

OPTISCHE UND ELEKTRONISCHE BILDVERARBEITUNG

Von F. Holdermann, Karlsruhe

1. Einleitung

Die Bildverarbeitung ist seit Anfang der 60er Jahre als eigenständiges Forschungsgebiet bekannt. Sie hat sich methodisch aus der Zeichenerkennung entwickelt. Deren klassische Dreiteilung in Abtastung, Merkmalsextraktion und Klassifikation konnte jedoch bei der Bildverarbeitung wegen der wesentlich komplexeren Problemstellungen nicht ohne weiteres übernommen werden (Bild 1).

Die Abtastung muß in der Regel mit wesentlich höherer flächenhafter Auflösung vorgenommen werden ($5 - 50 \mu$), die abzutastende Information muß in nicht-binäre Grauwerte ($32 - 256$) zerlegt werden, häufig getrennt für mehrere Spektralkanäle.

Zwischen Abtastung und Merkmalsextraktion tritt bei der Bildverarbeitung das weite Gebiet der Bildvorverarbeitung. Unter Vorverarbeitung sei eine Verarbeitung ohne wesentliche Informationsreduktion verstanden, wie z.B. geometrische oder radiometrische Entzerrungen, Bildfilterungen zur Kontrastverschärfung oder Störunterdrückung. Dies entspricht einer Transformation, bei der in der Regel die Eingangsbildmatrix in eine gleich große Ausgangsmatrix umgewandelt wird. Ein Teil der Operationen bezieht sich nur auf die einzelne Bildpunktinformation, ohne Berücksichtigung der Umgebungsinformation eines Bildpunktes, der weitaus größere Teil der Operationen muß jedoch die jeweiligen Nachbarbildpunkte mit einbeziehen (Bild 2). Man bezeichnet diese Art von Operationen als lokale Operationen, da sie die lokale Umgebungsfläche eines Bildpunktes berücksichtigen. Eine Klassifizierung der einzelnen Vorverarbeitungsmethoden ist in Bild 3 gegeben. Dabei wird unterschieden nach der Art und Weise der Abarbeitung der Bildmatrix, ob in jedem Bildpunkt der gleiche Bildoperator angewendet wird (homogen), oder ob verschiedene Bildoperatoren informationsabhängig ausgewählt werden (inhomogen). Weiterhin wird unterschieden nach linearen und nichtlinearen Operationen.

Im Gegensatz zur Zeichenerkennung, bei der die Merkmalsextraktion hauptsächlich in der Ermittlung von Formkriterien linienhafter Muster bestand, müssen bei der Bildverarbeitung flächenhafte Muster durch Merkmale beschrieben werden. Diese flächenhaften Muster grenzen sich von ihrer Umgebung außerdem nur durch mehr oder weniger stark ausgebildete Grauwertsprünge ab. Zur Beschreibung dieser Muster (Objekte) kann einmal die Grauwertverteilung der Fläche, z.B. Mittelwert und Streuung oder allgemein Grauwertstatistik, oder die Form der Flächenumrandung (Formkriterien) bennutzt werden (Bild 4). Die Flächenumrandung (Kontur) muß hierzu jedoch erst mit speziellen lokalen Operationen ermittelt werden, wie z.B. durch Differentiation, Hochpaßfilterung oder Konturfilterung.

Dem Begriff der Klassifizierung in der Zeichenerkennung entsprechen in der Bildverarbeitung die Begriffe Objektextraktion und Bildbeschreibung. Während die Bildbeschreibung im Idealfalle eine vollständige listenhafte Beschreibung des Bildinhaltes zum Ziele hat, begnügt man sich im einfacheren Falle der Objektextraktion, ein zu analysierendes Bild nach einzelnen wenigen Objekten abzusuchen und evtl. deren Lage und Ausdehnung zu ermitteln. In Bild 5 sind einige Verfahren zusammengestellt, die bisher - meist von einander getrennt - im Rahmen einer Objektextraktion untersucht wurden. Diese Verfahren unterscheiden sich alle von den in der Mustererkennung bekannten, parallel arbeitenden Klassifikatoren. Dort ist das zu klassifizierende Linienmuster zumindest annähernd in seiner Lage und Ausdehnung bekannt, so daß direkt Kriterien extrahiert werden können. Bei der allgemeinen Bildverarbeitung ist dies jedoch nicht der Fall. Hier muß durch entsprechende Hypothesen und anschließende Verarbeitung ein Objekt zuerst lokalisiert werden, bevor es klassifiziert werden kann.

Die Gesamtmenge der Verarbeitungsmethoden lassen sich in zwei große Gruppen unterteilen. Eine Gruppe versucht Objekte über deren Flächen (Flächenwachstumsmethoden) zu extrahieren, die andere Gruppe benutzt hierzu die Objektkontur (Konturverfolgungsalgorithmen). In Abschnitt 3 werden einige Methoden zur Objektextraktion mittels Flächenwachstum und Konturverfolgung beschrieben.

Neben der intensiven Forschung auf dem Gebiet der digital elektrischen Bildverarbeitung werden auch Verfahren und Systeme zur analog optischen Bildverarbeitung untersucht, die insbesondere durch Verwendung des Lasers als kohärente monochromatische Lichtquelle stark an Bedeutung gewonnen haben. Ihr wesentlicher Vorteil liegt in der Parallelverarbeitungsmöglichkeit des optischen Systems. Auf die analog optische Bildverarbeitung, ihre Möglichkeiten, Vor- und Nachteile wird in Abschnitt 2 eingegangen.

2. Analog optische Bildverarbeitung

Die in diesem Abschnitt aufgeführten Prinzipien zur analog optischen Verarbeitung von Bildinformation sollen lediglich einen groben Überblick vermitteln. Eine ausführlichere Behandlung der Problematik ist in [1], [2], [3], [4] gegeben. Man unterscheidet im wesentlichen zwischen inkohärenter und kohärenter optischer Verarbeitung. Da der kohärent optischen Verarbeitung wegen ihrer vielseitigen Verwendbarkeit die wesentlich größere Bedeutung zukommt, sei diese im folgenden ausschließlich behandelt.

Zur kohärent optischen Verarbeitung wird eine Lichtquelle benötigt, die monochromatisches Licht aussendet, welches jeweils in einer Ebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung an jedem Ort die gleiche Phasenlage aufweist. Laser als Lichtquellen genügen diesen Forderungen in fast idealer Weise, dies erklärt, daß die Entwicklung und Anwendung kohärent optischer Verarbeitungsmethoden sehr stark mit der Entwicklung der Lasertechnik gekoppelt war.

Das Prinzip der optischen Verarbeitung beruht auf der Beugung und Interferenz des Lichtes. Wesentliche Elemente eines optischen Prozessors sind eine kohärente, monochromatische Lichtquelle und eine Sammellinse (Bild 6). Bringt man in die vordere Brennebene eine örtlich verteilte Transparenzfunktion $s(x, y)$ und beleuchtet diese mit kohärentem Licht, so erhält man in der hinteren Brennebene der Linse in guter Näherung die Fouriertransformierte $\underline{S}(j\omega_x, j\omega_y)$ des Eingangssignals (Gl. 1)

$$\underline{S}(j\omega_x, j\omega_y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} s(x, y) \cdot \exp \{-j(\omega_x \cdot x + \omega_y \cdot y)\} dx dy \quad (1)$$

$\underline{S}(j\omega_x, j\omega_y)$ ist im allgemeinen komplex und repräsentiert das zweidimensionale Ortsfrequenzspektrum der Funktion $s(x, y)$ mit den Ortsfrequenzen ω_x und ω_y in x- bzw. y-Richtung. Bringt man eine zweite Linse zusätzlich in den Strahlengang, so daß deren vordere Brennebene mit der hinteren Brennebene der ersten Linse zusammenfällt, so erhält man in der hinteren Brennebene der zweiten Linse in guter Näherung die Rücktransformation (Gl. 2).

$$s(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \underline{S}(j\omega_x, j\omega_y) \cdot \exp \{+j(\omega_x x + \omega_y y)\} d\omega_x d\omega_y \quad (2)$$

Gl. 3 gibt eine symbolische Schreibweise für Hin- und Rücktransformation

$$\begin{aligned} \underline{S}(j\omega_x, j\omega_y) &\longleftarrow s(x, y) \\ s(x, y) &\longrightarrow \underline{S}(j\omega_x, j\omega_y) \end{aligned} \quad (3)$$

Welche Bedeutung die Fouriertransformation für die Bildverarbeitung hat, wird deutlich, wenn man Aufgabenstellungen und verwendbare Methoden zur Bildverarbeitung etwas analysiert. Es zeigt sich dann, daß sehr viele Problemstellungen zumindest teilweise durch Korrelation oder Faltungsintegral gelöst werden können. Betrachtet man eine Bildfunktion $b(x, y)$ und eine Gewichtsfunktion $g(x, y)$, mit der die Bildfunktion gefaltet werden soll, so lassen sich Faltungs- und Korrelationsintegral durch Gl. 4 darstellen:

Faltungsgesamtes

$$I(x',y') = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} b(x,y) \cdot g(x'-x, y'-y) \, dx \, dy$$

$$= b * g$$

Korrelationsgesamtes

$$\emptyset(x',y') = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} b(x,y) \cdot g(x-x', y-y') \, dx \, dy$$

$$= b \otimes g$$

(4)

Für jeden Punkt $P(x',y')$ der Ergebnismatrix werden die von der entsprechend verschobenen Gewichtsfunktion g bedeckten Elemente der Bildfunktion b gewichtet aufsummiert. Aus Gl. 4 ist zu ersehen, daß für reelle symmetrische Gewichtsfunktionen die Ergebnisse von Faltung und Korrelation identisch sind.

Diese für die Bildverarbeitung wesentlichen Faltungs- und Korrelationsoperationen, deren Berechnung im Ortsbereich u.U. sehr zeitaufwendig sein kann, lassen sich im Ortsfrequenzbereich (Fourierbereich) durch eine einfache Multiplikation der Transformaten von Bild- und Gewichtsfunktion ermitteln (Gl. 5).

Es sei:

$$b_1 = \text{Eingangsbildfunktion, } B_1 \longleftrightarrow b_1 \text{ deren Ortsfrequenzfunktion}$$

$$g = \text{Gewichtsfunktion, } G \longleftrightarrow g \text{ deren Ortsfrequenzfunktion}$$

$$b_2 = \text{Ergebnisbildfunktion, } B_2 \longleftrightarrow b \text{ deren Ortsfrequenzfunktion}$$

$$G^* \text{ konjugiert Komplexe von } G$$

Damit ergibt sich:

Faltung:

$$b_2 = b_1 * g \longleftrightarrow B_2 = B_1 \cdot G \quad (5)$$

Korrelation:

$$b_2 = b_1 \otimes g \longleftrightarrow B_2 = B_1 \cdot G^*$$

Zur Berechnung von Faltung oder Korrelation ist es daher zweckmäßig, die Fouriertransformaten von Bild- und Gewichtsfunktion (Filter) zu bilden, im Frequenzbereich (Fourierbereich) zu multiplizieren und die Ergebnisfunktion in den Ortsbereich zurück zu transformieren. Eine optische Anordnung gemäß Bild 7, bei der die Eingangsbildfunktion in der vorderen Brennebene der ersten Linse L_1 und die Fouriertransformierte der Gewichtsfunktion in der hinteren Brennebene der gleichen Linse liegt, liefert in der hinteren Brennebene der zweiten Linse L_2 die entsprechende Faltung oder Korrelation mit guter Näherung.

