

EIN NEUES OPTISCHES MESSGERÄT ZUR MESSUNG DER GERADHEIT LANGER BOHRUNGEN

Z. TURI, GY. ÁBRAHÁM, A. HALMAI,
A. HUBA und K. WENZEL

Lehrstuhl für Feinmechanik und Optik,
Technische Universität, H-1521 Budapest

Eingegangen am 9. September 1986

Abstract

The measurement of workpieces with long but small diametric cavities (drills) is always a difficult problem. The apparatus shown in this paper has been developed for measurement of the straightness of cavities with 5—10 mm diameter and 600—1000 mm length. The optical principle of this measuring allows to achieve the uncertainty less than $\pm 5 \mu\text{m}$.

Die Formfehler bei inneren Zylinderoberflächen, — besonders bei Bohrungen — können in zwei Grundformen eingeordnet werden.

1) Form-, und Maßunterschiede des Durchmessers

2) Abweichung der Bohrungsachse von der Gerade. Die Toleranzgrenzen, beim ersten Fall können durch eine entsprechende Technologie (Werkzeug), und homogene Materialqualität gesichert werden, darauf lassen wir uns in dieser Arbeit nicht ein.

Unsere Aufgabe war die Abweichung der Bohrungsachse von der Gerade festzustellen- und dabei vor allem die Messung von langen inneren Zylinderoberflächen, mit relativ kleinem Durchmesser (hydraulische, pneumatische Arbeitszylinder).

Die Form dieser inneren Zylinderoberflächen, die von einem großen l/d Verhältnis bestimmt werden, kann mit optischen Meßmethoden erfolgreich erfaßt werden. Unter den Methoden sind einige, die ohne Berührung funktionieren [1], und andere die die Messung durch berührende Abtastung durchführen. Unser Artikel stellt ein Meßgerät vor, in dem die Rohrachse durch einen bewegten Meßzylinder abgetastet wird.

Die Wahl der zu messenden Größen

Mathematisch kann die Form (die Geradheit) einer Zylinderoberfläche mit dreidimensionalen Funktionen beschrieben werden. Diese Funktionen können Lage-, Richtungs-, oder Krümmungsfunktionen sein (Abb. 1).

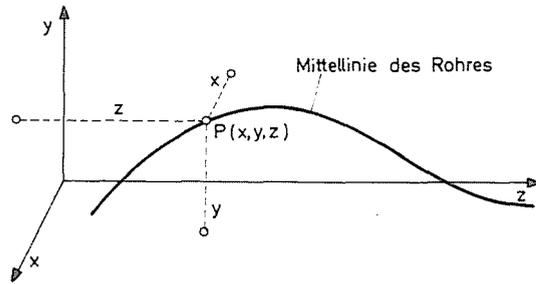


Abb. 1

Die Lagefunktion wird durch

$$x = f_1(z) \quad (1)$$

$$y = f_2(z)$$

bestimmt.

Die Richtungsfunktion ist:

$$y' = \frac{df_1}{dz} x(z) \quad (2)$$

$$y' = \frac{df_2}{dz} y(z)$$

Die Krümmungsfunktion:

$$x'' = \frac{d^2 f_1}{dz^2} q_x(z) \quad (3)$$

$$y'' = \frac{d^2 f_2}{dz^2} q_y(z)$$

Alle drei Funktionen können die Geradheit gleichgut charakterisieren. Da zwischen ihnen ein Integralverhältnis bzw. Ableitung besteht, genügt Eine von ihnen zu messen, und die beiden anderen können daraus abgeleitet werden.

Die Lösung muß auf ganz anderen Wegen gesucht werden, abhängig davon, ob man zur Datenverarbeitung eine on-line Computertechnik benutzen will, oder nicht. In dem einen Fall müssen die Schwerpunkte des Problems bei der Auswertung, in dem anderem bei der Messung gelöst werden. Der Computer löst komplizierte Bewertungsaufgaben schnell und genau, man muß also nicht unbedingt diejenige Meßsignale aussuchen, die am einfachsten zu bewerten sind. Beim Entwurf des Meßgerätes liegt der Schwerpunkt auf der einfachen und funktionssicheren Gestaltung (z. B. Richtungsmessung mit der Autokollimations-Methode).

So ein „intelligentes“ Meßgerät bedeutet jedenfalls Kostenerhöhung somit bei seltenen Messungen Unrentabilität.

