weitere Untergliederung der Tamura-Operation existiert: es handelt sich ja um eine elementare Realisierungsmethode.

Als A-Methoden werden Elemente des Methodengraphen angesehen, die mehrere Alternativen als ‚Spezialisierungsblätter‘ aufweisen. Hierbei handelt es sich um Elemente eines Oder-Zweiges. Im obigen Methodengraphen ‚Geometrieprüfung‘ stellt ‚Formprüfung‘ eine A-Methode dar. Die dritte Methodenart sind T-Methoden. Als T-Methoden werden in Teilmethoden gliederbare Elemente eines Methodenbaumes angesehen. Die in der Abb. 3.2.1-2 dargestellten Skelettierungsoperatoren des SPIDER-Paketes sind keine T-Methoden, sondern R-Methoden. Ihre abstrakten Vertreter ("Binärbildskelettieren"; "Grauwertbildskelettieren") stellen A-Methoden dar. Unter Teilmethoden werden typischerweise Blätter eines Und-Zweiges subsumiert; Teilmethoden können nicht isoliert verarbeitet werden. Im obigen Graphen ‚Geometrieprüfung‘ stellt "Streckenlänge (bestimmen)" eine abstrakte Methode dar, die aus zwei Teilmethoden besteht: nämlich "Bestimmung der Meßpunkte" und "Abstandsmessung".

Die Elemente einer T-Methode werden Bestandteile genannt und in *aufsteigender* Folge im generischen Slot *Methodenbestandteile* aufgeführt. Die T-Methode "Streckenlänge (bestimmen)" müßte hier dementsprechend die Lisp-Liste (Bestimmung-der-Meßpunkte Abstandsmessung) enthalten.

Der generische Slot *Alternativen* listet die Ausprägungen der A-Methoden. Im Falle der Methode "Abstandsmessung" wären hier die Listenelemente (Laufzeitmessung Ortsmessung) aufzunehmen.

Weil das im Basisteil des Methodenframes repräsentierte Wissen keine Rückschlüsse hinsichtlich der Anwendbarkeit erlaubt, muß das generische Methodenframe um einen *Restriktionsteil* erweitert werden, der die *intern* abgeleitete System- und *extern* akquirierte Konfigurationsbedingungen enthält, die bei einer Selektion auf Gültigkeit zu prüfen sind. Eine Bildverarbeitungsroutine wird dann anwendbar, wenn die hierfür geltenden Konfigurationsbedingungen vorliegen.

Die ‚internen‘ *Systembedingungen* des Restriktionsteiles enthalten vor allem Schnittstellenanforderungen: die Einbettung eines Algorithmus in eine Verarbeitungsfolge zwingt zur Beachtung von Ein- und Ausgabedatenkonventionen. Diese Systembedingungen werden durch die *Propagationsfunktionen* gesetzt, welche auf die *Propagationsbedingungen* zugreifen. Im Unterschied zu *intern verwalteten* Systembedingungen sind im Slot *Konfigurationsbedingungen* die vom Systembenutzer erfragten Vorgaben - also externe Kriterien - abzuspeichern. Sind die externen Konfigurationsbedingungen wie die internen Systembedingungen gültig, so kann die Methode in die konfigurierte Sequenz einbezogen werden. Ist eine geforderte Bedingung nicht erfüllt, so wird die Methode an dieser Stelle ‚abgelehnt‘.

Im *Aktionsteil* des Methodenframes sind einzelne *Propagationsbedingungen* gespeichert, welche im Zuge der Wissensverarbeitung *lokal* aufgebaut werden.

Definition eines generischen Methodenframes für Bildverarbeitungsalgorithmen

Basisteil:

<i>[Methodenname]</i>	< Symbolische Bezeichnung des Algorithmus >
<i>[Funktionsbeschreibung]</i>	< Kurzbeschreibung der Funktionalität des Operators >
<i>[Methodenklasse]</i>	<Symbolische Zuordnung/Angabe der Methodenklasse : {A-Methode, R-Methode, T-Methode} >
<i>[Methodenbestandteile]</i>	< Liste von ‚Methodennamen‘ eines T-Algorithmus >
<i>[Alternativen]</i>	< Liste der ‚Methodennamen‘ von Alternativalgorithmen >

Restriktionsteil:

<i>[Systembedingungen]</i>	< Liste von (bildmaterialneutralen) Implementierungsrestriktionen >
<i>[Konfigurationsbedingungen]</i>	< Liste der Konfigurationsbedingungen >

Aktionsteil:

<i>[Propagationsbedingungen]</i>	< Liste der Propagationsbedingungen >
----------------------------------	---------------------------------------

Mit dieser Definition eines generischen Methodenframes wurde ein *objektorientierter Implementierungsansatz* umrissen, der in einer entsprechenden Entwicklungsumgebung realisiert werden kann. [32] Vor einer endgültigen Entscheidung für den Einsatz eines Softwarewerkzeuges sollte berücksichtigt werden, daß die Verfügbarkeit sogenannter *Lisp-Chips mit CLOS (Common Lisp-Objekt-Oriented-Programming)* auf Workstations (u.a. SUN-Rechnern) mittlerweile eine direkte Portierung des im Rahmen explorativen Prototypings auf einer Lisp-Maschine erzeugten Codes ermöglicht [Kee 89].

[32] Eine direkte Möglichkeit hierzu bietet die IDT-eigene Lisp-Maschine Symbolics 3650. Eine *portable* Werkzeuglösung ermöglicht KEE 3.0 von IntelliCorp.

Zur regelorientierten Repräsentation

Der soeben vorgestellte Repräsentationsansatz ist *objektorientiert*. Liegt es aber nicht auf der Hand, eine regelorientierte Wissensrepräsentation für das *Konfigurationswissen* zu wählen ?

Natürlich ist ein regelbasierter Ansatz ebenfalls umsetzbar; dies zeigt bereits die OPS 5-Implementierung von XRAY. Außerdem existieren interessante Arbeiten, die einen regelbezogenen Wissensverarbeitungsansatz für *spezielle* Konfigurationsprobleme nutzen. Zu erwähnen sind in diesem Zusammenhang die Arbeiten von NAZIF und LEVINE sowie von ENDER.

NAZIF und LEVINE zeigten, daß sich Produktionsregeln vorteilhaft für die Verarbeitung von Segmentationsheuristiken anwenden lassen [NaLe 84]. Diese Problematik, die insbesondere auch für die Weiterverarbeitung von low level Ergebnissen in high level Interpretationsmodulen wichtig ist, konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht tiefergehend analysiert werden: die Schnittstellenabklärung zwischen der ‚low level‘ und der ‚high level‘ Bildauswertung ist relativ diffizil.

ENDER fand ebenfalls, daß sich die Verarbeitung von Regeln vorteilhaft für eine spezielle Konfigurationsproblematik nutzen läßt. Ausgehend von einem festen Satz von Bildverarbeitungsoperatoren demonstrierte er für eine Klasse von Werkstücken mit analytisch einfach beschreibbarer Geometrie, wie auch bei stark variierender Bildqualität eine Parameteradaptation automatisch durchführbar ist [End 87].

Man kann die Systeme von NAZIF und LEVINE und von ENDER als Komponenten einordnen, die bei einem weiteren Ausbau der oben skizzierten Architektur (Abb. 3.1-2) zu integrieren wären, denn diesbezüglich wurden keine Detaillierungen angegeben. Tatsächlich lassen sich heuristische Segmentations- und Parameteradaptationsverfahren als Weiterentwicklung des wissensbasierten Konfigurationsmoduls auffassen, und zwar in der Weise, daß die in Abb. 3.1-2 angegebene empirische Validierung durch den experimentierenden Systementwickler abgekürzt wird. Insofern ist der hier diskutierte Konfigurationslauf als offene Systemlösung einzuordnen.

Ein Verständnis für die Präferenzen eines objektorientierten Repräsentationskonzeptes läßt sich ableiten, wenn man die Anwendung eines regelorientierten Repräsentationsansatzes mit einer objektorientierten Lösung vergleicht.

Hierzu betrachte man zunächst die Wissensakquisitionskomponente, vor allem die Fähigkeiten des Akquisitionseeditors. Sind die generischen Funktionen (Methoden) des objektorientierten Systems einmal implementiert, so erfolgt die Wissensakquisition nahezu vollständig durch die Anwendung eines Frameeditors (Funktionen zur Eingabe von Vererbungsrelationen seien dem Frameeditor zugeordnet).

