

## Digitale Bildverarbeitung in der dynamischen Spannungsoptik

Engel, K.; Ort, A.

*Der Einsatz der digitalen Bildverarbeitung in der Auswertung optischer Informationen bietet ein erhebliches Leistungspotential. Neben der Beschreibung des eingesetzten Systems wird kurz ein Anwendungsfall aus der optischen Körperschallanalyse mit den Methoden der dynamischen Spannungsoptik dargestellt.*

*Computer vision becomes more efficiency in interpretation of optical informations. After a description of the used tool the practical usage in optical analysis of structure-borne sound by photoelasticity is explained.*

### 1 Bedeutung

Die digitale Bildverarbeitung entwickelte sich in den letzten Jahren von einer ergänzenden, halbmanuellen Bedienerunterstützung zu einer der industriellen Schlüsseltechnologien in der Fertigung, der Logistik und Materialflußsteuerung und der Qualitätskontrolle.

Mit der zunehmenden Automatisierung in den Fertigungslinien schreitet das Bedürfnis nach einer zuverlässig arbeitenden, automatischen Objekterkennung und Positionsüberwachung einher. In der Logistik ermöglichen einfache Barcodes eine sichere Zuordnung von Warensendungen, im Recycling übernehmen Bildverarbeitungssysteme Identifikationsaufgaben und unterstützen so Sortierprozesse. Eines der bekannten Anwendungsgebiete der digitalen Bildverarbeitung bildet die Meßtechnik. Durch die Kombination mit optischen Ganzfeldmeßverfahren ist hier die Grundlage zu einer schnellen Digitalisierung von Freiformflächen aus dem Modellbau, wie auch der direkten Vermessung komplexer Geometrien gelegt worden.

Ein wesentliches Kriterium für den Einsatz an Hochschulinstituten bildet die offene, weitestgehend hardwareunabhängige Gestaltung der Bildverarbeitungsprogramme. Nur so ist eine Anpassung an spezifische Aufgabenstellungen und die Softwarepflege sinnvoll zu bewältigen.

### 2 Theoretische Grundlagen der digitalen Bildverarbeitung

Der Oberbegriff der digitalen Bildverarbeitung umfaßt allgemein die Bereiche der rechnerbasierten Bearbeitung, Interpretation, Klassifikation und Auswertung bildhafter Informationen /3/.

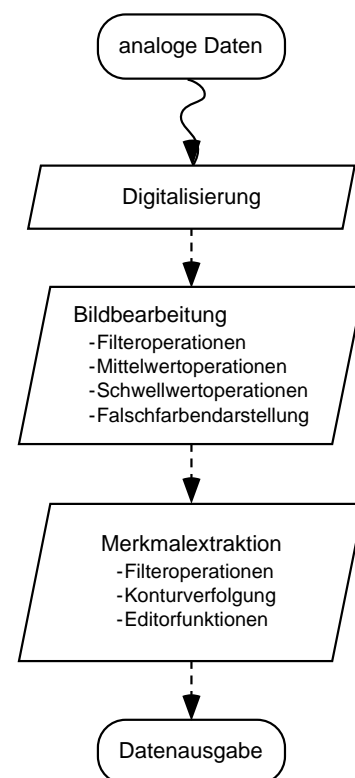


Bild 1: Stufen der digitalen Bildverarbeitung

Parallel zur Verbesserung der Hardware entwickelten sich spezielle Modelle zur Speicherung, Datenreduktion, Verbesserung und Aufbereitung von Bildern, der Extraktion von Bildmerkmalen sowie zur Erkennung von Objekten. Diese Theorien sind so komplex, daß sie hier in ihrer Gesamtheit nicht dargestellt werden können. Diese Publikation beschränkt sich deshalb auf ausgewählte theoretischen Grundlagen, die Vorstellung der eingesetzten Software und die Darstellung der Anwendung innerhalb der Auswertung spannungsoptischer Auswertungen.

