

### 3.4 Teilprojekt A4

Grundlagenuntersuchung, Entwicklung und Erprobung optischer Sensoren für die Qualitätssicherung und zum Einsatz an Montagerobotern in der flexiblen Montage.

#### 3.4.1 Kenntnisstand bei der letzten Antragsstellung

Die Automatisierung von Produktions- und Montageprozessen erfordert neben den marktüblichen Sensoren zur Aufnahme skalarer und eindimensionaler physikalischer Größen (Druck, Kraft, Weg, etc.) auch neuartige flexible optische Sensorik für die zwei- und dreidimensionale Objekterfassung und Szenenanalyse. Die Ergebnisse der optischen Grundlagenforschung lassen eine Vielfalt von technischen Entwicklungen und Realisierungen für die Zukunft erwarten.

Die dreidimensionale berührungslose Objektvermessung ist eine zentrale Sensoraufgabe in der industriellen Montage und Qualitätssicherung. Hierfür geeignet sind optische Triangulationsverfahren, die sich im Vergleich zu anderen Verfahren /1/ durch hohe relative Distanz- und Lateralauflösung sowie geringen apparativen Aufwand auszeichnen /2/. Zum Zeitpunkt der letzten Antragsstellung realisierte und industriell erprobte Triangulationsverfahren arbeiteten ein- oder zweiachsig und waren damit nur zur Abstands- bzw. Linienprofilmessung geeignet.

Dreiachsige Triangulationsverfahren waren bei der Antragsstellung nur als Labormuster realisiert. Kennzeichnend an diesen Verfahren ist ein festes Raster von Antastpunkten, deren Position und Zahl festgelegt ist. Da jedoch im allgemeinen nur bestimmte Objektausschnitte für Montage- und Prüfaufgaben interessant sind, ist der Anteil an Nutzinformation im Vergleich zu den großen erzeugten Datenmengen sehr gering, wodurch sich der Zeitbedarf für eine Montage- oder Prüfaufgabe mitunter erheblich vergrößert.

Optische Verfahren zur Fehlererkennung haben gegenüber den digitalen Verfahren Geschwindigkeitsvorteile. Wegen den bei kohärenter Objektbeleuchtung auftretenden Störungen durch die Oberflächenrauigkeit (Laserspeckles) konnten diese Verfahren bislang nicht realisiert werden. Für die optische Bildvorverarbeitung in der flexiblen Montage ist daher ein Bildspeichermedium, welches in quasi-Echtzeit arbeitet, von zentraler Bedeutung. Ein solches Bildspeichermedium kann, sofern es die Intensitätsverteilung als Doppelbrechungsverteilung speichert, zur Inkohärent-Kohärent-Wandlung, Kontrastwandlung sowie zur Durchführung algebraischer (+,-,x) und eventuell auch analytischer (d/dx) Operationen verwandt werden.

Zu Beginn der Förderungsperiode existierten auf dem Weltmarkt lediglich Wandler, die mehrschichtig aufgebaut und daher sehr teuer (ca. 100.000,- DM ) oder unverkäufliche Versuchsmuster waren /3,4,5/. Daher waren die Experimente auf dem Gebiete der optischen Bildvorverarbeitung mit Echtzeit-Bildspeichermedien (abgesehen von holographischen Methoden, die aber aus den vorerwähnten Gründen (Rauigkeit) kaum anwendbar sind) noch nicht über das reine Laborstadium hinaus /6,7/.

Die Objektbeleuchtung bei der "Robot Vision" ist vor allem dann problematisch, wenn verschiedenartige Merkmale eines Objekts von der Bildverarbeitung erfaßt werden sollen. Die für bestimmte Merkmale optimale Beleuchtung kann die Sichtbarkeit anderer Merkmale erheblich beeinträchtigen. Statische Beleuchtungen, wie sie meist in der Praxis verwendet werden /8/, können daher nur Kompromißlösungen sein und nicht gleichzeitig alle Merkmale hervorheben.

Dynamische Variation von Beleuchtungs- und Beobachtungskonfiguration zur Verbesserung der Sichtbarkeit von Objektmerkmalen sowie strukturierte oder punktuelle Beleuchtungen zur Kodierung der dritten Raumkoordinate wurden bisher vorwiegend wissenschaftlich eingesetzt /9,10,11/. Für den Industrieinsatz sind schnelle und robuste Verfahren erforderlich.

### 3.4.2 Angewandte Methoden

#### Abstandsmessung durch optische Triangulation

Ausgangspunkt unserer Entwicklung war die in Bild 1 gezeigte Standardanordnung zur Abstandsmessung durch optische Triangulation. Ein Lichtstrahl  $S$  markiert auf dem Meßobjekt einen Punkt  $P$ , der durch die Optik  $L$  auf den ortssensitiven photoelektrischen Detektor  $T$  (z.B. Photodiodezeile, Linearposicon) in  $P'$  abgebildet wird. Durch die gegen den Antaststrahl geneigte Anordnung der Auswertoptik wird erreicht, daß sich der Abstand  $H$  des Antastpunkts in eine definierte Punktbildposition umsetzt. Hieraus und aus den Geometriedaten des Aufbaus errechnet sich der Abstand  $H$ . Durch entsprechende Anordnung von Abbildungsoptik und Detektor kann die Scheimpflugbedingung erfüllt werden, was eine scharfe Abbildung des Antastpunkts über den gesamten Meßbereich gewährleistet.

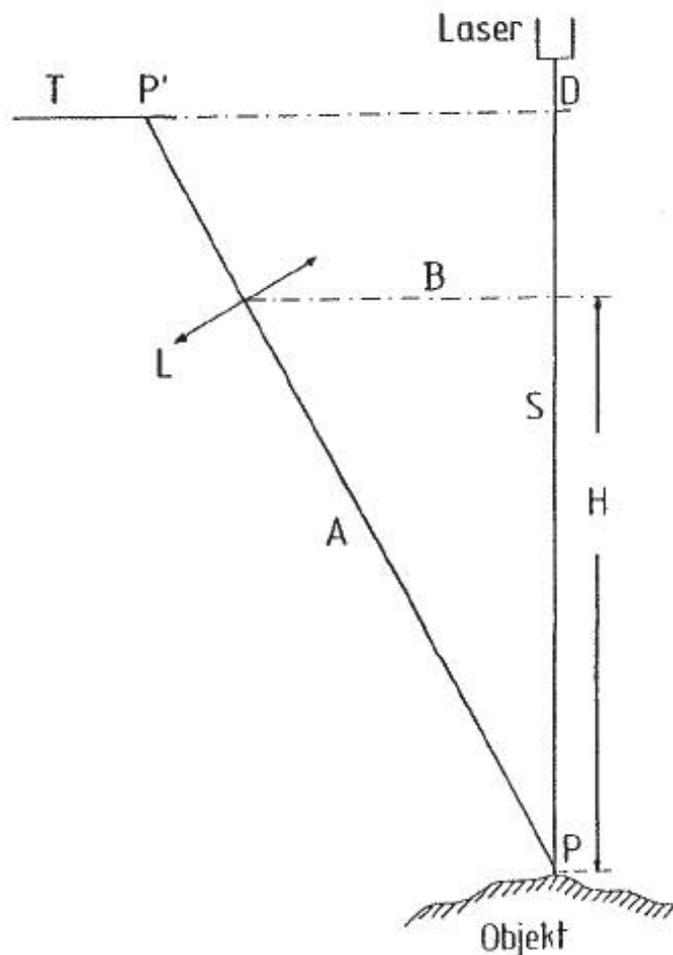


Bild 1 : Standardaufbau zur Abstandsmessung durch optische Triangulation

Durch Dynamisierung von Antast- und Abbildungshauptstrahl sollte dieses Meßprinzip zweidimensional erweitert werden. Hierzu sind beide Strahlengänge über steuerbare Drehspiegel zu führen (Bild 2). Die Punktbildposition auf dem Detektor ist dann vom Einstellwinkel des abbildungsseitigen Drehspiegels und vom Antastpunkt abhängig. Hierdurch kann jeder Antastpunkt innerhalb des Drehspiegelschwenkbereichs auf den Detektor abgebildet und somit vermessen werden. Da die Scheimpflugbedingung in dieser Anordnung nur teilweise erfüllt werden kann, ist im allgemeinen von einem unscharfen Punktbild auszugehen. Es mußte daher eine defokussierungsunabhängige Anordnung zur Positionsbestimmung des Punktbildes angewandt werden.

Die Objektabtastung erfolgt mit diesem Aufbau entlang einer Linie. Durch eine geeignete Umlenkvorrichtung von Antast und Abbildungsstrahl wird die Antastlinie lateral verschiebbar, was eine dreidimensionale Vermessung erlaubt.