Verfolgt man dagegen eine Lösung, in welcher die Bildverarbeitungsalgorithmen in Frames, und das Konfigurationswissen in Regeln aufgenommen wird, so benötigt man zum Aufbau und zur Pflege der Wissensbasis außerdem einen Regeleditor, dessen benutzergerechte Implementierung relativ aufwendig ist.

Damit erschöpfen sich die Vor- und Nachteilsbetrachtungen aber noch nicht. Während eine Modifikation der deklarativ codierten Konfigurationsbedingungen vermutlich *lokal* für den Systembenutzer mit Browserunterstützung in gut überschaubarer Weise ausgeführt werden kann, gelingt dies in einem regelbasierten Konfigurationssystem nur relativ mühselig und unbefriedigend. Sobald die Regelbasis eine gewisse Größe und Komplexität besitzt, ist diese vom Systembenutzer nicht mehr ohne Systemunterstützung leicht abzuändern. Sollen Regeln die relativ häufig feuern, modifiziert werden, so übersieht derjenige, der eine mangelhaft konfigurierte Bildverarbeitungsfolge des Expertensystems korrigieren möchte, die Auswirkungen auf Ableitungsstrecken, in denen die Regel in ihrer bisherigen Codierung *korrekt feuerte*, nur unvollkommen. Deshalb reicht es nicht aus, lediglich einen Editor bereitzustellen, der eine aufgezeichnete Vorwärtsverkettung (Regeltrace) Regel für Regel von der zuletzt gefeuerten bis zur ersten durchgehend, einem Bereichsexperten zur Überprüfung vorgibt.

Dieser TEIRESIAS-Ansatz unterstützt in erster Linie eine auf den *Einzelfall* bezogene Ableitungskorrektur [Dav 79]. Mit der Anwendung von TEIRESIAS verifiziert der Bereichsexperte nicht, daß zuvor als einwandfrei geprüfte Ableitungsstrecken bereits verarbeiteter Beratungsfälle nicht verändert werden.

Man muß also anstreben, stets die *Gesamtheit der induzierten Ableitungsänderungen* in Betracht zu ziehen, wenn man Regeln modifiziert. Ein in diese Richtung zielender beachtenswerter Vorschlag wurde von WEISS, POLITAKIS und GINSBERG mit dem Verfeinerungssystem SEEK2 vorgestellt [Pol 85; Gin 86; GWP 85]. SEEK2 ermittelt aus den aufgezeichneten Ableitungsstrecken und deren Expertenevaluierung regelspezifische Kennziffern, die zur automatischen Ableitung von *heuristischen* Modifikationsoperationen (u.a. Verallgemeinerungs- und Spezialisierungsoperationen) genutzt werden.

Dem Systembenutzer werden schließlich Vorschläge für die Änderung einzelner Regeln ausgegeben. Geht man - was nicht immer der Fall sein muß - vereinfachend davon aus, daß die vom SEEK2-System mittels der Verarbeitung von Metaheuristiken hergeleiteten *Änderungsvorschläge* direkt mit dem gewünschten Effekt realisierbar sind, so sieht man sich bei der Realisierung dieses interessanten, aber relativ aufwendigen Ansatzes noch mit Rechenzeitproblemen konfrontiert [GWP 88].

Bereits weniger große Regelbasen verzehren in Labormusteruntersuchungen relativ hohe Rechenzeiten: für das Verfeinern einer Basis von 140 Regeln, die über 121 Fälle validiert wurden, benötigte SEEK2 für eine Verbesserung der Systemleistung von 73% auf 98% etwa zwei Stunden CPU-Zeit auf einer VAX 785 [Gin 86]. Wurden vor dem Debugging lediglich 88 Fälle korrekt diagnostiziert, so waren es danach 119!

Dieses Rechenzeitproblem versucht GINSBERG mit einem anlässlich der AAAI 1988 vorgestellten *Reduced Theory Learning System (RTLS)* zu lösen, wobei er sich auf das ATMS von DeKLEER stützt. Hiermit verfeinerte er die erwähnte medizinische Regelbasis in rund 10 CPU-Minuten c.p. auf einer Lisp-Maschine TI Explorer [Gin 88; Gin 88b]. [33] Unterstellt man, daß es mittels dieses innovativen Konstruktes *tatsächlich* möglich ist, große und komplexe Regelbasen benutzerfreundlich und in angemessener Zeit zu erweitern und zu modifizieren, so findet man beim Vergleich eines in dieser Weise realisierbaren regelbezogenen mit einem objektorientierten Repräsentationsansatz, daß es zur fortlaufenden Modifikation der Regelbasis eines geeigneten Verfeinerungssystems bedarf, welches mit einem spürbaren Entwicklungsaufwand bereitgestellt werden muß.

Abhängig von der Struktur der Wissensbasen (relativ kurze / lange Ableitungsstrecken für Teilprobleme ?; kompakte Regeln ?), ergibt sich bei der angemessenen Bewältigung des Modifikationsproblems, daß die Systemkomplexität der objektorientierten Lösung unter der einer regelorientierten bleiben dürfte. [34] Bei der Entscheidung für einen objektorientierten Repräsentationsansatz ist nicht allein der - zumindest beim Prototyping - *geringere Entwicklungsaufwand* ausschlaggebend. An die frameorientierte Darstellung des Algorithmenkonfigurationswissens knüpft sich die Erwartung, daß es dem Systembenutzer mit lokalen Änderungen gut gelingt, auch die *komplexe* Wissensbasis leicht zu pflegen und zu erweitern.

Ob diese Erwartung im vollen Umfang berechtigt ist, muß eine prototypische Implementierung für eine/mehrere isolierte Anwendungsklasse(n) aufzeigen. Für *grössere* Anwendungsentwicklungsvorhaben besitzt die mittlerweile in der Erprobung befindliche PLAKON-Konzeption hinsichtlich der *hybriden* Wissensrepräsentations- und -verarbeitungsmechanismen sicherlich Vorbildcharakter.

[33] Man kann gegen das Rechenzeitproblem einwenden, daß Verfeinerungsläufe nicht zeitkritisch sind und über Nacht stattfinden können.

Man vergleiche hierzu auch die aus empirischer Sicht kritischen TEX-K-Beiträge des Battelle-Institutes [BZZ 88; Haag 89].

[34] Vermerkt sei an dieser Stelle, daß der Hinweis auf Vererbungsmöglichkeiten in hierarchischen Framestrukturen anscheinend kein Argument mehr gegen die Anwendung von Regelverarbeitung ist. Die künftige Release von KEE enthält neben einer Möglichkeit zur Bildung von Regelklassen offenbar analoge Mechanismen zur sog. *'dynamischen Regelvererbung'*.

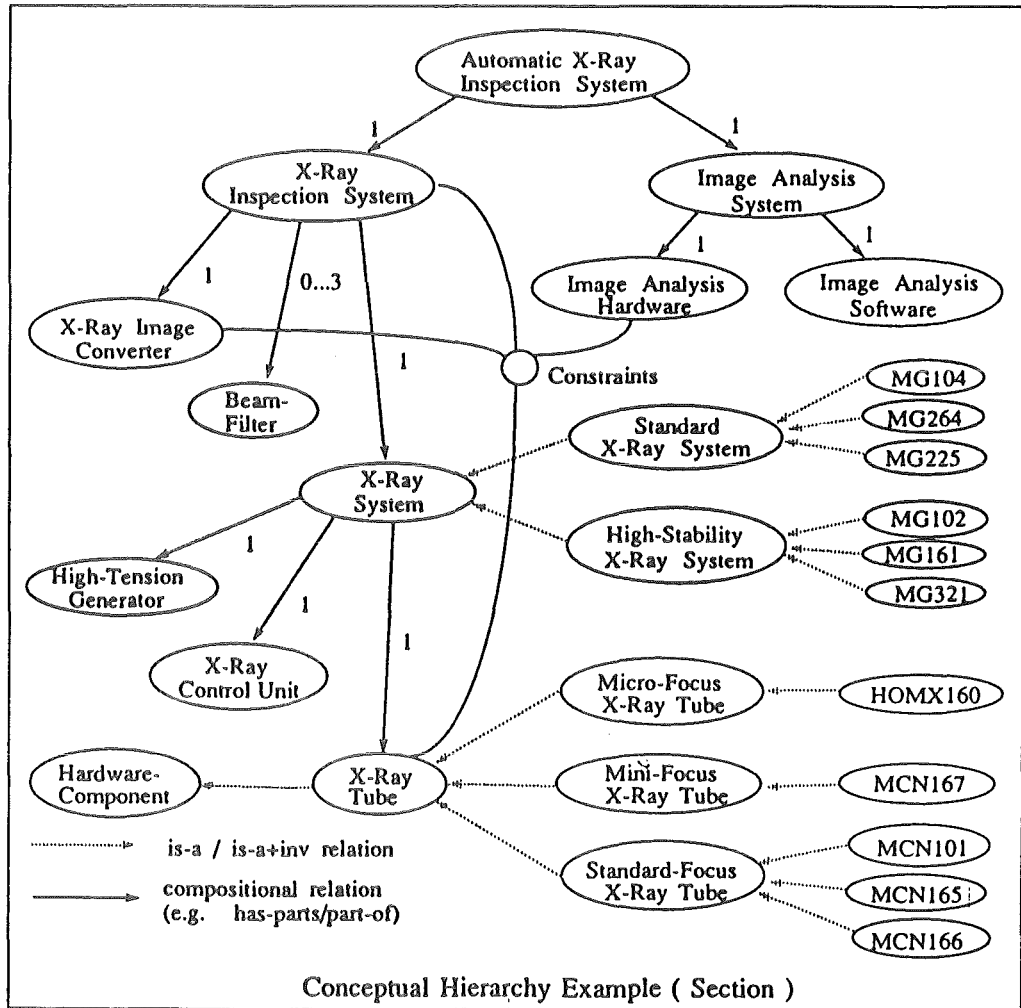
(Vgl. hierzu IntelliCorp's 1989 Summary 'KEE - The leading knowledge systems software', 25 Seiten)

