

Wissensbasierte Konfigurierung von Bildverarbeitungssystemen

Bernd Neumann

FBI-HH-M-147/87

Universität Hamburg
Fachbereich Informatik
Bodenstedtstr. 16, 2000 Hamburg 13

April 1987

Knowledge-Based Configuration of Computer Vision Systems

Bernd Neumann

Abstract

Computer vision systems for industry cannot yet be employed economically to the extent which has been predicted earlier. One of the reasons is the configuration problem: Computer vision experts are required to install a vision system and adapt it to a new task - an expensive procedure. This contribution investigates the possibility of employing expert systems for the configuration of vision systems. The configuration of vision systems can be decomposed into component selection (methods and devices) and parameter adaptation (e.g. threshold selection). Both subtasks are controlled by expert knowledge which requires considerable formalization before it can be put to use in configuration expert systems. A partial solution is presented in terms of the BIKOS system which configures vision systems for quality control. BIKOS selects methods and devices from a component taxonomy organized as an AND/OR graph.

Wissensbasierte Konfigurierung von Bildverarbeitungssystemen

Bernd Neumann
Universität Hamburg
Fachbereich Informatik
2000 Hamburg 50, Bodendstedtstr. 16

1. Einleitung

Digitale Bildauswertung ist ein Teilgebiet der Informatik, dessen Potential frühzeitig erkannt wurde (*Selfridge 55*), dessen Anwendungen aber offenbar hinter den Erwartungen zurückbleiben. Verfolgt man Übersichtsartikel durch die Jahre, so findet man beinahe gleichlautende Hinweise auf vielseitige Einsatzmöglichkeiten, deren weite Verbreitung in naher Zukunft bevorstehe (*Rosen 79, Rossol 82*), insbesondere im industriellen Bereich, also in der Prozeßsteuerung und Qualitätsprüfung. Diese Prognosen haben sich nicht erfüllt. In der Automobilherstellung beispielsweise ist der Anteil sehender Roboter bisher verschwindend klein. Automatische Sichtprüfung findet nur in Einzelfällen statt, meist im Rahmen von Pilotprojekten. Die Übertragung einer Lösung auf andere, ähnlich gelagerte Anwendungen unterbleibt häufig aus Wirtschaftlichkeitserwägungen.

Ein dazu passendes Bild ergibt sich, wenn man das Schicksal von Laborentwicklungen "für industrielle Anwendungen" verfolgt. Die Zahl der für den praktischen Einsatz entwickelten Laborsysteme steht in krassem Mißverhältnis zu der Zahl von letztendlich kommerziell eingesetzten Geräten. Dies gilt besonders für universelle Systeme, also solche, die für einen vielseitigen Einsatz ausgelegt sind.

Für diese Schwierigkeiten gibt es eine Reihe von Ursachen. Ein naheliegender Grund wird in *Winkler 85* diskutiert: Es fehlen praktisch einsetzbare Verfahren. Einfache, preiswerte und schnelle Verfahren leisten häufig zu wenig, komplizierte aber leistungsfähigere Verfahren sind entsprechend häufig zu langsam und zu teuer. Angesichts der Vielfalt der bisher entwickelten Algorithmen und der geringen Hoffnung auf radikale Neuerungen sieht *Winkler* eine Lösung dieses Dilemmas in einer kombinierten Entwicklung von Hard- und Software, bei der sich beide Bereiche im Interesse von preisgünstigen, schnellen Lösungen aufeinanderzubewegen.

Eine andere Ursache für die mangelnde Wirtschaftlichkeit liegt darin, daß Bildauswertesysteme zwar vielfach für wechselnde Anwendungen konzipiert sind, aber ihre Umrüstung auf eine neue Aufgabe meist sehr teuer ist. Dies ist das Konfigurierungsproblem. Soll bei-

spielsweise ein Qualitätsprüfstand für ein Gußteil A auf das Gußteil B umgestellt werden, so bedarf es in der Regel eines Bildverarbeitungsexperten, um die erforderlichen Modifikationen am System durchzuführen. 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. Die Kosten werden jedoch möglicherweise wegen schlüsselfertiger Lieferung nicht separat sichtbar.

Ähnlich problematisch können ungeplante Veränderungen oder Variationen in einem Bildauswertesystem sein, etwa eine Beleuchtungsänderung durch Verschmutzung der Lichtquelle oder Rostflecken 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 (dafür können Einstellungsmöglichkeiten vorhanden sein), sondern in der Schwierigkeit, das Fehlverhalten vorauszusehen. Wir sprechen deshalb vom 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.

Dieser Beitrag befaßt sich vorwiegend mit dem Konfigurierungsproblem, berührt aber auch das Prädiktionsproblem. Beiden Problemkreisen ist eine tieferliegende Ursache gemeinsam: ein Mangel an Formalisierung und theoretischer Durchdringung der Expertise, die beim Einrichten einer Bildverarbeitungsanlage erforderlich ist. Lösungsmöglichkeiten für dieses Dilemma sind grundsätzlich dadurch zu erwarten, daß systematische und formale Ansätze vorgesehen werden, wo bisher menschliche Expertise, ad-hoc Lösungen und Probierverfahren vorherrschen.

In den folgenden Abschnitten wird untersucht, wie ein aus der Künstlichen Intelligenz (KI) kommender Ansatz, die Modellierung von menschlicher Expertise durch ein Expertensystem, auf die Konfigurierungsproblematik von Bildverarbeitungssystemen angewendet werden kann. Der Gedanke ist noch relativ jung, und über unmittelbar relevante Forschungsarbeiten ist erst wenig bekannt (*Liedtke et al. 85, Neumann 85, Syska 86*). Das wissenschaftliche Umfeld erlaubt es jedoch, die Möglichkeiten einer automatischen Konfigurierung von Bildverarbeitungssystemen in einigem Detail zu erörtern.