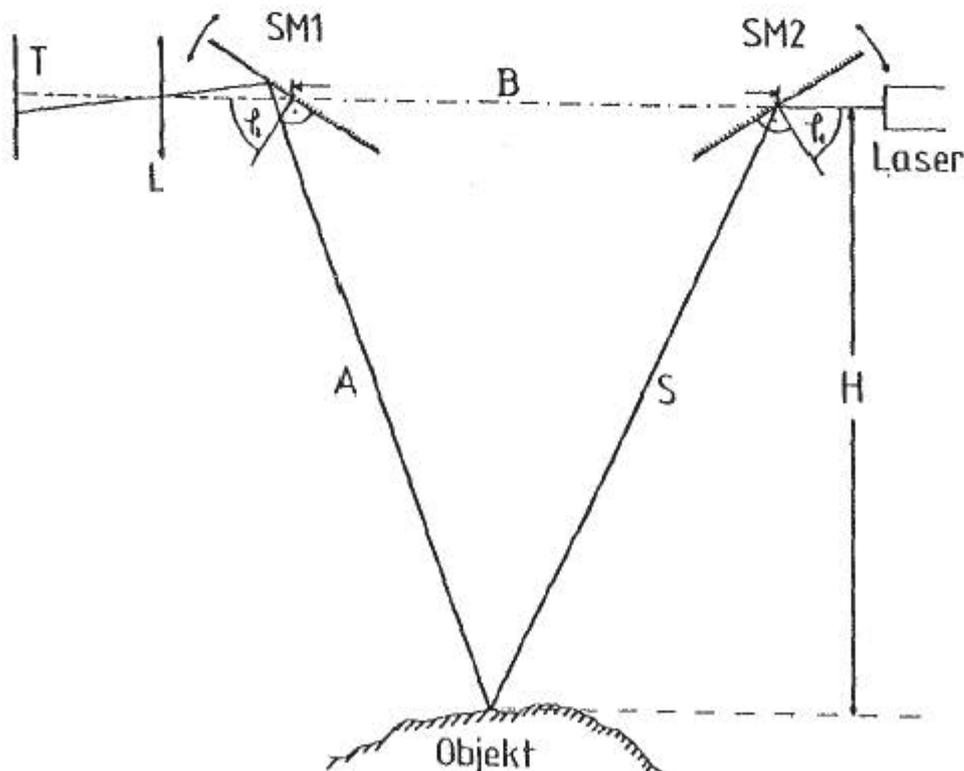


Bild 2 : Erweiterter Aufbau zur zweiachsigen Oberflächenvermessung

### Elektrooptische Bildvorverarbeitung

Bevor die optische Bildvorverarbeitung begann, galt es, einen praktikablen Echtzeitbildspeicher/wandler zu entwickeln. Ausgangspunkt unserer Untersuchungen war die Analyse der existierenden Wandler, von denen wir einen (Leihgabe der Firma Thomson CSF) auch untersuchen konnten. Die aufwendige Mehrschichtenbauweise der damals existierenden Wandler rührte daher, daß man jeweils ein Material für die Umwandlung der Intensitätsverteilung in eine elektrische Spannungsverteilung (photoelektrische Wandlung z.B. mit CdS) sowie für die Wandlung der elektrischen Spannungsverteilung in eine Doppelbrechungsverteilung (elektrooptische Wandlung mit LCD) benötigte /3,4,5/.

Erster Schritt unserer Arbeiten war es daher, ein Material zu finden, welches sowohl photoelektrisch als auch elektrooptisch ist. Diese Bedingung wird von den Polybismuthiten erfüllt, deren damals bekannten holographischen Anwendungen auf einer skalaren Änderung der Brechzahl beruhten /6,7/.

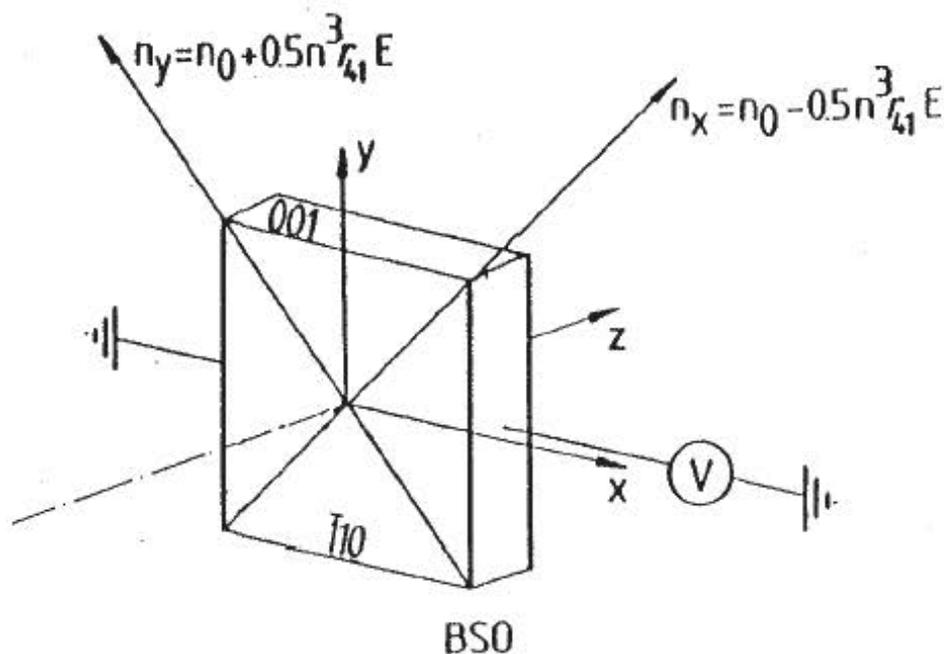


Bild 3 : Orientierung der elektrooptischen Kristalle

Durch geeignete Orientierung (Bild 3) der Kristalle konnten wir erreichen, daß die Polybismuthite, insbesondere  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ , intensitätsabhängige Doppelbrechungsänderungen zeigten /12/. Damit war ein Wandlermedium entwickelt, welches erstmals für praktische Anwendungen geeignet ist.

Der zweite Schritt war die technische Umsetzung des Bildspeichermediums zu einer funktionsfähigen Bildspeichereinheit. Es wurde daher als erster Schritt eine spezielle Kammer entwickelt, die den Einsatz von höheren angelegten Feldern als bisher (13 kV/cm statt bisher 5 kV/cm) erlaubte. Ferner wurde untersucht, bei welchen Betriebsbedingungen die Speichereinheit arbeiten kann. Dabei wurden sowohl optische als auch thermische, elektrische und mechanische Eigenschaften untersucht.

Als dritter Schritt wurden mehrere Bildvorverarbeitungskonzepte sowohl inkohärenter als auch kohärenter Art entwickelt und experimentell untersucht, deren prinzipielle Gemeinsamkeit die Vermeidung einer kohärenten Objektbeleuchtung ist.

### Aktiv-optische Informationsvorverarbeitung

Die bei der "Computer Vision" von der Kamera aufgenommene Information über Objekt oder Szene ist unvollständig und gestört. Daher ist jegliche (digitale) Nachverarbeitung, ob zur Merkmalsextraktion, Bildsegmentation, Texturanalyse oder Rekonstruktion und Erkennung von Objekten auf eine Vielzahl einschränkender Annahmen und Hypothesen angewiesen. Diese stecken als Prämissen in einfachen Algorithmen, oder sie resultieren aus aufwendiger wissensbasierter Verarbeitung.

Im on-line-Betrieb der Montage oder Qualitätsprüfung sind schnelle und zuverlässige Ergebnisse der "Computer Vision" gefordert. Durch geeignete aktiv-optische Maßnahmen vor der Bildaufnahme kann sowohl der relevante Anteil der Objektinformation als auch deren Zuverlässigkeit erhöht werden. Die nachfolgende digitale Bildverarbeitung wird dadurch schneller.

Optische Informationsvorverarbeitung umfaßt hier das gesamte optische Geschehen von der gezielten Beleuchtung des Objekts über die Wahl der Beobachtungsperspektive bis hin zur optischen Filterung, Abbildung und optoelektronischen Wandlung. Es ergaben sich daher mehrere Ansatzpunkte für eine optische Unterstützung der digitalen Bildverarbeitung.

Zum einen sollte der Einfluß der Beleuchtung auf die Sichtbarkeit von Objektmerkmalen (z.B. Kanten für die Formerkennung und Objektvermessung, Knicke, Risse, Flecken etc. bei der Qualitätsprüfung) systematisch untersucht werden. Hierzu wurde ein optischer Aufbau realisiert, der eine Beleuchtung mit konvergentem, parallelem und divergentem Auflicht, rotationssymmetrischem und winkelabhängigem Streiflicht sowie diffusem Durchlicht erlaubt. Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Untersuchungen sollten verschiedene praktikable Beleuchtungsverfahren in Verbindung mit der digitalen Bildverarbeitung realisiert werden.

Im Bereich der globalen Objektbeleuchtung bieten Kombinationen verschiedener Beleuchtungsverfahren erhebliche Vorteile. Verschiedene Objekte, Objektbereiche oder Objektmerkmale stellen oft widersprüchliche Beleuchtungsanforderungen, daher sollen schnelle Sequenzen unterschiedlicher Beleuchtungskonfigurationen eingesetzt werden, um den optischen Informationsgehalt vor der Bildaufnahme gezielt zu erhöhen.

Zur Realisierung dieser Verfahren existierten bisher keine geeigneten Beleuchtungssysteme. Es wurde daher ein rechnergesteuertes Beleuchtungsmeß- und -steuergerät entwickelt und gebaut, das schnelle Sequenzen reproduzierbarer Beleuchtungssituationen erlaubt.

Weitere Verfahren zur optischen Unterstützung der digitalen Bildsegmentation und Merkmalsextraktion und vor allem zur 3D-Objektrekonstruktion mit Hilfe räumlich strukturierter Beleuchtung und Lasertriangulation sind konzipiert und sollen in der nächsten Projektphase realisiert werden.

### 3.4.3 Ergebnisse und ihre Bedeutung

Das Teilprojekt A4 befasst sich mit der Entwicklung flexibler optischer Sensoren für die zwei- und dreidimensionale Objekterfassung und Szenenanalyse (Bild 4). Dabei wurde sowohl auf aktuelle technische Realisierungen als auch auf die Konzeption neuartiger Sensoren Wert gelegt.

Der in der ersten Projektphase entwickelte und realisierte Aufbau zur 3D-Lasertriangulation erlaubt eine flexible Anpassung an spezifische Mess- und Prüfaufgaben. Informationsredundanz wird bereits bei der Datenaufnahme vermieden, was die nachfolgende Auswertung erheblich vereinfacht (3.4.3.1).

Im Bereich der zukunftsweisenden Kristalloptik wurde ein neuartiger elektrooptischer Bildspeicher (Inkohärent-Kohärent-Wandler) entwickelt. Die für die zweite Projektphase geplante technische Erprobung wurde bereits teilweise vorgezogen. Erste Ergebnisse angewandter analogoptischer Bildverarbeitungsverfahren liegen bereits vor (3.4.3.2).

