

Verfahren zur objektiven Bestimmung der Brennweite von Fernrohren und Kollimatoren

Dipl.-Phys. V. Tympel, Dipl.-Phys. H. Brenneisen
Carl Zeiss JENA GmbH

Die Brennweite von Fernrohren und Kollimatoren wird häufig mit Hilfe von einstellbaren Autokollimationsfernrohren bestimmt. Die klassischen Verfahren sind durch die Einbeziehung des Auges subjektiv geprägt und im Wellenlängenbereich stark eingeschränkt. Im folgenden wird ein Verfahren vorgestellt, das durch den Einsatz von CCD-Sensortechnik und nachfolgender digitaler Bildverarbeitung die Bestimmung der Brennweite objektiviert und den Wellenlängenbereich von 430 bis 1 060 nm erschließt.

1. Grundlagen

Allgemein sind im Gebiet des optischen Messens subjektive Meßverfahren stark verbreitet. Dies trifft besonders für nicht beugungsbegrenzte Optik zu und bringt Probleme bei der Reproduzierbarkeit von Meßergebnissen. Ein typisches Beispiel hierfür ist die klassische Bestimmung der relativ großen Brennweite von Meßfernrohren, Autokollimationsfernrohren (AKF), Kollimatoren und ebenen Spiegeln [1]. Neben den zahlreichen Entwicklungen für die automatische Fokussierung in der Foto- und Kameratechnik gibt es für meßtechnische Zwecke seit längerem elektromechanische Meßsysteme, die zumeist mit Hilfe eines Schwingspalts arbeiten [2]. Der Einsatz moderner optoelektronischer Bauelemente, z. B. CCD-Sensoren, eröffnet auch hier neue Möglichkeiten. So wird in [3] der Einsatz einer CCD-Matrix für ein automatisch fokussierendes Mikroskop erläutert. Es liegt daher nahe, den Einsatz von CCD-Zeilen für die Bestimmung von großen Brennweiten zu untersuchen. Für die Bewertung des Fokussierzustands sind verschiedene Bildfunktionen bekannt [3] [4], z. B. Bildkontrastfunktion (BKF), Bildkontrastfunktion der Quadrate (BKFQ), Fensterkontrastfunktion (FKF) und Bildentropie. Im eindimensionalen Fall gilt:

$$BKF = \sum_i |G(i) - G(i+1)| \quad (1)$$

$$BKFQ = \sum_i (G(i) - G(i+1))^2 \quad (2)$$

$$FKF = \sum_i |G(i) - 2 \cdot G(i+1) + G(i+2)| \quad (3)$$

$G(i)$ Grauwert an der i -ten Position.

2. Meßeinrichtung

Die Meßeinrichtung besteht aus Sensorkopf, Sensorinterface und Computer EC 1834. Ein TURBO-PASCAL-Programm mit speziellem

Assemblermodul zur Sensorsteuerung übernimmt die Informationsauswertung und Darstellung. Im Sensorkopf wird mit Hilfe einer Okularoptik die Strichplatte des jeweiligen AKFs auf eine CCD-Sensorzeile L 133 C abgebildet. Mit Hilfe des CCD-Sensors kann die Konstruktion so leicht und klein gestaltet werden, daß der Sensorkopf bequem anstelle des üblichen Okulars an handelsübliche AKF geschraubt werden kann. Die Sensoroptik läßt sich entlang der optischen Achse durch Drehbewegung von außen verstellen. Das Sensorinterface wurde auf einer Lochrasterkarte vom Institut für Automatisierung aufgebaut und erlaubt zwei softwaremäßig umschaltbare Betriebsarten: Die eigenständige Bereitstellung der Steuertakte ohne Prozessorunterstützung, um die Betriebsbereitschaft der CCD-Zeile zu garantieren, und den prozessorgesteuerten Betrieb, d. h. programmäßige Erzeugung der Signale für CCD-Zeile, Multiplexer, AD-Wandler C 574 und Einlesen der Daten. Die Integrationszeit der CCD-Zeile kann 5 bis 500 ms betragen, wobei die Zeit für die Wandlung der 1024 Bildpunktdaten und 12 Referenzen etwa 50 ms beträgt.