Der folgende Abschnitt befaßt sich zunächst mit Expertensystemen zur Konfigurierung - kurz: Konfigurierungssystemen - und deren Eigenschaften und Problemen. Der Stand der Kunst in diesem Problembereich ist wichtig, um im dritten Abschnitt über Konfigurierungssysteme für Bildverarbeitungsanlagen sprechen zu können. Dort werden die Grundformen möglicher Systemarchitekturen herausgearbeitet und zu existierenden Ansätzen in Beziehung gebracht.

Im vierten Abschnitt wird über ein konkretes Konfigurierungssystem berichtet, das im

Arbeitsbereich des Autors entwickelt und implementiert wurde (*Syska 86*). Das System unterstützt die Komponentenauswahl und -konfigurierung für Sichtprüfungsprobleme, also einen eingeschränkten Aufgabenbereich.

2. Expertensysteme zur Konfigurierung

Expertensysteme sind eine besondere Art wissensbasierter Systeme, die die Rolle von menschlichen Experten übernehmen können. Ihr grundsätzlicher Aufbau geht aus Abbildung 1 hervor.

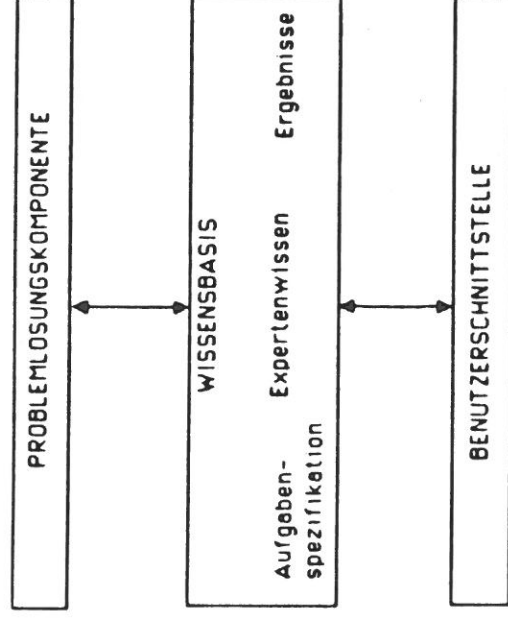


Abbildung 1: Aufbau eines Expertensystems

Hauptbestandteil eines Expertensystems ist die Wissensbasis, die im wesentlichen statisches Expertenwissen in Form von Regeln sowie dynamisches Faktenwissen über die Aufgabenstellung und über die Resultate enthält. Die Problemlösungskomponente ist unabhängig von der jeweiligen Aufgabenstellung und hat die Funktion, Regeln aus der Wissensbasis zur Anwendung zu bringen, bis das gewünschte Ziel erreicht ist. Dabei wird die Faktenbasis sukzessive verändert.

Unser Interesse gilt hier Expertensystemen für Konfigurierungsprobleme. Wir wollen in diesem Abschnitt in der gebotenen Kürze untersuchen, welche Probleme bei Konfigurierungsanwendungen generell zu bewältigen sind und wie der Stand der Kunst ist.

Ein Konfigurierungssystem gehört zur Klasse der Konstruktionssysteme. Im Gegensatz zu Diagnosesystemen wird das Resultat nicht aus einer Menge möglicher Resultate selektiert sondern muß erst aus Komponenten aufgebaut ("konstruiert") werden. Bei einem Konfigurierungssystem ist das Resultat eine aus Komponenten aufgebaute Konfiguration, die die Aufgabenstellung sowie allgemeingültige Bedingungen befriedigen muß. Ein bekanntes Beispiel ist das Konfigurierungssystem XCON (früher R1), das DEC-Rechenanlagen aus vorgegebenen Komponenten konfigurieren kann und seit mehreren Jahren gewinnbringend firmenintern im Einsatz ist (McDermott 82). Ähnlich erfolgreich ist das System SICON-FEX, mit dem das Betriebssystem von SICONP-Rechnern der Firma Siemens konfiguriert werden kann (Haugeneder et al. 85). Ein universelles Konfigurierungssystem für technische Systeme wird in Vitins 86 vorgestellt. Ein solches System könnte ggf. Grundlage für ein System zur Konfigurierung von Bildverarbeitungsanlagen sein.

Die Probleme beim Aufbau eines Konfigurierungssystems lassen sich grob in die zwei Bereiche Wissensrepräsentation und Ablaufsteuerung unterteilen. Zunächst sollen Aspekte der Wissensrepräsentation erörtert werden. Eine grundlegende Voraussetzung für den Einsatz von Expertensystemtechnologie ist die Formalisierbarkeit des für eine Aufgabe relevanten Wissens. Formalisieren bedeutet hier, daß Wissensseinheiten und ihre Beziehungen untereinander nach festen Vorschriften rechnerintern repräsentiert werden. Ein Expertensystem ist natürlich nur in dem Maße Experte, wie es über intern repräsentiertes Expertenwissen verfügt. Hinsichtlich der Konfigurierung von Bildverarbeitungssystemen läßt sich an dieser Stelle schon folgendes erkennen: Bildverarbeitung ist zwar ein weitgehend formal beschreibbares Wissensschaftsgebiet, der Aufbau von Bildverarbeitungssystemen enthält aber wie oben geschildert noch zahlreiche Unwägbarkeiten, die auf das Fehlen entsprechenden Wissens hinweisen. Hier sind beim Aufbau der Wissensbasis Probleme zu erwarten.

Gegenstand der Konfigurierung sind die Objekte, aus denen eine Konfiguration aufgebaut wird. Sie müssen mit allen relevanten Eigenschaften in der Wissensbasis repräsentiert werden. Bei einem Konfigurierungsproblem kommt es in erster Linie auf Eigenschaften an, die die wechselseitige Kompatibilität von Objekten sowie ihre Kompatibilität mit der Aufgabenstellung betreffen. Bei den Objekten von XCON, beispielsweise, handelt es sich um Rechnerkomponenten, die durch Eigenschaften wie Platzbedarf, Stromverbrauch, Steckertyp etc. charakterisiert werden.