Vergleicht man die drei Meßvarianten, und die dabei auftretenden Schwierigkeiten, so kann folgendes festgestellt werden:

Bei der Messung der Lagefunktion bereitet die Sicherstellung der Basislinie eine Schwierigkeit. Im weiteren wird der Entwurf eines Meßzylinders für die Lagenmessung eine von den schwersten Aufgaben (im Verhältnis zu den beiden anderen Varianten). Bei optischer Abtastung bedeutet die Tatsache einen weiteren Nachteil, daß man das Beobachtungsgerät an die Zielmarke des Meßzylinders erneut scharfstellen muß. Bei der Messung der Richtungsfunktion machen die Wahl des Toleranzfeldes und des maximalen Abweichungsortes eine Schwierigkeit. Jetzt muß nämlich eine Basislinie definiert werden, und die Richtungsabweichungen sind in Bezug auf diese zu registrieren. Oder aber müssen die Inflexionspunkte der Richtungsfunktion gefunden werden, das ohne Hilfe eines Computers eine schwere Aufgabe bedeutet. Hingegen kann man die einfachsten Meßzylinder zur Messung der Richtungsfunktion anfertigen. Zur automatischen Messung kann als Grundprinzip die Richtungsmessung empfohlen werden.

Bei der Messung der Krümmungsfunktion ist das Auffinden der maximalen Fehlerstelle relativ einfach. Man braucht dazu weder Basis-Richtung, noch Basis-Linie, und das Ausschauen der Extremwerte erweist sich als eine einfache, eindeutig definierbare Aufgabe. Der Meßzylinder ist aber im Verhältnis zur Richtungsmessung kompliziert und leicht beschädigbar. Unsere Arbeitsgruppe hat sich für die Entwicklung eines Gerätes entschieden, bei dem direkt ablesbar ist wie die Zylinderachse von der Gerade abweicht — und zwar möglichst ohne on-line Datenverarbeitung. Dem Gerät wurde die Abtastung eines Formfehlers von $\pm 5 \mu\text{m}$ bei einer Zylinderlänge von 1000 mm zum Ziel gesetzt.



Übliche optische Geräte zur Geradheitsmessung

Grundprinzipien

In den optischen Geradheit-, und Ebenheitsmeßgeräten verwendet man im allgemeinen ein Zielfernrohr. Abb. 2 zeigt das Grundprinzip wie mit dem Zielfernrohr gemessen wird. Der Betrachter (7) mißt die Entfernung y des Punktes B vom der Gerade $\overline{AA'}$. Das Zielfernrohr (1), besteht aus dem Objektiv (2), dem Okular (3), dem Fadenkreuz (4) und dem optischen Mikrometer (5); und kann stabil am Gestell (6) befestigt werden. Die optische \overline{AO} Achse wird bei der Messung als Basislinie dienen. Die Entfernung eines beliebigen Punktes B kann als Abstand von dieser Achse gedeutet werden. Der Betrachter (7) stellt

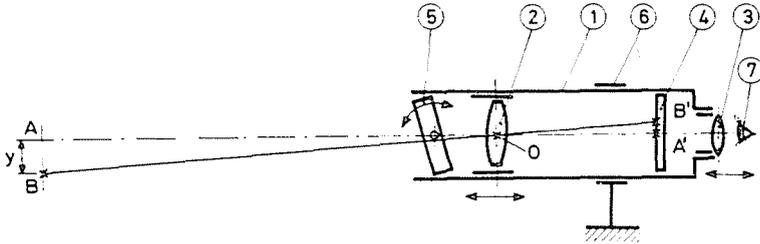


Abb. 2

das Fadenkreuz durch die axiale Verstellung des Objektivs (2) scharf ein. Die gesuchte Entfernung y kann durch das Skala des Fadenkreuzes (4), oder durch einen optischen Mikrometer (5) bestimmt werden.

Die Objektivführung ist ungenau, somit kann die optische Achse des Fernrohres durch das Scharfstellen verschoben werden. In Abb. 3 sieht man,

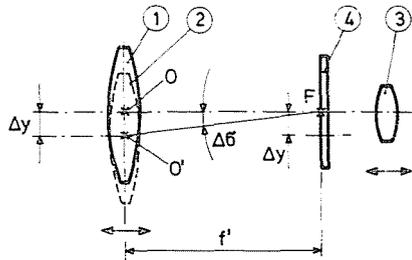


Abb. 3

daß eine Δy Querbewegung des Objektivs auf der Fadenscheibe (4) eine $\Delta y'$ Verschiebung des Bildes bewirkt. Damit ändert sich die Achse des Fernrohres um $\Delta\sigma$. Wenn die Brennweite des Objektivs (1) f' beträgt, dann gilt