3. Meßvorgang

Die Messung besteht aus zwei Teilvorgängen: Der Abstimmung des Systems Strichplatte-Sensoroptik-CCD-Zeile und der eigentlichen Messung, wobei die durch die Abbildung des AKF-Objektivs entstehende Struktur mit ausgewertet wird.

Zur Abstimmung des Systems Strichplatte-Sensoroptik - CCD-Zeile wird die Okular-Strichplatte objektivseitig beleuchtet. Durch Verstellen der Sensoroptik kann dann das gewünschte Einstellkriterium erreicht werden. Die Abstimmung muß nicht vor jeder Messung wiederholt werden. Dies ist nur erforderlich, wenn die Wellenlänge geändert oder der Sensorkopf abgeschraubt wurde.

Zur eigentlichen Messung wird der Prüfling bzw. ein Autokollimationsspiegel objektivseitig angeordnet und zum AKF justiert. Die in der Strichplattenebene entstehende Struktur gelangt zur Auswertung. Durch Verstellen des AKF-Auszugs kann das gewünschte Einstellkriterium erreicht werden. Mit Hilfe der Kursortasten ist eine softwaremäßige Einschränkung des Gesichtsfelds möglich. Bei den Messungen ist auf konstante Beleuchtungsverhältnisse und exakte Filterwirkung (große Empfindlichkeit der CCD-Zeile im NIR) zu achten.

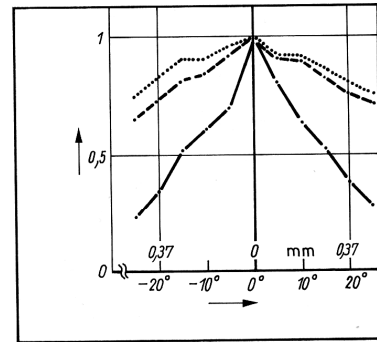


Bild 1. Normierte Bildfunktionswerte in Abhängigkeit vom Drehwinkel bzw. von der Lage der Sensoroptik auf der optischen Achse (--- BKFQ; - · - · - BKF; ... FKF)

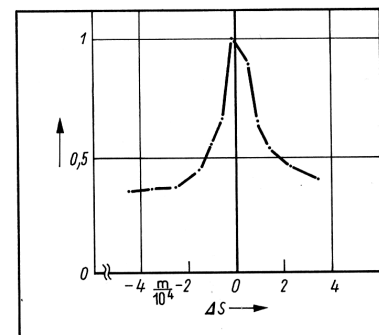
4. Ergebnisse

Anhand des Abstimmvorgangs für die Abbildung der Strichplatte des AKFs auf die CCD-Zeile wurde die Wirkung verschiedener Bildfunktionen untersucht. Bild 1 zeigt die Wirkung des Drehwinkels (als Maß für die Lage der Sensoroptik auf der optischen Achse) bezüglich verschiedener Bildfunktionen. Es zeigte sich, daß die BKFQ als Einstellkriterium geeignet ist, wobei auch BKF und FKF brauchbare Ergebnisse liefern. Untersuchungen der Bildentropie und der Entropie der Grauwertdifferenzen ergaben, daß diese im speziellen Fall ungeeignet sind. Auch die Fourierspektrenanalyse erwies sich als unzweckmäßig.

Unter Verwendung der BKFQ als Einstellkriterium wurde ein AKF 63/420 S im Autokollimationsverfahren mit Hilfe eines hochebenen Spiegels überprüft. Bild 2 zeigt, daß der visuell ermittelte Auszugswert mit dem Maximum der BKFQ übereinstimmt.

