

# **AUTOMATISCHE MESSUNG VON SPUREN IN MOTOGRAFISCHEN MESSBILDERN**

*Thomas LUHMANN*  
*Jürgen PEIPE*  
*Wilfried WESTER-EBBINGHAUS*

In: *DORRER, Egon / PEIPE, Jürgen (Hrsg.) [1987]:*

Motografie.

Symposium, 11./12. März 1986.

Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, Heft 23, Neubiberg,  
S. 117-126

ISSN: 0173-1009.



## AUTOMATISCHE MESSUNG VON SPUREN IN MOTOGRAFISCHEN MESSBILDERN

T. Luhmann, Hannover  
J. Peipe, München  
W. Wester-Ebbinghaus, Hannover

### ZUSAMMENFASSUNG

Leuchtpuren als wesentlicher Bildinhalt motografischer Aufnahmen eignen sich für die automatische Ausmessung mit Hilfe photogrammetrischer Digitaltechnik. In diesem Bericht werden Verfahren zur automatischen Punkterkennung und Linienverfolgung vorgestellt und an einem Testbeispiel erläutert. Als Auswertegerät diente ein Réseau-Scanner Rolleimetric RS 1 in Funktion eines digitalen Monokomparators.

### ABSTRACT

Luminous points and traces representing the essential information recorded on motographic images are appropriate for automatic measurement by means of digital photogrammetric techniques. An approach to automatic point determination and line following is presented and exemplified in this paper. Thereby, a réseau-scanner Rolleimetric RS 1 was used as a digital monocomparator.

## 1. EINLEITUNG

Motografie ist eine bewährte Methode zur Erfassung von Bewegungen. Die Lageänderungen ausgewählter, mit blinkenden oder permanent leuchtenden Signalen versehener Objektpunkte werden als Leuchtspuren aufgezeichnet. Mit Hilfe photogrammetrischer Instrumente und Auswerteverfahren können sie aus einer oder mehreren Aufnahmen rekonstruiert werden (PEIPE 1987). Dies ist mit hoher Genauigkeit möglich, wenn Meß- oder Teil-Meßkammern für die Abbildung verwendet werden (WESTER-EBBINGHAUS 1987). Zusätzlich zu den Leuchtspuren können ein Objektzustand oder mehrere einbelichtet werden, um die Interpretation des Bewegungsvorgangs zu erleichtern.

Kontinuierlich leuchtende Signale genügen, wenn lediglich die Form der Bewegung zu bestimmen ist (Abb. 1). Soll als Sekundärinformation zum Beispiel ihre Geschwindigkeit abgeleitet werden, so müssen mit bekannter und konstanter Frequenz blinkende Lämpchen oder Leuchtdioden zur Spurerzeugung benutzt werden. Durch diese Auflösung der Spur in Einzelpunkte (Abb. 2) wird zudem die monoskopische oder stereoskopische Ausmessung mehrerer gleichzeitig aufgenommener Bilder desselben Objekts erheblich erleichtert. Eine zusätzliche Codierung der Spur durch verschiedenfarbige Lämpchen bzw. Impulsausfall (BAUM 1983) ist angebracht, wenn sich Bewegungsbahnen in der Abbildung kreuzen oder überlagern.

Falls blinkende Glühlämpchen als Signale verwendet werden, weist ein Spurpunkt bei der photographischen Aufzeichnung die in Abbildung 3 schematisch dargestellte Form auf. Wegen der Nachglimmeigenschaften des Lämpchens wird die Richtung der Bewegung angezeigt. Der Mittelpunkt des Lämpchens ist vor allem bei schnelleren Bewegungen nicht mehr als lokales Helligkeitsmaximum erkennbar und damit als Meßpunkt bei der photogrammetrischen Auswertung ungeeignet. Dagegen ist der Scheitelpunkt des Leuchtschweifs auch in diesem Fall noch eindeutig einstellbar.