$$\operatorname{tg} \Delta\sigma = \frac{\Delta y}{f'} \quad (4)$$

Bei Fernrohren mit innerer Scharfeinstellung kann dieser Fehler wesentlich niedriger sein. Das Objektiv von Fernrohren mit innerer Scharfeinstellung besteht aus 2 Gliedern (Abb. 4): aus Glied 1 als Sammellinse, und Glied 2 als Streulinse mit langem Fokusabstand. Die Scharfeinstellung erfolgt jetzt durch die axiale Verschiebung des Gliedes 2, mit einem Fokusabstand f'_2 . Wenn sich dieses Glied bei der Scharfeinstellung bewegt, so gilt für die Richtlinienänderung des Fernrohres:

$$\operatorname{tg} \Delta\sigma = \frac{\Delta y}{f'_2} \quad (5)$$

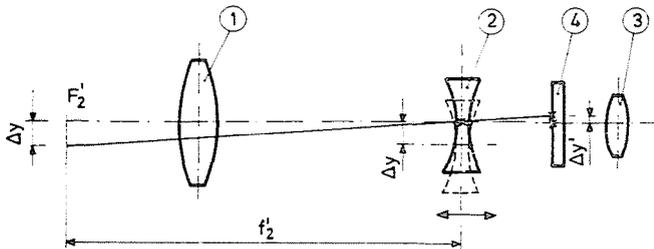


Abb. 4

Da die f'_2 Fokulentfernung immer mit einem hohen Wert gewählt wird, wird der in der Bildebene auftretende Meßfehler $\Delta y'$ bedeutend kleiner bleiben, als der Führungsfehler Δy . Alle modernen Zielfernrohre haben deshalb innere Scharfstellung [1]. Auf dem sozialistischen Markt werden für Geradheitsmessung die Zeiss Lagen- und Richtungsmeßgeräte angeboten, oder das universelle optische Einstellgerät OSZZM aus der Sowjetunion, weiterhin die Zielfernrohre der geodetischen Geräte (Nivellierungsgeräte und Theodolite). Untersuchen wir nun, ob unsere einleitend dargestellten Aufgaben mit diesen gelöst werden können.

Das von Zeiss-Werken hergestellte Optische Fluchtungs- und Richtungsmeßgerät [2] hat ein Zielfernrohr für 0,7...40 m Objektentfernung; die Skaleneinteilung seines optischen Mikrometers liegt bei 0,05 mm, und hat einen Meßbereich von 1,2 mm. Bei der Geradheitsmessung von pneumatischen und hydraulischen Arbeitszylindern muß aber bereits ein Fehler von $\pm 5 \mu\text{m}$ registriert werden. Deswegen entspricht dieses Gerät unseren Zielen nicht.

Das universelle optische Einstellgerät OSZZM aus der Sowjetunion wurde für die Geradheitsmessung, für die Messung der Parallelität, der Rechtwinkligkeit, der Lage zweier Achsen also für allgemeine Zwecke im Maschinenbau entwickelt. Das Zielfernrohr kann mit dem Autokollimationsfernrohr — mit dem es konzentrisch montiert ist — auf eine Objektweite von 0 ~ 15 verwendet werden. Die kleinste Skaleneinteilung des Optischen Mikrometers des Zielfernrohres beträgt 0,001 mm. Die Meßunsicherheit ist bei der Geradheitsmessung von $\pm(4 + 2L)$, wo L die Entfernung des Fernrohres vom Zielobjekt in Meter ist. Die meßbare Länge macht aber nur 0,2 ~ 30 mm aus. Die gestellte Aufgabe wird also durch dieses Gerät auch nicht gelöst.

Bei der Bewertung der geodetischen Fernrohre muß in Betracht bezogen werden, daß bei den pneumatischen und hydraulischen Arbeitszylindern die Geradheit auf einer Länge von 800 ~ 1000 mm mit einer Genauigkeit von $\pm 0,005$ mm gemessen werden muß. Um die Parameter des Zielfernrohres zu bestimmen, betrachte man die Meßanordnung in Abb. 5.

Wenn die Länge des zu messenden Rohres (2) $l = 1000$ mm ist und der Nahpunkt des Fernrohres (1) bei 800 mm liegt, weiterhin der kleinste Meßwert

$y=0,005$ mm ist, so muß im weitesten Punkt des Rohres ein Winkel $\varepsilon=0,6''$ gemessen werden. Wenn eine geübte Person mit dem Fernrohr mißt, die das Gerät mit einem Fehler von $20''$ einstellen kann [4], dann ist die benötigte Winkelvergrößerung 33-fach. Wenn ein Fernrohr mit dem Nahpunkt $k=1500$ mm verwendet wird, so muß in dem weitesten Messpunkt mit $\varepsilon=0,4''$ gemessen werden, was eine 50fache Winkelvergrößerung benötigt. Im letzteren Fall bereitet aber auch schon das geeignete Stativ eine Sorge, worauf sowohl das zu messende Rohr wie auch das Zielfernrohr stabil, und Schwingungsfrei befestigt werden müßte.

