

# PRÄZISIONS-ORTSBESTIMMUNGEN IN WISSENSCHAFTLICHEN GERÄTEBAUVERFAHREN UND GRENZEN

H. G. WOSCHNI

Technische Hochschule Leipzig,  
Sektion Automatisierungsanlagen, Lehrstuhl Angewandte Elektronik, DDR

Eingegangen am 28. Juni 1988  
Vorgelegt von Prof. Dr. O. Petrik

## Abstract

The paper gives a survey of the precision position measurement procedures of scalelines and of the edge of the body, with the accuracy less than  $0,5 \mu\text{m}$ . Shows the paper also the need of the unambiguous definition of the position itself. All of the methods which are based on the photometrical position measurement are working with error only, because of the illumination distribution defined sensor signal. The author uses vector and tensor calculations for investigation of geometrical error of measuring apparatus.

Der Wissenschaftliche Gerätebau hat sich im Laufe der letzten 20 Jahre zusammen mit der Wissenschaftlich-Technischen Revolution stürmisch entwickelt und diese Revolution selbst mit hervorgebracht, bzw. diese stimuliert: Die Wissenschaftlich-Technische Revolution bewirkt auf Grund der zunehmenden wissenschaftlichen Durchdringung des Produktionsprozesses eine ständige Optimierung der Technologie und damit eine Verringerung des Preises der Produkte. Sie hat aber auch eine steigende Bedeutung bisher nicht genutzter physikalischer Effekte für den Einsatz in neuen Produkten zur Folge. Die Bedeutung des Wissenschaftlichen Gerätebaues für diese Entwicklung ergibt sich aus der Tatsache, daß er (1)

- sowohl Geräte für wissenschaftliche Untersuchungen
  - als auch „auf wissenschaftlicher Basis entwickelte“, d. h. wissenschaftlich durchgearbeitete Einzel- oder Seriengeräte (die in vielen Fällen die physikalischen Grenzen der Meß- und Untersuchungsmethoden ausloten)
- hervorbringt und damit die Grundlagen für die Beschleunigung des Wissenschaftlich-Technischen Fortschrittes legt.

Das vor mehr als 100 Jahren (1875) auf der internationalen Meterkonferenz definierte Urmeter war lange Jahre hindurch als Längennormal verwendet worden, wurde mehrfach durch neue Definitionen (charakteristische Strahlung bestimmter Isotope Cd, Kr, Laufzeitdefinition) ersetzt und erreicht heute, ausgehend von einer Unsicher-



gerung werden durch den Vektor  $\Omega$  beschrieben. Es gelte  $\mathbf{r}' = \Omega \cdot \bar{\mathbf{r}}$  mit  $\Omega = i; i \cos \varphi - j; j \sin \varphi + j; i \sin \varphi + j; j \cos \varphi$ . Dann ergibt sich für den Meßfehler in geschlossener Form:

$$\begin{aligned}
 F = |\vec{L}_1| - |\vec{L}_2| = & \frac{x_5 \cos(\Delta\varphi_7 + \varphi_5) + l_1 \cos(\varphi_1 + \varphi \cdot \Delta\varphi_7) + l_2 \cos(\varphi_1 + \varphi + \Delta\varphi_7)}{\cos(\varphi + \varphi_4 + \Delta\varphi_7)} + \\
 & + \frac{l_3 \cos(\varphi_3 + \varphi + \Delta\varphi_7) - l_1 \cos(\varphi_1 + \Delta\varphi_7) - l_2 \cos(\varphi_2 + \Delta\varphi_7) - l_3 \cos(\varphi_3 + \Delta\varphi_7)}{\cos(\varphi + \varphi_4 + \Delta\varphi_7)} - \\
 & - \frac{x_5 \cos \varphi_5}{\cos(\varphi_1 + \varphi)} \quad (\Delta\varphi_7 = 90 - \varphi_7) \quad (1)
 \end{aligned}$$

In ähnlich einfacher und eleganter Weise läßt sich der Einfluß von Wanderlasten und die unter deren Einfluß auftretenden Verzerrungen berechnen.