Leuchtspuren in motografischen Meßbildern eignen sich für die automatische Punkterkennung und Linienverfolgung, da wohldefinierte Signale, deren Form bekannt ist und die vom Hintergrund (Objekt) getrennt werden können, und ein weitgehend glatter Kurvenverlauf vorliegen. Eine Kombination moderner Instrumente zur digitalen Erfassung und Messung analoger Bilder (siehe Kap. 2) mit Methoden zur Mustererkennung in digitalen Bildern (siehe Kap. 3) ermöglicht eine schnelle und genaue Bestimmung der Spur, wobei die mühsame und anstrengende Arbeit des Operateurs ganz oder teilweise vom Rechner übernommen werden kann.

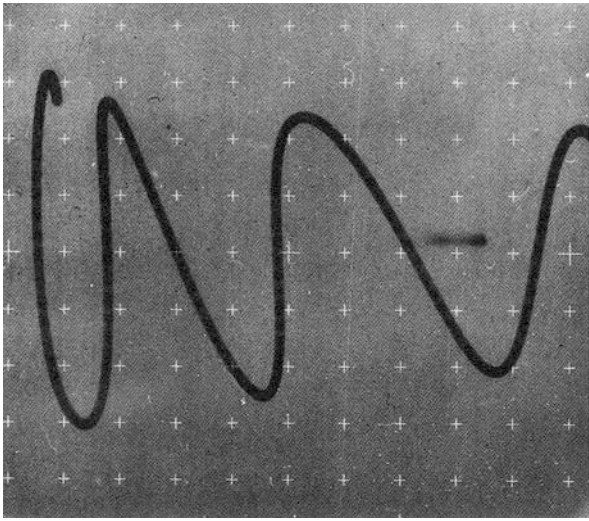


Abb. 1 Beispiel einer kontinuierlichen Leuchtspur:  
Gedämpfte Schwingung eines Probekörpers

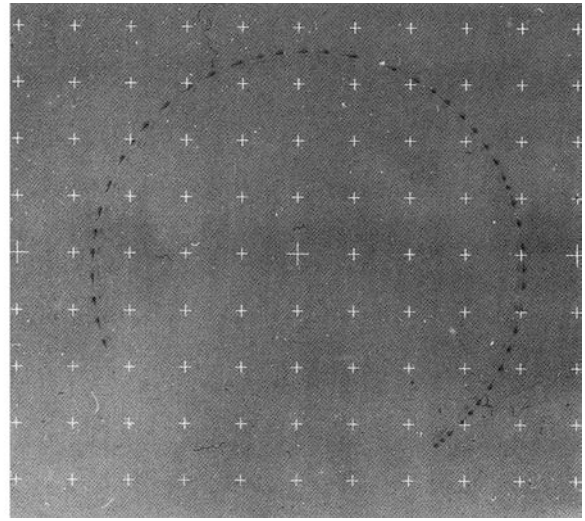


Abb. 2 Beispiel einer in Einzelpunkte aufgelösten Leuchtspur:  
Drehung eines Rades

