

Autorenfortdruck aus der Zeitschrift

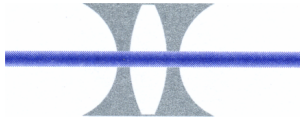
F & M

Feinwerktechnik
Mikrotechnik
Messtechnik

Zeitschrift für Elektronik, Optik und Mikrosystemtechnik

104. Jahrgang 1996

Carl Hanser Verlag, München



Engelbert Hofbauer,
München;

Klaus Röttger,
Rudolf Kellner, Wasserburg

Kurzer Prozeß mit Ebenheit

Ebenheitsmessung an Polier-Trägerplatten in der Silizium-Waferfertigung

Die Halbleiterindustrie benötigt Siliziumwafer mit sehr hohen Anforderungen an Ebenheit und Gleichförmigkeit der Oberfläche. Um diese Parameter einzuhalten und zu optimieren, ist es erforderlich, die Ebenheit der maßgeblich bei der Bearbeitung einflußnehmenden Maschinenelemente zu kennen. Die Vermessung kann auf einfache und präzise Art mit einem elektronischen Autokollimator in Verbindung mit einem signalverarbeitenden portablen PC erfolgen.

All on an even keel. *Evenness measurement on polished support plates in silicon wafer production. The semiconductor industry requires silicon wafers complying with stringent evenness and surface uniformity requirements. To permit these parameters to be fulfilled and further optimized, reliable information regarding the evenness of machine elements playing a crucial role in the production process is essential. Simple, precise gauging is possible using an electronic autocollimator in conjunction with a signal-processing portable PC.*

Für eine effiziente Herstellung von integrierten Schaltkreisen für VLSI- und ULSI-Technologie sind Dickenvariationen von kleiner $1\ \mu\text{m}$ sowie Rauigkeiten im Angström-Bereich bei Si-Wafern eine wichtige Voraussetzung. Dabei definiert der Polierprozeß als letzter Schritt der Waferherstellung die Geometrie und Morphologie der Oberfläche. Stand der Technik zur Herstellung sehr ebener und glatter Si-Oberflächen ist ein chemomechanischer Polierprozeß, der einen mechanischen Abtrag auf einem rotierenden Poliertuch mit der chemischen Aktivität eines alkalischen Poliermittels verbindet (Bild 1).

Dabei sind die nur wenige Zehntel Millimeter dicken Wafer - im vorliegenden Fall 8"-Scheiben - auf einer speziellen Trägerplatte aus Keramik aufgeklippt, die ihre Geometrie unter anderem quasi 1:1 auf den zu bearbeitenden Wafer überträgt. Um alle Prozeßparameter zu kennen und Abweichungen analysieren zu können, ist es deshalb erforderlich, den Polierteller und alle im Einsatz befindlichen Trägerplatten zu vermessen und jeweils eine für den Polierprozeß geeignete Oberfläche einzustellen.

Zur Geradheits- und Ebenheitsmessung eignet sich besonders ein optischmechanisches Meßverfahren. Dieses ermöglicht es generell, großflächige Maschinenteile mit Abmessungen von etwa 0,5 m bis über 20 m mit hoher Auflösung und Reproduzierbarkeit ($\pm 0,25\ \mu\text{m/m}$ bis $\pm 0,025\ \mu\text{m/m}$) zu vermessen.

Eine Herausforderung ist hierbei, die vorliegenden Polier-Trägerplatten mit einem Durchmesser von 640 mm in kurzer Zeit und in geeigneter Weise zu prüfen, um Klarheit über die Zusammenhänge mit der Waferqualität zu bekommen. Gesucht war ein einfaches und für die Praxis an der Maschine geeignetes Verfahren, welches bei erforderlicher Genauigkeit eine rasche Meßwertfassung, eine übersichtliche grafische Auswertung der Ergebnisse und eine Analyse der Bearbeitungsparameter erlaubt.