### 2. Fotoelektrische Methoden des Strich- und Kanteneinfangs

Die oben genannten fotoelektrischen Verfahren zur Erhöhung der Ablesegenauigkeit von Maßstäben sind heute wegen des Ersatzes der Strichmaßstäbe durch Raster- oder Laser-Wegmeßsysteme, die der Rechentechnik besser angepaßt sind, in ihrer Bedeutung für diese Einsatzfälle zurückgetreten. Haben sie in den 60er Jahren zur Erhöhung der Teilgenauigkeit der Maßstäbe und in den 70er Jahren zur Erhöhung der Meßgenauigkeit der Geräte geführt, so werden sie jetzt im WGB bei den sogenannten „Wafer-Steppern“ (5) zur Orientierung auf dem Wafer oder auch zum Objekteinfang bei Zweikoordinatenmeßgeräten eingesetzt (6). Grundproblem der Aufgabenstellung ist in jedem Falle die genaue Ortsbestimmung eines Striches, bzw. einer Kante, deren Helligkeitsprofile in Bild 2 dargestellt sind. Von den möglichen Ortsdefinitionen ist, — wenn keine besonderen Forderungen (z. B. durch die Gradation des

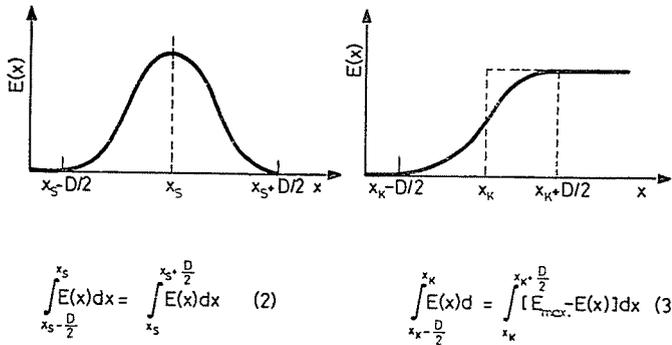


Bild 2. Fotometrische Definition des Strich- (2) und Kantenortes (3) bei gegebener Beleuchtungsstärkeverteilung  $E(x)$

Fotolackes für die Strukturübertragung) bestehen — die fotometrisch definierte Ortsdefinition vorzuziehen (Formeln (2) und (3)). Zur Vereinfachung der Betrachtungen haben wir uns auf eindimensionale Objekte beschränkt, die Übertragung der Ergebnisse auf zweidimensionale Verhältnisse bereitet keine Schwierigkeiten.

Die Definition erklärt zum Strichort diejenige Stelle, die den durch den Strich erzeugten Lichtstrom in zwei gleiche Hälften teilt. Die Kantenortsdefinition erklärt den Ort sprunghaften Hell-Dunkelübergangs mit gleicher fotometrischer Wirkung zum Kantenort. Der Strichort ist dann die Mitte zwischen den Kantenorten der den Strich bildenden Kanten. Diese Definitionen genügen den Forderungen:

- Eindeutigkeit
- geringe Zahl von Bestimmungsstücken
- die gesamte Struktur trägt zur Ortsdefinition bei
- das Objekt und dessen „Negativ“ werden in der gleichen Weise definiert
- Unabhängigkeit von Apertur und Vergrößerung.