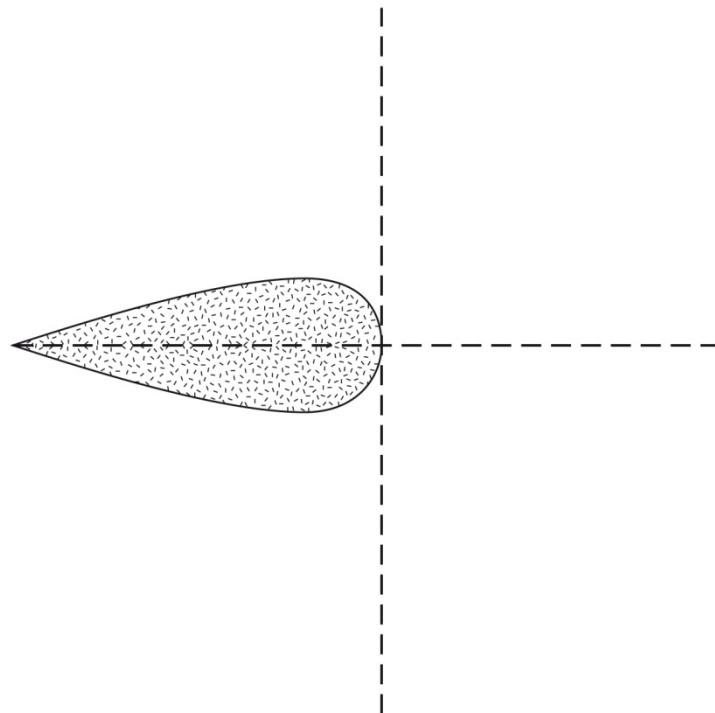


Abb. 3 Definition für die Einstellung eines Spurpunktes bei der Auswertung

## 2. INSTRUMENTE ZUR ERFASSUNG DIGITALER BILDDATEN

Da fotografische Meßbilder in der Regel mit herkömmlichen photogrammetrischen Meß- oder Teilmeßkammern aufgenommen werden, ist eine Digitalwandlung dieser analogen Bilder vorzunehmen, wenn man sie automatisch auswerten will.

Hierfür existieren seit langem Trommelabtaster, die ein Bild durch einen sich bewegenden, lichtempfindlichen Sensor in eine Grauwertmatrix wandeln können. Diese Geräte besitzen eine hohe radiometrische Auflösung; bei den möglichen Auflösungen (zwischen ca. 10  $\mu\text{m}$  und 100  $\mu\text{m}$  Bildelementgröße) bieten sie jedoch keine ausreichende geometrische Stabilität, um sie für eine photogrammetrische Auswertung einsetzen zu können. Zudem muß der gesamte Bereich eines analogen Bildes, in dem zu messende Elemente vorkommen, digitalisiert werden. Dies führt schon bei kleinen Formaten (z.B. 6 cm x 6 cm) zu großen Datenmengen (ca. 23 MByte bei 12.5  $\mu\text{m}$  Auflösung).

Wesentlich weniger Daten fallen bei einer selektiven Digitalisierung an, wobei nur der Bildausschnitt digitalisiert wird, in dem sich ein zu messendes Objekt befindet. Dabei kann das digitale Bild sofort ausgewertet werden, so daß nur noch die Bildkoordinaten der Meßpunkte gespeichert werden müssen. Solche Systeme setzen jedoch voraus, daß die Orientierung jedes einzelnen Teilbildes im Gesamtbild bekannt ist.

Dies kann mit hoher geometrischer Stabilität durch analytische Plotter realisiert werden, die mit CCD-Videokameras ausgestattet sind. Sie dienen hauptsächlich zur automatischen Erfassung digitaler Geländemodelle mit Hilfe von Korrelationsverfahren (PERTL 1984, COGAN und HUNTER 1984), lassen sich aber auch zur Ausmessung beliebiger Bilder verwenden. Dabei geschieht die digitale Bilderfassung in Teilbildern mit CCD-Flächensensoren, deren Orientierung im Gesamtsystem durch die Bewegung der Bildwagen bestimmt wird. Dieses Prinzip gilt auch für den digitalen Monokomparator AUTOSET-I (FRASER und BROWN 1986). Die geforderte mechanische und optische Qualität kann nur durch großen instrumentellen Aufwand realisiert werden.

Instrumentell wenig aufwendig und dabei hochgenau und sicher läßt sich die Orientierung der Teilbilder optisch-numerisch durch Réseautchnik verwirklichen (WESTER-EBBINGHAUS 1984). Die CCD-Sensorfläche wird so im Abbildungsraum angeordnet, daß mindestens eine Masche eines in den Abbildungsvorgang mit einbezogenen Réseaus (Glasplatte mit rasterartig verteilten Punktmarkierungen) abgebildet wird. Das Gesamtbild kann dann erhalten werden durch

numerische perspektive Rücktransformation der Teilbilder in die entsprechenden Maschen des Réseausystems. Damit ist nicht nur die Raumlage des Sensors eindeutig bestimmt, sondern es wird auch das Bildbezugssystem der Sensoren für jedes Teilbild im Bildraum neu orientiert. Der optisch-mechanische Aufbau muß dabei nur gewährleisten, daß die gewählte Masche des Réseaus vom Teilbild vollständig getroffen wird.