Es hat sich gezeigt (Raulefs 85), daß für viele Probleme eine Repräsentation in zwei Präzisionsstufen sinnvoll ist. Beispielsweise könnte man bei einer räumlichen Konfigurierung zunächst von angenäherten einfachen Objektformen ausgehen und damit schnell zu einer Lösung kommen, die dann anschließend unter Zugrundelegung der exakten Objektformen verifiziert werden müßte. Dies ist auch in analoger Form für Bildverarbeitungsanlagen gültig, wie im nächsten Abschnitt gezeigt wird.

Zur Wissensbasis gehört auch das Aufgabenwissen, also eine formale Repräsentation der

konkreten Konfigurierungsaufgabe. Im Falle von XCON handelt es sich hierbei um eine Liste von vorgegebenen Rechnerkomponenten, deren formale Beschreibung kein besonderes Problem darstellt. Für die Bildverarbeitungskonfigurierung kann eine formale Aufgabenbeschreibung wesentlich schwieriger sein. Man denke z.B. an Sichtprüfungsaufgaben wie "richtigen Sitz des Sicherungssplintes prüfen" oder "Bremsscheiben nach Lunkern untersuchen". Abgesehen vom Repräsentationsproblem im Einzelfall sind Bildverarbeitungsaufgaben auch deshalb problematisch, weil man mit einer kaum eingrenzbaren Fülle von Aufgabenvarianten rechnen muß. Das Repräsentationswerkzeug muß also sehr allgemein sein, es sei denn, der Aufgabenbereich wird zur Bewältigung dieser Problematik eingeschränkt.

Zum Expertenwissen gehört auch Wissen über das richtige Vorgehen beim Konfigurieren, also eine Art von Metawissen. Dies leitet zum zweiten größeren Problembereich bei Konfigurationssystemen über, zur Ablaufsteuerung. XCON bietet das Beispiel eines Systems, das sein Ziel völlig geradlinig erreicht, ohne daß eine Entscheidung wieder rückgängig gemacht werden muß. Dies ist allerdings keineswegs typisch für ein Konfigurierungsproblem. Eine Konfigurierungsaufgabe kann im allgemeinen mit einem Puzzle verglichen werden, bei dem sich nicht sofort erkennen läßt, ob eine lokale Entscheidung mit dem globalen Ziel verträglich ist. Man muß also damit rechnen, daß Entscheidungen wieder rückgängig gemacht und Alternativen erkundet werden müssen. Diese Problematik ist bei Planungssystemen in einiger Tiefe untersucht worden (*Sacerdoti 77, Tate 85*). Die dort entwickelten Konzepte und Strategien lassen sich zum Teil auch auf Konfigurierungsprobleme übertragen (letztere stellen die allgemeinere Problemklasse dar). Eines dieser Konzepte ist die Hierarchisierung des Lösungsraumes. Eine Konfiguration wird dabei auf verschiedenen Abstraktionsebenen betrachtet. Die oberste Abstraktionsebene enthält die grösste Sicht, jede weitere Ebene enthält die Verfeinerungen von Komponenten der darüberliegenden Ebene. Durch geschickte Zerlegung nach dem Modularisierungsprinzip entsteht ein Baum, dessen Zweige geringe Abhängigkeit voneinander haben, weil stark abhängige Komponenten in einem Zweig zusammengefaßt sind. Folgt man beim Konfigurieren dieser Baumstruktur, so ist das Problem spät erkennbarer Konflikte entschärft, wenn auch im allgemeinen nicht beseitigt. XCON ist ein System, das Backtracking durch gut überlegte Zerlegung der Konfigurierungsaufgabe in geeignete Teilaufgaben völlig vermeiden kann. Inwieweit dies auch bei Konfigurationssystemen für Bildverarbeitungsanlagen möglich sein wird, muß sich erst zeigen. Eine Hierarchisierung sollte auf jeden Fall versucht werden.

Geht man davon aus, daß Backtracking unvermeidlich ist, so kann der Suchaufwand durch sog. "intelligentes Backtracking" in Grenzen gehalten werden. Darunter versteht man Verfahren, die es vermeiden, mehr Entscheidungen als notwendig wieder rückgängig zu machen. Das kann dadurch erreicht werden, indem über die wechselseitigen Abhängigkeiten Buch geführt wird (*de Kleer 86*). Entscheidungen, die durch einen Konflikt nicht berührt werden, können auf diese Weise erkannt und aufrecht erhalten werden.

3. Grundformen der rechnergestützten Konfigurierung von Bildverarbeitungsanlagen

Wir gehen nun näher auf die Konfigurierungsproblematik von Bildverarbeitungsanlagen ein und untersuchen, welche Grundformen rechnergestützter Konfigurierung möglich sind. Dabei werden Anforderungen an das zu repräsentierende Wissen deutlich. Wir werden auf existierende Ansätze und Entwicklungslinien eingehen, die in diesem Zusammenhang von Bedeutung sind.

Abbildung 2 zeigt die wichtigsten Komponenten einer Sichtprüfanlage, mit der die Länge eines Werkstückes überprüft werden soll. Die Konfigurierung einer solchen Anlage soll in der folgenden Diskussion stellvertretend für andere Aufgaben betrachtet werden.