## 2.1 Die Programmpakete Khoros und Cantata

Die Programmpakete *Khoros* und *Cantata* werden seit Januar 1987 am *Department of Electrical and Computer Engineering* an der *University of New Mexico* entwickelt und sind als Public-Domain-Software erhältlich. *Khoros* und *Cantata* laufen auf vielen Plattformen, wie z.B. HP, APOLLO, CRAY, DEC, NeXT, SUN und mittlerweile auch auf iX86 Systemen unter Linux.

## 2.2 Khoros

Die Einordnung von *Khoros* in gängige Softwarekategorien fällt schwer. Die Konzeption sieht eine leichte Erweiterbarkeit vor. Das Programmpaket vereint sowohl eine Programmbibliothek als auch verschiedene CASE-Tools zur Softwareentwicklung. Neben den bildverarbeitenden Routinen wird damit auch ein Softwareentwicklungsstandard für Erweiterungen des Systems angeboten. Die Entwickler selbst bezeichnen ihr System als '*Integriertes Softwarepaket mit Entwicklungsumgebung zur Informationsverarbeitung und Datenaufbereitung/darstellung*'. Diese Konzeption macht es allen Anwendern möglich, das System an ihre speziellen Anforderungen anzupassen.

Die Programmbibliothek stellt eine große Anzahl von Routinen zur Bild- und Signalverarbeitung zur Verfügung. Diese Routinen arbeiten mit einem einheitlichen Grafikformat, dem sogenannten VIFF-Format, so daß die Ergebnisse einzelner Routinen wieder als Eingabe für andere Routinen genutzt werden können. Es stehen sowohl eine große Anzahl an Bildverarbeitungsoperatoren zur Glättung, Kantenextraktion, geometrischen und farblichen Manipulation und Farbmodellumwandlung als auch Konvertierungs- und Auswerterroutinen zur Verfügung. Alle diese Routinen können direkt von der Kommandozeile aufgerufen werden und zeichnen sich durch eine einheitliche Syntax der Aufrufparameter aus. Jede einzelne Routine besitzt darüberhinaus eine programmiersprachenspezifische Schnittstelle (hier in C), so daß jede Routine auch für eigene Weiterentwicklungen zur Verfügung steht.

Die Erweiterung des Systems wird durch die zugehörigen CASE-Tools vereinfacht. Große Teile einer zu entwickelnden Routine, u.a. die Auswertung des Kommandozeilenaufrufs und die grafische Oberflä-

che, werden durch eine Skriptsprache spezifiziert und dann von den CASE-Tools in ausführbaren Programmcode umgewandelt. Der Programmierer kann sich dadurch ganz auf die von ihm zu implementierenden Routinen konzentrieren. Gleichzeitig garantiert dieses Verfahren ein einheitliches Erscheinungsbild und Verhalten der neu entwickelten Routinen.

## 2.3 Cantata

Bei *Cantata* handelt es sich um eine grafische Oberfläche, die den komfortablen Aufruf der einzelnen *Khoros*-Routinen ermöglicht. Diese können dabei zu Datenflußnetzwerken hintereinandergeschaltet werden, in denen nachfolgende Routinen die Ergebnisse ihrer Vorgänger als Eingaben entgegennehmen. Der Aufbau dieser Netzwerke wird grafisch am Bildschirm angezeigt. Mit der Maus können neue Routinen, in diesem Zusammenhang auch Module genannt, eingefügt bzw. gelöscht werden. Verbindungen zwischen den einzelnen Modulen können ebenfalls per Mausclick manipuliert werden. *Cantata* ermöglicht den Aufruf einzelner Routinen bzw. des gesamten Netzwerkes und führt die entsprechenden *Khoros*-Routinen aus. Weiterhin besteht die Möglichkeit, mehrere Routinen funktional zusammenzufassen, damit sie nach außen hin als ein einzelnes Modul erscheinen.

Die netzwerkartige Anordnung der einzelnen Module ist gerade in Bezug auf die Bildverarbeitung sehr sinnvoll. Die Gesamtbearbeitung eines Bildes setzt sich meistens aus einer Vielzahl von Einzelschritten zusammen. Jedes Modul kann mittels Parametern optimiert werden. Die *Cantata*-Oberfläche unterstützt durch die einfache Zusammenstellung der Module und die beliebige Verzweigung des Datenflusses eine schnelle und vergleichende Bewertung der Resultate. Der Einfluß von Parametern auf die Resultate läßt sich durch das Starten des Gesamtnetzwerkes oder aber nur einzelner Stränge bequem ermitteln.