Gesteigerte Auflösung durch Sub-Pixelverfahren

Voranalysen und -untersuchungen haben gezeigt, daß der elektronische Autokollimator >Elcomat 1< von Möller-Wedel - im weiteren als Elcomat bezeichnet - in Verbindung mit einem Meßspiegel (Bild 2) diese Meßaufgabe bei niedrigen Investitionskosten und geringem Personaleinsatz lösen kann.

Das Kernstück des Meßverfahrens ist ein hochauflösendes Winkelmeßsystem, das nach dem Autokollimationsprinzip arbeitet. Dabei wird eine Strichmarke über ein optisches System ins „quasi“-Unendliche abgebildet und das „quasi“-parallele Strahlenbündel über den Meß-/Basisspiegel (Bild 2) wieder in den Elcomat zurückreflektiert. In der Brennebene wird das scharfe Bild der Strichmarke auf eine CCD-Zeilenkamera abgebildet und in geeigneter Weise ausgewertet. In [1, 2] sind Methoden beschrieben, um die reguläre Ortsauflösung - gegeben durch den Pixelabstand der CCD-Zeile von $10\ \mu\text{m}$ - mit Hilfe von optisch-elektronischen sowie mathematisch-elektronischen Verfahren um einen Faktor von größer 200 zu steigern. Dies bedeutet auch gegenüber herkömmlichen, visuellen Autokollimationsfernrohren eine Steigerung der Auflösung von etwa einer Winkelsekunde auf 0,005 Winkelsekunden (entspricht $0,025\ \mu\text{m}$ pro Meter).

Der Vorteil bei diesem Meßprinzip ist, daß durch den „parallelen“ Strahlengang die Geräte- oder Systemgenauigkeit unabhängig vom Abstand Meßspiegel und Elcomat ist.

Die Gesamtlänge einer Meßbahn L kann beim Elcomat bis zu 25 Metern betragen - dann jedoch mit eingeschränktem Meßbereich.

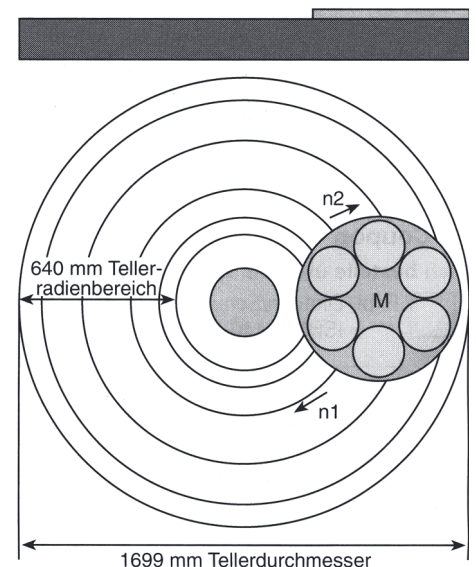


Bild 1. Schematische Darstellung von Polierteller und Trägerplatte bei einer Einseitenpoliermaschine. n_1 : Drehrichtung des Poliertellers; n_2 : Drehrichtung der Trägerplatte mit sechs aufgeklebten 8"-Wafern

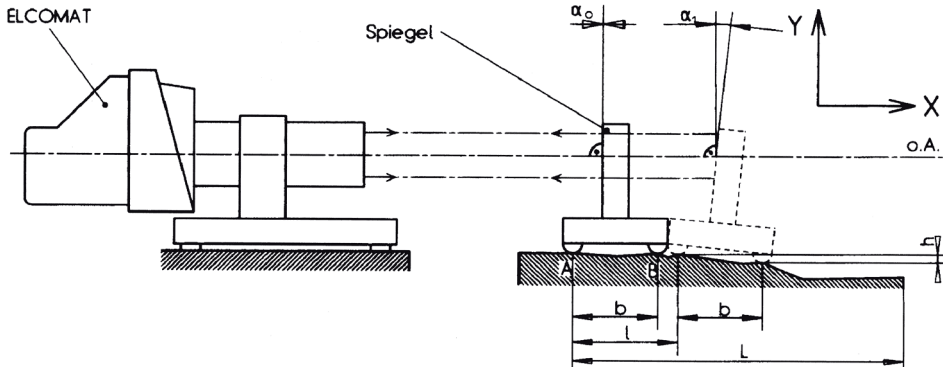


Bild 2. Schematische Darstellung der Geradheitsmessung für hohe Auflösung und große Meßstrecken nach der Neigungsmethode
Quelle: Möller-Wedel