Zur Realisierung aktiv-optischer Methoden zur Bildvorverarbeitung wurde in der ersten Projektphase ein schnelles rechnergesteuertes Beleuchtungssystem entwickelt und gebaut. Es erlaubt komplexe und zeitsequentielle Beleuchtungen, welche die Leistungsfähigkeit optischer Form- und Oberflächenanalyse (mit und ohne digitale Bildverarbeitung) erhöht. Ein schnelles optisches Qualitätsprüfverfahren wurde entwickelt. Erste Algorithmen für aktiv-optisch unterstützte digitale Bildverarbeitung sind realisiert (3.4.3.3).

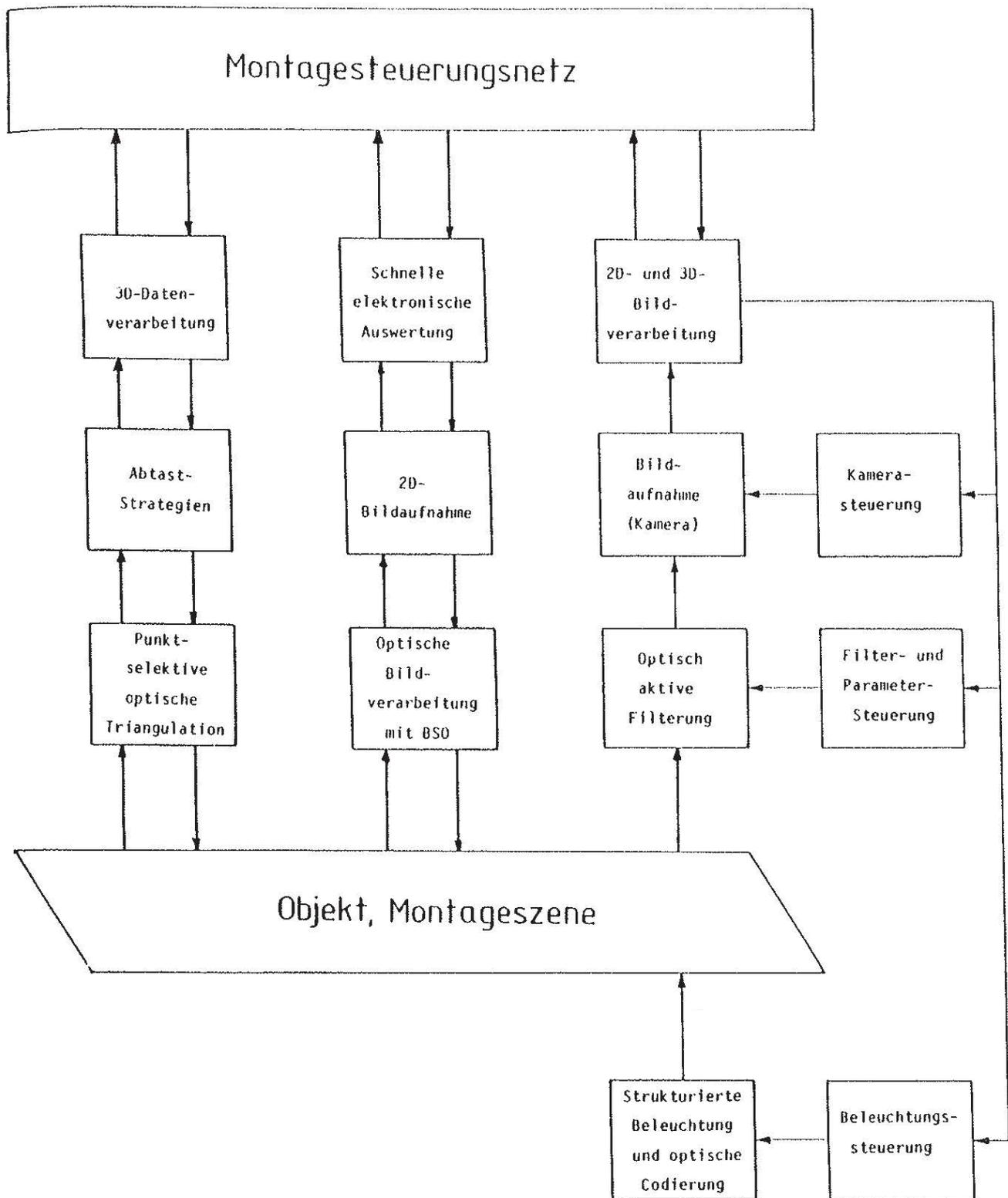


Bild 4 : Aktiv-optische Sensorsysteme zur Unterstützung der Montage

### 3.4.3.1 3D-Lasertriangulation

Der prinzipielle Aufbau des realisierten 3D-Koordinatenmeßgeräts ist in Bild 5 skizziert. Durch die Linsen L1 und L2 wird ein He-Ne Laserstrahl aufgeweitet und anschließend durch L3 über die Spiegel M2, SM2 und SM3 auf das Objekt fokussiert. Der Spiegel SM2 ist auf einen Galvanometer-scanner montiert und somit drehbar, was eine Positionierung des Antastpunkts in x-Richtung erlaubt. Die Positionierung in y-Richtung wird durch den senkrecht zur Achse von SM2 drehbaren, schrittmotorgesteuerten Spiegel SM3 ermöglicht.

Durch die Optik L4 wird der Antastpunkt über den starr mit SM3 gekoppelten Drehspiegel SM4 und den galvanometergesteuerten Spiegel SM1 auf eine Photodiodenzeile abgebildet.

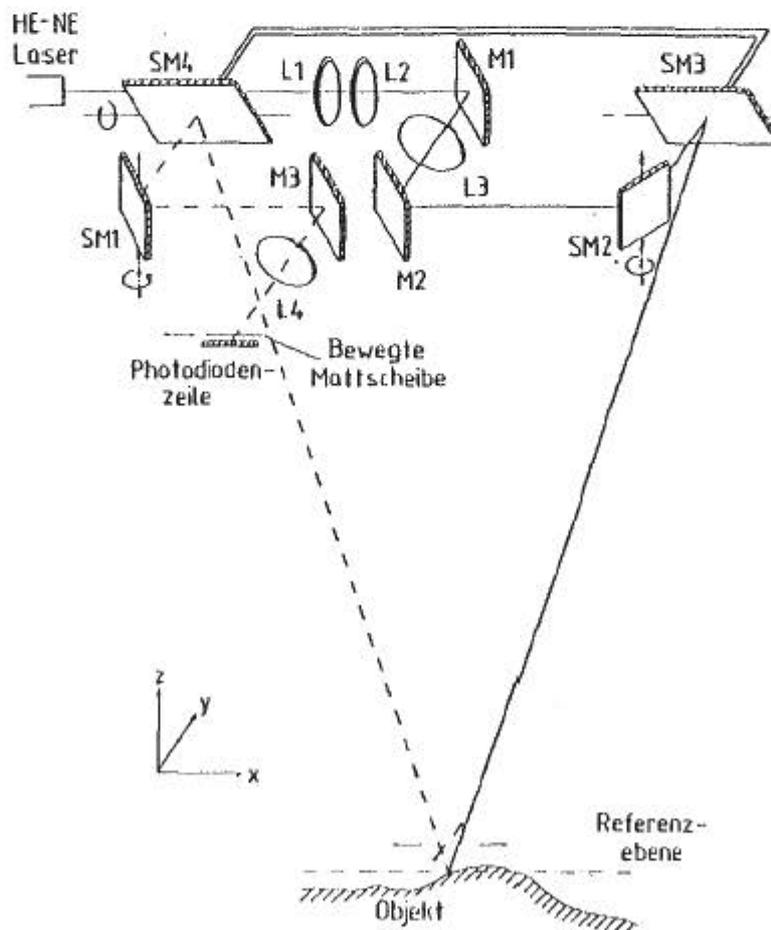


Bild 5 : Realisierter Aufbau zur dreiachsigen Oberflächenvermessung

Die Bildweite ist konstant, was eine scharfe Abbildung nur dann erwarten läßt, wenn sich der Antastpunkt auf einer torischen Fläche bewegt. Bei einem beliebigen Meßobjekt ist folglich von einer mehr oder minder starken Defokussierung des Punktbilds auszugehen. Der Schwerpunkt dieses Punktbilds ist eine gute Näherung für die Punktbildposition.

Da eine rechnerische Schwerpunktsbestimmung zu zeitaufwendig ist, wird die Punktbildposition aus den Punktbildflanken ermittelt. Die hierfür verwendete elektronische Schaltung besteht aus zwei im Pixeltakt laufenden Binärzählern, wovon einer durch die ansteigende, der andere durch die abfallende Flanke des Punktbilds bei einem vorgegebenen Schwellwert angehalten wird. Das arithmetische Mittel beider Zählresultate ergibt unter Annahme eines intensitätsmäßig symmetrischen Punktbilds dessen Schwerpunktskoordinate. Zur Schaffung dieser Voraussetzung ist eine bewegte Mattscheibe vor der Photodiodenzeile angebracht. Diese bewirkt eine Tiefpaßfilterung des Punktbilds, wodurch sich der Einfluß symmetriestörender Speckle, bedingt durch die Verwendung kohärenten Lichts, vermindert.