Die Sensororientierung geschieht vollautomatisch durch Erkennung und präzise Bestimmung der Réseapunkte im Teilbild. Dabei kommen Verfahren zur genauen Detektion linienhafter Elemente zur Anwendung, die eine Punktbestimmung im Subpixelbereich ermöglichen. Die gefundenen Réseapunkte werden auf die Sollkoordinaten im System des Réseaus transformiert und liefern damit eine präzise Orientierung der Sensorflächen im Abbildungsraum.

Der auf diesem Prinzip aufbauende Réseau-Scanner Rolleimetric RS 1 (Abb. 4) ist als digitaler Monokomparator einsetzbar. Analoge Meßbilder bis zum Luftbildformat können digitalisiert und ausgemessen werden. Die Auflösung ist durch optische Vergrößerung variabel von ca.  $2 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$  bis ca.  $100 \mu\text{m} \times 160 \mu\text{m}$  pro Bildelement bei einer Sensorfläche von  $6.6 \times 8.8 \text{ mm}^2$  ( $\hat{=}$   $576 \times 604$  Sensorelemente). Einzelne Teilbilder lassen sich numerisch mit einer Genauigkeit von wenigen Mikrometern zu einem Gesamtbild zusammensetzen (LUHMANN und WESTER-EBBINGHAUS 1986).

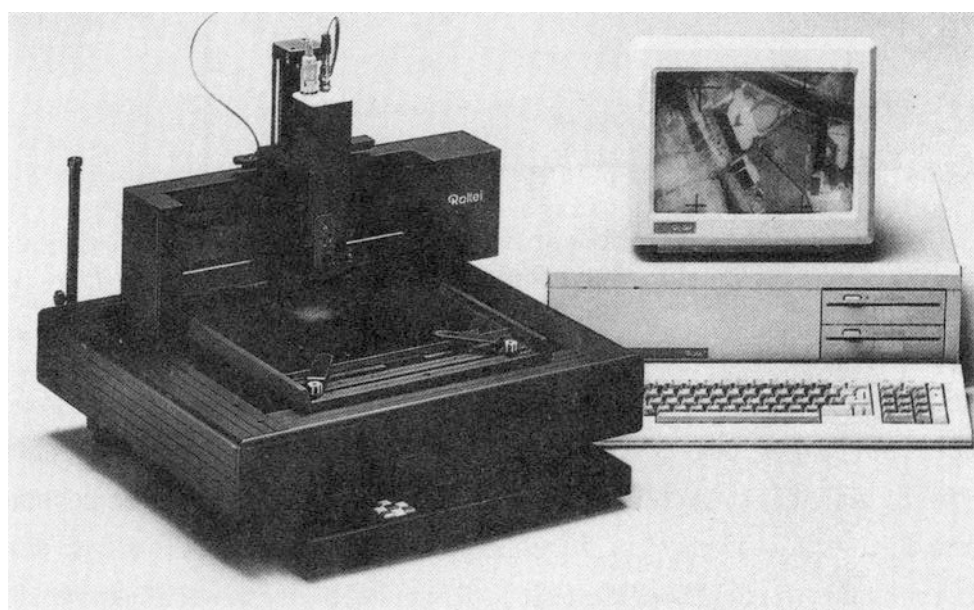


Abb. 4 Réseau-Scanner Rolleimetric RS 1

Im vorliegenden Fall wird der RS 1 zur automatischen Ausmessung einer fotografischen Leuchtspur eingesetzt (siehe Kap. 4). Deren Bestimmung erfolgt nach einem neuentwickelten Verfahren zur richtungsunabhängigen Linienverfolgung.