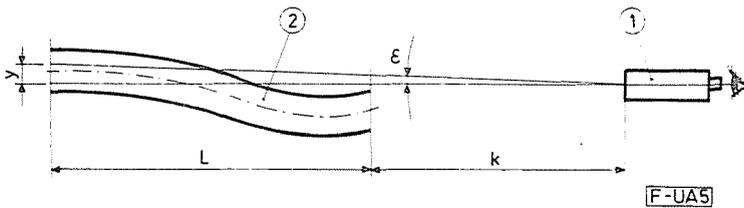


Abb. 5

Die geodetischen Hochleistungsfernrohre haben eine 25—50fache Winkelvergrößerung ihr Nahpunkt liegt bei $1,5 \sim 4$ m, der mittlere Fehler bei $\pm 0,2 \sim 0,5$ mm/km, d. h. $\pm 0,04 \sim 0,1''$ [5]. In dem breiten Angebot von geodetischen Zielfernrohren gibt es nur wenige Modelle, bei denen der Nahpunkt bei 0,8 m liegt. Bei denen ist der mittlere Fehler groß, und die Winkelvergrößerung klein. (z. B. Ni 050, VEB Carl Zeiss, Jena; Nahpunkt 0,9 m, mittlerer Fehler ± 5 mm) km d. h. $\pm 1''$, die Vergrößerung beträgt das 18-fache. Oder Ni-EL, MOM Budapest, Nahpunkt 0,8 m, mittlerer Fehler ± 15 mm/km d. h. $\pm 3''$, die Vergrößerung ist 6,2-fach.

So kann leicht eingesehen werden, daß die Aufgabe nicht einmal mit den anspruchsvollsten geodetischen Fernrohren lösbar ist.

Eine nahe vollwertige Lösung hat bis jetzt nur die Autokollimations-Meßmethode gebracht [6]. Dabei kann die Auflösung 0,001 mm, die Messlänge 750 mm betragen, der Nahpunkt kann beliebig kurz entfernt sein, das Stativ muß nicht sehr groß gewählt werden. Dieses Meßgerät kann nur mit computerisierter Bewertung zielgerecht verwendet werden, da die Autokollimationsmessung nicht die Geradheitsfehler, sondern die Richtungsfehler angibt.

Deswegen mußte zur Lösung der gegebenen Aufgabe ein neues optisches Meßgerät entwickelt werden.

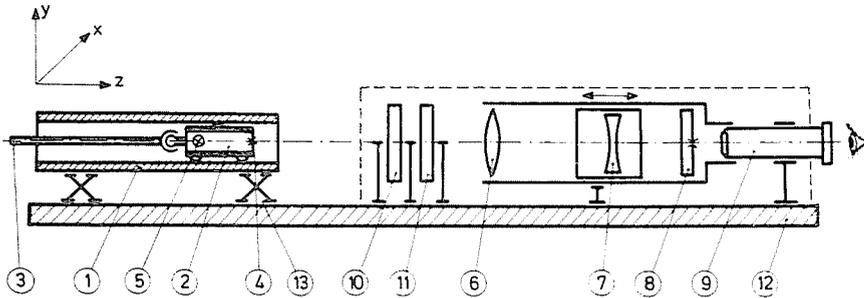


Abb. 6

Neues optisches Meßgerät für Geradheitsmessung entwickelt am Lehrstuhl für Feinmechanik und Optik an der TU Budapest

Der Aufbau des Gerätes ist in Abb. 6 zu sehen. Die Bohrung des Rohres (1) wird mit einem Meßzylinder mechanisch abgetastet (2), wobei der Meßkörper mit einem Stab im Rohrinernen entlangbewegt wird. Das Fadenkreuz des Meßzylinders wird durch eine gelbe Leuchtdiode erhellt. Die Verschiebungen des Fadenkreuzes (4), die aus der Krümmung des Rohres abzuleiten sind, können mit einem Zielfernrohr auf optischem Wege gemessen werden.