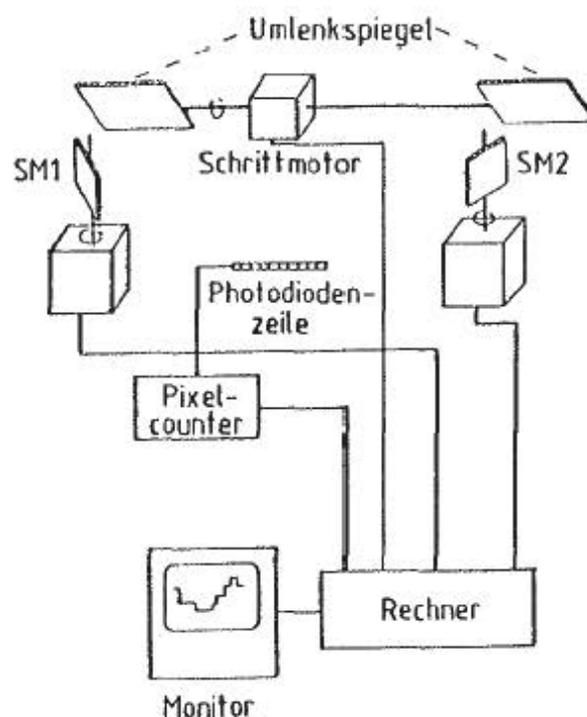


Bild 6 : Steuerung des 3D-Koordinatenmeßgeräts

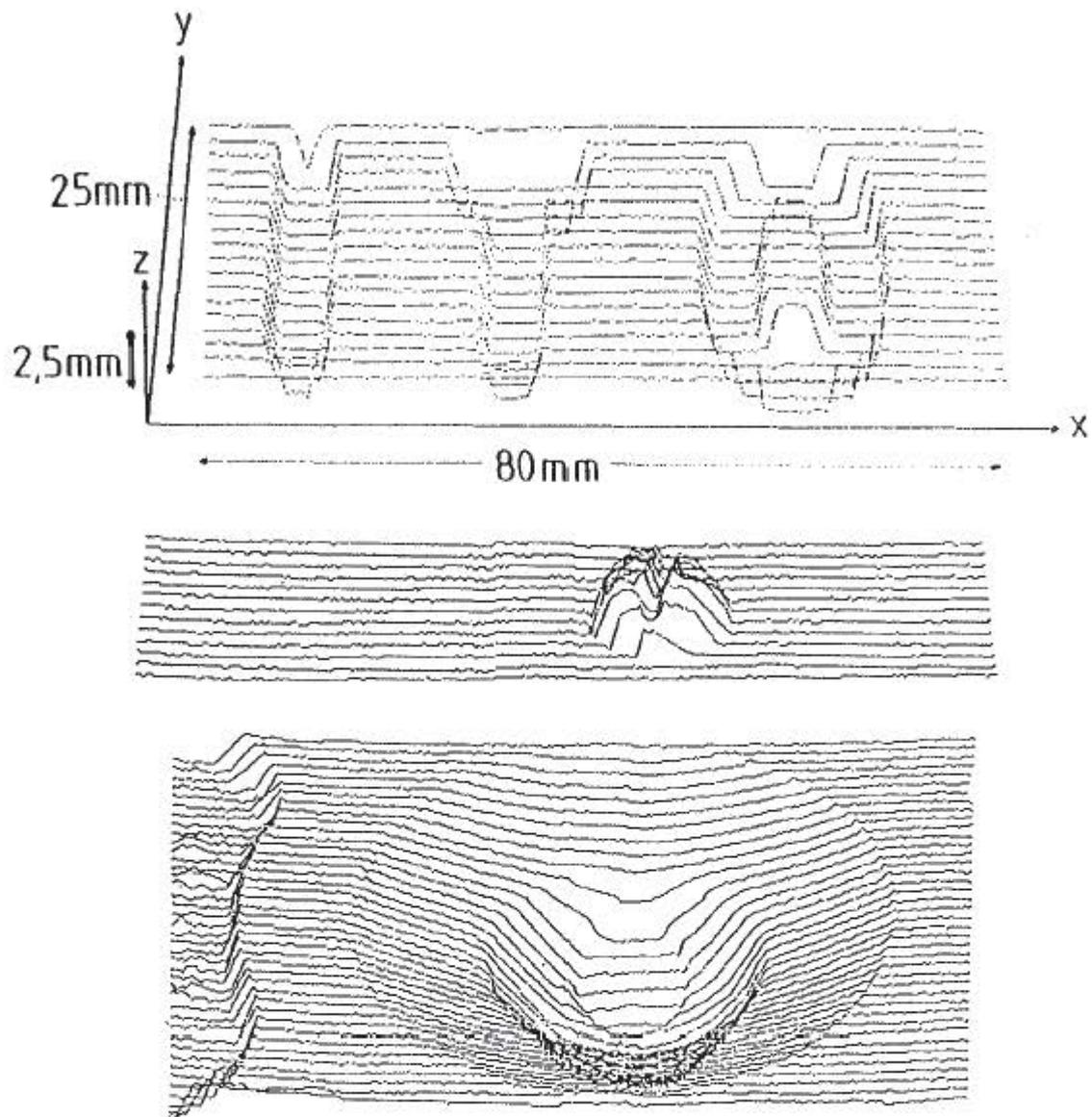
Die Steuerung des Meßvorgangs erfolgt durch einen handelsüblichen Kleinrechner (Bild 6). Ein Meßzyklus beginnt mit der Positionierung beider Drehspiegel bei gleichzeitiger Einstellung der schrittmotorgesteuerten Umlenkspiegel. Daraufhin wird die Punktbildkoordinate durch den Pixelcounter ermittelt und an den Rechner weitergeleitet. Hier werden aus Punktbildkoordinate und Drehspiegelstellwinkeln die Koordinaten des Antastpunkts berechnet und auf einem Videomonitor dargestellt.

Intensitätsprobleme führten auch dazu, daß anstelle der ursprünglich vorgesehenen positionsempfindlichen Photodiode (Posicon) vorerst eine Photodiodenzeile zur Positionsdetektion des Punktbilds verwendet wurde. Begründet liegt dies im günstigeren Rauschverhalten einer Photodiodenzeile, wodurch bei geringen Lichtintensitäten eine bessere Ortsauflösung erzielt wird. Außerdem erlaubt die Diodenzeile eine Analyse der Punktbildform. Die vergleichsweise langsame Photodiodenzeile soll nach Verbesserung der Intensitätsverhältnisse durch ein schnelleres Posicon ersetzt werden.

Bild 7 zeigt eine kleine Auswahl abgescannter Profile, und zwar ein Demonstrationsprofil, den Kopf einer Rundkopfschraube, und die Innenseite eines Zylinderkopfdeckels.

Die Meßgeschwindigkeit beträgt bei einer Laserleitung von 2 mW und günstigen Oberflächenverhältnissen ca. 40 ms/Meßpunkt. Bei einem Objekt-Abstand von 420 mm beträgt die Meßunsicherheit des Abstands +/- 0.1 mm. Die laterale Meßunsicherheit beträgt bei einer Antastfläche von 150x150 mm ca. +/- 0.15 mm.

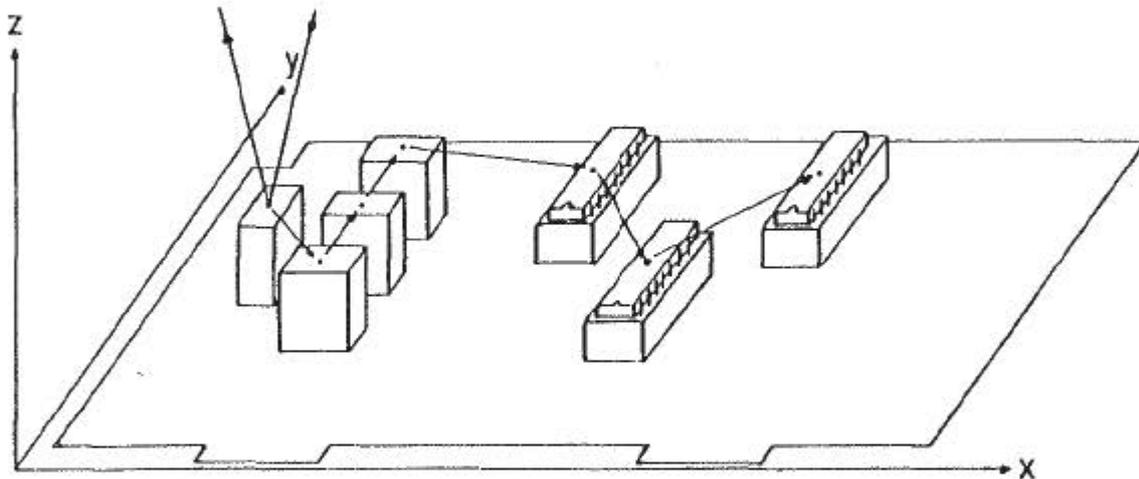
Die Meßgeschwindigkeit wird durch die Belichtungszeit der Photodiodenzeile bestimmt. Geringe Punktbildintensitäten erfordern lange Belichtungszeiten.



**Bild 7 :** Demonstrationsprofil, Schraubenrundkopf, Zylinderkopf (innen)

Wie aus Bild 7 ersichtlich, eignet sich das Gerät zum abscannen von Werkstückoberflächen. Die Vorteile des Geräts zeigen sich jedoch am deutlichsten bei Anwendungen, bei denen nur wenige, aber beliebig über das Objekt verteilte Punkte zu vermessen sind, also beispielsweise bei Vollständigkeits- oder Toleranzprüfaufgaben an Werkstücken. Hierbei liegt der entscheidende Vorteil des Geräts darin, daß die Meßwertfassung auf interessierende Objektbereiche beschränkbar ist, wodurch sich die anschließende Auswertung erheblich vereinfacht.

Exemplarisch wurde diese Eigenschaft zur Bestückungskontrolle an elektronischen Leiterplatten getestet. Das Meßkonzept der punktwisen Abtastung gestattet hier die Ausnutzung der Tatsache, daß die Bauteillagen konventionell bestückter Leiterplatten durch die zugehörigen Platinenbohrungen festgelegt sind. Eine Kontrolle der Bauteilposition erübrigt sich also; festzustellen bleibt nur noch die Anwesenheit des Bauteils. Hierfür kann die schnelle, punktwise Vermessung der Bauteilpositionen anstelle der zeitaufwendigen Integralvermessung der Platine durchgeführt werden (Bild 8). Ferner vereinfacht sich hierdurch die Auswertung, da keinerlei redundante Information verarbeitet werden muß.