### 3. VERFAHREN ZUR AUTOMATISCHEN LINIENVERFOLGUNG

Ein Meßbild (Abb. 5) zeigt ein relativ einfaches Beispiel einer fotografischen Spur; sie ist nicht durch Objektinformation gestört und es treten keine sich kreuzenden oder berührenden Linien auf. Allerdings bildet sie sich mit wechselnden Kontrasten und Linienbreiten ab.



Abb. 5 Motografische Aufnahme  
der Bewegung eines  
Tennisschlägers

Ein geeignetes Verfahren für die Bestimmung der Spur im Monobild wird in Abb. 6 dargestellt. Der Operateur legt näherungsweise Linienanfang und -richtung fest. Am Startpunkt  $M_i$  wird ein Grauertring erzeugt, dessen eindimensionale Intensitätsfunktion durch bilineare Interpolation aus dem Originalbild berechnet wird (LUHMANN 1986). Innerhalb dieses Ringes werden zwei Linienpunkte  $S$  durch eine Kantendetektion bestimmt, wobei die Intensitätsfunktion mit einem geeigneten Operator gefaltet wird (Approximation der 1. oder 2. Ableitung, je nach Typ der Kante) und die Nulldurchgänge der



Ausgangsfunktion mit hoher Genauigkeit im Subpixel-Bereich bestimmt werden. Die Lage des nächsten Näherungspunktes  $M_{i+1}$  ergibt sich aus der Richtung  $r_i$  (Bogenlänge im Ring) des Linienpunktes  $S_{i,1}$  und einem vorgegebenen Fortschritt  $e$ . Werden an einem Näherungspunkt  $M$  keine plausiblen Linienpunkte gefunden oder weicht die neue Richtung  $t_{i+1}$  zu weit von der alten Richtung  $t_i$  ab, dann werden sukzessive der Ringradius  $r$  verändert bzw. der Fortschritt  $e$  verringert, bis geeignete Linienpunkte gefunden werden oder ein Linienende erkannt wird.

Dieses Verfahren entspricht somit der manuellen Liniendigitalisierung mit dem Ziel, in schwach gekrümmten Bereichen wenige Punkte und in stark gekrümmten Bereichen viele Meßpunkte zu bestimmen.

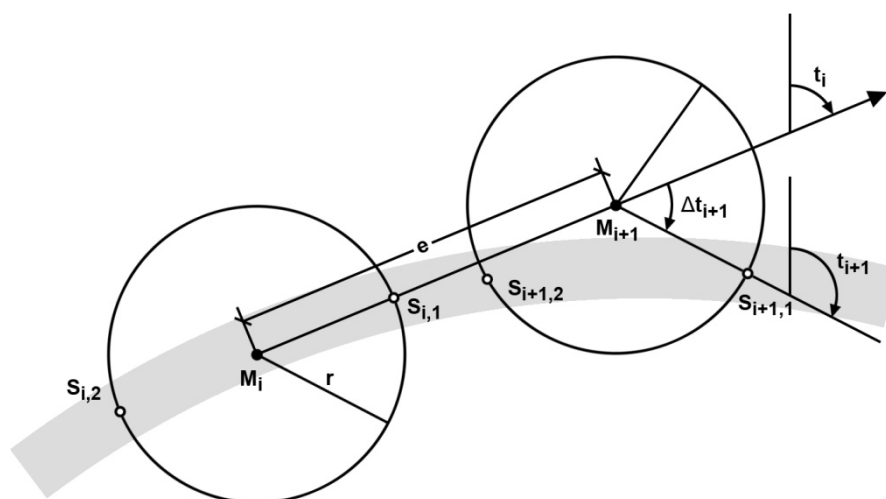


Abb. 6 Prinzip der Linienverfolgung: Gegeben sind ein Linienpunkt (Startpunkt)  $M_i$  sowie eine Richtung  $t_i$ . In einem Grauwert-ring mit veränderlichem Radius  $r$  werden Linienpunkte  $S_{i,j}$ ,  $j = 1,2$  gesucht. Auf der Geraden  $M_i S_{i,1}$  liegt im Abstand  $e$  der neue Näherungspunkt  $M_{i+1}$