Mit dem AKF 63/420 S als Normal wurde die Brennweite eines Dioptrienmeßfernrohrs unter Verwendung der BKFQ bestimmt. Außerdem führten verschiedene Prüfer visuell Vergleichsmessungen durch. Bild 3 zeigt, daß beide Meßverfahren gleiche Ergebnisse für die Brennweite liefern, wobei das objektive Verfahren eine geringere Streubreite aufweist. Die Eichung des AKFs 63/420 S erfolgte im Autokollimationsverfahren unter Verwendung

Bild 2. Normierte BKFQ in Abhängigkeit vom relativen Auszugswert eines AKFs 63/420 S im Autokollimationsverfahren mit hochebenem Spiegel bei $\lambda = 546 \text{ nm}$



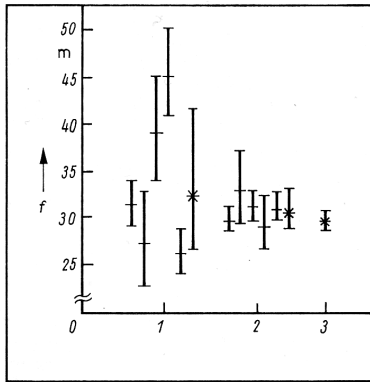
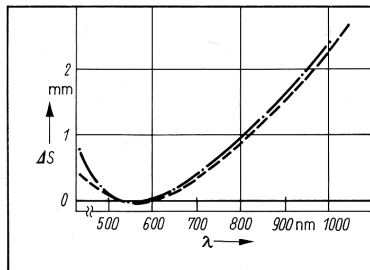


Bild 3. Brennweitenmessung eines Dioptrienmeßfernrohres (1 visuell mit AKF 40/250 S; 2 visuell mit AKF 63/420 S; 3 Sensorkopf mit BKFO-Kriterium)
 \bar{x} = mittlerer Meßwert mit Streubreite eines Prüfers
 \pm = mittlerer Meßwert mit Streubreite über alle Prüfer

Bild 4. Fokusslage eines AKFs 63/420 S in Abhängigkeit von der Wellenlänge (— relative Lage der theoretisch günstigsten Auffangebene; --- mit Sensorkopf und BKFO bestimmte relative Brennpunktlage)



der BKFO im Wellenlängenbereich von 430 bis 1 060 nm. Aus Bild 4 geht hervor, daß die so ermittelte Lageänderung des Brennpunkts in Abhängigkeit von der Wellenlänge gut mit den über Strahlendurchrechnung ermittelten günstigsten Auffangebenen des Idealobjektives übereinstimmt.

Die Ergebnisse bestätigen, daß die Abbildungsqualität eines konventionellen Okulars als Sensoroptik ausreichend ist.

5. Zusammenfassung

Durch den Einsatz eines CCD-Sensors in Verbindung mit entsprechender Rechentechnik und Software wurde ein Verfahren entwickelt, das es gestattet, optische Messungen großer Brennweiten, wie diese bei Meßfernrohren, Autokollimationsfernrohren, Kollimatoren und ebenen Spiegeln auftreten, objektiv durchzuführen. Unter Verwendung der BKFO als Einstellungskriterium konnten visuelle Messungen und theoretische Rechnungen bestätigt werden. Der Wellenlängenbereich von 430 bis 1 060 nm wurde dabei mit erschlossen. Ein derartiges Verfahren ist geeignet, die oben genannten optischen Geräte bezüglich der Brennweite im Sinne eines Maßanschlusses an bestehende Ebenheitsnormale anzubinden.