Die mit einem optischen Prozessor ausführbaren Operationen lassen sich hinsichtlich der Anwendung in zwei Gruppen unterteilen:

- Operationen zur Bildaufbereitung
z.B. Hochpaß-, Tiefpaßfilterungen
- Operationen zur Signaldetektion
z.B. Objektextraktion, Mustererkennung.

Die erste Gruppe umfaßt hauptsächlich Filteroperationen, wie z.B. Tiefpaß-, Bandpaß- oder Hochpaßfilterungen. Die Filter bestehen meist aus Filmmaterial mit entsprechend eingestellter Transparenz. Mit einem solchen Filter können in der Ortsfrequenzebene die Amplituden der Ortsfrequenzen beeinflußt werden.

Die zweite Gruppe umfaßt hauptsächlich Korrelationsoperationen zwischen einem unbekanntem Bild und einem bekannten Bildausschnitt (Objekt). Für diese auch als "matched filtering" bezeichnete Operation wird das komplexe Ortsfrequenzspektrum des zu korrelierenden Objektes benötigt, das sowohl Amplituden als auch Phasenlagen enthält. Dies erfordert einen holographischen Herstellungsprozeß des Filters. Hierzu wird das bekannte Objekt mit kohärentem Licht durch-

strahlt, in die Frequenzebene transformiert, dort mit einem unter einem bestimmten Winkel einfallenden Referenzstrahl überlagert und auf photographisches Material aufgezeichnet.

Die Vorteile eines solchen optischen Verarbeitungssystems sind:

- Verarbeitung mit Lichtgeschwindigkeit
- hohe flächenhafte Bildauflösung
- gute Grauwertauflösung.

Neben diesen Vorteilen existieren aber auch eine Reihe von Nachteilen bzw. Einschränkungen, die bisher verhindert haben, daß die kohärent optische Bildverarbeitung sich stärker durchsetzen konnte.

Ein Nachteil, der durch den optischen Prozessor bedingt ist, ist die sehr präzise Justage (auf Wellenlängen genau) von Bild und Filter, in der jeweiligen Brennebene. Diese sehr zeitraubende Justagearbeit macht den Vorteil der schnellen Verarbeitung wieder zunichte. Weitere Nachteile liegen in der Fouriertransformation und Faltung bzw. Korrelation selbst begründet:

- Die Fouriertransformation ist eine lineare homogene Transformation, nichtlineare oder inhomogene Operationen lassen sich damit nicht durchführen.
- Faltung bzw. Korrelation sind lediglich translationsinvariant, jedoch nicht rotations- und größeninvariant.

Bei Verwendung von Korrelationsmethoden zur Detektion eines Objektes, dessen Orientierung in der Ebene nicht bekannt ist, muß daher für jede mögliche Objekt-Orientierung ein entsprechendes Filter bereitgestellt und in der Filterebene eingesetzt werden. Hier tritt der Nachteil der zuvor erwähnten zeitraubenden Filterjustage besonders gravierend hervor. Gleiches gilt für verschiedene Objektgrößen.

Dieser Nachteil konnte durch Verwendung spezieller Techniken zur Speicherung mehrerer Filter auf einem Trägermedium in der Filterebene abgemildert werden:

- Direkte Überlagerung mehrerer Filter und photographische Aufzeichnung (nur für wenige, einfache Filter geeignet)
- Flächenhafte Anordnung von Filterhologrammen in der Filterebene (Page-composer) unter Verwendung einer Fliegenaugenoptik und eines digitalen Lichtablenkers (Zeitmultiplexbetrieb, Bild 8) oder unter Verwendung eines Punkthologrammes zur Vielkanalaufspaltung des Ortsfrequenzspektrums des gesuchten Objektes (bis zu 100 Kanälen, Bild 9) |5|.

Eine wirkungsvolle Nutzung eines optischen Prozessors dürfte jedoch erst dann gegeben sein, wenn es gelingt, ihn mit einem Digitalrechner zu koppeln, so daß die hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit des optischen Prozessors und die hohe Flexibilität des Digitalrechners in der Kombination voll zum Tragen kommen (Hybridrechner, Bild 10). Hierzu ist es nicht nur erforderlich, daß die Helligkeitsverteilung in der Ergebnisebene (hintere Brennebene der zweiten Linse) abgetastet und in den Rechner übertragen wird, es muß darüber hinaus eine Möglichkeit geschaffen werden, in Abhängigkeit von den jeweiligen Ergebnissen die in der Filterebene abgespeicherte Information vom Rechner her verändern zu können.

Letzteres erfordert Bauelemente, bei denen optisch oder elektrisch die Transparenz lokal gesteuert werden kann. Die eingeschriebene Information muß außerdem wieder gelöscht werden können. Der Vorteil eines solchen Bauelementes in der Filterebene ist, daß die präzise Justage nur einmal vorgenommen werden muß, die einzelnen Filterinformationen können dann mit Rechnergeschwindigkeit eingeschrieben oder ausgetauscht werden.

Bauelemente, die solches leisten, befinden sich zur Zeit noch im Laborstadium. Die am weitesten gediehenen Entwicklungen sind unter dem Namen PROM (Firma Itec) |6|, |7|, |8|, |9|, |10|, |11| und TITUS (firma Philips) |12|, |13|, |14|, |15|, |16|, |17| in der Literatur beschrieben.

PROM ist ein Bauelement, das hauptsächlich aus einem lichtempfindlichen, doppelbrechenden Kristall aus $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ besteht, der mit durchsichtigen Elektroden beschichtet ist (Bild 11). Ausgenutzt wird hierbei ein optisch lokal gesteuerter Pockels-Effekt, mit dem die Polarisationssebene des durchtretenden Lichtes lokal verändert wird. Mit Hilfe eines Analysators kann die Phasenverteilung wieder in eine Amplitudenverteilung übergeführt werden. Das Einschreiben der Information kann mit inkohärentem blauen Licht (450 nm) vorgenommen werden, ausgelesen und betrieben wird dann das Bauelement mit kohärentem roten Licht (632 nm), um ein Zerstoren der eingespeicherten Information zu vermeiden. Mit diesem Element wurde eine Auflösung von 300 Punkten/mm und ein Kontrastverhältnis von bis zu 5.000:1 erreicht.

Das Bauelement TITUS (Bild 12) arbeitet in ähnlicher Weise. Es benutzt einen KDP-Kristall (KD_2PO_4), auf den die Filterinformation mit Hilfe eines Elektronenstrahls als Ladungsbild eingeschrieben wird.

Neben dem bei PROM und TITUS ausgenutzten longitudinalen Pockels-Effekt werden noch eine Reihe anderer physikalischer Effekte auf ihre Eignung untersucht, wie z.B. Feldeffekte bei Flüssigkristallen, ferroelektrische Einkristalle, Materialien zur Oberflächenmodulation, thermomagnetische, photochrome und elektrochrome Substanzen. Einen gewissen Überblick über Wirkungsweise und Stand der Entwicklung ist in [18] gegeben.

3. Digital elektronische Bildverarbeitung

Zur digital elektronischen Verarbeitung muß die als optische Remissions- oder Transparenzverteilung vorliegende Bildinformation flächenhaft quantisiert als Digitalinformation einem Rechner zur Verfügung gestellt werden. Abtastsysteme, die dieses leisten, sind heute bereits kommerziell erhältlich. Typische Leistungswerte sind z.B. Auflösung einer Fläche von 60x60 mm in 2.000x2.000 Bildpunkte in drei verschiedenen Farb- oder Spektralkanälen, mit je 8 bit pro Bildpunkt. Je nach gewünschter Genauigkeit, Auflösung und tolerierbarer Abtastzeit werden hierzu zweidimensional verschiebbare Abtasttische, rotierende Abtasttrommeln, elektronisch oder magnetisch ablenkbare Elektronenstrahlröhren, Image Dissector-Röhren oder Lichtablenker-Systeme eingesetzt.

Zur schnellen und sicheren Interpretation der digital abgespeicherten, verarbeiteten Bildinformation muß die Möglichkeit bestehen, die Bildinformation wieder als flächenhafte Remissions- oder Transparenzverteilung sichtbar zu machen. Hierzu benutzt man hauptsächlich Video-Displays mit und ohne Speicherschirm oder Geräte zur Belichtung von photographischem Film. Bei nicht speichernden Video-Displays muß die Bildinformation zyklisch mit bestimmter Frequenz (~ 30 Hz) aus einem Speicher ausgelesen und dargestellt werden, um den Eindruck eines stehenden, flimmerfreien Bildes zu geben.

Die digitalisierte Bildinformation wird in Form einer zweidimensionalen Bildmatrix ($n \times n$ Elemente) im Speicher eines Rechners abgespeichert. Die Verarbeitung der Bildinformation kann - sofern es sich um lineare, homogene Operationen handelt (Faltung, Korrelation) - entweder im Orts- oder im Ortsfrequenzbereich durchgeführt werden. Eine Faltung im Ortsbereich erfolgt dergestalt, daß eine Untermatrix, die die Filterinformation enthält ($m \times m$ Elemente, $m < n$), in jeder Position der Bildmatrix überlagert wird. Alle Bildelemente im Bereich der Untermatrix werden dann gewichtet aufsummiert und in eine entsprechende Position der Ergebnismatrix abgespeichert (Bild 13). Es ist leicht zu ersehen, daß bei konstantem n die Verarbeitungszeit auf einem seriell arbeitenden Digitalrechner mit wachsendem m sehr stark anwächst (m^2).

Ab einer bestimmten Grenze für m , die von der Arbeitsspeicherausstattung des Rechners abhängt ($m \sim 11 \div 15$), bietet eine Verarbeitung im Ortsfrequenzbereich u.U. erhebliche Zeitvorteile, sofern hierzu der Algorithmus der schnellen Fourier-Transformation (SFT) benutzt wird [19], da die Transformation nur durch die Bildmatrixgröße n und nicht durch die Untermatrixgröße m bestimmt wird. In Bild 14 und Bild 15 sind eine Hochpaßfilterung und eine Korrelation zwischen zwei im Maßstab unterschiedlichen Luftbildausschnitten dargestellt, die unter Verwendung des SFT-Algorithmus errechnet wurden.

Eine Verarbeitung der Bildinformation zum Zwecke einer Objektextraktion erfordert meistens nichtlineare und u.U. inhomogene Verarbeitungsmethoden, die nur im Ortsbereich durchgeführt werden können. Als Objekte definiert man i.allg. Bereiche mit homogener oder gleicher statistischer Grauwertverteilung. Die Extraktion so definierter Objekte kann gemäß Bild 5 entweder über die Bereichskontur, über die Bereichsfläche oder über Kombinationen beider erfolgen.

3.1 Flächenextraktionsmethoden

Eine der einfachsten Flächenextraktionsmethoden beruht darin, ein Grauwertbild als dreidimensionale Grauwertverteilung zu betrachten, wobei der jeweilige Grauwert in der dritten Dimension aufgetragen wird (Bild 16). Objekte, die sich durch gut homogene Grauwertverteilung auszeichnen, lassen sich dann durch Herausschneiden der dem Grauwert entsprechenden Schicht (level slicing) extrahieren, da einheitliche Grauwerte sich als mehr oder weniger flache Plateaus im Grauwertgebirge darstellen. Die Verwendbarkeit dieser Methode ist sehr begrenzt, da die geforderten Voraussetzungen bezüglich Grauerthomogenität nur selten gegeben ist.