Zusammenfassend gibt der Operateur folgende Parameter vor:

1. Startpunkt  $M$  (Näherungswert)
2. Anfangsrichtung  $t$  (Näherungswert)
3. Ringradius  $r$  (abhängig von der Breite der Linie, ändert sich mit Linienkrümmung)
4. Fortschritte (abhängig von der Linienkrümmung)
5. Typ des Linienprofils
6. Größe des Faltungsoperators (abhängig von Abbildungsgüte der Spur)

Im Verlauf der Linienverfolgung werden bis auf Parameter 5 und 6 alle Werte automatisch vom Programm dem aktuellen Linienverlauf angepaßt.

Die Methode des Ring-Operators eignet sich nicht nur zur genauen Messung linienhafter Objekte, sondern erzeugt auch zu jedem Linienpunkt eine strukturelle Beschreibung, in der Geometrie und Intensitätsverlauf des Musters einbezogen sind (LUHMANN 1986). Es wird daher in einer späteren Version des Verfahrens möglich sein, sich kreuzende oder berührende Linien zu erkennen und kritische Stellen zu kennzeichnen oder automatisch weiterzuverarbeiten.

#### 4. ANWENDUNGSBEISPIEL

Abb. 5 zeigt das mit einer Rolleiflex SLX Réseau Mittelformatkamera erhaltene Bild einer motografisch aufgezeichneten Schlagbewegung im Tennis. Die Aufnahme wurde am Réseau-Scanner Rolleimetric RS 1 mit dem in Kap. 3 beschriebenen Verfahren ausgemessen. Bei einer optischen Vergrößerung von 1:1 werden Bildelemente von  $10.0 \mu\text{m} \times 15.6 \mu\text{m}$  auf den Flächensensor abgebildet. Abb. 7 zeigt ein mit dem RS 1 digitalisiertes Teilbild, in dem neben den Réseaukreuzen des Scanners (Maschenweite 5 mm) ein Teilstück der Spur mit eingeblendeten lokalisierten Linienpunkten abgebildet ist. Die Koordinaten der Linienpunkte werden im System des Abtastréseaus gespeichert und können direkt weiterverarbeitet werden. Abb. 8 zeigt die graphische Ausgabe der Originaldaten.