Das Objektiv des Zielfernrohres besteht aus dem Sammell- (6), und dem Streuglied (7), mit langem Fokusabstand. Durch die Bewegung des Gliedes (7) kann das Fadenkreuz (4) scharf eingestellt werden, das Zielfernrohr hat also eine innere Scharfeinstellung. Das Bild des Fadenkreuzes (4) das durch die Objektive (6, 7) gewonnen wird, entsteht im Sehfeld auf dem Fadenkreuz (8). Diese beiden Bilder, die Lage der beiden Fadenkreuze also, kann durch ein Mikroskop (9) betrachtet werden. Wenn sich der Fadenkreuz-Mittelpunkt des Meßzylinders in der optischen Achse befindet, dann decken sich im Sehfeld die Schnittpunkte der beiden Fadenkreuze. Durch eine Krümmung des untersuchten Rohres wird das Bild der beiden Fadenkreuze voneinander verschoben. Durch den optischen Mikrometer (10, 11) kann diese Verschiebung des Fadenkreuzes (4) in x und y Richtung ausgeglichen werden. Die dazu benötigten Verschiebungen können am optischen Mikrometer abgelesen werden.

Das Zielfernrohr, das Mikroskop und der optische Mikrometer sind durch das Gestell (12) miteinander fest verbunden. Mit diesem Gestell ist auch das untersuchte Rohr (1) verbunden. Zum „Aufädeln“ des Rohres an die optische Achse dient eine spezielle Feinpositionierungseinheit mit einer scherenförmigen Anordnung (13).

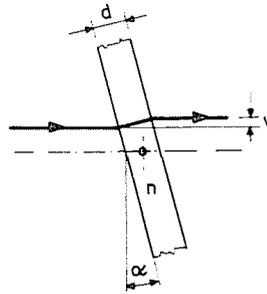


Abb. 7

Der optische Mikrometer (Abb. 7, 10, 11) wurde zielgerecht konstruiert. Abbildung 7. zeigt das Funktionsprinzip.

Der optische Mikrometer besteht aus zwei planparallelen Platten, die unabhängig voneinander um zwei, einander senkrecht stehenden, Achsen gedreht werden können. Die planparallelen Glasplatten verschieben den einfallenden Strahlenbündel parallel zur ursprünglichen Richtung. Die Verschiebung (v) kann mit der (d) Plattendicke (d), dem Einfallswinkel ε , und mit dem Brechkoeffizienten n berechnet werden:

$$v = d \sin \varepsilon \left(1 - \frac{1 - \sin^2 \varepsilon}{n^2 - \sin^2 \varepsilon} \right) \quad (6)$$

Es ist klar, daß: wenn der Einfallswinkel klein ist, so kann die $\sin \varepsilon \approx \varepsilon$ Annäherung, und die $\sin^2 \varepsilon \approx 0$ Vernachlässigung angewandt werden. Wenn wir annehmen, daß der Bewegungswinkel der planparallelen Platte $\gamma = \varepsilon$ ist, so kann die obige Gleichung eine einfachere Form annehmen, und praktisch gut gebraucht werden:

$$v = d \cdot \gamma = \frac{n-1}{n} \quad (7)$$

Beim Entwurf des optischen Mikrometers kann diese einfachere Form verwendet werden. Bei der Konstruktion haben wir folgende Erwägungen getroffen:

- 1) Die Auflösung des optischen Mikrometers soll eine ganze Zahl sein, z. B. $\pm 1 \mu\text{m}$.
- 2) Der Meßbereich braucht wegen der kleinen Auflösung nicht groß zu sein. Wählen wir $100 \mu\text{m}$, das vom Mittelpunkt aus $\pm 50 \mu\text{m}$ bedeutet.
- 3) Der benötigte Drehungswinkel γ der planparallelen Platten kann erst dann zielgerecht gewählt werden, wenn das Verhältnis zwischen Drehwinkel und Bildverschiebung linear, oder nahe linear ist. Wählt man $\gamma_{\text{max}} \ll 5^\circ$, dann ist das berechtigt und zielgerecht.

4) Beim Bewegungsmechanismus der Planparallelplatten kann kein Spiel auftreten, und jedes Spiel der Lager muß vermieden werden.

Wenn man die genannten Merkmale berücksichtigt, ergibt sich aus dem Meßbereich $50 \mu\text{m}$, und $\gamma_{\text{max}} = 5^\circ$, die minimale Dicke, der Brechungsindex wurde für $n = 1,51$ gewählt.

$$d = \frac{v}{\gamma_{\text{max}}} \cdot \frac{n}{n-1} = 1,69 \text{ mm} \quad (8)$$

Wenn man ein dickeres Glas wählt, wird der benötigte Drehwinkel kleiner, und die Linearität nimmt zu, Man wähle willkürlich ein $d = 5 \text{ mm}$ dickes Glas. Die axiale Bewegung der planparallelen Platte kann am besten mit kegelförmigen Lagerungen, ohne Spiel gesichert werden, wie es Abb. 8 zeigt.