Taktiler Sensorsystem mit optoelektronischer Wandlung zur Schweißbrennerführung

Prof. Dr. sc.-techn. H.-J. Gerhard, Dr.-Ing. H. Schmidt
 Technische Hochschule Zwickau

In der Schweißprozessautomatisierung ist eine Vielzahl von Problemen zu beherrschen, für deren Lösung es keinen universellen Sensor gibt. Berührungslose Erkennungsprinzipien bieten zweifellos viele Vorteile. Aus diesem Grund geht der internationale Trend in der Sensorentwicklung in diese Richtung. Trotzdem behalten auch taktile Verfahren weiterhin für bestimmte Einsatzfälle ihre Berechtigung, da sie meist robust, einfach und kostengünstig aufgebaut sind und zuverlässig arbeiten. Je nach Einsatzfall und Sensoraufgabe, z. B. Erkennung des Fugenanfangs, des Fugenverlaufs, der Spaltbreite, der Spaltgeometrie u. a., muß ein geeignetes Prinzip ausgewählt werden, wobei immer auch ökonomische Gesichtspunkte, wie das Verhältnis von Aufwand und Nutzen, eine Rolle spielen.

1. Wirkungsprinzip und Aufbau des Sensorsystems

Das taktile Sensorsystem eignet sich zur Schweißbrennerführung beim Schweißen von Kehl-, Überlapp-, Bördel- und bedingt von Stumpfnähten (mit Spaltbreiten > 0) sowie zur Brennerpositionierung bei der Fugenanfangssuche.

Fugenanfang und Fugenverlauf werden mit einem entsprechend der Kontur geformten Tastelement erfaßt. Dabei wird der Taststift mechanisch ausgelenkt. Die Information über Betrag und Richtung der Auslenkung wird über eine optische Anordnung mit Reflektor in elektronisch verwertbare Signale umgesetzt. Die Anordnung besteht aus dem an der Verlängerung des Taststiftes im Sensorinneren angebrachten Reflektor und einer ihm gegenüber befindlichen Platte mit einem achssymmetrisch strahlenden Sender im Mittelpunkt und vier

jeweils um 90° versetzten Empfängern auf einem Kreisumfang um diesen Sender. Eingesetzt werden kostengünstige, gut verfügbare optoelektronische Bauelemente (z. B. IRED VQ 123 als Sender, Fototransistor SP 213 als Empfänger). Der Sender wird mit Gleichlicht betrieben. Bei Auslenkung des Reflektors ändert sich die räumliche Verteilung der Strahlungsmenge, die sich in der Signaländerung der Empfänger widerspiegelt. Dieses einfache Prinzip ermöglicht die Erkennung der Auslenkung des Taststifts in maximal drei Dimensionen nach Betrag und Richtung. Es lehnt sich an Prinzipien an, bei denen als Empfangselement positionsempfindliche Fotodioden, wie Quadrantenfotodioden oder Vollflächendioden, eingesetzt werden, und die eine zweidimensionale Erkennung mit hoher Genauigkeit, aber meistens keine dreidimensionale Erkennung erlauben. Hierbei muß aber hinsichtlich der Erzeugung, Bündelung und Auslenkung des Lichtstrahls ein hoher Aufwand betrieben werden. Im Gegensatz dazu funktioniert das oben genannte Prinzip ohne jede zusätzliche Optik und erreicht trotzdem eine für viele Schweißaufgaben ausreichende Präzision. Zusätzlich bietet die Wandlung über Reflexion Vorteile:

- Mit dem Taststift sind keine optoelektronischen Bauelemente verbunden. Sie sind damit vom Schweißprozeß galvanisch getrennt. An den Taststift als bewegtes Teil muß keine Energie geführt werden, und er ist thermisch höher belastbar.
- Durch die Reflexion entstehen größere relative Änderungen der Ausgangssignale der Empfänger, da der Auslenkwinkel sich auf den Einfallswinkel und Ausfallswinkel am Reflektor auswirkt. Für den Einsatz zur Schweißbrennerführung ist es sinnvoll, dieses einfache Wirkprinzip zur Sensierung in zwei Dimensionen auszunutzen:

- Brennerposition quer zur Fuge (y-Richtung)
- Abstand Brenner-Werkstück, also Schweißabstand (z-Richtung).