Ein seitlicher Parallelversatz des Meßspiegels hat keinen Einfluß auf das Meßergebnis, sofern noch genügend Lichtenergie in den Elcomat zurückreflektiert wird und die Qualität des Spiegels in seiner Ebenheit ausreichend gut ist.

Neigungsmethode - die optische Achse als Referenzgerade

Bei der sogenannten Neigungsmethode werden Geradheitsabweichungen - in der Regel von Maschinenteilen - indirekt über die Messung von Neigungswinkeln bestimmt. Dabei wird ein Basisspiegel mit den Basispunkten A und B und dem Basisabstand b schrittweise über die zu messende Oberfläche verschoben.

Für quantitative Aussagen beträgt die Verschiebung des Spiegels l den Basisabstand b ($l = b$). Die Neigungswinkel α_i gegenüber der Orthogonalen zur optischen Achse (o.A.) werden gemessen und entsprechend Gleichung (1) die Höhenwerte h_i ermittelt. Die Summation der einzelnen h_i ergeben dann die Meßwerte für y entlang der Meßachse x gegenüber der Referenzgeraden (optische Achse). Für eine einzelne Geradheitsmessung, die sich nicht auf eine andere Geradheitsmessung bezieht, - wie bei Messung der Parallelität oder Rechtwinkligkeit - wird anschließend eine Bezugsgerade durch Anfangs- und Endpunkt gelegt, die Geradheitsabweichungen umrechnet und grafisch darstellt [3].

$$h_i = b \cdot \tan \alpha_i \quad (1)$$

wobei für kleine Winkel gilt:

$$h_i = b \cdot \alpha_i \quad (2)$$

mit α_i in Bogenmaß.

Wird eine Basislänge b wie im vorliegenden Fall mit 50 mm verwendet, so ergibt sich die Umrechnung wie folgt:

$$h_i = 0.25 \cdot \alpha_i \quad [\mu\text{m}] \quad (3)$$

mit α_i in Winkelsekunden.

Gegenüber rein optischen Meßverfahren, bei denen eine optisch reflektierende Oberfläche notwendig ist, können mit dieser Methode auch technische Oberflächen mit Rauigkeitwerten (R_a) im μm -Bereich und weit größer gemessen werden. Die Oberfläche der Basispunkte (A, B) ist in ihrer Beschaffenheit und

Krümmungsradius dabei so gewählt, daß Rauigkeitseinflüsse der zu messenden Oberfläche keinen Einfluß haben und nur Formabweichungen bestimmt werden.

Ebenheitsmessung einer Trägerplatte

In Bild 3a ist das Ergebnis der Ebenheitsmessung einer Trägerplatte gezeigt. Dabei werden acht einzelne Geradheitsmessungen mit jeweils 10 beziehungsweise 15 Meßwerten nach dem sogenannten Union-Jack-Schema durchgeführt (Bild 3b). Mit Hilfe mathematischer Verknüpfungen der Meßlinien 1 bis 6 wird über die Software eine Referenzebene ermittelt und die Istabweichung dazu errechnet [4]. Der maximale von dieser Referenzebene abweichende Meßwert ergibt die Ebenheitsabweichung in Mikrometer. Bei der vorliegenden Trägerplatte ergibt sich eine Abweichung von $1,9 \mu\text{m}$ im Bereich des vermessenen Quadrats mit einer Diagonalen von 640mm. Die in der Grafik zusätzlich angegebenen Werte der Mittelpunktabweichungen ML7 und ML8 sind ein Maß für die zufällige Meßunsicherheit, die in unserem Fall demnach weniger als $0,1 \mu\text{m}$ beträgt. Sie sollte in jedem Fall unter der erforderlichen Meßgenauigkeit liegen.