Wesentlich häufiger finden parametrische oder nicht parametrische statistische Testverfahren Anwendung, die nicht nur für Grauwerte, sondern auch für komplexere Merkmale, wie z.B. Kontrastgradientenverteilung eingesetzt werden können. Stellvertretend für nichtparametrische Testverfahren sei hier der sog. Kolmogoroff-Smirnow-Test (K-S-Test) erwähnt (Bild 17), bei dem keine speziellen Kenntnisse über die Verteilungen vorausgesetzt werden. Dabei wird die kumulative Häufigkeitsverteilung eines Merkmals (z.B. Grauwerte) einer Ursprungszelle mit der Verteilung einer Nachbarzelle verglichen. Sind beide "ähnlich", so wird aus beiden eine neue Zelle mit einer entsprechend geänderten Verteilung gebildet. Das Wachstum dieser Zelle endet, sobald keine zusätzlichen Nachbarzellen mit vergleichbaren Verteilungen gefunden und angegliedert werden können. Problematisch ist der Begriff der Ähnlichkeit der Verteilungen. Als zweckmäßig hat sich erwiesen, die von beiden zu vergleichenden Verteilungen eingeschlossene Fläche als Maß zu verwenden. Bild 18 zeigt das Ergebnis eines solchen Wachstumsprozesses unter Verwendung des K-S-Test, angewandt auf ein Luftbild. Nachteile des Verfahrens sind die hohe Empfindlichkeit bezüglich der Wahl des Startpunktes und die mangelhafte Abbruchbedingung. In sehr vielen Fällen kann es vorkommen, daß auf Grund einer minimalen Störung im Bereich einer Objektgrenze, das Verfahren in andere, Objekt-fremde Gebiete 'ausufert'.

Um das Ausbrechen des Algorithmus aus einem Objekt mit gestörter Kontur zu verhindern, wurde ein Verfahren untersucht [20], das zusätzlich zu dem zuvor beschriebenen Flächenwachstum auch noch die Konturinformation einbezieht. Dabei wird von der Tatsache Gebrauch gemacht, daß an sog. Ausbruchstellen die Objektfläche sehr stark eingeschnürt ist. Mit Hilfe der sog. Abstandstransformation lassen sich solche Einschnürungen ermitteln und beseitigen (Bild 19). Bild 20 zeigt das Ergebnis einer Flächenextraktion bei gestörter Objektkontur, die mit diesem Verfahren ermittelt wurde.

Bezüglich des Flächenwachstums bieten sich zwei unterschiedliche Vorgehensweisen an. Im ersten Fall wird - wie zuvor beschrieben - von einer einzelnen Keimzelle ausgegangen, die solange ausgedehnt wird, bis ein Abbruch erreicht wird, d.h. keine Nachbarzellen mit ähnlicher statistischer Verteilung mehr gefunden werden können. Hierbei können die zuvor erwähnten Schwierigkeiten des Auswucherns auftreten (Bild 21a). Sind die Übergänge zwischen F_1 und F_2 , deren Merkmale unterschiedliche Verteilungen besitzen sollen, fließend, so kann es geschehen, daß Nachbarlemente N , die zwar objektiv bereits zu F_2 gehören, noch von der in F_1 liegenden Keimzelle K übernommen und angegliedert werden. Dadurch wird aber die stets neu berechnete statistische Verteilung von K der von F_2 noch ähnlicher, so daß weitere derartige Nachbarlemente fälschlicherweise angegliedert werden. Dieser Auswucherungsprozeß kann dadurch etwas eingeschränkt werden, daß die Anlagerung von Zellen nicht einseitig an einer Stelle erfolgen darf, sondern ausgeglichen entlang der gesamten Zell-Kontur vorgenommen werden muß. Zum anderen können mit wachsender Zelle strengere Anforderungen bezüglich möglicher Abweichungen von anzugliedernden Zellen gestellt werden.

Bei der zweiten Methode läßt sich die Gefahr des Auswucherns dadurch verringern, daß zu Beginn mehrere Keimzellen ermittelt werden, die zu unterschiedlichen Gebieten F_i gehören. Für diese wird dann 'gleichzeitig' der Wachstumsprozeß durchgeführt (Bild 21b). Man erreicht dadurch, daß sich die einzelnen Gebiete weitgehend selbst gegeneinander abgrenzen.

3.2 Konturextraktionsmethoden

Zur Extraktion von Objekten über deren Konturlinien ist es erforderlich, diese aus der Grauwertverteilung zu erzeugen. Die einfachste Methode hierzu ist die zweidimensionale Differentiation (Bild 22). Sie liefert nur dort brauchbare Ergebnisse, wo Flächen mit jeweils unterschiedlichen, homogenen Grauwertverteilungen aneinander grenzen. Flächen, die sich nur durch verschiedene Texturen unterscheiden, lassen sich auf diese Weise nur mangelhaft abgrenzen.

Im differenzierten Bild repräsentiert sich die Konturinformation durch nicht binäre Werte, die der Höhe des Grauwertsprungs in der einzelnen Position entspricht. Diese Angaben sind unabhängig von der lokalen Richtung der Kontur. Im Hinblick auf die, auf die Kontur anzusetzenden Suchalgorithmen, ist es jedoch zweckmäßig, in jedem Konturpunkt auch über den lokalen Konturverlauf (Richtung) informiert zu sein. Es wurden deshalb Algorithmen entwickelt, die es erlauben, in jedem Konturpunkt die lokale Konturrichtung zu ermitteln.

Bei der sog. Maskenvergleichsmethode [21], (Bild 23) wird in jedem Konturpunkt des differenzierten Bildes der lokale Konturverlauf mit idealen Konturmasken in verschiedene Orientierungen verglichen. Die Richtung derjenigen Maske, die die beste Übereinstimmung ergibt, wird als Richtungskennzeichnung des Konturpunktes festgehalten.

Betrachtet man ein Grauwertbild als dreidimensionale Grauwertverteilung, wobei der Grauwert in der dritten Dimension aufgetragen wird, so zeichnen sich Objektkonturen als mehr oder weniger starke Übergänge zwischen Grauwertplateaus aus. Bei der Ebenenapproximationsmethode wird versucht, eine in ihrer räumlichen Ausdehnung begrenzte Ebene in jedem Bildpunkt so zu orientieren, daß sie mit der örtlichen Grauwertverteilung eine beste Deckungslage einnimmt (Bild 24). Der Ebenennormalenvektor einer so orientierten Ebene gibt dann Auskunft über Betrag und Richtung des Kontrastgradienten und dient somit zur Beschreibung des lokalen Konturverlaufs.

Bei einer dritten Methode wurde durch entsprechende Analog-Verarbeitung des elektrischen Abtastsignals versucht, bereits während der Bildabtastung die gewünschte Kontrastgradientenverteilung zu ermitteln (Bild 25). Dabei wird der abtastende Lichtpunkt in jeder Abtastposition auf einer Kreisbahn bewegt. Aus Amplitude und Phasenlage des Abtastsignals kann dann Betrag und Richtung des Kontrastgradienten ermittelt werden.

Bild 26 zeigt Ergebnisse von Konturfilterungen, angewandt auf ein Luftbild, wie sie mit den zuvor beschriebenen Methoden erzielt wurden. Die einzelnen Kontur-elemente sind darin als Helligkeitsmodulierte, kleine Geradenstücke in der jeweils vorgegebenen Richtung dargestellt.

Zur Extraktion von Objekten aus der matrixförmig abgespeicherten Konturinformation werden neben wenig effizienten Konturmaskenvergleichen hauptsächlich Konturverfolgungsalgorithmen eingesetzt, die eine listenförmige Beschreibung der Objektkonturen liefern. Das Prinzip eines einfachen, nicht-objektspezifischen Suchalgorithmus ist in Bild 27 dargestellt. Dabei wird der Suchbereich durch die Richtung des jeweiligen lokalen Richtungselementes vorgegeben. Der Algorithmus erhält dadurch eine gewisse Richtungsträgheit, d.h. er folgt speziell an Kreuzungen oder Abzweigungen einer einmal vorgegebenen Richtung, sofern weitere Konturelemente gleicher Richtung gefunden werden können. Ergebnisse einer solchen Kontursuche sind in Bild 28 dargestellt. Zur besseren visuellen Interpretation sind die listenhaft abgespeicherten Konturkoordinaten wieder als zweidimensionale Verteilung dargestellt.

In Bild 29 ist das Prinzip einer objektbezogenen Konturverfolgung zur Extraktion paralleler Konturführungen (z.B. Straßen) erläutert. Dabei werden solche Konturen bei denen in vorgebbarem Abstand keine parallel verlaufenden Konturelemente existieren, unterdrückt. Ergebnisse dieser speziellen Konturfilterung sind in Bild 30 dargestellt.

Im Gegensatz zu dem Richtungs-trägen Algorithmus (Bild 27), der bevorzugt geradlinige Konturverläufe extrahiert, ist in Bild 31 das Prinzip eines Algorithmus zur Extraktion geschlossener Konturen dargestellt. Der Algorithmus überstreicht dabei in einem halbkreisförmigen Segment den Konturverlauf und errechnet jeweils die Orientierung des folgenden Segments aus den gefundenen Konturrichtungen. Bild 32 zeigt einige Ergebnisse eines solchen Suchlaufes.

Die in den Bildern 28, 30 und 32 dargestellten Ergebnisse zeigen, daß die lokal extrahierte Konturinformation stark fehlerbehaftet ist und noch einer globalen Nachbehandlung bedarf. Mit Hilfe einer dynamischen Optimierungsmethode wurde versucht, eine gefundene Objektkontur durch Geradenelemente - optimal im Sinne einer Zielfunktion - anzupassen (Bild 33). Dabei werden innerhalb vorgegebener Grenzen alle möglichen Lagen der Geradenstücke und deren Auswirkungen auf die sich anschließenden Geradenstücke bewertet. Das Ergebnis einer solchen Approximation, bei der einzelne Stützstellen grob interaktiv vorgegeben waren, zeigt Bild 34.

4. Prozessoren zur Bildverarbeitung

Die Bearbeitung der in Kapitel 3 beschriebenen lokalen homogenen Operationen (Faltungen) auf einem seriell arbeitenden Digitalrechner ist sehr zeitaufwendig. So benötigt man z.B. zur Konturermittlung mit Hilfe der Ebenenapproximationsmethode auf einem mittelschnellen Rechner (CD 3300) je nach Untermatrixgröße 3-5 Minuten CPU-Zeit (Bildmatrix 256x256 Elemente, 6-bit Grauwerte, Untermatrixgröße 3x3 bis 5x5).

Da die auf eine Untermatrix jeweils anzuwendende Operationsfolge von den Ergebnissen aller anderen Untermatrix-Operationen unabhängig ist, könnten prinzipiell alle Untermatrixoperationen parallel, gleichzeitig durchgeführt werden, wie es z.B. beim optischen Prozessor der Fall ist. Diese Überlegungen führten zur Entwicklung von Parallel-Prozessoren (array-Prozessoren), bei denen eine Anzahl einfacher Prozessoren in einem Feld angeordnet sind, gemeinsam auf einem Bildspeicher zugreifen können und ihre Ergebnisse gleichzeitig und unabhängig voneinander in einen Ergebnisspeicher ablegen können. Typische Vertreter sind z.B. ILLIAC III (32x32 Prozessoren) und ILLIAC IV (8x8 Prozessoren in einem array, mehrere arrays sind möglich, Bild 35).

Während ILLIAC III nur Binärbildinformation verarbeiten kann, ist ILLIAC IV auch in der Lage nichtbinäre Information zu handhaben.

Die Verarbeitung der einzelnen nichtbinären Operationen durch die Einzelprozessoren kann auf zweierlei Weise geschehen:

- bit-seriell, um die Struktur des Einzelprozessors möglichst einfach zu halten,
- bit-parallel, um zu möglichst kurzen Verarbeitungszeiten pro Operation zu kommen.