Darüber hinaus ist die Bestimmung der realen Beleuchtungsstärkeverteilung nur über die Abtastung des Bildfeldes mit einem Spalt endlicher Breite möglich. Das durch den Empfänger ausgegebene Signal ist gleich dem Faltungsintegral der Beleuchtungsstärkeverteilung mit der „Spaltapertur“ (Spalttransparenz)  $\tau(\xi)$  (Bild 3)

$$\Phi(x'_\xi) = k \int_{\xi=-\infty}^{\xi=+\infty} \tau(\xi) E(x'_\xi + \xi) d\xi. \quad (4)$$

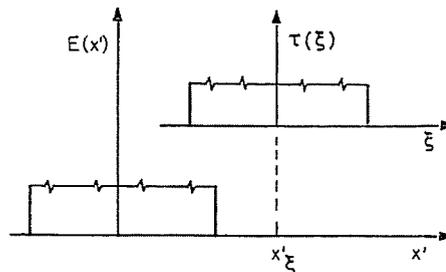


Bild 3. Ermittlung der Signalfunktion  $\Phi(x'_\xi)$  bei Abtastung der Struktur  $E(x)$  mit einem Spalt der Transparenz  $\tau(\xi)$

Die Ermittlung des Strukturortes als Integral entsprechend Definition (2) bzw. (3) kann durch einfache Integration der Empfängersignale erfolgen, bzw. dadurch, daß diese Integration mit dem Empfänger selbst vorgenommen wird (optische Integration), dessen Ausgangssignal dem auffallenden Lichtstrom proportional ist. Eine auf der Kenntnis der realen Beleuchtungsstärkeverteilung  $E(x)$  beruhende andere Ortsdefinition würde zunächst die Ermittlung dieser Verteilung erfordern, d. h. Lösung der Fredholmschen Integralgleichung erster Art (4) mit  $\tau(\xi)$  als Kern („Entfaltung“ des Fotosignals).

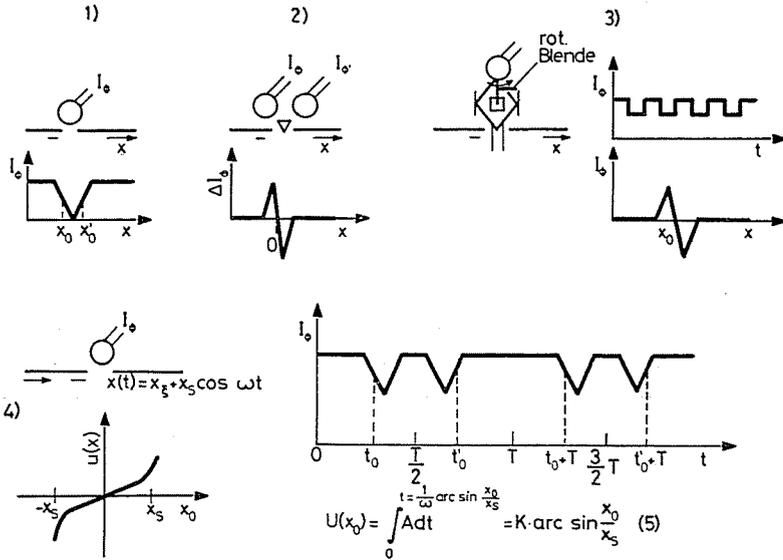


Bild 4. Prinzipien fotoelektrischer Mikroskope

Bild 4 zeigt verschiedene prinzipielle Möglichkeiten des Aufbaus fotoelektrischer Mikroskope zur Strichortbestimmung. Es sind das Einzellen-Verfahren 1, das Zweizellen-Verfahren 2, das Chopperverfahren 3 und das Scanningverfahren 4 dargestellt. Alle vier Prinzipien lassen sich auf die Abtastung der Struktur mit Hilfe eines Spaltes zurückführen, die Ausgangssignale sind jeweils als Funktion des Ortes dargestellt. Die Übereinstimmung des Strichortes mit einer ausgezeichneten Koordinate  $x_0$  des Mikroskopes (z. B. der optischen Achse) läßt sich durch Verarbeitung des Ausgangssignals (Diskrimination, bzw. Nutzung der Nulldurchganges des Ausgangssignals) ermitteln.