3.2.3 Anlagenkonfigurationswissen

Das generische Methodenframe ermöglicht es, das *softwaretechnische* Konfigurationswissen für die Auswahl und die Hintereinanderausführung von Bildverarbeitungsalgorithmen systematisch darzustellen und zu verarbeiten. Da die Konfiguration von Bildauswertungssystemen nicht allein eine Algorithmenkonfiguration, sondern auch eine Konfiguration der Anlagenkomponenten erfordert, muß die Wissensrepräsentation durch *Wissen über die hardware-/anlagentechnische Konfigurierbarkeit des Bildauswertungssystems* vervollständigt werden. Analog zum generischen Methodenframe ist diesbezüglich ein *generisches Anlagenkomponentenframe* zu bestimmen. Diese Definition ist wegen der vielschichtigen Konstruktionseigenschaften von Gerätesystemen recht diffizil und soll hier nicht ausgeführt werden. Beispiele für entsprechend zweckmäßige Akquisitions- und Repräsentationsmöglichkeiten von ‚Konstruktionswissen‘ stellen die Entwürfe von AMOR und BHIBS dar [CGSB 89; TKP 89].

Die Abbildung unten zeigt die Repräsentation von Teilen der Komponentenhierarchie eines Röntgeninspektionssystems aus einer Arbeit von STRECKER [Str 89], worin die Bildauswertungssoftware als Konfigurationselement enthalten ist.

Abb. 3.2.3-1 : Repräsentation von Komponenten eines Röntgeninspektionssystems.



3.3 Wissensverarbeitung

Die für der Ableitung der Bildverarbeitungssequenz erforderliche Wissensverarbeitung erfolgt objektorientiert, d. h. mittels generischer Funktionen. Hierbei wird zwischen der Ableitung einer Basissequenz und der von Alternativsequenzen für eine gegebene Konfigurationsproblematik unterschieden. Die im folgenden beschriebene Wissensverarbeitung bezieht sich auf die Bestimmung der Bildverarbeitungsoperationen; die wissensbasierte Konfiguration von Anlagenkomponenten für Bildauswertungssysteme wird hier nicht detailliert [BEGP 88].

Der dargestellte objektorientierte Wissensrepräsentationsansatz trennt nicht streng zwischen Kontroll- und Domänenwissen in der Weise, daß dieses unterschiedlichen Objekten zugeordnet wird, wie dies explizit bei der Implementierung von Blackboardarchitekturen geschieht. Das Methodenframe eines Bildverarbeitungsoperators enthält auch Kontrollwissen. Inwieweit dieser Ansatz tragfähig bleibt, muß die empirische Erprobung zeigen. Objektorientierte Repräsentationen, wie die hier vorgestellte, lassen sich mit vertretbarem Aufwand in eine Architektur reimplementieren, die sich künftig möglicherweise als allgemeingültig bzw. als die zweckmäßigste heraushebt: die Blackboard-Architektur.

Es sei an dieser Stelle mit Nachdruck hervorgehoben, daß gegenwärtig auch hybride Repräsentationsansätze noch nicht in einer Weise ausgereift und praktisch erprobt sind, die ihre problemlose Anwendbarkeit nachweist. Dieser entwicklungsbedürftige Stand wird nicht zuletzt von den Systementwicklern dieser Prototypen (u.a. auch des TEX-K-Projektes) selbst bestätigt [SCGB 89; Haag 89; HTH 89]. Vergleichbares gilt für den State-of-the-Art der Wissensakquisition [HeKa 89].

3.3.1 Basissequenz

Die Wissensverarbeitung des Konfigurationssystems beginnt mit der Akquisition der Konfigurationsvorgaben k^* : Ziel des Systementwurfes muß es sein, mit einer *minimalen* Zahl von Fragen die Konfigurationssequenz abzuleiten. Die Darstellung des Skelettierungsteilgraphen offenbart bereits, daß allein für diese Operatorenentscheidung *mehrere* technische Kriterien einzubeziehen sind. Denkt man sich einen low level Bildverarbeitungsmodul aus mehreren Dutzend derartiger Algorithmen konfiguriert, so zeigt sich unmittelbar der zu bewältigende Wissensakquisitionsaufwand. Es ist nicht übertrieben, zu erwarten, daß sich ein Beratungsdiallog auf eine Zeitspanne von bis zu einer Stunde ausdehnt.

Das Akquisitionssystem sollte so ausgelegt werden, daß es in zwei Modi arbeiten kann. Zunächst ist ein *benutzergetriebener* Dialog aufzubauen, der sich auf solche Vorgaben bezieht, die *allgemeiner Art* sind und bereits eine starke Eingrenzung des Suchprozesses ermöglichen. Das Resultat dieser ersten Akquisitionsphase ist ein *Konfigurationsvorgabenframe*, (bzw. Instanziierungen von Konfigurationsvorgabenflavors) welche(s) dem Ableitungssystem primär *Konzeptwissen* bereitstellt; insbesondere aber relevante Auswertungsvorgaben.