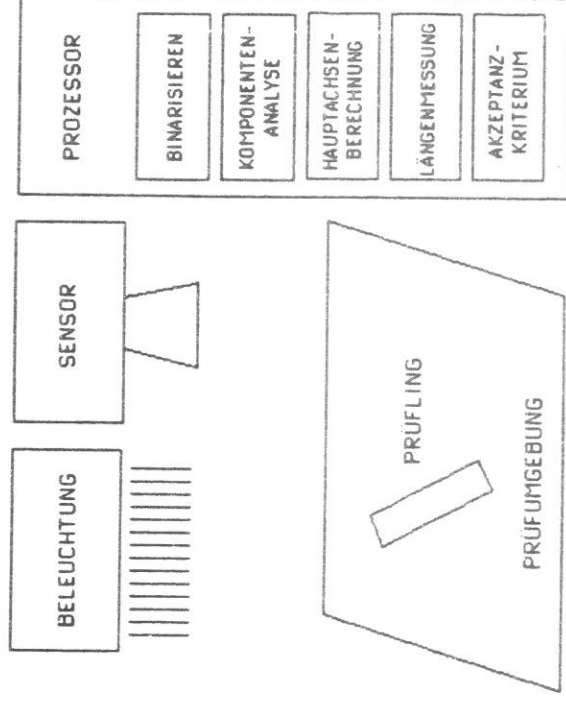


Abbildung 2: Komponenten einer Sichtprüfanlage

Konfigurierungsobjekte sind Geräte (Beleuchtung, Sensor, Prozessor, Prüfumgebung) und Methoden (Binarisieren, Komponentenanalyse, etc.). Unter Konfigurierung verstehen wir Auswahl (Selektion), Zusammenfügen (Komposition) und Anpassen (Adaption) von Objekten. Das Selektionsproblem ist der Kern der Konfigurierungsproblematik. Hier geht es darum, geeignete Geräte und Methoden für eine vorgegebene Aufgabe unter Verwendung von Konfigurierungswissen auszuwählen. Das Kompositionsproblem bezieht sich auf die Struktur der Anlage. Bei Geräten geht es vorwiegend um die räumliche Anordnung, bei Methoden um deren zeitlichen und logischen Zusammenhang. Die Freiheitsgrade zur Anor-

dung von Geräten sind beträchtlich. Dagegen zwingt die innere Logik der ausgewählten Methoden meist eine bestimmte Ablaufstruktur auf, so daß das Kompositionsproblem bereits weitgehend bei der Methodenauswahl gelöst wird. Das Adaptionproblem ergibt sich daraus, daß Konfigurierungsobjekte häufig parametrisiert sind, d.h. über einstellbare Parameter verfügen. Man denke an Binarisierung durch Schwellwertvergleich, an Kantensfinder mit einstellbarer Fenstergröße und frei wählbarem Schwellwert für den Gradientenbetrag, an Grenzwerte für minimale Bereichsgrößen und Kantenlängen, an die Beleuchtungsstärke einer Lichtquelle, etc. Soweit die Parameter aufgrund der Aufgabenstellung und der sich daraus ergebenden Konsequenzen festgelegt werden, kann dieser Teil der Konfigurierung auch als Selektion verstanden werden (Selektion einer Methodenausprägung). Die Parameteradaptation wird dann zu einem besonderen Verfahren, wenn sie durch ein Bewertungskriterium gesteuert wird, das eine schrittweise Veränderung von Parametern im Sinne einer Optimierung erlaubt. Ein solches Kriterium kann sich z.B. auf die Auswertung von Testläufen stützen.

Unter Adaption soll im folgenden nur ein derartiges Verfahren verstanden werden. Weiterhin gehen wir davon aus, daß Selektion und Komposition in einem Verfahren zusammengefaßt sind, so daß also nur noch zwischen Komponentenselektion und Parameteradaptation unterschieden werden muß.

Wir erläutern jetzt, welche Formalisierungsschritte erforderlich sind, um eine rechnergestützte Konfigurierung durch Komponentenselektion und Parameteradaptation durchführen zu können, und inwieweit diese Schritte nach dem heutigen Stand der Kunst bereits vollzogen werden können.

Komponentenselektion

Zur rechnergestützten Auswahl von Geräten und Methoden für eine vorgegebene Aufgabe ist eine formale, rechneradäquate Repräsentation aller Problembestandteile erforderlich. Diese sind

- (i) Aufgabenstellung,
- (ii) Konfigurierungswissen, sowie
- (iii) Geräte und Methoden.

Die Aufgabenstellung umfaßt Angaben über Prüflinge, Prüfstelle und Prüfaufgabe. Dies ist die Terminologie der VDI/VDE-Richtlinien für die automatisierte Sichtprüfung (VDI/VDE 85). Die in den Richtlinien im einzelnen niedergelegte Gliederung und begriffliche Klärung stellt einen wertvollen Beitrag zur Formalisierung dieser Aufgabenklasse dar.

Bei einem Konfigurierungssystem ist es sinnvoll, die Aufgabenspezifikation durch Befragen des Benutzers zu ermitteln. Die Angaben müssen dabei mit der Genauigkeit und mit den Attributen erfolgen, die zur Unterstützung der Konfigurierungsaufgabe erforderlich sind. Im einfachsten Fall kann die Aufgabenbeschreibung in einer Form erfolgen, aus der die Konfiguration unmittelbar hervorgeht. Der Benutzer des Konfigurierungssystems könnte bei der Aufgabenspezifikation beispielsweise gefragt werden:

Kann eine Zeilenkamera verwendet werden?

Ist Binärbildverarbeitung möglich?

Welche Merkmale sollen berechnet werden?

Eine solche Aufgabenrepräsentation reduziert das Konfigurierungssystem auf eine Dialogkomponente und verlangt dem Benutzer die entscheidende Expertise ab. Eine interessantere Lösung ergibt sich, wenn die Aufgabenspezifikation mithilfe einer Klasseneinteilung erfolgt, wie sie in *VDI/VDE 85* in grober Form zu finden ist. Der Benutzer gibt z.B. die Aufgabenklasse "Objekterkennung" an und spezifiziert Prüfmerkmale, Ausprägungen je Objektklasse und Toleranzen. Diese Angaben erfordern keinerlei Bildverarbeitungs-Expertise, entsprechen also dem Konzept einer Konfigurierung durch Laien.

Für eine weitergehende Konzeption des Konfigurierungssystems kann es erforderlich sein, die Eigenschaften von Prüfling und Prüfstelle sehr detailliert zu spezifizieren, z.B. photometrische Oberflächeneigenschaften, 3D-Formen von Objekten und von Defekten, etc. Eine in diesem Sinn "vollständige" Aufgabenspezifikation ist die Voraussetzung für eine Simulation der Bildverarbeitungsanlage. Dazu müssen die relevanten Eigenschaften des gesamten Bildverarbeitungssystems rechnerintern nachgebildet werden. Die Möglichkeit einer Simulation bietet zweifellos große Vorteile, wenn es um die Vorhersage der Systemperformanz geht. Wir werden weiter unten näher darauf eingehen. Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß Ansätze zu einer formalen Aufgabenrepräsentation in Gestalt fachlicher Systematisierungen vorliegen. Für weitergehende Repräsentationsanforderungen kommen Techniken infrage, wie sie in den Bereichen CAD und Computer Graphik entwickelt worden sind (eine Übersicht findet sich in *Requicha 80*).