Bei entsprechender Wahl der Spaltbreiten (größer als Strichbreiten) ist die Strichortbestimmung entsprechend Definition (2) stets exakt möglich. Während bei den Verfahren 2 und 3 der Nulldurchgang des Ausgangssignals die Koinkidenz des fotometrischen Strichortes mit der optischen Achse signalisiert, trifft das bei den Verfahren 1 und 4 für die Koinkidenz der rechten oder linken Spaltkante mit diesem Ort bei der halben Impulsamplitude  $\frac{1}{2} (\theta_{\max} + \theta_{\min})$  zu. Man muß also die dort notwendigen Diskriminatoren auf diesen Wert einstellen. Dabei reagiert das Scanning-Verfahren 4 auf die Spaltmitte, falls die (mit der Zeit) ansteigende Flanke für die jeweilige Zeitmessung eingesetzt wird (7) S. 63.

Kleinere Spaltbreiten als die Strichbreite ergeben nicht eindeutig definierte Strichorte. Wird eine Ortsdefinition gewählt, die auf der Beleuchtungsstärkeverteilung aufbaut (kein Integralwert), so muß mit Fehlern durch Ungenauigkeiten bei der Entfaltung der Funktion (4) gerechnet werden.

*Zum Meßbereich der fotoelektrischen Mikroskope für den Stricheinfang*

Die fotoelektrischen Mikroskope sind ursprünglich Hilfsmittel zum Stricheinfang, d. h. Nullindikatoren, jedoch gestatten sie auch in einem gewissen Maße, die Ablage des Striches von der optischen Achse zu ermitteln. Wie aus Bild 4 hervorgeht, ist für die Verfahren 1—3 eine etwa lineare Abhängigkeit des Ausgangssignals von der Strichlage im Bereich der Strichbreite festzustellen. Die Linearität ist abhängig von der Strichform und nur in gewissen Grenzen gegeben. Allein das Schanning-Verfahren 4 besitzt einen Meßbereich, der wesentlich über die Strich- und Spaltbreite hinausgehen kann, weil dort die Weg-Zeit-Transformation durch die Abtastung mit sinusförmig schwingendem Strich (oder Spalt) erfolgt. Die am leichtesten überschaubare Transformation wäre die lineare mit dreieck- oder sägezahnförmiger Auslenkung, sie bietet jedoch gerätetechnisch große Schwierigkeiten (8).

Mißt man beim Scanning-Verfahren die Zeit durch Integration eines zeitlich konstanten Stromes, so wird das Ausgangssignal proportional zu  $\arcsin \frac{x_0}{x_s}$  (Bild 4), d. h. man erhält eine nichtlineare Abhängigkeit, die am Bereichsende zu einer höheren Empfindlichkeit führt, als in Bereichsmitte (9). Diese Nichtlinearität ließe sich durch Einsatz eines entsprechenden nichtlinearen Verstärkers beseitigen. Bei Einsatz von linearen Verstärkern schlagen Ciddor (10) und Karovic (11) vor, die Linearisierung durch Variation der Konstanten  $A=A(t)$  in Formel (5) zu erzielen. Alle diese Methoden beruhen auf der (exakten oder angenäherten) Lösung der durch Formel (5) dargestellten inhomogenen Volterraschen Integralgleichung erster Art. (7) S. 99—102.