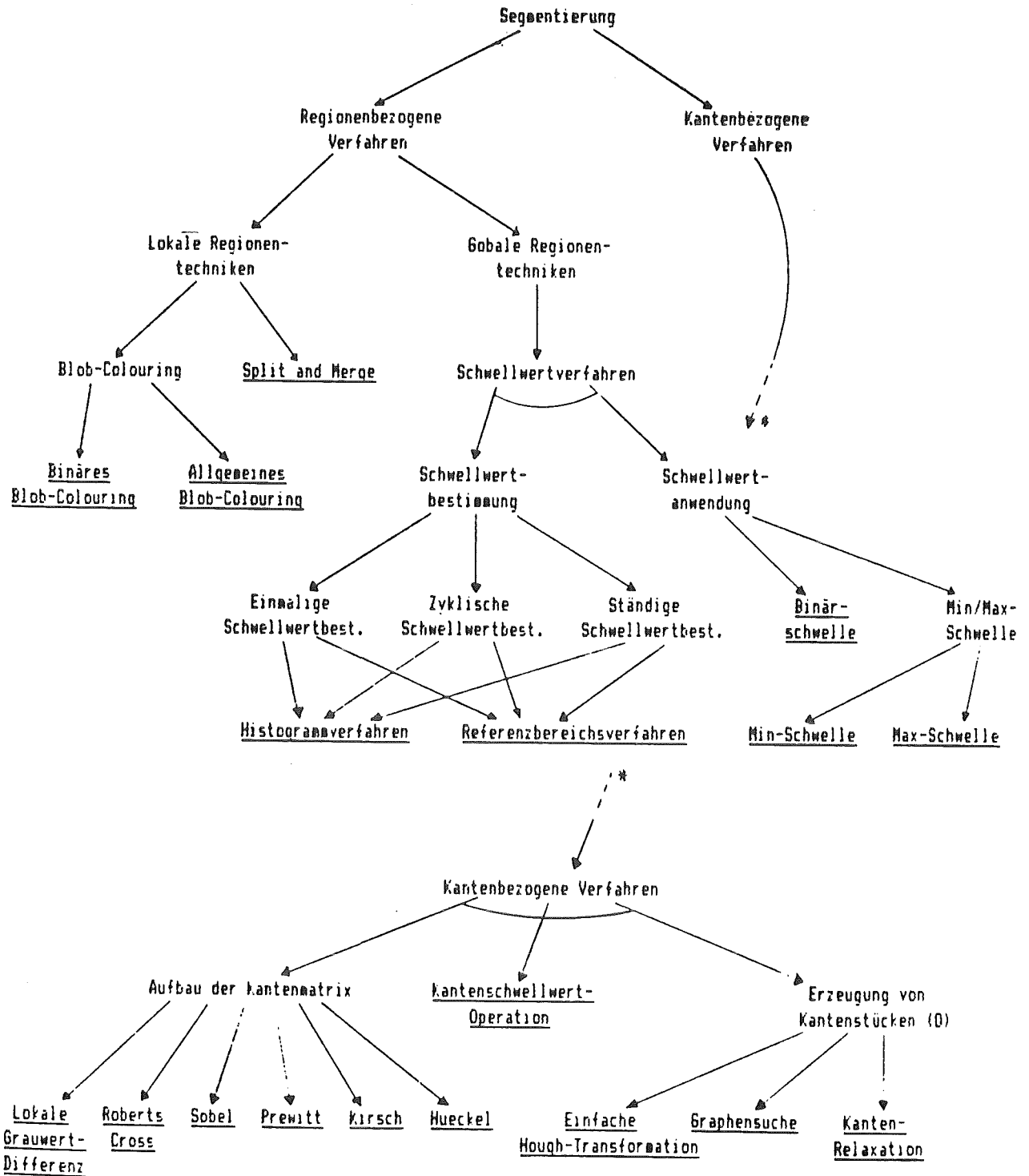
Es ist wichtig zu sehen, daß bereits in dieser Phase auch Frames editiert bzw. erzeugt werden, die - man denke etwa an die Beschreibung von geometrischen Gebilden - später z.B. mit Ist-Daten ("Kreisradius = 34.4 mm"; "Objektvorlagetakt = 4 sec.") belegt werden oder zumindest für Zwischenergebnisse benötigt werden.

Mittels der nun erworbenen relevanten Konfigurationsvorgaben sollte daß Konfigurationssystem in der Lage sein, *system- bzw. zielbezogen* die *speziellen fallspezifischen* Konfigurationsbedingungen aufzunehmen. Es muß also mit den in der ersten Akquisitionsphase aufgenommenen Vorgaben möglich sein, z.B. festzulegen, ob überhaupt eine Entzerrung durchgeführt werden muß, ob daß Ausgangsbild zu segmentieren ist, zu vergrößern ist etc.

Mit diesem Konfigurationswissen arbeitet das Ableitungssystem auf der Basis generischer Funktionen den Methodengraphen 'top down' ab und *ergänzt* - durch Anstoßen entsprechender objektspezifischer Akquisitionsmenus - 'fehlende' Konfigurationsvorgaben ('Akquisitionslücken') durch Benutzereingaben (Mausklick).

Der Wissensverarbeitungsprozeß in der zweiten Ableitungsphase ist interaktiv. Der Leser denke sich das Konfigurationssystem in der zweiten Akquisitionsphase beispielsweise auf dem top level des unten dargestellten Methodengraphen ‚Segmentierung‘ (‚Bestimme die Art des Segmentierungsvorganges bzw. die Segmentierungsoperationen‘) aufsetzend und z.B. im Bereich ‚Kantenbezogene Verfahren‘ schließlich technische Kriterien abfragend.

Abb. 3.3.1-1: Methodengraph für die Verarbeitungsklasse Segmentierung.



Nach dem Verarbeiten des ‚Segmentierungsbaumes‘ möge das Konfigurationssystem z.B. im Methodengraph „Geometrieprüfung“ relevante Operatoren bestimmen, um diese in die bereits ermittelte Teilverarbeitungsfolge zu integrieren.

In dieser Weise gelangt es inkrementell zu einer Basisalgorithmenfolge, die dem Benutzer ausgegeben wird. Damit er im Falle der erneuten Systemkonsultation nicht alle Vorgaben wiederholt einzugeben hat, müssen diese gespeichert werden, bis schließlich eine Akzeptanzmeldung erfolgt.

Die für eine derartige Ablaufsteuerung erforderlichen Funktionen verarbeiten eben die in den Slots des generischen Methodenframes enthaltenen Angaben. Liegt etwa eine Methode vor, die aus mehreren Bestandteilen (Unterroutinen) zusammengesetzt ist, so wird die im Slot ‚Methodenbestandteile‘ gelistete Routinenfolge integriert, wobei (in seltenen Fällen) möglicherweise interaktiv ‚Akquisitionslücken‘ durch Benutzereingaben geschlossen werden müssen. Hinsichtlich der Systembedingungen denke der Leser u.a. an das simple Erfordernis, eine ‚neue‘ Datei für ein verarbeitetes Bild anzulegen, denn die Anzahl der zu erzeugenden, abzuspeichernden Bildtransformationen ist zu Beginn der Konfigurationssitzung noch nicht bekannt. Derartige ‚Verwaltungsaktivitäten‘ sollten den Systementwickler auch nicht ‚belasten‘, sondern für ihn nicht wahrnehmbar von Expertensystem ausgeführt werden.

3.3.2 Alternative Verarbeitungssequenzen

Mit der hier so genannten *Basissequenz* wurde für eine gegebene Konfigurationsvorgabe $k^* \subset K$ eine Bildverarbeitungsfolge abgeleitet. Diese systemseitig generierte Bildverarbeitungsfolge enthält prinzipiell keine alternativen Teilsequenzen, weil dem Systembenutzer keine Möglichkeit belassen wurde *mehrere - also nicht nur eine diskrete -, sondern alternative* Vorgaben für ein relevantes Konfigurationskriterium einzugeben. Dementsprechend erzeugt das Wissensverarbeitungssystem auch nur eine definierte Bildverarbeitungssequenz S^* .

Wie man dem oben von SYSKA für Prüfverfahren ermittelten Methodengraph "Segmentierung" entnehmen kann, lassen sich regelmäßig alternative Operatorenfolgen generieren; der Leser beachte diesbezüglich auch die Und-Verknüpfung im Teilgraph ‚Kantenbezogene Verfahren‘ [Sys 86].

Möchte man eine alternative Bildverarbeitungsfolge S^{l*} zu S^* (lies: 1-te Alternative zu S^* ($l \in \mathbb{N}$)) erhalten, so muß man folglich die entsprechenden Konfigurationsvorgaben k^{l*} zugrundelegen.

Diese sind zu erhalten, indem man das Akquisitionssystem im Rahmen eines *Reruns mit k^** so steuert, daß es von den existierenden Konfigurationskriterien die alternativ ausprägbareren ermittelt und den Systembenutzer diesbezüglich nochmals befragt; diesmal eben nach den *auch* zulässigen Konfigurationsvorgaben.

Eine mögliche Frage des Wissensakquisitionssystems wäre dann beispielsweise von dem folgenden Typ:

Sie haben für die Bildaufnahme das Konfigurationskriterium ‚CCD-Zeilenkamera‘ vorgegeben. Kann für die Konfiguration auch eine ‚CCD-Arraykamera‘ vorgegeben werden ?

Der Benutzer kann diese Frage bejahen oder verneinen. In Abhängigkeit der Benutzereingabe variiert das Akquisitionssystem dann die relevanten Konfigurationsvorgaben. Nimmt man an, daß er bejaht, so erzeugt das Akquisitionssystem *eine* Alternative k^{l*} .

Bejaht der Systembenutzer auch die Frage

Sie haben für die Bildaufnahme das Konfigurationskriterium ‚CCD-Zeilenkamera‘ vorgegeben. Kann für die Konfiguration auch eine ‚Vidikonkamera‘ vorgegeben werden ?

so ergibt sich eine weitere Alternative $k^{(l+1)*}$.