Für diesen Anwendungsfall existieren zwei Varianten eines zweidimensionalen Sensors, die sich nach den Auslenkrichtungen des Taststifts und der Anbringung des Sensors am Brenner unterscheiden. Beim Sensor 2D01 läßt sich der Taststift gemäß Bild 1 in x- und y-Richtung auslenken und muß gemäß Bild 2 zum Brenner in einem bestimmten Winkel stehen. Der Sensor 2D02 steht zum Brenner parallel (Bild 3). Sein Taststift läßt sich in x-Richtung schwenken und

Literatur

- [1] König, A.: Das Fernrohr. Berlin: Springer-Verlag 1933, S. 184 ff.
- [2] Hock, F.; Wentzlar: Ein photoelektrischer Meßtubus als Mikroskop, Automikroskop, Autokollimator und Refraktometer. Mikrotech, vol. XX No. 5, S. 522–526
- [3] Nowotnick, A.: Test ausgewählter Fokussierkriterien zur Bestimmung der optimalen Fokusposition eines Mikroskops mit Methoden der automatischen Bildverarbeitung. Diplomarbeit, FSU Jena 1987
- [4] Hild, R.; Nitzsche, G.: Eigenschaften der Bildentropie bei mikroskopisch defokussierter Abbildung. Beiträge zur Optik und Quantenelektronik, Band 12 (1987), S. 109–110

Fg 0584

Verfahren zur objektiven Bestimmung der Brennweite von Fernrohren und Kollimatoren

Dipl.-Phys. V. Tympel, Dipl.-Phys. H. Brenneisen
Carl Zeiss JENA GmbH

Die Brennweite von Fernrohren und Kollimatoren wird häufig mit Hilfe von einstellbaren Autokollimationsfernrohren bestimmt. Die klassischen Verfahren sind durch die Einbeziehung des Auges subjektiv geprägt und im Wellenlängenbereich stark eingeschränkt. Im folgenden wird ein Verfahren vorgestellt, das durch den Einsatz von CCD-Sensortechnik und nachfolgender digitaler Bildverarbeitung die Bestimmung der Brennweite objektiviert und den Wellenlängenbereich von 430 bis 1 060 nm erschließt.

1. Grundlagen

Allgemein sind im Gebiet des optischen Messens subjektive Meßverfahren stark verbreitet. Dies trifft besonders für nicht beugungsbegrenzte Optik zu und bringt Probleme bei der Reproduzierbarkeit von Meßergebnissen. Ein typisches Beispiel hierfür ist die klassische Bestimmung der relativ großen Brennweite von Meßfernrohren, Autokollimationsfernrohren (AKF), Kollimatoren und ebenen Spiegeln [1]. Neben den zahlreichen Entwicklungen für die automatische Fokussierung in der Foto- und Kameratechnik gibt es für meßtechnische Zwecke seit längerem elektromechanische Meßsysteme, die zumeist mit Hilfe eines Schwingspalts arbeiten [2]. Der Einsatz moderner optoelektronischer Bauelemente, z. B. CCD-Sensoren, eröffnet auch hier neue Möglichkeiten. So wird in [3] der Einsatz einer CCD-Matrix für ein automatisch fokussierendes Mikroskop erläutert. Es liegt daher nahe, den Einsatz von CCD-Zeilen für die Bestimmung von großen Brennweiten zu untersuchen. Für die Bewertung des Fokussierzustands sind verschiedene Bildfunktionen bekannt [3] [4], z. B. Bildkontrastfunktion (*BKF*), Bildkontrastfunktion der Quadrate (*BKFQ*), Fensterkontrastfunktion (*FKF*) und Bildentropie. Im eindimensionalen Fall gilt:

$$BKF = \sum_i |G(i) - G(i + 1)| \quad (1)$$

$$BKFQ = \sum_i (G(i) - G(i + 1))^2 \quad (2)$$

$$FKF = \sum_i |G(i) - 2 \cdot G(i + 1) + G(i + 2)| \quad (3)$$

$G(i)$ Grauwert an der i -ten Position.