Der zweite Problembestandteil ist das Konfigurierungswissen. Darunter soll aufgabenspezifisches fachliches Wissen verstanden werden, das bei der Konfigurierung einer Bildverarbeitungsanlage herangezogen wird. Beispielsweise wissen wir, daß Binärbildverarbeitung möglich ist, wenn Prüfling und Prüfumgebung disjunkte Bereiche in der Grauwertskala einnehmen. Außerdem wissen wir, daß der Kontrast zwischen Prüfling und Umgebung bei Gegenlicht besonders groß ist. Dies sind Beispiele für Wissen, die eine Repräsentation in Form von Produktionen nahelegen, also Regeln mit einer WENN-DANN-Struktur.

WENN: hoher Kontrast zwischen Prüfling und Umgebung erwünscht ist, und

eine Gegenlichtanordnung möglich ist,
DANN: wähle Gegenlichtanordnung.

Die rasche Formulierbarkeit von Regeln soll jedoch nicht darüberhinwegtäuschen, daß die Begriffe und Prädikate in den Bedingungs- und Aktionsteilen der Regeln sorgfältig aufeinander abgestimmt werden müssen, damit eine konsistente und operationale Wissensbasis entsteht. Beispielsweise wäre zu überlegen, ob die Konsequenz der Gegenlichtentscheidung, nämlich ein hoher Kontrast, in den DANN-Teil mit aufgenommen werden sollte. Der hier sichtbar werdende Entwurfsspielraum und das Fehlen einer Entwurfsmethodik kennzeichnen das Problem des "Knowledge Engineering", also des Überführens von menschlicher Expertise in eine rechnerinterne Repräsentation.

Der in Abschnitt 4 vorgestellte Ansatz wird verdeutlichen, daß ein beträchtlicher Teil des Konfigurierungswissens objektorientiert repräsentiert werden kann, also nicht unbedingt in Regelform. Dies betrifft besonders die Vorbedingungen, die zum Einsatz einer Methode erfüllt sein müssen. Ist z.B. für die Längenmessung eines Objektes eine Längsrichtung erforderlich, so kann dies als Vorbedingung in der Methodenbeschreibung abgelegt werden. Eine Konfigurierungsregel diesen Inhaltes entfällt dann. Auch dies ist ein Hinweis auf die vielen Freiheitsgrade, die man bei der Abbildung des Konfigurierungsproblems auf eine Expertensystemarchitektur hat.

Wir wenden uns jetzt dem dritten Problembestandteil zu, den Konfigurationsobjekten. Dies sind in unserem Fall Geräte und Methoden. Sie stellen gewissermaßen das Repertoire des Konfigurierungssystems dar. Ihre Repräsentation muß auf die Konventionen der Aufgabenspezifikation und der Konfigurierungsregeln abgestimmt sein, denn Konfigurierungsregeln stellen ja einen Zusammenhang zwischen Aufgabe und Konfigurationsobjekten her. Es wurde bereits darauf hingewiesen, daß die Verwendung eines bestimmten Methodenbausteins meist starke Restriktionen hinsichtlich vorausgehender oder nachfolgender Verarbeitungsschritte impliziert. Eine Methode wird deshalb durch Schnittstellenbedingungen zu charakterisieren sein. Sie entsprechen den lokalen Zwangsbedingungen eines allgemeinen Konfigurierungsproblems und betreffen hier im wesentlichen Kompatibilitätsanforderungen an die Datentypen aufeinanderfolgender Methoden. Strikte Typengleichheit ist eine zu starre Forderung. Sei A der Datentyp der Ausgangsdaten und E der Datentyp der Eingangsdaten. A ist mit E kompatibel, wenn

- (i) A ein strukturierter Datentyp ist, E Substruktur von A ist, und alle Komponenten von E mit den entsprechenden Komponenten von A kompatibel sind, oder
- (ii) A und B einfache Datentypen sind und der Wertebereich von A im Wertebereich von B enthalten ist.

Einen nützlichen Grundstock für die hier erforderliche Formalisierung von Bildverarbeitungsmethoden stellen Unterprogrammbibliotheken dar, die für interaktive Bildverarbei-

tungssysteme aufgebaut worden sind, z.B. das DIBIAS-System (Triendl et al. 82). Die Interaktion erfolgt mittels einer Kommandosprache, wird jedoch auch durch eine systematische rechnerinterne Repräsentation wichtiger Unterprogrammeigenschaften unterstützt. Ebenfalls von Bedeutung sind Unterprogrammsammlungen wie SPIDER (Tamura et al. 88), die zumindest als umfassender Katalog (SPIDER enthält mehr als 400 FORTRAN-Unterprogramme) beim Aufbau eines Konfigurierungssystems nützlich sein können. Eine Übersicht über interaktive Bildverarbeitungssysteme und Programmbibliotheken findet sich in Haarslev 86. Zusammenfassend läßt sich sagen, daß interaktive Bildverarbeitungssysteme geeignete Ausgangspunkte für die Entwicklung eines Methodenrepertoires darstellen. Sie unterstützen jedoch vorwiegend technische Aspekte, z.B. Kompatibilitätsfragen. Hilfestellungen hinsichtlich der Eignung von Methoden für bestimmte Aufgaben sind meist nur informell auf Kommentarebene vorgesehen.

Parameteradaption

Parameteradaption wurde weiter oben als ein Verfahren definiert, bei dem eine Konfiguration durch schrittweise Modifikation von freien Parametern optimiert wird. Durch Parameteradaption wird eine Feineinstellung vorgenommen, die als Ergänzung der Komponentenselection aufgefaßt werden kann. Darüberhinaus bietet eine automatische Parameteradaption die Möglichkeit, den ungewollten Veränderungen in einer Bildverarbeitungsanlage zu begegnen, auf die in der Einleitung hingewiesen wurde.