Wesentlich ist, daß die Akquisition *alternativer Konfigurationskriterien* sich nicht auf das gesamte Spektrum der möglichen Fragen bezieht, sondern allein auf die Ermittlung von *weiterer zulässiger Vorgaben* zu einer Basisvorgabe k^* . Als Ergebnis dieses *Reruns* erzeugt das Akquisitionssystem in Abhängigkeit der Benutzereingaben dann alternative Konfigurationsvorgaben k^{l^*} ($l \in \mathbb{N}$), die vom Konfigurationssystem zu verarbeiten sind, so daß schließlich mit jedem Konfigurationslauf für k^{1^*}, k^{2^*}, \dots weitere *diskrete* Bildverarbeitungssequenzen $S^{1^*}, S^{2^*}, \dots, S^{l^*}$ ($l \in \mathbb{N}$) ausgegeben werden.

Mit den soeben explizierten Fragen nach der Einbeziehbarkeit von Anlagenkomponenten (z.B. Vidikonkamera) sollte darauf hingewiesen werden, daß es mitunter auch sinnvoll ist, nicht stets alle Konfigurationskriterien zu erfragen, sondern das auch der Weg beschritten werden kann, aus vorgegebenen Systemkomponenten die *implizierten* Konfigurationsvorgaben abzuleiten. Das Konfigurationsexpertensystem kann dementsprechend eine *Kompatibilitätsliste zu k^** generieren, und den Systementwickler auf alternative Optionen hinweisen. Die generischen Akquisitions- und Verarbeitungsfunktionen sollten die Eigenschaft besitzen, daß sie dem Benutzer auch während der ersten Akquisitionsphase nur diejenigen Attribute als Option freigeben, die bislang nicht im Widerspruch zu existierenden Konfigurationskriterien stehen.

Umgekehrt muß das Konfigurationssystem auch in einem Modus betreibbar sein, in welchem es *Inkompatibilitätsangaben zu einer selektierte Anlagenkomponente* bekannt gibt. Also z.B. eine Information der Art: ‚Die von ihnen geforderte Genauigkeit ist mit dem gewünschten Linsensystem und der gewählten Grauwertstufenzahl nicht erzielbar.‘

Danksagung

Der Verfasser bedankt sich bei Herrn Dipl.-Math. P. Stiller (KfK-IDT) für die intensiven Diskussionen, welche die Erstellung dieses Berichtes begleitet haben, speziell für seine bildverarbeitungstechnische und repräsentationsbezogene Kritik. Herrn Dipl.-Inf. I. Syska (Universität Hamburg) sei für die Erläuterung seines Prototypen sowie für die Bereitstellung seines Materials gedankt. Den Herren Dr. J. Benner (KfK-IRE), Dipl.-Wi.-Ing. B. Bürg (KfK-IDT), Dr. H. Guth (KfK-IDT) und Dipl.-Met. F.-S. Olesen (KfK-IMK) ist der Verfasser für die bereitwillige Erläuterung ihrer Anwendungsprobleme zu Dank verpflichtet. Herrn Dr. K.-P. Scheerer (KfK-IDT) sei für die Korrekturvorschläge gedankt, die sich bei der Durchsicht des Manuskriptes ergaben.

4 Literatur

- [BEGP 88] W. Baginsky; H. Endres; G. Geissing; L. Philipp 1988
Basic Architectural Features of Configuration Expert Systems for Automation Engineering.
Proc. IEEE Conf. 'Intern. Workshop on AI for Industrial Applications'; pp. 505 - 510
Hitachi City, Japan: Mai 1988
- [BHKR 86] W. Bauer; H. Bluhm; K. Böhnelt; P. Hoppe; H. U. Karow; W. Kühn; D. Rusch; D. Schultheiss
1986
A Review of Intense Ion Beam Research at KFK.
Proc. 6th Intern. Conf. on High-Power Particle Beams, 7 S.
Kobe, Japan: June 9. - 12., 1986
- [Ben 85] J.S. Bennett 1985
ROGET: A Knowledge-Based System for Acquiring the Conceptual Structure of a Diagnostic Expert System.
Journal of Automated Reasoning 1, No. 1, pp. 49-74
- [BLSW 88] J. Benner; C. Blume; K. Leinemann; E.G. Schlechtendahl; M. Wadle 1988
Advanced Carrier Systems and Telerobotics.
Proc. IFAC-Symposium on Robot Control (SYROCO '88); pp. 82.1 - 82.6
Karlsruhe: 5.-7. Oktober 1988
- [BeAI 85] T. Bernold; G. Albers (Eds.) 1985
Artificial Intelligence: Towards Practical Application
Proc. of the joint Technology Assessment Conf. of the Gottlieb Duttweiler Institute and the European Coordinating Committee for AI; Rüschlikon / Zürich, Schweiz: April 12 - 13, 1984.
Elsevier Science Publishers B.V. (North Holland), Amsterdam New York
- [BiSi 82] W. Bibel; J. Siekmann (Hrsg.) 1982
Künstliche Intelligenz Frühjahrsschule.
Proceedings KIFS-82: Teisendorf 15.-24. März 1982
Informatik-Fachberichte 59
Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York
- [BGL 88] J. Boose; B. Gaines; M. Linster (Eds.) 1988
Proceedings of the European Knowledge Acquisition Workshop - EKAW '88
GMD-Studien Nummer 143
Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung mbH., Sankt Augustin
- [BBD 85] A. van de Brug; J. Bachant; J. McDermott 1985
Doing RI with Style.
Proc. 2nd Conference on Artificial Intelligence Applications (CAIA '85); pp. 244 - 249
Miami Beach, Florida: December 11. - 13., 1985
- [Bra 85] M. Brady 1985
Artificial Intelligence and Robotics.
Artificial Intelligence 26, No. 1, pp. 79 - 121
- [BTW 89] J. Benner; W. Till; C. Walz 1989
Automation of Remote Maintenance by an industrial Robot mounted on a Gantry Crane.
Proc. ANS 3rd Topical Meeting on Robotics and Remote Systems; pp. 1.1 - 1.8
Charleston, South Carolina: March 13.-16., 1989

- [BrFr 89] W. Brauer; C. Freksa (Hrsg.) 1989
Wissensbasierte Systeme - 3. Intern. GI-Kongreß
Subreihe Künstliche Intelligenz: Informatik-Fachberichte 227
Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
- [BrRa 85] W. Brauer; B. Radig (Hrsg.) 1985
Wissensbasierte Systeme - 1. Intern. GI-Kongreß.
Informatik-Fachberichte 112
Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- [BrNi 88] H. Brünig; H. Niemann 1988
IPAX: Konzeption und Realisierung eines Bildverarbeitungssystems.
Proc. Mustererkennung 1988: [BKS 88], S. 60 - 67
- [BKS 88] H. Bunke; O. Kübler; P. Stucki (Hrsg.) 1988
Mustererkennung 1988.
Proc. 10. DAGM-Symposium: Zürich, September 1988
Informatik-Fachberichte 180
Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
- [BuSa 83] H. Bunke; G. Sagerer 1983
A System for Diagnostic Evaluation of Scintigraphic Image Sequences.
Proc. GWAI-83, pp. 50 - 59
Informatik-Fachberichte 76
Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
- [BZZ 88] P. Bunse; F. Zetzsche; G. Zinser 1988
Die Behandlung von Alternativen in der Planung: Erfahrungen mit ATMS-basierten Expertensystemarchitekturen.
Proc. 2. Workshop 'Planen und Konfigurieren': [HeGü 88], S. 113 - 132
- [Bür 88] B. Bürg 1988
Unveröffentlichter Bericht.
Kernforschungszentrum Karlsruhe, Institut für Datenverarbeitung in der Technik, Karlsruhe
- [BüHe 87] B. Bürg; A. Hellmann 1987
Unveröffentlichter Bericht.
Kernforschungszentrum Karlsruhe, Institut für Datenverarbeitung in der Technik, Karlsruhe
- [BDGK 87] B. Bürg; B. Deiß; H. Guth; U. Klein; D. Schmidt 1987
Unveröffentlichter Bericht.
Kernforschungszentrum Karlsruhe, Institut für Datenverarbeitung in der Technik, Karlsruhe
- [BGH 89] B. Bürg; H. Guth; A. Hellmann 1989
Bildanalytische Qualitätskontrolle in der Mikrofertigung.
Proc. 11. DAGM-Symposium: [BHN 89], S. 168 - 172
- [BHN 89] H. Burkhardt; K. H. Höhne; B. Neumann (Hrsg.) 1989
Mustererkennung 1989.
Proceedings 11. DAGM Symposium Hamburg, Oktober 1989
Informatik-Fachberichte 219
Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York