Ein typischer Vertreter der bit-seriellen Arbeitsweise ist der array-Prozessor STARAN (Bild 36), der bis zu 32 arrays mit je 256x256 bit ausgebaut werden kann. Eine Zeile mit je 256 bit kann dabei in w Worte mit je $256/w$ bit unterteilt werden, wobei die einzelnen Worte in allen Zeilen parallel verarbeitet werden. In Bild 37 sind verschiedene Prozessoren in einem Diagramm gegenüber gestellt. Der konventionelle John von Neumann-Rechner ist darin als wortseriell, bit-parallel eingetragen.

Eine weitere Unterscheidungsmöglichkeit ist in der Beschreibung der Prozessoren hinsichtlich Programmierbarkeit und Speicherzugriff gegeben [22]. Können die Einzelprozessoren nur einheitlich programmiert werden, so bezeichnet man den Rechner als 'single-instruction-stream-processor' (SIS). Können dagegen die einzelnen Prozessoren unabhängig von einander programmiert werden, so bezeichnet man den Rechner als 'multiple-instruction-stream-processor' (MIS). Beim zweiten Kriterium des Speicherzugriffs wird ebenfalls unterschieden, ob die Prozessoren durch einen einzigen Datenstrom, -'single-data-stream' (SDS) bedient werden, oder ob jeder Einzelprozessor seinen eigenen Datenstrom hat - 'multiple-data-stream' (MDS). Der konventionelle John von Neumann-Rechner ist damit vom Typ SIS, SDS (Bild 38a). ILLIAC III and STARAN sind damit typische Vertreter des Typs SIS, MDS (Bild 38b). Allgemeine Multiprozessoren, die auf getrennte Speicherbänke arbeiten sind vom Typ MIS, MDS (Bild 38d). Allgemeine Fließbandrechner (pipeline-processoren) lassen sich zur Gruppe MIS, SDS rechnen (Bild 38c).

Die Einordnung einer für die lokale homogene Bildverarbeitung geeigneten Prozessorstruktur in das vorgegebene Klassifikations-Schema ist etwas problematisch. Etwas pauschal kann gesagt werden, daß der Prozessor folgende Eigenschaften haben sollte:

- die einzelnen Prozessoren sollten unabhängig voneinander programmierbar sein (MIS). Die einzelnen Instruktionen oder Instruktionsfolgen können jedoch vor Ablauf der Verarbeitung in Prozessor-eigene Instruktionsspeicher übernommen werden, da die Verarbeitung für alle Bildpunkte homogen durchgeführt wird.
- da die einzelnen Prozessoren auf die einzelnen Elemente einer Untermatrix parallel zugreifen sollen, sollte der Prozessor vom Typ MDS sein. Diese Forderung kann jedoch wieder etwas eingeschränkt werden, da der Zugriff zu den Bilddaten nicht völlig wahlfrei erfolgen muß, sondern sich immer nur auf die Elemente im Bereich einer Untermatrix beschränkt, und diese Punkt für Punkt über das Bild geschoben wird. Durch Einfügen einer angezapften Daten-Pipeline zwischen Speicher und Prozessoren kann man - vom Speicher aus gesehen - zu einer Maschine des Typs SDS kommen (Bild 39).
- Instruktionsfolgen einer Bildverarbeitungsprozedur lassen sich normalerweise in einzelne Teilfolgen zerlegen, die von in Reihe geschalteten Prozessoren unabhängig voneinander bearbeitet werden können (multi-prozessor-pipeline). Während die Prozessoren in Stufe 2 die Teilergebnisse der Prozessoren der Stufe 1 weiterverarbeiten, können in Stufe 1 bereits die Daten der nächsten Untermatrix erarbeitet werden usw. Bei sinnvoller Aufteilung einer Prozedur in einzelne Instruktionsteilfolgen, kann man dadurch zu einer beträchtlichen Reduzierung der Taktzeit gelangen, mit der die einzelnen Bildpunkte aus dem Speicher abgerufen werden können.
- Da die einzelnen Bildverarbeitungsprozeduren äußerst unterschiedlich sind, sollte der Prozessor sowohl hinsichtlich Parallelitätsgrad der Eingangsstufe und hinsichtlich Stufentiefe p der Prozessor-pipeline flexibel sein. Dies bedeutet, die Struktur muß programmierbar sein.

Bild 40 zeigt das Prinzip eines programmierbaren Multi-Pipeline-Prozessors FMPP (flexible multipipeline processor) wie er zur Zeit beim FIM aufgebaut wird [23]. Der Prozessor kann in seiner vollen Ausbaustufe 64 Einzelprozessoren enthalten, die in einem Extremfalle in einer einzigen Pipeline angeordnet werden können, im anderen Extremfalle können die Prozessoren zu einem einstufigen Feld (array) zusammengeschaltet werden. Bild 41 zeigt eine programmierte Struktur (dick ausgezogene Linien) zur zweidimensionalen Differentiation.

Probleme die an diesem Prozessor untersucht werden sollen, sind, Auslastungsgrad der Teilprozessoren, Strukturoptimierung und in engem Zusammenhang dazu, Programmierung der Teilprozessoren. Es ist zu erwarten, daß man mit Prozessoren dieses Typs - bei vertretbarem Hardware-Aufwand - , ein recht großes Spektrum von Bildverarbeitungsproblemen in vertretbaren Zeiten (msec - sec) digital elektronisch lösen wird.

Literatur

- [1] Shulman, A.R. "Optical Data Processing"
John Wiley and Sons, Inc.
New York, London, Sidney, Toronto 1970
- [2] Cutrona, L.J. "Recent Developments in Coherent Optical Technology"
Optical and Electro-Optical
Information Processing, MIT-Press 1965, S. 83-124
- [3] Vander Lugt, A. "Character Reading by Optical Spatial Filtering"
Rotz, F.B.
Klooster, A. Optical and Electro-Optical
Information Processing, MIT-Press 1965, S. 125-142
- [4] Leith, E.N. "Coherent Optical Systems for Data Processing, Spatial
Kozma, A. Filtering and Wavefront Reconstruction"
Upatnieks, J. Optical and Electro-Optical
Information Processing, MIT-Press, 1965, S. 143-158
- [5] Groh, G. Holographie
Berliner Union Verlag, Stuttgart, 1973

- |6| Feinleib, J.
Oliver, D.S. "Reusable Optical Image Storage and Processing Device"
Applied Optics, Vol. 11, No. 12, Dec. 1972, S. 2752-2759
- |7| Nisenson, P.
Iwasa, S. "Real Time Optical Processing with $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ PROM"
Applied Optics, Vol. 11, No. 12, Dec. 1972, S. 2760-2767
- |8| Oliver, D.S.
Buchan, W.R. "An Optical Storage and Processing Device Using
Electrooptic ZnS "
IEEE Trans. on Electron Devices, May 1974, S. 769-773
- |9| Lipson, S.G.
Nisenson, P. "Imaging Characteristics of the Itec PROM"
Applied Optics, Vol. 13, No. 9, Sept. 1974, S. 2052-2060
- |10| Hou, S.L.
Oliver, D.S. "Pockels Readout Optical Memory using $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ "
Applied Physics Letters, Vol. 18, No. 8, April 1971,
S. 325-328
- |11| Nisenson, P.
Feinleib, J.
Iwasa, S. "Real-Time Optical Processing"
Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation
Engineers, Vol. 45, March 1974, S. 241-255
- |12| Marie, G. "Un Nouveau Dispositif de Restitution d'Images Utilisant
un Effet Electro-Optique: le tube TITUS"
Philips Rs. Repts. 22, 1967, S. 110-132
- |13| Donjon, J,
et al. "A Pockels-Effect Light Valve; Phototitus. Applications
to Optical Image Processing"
IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. 20, No. 11, Nov.
1973
- |14| Casasent, D. "Application of a Real-Time Hybrid Computing System"
1974 Int. Optical Computing Conference
- |15| Barrekette, E.S. "Real-Time Optical Information Processing"
Application of Holography, Plénum Press, 1969
- |16| Wieder, H.
Pole, R.V.
Heidrich, P.F. "Electron Beam Writing of Spatial Filters"
IBM J. Res. Develop, March 1969
- |17| Salvo, C.J. "Solid-State Light Valve"
IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. 18, No. 9,
Sept. 1971, S. 748-755
- |18| Holdermann, F.
Huber, A.
Kazmierczak, H. "Study of a Real-Time Converter of an Incoherent
Image into a Transparency"
ESTEC-Contract No. 2342/74/HP Phase 1-Report
- |19| Cooley, J.W.
et al. "Application of the Fast Fourier Transform to Computation
of Fourier Integrals, Fourier Series, and Convolution
Integrals"
IEEE Trans. on Audio- and Electro-Acoustics, June 1967,
S. 79-84
- |20| Weiland, E.
Holdermann, F. "Objekt Extraktion aus Vorverarbeiteten Grautonbildern"
FIM-Bericht Nr. 11, 1974
- |21| Holdermann, F.
Kazmierczak, H. "Preprocessing of Gray-Scale Pictures"
Computer Graphics and Image Processing, Vol. 1, No. 1,
1972, S. 66-80
- |22| Enslow, P.H. "Multiprocessors and Parallel Processing"
John Wiley and Sons,
New York, London, Sidney, Toronto 1974
- |23| Vorgrimler, K. "Rechnersimulation und Strukturuntersuchungen für einen
Prozessor zur Bildvorverarbeitung"
FIM-Jahresbericht 1974, S. 206-225

Zusammenfassung

Die Bildverarbeitung ist ein eigenständiges Forschungsgebiet, das sich aus der Zeichenerkennung entwickelt hat. In Abschnitt 1 werden die zur Zeichenerkennung unterschiedlichen Problemstellungen formal beschrieben und Begriffe und Methoden kurz erläutert. Abschnitt 2 befaßt sich mit den Grundlagen optischer Bildverarbeitung. Neben den Vorteilen der Parallelverarbeitung werden auch Nachteile wie z.B. Inflexibilität des Systems diskutiert. Optisch-elektronische Bauelemente, die dazu dienen, solche Schwierigkeiten zu überwinden, werden erwähnt. Abschnitt 3 befaßt sich mit Methoden der digital elektronischen Bildverarbeitung. Hier werden einzelne Methoden zur Objektextraktion mit Hilfe von Flächenwachstumsmethoden und Konturverfolgungsalgorithmen beschrieben. Abschnitt 4 befaßt sich mit Strukturbeschreibungen spezieller Multiprozessorsysteme, die für die digitale Bildverarbeitung geeignet sind, um die Verarbeitungszeiten auf ein erträgliches Maß zu reduzieren. Die Struktur eines flexiblen Multi-Pipeline-Prozessors wird kurz beschrieben.

Abstract

Image processing is a field of study in its own right that has developed from pattern recognition. Section 1 of the paper gives a formal description of the different problems of pattern recognition and briefly explains the terms and methods used. Section 2 deals with the basis of optical image processing. In addition to the advantages of parallel processing, drawbacks such as the inflexibility of the system are likewise discussed. Opto-electronic components serving to overcome these difficulties are mentioned. Section 3 deals with the methods of digital electronic image processing. Here, several methods for object extraction with the aid of area growth methods and contour follower algorithmus are described. Section 4 deals with a description of the structure of specific multi-processor systems suitable for digital image processing and reducing processing time to an acceptable rate. A brief description is given of the structure of a flexible multi-pipeline processor.