Ein weiteres Verfahren, das auf dem Scanning-Prinzip aufbaut, ist das der Oberwellenfilterung: Bekanntlich werden Filter in der Nachrichten- und Meßtechnik an vielen Stellen zur Heraushebung kleiner Signale aus Störungen und Rauschen eingesetzt. Die Filtertheorie ist weitgehend ausgebaut und die theoretische Beschreibung der Zusammenhänge gelingt mit Hilfe der Fourier-Transformation in vorzüglicher Weise. Definiert man den Ort des Striches als die Stelle, an der die  $2n-1$ -ten Harmonischen der Signalfunktion zu Null werden, so erhält man ein sehr empfindliches Verfahren. Es lag also nahe, die mit dem Scanning-Verfahren erzielten Signalfunktionen einer derartigen Filterung zu unterwerfen, um damit eine sehr hohe Empfindlichkeit des Stricheinfanges zu erzielen (12). Bei dieser Vorgehensweise ist jedoch besonders darauf zu achten, daß durch eine entsprechende Spaltbreite (größer als Strichbreite) und Diskriminierung bei der halben Impulshöhe zunächst solche Standardimpulse erzeugt werden, die die fotometrisch definierte Lage des Striches zum Schwingungsmittelpunkt festlegen. Beachtet man diese Einschränkung nicht und filtert man die ursprünglichen Signale, so können beträchtliche Fehler bei der Messung entstehen (7) S. 64—91. Abgesehen davon, daß nur die Filterung der Grundwelle keine Mehrdeutigkeit des Signalortes ergibt, werden Inhomogenitäten im Strich, bzw. Störungen (Staub, pinholes usw.) außerhalb des Striches, die durch den Spalt bei

dessen Schwingung noch erfaßt werden, stark gewichtet, so daß bei einer Strichbreite von  $5 \mu\text{m}$ , einer Schwingungsamplitude von  $50 \mu\text{m}$  ein Staubkörnchen, das einer Strichbreite von  $10^{-2} \mu\text{m}$  (d. h.  $2\%$  der Strichbreite) entspricht, diesen um fast  $10 \mu\text{m}$  in seiner Lage versetzt erscheinen lassen kann, während dieselbe Störung bei Einhaltung der Definition (2) eine Verlagerung des Striches um  $0,01 \mu\text{m}$  (d. h.  $1\%$  der Strichbreite) unabhängig von dessen Lage hervorruft, solange sie vom Empfänger erfaßt wird (Bild 5).

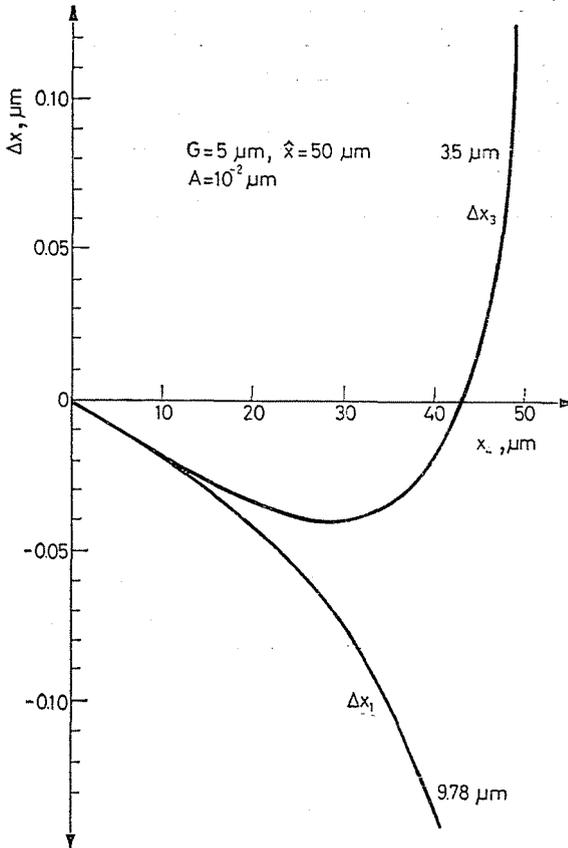


Bild 5. Fehler des Oberwellenverfahrens bei schmalen Spalt (s. Text)  
 $\Delta x_1$  für Grundwelle (1. Harmonische)  
 $\Delta x_2$  für dritte Harmonische