- [CEC 87] Commission of the European Communities (Ed.) 1987
ESPRIT '87 - Achievements and Impact.
Proc. of the 4th Annual ESPRIT Conference; Brussels: September 28-29
North-Holland Amsterdam New York Tokyo
- [CGS 87] R. Cunis; A. Günter; I. Syska 1987
Knowledge-Craft-Implementation auf einer MicroVax.
Künstliche Intelligenz 4, S. 72 - 74
- [CGSB 89] R. Cunis; A. Günter; I. Syska; H. Bode; H. Peters 1989
PLAKON - Modellierung von technischen Domänen mit BHIBS.
Proc. 3. Workshop 'Planen und Konfigurieren': [HTH 89], S. 33 - 48
- [Dav 79] R. Davis 1979
Interactive Transfer of Expertise: Acquisition of New Inference Rules.
Artificial Intelligence 12, pp. 121 - 157
- [DFD 88] DFD 1988
Satellitenfernerkundung für die Umwelt.
Farbdruck des DFD der DFVLR, Oberpfaffenhofen
Informationsbroschüre
- [Dru 86] M. Drumheller 1986
Connection Machine Stereomatching.
Proc. 5th Nat. Conf. on Artificial Intelligence (AAAI-86), Vol. 1; pp. 748 - 753
Philadelphia, Pennsylvania: August 11. - 15., 1986
- [EcGu 84] K. Eckert; H. Guth 1984
Unveröffentlichter Bericht.
Kernforschungszentrum Karlsruhe, Institut für Datenverarbeitung in der Technik, Karlsruhe
- [EcGu 86] K. Eckert; H. Guth 1986
Design and Implementation of an Interactive Image Processing System.
Proc. Identification and Pattern Recognition - IPAR '86: Vol. 2, pp. 605 - 617
Toulouse, France: June 18. - 20., 1986
- [Eck 88] W. Eckstein 1988
Das ganzheitliche Bildverarbeitungssystem HORUS.
Proc. Mustererkennung 1988 : [BKS 88], S. 53-59
- [End 87] M. Ender 1987
Ein Beitrag zur automatischen wissensbasierten Konfiguration von Bildinterpretationssystemen.
Fortschritt-Berichte VDI Reihe 10, Nr. 68
VDI Verlag Düsseldorf
- [EnMo 88] R. Englemore; T. Morgan (Eds.) 1988
Blackboard Systems.
Addison-Wesley Publishing Company Menlo Park Amsterdam Sydney
- [Esp 87] B. Espiau (Ed.) 1987
Towards Third Generation Robotics.
Proc. 3rd International Conference on Advanced Robotics - ICAR '87.
Versailles, France: October 13. - 15., 1987
IFS (Publications) Ltd. UK - Springer Verlag Berlin London

- [För et al. 87] B, Förster et al. 1987
Arbeiten zur Waldkartierung mit Satellitenbilddaten.
Auszug aus dem Tagungsband des 2. DFVLR-Statusseminars
,Untersuchung und Kartierung von Waldschäden mit Methoden der Fernerkundung'
Oberpfaffenhofen: 30.11. - 2.12.1987
DFVLR Oberpfaffenhofen
- [FrSi 88] R. Friehmelt; H. Siemer 1988
Unveröffentlichter Technologietransferbericht.
Kernforschungszentrum Karlsruhe, Koordinationsstelle Technologietransfer, Karlsruhe
- [FrSi 88] R. Friehmelt; H. Siemer 1988
Unveröffentlichter Technologietransferbericht.
Kernforschungszentrum Karlsruhe, Koordinationsstelle Technologietransfer, Karlsruhe
- [FVS 88] R. Friehmelt; D. Vollrath; H. Siemer 1988
Mehr Flexibilität - geringere Kosten.
Einige Anwendungsfälle des Bildverarbeitungssystems PACOS.
Elektronik 4, S. 116 - 120
- [Gin 86] A. Ginsberg 1986
A Metalinguistic Approach to the Construction of Knowledge Base Refinement Systems.
Proc. 5th Nat. Conf. on Artificial Intelligence (AAAI-86), Vol. 1 (Science); pp. 436 - 441
Philadelphia, Pennsylvania: August 11. - 15., 1986
- [Gin 88] A. Ginsberg 1988
Knowledge Base Reduction: A New Approach to Checking Knowledge Bases for Inconsistency and Redundancy."
Proc. 7th Nat. Conf. on Artificial Intelligence (AAAI-88), Vol. 2; pp. 585 - 589
Saint Paul, Minnesota: August 21. - 26., 1988
- [Gin 88b] A. Ginsberg 1988
Knowledge Base Reduction: A New Approach to Checking Knowledge Bases for Inconsistency and Redundancy."
Proc. 7th Nat. Conf. on Artificial Intelligence (AAAI-88); Vol. 2, pp. 590 - 595
- [GWP 85] A. Ginsberg; S. M. Weiss; P. Politakis 1985
SEEK 2: A Generalized Approach to Automatic Knowledge Base Refinement.
Proc. 9th Intern. Joint Conf. on Artif. Intelligence (IJCAI-85); Vol. 1, pp. 367 - 374
Los Angeles, California: August 1985
- [GWP 88] A. Ginsberg; S. M. Weiss; P. Politakis 1988
Automatic Knowledge Base Refinement for Classification Systems.
Artificial Intelligence 35, No. 2, pp. 197-226
- [Gom 84] A. Gomershall 1984
Machine Intelligence - An International Bibliography with Abstracts of Sensors in Automated Manufacturing.
Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York Tokyo
- [GoKu 85] G. Goos; P. Kursawe 1985
Programmiermethoden der Künstlichen Intelligenz.
Vorlesungsmanuskript für das SS 1985.
Universität Karlsruhe (TH), Fakultät für Informatik

- [Güs 88] H.-W. Güsgen 1988
CONSAT - A System for Constraint Satisfaction.
Dissertation am Fachbereich Informatik der Universität Kaiserslautern
- [Gu 88] H. Guth 1988
Unveröffentlichter Bericht.
Kernforschungszentrum Karlsruhe, Institut für Datenverarbeitung in der Technik
- [Haag 89] A. Haag 1989
Ein Beitrag zur praktischen Handhabung von Planungs- und Konfigurationsaufgaben - Konzepte und Kontrolle der Problemlösung unter Verwendung eines ATMS.
Proc. 3. Workshop ‚Planen und Konfigurieren‘ : [HTH 89], S. 83 - 106
- [HMR 87] P. Harth; K. Hasselmann; R. Mühlfeld; E. Raschke 1987
Fernerkundung. Physikalische und methodische Grundlagen für die Datenauswertung.
Bericht über ein von 1978 bis 1983 gefördertes Schwerpunktprogramm
Herausgegeben von der Dt. Forschungsgemeinschaft (DFG), Bonn
VCH Verlagsgesellschaft, D-6940 Weinheim
- [Har 86] G. Hartmann (Hrsg.) 1986
Mustererkennung 1986.
Proc. 8. DAGM-Symposium, Paderborn September/Oktober 1986
Informatik Fachberichte 125
Springer Verlag Berlin Heidelberg New York
- [HWL 83] F. Hayes-Roth; D. Waterman; D. Lenat (Eds.) 1983
Building Expert Systems
Addison-Wesley Publishing Co., Inc. London Amsterdam Sydney Tokyo
- [HTH 89] M. Hein; W. Tank; J. Hertzberg (Hrsg.) 1989
Beiträge zum 3. Workshop ‚Planen und Konfigurieren.‘
Arbeitspapiere der GMD Nr. 388
Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung, St. Augustin
- [HcGü 88] J. Hertzberg; A. Günter (Hrsg.) 1988
Beiträge zum 2. Workshop ‚Planen und Konfigurieren.‘
Arbeitspapiere der GMD Nr. 310
Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung, St. Augustin
- [HeKa 89] C. Hestermann; S. Karl 1989
Methoden und Werkzeuge für die Wissensakquisition.
Eine Übersicht über den State-of-the-Art.
Interner Bericht Nr. 7/89
Universität Karlsruhe (TH), Fakultät für Informatik
- [Hub 88] K.-P. Huber 1988
Erklärungskomponente für das System XUMA unter Berücksichtigung verschiedener Benutzerklassen.
KfK-Bericht 4478
Kernforschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe

- [HCN 87] A. Huertas; W. Cole; R. Nevatia 1987
Detecting Runways in Aerial Images.
Proc. 6th Nat. Conf. on Artificial Intelligence (AAAI-87); Vol. 2, pp. 712 - 717
Seattle, Washington: July 13 - 17, 1987
- [IDT 87] IDT 1987
Ergebnisbericht über Forschungs- und Entwicklungsarbeiten 1986.
Institut für Datenverarbeitung in der Technik.
KfK-Bericht 4234
Kernforschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe
- [IDT 88] IDT 1988
Ergebnisbericht über Forschungs- und Entwicklungsarbeiten 1987.
Institut für Datenverarbeitung in der Technik.
KfK-Bericht 4389
Kernforschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe
- [IDT 89] IDT 1989
Ergebnisbericht über Forschungs- und Entwicklungsarbeiten 1988.
Institut für Datenverarbeitung in der Technik.
KfK-Bericht 4539
Kernforschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe
- [IMK 88] IMK 1988
Ergebnisbericht über Forschungs- und Entwicklungsarbeiten 1987.
Institut für Meteorologie und Klimaforschung.
KfK - Bericht 4392
Kernforschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe
- [JaPa 88] A. Jaeschke; B. Page (Hrsg.) 1988
Informatikanwendungen im Umweltbereich.
Proc. 2. Symposium: Karlsruhe 9./10. November 1987
Informatik-Fachberichte 170
Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
- [JGP 89] A. Jaeschke; W. Geiger; B. Page (Hrsg.) 1989
Informatik im Umweltschutz.
Proc. 4. Symposium: Karlsruhe, 6.-8. November 1989
Informatik-Fachberichte 228
Springer-Verlag Berlin Heidelberg London
- [KBJK 86] G. S. Kahn; E. H. Breaux; R. L. Joseph; P. DeKlerk 1986
An Intelligent Mixed-Initiative Workbench for Knowledge-Acquisition.
Proc. of the Knowledge Acquisition for Knowledge-Based Systems Workshop; pp. 21.0 - 21.17
Banff, Canada: November 1986.
- [Kee 89] S. E. Keene 1989
Object-oriented Programming in COMMON LISP. A Programmer's Guide to CLOS.
Addison-Wesley Publishing Company New York Bonn
- [Kel 89] H.-W. Kelbassa 1989
Unveröffentlichter Bericht.
Kernforschungszentrum Karlsruhe, Institut für Datenverarbeitung in der Technik, Karlsruhe

- [KIBI 86] A. Klumpp; H. Bluhm 1986
Untersuchungen zur Diagnostik von intensiven gepulsten Protonenstrahlen mit Hilfe der $^{11}\text{B}(p, \alpha)^2\alpha$ -Reaktion.
KfK-Bericht 4130
Kernforschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe
- [KHR 87] C.A. Kohl; A.R. Hanson; E.M. Riseman 1987
A Goal-Directed Intermediate Level Executive for Image Interpretation.
Proc. 10th Intern. Joint Conf. on Artificial Intelligence (IJCAI-87), Vol. 2, pp. 811 - 814
Milan, Italy: August 23. - 28., 1987
- [KPH 86] D. Kuan; G. Phipps; A. Hsueh 1986
A Real-time Road Following and Junction Detection Vision System for Autonomous Vehicles.
Proc. 5th Nat. Conf. on Artif. Intelligence (AAAI-86), Vol. 2, pp. 1127 - 1132
Philadelphia, Pennsylvania: August 11. - 15., 1986
- [LeMa 87] P. Levi; J. Majumdar 1987
Verwendung von dreidimensionalen CAD-Modellen für den Handkameraeinsatz bei zweiarmigen Montagerobotern.
Proc. Mustererkennung 1987: [Pau 87], Seiten 191 - 195
- [Loh 87] G. Lohmann 1987
Wissensbasierte Klassifizierung von Satellitenbildern für Waldbestandskartierungen.
in [För et al. 87], S. 117 - 137
- [LFGJ 87] K. Lütjen; H. Fügen; H.-J. Greif; K. Jurkiewicz 1987
Auswahlverfahren für die wissensbasierte Bildauswertung mit dem Blackboard-basierten Produktionssystem BPI.
Proc. Mustererkennung 1987: [Pau 87], S. 290 - 294
- [LFGJ 87b] K. Lütjen; H. Fügen; H.-J. Greif; K. Jurkiewicz 1987
Klassifikation 2-dimensionaler Objekte in Luftbildern mit dem mit dem Blackboard-basierten Produktionssystem BPI.
Proc. Mustererkennung 1987: [Pau 85], S. 321
- [MLR 89] J. Majumdar; P. Levi; U. Rembold 1989
3-D Model Based Robot Vision by Matching Scene Description with the Object Model from a CAD Modeller.
Robotics and Autonomous Systems 5, S. 69 - 83
- [MLR 87] J. Majumdar; P. Levi; U. Rembold 1987
3-D model based robot vision by matching scene description with the object model from a CAD modeller.
Proc. ICAPR '87: [Esp. 87], pp. 187 - 197.
- [MLR 88] J. Majumdar; P. Levi; U. Rembold 1988
Algorithm for Visible Surface Pattern Generation - a Tool for 3D Object Recognition.
Forschungszentrum Informatik an der Universität (TH) Karlsruhe (FZI),
Forschungsgruppe Technische Expertensysteme und Robotik, Karlsruhe

- [MMS 87] M. Majumdar; D. Majumdar; J.I. Sackett (Eds.) 1987
Artificial Intelligence and other Innovative Computer Applications in the Nuclear Industry.
Proc. of the American Nuclear Society Topical Meeting on Artificial Intelligence and
other Innovative Computer Applications;
Snowbird, Utah: August 31 - September 2, 1987
Plenum Press New York London
- [MHM 85] D.M. McKeown; W.A. Harvey; J. McDermott 1985
Rule-based Interpretation of Aerial Imagery.
IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence: PAMI-7, No. 5, pp. 570 - 585
- [Met 89] D. Metzger (Hrsg.) 1989
GWAI-89 - 13th German Workshop on Artificial Intelligence.
Subreihe Künstliche Intelligenz: Informatik-Fachberichte 216
Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
- [Mor 87] K. Morik 1987
GWAI-87 - 11th German Workshop on Artificial Intelligence
Subreihe Künstliche Intelligenz: Informatik-Fachberichte 152
Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York London Paris
- [Mon 87] M. Mohnhaupt 1987
Über die First International Conference on Computer Vision
Künstliche Intelligenz 1, Heft 4, S. 20 f.
- [NMM 88] M. Nagao; T. Matsuyama; H. Mori 1988
Structural Analysis of Complex Aerial Photographs.
in [EnMo 88], pp. 219 - 230
- [Nag 85] H.-H. Nagel 1985
Wissensgestützte Ansätze beim maschinellen Sehen: Helfen Sie in der Praxis ?
Proc. 1. Intern. GI-Kongreß ‚Wissensbasierte Systeme‘: [BrRa 85], S. 421 ff.
- [NaLe 84] A. M. Nazif; M. D. Levine 1984
Low level Image Segmentation: An Expert System.
IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence:
IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence: Vol. PAMI-6, No. 5, pp. 555 - 577
- [Neu 86] B. Neumann 1986
Wissensbasierte Konfigurierung von Bildverarbeitungssystemen.
Proc. Mustererkennung 1986: [Har 86], S. 206 - 218
- [NiBu 87] H. Niemann; H. Bunke 1987
Künstliche Intelligenz in Bild- und Sprachverarbeitung.
Teubner Verlag Stuttgart
- [OIGr 85] F.-S. Olesen; H. Grassl 1985
Cloud detection and classification over oceans at night with NOAA-7.
Int. J. Remote Sensing 6, No. 8, pp. 1435 - 1444
- [Os 86] R. L. Osborne 1986
Online, Artificial Intelligence-Based Turbine Generator Diagnostics.
AI Magazine 7, No. 4, pp. 97-103