2. Meßeinrichtung

Die Meßeinrichtung besteht aus Sensorkopf, Sensorinterface und Computer EC 1834. Ein TURBO-PASCAL-Programm mit speziellem

Assemblermodul zur Sensorsteuerung übernimmt die Informationsauswertung und Darstellung. Im Sensorkopf wird mit Hilfe einer Okularoptik die Strichplatte des jeweiligen AKFs auf eine CCD-Sensorzeile L 133 C abgebildet. Mit Hilfe des CCD-Sensors kann die Konstruktion so leicht und klein gestaltet werden, daß der Sensorkopf bequem anstelle des üblichen Okulars an handelsübliche AKF geschraubt werden kann. Die Sensoroptik läßt sich entlang der optischen Achse durch Drehbewegung von außen verstellen. Das Sensorinterface wurde auf einer Lochrasterkarte vom Institut für Automatisierung aufgebaut und erlaubt zwei softwaremäßig umschaltbare Betriebsarten: Die eigenständige Bereitstellung der Steuertakte ohne Prozessorunterstützung, um die Betriebsbereitschaft der CCD-Zeile zu garantieren, und den prozessorgesteuerten Betrieb, d. h. programmäßige Erzeugung der Signale für CCD-Zeile, Multiplexer, AD-Wandler C 574 und Einlesen der Daten. Die Integrationszeit der CCD-Zeile kann 5 bis 500 ms betragen, wobei die Zeit für die Wandlung der 1024 Bildpunktdaten und 12 Referenzen etwa 50 ms beträgt.

3. Meßvorgang

Die Messung besteht aus zwei Teilvorgängen: Der Abstimmung des Systems Strichplatte-Sensoroptik-CCD-Zeile und der eigentlichen Messung, wobei die durch die Abbildung des AKFObjektivs entstehende Struktur mit ausgewertet wird.

Faksimile: Verfahren zur objektiven Bestimmung der Brennweite von Fernrohren und Kollimatoren

Zur Abstimmung des Systems Strichplatte-Sensoroptik - CCD-Zeile wird die Okular-Strichplatte objektivseitig beleuchtet. Durch Verstellen der Sensoroptik kann dann das gewünschte Einstellkriterium erreicht werden. Die Abstimmung muß nicht vor jeder Messung wiederholt werden. Dies ist nur erforderlich, wenn die Wellenlänge geändert oder der Sensorkopf abgeschraubt wurde.

Zur eigentlichen Messung wird der Prüfling bzw. ein Autokollimationsspiegel objektivseitig angeordnet und zum AKF justiert. Die in der Strichplattenebene entstehende Struktur gelangt zur Auswertung. Durch Verstellen des AKF-Auszugs kann das gewünschte Einstellkriterium erreicht werden. Mit Hilfe der Kursortasten ist eine softwaremäßige Einschränkung des Gesichtsfelds möglich. Bei den Messungen ist auf konstante Beleuchtungsverhältnisse und exakte Filterwirkung (große Empfindlichkeit der CCD-Zeile im NIR) zu achten.

4. Ergebnisse

Anhand des Abstimmvorgangs für die Abbildung der Strichplatte des AKFs auf die CCDZeile wurde die Wirkung verschiedener Bildfunktionen untersucht. Bild 1 zeigt die Wirkung des Drehwinkels (als Maß für die Lage der Sensoroptik auf der optischen Achse) bezüglich verschiedener Bildfunktionen. Es zeigte sich, daß die BKFQ als Einstellkriterium geeignet ist, wobei auch BKF und FKF brauchbare Ergebnisse liefern. Untersuchungen der Bildentropie und der Entropie der Grauwertdifferenzen ergaben, daß diese im speziellen Fall ungeeignet sind. Auch die Fourierspektrenanalyse erwies sich als unzweckmäßig.