Résumé

Le traitement des photographies et des images constitue un propre domaine de recherche, issu de la "reconnaissance des formes". La première partie de l'exposé décrit les différents problèmes de la "reconnaissance des formes", puis commente brièvement les notions et les méthodes. La seconde partie de l'exposé s'étend sur les principes du traitement optique des photographies et des images. Elle examine les avantages du traitement parallèle, ainsi que ses désavantages, p.ex. inflexibilité du système. Elle mentionne en outre les composants opto-électroniques qui servent à éliminer de tels inconvénients. La troisième partie porte sur les méthodes du traitement électronique et numérique des images. Elle explique les méthodes d'extraction des objets à l'aide de la végétation en surface et des algorithmes suiveurs de contours. La quatrième partie étudie la structure de systèmes multiprocesseurs spéciaux qui sont appropriés au traitement numérique des images et réduisent la durée du traitement sur des valeurs acceptables. Un processeur multi-pipeline fait l'objet d'une brève description.

Resumen

El procesamiento de imágenes es un campo de investigación independiente que ha nacido del reconocimiento de caracteres. En la primera parte se describen formalmente los distintos problemas del reconocimiento de caracteres y se explican brevemente los términos y métodos correspondientes. La segunda parte trata de las fases del procesamiento óptico de imágenes. Además de las ventajas del procesamiento paralelo, se discuten también las desventajas, tales como la inflexibilidad del sistema. Se mencionan componentes óptico-electrónicos que sirven para superar tales dificultades. La tercera parte se ocupa de los métodos del procesamiento digital electrónico de imágenes. Aquí se describen distintos métodos para la extracción de objetos por medio de métodos de crecimiento de superficie y algoritmos de seguimiento de contornos. En la cuarta parte se describen las estructuras de sistemas especiales de multiprocesamiento adecuados para el procesamiento digital de imágenes con el fin de reducir el tiempo de procesamiento a un valor aceptable. Se describe brevemente la estructura de un procesador flexible multi-pipeline.

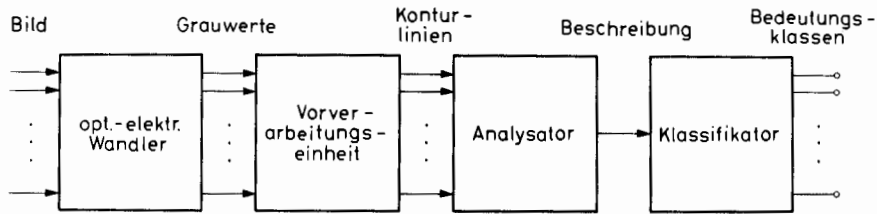
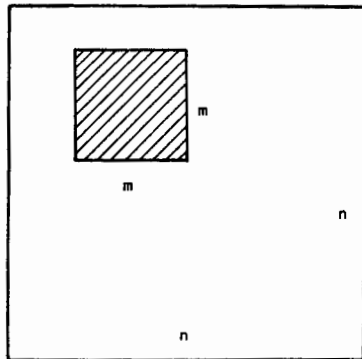


Bild 1: Blockschaltbild einer automatischen digitalen Bildverarbeitung



Bildmatrix-
Durchlauf

Bewertung der
lokalen Nach-
barschaft

lokaler
Operator

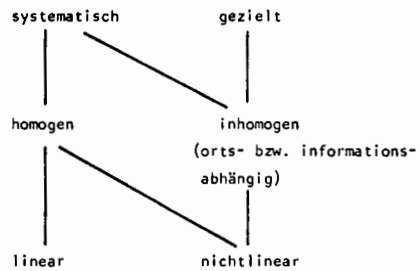


Bild 2: Bildmatrix und Untermatrix zur Berücksichtigung der Nachbarbilpunkte

Bild 3: Klassifizierung der Vorverarbeitungsmethoden

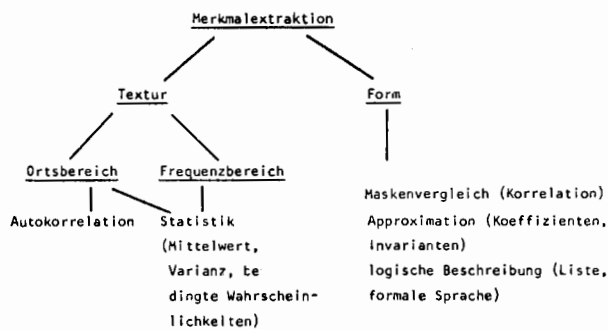


Bild 4: Methoden zur flächenhaften Merkmalsextraktion

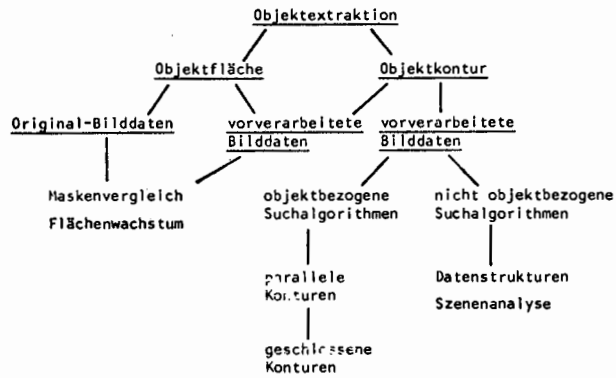


Bild 5: Objektextraktions-
methoden

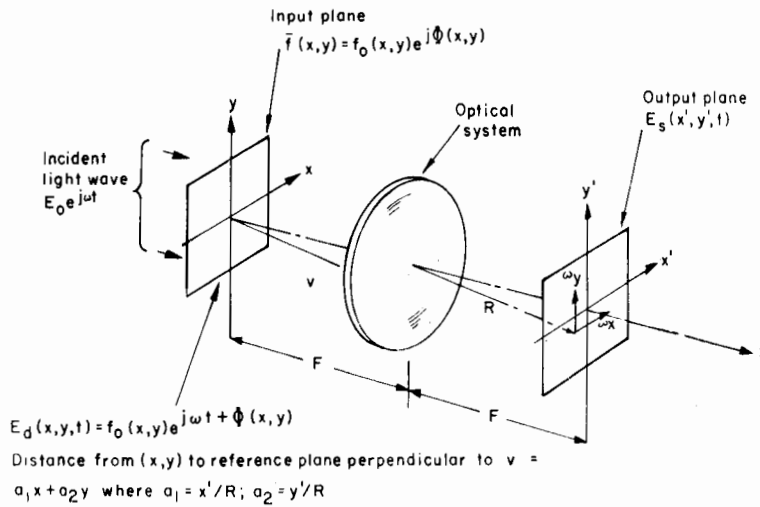


Bild 6: Prinzip der
optischen Verarbeit-
ung

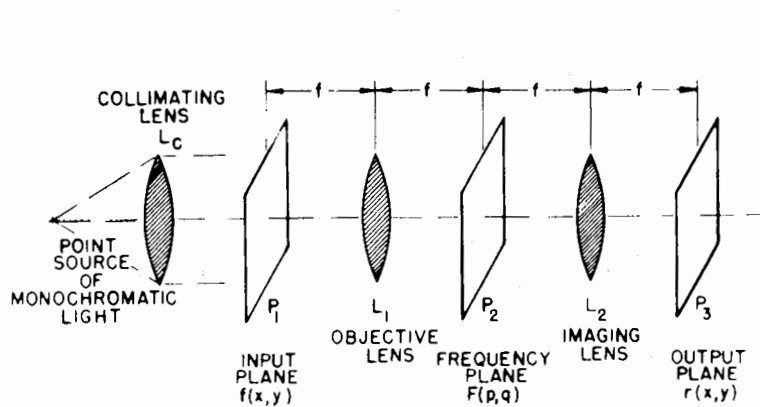


Bild 7: Optischer
Prozessor

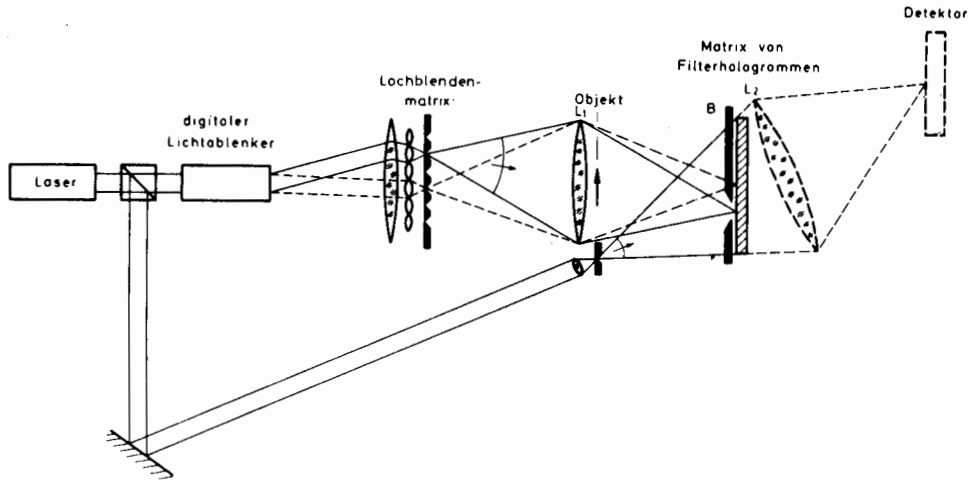


Bild 8: Vielkanalaufspaltung mit zeitmultiplexer Abfrage der Ausgangssignale

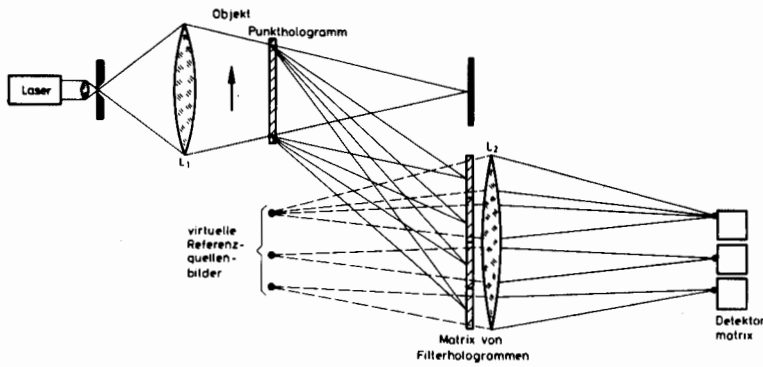


Bild 9: Vielkanalaufspaltung mit Punkthologramm zur parallelen Weiterverarbeitung der Ausgangssignale