Die Oberfläche *Cantata* ist jedoch nicht nur auf die schon bestehenden *Khoros* Routinen ausgelegt. Die Verwendung der Skriptsprache, mit der auch schon die Kommandozeilenparameter und die grafische Erscheinung von selbst entwickelten Routinen festgelegt wird, stellt eine Integration dieser Routinen in die bestehende Programmbibliothek sicher und garantiert ein gleiches Verhalten wie bei schon existierenden *Khoros*-Module.

**Bild 2** zeigt beispielhaft die *Cantata*-Oberfläche mit einem Netzwerk aus verschiedenen Modulen zur Bearbeitung eines spannungsoptischen Bildes.

Weitere Informationen zu *Khoros* und *Cantata*, insbesondere zur Bedienung der Oberfläche können den Handbüchern entnommen werden /4/.

### 3 Softwareentwicklung unter Khoros

Der Prozeß der Softwareentwicklung wird unter Khoros durch verschiedene CASE-Tools stark erleichtert. Gegenüber der konventionellen Programmierung ergeben sich dadurch einige Besonderheiten, auf die hier nur kurz eingegangen werden kann.

#### 3.1 Erstellung der Benutzerschnittstellen

Die Entwicklung jeder *Khoros*-Routine beginnt mit der Festlegung der Ein- und Ausgabeparameter, die sich unmittelbar in der Benutzerschnittstelle niederschlägt. Dazu gehört auch die Spezifikation, ob ein Parameter optional oder zwingend angegeben werden muß. Es wird zwischen dem sogenannten CLUI (Command Line User Interface) und dem GUI (Graphical User Interface) unterschieden. Jede *Khoros*-Routine muß ein CLUI besitzen. Ein GUI besitzen nur die sogenannten *XV-Routinen*, die während des Programmablaufs zusätzliche Eingaben von der *XWindow*-Oberfläche erwarten.

Sowohl die CLUI als auch die GUI werden mit einer Skriptsprache beschrieben. Die Umsetzung der GUI Beschreibung in das tatsächliche Ein-/Ausgabfenster geschieht dann wieder automatisch. Mit Hilfe des im *Khoros*-Paket enthaltenen Programms *preview*

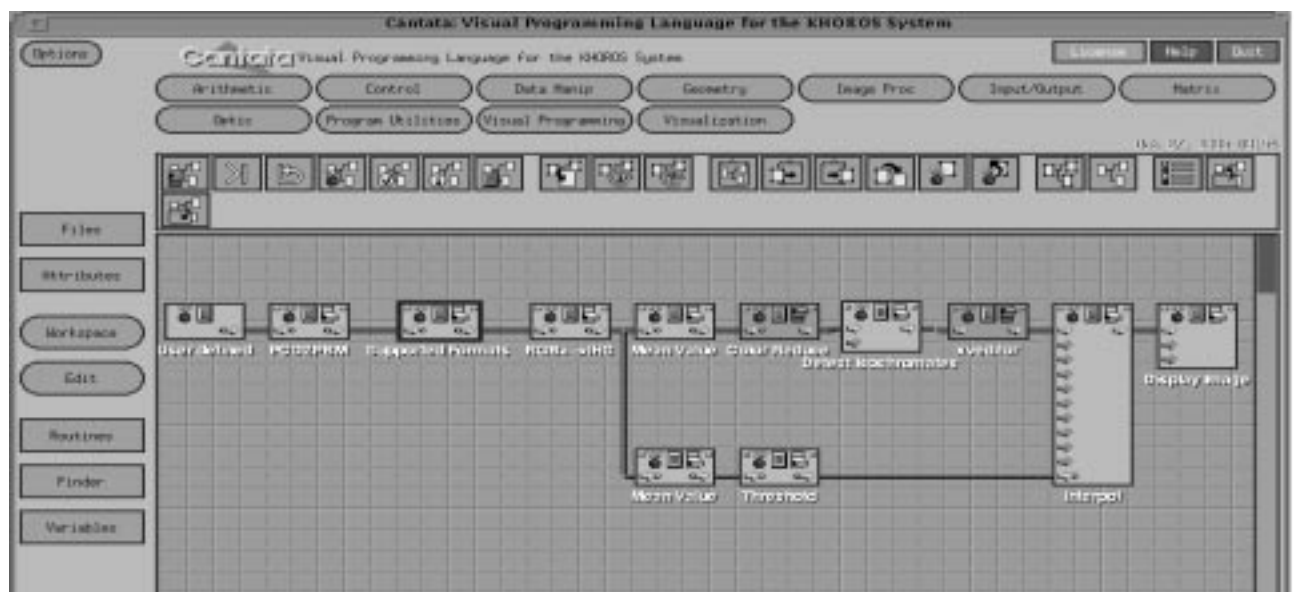
lassen sich bereits definierten Teile der GUI darstellen und Fehler vorab erkennen.