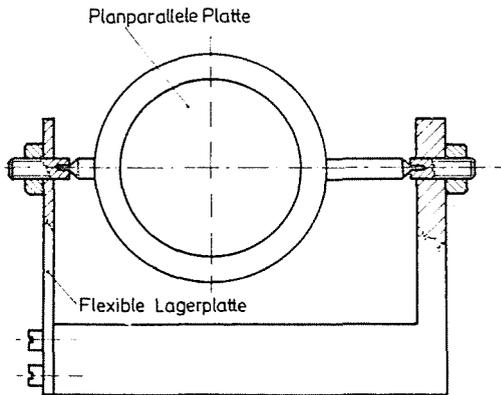


Abb. 8

Zur Betätigung bieten sich drei Methoden: die einfachste mit Stirnrad, eine mit Schnecke und Schneckenrad, und eine mit Schraubengewinde.

Da bei allen drei Methoden die Spielfreiheit ein wichtiges Kriterium ist, ist die Realisierbarkeit von großer Bedeutung.

Damit ist es zu erklären, daß der Bedienbarkeit wegen einfachste Stirnradmethode nicht verwendet wurde. Der Schneckenantrieb und die Gewindenbetätigung sind von der Bedienung her gleichwertig. Ein spielloser Gewindenantrieb kann aber leichter hergestellt werden, geschweige von dem Genauigkeitsansprüchen. Bei der Gewindenbetätigung liegt ein Nachteil vor, — wie es auf Abb. 9/c zu sehen ist — die Nichtlinearität, die bei der Verwendung des Sinus—Hebels entsteht. Bei kleinen Bewegungswinkeln sind aber diese Fehler so klein, daß die Nichtlinearität vernachlässigt werden kann.

Die, bei den Erwägungen erwähnte Auflösung ($\pm 1 \mu\text{m}$) erreichen wir am einfachsten dann, wenn wir als Bewegungsglied einen kommerziellen Mikro-

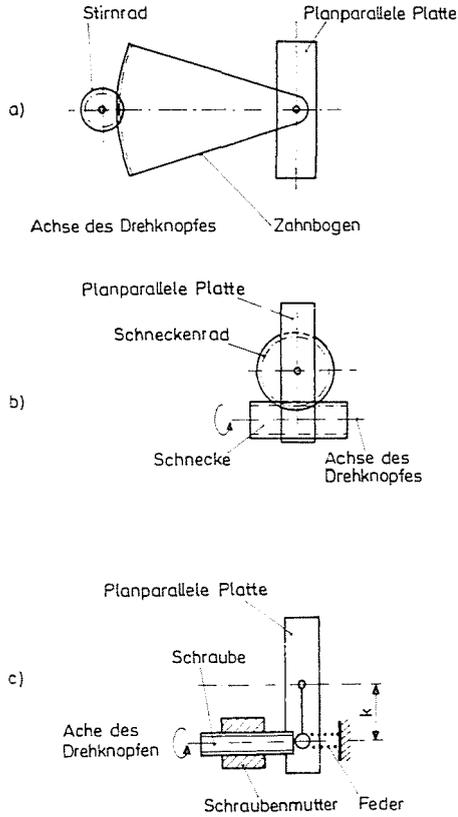


Abb. 9

meter verwenden, und die Hebellänge k so gewählt wird, daß eine Mikrometerunterteilung genau $1\ \mu\text{m}$ Bildbewegung produziert. Die Gewindesteigung des Mikrometers ist $h=0,5\ \text{mm}$. Anhand der Abbildungen und der Gleichung (8) kann Gleichung (9) aufgestellt werden,

$$k = \frac{h}{\sin \alpha} = 16,95 \quad (9)$$

Wenn der Hebel $k=16,95\ \text{mm}$ lang gefertigt wird, so entspricht auf der Meßtrommel einer Skalenteilung eine Bildverschiebung von $1\ \mu\text{m}$.

Der verwendete Sinus—Hebel arbeitet naturgemäß mit einem Fehler, der

$$h = \frac{k \cdot \gamma^3}{6} = \frac{16,95 \cdot 0,029^3}{6} = 0,06\ \mu\text{m} \quad (10)$$

beträgt. So ein kleiner Fehler kann aber vernachlässigt werden. Aus den Zusammennängen folgt, daß bei Erhöhung des Drehwinkels der Fehler mit der