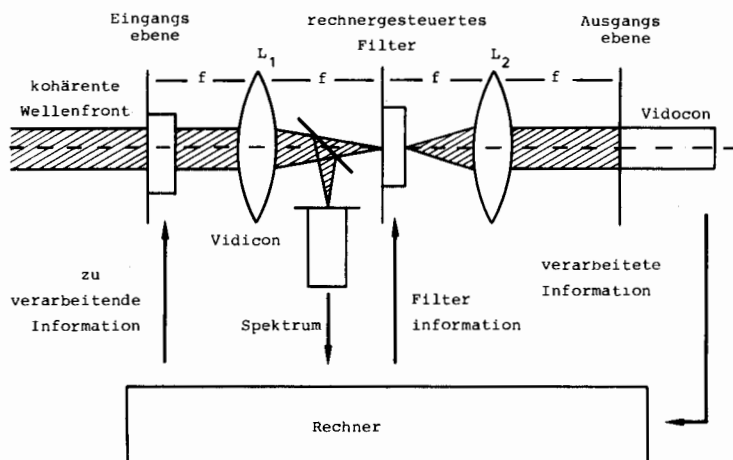


Bild 10: Optisch-elektronischer Hybridrechner

Bild 11: Bauelemente PROM,
 Aufbau und Wirkungsweise

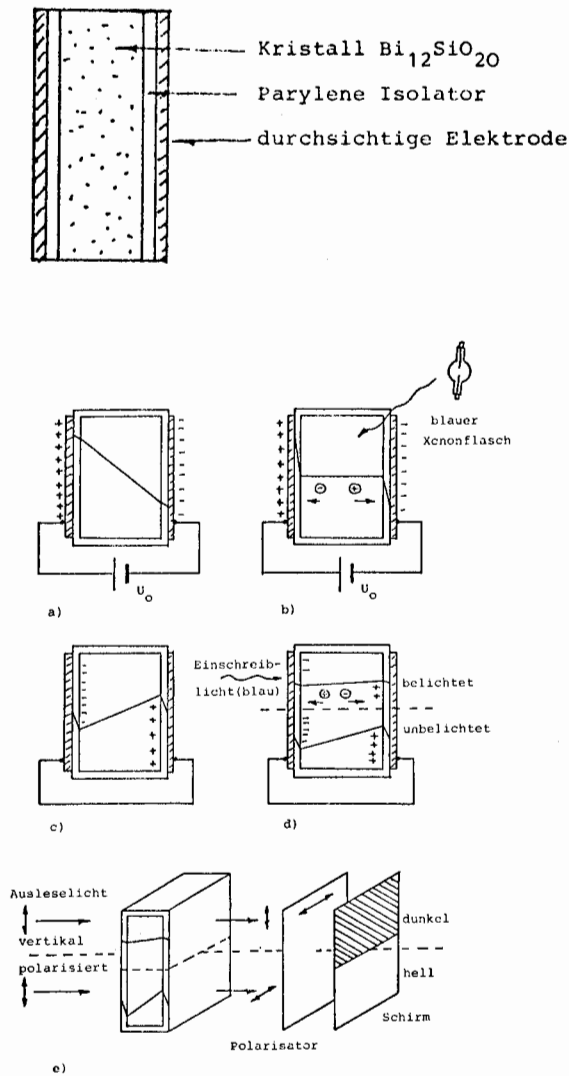


Bild 12: Bauelemente
 TITUS, Phototitus

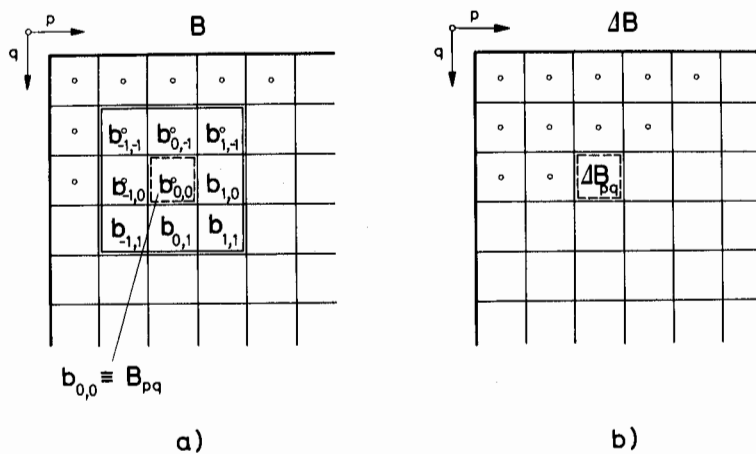
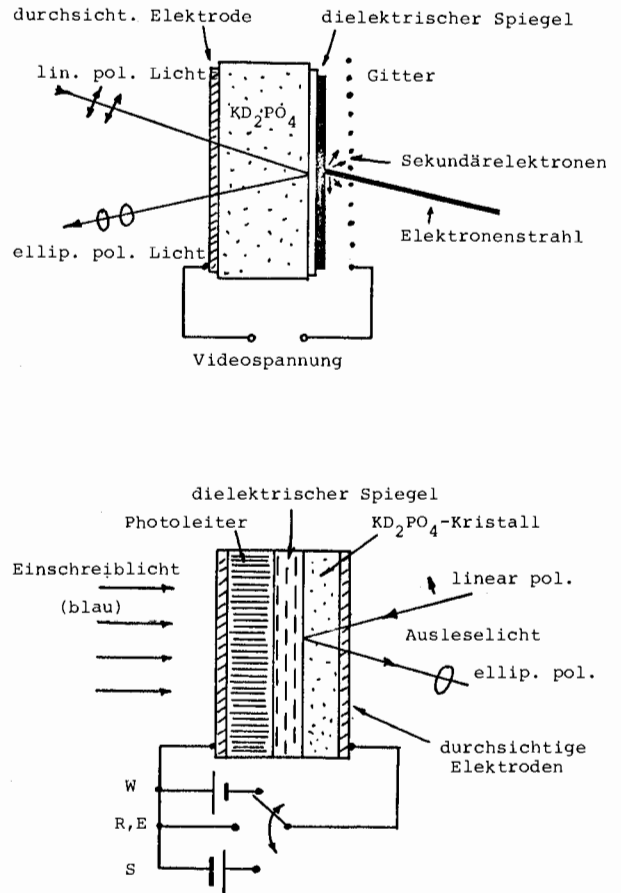


Bild 13: Lokale Vorverarbeitung mit einer Untermatrix;
 a) Position der Untermatrix in der Bildmatrix
 b) Position des Ergebniselementes

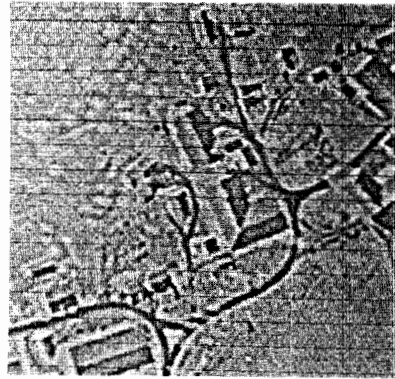
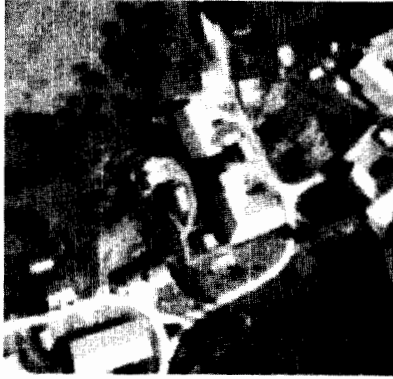


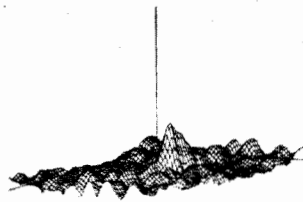
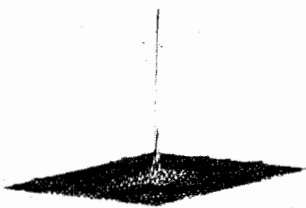
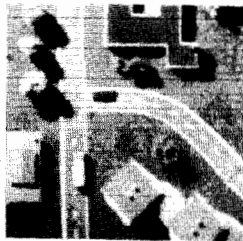
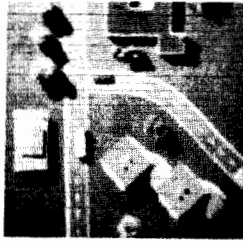
Bild 14: Hochpaßfilterung