Unter Verwendung der BKFQ als Einstellkriterium wurde ein AKF 63/420 S im Autokollimationsverfahren mit Hilfe eines hochebenen Spiegels überprüft. Bild 2 zeigt, daß der visuell ermittelte Auszugswert mit dem Maximum der BKFQ übereinstimmt.

Mit dem AKF 63/420 S als Normal wurde die Brennweite eines Dioptrienmeßfernrohrs unter Verwendung der BKFQ bestimmt. Außerdem führten verschiedene Prüfer visuell Vergleichsmessungen durch. Bild 3 zeigt, daß beide Meßverfahren gleiche Ergebnisse für die Brennweite liefern, wobei das objektive Verfahren eine geringere Streubreite aufweist.

Die Eichung des AKFs 63/420 S erfolgte im Autokollimationsverfahren unter Verwendung der BKFQ im Wellenlängenbereich von 430 bis 1 060 nm. Aus Bild 4 geht hervor, daß die so ermittelte Lageänderung des Brennpunkts in Abhängigkeit von der Wellenlänge gut mit den über Strahldurchrechnung ermittelten günstigsten Auffangebene des Idealobjektives übereinstimmt.

Die Ergebnisse bestätigen, daß die Abbildungsqualität eines konventionellen Okulars als Sensoroptik ausreichend ist.

5. Zusammenfassung

Durch den Einsatz eines CCD-Sensors in Verbindung mit entsprechender Rechentechnik und Software wurde ein Verfahren entwickelt, das es gestattet, optische Messungen großer Brennweiten, wie diese bei Meßfernrohren, Autokollimationsfernrohren, Kollimatoren und ebenen Spiegeln auftreten, objektiv durchzuführen. Unter Verwendung der BKFQ als Einstellkriterium konnten visuelle Messungen und theoretische Rechnungen bestätigt werden. Der Wellenlängenbereich von 430 bis 1 060 nm wurde dabei mit erschlossen. Ein derartiges Verfahren ist geeignet, die oben genannten optischen Geräte bezüglich der Brennweite im Sinne eines Maßanschlusses an bestehende Ebenheitsnormale anzubinden.

In der Schweißprozeßautomatisierung ist eine Vielzahl von Problemen zu beherrschen, für deren Lösung es keinen universellen Sensor gibt. Berührungslose Erkennungsprinzipien bieten zweifellos viele Vorteile. Aus diesem Grund geht der internationale Trend in der Sensorentwicklung in diese Richtung. Trotzdem behalten auch taktile Verfahren weiterhin für bestimmte Einsatzfälle ihre Berechtigung, da sie meist robust, einfach und kostengünstig aufgebaut sind und zuverlässig arbeiten. Je nach Einsatzfall und Sensoraufgabe, z. B. Erkennung des Fugenanfangs, des Fugenverlaufs, der Spaltbreite, der Spaltgeometrie u. a., muß ein geeignetes Prinzip ausgewählt werden, wobei immer auch ökonomische Gesichtspunkte, wie das Verhältnis von Aufwand und Nutzen, eine Rolle spielen.

Literatur

- [1] König, A.: Das Fernrohr. Berlin: Springer-Verlag 1933, S. 184 ff.
- [2] Hock, F.; Wentzlar: Ein photoelektrischer Meßtubus als Mikroskop, Automikroskop, Autokollimator und Refraktometer. Mikrotech, vol. XX No. 5, S. 522-526
- [3] Nowotnick, A.: Test ausgewählter Fokussierkriterien zur Bestimmung der optimalen Fokusposition eines Mikroskops mit Methoden der automatischen Bildverarbeitung. Diplomarbeit, FSU Jena 1987
- [4] Hild, R.; Nitzsche, G.: Eigenschaften der Bildentropie bei mikroskopisch defokussierter Abbildung. Beiträge zur Optik und Quantenelektronik, Band 12 (1987), S. 109-110