Die Mehrdeutigkeit ergibt sich daraus, daß an Stelle der Bedingung (2) für das Oberwellen-Verfahren die Bedingung

$$\int_T \Phi(t) \sin(2n+1)\omega t dt = 0 \tag{6}$$

tritt, die nicht nur dann erfüllt ist, wenn  $\theta(t)$  symmetrisch zum Nullpunkt liegt, sondern auch dann, wenn es symmetrisch zu den weiteren Nulldurchgängen der Oberwelle, d. h. zu  $\omega t(2n+1) = k\pi$  liegt. Wegen der Orst-Zeit-Transformation trifft das für die 3. (5.) Harmonische noch an 2 (4) weiteren Stellen des abgetasteten Bereiches zu. Bild 6 veranschaulicht die Zusammenhänge. Die oben genannte starke Wichtung von Störungen, die außerhalb der Strichmitte liegen, ist auf die Tatsache zurückzuführen, daß entsprechend (6) hier nicht der fotometrisch definierte Strichort (2), sondern näherungsweise (solange der Sinus durch sein Argument angenähert werden kann) der Flächenschwerpunkt zum Strichort erklärt wird, bei dem die Signalanteile proportional zum Abstand gewichtet werden (entsprechend dem Moment erster Ordnung). Für weiter vom Strichort entfernt liegende Strichteile tritt darüber hinaus zusätzlich zu dieser Wichtung noch eine Verlängerung der Signaldauer auf Grund der Tatsache, daß die Spaltgeschwindigkeit in der Nähe des Umkehrpunktes des Spaltes sehr gering wird. Hier macht sich also zusätzlich die Nichtlinearität der Längen-Zeittransformation bei sinusförmiger Abtastung bemerkbar.

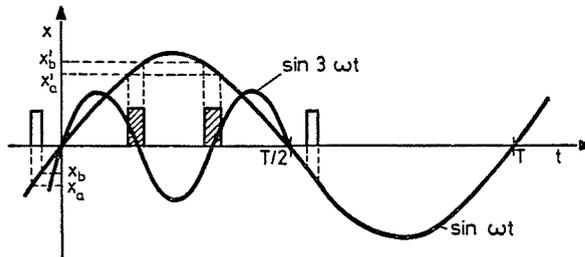


Bild 6. Signal beim Abtasten eines idealen Striches mit einem sehr schmalen Spalt.  $x_b - x_a$  = Strichbreite. Die schraffierten, bzw. offenen Rechteckimpulse entstehen als Signale beim Abtasten des Striches durch den Spalt

### Kantenortbestimmung

Für die Ermittlung der Lage einer Kante, wie sie in Zweikoordinaten-Meßgeräten (6) bestimmt werden, lassen sich die oben in Bild 2 dargestellten Prinzipien nicht ohne Abwandlung einsetzen. Geht man von der zur Strichortdefinition analogen Kantenortdefinition (3) aus, so läßt sie sich durch Verwendung von 3 an Stelle von 2 Spalten erfüllen, d. h. (3) wird in der Form

$$\frac{D}{2} (\Phi_{\max} + \Phi_{\min}) = \int_{x_k - (D/2)}^{x_k + (D/2)} E(x) dx \quad (7)$$

erfüllt (7) S. 59—60. Dazu eignet sich sowohl das Scanning-Verfahren (13) als auch ein

Differenz-Fotoempfänger-Array (SP 123XM, SP 124XM) in Form einer konzentrischen Kreis-Kreisringanordnung mit gleichen Empfängerflächen, deren Signale voneinander abgezogen werden. Der maximale Außendurchmesser beträgt für die o. a. Arrays 1, bzw. 3,46 mm, so daß in der Zwischenbildebene eine fast punktförmige Abtastung erfolgt. Während bei dem Scanning-Verfahren die Schwingrichtung des Spaltes senkrecht zur Kante ausgerichtet werden muß, fällt diese Notwendigkeit bei Einsatz der SP 123 und SP 124 fort.