a) digitalisiertes Luftbild
Auflösung 256x256 Punkte,
64 Grauwerte

b) Hochpaßgefiltertes Ergebnis

a

b



c

d

Bild 15: Korrelation zwischen zwei Luftbildern

a) Luftbild 1, b) Luftbild 2

c) Autokorrelation von Luftbild 1

d) Korrelation von Luftbild 1 mit Luftbild 2

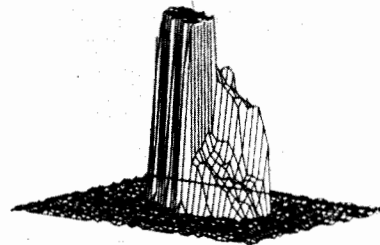


Bild 16: Darstellung eines Quaders

a) als Grautonbild

b) dreidimensionale Darstellung
seiner Grauwerte

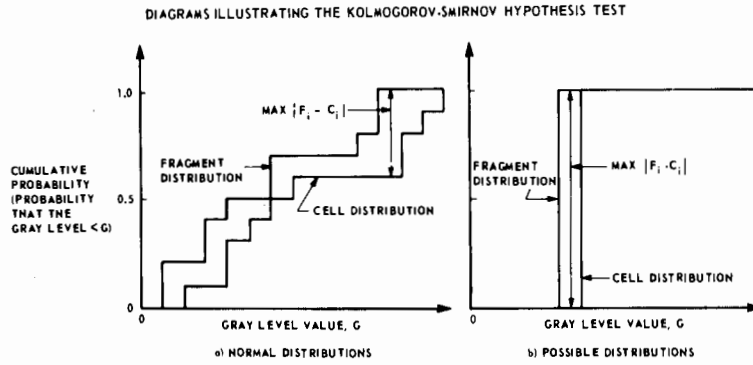


Bild 17: Kolmogoroff-Smirnow-Test (K-S-Test), Prinzip

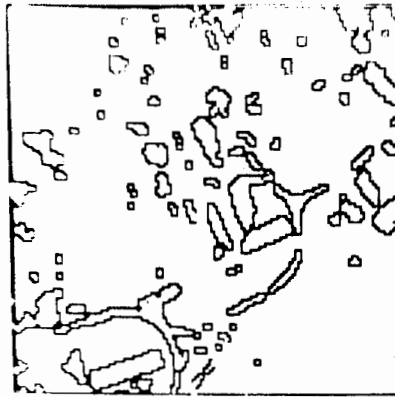


Bild 18: K-S-Test, angewandt auf ein Luftbild

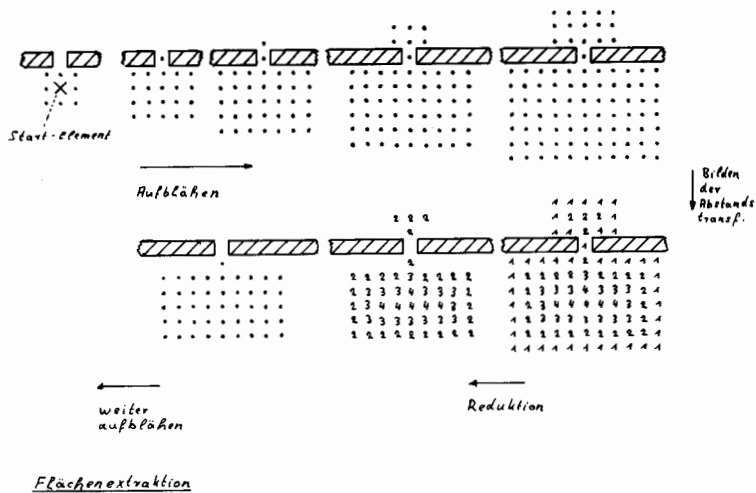


Bild 19: Flächenextraktion unter Berücksichtigung der Objekt-Kontur, Prinzip

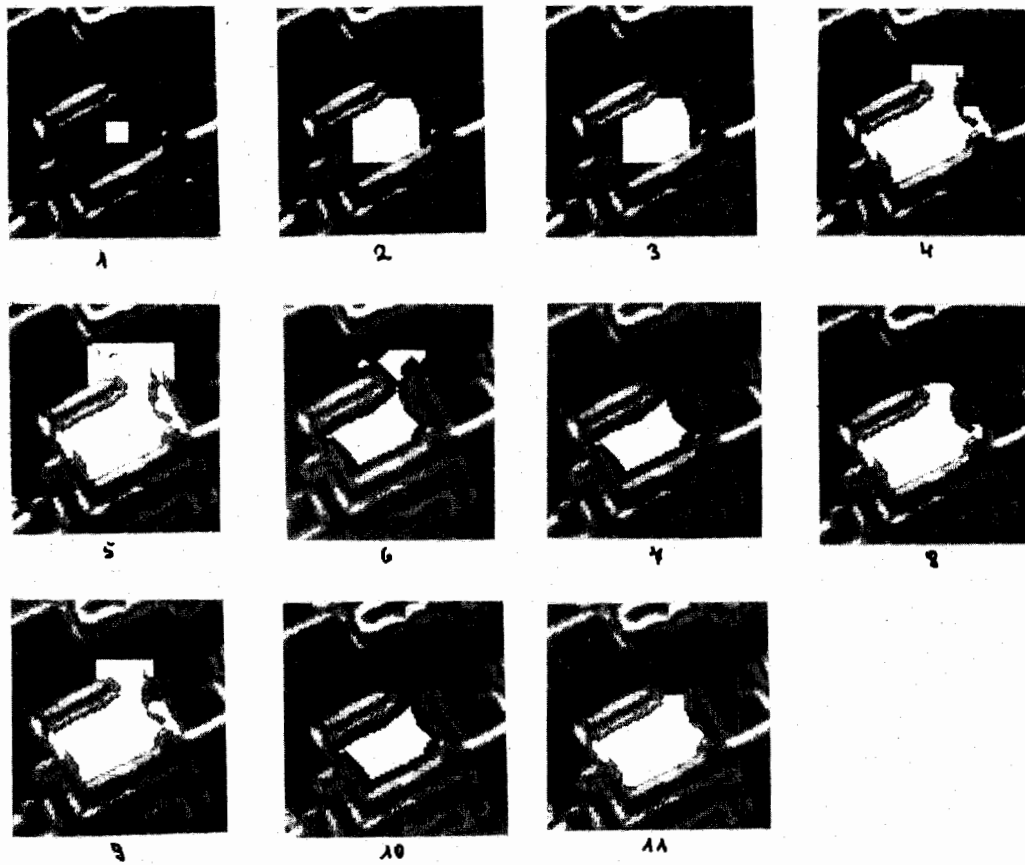
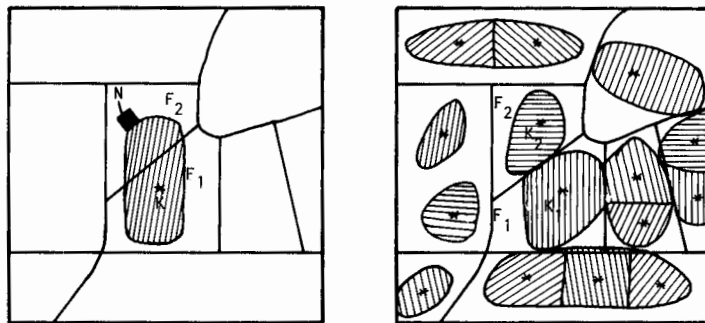


Bild 20: Flächenextraktion unter Berücksichtigung der Objekt-Kontur, einzelne Wachstumsstadien



a) eine Keimzelle

b) mehrere Keimzellen

Bild 21: Prinzip des Flächenwachstums
 a) ausgehend von einer Keimzelle
 b) ausgehend von mehreren Keimzellen



Bild 22: Zweidimensionale
 Differentiation eines Luft-
 bildes

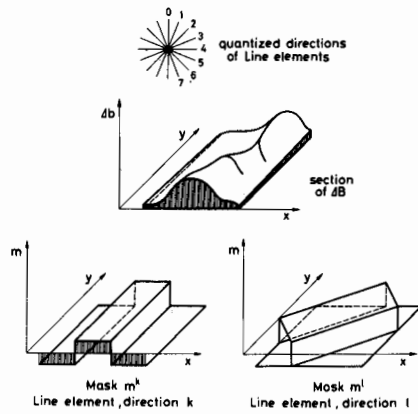


Bild 23: Maskenvergleichsmethode zur Ermittlung lokaler Konturrichtungen

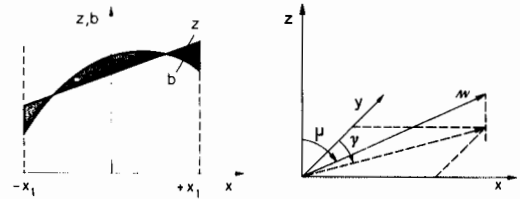


Bild 24: Ebenenapproximationsmethode zur Konturrichtungsermittlung

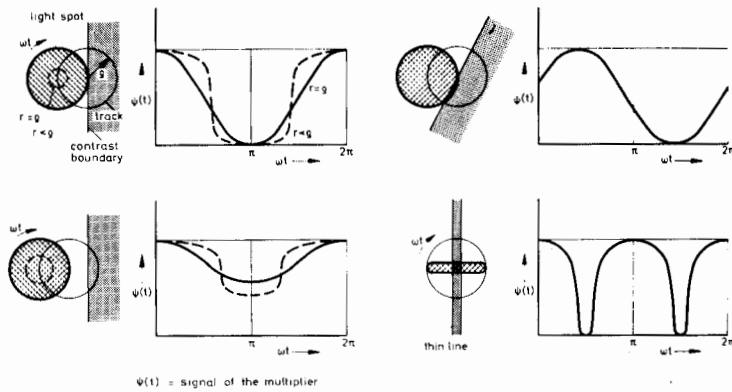


Bild 25: Kreisabtastung zur Kontrastgradientenermittlung

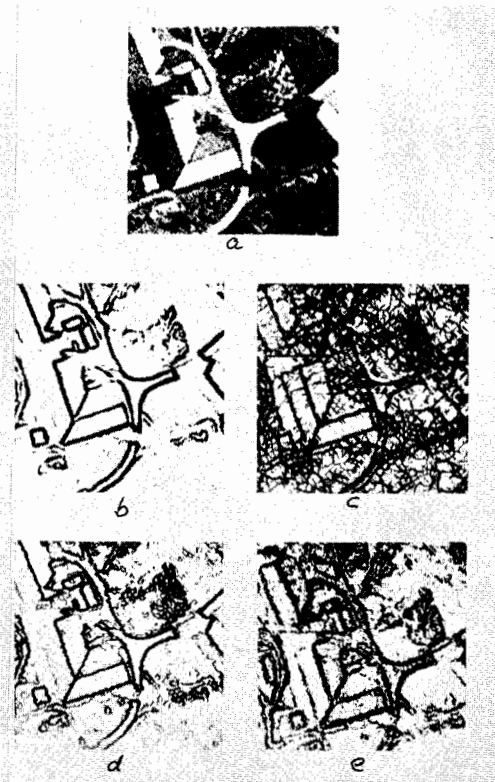


Bild 26: Konturfilterung eines Luftbildes

- a) Luftbild,
- b) differenziert
- c) konturfiltert mit Maskenvergleichsmethode, Bild 23
- d) konturfiltert mit Ebenenapproximationsmethode, Bild 24
- e) konturfiltert durch Spezialabtastung, Bild 25

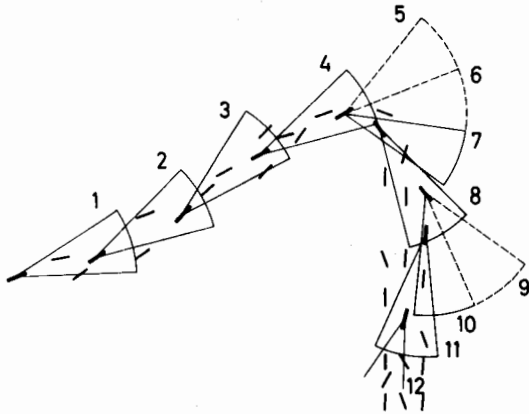


Bild 27: Prinzip einer Konturverfolgung, nicht-objekt-spezifisch

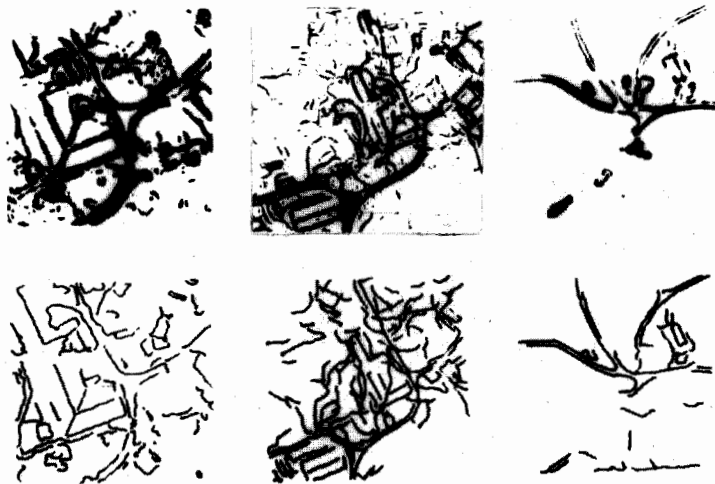


Bild 28: Ergebnisse einer Konturverfolgung nach Bild 27

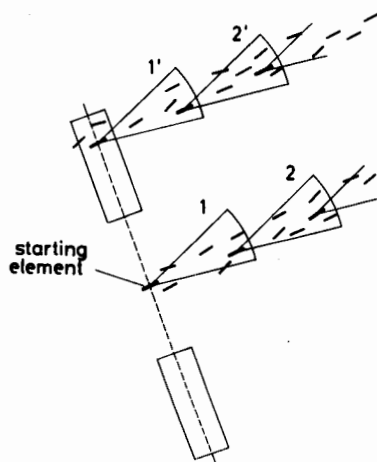


Bild 29: Prinzip einer objektbezogenen Konturverfolgung (parallele Konturen)

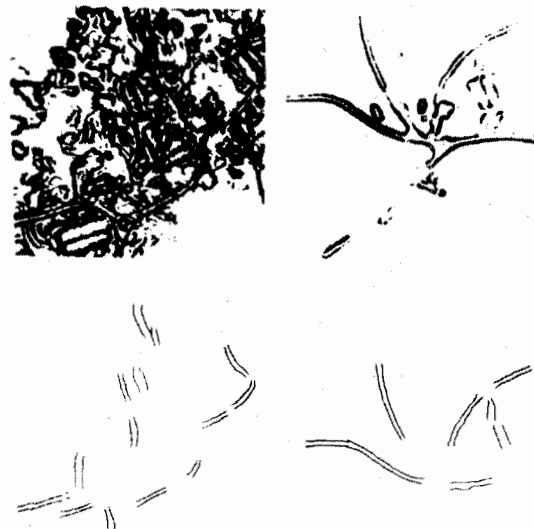


Bild 30: Ergebnisse einer objektbezogenen Konturverfolgung nach Bild 29

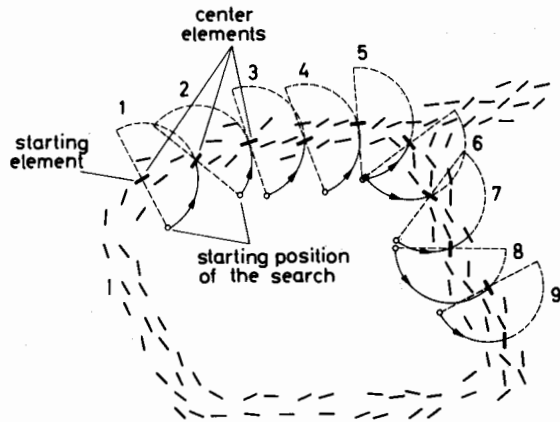


Bild 31: Prinzip einer objektbezogenen Konturverfolgung (geschlossene Konturen)