Parameteradaption vollzieht sich in einem Kreisprozeß mit folgender grundsätzlicher Struktur (Abbildung 3).

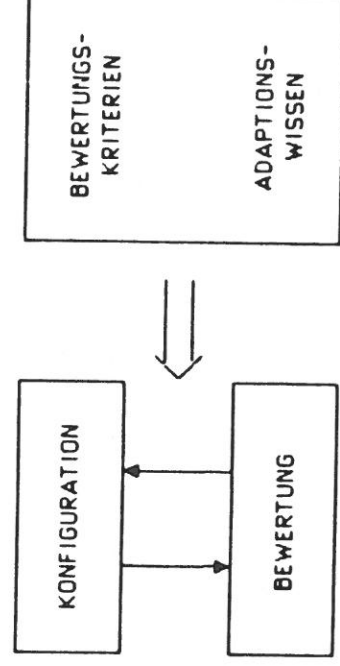


Abbildung 3: Schema der Parameteradaption

Eine Konfiguration wird bewertet (Pfeil nach unten), auf Grund der Bewertung werden

die Parameter der Konfiguration modifiziert (Pfeil nach oben). Das ganze ist ein wissenschaftlicher Prozeß, der durch Bewertungskriterien und Wissen über geeignete Parametermodifikationen gesteuert wird.

Die naheliegendste Bewertungsmethode besteht darin, das Bildverarbeitungssystem auszuprobieren. Zeigt das System in den Testläufen nicht das gewünschte Verhalten, so müssen die Parameter entsprechend modifiziert werden. Wir sind daran interessiert, diesen Prozeß zu formalisieren, um ihn einem Rechner übertragen zu können. Dabei gibt es ein Spektrum von möglichen Zielvorstellungen, je nach dem, welche Rolle dem Menschen einerseits und der konkreten Bildverarbeitungsanlage andererseits zugeordnet wird.

Zielt man darauf ab, den menschlichen Experten überflüssig zu machen, müssen alle Komponenten in Abbildung 3 formalisiert und rechnerintern repräsentiert werden. Man kommt zu einem System mit automatischer Parameteradaptation ohne Lehrer. Unabhängig davon kann man versuchen, die Parameteradaptation an einer simulierten Konfiguration vorzunehmen, also ohne eine konkrete Bildverarbeitungsanlage. Wir sprechen dann von einer Parameteradaptation durch Simulation. Beide Entwicklungsrichtungen lassen sich kombinieren und führen auf Adaptionssysteme mit unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten.

Der Ansatz von Liedtke und Mitarbeitern (*Liedtke et al. 85, Ender und Liedtke 86*) stellt einen wichtigen Meilenstein in diesem Problembereich dar. Das von ihnen entwickelte System ist selbstadaptierend, d.h. die Parameteradaptation findet automatisch ohne menschlichen Eingriff statt. Das Verfahren läuft parallel zu konkreten Bildverarbeitungsvorgängen ab, basiert also nicht auf Simulation.

Der Simulationsansatz steckt noch in den Kinderschuhen. Es wird zur Zeit an verschiedenen Stellen untersucht (*Strecker 86, Weber 86*), ohne daß konkrete Systeme vorzuweisen sind. Seine Vorteile liegen auf der Hand. Durch die Simulation einer konfigurierten Bildverarbeitungsanlage kann ihre Performanz ohne den kostspieligen Aufbau eines konkreten Systems verifiziert werden. Simulation kann sowohl für Komponentenselektion als auch Parameteradaptation nützlich sein.

Wie realistisch ist das Ziel, eine Bildverarbeitungsanlage zu simulieren? Offenbar liegen die Schwierigkeiten vorwiegend im Bereich der Bildentstehung. Die Bildverarbeitung vollzieht sich weitgehend algorithmisch und kann durch Exekution der gewählten Methoden simuliert werden. Spezielle Bildverarbeitungshardware müßte ebenfalls algorithmisch beschrieben werden. Eine Simulation der Bildentstehung erscheint zumindest in eingeschränkten Problemklassen aufgrund von Fortschritten in verschiedenen Disziplinen denkbar. Computer Graphik Methoden erlauben die Synthese von hochrealistischen Bildern mit Spiegelungen, Texturen und anderem Detail, das das Verhalten von Bildanalysealgorithmen beeinflusst und deshalb für eine realistische Prädiktion erforderlich ist. Aus den Bereichen CAD/CAM stehen Repräsentationsmethoden für Objektformen zur Verfügung, möglicherweise sogar die erforderlichen Objektmodelle selbst, so daß die abzubildenden

Gegenstände in eine rechnerinterne Form gebracht werden können. Schließlich sei auch auf die Entwicklung von wissensbasierten Methoden in der Bildverarbeitung hingewiesen, bei denen die Abhängigkeit von bildformierenden Größen explizit gemacht wird. Dadurch kann z.B. der Effekt von Unsicherheiten im Bereich der Ausgangsdaten, etwa der Beleuchtung, leichter verfolgt werden, so daß realistische Vorhersagen über die Systemperformanz möglich werden.