**Bild 8 :** Vollständigkeitsprüfung an bestückten Leiterplatten durch punktwise Vermessung von Bauteilpositionen

### 3.4.3.2 Elektrooptische Bildvorverarbeitung

#### Entwicklung einer Speichereinheit

Der von uns entwickelte Bildspeicher/wandler ist in seiner räumlichen Auflösung auf die durch die geometrische Optik gegebene Auflösung in einem räumlichen Speicher limitiert. Die von Seiten der Festkörperphysik gegebene Auflösungsgrenze von ca. 0.001 mm (Diffusionslänge der Elektronen) ist hierbei ohne Bedeutung.

In der Praxis sind abhängig vom Öffnungsverhältnis der abbildenden Optik Auflösungen von ca. 20-50 Linienpaaren/mm möglich. Bei einer Kristallgröße von ca.  $20 \times 20 \text{ mm}^2$  entsprechen dem ca. 160 000 bis 1 000 000 Pixel. Die mögliche Anwendung größerer Kristalle (Dimensionen bis ca. 200 mm sind zur Zeit realisierbar) erlaubt also auch im Falle großer Öffnungsverhältnisse die Anpassung an den TV-Standard.

Die Lichtempfindlichkeit beträgt ca.  $0.05 \text{ mJ/cm}^2$  für Belichtungszeiten zwischen 10 und 1000 ms. Über- und unterhalb dieser Grenzen nimmt sie ab. Versuche mit einem Elektronenblitz ( $t = 10 \text{ ms}$ ) verliefen erfolgreich. Bei geeigneter Beleuchtung ist 50 Hz - Betrieb denkbar.

Messungen zur Temperaturabhängigkeit der Wandlerfunktion ergaben ein unkritisches Verhalten. Wegen der Kapselung des Wandlers spielen Luftfeuchtigkeit und Luftdruck keinerlei Rolle. Die monolithische Struktur des Wandlers macht diesen mechanisch ziemlich unempfindlich im Vergleich zu den Mehrschichtenwandlern, die wegen ihrer LCD's auch temperaturkritisch sind.

Änderungen des äußeren elektrischen Feldes bis etwa  $\pm 20 \%$  sind in der Praxis ohne nennenswerten Einfluß. Wichtig ist hingegen eine gute Strombegrenzungsschaltung, um etwaige Überschlagschäden zu minimieren.

Die beiden folgenden Bilder zeigen die beiden Speicherfunktionen des von uns entwickelten Wandlers. Bild 9 zeigt die Kontrastumkehr eines Objektes, wie sie für die Durchführung der Bildsubtraktion erforderlich ist.

Bild 10 zeigt die Inkohärent-Kohärent-Wandlung eines Objektes mit anschließender optischer Fouriertransformation. Sie ist für die Durchführung kohärent optischer Bildverarbeitungsoperationen (Fouriertransformation (Bild 10), Korrelation, VanderLugt-Filterung etc.) bei inkohärent beleuchteten Objekten erforderlich.

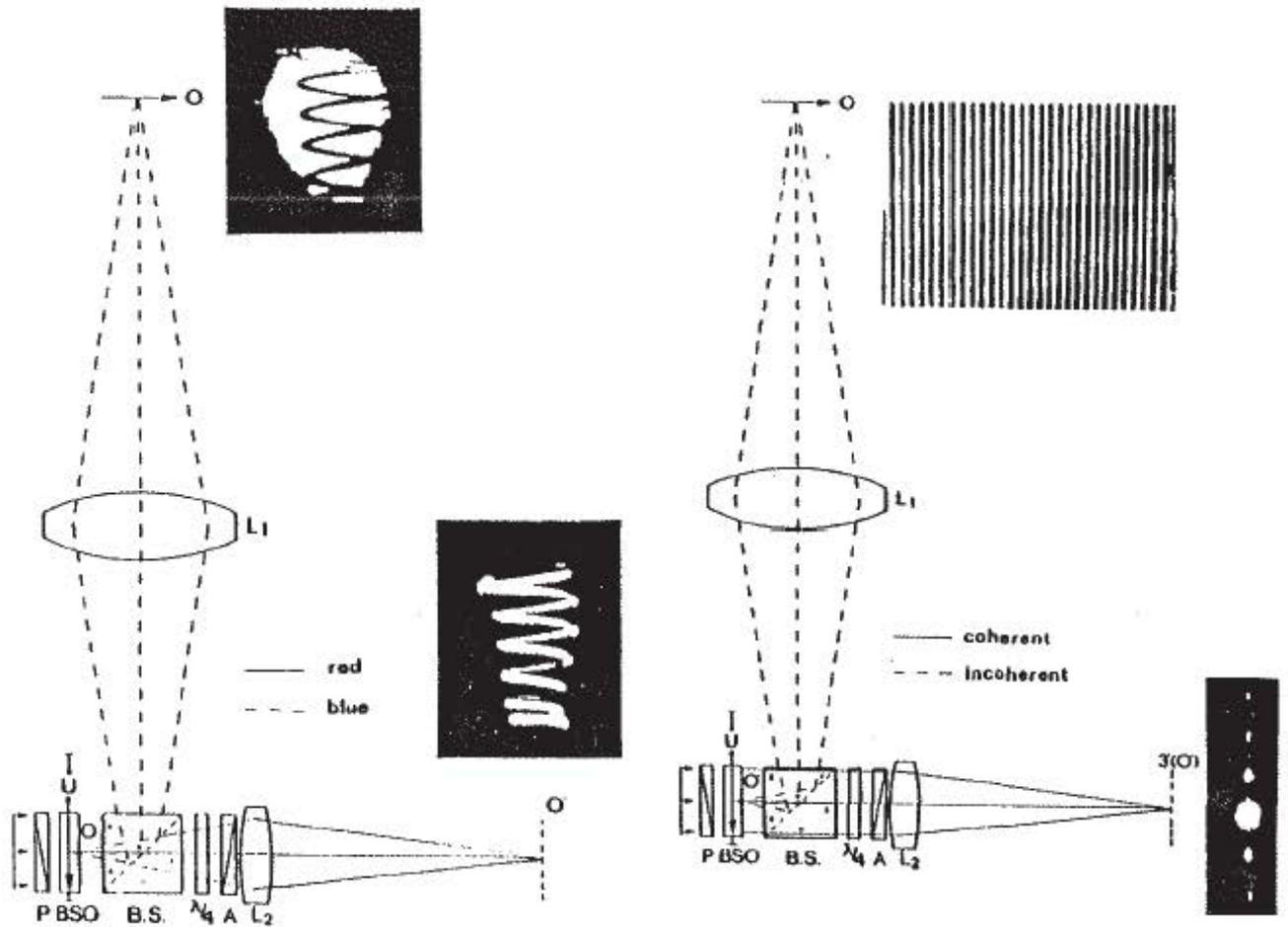


Bild 9 : Kontrastumkehr mit BSO    Bild 10 : Inkohärent-Kohärent-Wandlung

Bildvergleich durch Kontrastumkehr

Bild 11 zeigt den prinzipiellen Aufbau in Form eines Blockdiagrammes. Das Musterobjekt  $O$  wird mit blauem Licht auf den Speicher abgebildet, der eine entsprechende Doppelbrechungsverteilung bildet. Das Vergleichsobjekt  $O'$  wird mit rotem Licht durch den Speicher auf das Kameratarget abgebildet. Da der Kristall, der den Speicher bildet, rotunempfindlich ist, wird das eingeschriebene Muster davon nicht beeinflusst. Zusammen mit den Polarisations-elementen  $P$  und  $A$  wirkt der Kristall auf das Bild von  $O'$  als kontrastinvertiertes Filter. Wir beobachten daher  $O' \times O^{-1}$  auf dem Kameratarget.

Sofern also  $O' = O$  ist, beobachten wir Dunkelheit. Lediglich die Unterschiede zwischen  $O'$  und  $O$  (Fehler von  $O'$ ) erscheinen auf dem Bildschirm. Das Verfahren extrahiert also den Fehler des Vergleichsobjektes.