- [OsCo 87] R. L. Osborne; M. Coffmann 1987
Power Plant Experience with Artificial Intelligence Based, On-line Diagnostic Systems.
Proc. of the American Nuclear Society Topical Meeting on Artificial Intelligence and other Innovative Computer Applications: [MMS 87], pp. 547 - 553
- [Pau 87] E. Paulus (Hrsg.) 1987
Mustererkennung 1987.
Proc. 9. DAGM-Symposium Braunschweig
Informatik-Fachberichte 149
Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
- [PaTe 86] J.Y.-C. Pan; M. Tenenbaum 1986
PIES: An Engineer's Do-It-Yourself Knowledge System for Interpretation of Parametric Test Data.
AI Magazine 7, pp. 62 - 69
- [Pfi 89] K. Pfitzner 1989
Auswahl, Integration und Zerlegung von Bibliothekslösungen bei der Konstruktion.
Proc. 3. Workshop ‚Planen und Konfigurieren‘: [HTH 89], S. 165 - 182
- [PfiGü 88] K. Pfitzner; A. Günter 1988
Bibliothekslösungen zur Unterstützung der Problemlösung in Konstruktions-Expertensystemen.
Proc. 2. Workshop ‚Planen und Konfigurieren‘: [HeGü 88], S. 175 - 190
- [PfiSt 87] K. Pfitzner; H. Strecker 1987
XRAY - An Experimental Configuration Expert System for Automatic X-Ray Inspection.
Proc. Mustererkennung 1987: [Pau 87], S. 315 - 319
- [Pol 85] P. G. Politakis 1985
Empirical Analysis for Expert Systems.
Research Notes in Artificial Intelligence 6
Pitman Advanced Publishing Program Boston London Melbourne
- [Popp 89] C. Popp 1989
On the Interrelation of Knowledge Representation and Explanation.
Forschungszentrum Informatik (FZI) an der Universität Karlsruhe (TH),
Forschungsgruppe Technische Expertensysteme und Robotik, Karlsruhe
GWAI-Fassung vom September 1989
- [PBMF 87] J. Porill; S.B. Pridmore; J.B. Bowen; J.E.W. Mayhew; J.P. Frisby 1987
TINA: The Sheffield AIVRU Vision System.
Proc. 10th Int. Joint Conf. on Artif. Intelligence (IJCAI-87), Vol. 2, pp. 1138 - 1144
Milan, Italy: August 23. - 28., 1987
- [Pup 88] F. Puppe 1988
Einführung in Expertensysteme.
Springer Verlag Berlin Heidelberg New York
- [Rau 82] P. Raulefs 1982
Expertensysteme.
Proc. Künstliche Intelligenz Frühjahrsschule (KIFS-82); [BiSi 82], S. 61 - 98
Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York

- [Rau 85] P. Raulefs 1985
Knowledge Processing Expert Systems.
Proc. 'Artificial Intelligence: Towards Practical Application' ; [BeAl 85], pp. 21 - 31
- [RaTh 87] P. Raulefs; P. W. Thorndyke 1987
An Architecture for Heuristic Control of Real-time Processes.
Proceedings of the 1987 JPL Workshop on Space Telerobotics;
Orlando, Florida: January 1987
- [Ric 83] E. Rich 1983
Artificial Intelligence.
McGraw Hill Book Company New York
- [RiHa 84] E. M. Riseman; A. R. Hanson 1984
A Methodology for the Development of General Knowledge-Based Vision Systems.
Proc. IEEE Workshop on Principles of Knowledge-based Systems, pp. 159 - 170
Denver, Colorado: December 3. - 4., 1984
- [RiBo 89] I. C. Risk; H. Boerner 1989
VIDIMUS: A Vision System Development Environment for Industrial Applications.
Proc. 3. Intern. GI-Kongreß 'Wissensbasierte Systeme': [BrFr 89], S. 477 - 485
- [Rup 87] A. Rupalla 1987
Einsatzmöglichkeiten und Perspektiven der Bildverarbeitung.
KfK-Hausmitteilungen 3, S. 12 - 14
- [SaKr 88] R. W. Saunders; K. T. Kriebel 1988
An improved method for detecting clear sky and cloudy radiances from AVHRR data.
Int. J. Remote Sensing 9, No. 1, pp. 123 - 150
- [Sau 86] R.W. Saunders 1986
An automated scheme for the removal of cloud contamination from AVHRR radiances over western Europe.
Int. J. Remote Sensing 7, pp. 867 - 886
- [SNS 88] S. Schröder; H. Niemann; G. Sagerer 1988
Knowledge Acquisition for a Knowledge Based Image Analysis System.
in [BGL 88], pp. 29-1/29-15
- [Sta 88] S.A. Stansfield 1986
ANGY: A Rule-based Expert System for Automatic Segmentation of Coronary Vessels from Digital Subtracted Angiograms.
IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-8, No. 2, pp. 188-199
- [Str 89] H. Strecker 1989
Configuration using PLAKON - An Application Perspective.
Proc. 3. Intern. GI-Kongreß 'Wissensbasierte Systeme': [BrFr 89], 352 - 362
- [StPf 88] H. Strecker; K. Pfitzner 1988
XRAY - Ein prototypisches Konfigurierungs-Expertensystem für die automatische Röntgenprüfung.
Künstliche Intelligenz 2, S. 4 - 8

- [Sys 86] I. Syska 1986
Überlegungen zur automatischen Konfigurierung von industriellen Bildverarbeitungssystemen.
Mitteilung Nr. 138 des FB Informatik der Universität Hamburg; FBI - HH - M - 138 / 86
- [SCGB 89] I. Syska; R. Cunis; A. Günter; H. Bode; H. Peters 1989
Modulare Expertensystemarchitekturen.
Proc. GWAI-89: [Met 89], S. 359 - 368
- [SGCP 88] I. Syska; A. Günter; R. Cunis; H. Peters; H. Bode 1988
Constraints in PLAKON.
Proc. 2. Workshop 'Planen und Konfigurieren': [HeGü 88], S. 91 - 102
- [TKP 89] W. Tank; B. Kamp; S. Papaioannou 1989
AMOR: Eine Beschreibungssprache für technische Systeme zur Unterstützung der Wissensaquisition für Konfigurationsprobleme.
Proc. 3. Workshop 'Planen und Konfigurieren': [HTH 89], 17 - 32
- [Tam 83] H. Tamura 1983
A SPIDER User's Manual.
Joint System Development Corp. Tokyo
- [Tol 87] T. Tolxsdorff 1987
Ein neues Software-System (RAMSES) zur Verarbeitung NMR-spektroskopischer Daten in der bildgebenden medizinischen Diagnostik.
Medizinische Informatik und Statistik 66
Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
- [Tol 87b] T. Tolxsdorff 1987
Wissensbasierte Diagnoseunterstützung bei der gewebecharakterisierenden Kernspintomographie.
Proc. Mustererkennung 1987: [Pau 87], S. 242-246
- [Tra 87] H. Trauboth 1987
Was kann die Informationstechnik für den Umweltschutz tun ?
Automatisierungstechnik 35, Heft 11, S. 431 - 442
- [VFPS 86] D. Vollrath; R. Friehtmelt; A. Nasraoui; J. Pecht; P. Stiller 1986
PACOS - programmgesteuerte Bildanalyse.
Die Umschau, Heft 2, S. 90 - 97
- [Wac 89] I. Wachsmuth 1989
Kognitive Kategorien.
Proc. GWAI-89: [Met 89], S. 482 - 483
- [Wel 87] W.M. Wells 1987
Visual Estimation of 3D-Line Segments from Motion - A mobile Robot Vision System.
Proc. 6th Nat. Conf. on Artificial Intelligence (AAAI-87), Vol. 2, pp. 772-776
Seattle, Washington: July 13. - 17., 1987
- [Wick 89] M. R. Wick 1989
The 1988 AAAI Workshop on Explanation.
AI Magazine 10, No. 3, pp. 22 - 26

- [Win 84] G. Winkler 1984
Konzept für ein Visuelles Interpretationssystem für Technische Anwendungen (VISTA).
FhG-Berichte 2, S. 4-7
- [Win 85] G. Winkler 1985
Industrielle Anwendung der digitalen Bildauswertung.
Informatik-Spektrum 8, Heft 4, S. 215-224
- [Win 87] R. Winter 1987
Überblick zu den Walduntersuchungen mit Satellitenbild-Daten.
in [För et al. 87], S. 415 - 432
- [WMLL 88] R. Winter; W. Markwitz; H.-J. Lotz-Iwen; G. Lohmann 1988
Datentechnische Werkzeuge zur digitalen Verarbeitung von Satellitenbilddaten für Fernerkundungsanwendungen.
Proc. 2. Symposium ‚Informatikanwendungen im Umweltbereich‘: [JaPa 88], S. 67 - 78