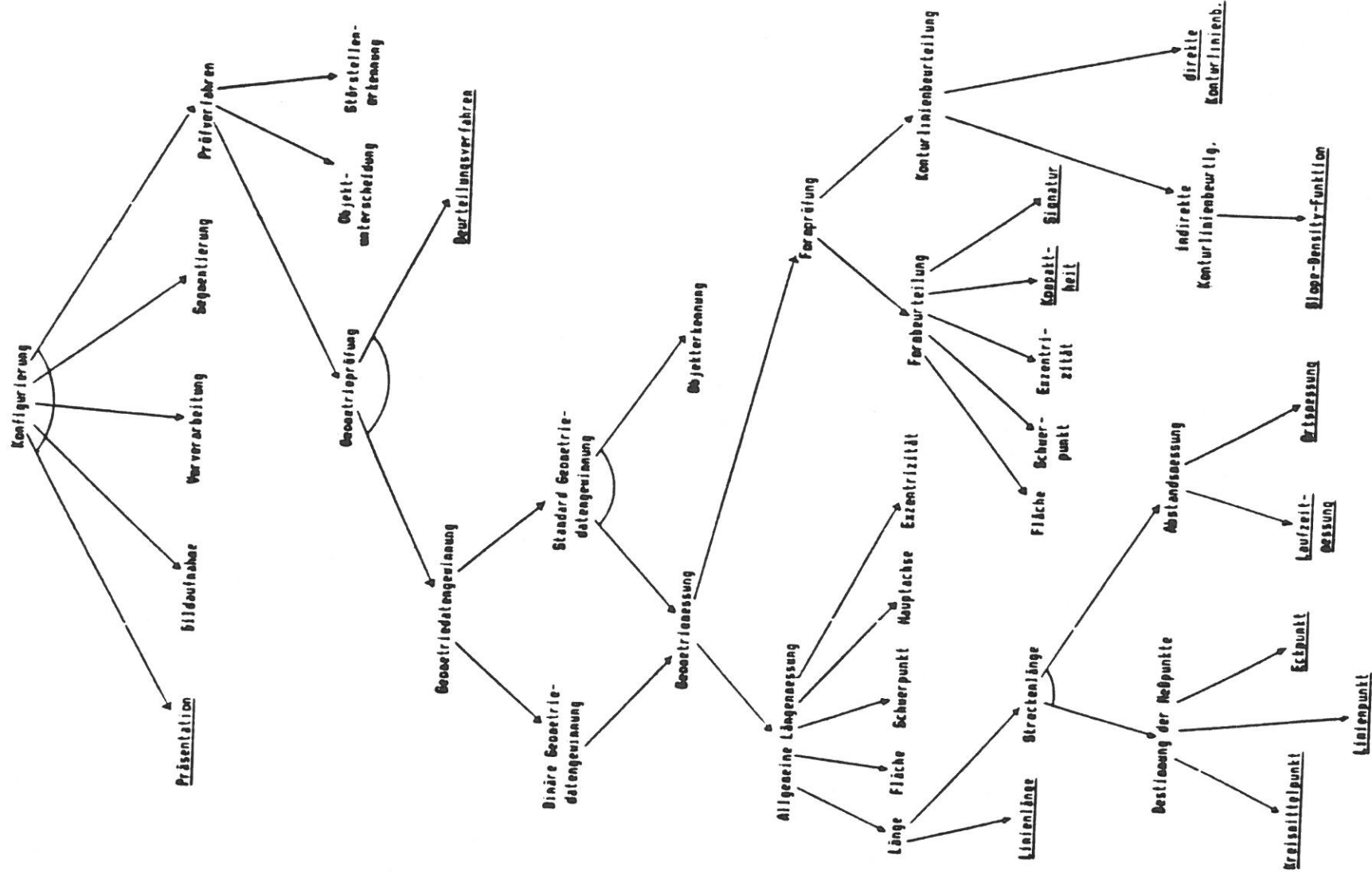


Abbildung 4: Ausschnitt aus dem Methodengraphen von BIKOS

Der Auswahlteil erlaubt die Formulierung von Bedingungen, die entweder auf die Aufgabenstellung Bezug nehmen (z.B. 'Fremdlicheinfall gering') oder aber gegenseitige Abhängigkeiten betreffen, insbesondere Anforderungen an Eingangsdaten. Fakten, die diese internen Bedingungen befriedigen können, werden erst bei Methodenselektion (durch den Aktionsteil des Methodenschemas) oder mithilfe von Konfigurierungswissen erzeugt. Konfigurierungswissen ist in BIKOS in Gestalt von Kriterien repräsentiert, die zum Erwerb, zur Aufnahme und zur Auswertung von Wissen über die aktuelle Aufgabenstellung dienen. Z.B. kann die Bedingung 'Fremdlicheinfall gering', die im Auswahlteil einer Methode aufgeführt wird, durch Instantiierung des Kriterien-Schemas 'Fremdlicheinfall' evaluiert werden.

KRITERIUM

[Name]	Fremdlicheinfall
[Modus]	Frage
[Fragetext]	Wie stark ist der Fremdlicheinfall?
[Default]	Mittel
[Alternativwerte]	Gering, Stark

In diesem Fall führt die Instantiierung des Kriteriums zu einer Frage an den Benutzer. Andere Kriterien leiten die gewünschte Information aus vorhandenen Fakten ab.

Fragen werden normalerweise in einer Spezifizierungsphase gebündelt, die der Konfigurierungsphase vorausgeht. Die Spezifizierung stützt sich auf die Systematik, die in *VDI/VDE 85* für die Spezifikation von Sichtprüfungsaufgaben niedergelegt ist. Sie wird durch einen UND/ODER-Baum gesteuert genau wie die Konfigurierung.

Der Ablauf des Konfigurierungsprozesses wird durch die bisher vorgestellten Wissensstrukturen nicht gesteuert. Dies obliegt einer separaten Ablaufsteuerung (einer Metawissensstruktur). In BIKOS ist eine Tiefensuche realisiert, bei der der Methodenbaum systematisch von der Wurzel aus nach einer möglichen Konfiguration abgesucht wird. Diese Reihenfolge zieht besonders viel Nutzen aus der hierarchischen Struktur, weil gegenseitige Abhängigkeiten vorwiegend in lokalen Bereichen des Graphen gebündelt sind und auf diese Weise ein Backtracking in Grenzen gehalten werden kann. Es ist jedoch durchaus denkbar, daß die Suche irgendwo im Baum beginnt, z.B. mit einer vom Benutzer vorgegebenen Methode.

BIKOS ist in OPS5 auf einer VAX-780 implementiert und umfaßt zur Zeit ca. 10.000 Zeilen bzw. 344 Regeln.