#### 3.2 Ghostwriter und Ghostreader

Der eigentliche Softwareentstehungsprozeß erfolgt mit Hilfe der CASE-Tools Ghostwriter.

*Ghostwriter* erzeugt mit der Hilfe des CLUI-Files als Eingabe zunächst einen Programmrahmen für den zu schreibenden Quellcode. Dieser Rahmen besitzt eine fest vorgeschriebene Struktur. So sind die Parameterspezifikationen der CLUI ebenso immer an der gleichen Stelle zu finden wie auch die Platzhalter für die Dokumentation der Routine in Form einer UNIX *manpage*. Da diese Vorgaben eingehalten werden müssen, entspricht die selbstentwickelte Routine automatisch dem *Khoros*-Standard. Änderungen in der Parameterspezifikation können wiederum in der CLUI Spezifikation vorgenommen werden. Ein erneuter Aufruf von *ghostwriter* aktualisiert dann das entsprechende Quellcode File.

Eine Erleichterung zu der Erstellung graphischer Ausgaben stellt der *Conductor* dar. Diese Routine kann zur Erstellung von Programmen genutzt werden, die Darstellungen auf der *XWindow*-Oberfläche vornehmen bzw. interaktive Eingaben während des Programmablaufes vom Benutzer entgegennehmen. Eine Erweiterung erlaubt es inzwischen auch, grafische Elemente der Benutzeroberfläche direkt zu manipulieren. Diese Änderungen bewirken automatisch eine Aktualisierung der entsprechenden GUI Spezifikation.



**Bild 2:** Cantata-Oberfläche

#### 4 Vorteile und Einschränkungen des *Khoros-Systems*

Gegenwärtig wird eine große Anzahl an zum Teil kommerziellen aber auch nicht-kommerziellen Bildverarbeitungsprogrammen auf dem Markt angeboten. Einige dieser Systeme sind auf eine spezielle Hardwareumgebung angewiesen oder in speziellen Programmiersprachen zu erstellen. Für eine Entscheidung zugunsten der Programmpakete *Khoros* und *Cantata* sprechen mehrere Gründe:

- Das Programmpaket ist kostenlos erhältlich und enthält sehr viele der benötigten Routinen.
- Das Programmsystem kann auf vielen Plattformen, wie z.B HP, APOLLO, CRAY, DEC, NeXT, SUN und mittlerweile auch auf iX86 Systemen unter Linux eingesetzt werden.
- Mit Programmiersprache C wird eine standardisierte und weit verbreitete Sprache vorgegeben.
- Es ist möglich, das System selbständig zu erweitern und an die speziellen Anwenderbedürfnisse anzupassen.
- Das Konzept der Datenflußnetzwerke der Oberfläche *Cantata* eignet sich sehr gut für die geforderte Aufgabenstellung.
- Da das System an vielen Universitäten genutzt wird, sind eine Vielzahl an Toolboxes für spezielle Aufgaben über das Internet erhältlich.
- Durch die freie Erweiterbarkeit und weite Verbreitung des Systems können Herstellerabhängigkeiten weitgehend vermieden werden /2/.