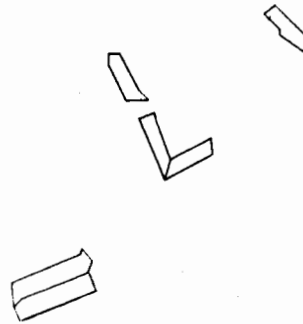


Bild 32: Ergebnisse einer objektbezogenen Konturverfolgung nach Bild 31

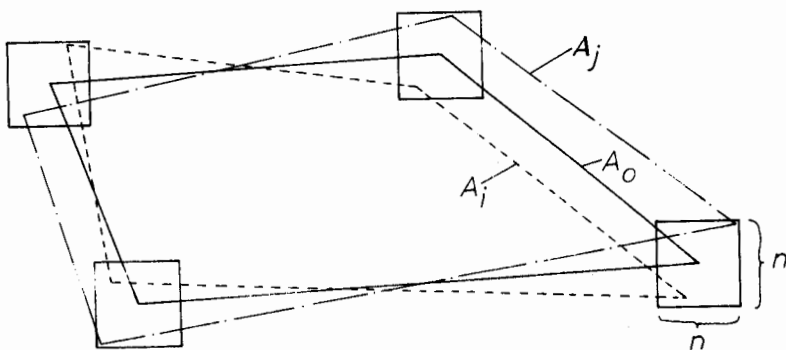


Bild 33: Prinzip der dynamischen Optimierung eines Konturlaufes

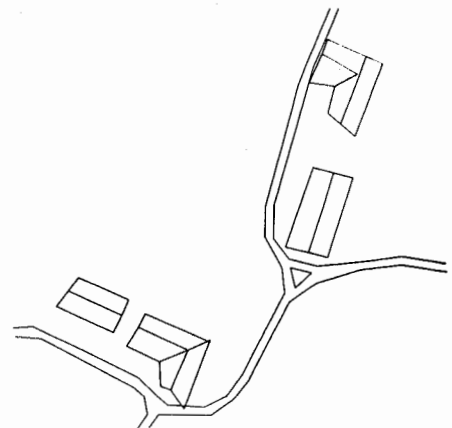


Bild 34: Konturverlauf dynamisch optimiert nach Bild 33

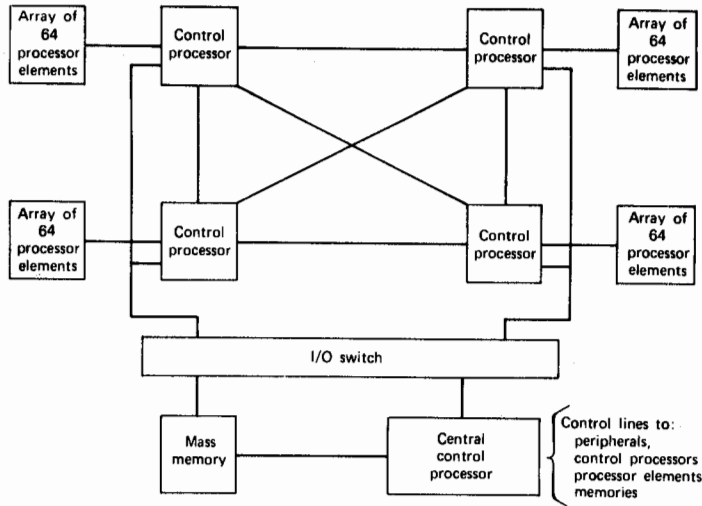


Bild 35:
 Blockschalbild des
 Array-Prozessors
 ILLIAC IV

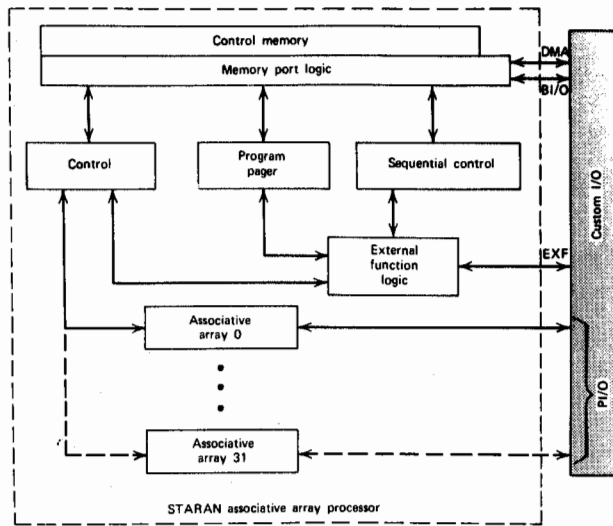


Bild 36:
 Blockschalbild des
 Array-Prozessors
 STARAN

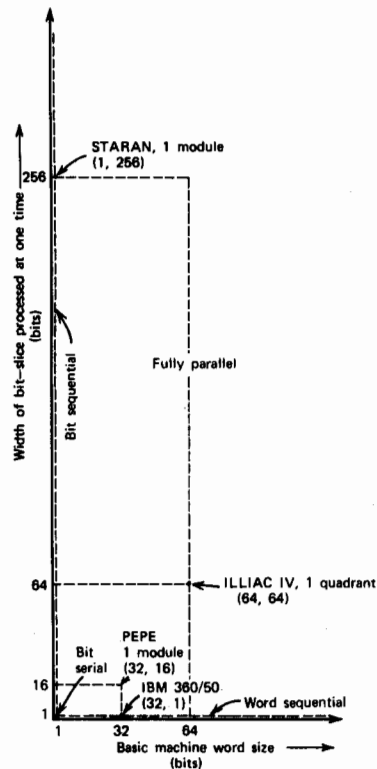


Bild 37: Vergleich mehrerer
 Prozessoren, Bit-sequentiell,
 Wort-sequentiell

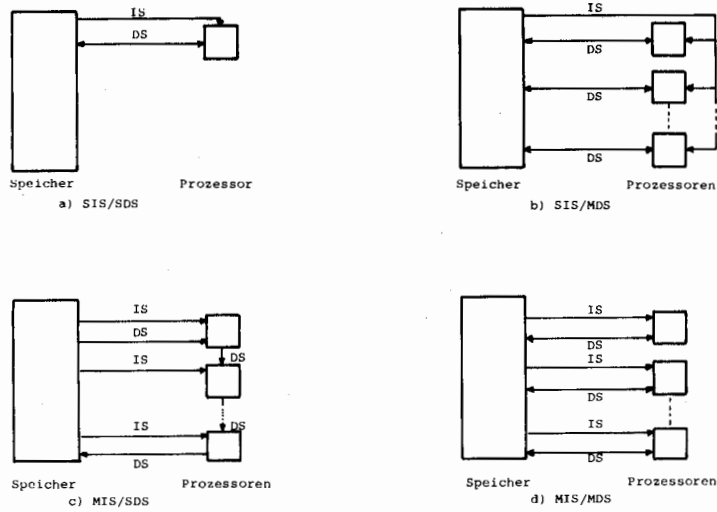


Bild 38: Unterschiedliche Prozessorkonfigurationen
 SIS = single instruction stream
 MIS = multiple instruction stream
 SDS = single data stream
 MDS = multiple data stream

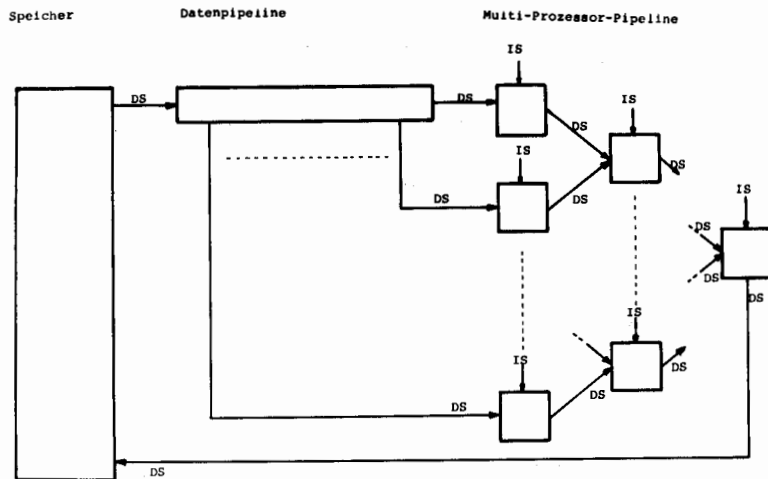


Bild 39: Prozessorstruktur für lokale Bildverarbeitung

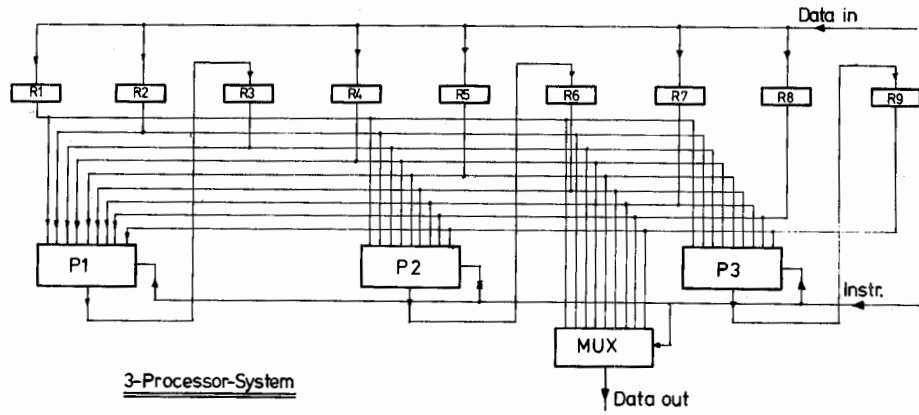


Bild 40: Struktur eines flexiblen Multi-Pipeline-Prozessors (FMPP)

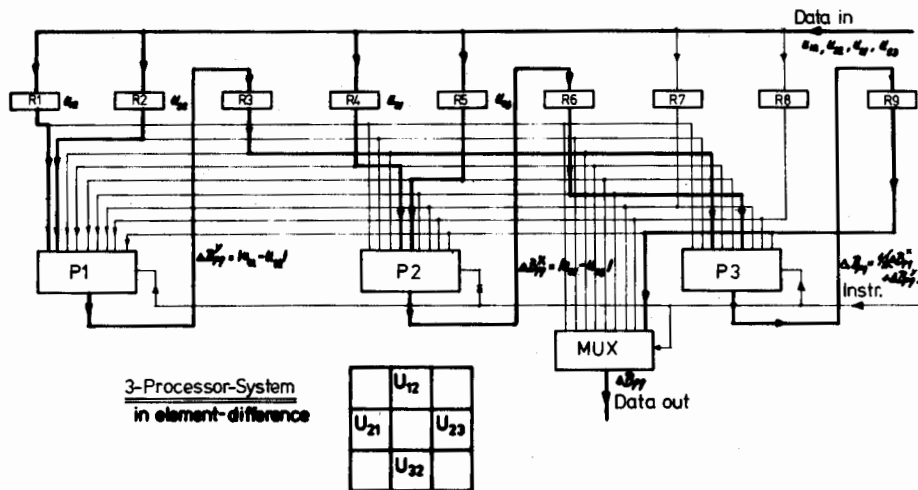


Bild 41: Programmierte Struktur des FMPP für Differentiation