Die obige Ebenheitsabweichung zeigt außerdem eine deutlich konvexe Form des Prüflings; die Trägerplatte zeigt also ein >volles< Oberflächenprofil. Der Krümmungsradius beträgt im Mittel etwa 22,5 km.

Die Winkelmeßdaten des Elcomat werden über die RS232-Schnittstelle einem beliebigen Computer zugeführt. Die Meßsoftware >PC-Geradheit< oder >PC-Ebenheit< errechnet innerhalb von Sekundenbruchteilen die Höhenwerte, bestimmt die Geradheits- oder Ebenheitsabweichung und erstellt die Grafik.

Die acht Geradheitsmessungen an sich (manuelle Verschiebung des Meßspiegels, Ausrichten von Meßspiegel und Führungslinie von jeder Meßlinie) bedeuten gegenüber der Datenaufnahme und -Verarbeitung im PC einen vergleichsweise hohen Zeitaufwand von 10 bis 20 Minuten. Deshalb ist das Ziel, die Anzahl der Geradheitsmessungen möglichst auf die Hälfte oder noch mehr zu reduzieren.

Wie die Ergebnisse der Geradheits- und Ebenheitsmessungen an mehreren Trägerplatten ergaben, weisen die Oberflächen der Prüflinge in ihrer globalen und lokalen Formab-

weichung eine rotationssymmetrische Eigenschaft auf.

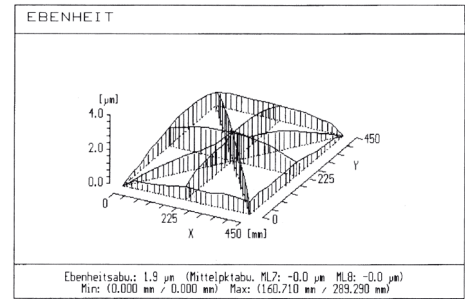


Bild 3a. 3D-Darstellung der Ebenheit einer Trägerplatte gemessen nach dem Union-Jack-Verfahren. Die maximale Abweichung von der idealen Ebene beträgt $1,9 \mu\text{m}$

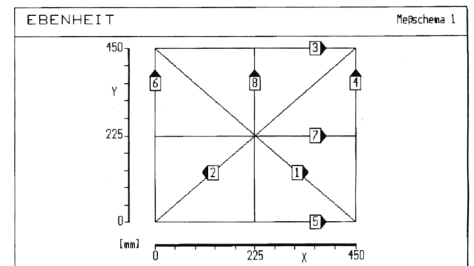


Bild 3b. Schema des Union-Jack-Verfahrens für die Ebenheitsmessung

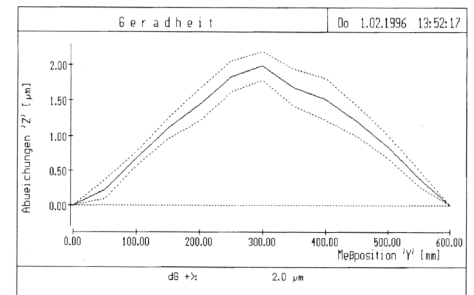


Bild 4. Profilverlauf der Polierträgerplatte aus Bild 3a in einem Schnitt, inklusive Wiederholbarkeitsgrenzen

Die Unterschiede der Formabweichung in verschiedenen radialen Schnitten liegen bei maximal $0,4 \mu\text{m}$. Verwindungen der Oberfläche konnten nicht festgestellt werden.