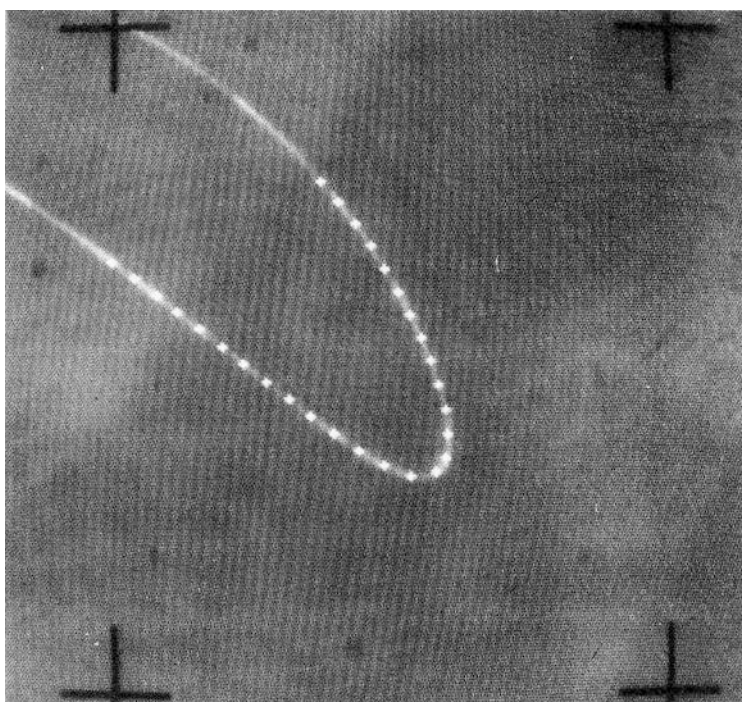


Abb. 7 Digitalisiertes Teilbild aus Abbildung 5

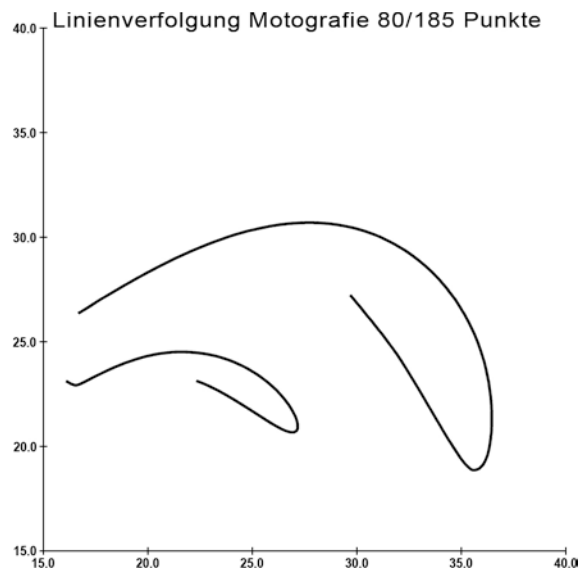


Abb.8 Graphische Ausgabe der automatischen Linienverfolgung

Eine Abschätzung der Meßgenauigkeit führt zu einem mittleren Fehler eines Linienpunktes von 5 - 8  $\mu\text{m}$ . Die Methode der Linienverfolgung bestimmt einzelne Punkte mit einer Genauigkeit bis ca. 0.1 Bildelementen, abhängig von der Güte des Signals. In diesem Fall ist aufgrund der schwachen Kontraste und schwankenden Linienbreiten eine Meßgenauigkeit von 0.5 Bildelementen zu erwarten. Diese Genauigkeit ist vergleichbar mit manuellen Messungen, z.B. am analytischen Plotter, da auch der menschliche Beobachter Probleme bei der Messung schlecht abgebildeter Linien hat, die zu einer größeren Meßunsicherheit führen.

## 5. LITERATUR

- BAUM, E., 1983: *Motografie II*. Forschungsbericht Nr. 324 der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Unfallforschung, Dortmund
- COGAN, L., HUNTER, D., 1984: *DTM Collection and the Kern Correlator*. Kern & Co. Ltd., Aarau
- FRASER, C.S., BROWN, D.C., 1986: *Industrial Photogrammetry - New Developments and Recent Applications*. Photogrammetric Record 12 (68), 197-217
- LUHMANN, T., 1986: *Ein Verfahren zur rotationsinvarianten Punktbestimmung*. Bildmessung und Luftbildwesen 54, 147-154

- LUHMANN, T., WESTER-EBBINGHAUS, W., 1986: *Rolleimetric RS - A New System for Digital Image Processing*. Symposium ISPRS Commission II, Baltimore
- PEIPE, J., 1987: *Photogrammetrische Auswertung motografischer Aufnahmen*. In diesem Heft
- PERTL, A., 1984: *Digital Image Correlation with the Analytical Plotter Planicom C100*. Int. Arch. of Photogrammetry, Vol. 25-A3b, Rio de Janeiro
- WESTER-EBBINGHAUS, W., 1984: *Opto-elektrische Festkörper-Flächensensoren im photogrammetrischen Abbildungssystem*. Bildmessung und Luftbildwesen 52, 297-301
- WESTER-EBBINGHAUS, W., 1987: *Photogrammetrische Aufnahmetechnik für die Motografie*. In diesem Heft