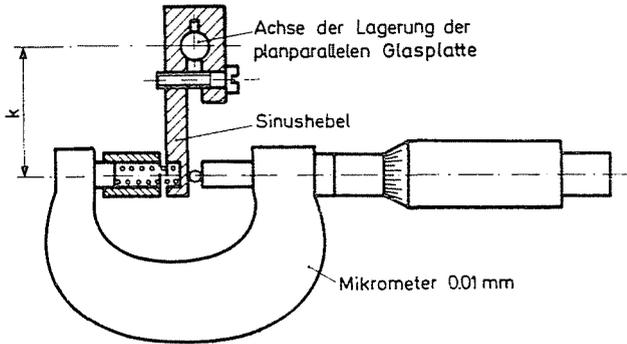


Abb. 10

ritten Potenz steigt, und somit rascher steigt, als der Linearitätsfehler, der bei der Bewegung der planparallelen Platte entsteht vgl. Gl. (8, 9 und 10). Laut den gezeigten Zusammenhängen ist es offensichtlich, daß man vom Gerät zwei Stücke braucht damit das Bild in der Ebene in Richtung x und y bewegt werden kann. Die beiden, im Strahlengang hintereinander angeordneten optischen Mikrometer haben eine senkrechte Drehachse.

Die Einrichtung zur Feinpositionierung

Ihre Gestaltung ist neuartig. Das Meßprinzip und die erforderliche Meßgenauigkeit brauchen eine Einrichtung zur Positionierung und Befestigung, die die Einstellung mit einer Auflösung von $1\ \mu\text{m}$ ermöglicht. Herkömmlicherweise wird das Problem, — in der Literatur, durch Bewegung mit 2 Freiheitsgraden, in senkrechter (y) und waagerechter (x) Richtung, gelöst. Im gegebenen Fall ist der Anspruch auf die mechanische Stabilität groß. Der gemessene Gegenstand muß — wegen seiner Zylinderform — mit prismatischen Elementen unterstützt werden. In den Versuchen hat die Bewegungslänge in keiner Richtung $1\ \text{mm}$ überschritten. Zur Lösung der Positionierungsaufgabe ergab sich ein gabelförmiger Feinpositionierer. Zwei, von den oben genannten Bedingungen stimmten für diese Konstruktion zu:

— die Bewegungslänge wird nicht am Positionierungslied abgelesen, da das Werkstück in $x - y$ Richtung so eingestellt werden muß, daß im Sehfeld der Meßzylinder und das Fadenkreuz des Okulars in Deckung kommen.

— die Unterstützung soll mit einem prismatischen Element erfolgen.

Abb. 11 zeigt das verwirklichte Gerät. An den oberen Enden der Balken quadratischen Querschnitts, die in x Form geordnet, und ohne Spiel gelagert sind, (1) (Teflon-Gleitlager) befinden sich 2 gehärtete und geschliffene Zylinder. Am unteren Ende der Balken wird die Bewegung über Lagerkugeln (4) durch Mikrometer eingepreßt (5). Aus der Geometrie ergeben sich die „Ausgangsbe-

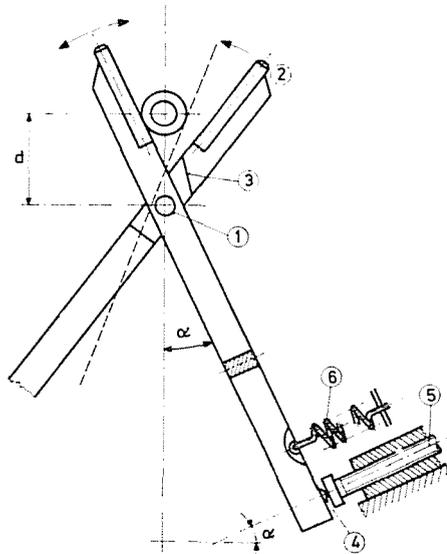


Abb. 11

wegungen" am prismatischen Oberteil. Das Verhältnis ist nicht linear, aber man braucht die Größe der Eingangsbewegung nicht unbedingt kennen. Die gleichzeitige und gleich große Verstellung der beiden Mikrometer bedeutet ein Heben oder Senken entlang der senkrechten Achse. Das gleichzeitige und gleich große Ein-, und Ausdrehen bewirkt eine Bewegung entlang eines Kreises mit einem Radius „d“. Die Abweichung von der waagerechten Achse kann durch die Engerstellung der Balken korrigiert werden. Die Stabilität wird durch die Schraubgewinde der Mikrometer gesichert, da ein Teil des Gewichtes des Meßstückes die Berührung zwischen Gewinde und Kugel sichert. Die Druckkraft wird auch durch die Feder (6) gesteigert.