5. Zusammenfassung

Bildverarbeitungsanlagen für den industriellen Einsatz können bisher noch nicht in dem Maße wirtschaftlich eingesetzt werden, wie es in früheren Prognosen vorhergesagt worden war. Einer der Gründe ist das Konfigurierungsproblem: Das Einrichten einer Bildverarbeitungsanlage und das Anpassen an eine neue Aufgabe kann nur durch Bildverarbeitungsexperten erfolgen und ist deshalb mit hohen Kosten verbunden. In diesem Beitrag wurden die Voraussetzungen für die Verwendung von Expertensystemen zur Konfigurierung von Bildverarbeitungsanlagen untersucht. Konfigurierungssysteme sind für andere Anwendungen bereits erfolgreich entwickelt worden, ihre Eigenschaften und Probleme werden weitgehend verstanden. Die Konfigurierung von Bildverarbeitungsanlagen läßt sich in Komponentenselektion und Parameteradaptation zerlegen. Für beide Teilprobleme ist eine Formalisierung von Wissen erforderlich, das bisher von menschlichen Experten als Erfahrungswissen eingebracht wurde oder zum Fachwissen zu rechnen ist. Es wurden verschiedene Quellen aufgezeigt, die zu dieser Formalisierung beitragen. Ein konkreter Ansatz wurde in größerem Detail vorgestellt. Die bisher vorliegenden Ergebnisse decken erst einen Teil der Konfigurierungsproblematik ab. Wir befinden uns am Anfang einer interessanten Entwicklung.

6. Literatur

- de Kleer 86
An Assumption-Based TMS
J. de Kleer
Artificial Intelligence 28 (1986), 127-162
Ender und Liedtke 86
Repräsentation der relevanten Wissensinhalte in einem selbstadaptierenden
regelbasierten Bilddeutungssystem
M. Ender, C.-E. Liedtke
(in diesem Band)
Haarslev 86
Interaktion in Systemen zur Bildfolgenauswertung basierend auf einem
objektorientierten Ansatz
V. Haarslev
Dissertation, Fachbereich Informatik, Universität Hamburg, 1986
Haugeneder et al. 85
Knowledge-Based Configuration of Operating Systems - Problems in Modeling
the Domain Knowledge
H. Haugeneder, E. Lehmann, P. Struß
in: W. Brauer, B. Radig (Hrsg.), Wissensbasierte Systeme,
Informatik Fachberichte 112, Springer 1985, 121-134
Liedtke et al. 85
Komponenten eines adaptiven Bildverarbeitungssystems zur
Lageerkennung von Objekten
C.-E. Liedtke, M. Ender, M. Henser
in: H. Niemann (Hrsg.), Mustererkennung 85, Informatik Fachberichte 107,
Springer 1985, 165-169
McDermott 82
R1: A Rule-Based Configurer of Computer Systems
J. McDermott
Artificial Intelligence 19 (1982), 39-88
Neumann 85
Rechnergestützte Konfigurierung von Bildverarbeitungssystemen
B. Neumann
Proc. 1. Internationale Fachtagung "Automatische Bildverarbeitung",
Kammer der Technik, DDR, 1985, P4/1- P4/4
Raulefs 85
Knowledge Processing Expert Systems
P. Raulefs
in: T. Bernold, G. Albers (Hrsg.), Artificial Intelligence:
Towards Practical Applications,
North Holland 1985, 21-32

- Requicha 80
Representations for Rigid Solids: Theory, Methods and Systems
A.A.G. Requicha
ACM Computing Surveys 12 (1980), 437-464
- Rosen 79
Machine Vision and Robotics: Industrial Requirements
C.A. Rosen
in: G.G. Dodd, L. Rossol (Hrsg.), Computer Vision and Sensor-Based Robots,
Plenum Press, 1979, 3-19
- Rossol 82
Computer Vision in Industry
L. Rossol
in: A. Pugh (Hrsg.), Robot Vision, Springer 1983, 11-18
- Sacerdoti 77
A Structure for Plans and Behavior
E.D. Sacerdoti
American Elsevier Publ. Company, 1977
- Selfridge 55
Pattern Recognition and Modern Computers
O.G. Selfridge
Western Joint Computer Conference 1955, 91-93
- Syska 86
Ein Expertensystem-Ansatz für die automatische Konfigurierung
von industriellen Bildverarbeitungsanlagen
I. Syska
Diplomarbeit, Fachbereich Informatik, Universität Hamburg, 1986
- Strecker 86
private Kommunikation
H. Strecker
Philips Forschungslaboratorium, Hamburg, 1986
- Tate 85
A Review of Knowledge-Based Planning Techniques
A. Tate
Proc. Expert Systems 85, M. Merry (Hrsg.), Cambridge Univ. Press 1985, 89-111
- Tamura et al. 83
Design and Implementation of SPIDER - A Transportable Image
Processing Software Package
H. Tamura, S. Sakane, F. Tomita, N. Yokoya, M. Kaneko, K. Sakauc
Computer Vision, Graphics, and Image Processing, Vol. 23 (1983), 273-294
- Triendl et al. 82
Design of an Interactive Picture Processing System
E. Triendl, R. Fiedler, H. Helbig, G. Kritikos, D. Kübler, M. Lehner
Proc. of the IEEE Computer Society Conference on Pattern
Recognition and Image Processing, June 14-17, Las Vegas, Nevada 1982, 534-536

VDI/VDE 85

Automatisierte Sichtprüfung - Beschreibung der Prüfaufgabe
VDI/VDE-Handbuch Messtechnik II, Beuth Verlag, 1985

Vitins 86

A Prototype Expert System for Configuring Technical Systems
M. Vitins

Proc. Knowledge-Based Systems in Industry, I. Kriz (Hrsg.),
KLR 86-54C, Brown Boveri Research Center, Baden-Dättwil,
Schweiz, 1986, 146-161

Weber 86

private Kommunikation

J. Weber

URW GmbH, Hamburg, 1986

Winkler 85

Industrielle Anwendung der digitalen Bildauswertung

G. Winkler

Informatik-Spektrum 8/4, Springer 1985, 215-224