#### *Einsatz von CCD-Zeilen zur Präzisions-Längenmessung*

Die seit Mitte der 70er Jahre produzierten CCD-Arrays sind auf Grund der in ihnen verwirklichten „Selbstabtastung“ sowohl für die Arbeit mit Rechnern, als auch für den Ersatz mechanisch bewegter Systeme (wie sie beim Scanning- und Chopper-Mikroskop eingesetzt werden) geeignet. Sie sind gleichzusetzen mit aneinandergereihten fotoelektrischen Empfängern (Pixeln), die nach einer gewissen Integrationszeit (ms) sequentiell ausgelesen werden und damit ebenfalls eine Orts-Zeit-Transformation erzeugen. Hier ist jedoch besonders darauf zu achten, daß das Ausgangssignal eines jeden Pixels wieder als Faltungsintegral der „Pixelapertur“ und der auf das Pixel gefallenen Belichtung entsteht. Das aus diesen Arrays ausgelesene Signal ist daher die mit der Pixelapertur gefaltete und danach (im Pixelabstand) abgetastete Bildinformation (14) S. 16.

Das „Übersprechen“ zwischen den Pixeln, d. h. die Wahrscheinlichkeit dafür, daß Landungsträger, die in der Nähe der Pixelgrenze generiert werden, in das benachbarte Pixel diffundieren (15), wird durch eine entsprechende Form der Pixelapertur berücksichtigt. In guter Näherung wird zunächst mit trapezförmigen Aperturen gerechnet. Insgesamt fordert die für die Fläche konstante Quantenausbeute für aneinanderstoßende Pixel, daß die Summe ihrer Aperturen an jedem Punkt (d. h. auch an den Pixelgrenzen) 1 ergibt.

Unter Berücksichtigung dieser Zusammenhänge und der Tatsache, daß es sich hier um ein Abtastsystem mit den dadurch gegebenen Grenzen hinsichtlich Auflösungsvermögen handelt, lassen sich bei Rechnereinsatz alle Ortsdefinitionen verwirklichen. Während die Entfaltung der Pixelsignale hier zusätzlich durch das Abtasttheorem bedingte Fehler ergibt und damit die Ortsbestimmung stark beeinflusst, ist bei Verwendung der Ortsdefinitionen (2) und (3) kein prinzipbedingter Fehler zu erwarten! Die Meßunsicherheit des Verfahrens zur Bestimmung des Strukturortes wird weder durch das aperturbegrenzte Auflösungsvermögen noch durch das Abtasttheorem festgelegt: Handelt es sich doch weder um die Trennung zweier Objekte, die durch die Apertur nach Abbe prinzipiell begrenzt ist, noch um die Rekonstruktion der abgetasteten Originalfunktion, die durch das Abtasttheorem begrenzt wird, sondern eben um eine Ortsbestimmung im Objektraum, die durch die Integralfunktion gegeben ist. Die mit derartigen selbstabtastenden Systemen erreichbaren Meßunsicherheiten und Meßfehler wurden in (16) gründlich untersucht und in einer Reihe

weiterer Publikationen, die insbesondere auch Teilungsfehler der CCD-Arrays (17) darstellen, veröffentlicht. Sie zeigen, daß Meßunsicherheiten von 2% des Pixelabstandes erreicht werden können und auch die Teilungsfehler der Arrays auf Grund der Herstellungstechnologie der Halbleiter diesen Wert kaum überschreiten.

### Zusammenfassung

Es wird ein Überblick über die für die Präzisions-Ortsbestimmung von Strichen und Kanten mit Unsicherheiten unter  $0,5\ \mu\text{m}$  eingesetzten Verfahren gegeben und auf die Notwendigkeit der eindeutigen Definition des Ortes hingewiesen. Alle Meßmethoden, die auf der Anwendung fotoelektrischer Methoden beruhen, lassen sich so auslegen, daß der fotometrisch bestimmte Strukturort angemessen wird, während auf der Kenntnis der Beleuchtungsstärkeverteilung beruhende Definitionen die Entfaltung des Sensorsignals erfordern und damit stets nur fehlerbehaftet ermittelt werden können. Es wird auf die Zwickmäßigkeit der Verwendung der Vektor- und Tensorrechnung bei der Ermittlung geometrischer Fehler an Meßapparaturen hingewiesen.