Um das Einklemmen zu vermeiden schliessen die Balken in der Grundposition einen Winkel von 90° ein, und die charakteristischen Bewegungen können bereits bei kleinen $\Delta\alpha$ Winkelveränderungen hergestellt werden. Die Zusammenhänge für die Bewegung entlang der senkrechten Achse sind am einfachsten zu bestimmen:

Wenn man annimmt, daß die Bewegungen der beiden Mikrometer gleich groß sind, und α_1 der Ausgangswinkel, und α_2 der nach dem Heben meßbare Halbwinkel ist, gilt

$$d + e = \frac{r}{\sin \alpha_2} \quad \text{und} \quad d = \frac{r}{\sin \alpha_1} \quad (11)$$

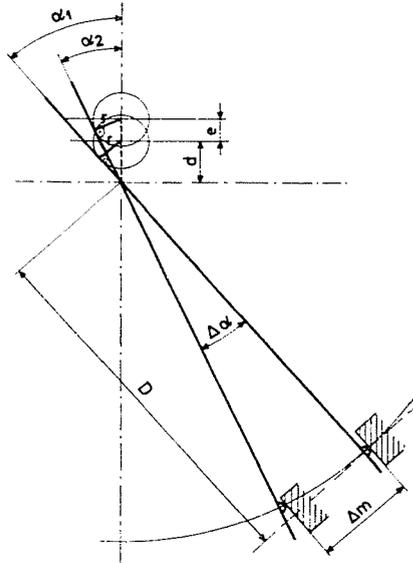


Abb. 12

und

$$e = r \left(\frac{1}{\sin \alpha_2} - \frac{1}{\sin \alpha_1} \right) = \frac{r(\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2)}{\sin \alpha_1 \sin \alpha_2} \quad (12)$$

Man sieht daß $\alpha_1 - \alpha_2 = \Delta\alpha$ ist, und daß diese Winkelveränderung durch eine Bewegung Δm der Mikrometerschraube bewirkt wird:

$$\frac{\Delta m}{D} = \operatorname{tg} \alpha \quad (13)$$

Da die Winkelveränderungen kleiner sind als 8° , gilt:

$$\frac{\Delta m}{D} \simeq \Delta\alpha \quad (14)$$

Wenn man die Gleichung (12) zielgemäß umformt bekommt man:

$$e = \frac{2r \cos \left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \right) \sin \left(\frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2} \right)}{\sin \alpha_1 \sin \alpha_2} \quad (15)$$

Wird nun beachtet, daß

$\alpha_1 - \alpha_2 = \Delta\alpha < 8^\circ$ bleibt, so erhält man in guter Näherung

$$\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \simeq \alpha$$

Mit dem obigen Zusammenhang und mit der Gleichung (14) hat man für die Ausgauggröße e den folgenden Zusammenhang:

$$e = \frac{2r \cos \alpha \cdot \frac{\Delta \alpha}{2}}{\sin^2 \alpha} = \frac{r}{D} \frac{\cos \alpha}{1 - \cos^2 \alpha} \cdot \Delta m_1.$$

Mit den Konstruktionsparametern ($\alpha = 45^\circ$, $\bar{r} = 12,5$ mm, $D = 200$ mm) beträgt die kleinste senkrechte Bewegung beim Drehen des Mikrometers um $10 \mu\text{m}$ etwa $0,88 \mu\text{m}$. Den Erfahrungen nach war diese Auflösung ausreichend.

Technische Daten:

Nahpunkt: 800 mm

Winkelvergrößerung 30...50

Mittlerer Richtungsfehler $0,5''$

Meßunsicherheit

bei 900 mm Entfernung $\pm 1 \mu\text{m}$

1900 mm Entfernung $\pm 5 \mu\text{m}$

Zusammenfassung

Es wurde ein optisches Abtastgerät entwickelt, das zur Gerademessung von inneren Zylinderoberflächen — mit großem l/d Verhältnis — geeignet ist. Das Gerät ist geeignet bei einer Länge von 1000 mm eine Mindestauflösung der Gestaltfehler von $\pm 5 \mu\text{m}$ zu messen.

Literatur

1. HODAM F.: Optik in der Längenmeßtechnik, VEB Verlag Technik, Berlin, 1961.
2. Fluchtungs- und Richtungsmeßgerät; Gebrauchsanleitung, Carl Zeiss, Jena
3. LEWIN, B. M., VOLKOVÁ T. A.: Universalnaia optitscheskaia cseszkaja struna, OMA 1978. N° 11
4. OLTAY, K.: Geodézia. Tankönyvkiadó, Budapest, 1951.
5. DEUMLICH: Instrumentenkunde oder Vermessungstechnik VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 1972
6. Automatische Meß- und Richtmaschine für Hohlkörper und Hohlwellen. Hecker—Koch Maschinen- und Anlagenbau GMBH

Prof. Dr. Zoltán TURI	}	H-1521 Budapest
Dr. György ÁBRAHÁM		
Dr. Attila HALMAI		
Dr. Antal HUBA		
Dr. Klára WENCZEL		