Durch die oben beschriebene Art der Softwareentwicklung werden mehrere positive Effekte erzielt. Zum einen werden dem Programmierer viele Standardaufgaben abgenommen, die normalerweise viel Zeit kosten würden, jedoch nicht mit den eigentlichen Programmfunktionen in Verbindung stehen und sehr fehleranfällig sind. Als Beispiel sei hier die Auswertung der Kommandozeile bzw. die Erstellung der grafischen Benutzeroberfläche genannt.

Weiterhin wird durch das strenge Konzept sehr einheitliche Software erzeugt. Die Routinen müssen von Anfang an so konzipiert werden, daß sie nicht nur von der augenblicklich erstellten, sondern auch von in Zukunft zu erstellenden Routinen genutzt werden können.

nen.

Aber nicht nur der Programmierer profitiert von diesem Verfahren. Auch die Benutzung der Routinen wird erleichtert. So verhalten sich alle *Khoros*-Routinen nach außen ähnlich. Die meisten Aufrufparameter sind identisch bzw. haben die gleiche Form. Erst dieser Umstand ermöglicht das einfache Einbinden neuer Routinen in die Benutzeroberfläche *Cantata*.

Dennoch bringt dieses Verfahren nicht nur Vorteile. Der Programmierer in der Gestaltung des Quellcodes oftmals zu stark an die von *Khoros* vorgegebene Aufteilung gebunden. Teilweise führt dieses zu Unübersichtlichkeiten, die dann zu schwer ermittelbaren Fehlern führen. Dies verlangt vom Programmierer besonders in der Anfangsphase eine große Disziplin und eine gewisse Überwindung.

Insgesamt überwiegen jedoch die positiven Seiten des *Khoros* Konzeptes. Die Programmentwicklung wird nach einer gewissen Eingewöhnungszeit außerordentlich beschleunigt. Der Programmierer kann sich vollkommen auf die zu realisierenden Funktionen des Programmes konzentrieren, ohne zu viel Aufmerksamkeit auf Oberflächen und Benutzerschnittstellenprogrammierung verwenden zu müssen. Auch die Verwaltung aller erstellten Routinen, den zugehörigen Spezifikationen und Dokumentationen übernimmt eine komfortable Umgebung.

#### 6 Anwendung in der Auswertung dynamischer spannungsoptischer Aufnahmen

Die dynamische Spannungsoptik wird am Institut für Maschinenwesen zur Analyse der Körperschalleitung im Rahmen von Ähnlichkeitsuntersuchungen eingesetzt /5/.

Die Spannungsoptik liefert zwei unterschiedliche Streifenmuster, die die Informationen zur Ermittlung des Spannungszustandes im Modell liefern. Die Isochromaten – farbige Linien auf dem Modell –, geben die Hauptspannungsdifferenz wieder. Die Hauptspannungsrichtungen werden durch schwarze Linien, die sogenannten Isoklinen, wiedergegeben.

Der Einsatz der digitalen Bildverarbeitung soll es ermöglichen, die Isochromaten- und Isoklineninformationen aus den photographischen Aufnahmen zu extrahieren und getrennt weiterzuverarbeiten. Ziel ist es, die Informationen in geeignete Daten für eine numerischen Auswertung umzusetzen.