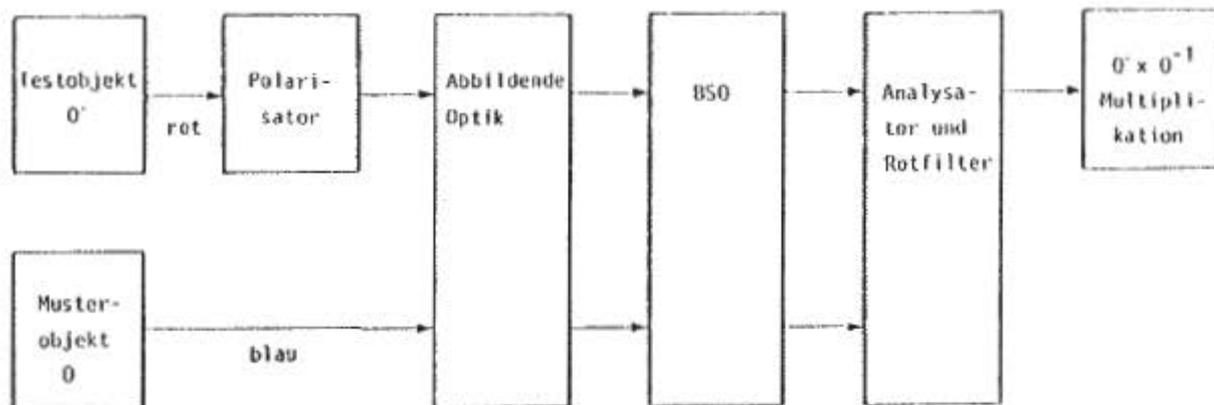


Bild 11 : Blockdiagramm zur Kontrastumkehr

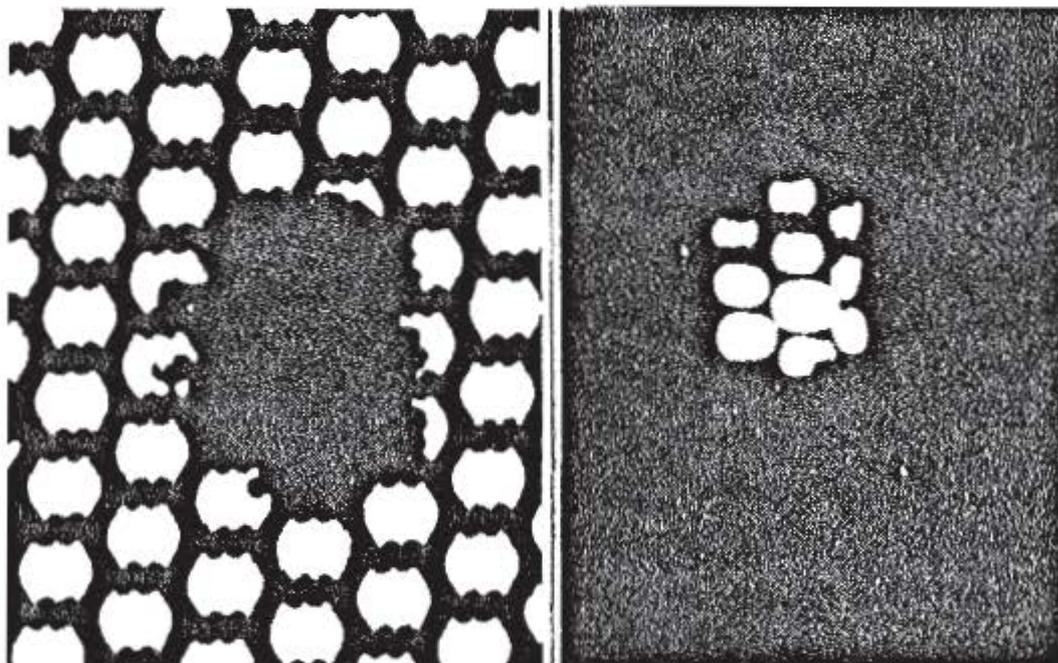


Bild 12 : Fehlerhaftes Objekt vor und nach der Filterung

Bild 12 zeigt den Effekt der Merkmalsextraktion am Beispiel eines fehlerhaften Rasierscherblattes. Nach der optischen Filterung bleibt lediglich das Fehlermerkmal kontrastinvertiert sichtbar.

### Bildvergleich durch kohärente Filterung

Als Alternative zur Filterung durch Kontrastumkehr wurde das folgende Konzept entwickelt, welches auf der kohärenten Seite den bekannten Korrelatoren entspricht. Im Gegensatz zu diesen bedarf es aber bei unserem Konzept nicht der kohärenten Beleuchtung des Objektes.

Bild 13 zeigt den prinzipiellen Aufbau im Blockdiagramm. Das Testobjekt  $O$  wird mit inkohärentem blauem Licht in den Speicher eingelesen und dann zerstörungsfrei mit einem HeNe-Laser ausgelesen. Die Fouriertransformierte von  $O$  wird dann mit der invertierten Fouriertransformierten des Musterobjektes  $O^*$  multipliziert. Nach der Rücktransformation erhält man dementsprechend die Korrelationsfunktion  $O * O^*$ . Wesentlicher Fortschritt dieses Aufbaus ist es, daß man keine kohärente Objektbeleuchtung benötigt. Bild 10 zeigt die Fouriertransformation eines inkohärent beleuchteten Objektes, die dem ersten Teil des geschilderten Konzeptes entspricht.

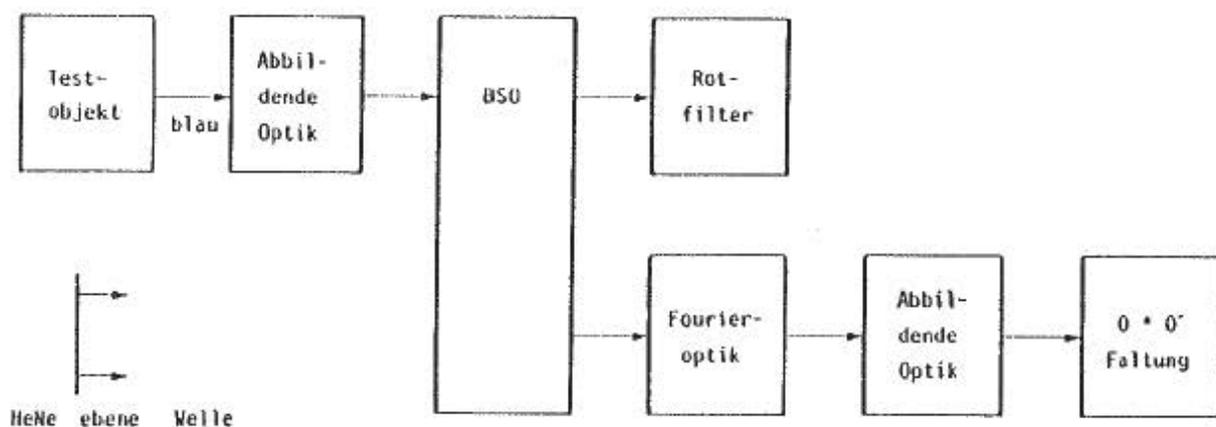


Bild 13 : Blockdiagramm zur kohärenten Filterung bei inkohärenter Beleuchtung

### 3.4.3.3 Aktiv-optische Informationsverarbeitung

#### Flexible Mehrfachbeleuchtung

Die Einflüsse der Beleuchtungskonfiguration und Beobachtungsrichtung auf die Sichtbarkeit von Objektmerkmalen sollte untersucht werden. Als Untersuchungsobjekte wurden zunächst flache Teile (Messingstanzteile, Rasierscherblätter) mit Durchbrüchen und teilweise spiegelnder und beleuchtungstechnisch problematischer Oberfläche ausgewählt. Da sich die von einem Objektpunkt ausgehende Lichtintensität aus verschiedenen Anteilen wie reflektiertem Auflicht, gestreutem Streiflicht und/oder transmittiertem Durchlicht zusammensetzt, ist eine wechselseitige Fehlerkompensation nicht auszuschließen. Zum Beispiel reduziert ein matter Fleck auf einer glänzenden Oberfläche den reflektierten, erhöht aber gleichzeitig den gestreuten Lichtanteil. Eine Änderung der relativen Lichtanteile bei der Aufnahme von Prüfling und Referenzobjekt genügt hier zur Kontrastierung des Fehlers.

Bei geeigneter Kombination der drei Anteile konnte mit dieser Beleuchtungsanordnung erreicht werden, daß auch solche Form- und Oberflächenfehler zu Intensitätsabweichungen führen, die unter einfacheren Lichtverhältnissen nicht sichtbar sind (z.B. Oberflächenwelligkeiten).

Die gleichzeitige Analyse sowohl heller als auch dunkler Gebiete ist bei einfachen Beleuchtungen meist nicht möglich, da die Helligkeitsdynamik des beleuchteten Objekts (Objektumfang) größer ist als die Dynamik des weiterverarbeitenden Mediums oder Systems (Optisches System, BSO-Kristall, Elektronische Kamera, Elektronische Verarbeitung). Für die untersuchten flachen Objekte konnte das Dynamikproblem durch die flexible Mehrfachbeleuchtung gelöst werden.

### Echtzeit-Reduktion redundanter Information in der Qualitätsprüfung

Zielsetzung war die Entwicklung eines schnellen Qualitätsprüfverfahrens auf der Basis des erwähnten Beleuchtungssystems. Es sollte ohne digitale Weiterverarbeitung des mit einer Kamera aufgenommenen Bildes auskommen. Ein Prüfvorgang soll nach 40 ms mit der Ausgabe der letzten Bildzeile und analoger Echtzeit-Signalverarbeitung praktisch abgeschlossen sein. Der nächste Prüfvorgang kann bei Bedarf unmittelbar darauf erfolgen, was einer maximalen Prüfrate von 25/s entspricht. Das Verfahren soll sowohl Formfehler (fehlendes oder überschüssiges Material) als auch Oberflächenfehler einer bestimmten Klasse von Objekten detektieren können. Da sich solche Fehler in der Regel als positive oder negative Intensitätsabweichungen von einem Referenzwert zeigen, muß die Beleuchtung so gewählt werden, daß keine Begrenzungseffekte (Schwarz-Weiß-Sättigung) im gesamten System auftreten. Eine einfache Binärbild-Verarbeitung (optisch oder digital) wäre hier nicht ausreichend.

Die dem Verfahren zugrundeliegende Reduktion der gesamten Bildinformation des Prüflings beruht im Prinzip auf der Quotientenbildung der Intensitätsverteilungen von Prüfling und Referenzobjekt. Sie ergibt im Idealfall eine konstante Grauwertverteilung bzw. eine Konstante. Treten am realen Objekt stochastische Texturen auf, so werden diese zuvor durch optische Tiefpaßfilterung zu Grauwertverteilungen geringer Welligkeit homogenisiert.

Fehler treten nun als positive oder negative Überschreitungen eines gegebenen Grauwertbereiches auf. Die einfachste Form der analogen Weiterverarbeitung kann daher als Trinärbild-Verarbeitung bezeichnet werden. Zur Auswertung genügt dann ein Fensterdiskriminator.

Da eine optische Quotientenbildung zweier Bilder auf direktem Wege nicht realisierbar ist, wird sie in praxi durch optische Multiplikation (Filterung) eines Bildes mit dem kontrastinvertierten Bild des Referenzobjekts ersetzt.

Zur Inversion und Speicherung des Referenzbildes kann auch bei diesem Trinärbild-Verfahren ein BSO-Kristall eingesetzt werden. Für Vorversuche wurde bisher ein fotografischer Negativfilm verwendet, der unter definierten und reproduzierbaren Bedingungen so entwickelt wurde, daß sich ein Gradationsgradient von 1,0 und damit eine Kontrastinversion des Referenzbildes einstellte.