### Literatur

1. P. GÖRLICH: „Die geschichtliche Entwicklung des WGB und seine zukünftige Bedeutung“. Sitzungsberichte der Sächs. Akad. d. Wiss. zu Leipzig, Meth.-Nat. Kl. Bd. 115, H. 3. Berlin 1981.
2. G. MEISTER: „Die Weiterentwicklung der Präzisions—Längenmeßtechnik“. Feingerätetechnik 12 H. 5/1963, Verlag Technik Berlin.
3. W. KRIEG, H. G. WOSCHNI: „Abbe-Längenmeßgerät P1“. Feingerätetechnik 15 H. 4/1966, Verlag Technik Berlin.
4. G. MEISTER, R. CICHON: „Die Herstellung, Prüfung und Anwendung von ...“. Feingerätetechnik 9/1960 S. 429—438, Jenaer Rundschau 5 (1960) S. 171 ff.
5. St. HARTUNG u. a.: „Der Masken-Projektions-Überdeckungs-Repeater MPÜR“. Jenaer Rundschau 1979/2 S. 71—77.
6. G. BAUER u. a.: „Fotoelektrische Meßeinrichtung für Zweikoordinaten-Meßgeräte“. Jenaer Rundschau 2/1985.
7. H. G. WOSCHNI: „Fotoelektrische Mikroskope für Präzisions-Längenmessungen“. Diss. „B“, TH Magdeburg 1979.
8. S. M. SERDJUK, B. P. BRUJAKIN: Vlijanie nelinejnosti piloobrasnogo naprjazenija na progrnostj ismerenija s pomoseju skanitora. E 11/12 Sammlung Geräte- und Automatisierungsmittel, Kiev 1974 (russ).
9. H. G. WOSCHNI: „Fotoelektrische Mikroskope als Hilfsmittel zur objektiven Vermessung ebener Objekte“. Wiss. Zeitschr. d. Fr.-Schiller-Universität Jena, Meth.-Nat.-R. 25 (1976) H. 5.
10. CIDOR: „Some theoretical and experimental studies of a scanning photoelectric microscope“ metrologia 7 (1971) S. 135—142.
11. K. KAROVIC: „Über die Auswertung in fotoelektrischen Mikroskopen“. Feingerätetechnik 24 H. 7/1975 S. 306—308.
12. V. HEINECKE: „Fotoelektrisches Einfangen von Strichmarken“. Feinwerttechnik 71/1967 H. 4 S. 160—166.
13. VEB Carl Zeiss Jena, Prospekt „Fotoelektrische Meßeinrichtung für Zweikoordinatenmeßgeräte“ 1985.

14. R. LEHMER: „Untersuchungen zum Auflösungsvermögen einer CCD-Zeilenkamera“. Diplomarbeit 1987, Technische Hochschule Leipzig, 83 A2.
15. H. G. WOSCHNI u. a.: „Erweiterung der Auflösungsgrenze von Längenmeßsystemen mit CCD-Zeile“. Feingerätetechnik 35 H. 9/1986 S. 403—405.
16. A. REINSCH, R. CHRISTOPH: „Untersuchungen zu einem Verfahren zur Präzisionslageermittlung...“. Friedrich-Schiller-Universität Jena, Diss. A 1985.
17. HANDKE, u. a.: „Untersuchungen geometrischer Eigenschaften der CCD-Zeile L 133 C“ Feingerätetechnik 36 H. 12/1987 S. 536—540.

H. G. WOSCHNI — Technische Hochschule Leipzig