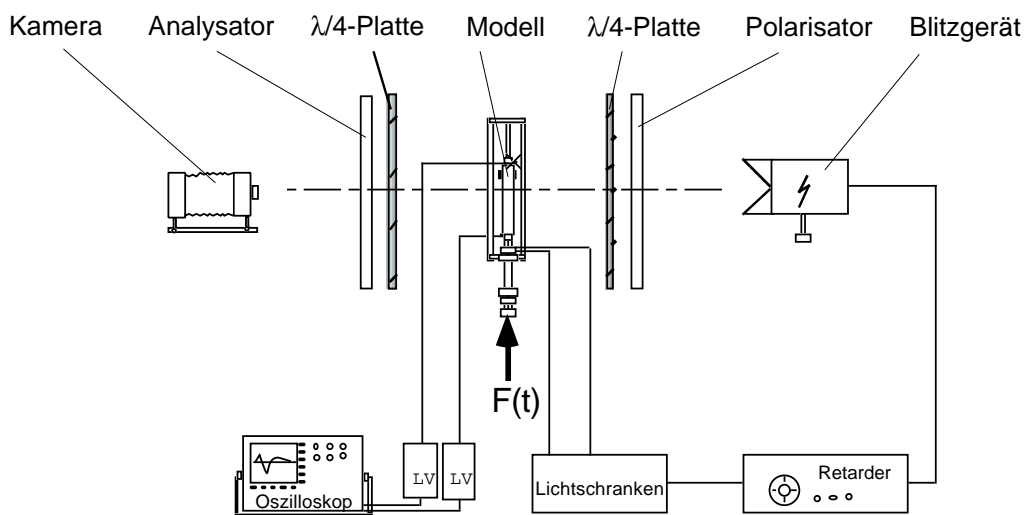


Bild 3: Erstellung dynamischer spannungsoptischer Aufnahmen

Vom Versuchsaufbau bis zur Auswertung werden dabei mehrere Zwischenstadien durchlaufen. **Bild 4** gibt einige der unterschiedlichen Repräsentationen wieder. Das analog aufgenommene Isochromatenbild enthält die interessierenden Informationen, die nun in eine rechnerverarbeitbare Form transformiert werden müssen. Nach der Digitalisierung des Bildes und gegebenenfalls der Anwendung von bildverarbeitenden Routinen filtern Extraktionsalgorithmen die relevanten Informationen heraus. Eine Repräsentation hiervon ist z.B. das Konturbild der Isochromaten (Bild 4 Mitte). Die numerische Auswertung schließt sich der Merkmalsextraktion an. Dabei geben die numerischen Verfahren die Schittstellen zwischen einer grafischen Repräsentation und einer numerischen Repräsentation ("Zahlenkolonnen") weitestgehend vor. Die Repräsentation der Auswertungsergebnisse erfolgt in der Regel wieder grafisch (Bild 4, rechts).

Die folgenden Kapitel gehen exemplarisch noch einmal auf die einzelnen Schritte ein.

### 6.1 Versuchsaufbau

**Bild 3** zeigt schematisch den verwendeten Versuchsaufbau zur Analyse der Modelle unter Stoßanregung.

Die Stoßwelle breitet sich mit Schallgeschwindigkeit im Modell aus. Während des Ausbreitungsvorganges werden zu definierten Zeiten Einzelaufnahmen des Vorganges erstellt /5/. Da der Einsatz des Phasenshift-Verfahrens unmöglich ist, werden zur vollständigen Auswertung des Spannungszustandes für einen Zeitpunkt eine Isochromaten- und 9 Isoklinenaufnahmen angefertigt.

### 6.2 Digitalisierung

Für den Einsatz in der Meßtechnik ist es nicht immer zwingend erforderlich, eine sofortige Weiterverarbeitung der Messdaten vorzunehmen. Im vorliegenden Fall wurde eine vergleichsweise preiswerte Digitalisierung analoger Photographien durch kommerzielle Photo-CD's gewählt. Die Bilder werden von der CD in fünf Auflösungen von 192\*128 bis 3072\*2048 bei einer Farbtiefe von 24 bit zur Verfügung gestellt.

### 6.3 Farbmodell

Für den hier dargestellten Anwendungsfall ist eine Echtfarbendarstellung notwendig. Besonders geeignet für die nachfolgenden Bearbeitungsschritte ist



Bild 4: Auswertungsschritte von links, Isochromatenbild, extrahierte Isochromaten, Spannungsverteilung nach der GEH

das IHS-Farbmodell.

Mathematisch läßt sich ein Bild ohne Verluste vom RGB-Farbmodell in das IHS-Farbmodell und zurück umrechnen. Im IHS-Modell wird eine Farbe nicht in ihre drei Grundfarben Rot, Grün und Blau zerlegt. Stattdessen wird sie durch die drei Werte Intensität, Farbe und Sättigung charakterisiert. Dieses Farbmodell bietet sich für die Bearbeitung spannungsoptischer Bilder besonders an, da oft nur die Farb- bzw. Intensitätswerte eines Pixels bearbeitet werden müssen. Im RGB-Modell wären in diesem Falle alle drei Bänder des Bildes zu bearbeiten, im IHS-Modell jedoch nur ein Band. Dies wirkt sich besonders positiv auf die Geschwindigkeit der einzelnen Bildverarbeitungsroutinen aus und erleichtert ihre Implementierung.