Erreichbare Genauigkeit und Reproduzierbarkeit

Um zu untersuchen, wie verlässlich diese Ergebnisse sind und welche Wiederholgenauigkeit erreicht werden kann, wurden Mehrfachmessungen an einer Trägerplatte durchgeführt und die empirische Wiederholstandardabweichung s ermittelt. Bild 4 zeigt das Ergebnis einer zehnfachen Wiederholmessung an der Trägerplatte aus Bild 3. Dabei ist die Kurve der Mittelwerte sowie die untere und obere Vertrauensgrenze ($\pm 2s$) erkennbar. Die empirische Standardabweichung beträgt bei der vorliegenden Meßreihe $s = \pm 0,15 \mu\text{m}$. Es ergibt sich damit eine maximale Streubreite beziehungsweise Wiederholgenauigkeit von $2s = \pm 0,3 \mu\text{m}$ bei einer Meßposition $x = 400 \text{ mm}$. Der Erwartungswert für die maximale

Geradheitsabweichung liegt also innerhalb dieses Bereiches bei einer Einzelmessung. Aufgrund der fehlerbehafteten Einzelmessungen ergeben sich mit fortlaufender Meßstrecke x größere Meßunsicherheiten [5]. Der Maximalwert der Unsicherheit liegt theoretisch in der Bahnmitte vor [6]. Dort ergibt sich eine maximale Unsicherheit von $U_{\text{emax}} = 0,03 \mu\text{m}$ - bei zufälligen Abweichungen des Elcomats mit $= 0,05''$ und einer Positioniergenauigkeit des Spiegels von 0,5 mm. Diese Werte sind jedoch nur unter Laborbedingungen erreichbar. Aufgrund von Temperatureinflüssen - im vorliegenden Fall vor allem durch Körperwärme des Bedieners - ergeben sich in der Praxis Luftschichtungen und Luftschlieren, die die zufällige Meßunsicherheit zusätzlich erhöhen. Die systematischen Einflüsse der maximalen Unsicherheit in der Bahnmitte liegen bei 0,08 μm und sind zunächst vernachlässigbar und zudem für Vergleichsmessungen irrelevant.

Verkürzung der Meßzeiten auf ein Viertel

Aus den vorliegenden Ergebnissen läßt sich ableiten, daß bei einer erreichten maximalen Wiederholgenauigkeit von $\pm 0,3 \mu\text{m}$ in der Bahnmitte eine Einzelmessung einer Bahn ausreichend ist. Aufgrund der rotationssymmetrischen Objekte genügt es, jeweils zwei aufeinander senkrecht stehende Geradheitsmessungen in radialer Richtung über die Trägerplatte durchzuführen, um aussagekräftige Ergebnisse über die Trägerplattengeometrie zu erhalten. Damit können die Untersuchungs- und Prüfzeiten auf ein Viertel der ursprünglichen Ebenheitsmessung reduziert werden.

Wirkung der Trägergeometrie auf die Keiligkeit

Wie bereits erwähnt, hat die Oberflächenform der Trägerplatte, auf die die Si-Wafer in direktem Kontakt aufgeklebt sind, einen unmittelbaren Einfluß auf die erreichbare Ebenheit der Si-Wafer. In Bild 5 sind drei typische Profile von Trägerplatten dargestellt, die durch Geradheitsmessung über den Durchmesser der Trägerplatte bestimmt wurden. Es zeigt sich, daß eine Trägerplatte sowohl eine konvexe als auch eine konkave Oberflächenform haben kann. Da die Si-Wafer auf der Außenseite der Trägerplatte aufgeklebt sind, ist zu erwarten, daß die Oberflächenform einen Einfluß auf die

Keiligkeit der Si-Wafer in radialer Richtung hat. Demnach wird bei einer konvexen Oberfläche der Trägerplatte die dem Plattenzentrum zugewandte Seite des Si-Wafers im Polierprozeß stärker abgetragen als die außenliegende Seite, während es sich bei einer konkaven Trägerplatte umgekehrt verhält.