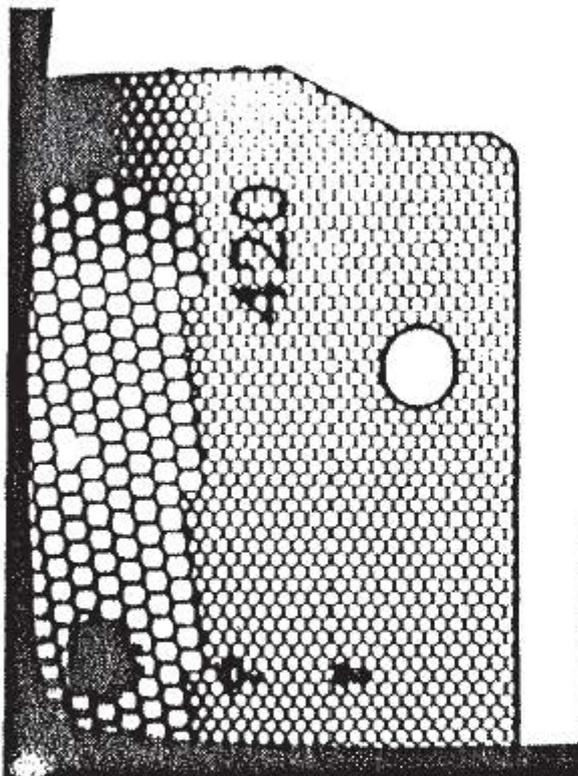


Bild 14 : Fehlerhafter Prüfling  
im Auflicht

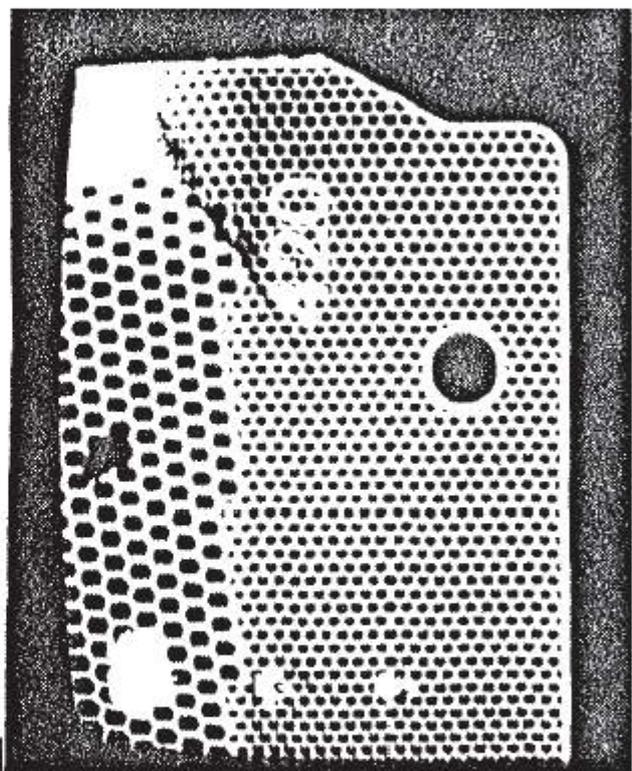


Bild 15 : Fehlerhafter Prüfling  
im Durchlicht

Bild 14 zeigt ein fehlerhaftes Objekt im gerichteten Auflicht, Bild 15 im Streiflicht und Bild 16 im Durchlicht. Bild 17 zeigt ein typisches Ergebnis mit einem Prüfling, bei dem der hohe redundante Informationsgehalt der Sollstruktur des Objekts nahezu vollständig unterdrückt ist und nicht mehr verarbeitet werden muß. Überschüssiges Material zeigt sich (auch bei gleicher Oberflächenbeschaffenheit) durch Intensitätsverlust, fehlendes Material durch Intensitätserhöhung. Eine spezielle Projektion des Auflichtes erlaubt zusätzlich eine Detektion von Knicken in der Oberfläche.

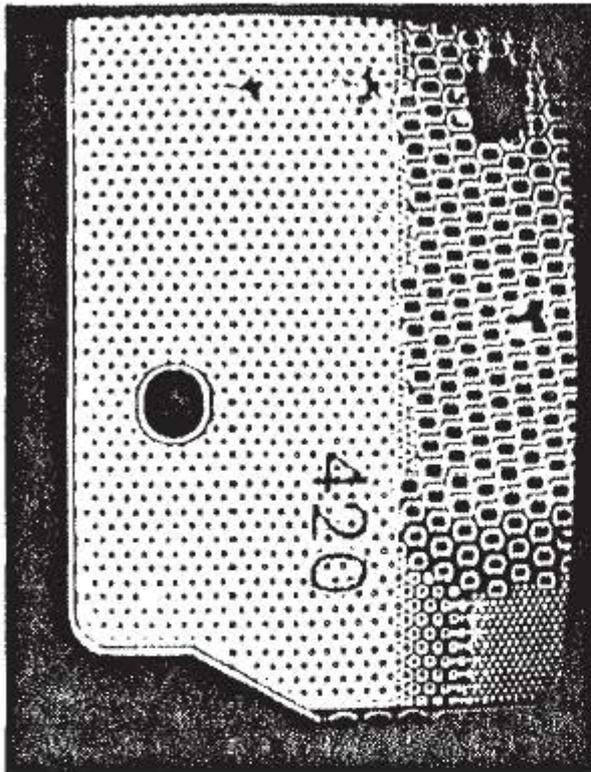


Bild 16 : Fehlerhafter Prüfling  
im Streiflicht



Bild 17 : Kombinationsbeleuchtung  
und Filterung mit einem kontrast-  
invertierten Muster

### Schnelles rechnergesteuertes Beleuchtungssystem

Bei vielen Objekten sind die Anforderungen an eine Beleuchtung so komplex und widersprüchlich, daß in einem einzigen Bild die erforderlichen Informationen zur eindeutigen automatischen Bildsegmentation und Merkmalsextraktion nicht enthalten sein können /13/. Für solche Fälle sollen sequentielle Beleuchtungsverfahren entwickelt werden, die nacheinander die für die verschiedenen Merkmale optimalen Beleuchtungssituationen herstellen /9/.

Handelsübliche Beleuchtungsgeräte sind nicht geeignet, um schnelle und präzise Intensitätsvariationen zu erzeugen. Es war daher erforderlich, verfügbare Lichtquellen auf ihre elektrischen, optischen und mechanischen Eigenschaften hin zu untersuchen. Zum anderen mußten neuartige Anschluß- und Steuergeräte entwickelt werden.

-Temperaturstrahler (Glühlampen, insbes. Niedervolt-Halogenlampen), die häufig für Objektbeleuchtungen eingesetzt werden, zeichnen sich durch ein kontinuierliches Strahlungsspektrum, kleine Abmessungen und leichte Steuerbarkeit aus. Nachteilig ist die hohe Wärmebelastung der Umgebung und die optische Trägheit. Lampen mittlerer Leistung (z.B. 50 Watt) haben eine typische Einstellzeit von mehr als einer Sekunde und sind damit für schnelle Algorithmen nicht geeignet.

-Entladungslampen für kontinuierlichen Betrieb (Xenon-, Krypton-, Metallampf-Lampen) mit ihrem hohen Wirkungsgrad sind auch bei Verwendung elektronischer Vorschaltgeräte nicht verwendbar, da sie nicht dimmbar und/oder nicht heißstartfähig sind.

-Entladungslampen für Blitzbetrieb erlauben bei Einsatz aufwendiger elektronischer Steuerungen eine begrenzte Variation der Lichtenergie. Ein definierter zeitlicher Intensitätsverlauf oder ein Dauerbetrieb ist in der Praxis nicht möglich.

-Leuchtstofflampen sind mit unterschiedlichen Leuchtstoffen verfügbar, die durchweg Mischspektren (Kontinuierliche Spektren mit mehreren intensiven schmalbandigen Bereichen) liefern. Bei Untersuchungen der Reaktionszeit hat sich gezeigt, daß im wesentlichen zwei verschiedene Lichtanteile ( Fluoreszenz und Phosphoreszenz ) auftreten, die mit stark voneinander abweichenden Zeitkonstanten (z.B. 0,01 ms und 10 ms) behaftet sind. Die Einstellung während einer Kamerabild-Frame-Zeit von 40 ms mit einem neuentwickelten Steuergerät ist also realisierbar.

Der Zusammenhang zwischen Lichtstrom und elektrischer Spannung einer Leuchtstofflampe ist, wie bei allen Entladungslampen, extrem nichtlinear und mehrdeutig. Eine direkte Ansteuerung, wie sie in der Lichttechnik angewandt wird, hat einerseits ein undefiniertes Zündverhalten und andererseits einen spannungs-, temperatur- und altersabhängigen Intensitätsverlauf zur Folge. Die 100 Hz - Modulation des Lichtstroms (50 Hz - Netzbetrieb) verursacht nur deshalb bei der Bildaufnahme keine Störungen, weil die Kamera bei jedem Halbbild (50 Halbbilder / s) das Licht einer vollen Spannungsperiode integriert und damit unabhängig von der Phase der Lichtmodulation stets die gleiche Lichtenergie erhält.

Sequentielle Beleuchtungsverfahren verlangen einen zeitlichen Verlauf des Lichtstroms, der mit möglichst geringer Verzögerung und geringem Fehler der Vorgabe eines Rechners folgt. Um dies zu erreichen, wurden in dem neuentwickelten elektronischen Steuergerät folgende Prinzipien verwirklicht (Bild 18) :

- Hochfrequenzbetrieb im Bereich 100 kHz bis 300 kHz. Er gewährleistet stabilen Betrieb des Plasmas, schnelle Regelbarkeit, Gleichlichtbetrieb, günstigen Wirkungsgrad des Steuergerätes, erhöhte Lichtausbeute sowie erhöhte Lebensdauer der Leuchtstoffröhren.