#### 6.4 Merkmalsextraktion

Der Programmablauf wird durch die verwendeten Module in **Bild 2** verdeutlicht.

Die Bilder werden von der Photo-CD eingelesen und in das IHS-Modell konvertiert. Je nachdem, ob ein Isochromaten- oder ein Isoklinienbild bearbeitet werden soll, werden Farb- oder Intensitätsbänder für die Merkmalsextraktion genutzt.

Zur Vorverarbeitung werden die Bilder einer Mittelwertfilterung unterzogen, um Fehler zu glätten. Danach wird der Bildhintergrund durch ein Pegelbild nachbearbeitet. Die interaktive Vergabe der Isochromatenordnung ist in drei Module untergliedert. Im ersten Schritt wird eine beliebige Anzahl von Zwischenwerten definiert. Im zweiten Schritt werden die Isochromatenfelder mit der vorgewählten Unterteilung dargestellt um sie abschließend mit einem Editor nachbearbeiten zu können.

Aus diesen Feldinformationen wird durch eine nachgeschaltete Interpolation eine Ausgabematrix von kontinuierlichen Isochromatenwerten erstellt.

Zur Gewinnung der Informationen über die Hauptspannungsrichtungen werden aus den neun Isoklinienbildern durch ein Skelettierungsalgorithmus die Grundinformationen herausgearbeitet. Eine manuelle Nachbearbeitung durch einen Editor ist hier jedoch notwendig. Alle Bildinformationen werden anschließend durch eine Interpolation in eine Ausgabematrix der Isoklinienwerte umgewandelt.

#### 6.5 Auswertung

Zur Beschreibung eines vollständigen zweidimensionalen Spannungszustandes werden drei Variable bzw.  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  oder  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\phi$  benötigt. Aus der Spannungsoptik erhält man zwei der drei Variablen bzw. die Hauptspannungsdifferenz und die Hauptspannungsrichtung.

Ausgehend von den mittels der digitalen Bildverarbeitung erstellten Ausgabematrizen wird ebenfalls unter Khoros in einem nachgeschalteten Modul eine Trennung der Hauptspannungen nach dem Liebmann-Verfahren vorgenommen. Unter Berücksichtigung der Gleichgewichts- und Verträglichkeitsbedingungen wurde in /2/ ein Verfahren zur quantitativen Auswertung vorgestellt. Aufbauend auf diesem Verfahren wurde im Rahmen eines FVA-Vorhabens ein Programmsystem entwickelt, das die Hauptspannungen trennt und die Koordinatenspannungen und die potentielle Energieverteilung nach der Gestaltänderungsenergiehypothese berechnet /1/.

#### 7 Zusammenfassung

Die digitale Bildverarbeitung stellt ein äußerst leistungsfähiges Werkzeug zur Verarbeitung optischer Informationen dar. Durch eine modularisierte Gestaltung des Programms wird eine hohe Flexibilität erreicht, die mit gezielter Optimierung der einflußnehmender Parameter verbunden werden kann.

#### Literatur

/1/ Dietz, P.; Engel, K.: FVA 235-Impedanzelement Forschungsreport 1995

/2/ Albers, J.: Dynamische Spannungsanalyse mit optischen und numerischen Verfahren unter Einsatz der digitalen Bildverarbeitung am Beispiel prallbeanspruchter Partikelmodelle. Diss. TU Clausthal 1991

/3/ Klette, R.; Zamperoni, P.: Handbuch der Operatoren für die Bildbearbeitung - Bildtransformation für die digitale Bildverarbeitung - Vieweg, Wiesbaden 1992

/4/ Khoros Research, Inc.: Programming Service Volume I-III, 1995

/5/ Dietz, P.; Engel, K.; Schmidt, A.: Maschinenakustische Maßnahmen zur Reduktion der Körperschallübertragung  
Institutsmittteilung Nr. 19, IMW Clausthal 1994