- Kontinuierliche Elektrodenheizung. Damit ist ein schneller und störungsfreier Intensitätsanstieg vom Nullzustand aus möglich; gleichzeitig wird ein unzulässiges und lebensdauerverkürzendes Absinken der Elektrodenmindesttemperatur verhindert.

- Optische Rückkopplung und Regelung. Mit einer Photodiode wird die Ausgangsgröße (Lichtstrom) gemessen und mit der Eingangsgröße (Analogspannung 0 bis 10 V) verglichen. Die schnelle Regelung gewährleistet sowohl einen linearen Zusammenhang zwischen beiden Größen als auch eine möglichst geringe Einstellzeit.

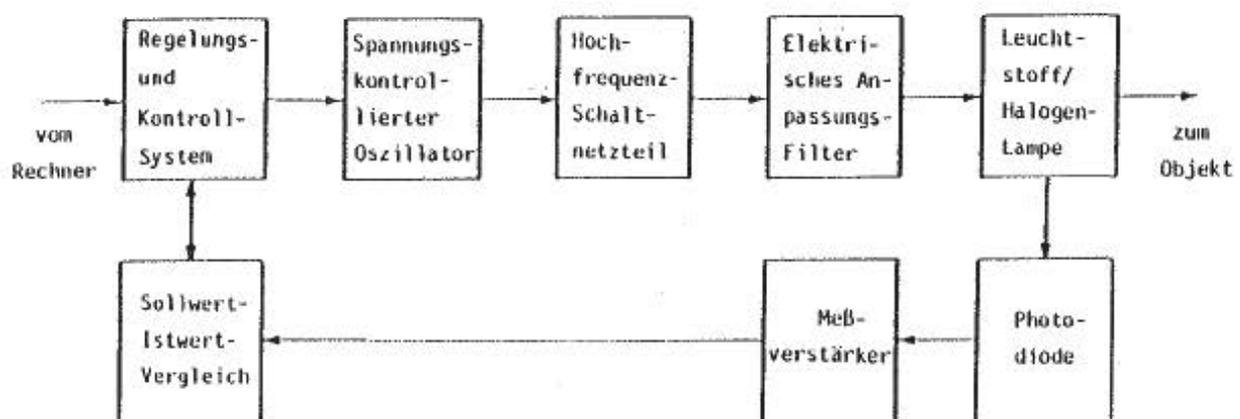


Bild 18 : Blockdiagramm für einen Kanal des mehrkanaligen Gerätes

Mit diesem Gerät werden in der nächsten Projektphase Verfahren realisiert, welche die im Rahmen der "Robot Vision" erforderliche digitale Bildsegmentation und Merkmalsextraktion vereinfachen und beschleunigen.

#### Algorithmen zur Formerkennung und zum Formvergleich mit digitaler Bildverarbeitung

Für die digitale Bildverarbeitung wird Software entwickelt, die einerseits auf die speziellen Erfordernisse der 2D- und 3D-Formerkennung und -analyse und andererseits auf den kombinierten Einsatz optischer Vorverarbeitung, insbesondere der sequentiellen Beleuchtung /9/, der punktuell unterstützen Merkmalsextraktion /10/ und der strukturierten Beleuchtung /11/ zugeschnitten ist. Bisher wurden Algorithmen für die rotationsinvariante 2D-Formerkennung, die 3D-Erkennung verkippter Objekte und zur Oberflächenanalyse entwickelt.

#### 3.4.4 Vergleich mit Arbeiten außerhalb des Sonderforschungsbereiches

Abtastende Triangulationsverfahren werden von Forschungsgruppen in den USA (Advanced Robotics Corp.), den Niederlanden (Oldelft) und Kanada (National Research Council) entwickelt und erprobt. All diese Verfahren sind an feste Abtastraster gebunden, erlauben also keine Eingrenzung des zeitaufwendigen Datenaufnahmeprozesses auf montagerelevante Objekt- oder Szenenausschnitte.

Forschungsgruppen in den USA (u.a. Hughes Aircraft), der UdSSR, Frankreich (Thomson CSF) und Japan (Sumitomo) arbeiten intensiv auf dem Gebiete der Inkohärent-Kohärent-Wandlung, wobei monolithische Wandler allerdings bislang nur in Verbindung mit holographischen Verfahren /14/ verwendet wurden. Auf dem Gebiete der Bildsubtraktion durch Kontrastinversion wurden keine wesentlichen Fortschritte erzielt.

### 3.4.5 Offene Fragen

Die Meßgeschwindigkeit des konzipierten Triangulationsmeßgeräts hängt in erster Linie von der Intensität des abgebildeten Antastpunkts ab. Geringe Punktbildintensitäten erfordern lange Belichtungszeiten der Photodiodenzeile und erlauben daher nur verhältnismäßig geringe Meßgeschwindigkeiten. Folgende Effekte beeinflussen die Punktbildintensität:

- Absorptions-/Reflexionseigenschaften der Objektoberfläche sowie deren Relativneigung zu Antast- und Abbildungshauptstrahl.
- Objektentfernung
- Fokussierung des Punktbilds

Berücksichtigt man die Tatsache, daß in der Montage von Objekten unterschiedlichster Oberflächengeometrien und -eigenschaften auszugehen ist, so wird die Problematik von Punkt 1 besonders deutlich. Bei glänzenden Oberflächen wird die Eintrittspupille der Abbildungsoptik inhomogen ausgeleuchtet, was zu Meßfehlern führt. Offen ist, ob diese Meßfehler durch polarisationsoptische Maßnahmen vermeidbar sind.

Der Abstandsmeßbereich des realisierten Geräts wird durch den Schwenkbereich beider Galvanometerscanner begrenzt. Intensitäts- und Fokussierprobleme bei der Antastpunktabbildung führen hier jedoch zu erheblichen Einschränkungen. Ferner ist zu berücksichtigen, daß die Lateralauflösung wegen der starren Antaststrahlfokussierung abstandsabhängig ist, was eine zusätzliche Bereichsbeschränkung mit sich bringt. Das Problem der Antaststrahl- und Abbildungsfokussierung sind noch ungelöst. Ansätze liegen allerdings vor /15/.

Der zum Aufbau des Raumladungsfeldes im BSO-Kristall führende Leitungseffekt ist bislang nur insoweit beschrieben, als daß die Lochleitung gegenüber der Elektronenleitung vernachlässigt wurde. Untersuchungen unsererseits zeigten aber, daß unter bestimmten Bedingungen (dynamische Objekte) die Lochleitung dominieren kann.

Literatur

- /1/ Schwarte, R.: Performance Capabilities of Laser Ranging Sensors. Proc. ESA, Workshop on Space Laser Applications and Technology (ESA SP-202, May 1984).
- /2/ Rioux, M.: Laser range finder based on synchronized scanners. Applied Optics 23 (1984) 21, S. 3837-3844.
- /3/ Bleha, W.P. et al.: Application of the Liquid Crystal Light Valve to Real Time Optical Correlation. Optical Engineering 17 (1978) 4, S. 371-384.
- /4/ Marom, E; Grinberg, J: Subtraction of images with incoherent illumination in Real Time. Applied Optics 16 (1977) 12, S. 3086-3087.
- /5/ Aubourg, P.; Huignard, J.P.; et al.: Liquid Crystal Light Valve Using Bulk Monocrystal-line  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  as the Photoconductive Material. Applied Optics 21 (1982) 20, S. 3706-3712.
- /6/ Huignard, J.P.; Micheron, F.: High Sensitive Read-Write Volume Holographic Storage in  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  and  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  Crystals. Applied Physics Letters 29 (1976) 9, S. 591-593.
- /7/ Tiziani, H.J.: Real Time Metrology with BSO Crystals. Optica Acta 29 (1982) 4, S. 463-470.
- /8/ Pugh, A.(Hsg.): Robot Vision. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 1983.

- /9/ Shirai, Y;           Extraction of the line Drawing of Three-Dimensional  
Tsuji :                Objects by Sequential Illumination from Several  
                          Directions.  
                          Pattern Recognition 4 (1972), S. 343-351.
- /10/ Ishii, M.;         Feature Extraction of three-Dimensional Objects  
Nagata, T.:           and Visual Processing in a Hand-Eye Systems  
                          Using Laser Tracker.  
                          Pattern Recognition 8 (1976), S. 229- 237.
- /11/ Jaliko, J. A.;    Three dimensional inspection using multistripe  
Kim, R. C.;           structured light.  
Case, S.K.:           Optical Engineering 24 (1985), S.966-974.
- /12/ Höller, F.;       A Spatial Light Modulator using BSO-Crystals.  
Tiziani, H.J.:        Optics Communications 58 (1986) 1, S. 20-24.
- /13/ Niemann, H.      Mustererkennung 1985.  
      (Hsg.):            Informatik-Fachberichte 107.  
                          Berlin, Heidelberg, New York:  
                          Springer-Verlag 1985.
- /14/ Shi, Y.;          Photorefractive Incoherent to Coherent Optical  
Psaltis, D.;         Converter.  
et al.:                Applied Optics 22 (1983) 23, S. 3665-3667.
- /15/ Bickel, G.;       Triangulation with expanded range of depth.  
Häusler, G.;         Optical Engineering 24 (1985) 6, S. 975-977.  
Maul, M.:

/16/ Seitz, G.; 3D-Koordinatenmessung durch optische Triangulation.  
Tiziani, H.J.; *Feinwerk- & Meßtechnik* 94 (1986) 7, S. 423-425.  
Litschel, R:

/17/ Tiziani, H.J.; New Light Valve Based On Photoinduced Space Charge  
Höller, F.: Fields In BSO Crystals.  
Vortrag auf der Tagung "Image Detection and Quality"  
vom 16.7. - 18.7.1986 in Paris.