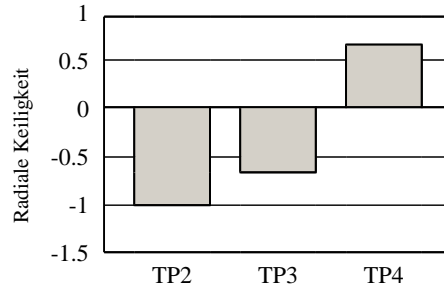


Bild 6. Keiligkeit der Si-Wafer, verursacht durch die Oberflächenform der Trägerplatte

Die Keiligkeit der Scheiben berechnet sich dann als Waferdicke an der Stelle des Trägerplattenrandes minus der Waferdicke auf der dem Trägerplattenzentrum zugewandten Seite (M in Bild 1). Eine Korrelation der Trägerplattenoberfläche mit der Keiligkeit der Si-Wafer bestätigt diesen Einfluß (Bild 6). Während die konvexe Trägerplatte 1 eine deutlich positive Keiligkeit der Si-Wafer zeigt, sind die auf der konkaven Trägerplatte 2 polierten Si-Wafer im Mittel negativ keilig. Die Trägerplatte 3 mit einem welligen Profil zeigt einen dazwischenliegenden Keiligkeitswert. Die Absolutwerte der Keiligkeit sind hierbei noch durch Einflüsse von Kinematik und Druck beeinflusst.

Fazit

Die Meßanordnung mit Elcomat 1 und Meßspiegel erlaubt unter den vorgegebenen Wiederholbedingungen eine quantitative Bestimmung der Oberflächengeometrie von Polierträgerplatten mit Durchmesser 640 mm mit einer Wiederholstandardabweichung von $\pm 0,15 \mu\text{m}$. Die ursprünglich acht notwendigen Geradheitsmessungen zur Bestimmung der Ebenheit konnten auf insgesamt zwei Messungen reduziert und die Meß- und Auswertzeit um 75 Prozent auf insgesamt etwa 3 bis 5 Minuten pro Trägerplatte gekürzt werden.

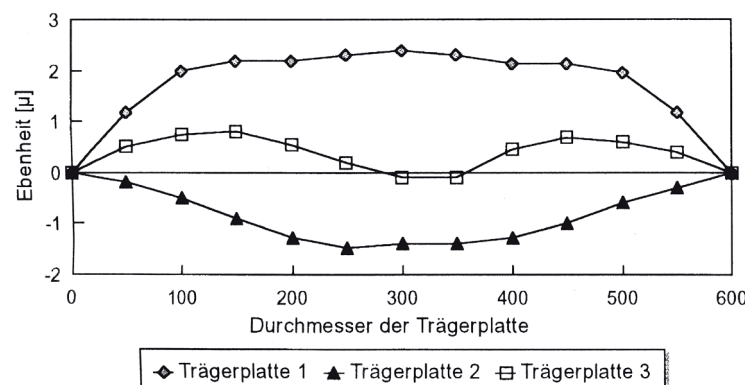


Bild 5. Charakteristische Profile dreier verschiedener Trägerplatten mit konvexer, konkaver und nahezu ebener Form

Die Autoren dieses Beitrags

Dipl.-Ing. (FH) Engelbert Hofbauer, Jahrgang 1961, studierte Feinwerktechnik an der FH München, von 1985 bis 1990 war er als Entwicklungsingenieur im Optik-Labor der Optischen Werke G. Rodenstock im Bereich optische Meß- und Justagetechnologie sowie Scanner- und Laserdiodenoptik tätig. Ab 1990 arbeitete er als Freier Mitarbeiter bei verschiedenen Firmen im Bereich Lasermeßtechnik und optische Meß- und Prüftechnik. Seit 1994 leitet er ein Vertriebs- und Ingenieurbüro mit Gebietsvertretung der Firma Möller-Wedel, Wedel bei Hamburg, und einem angegliederten Meß- und Prüflabor für die Vermessung und Kalibrierung von optischen Bauteilen, Winkel sowie Geradheit, Ebenheit und Drehposition im Maschinenbau. Er ist Lehrbeauftragter an der FH München und gibt Schulungen und Workshops.

Dr. Klaus Röttger, Jahrgang 1964, studierte Physik an der Universität Tübingen. Während der Diplomarbeit an der Universität Marseille beschäftigte er sich mit nichtlinearer Optik in Dünnschichtwellenleitern. Von 1990 bis 1994 promovierte er am Kristalle-graphischen Institut der Universität Tübingen und entwickelte unter anderem ein neuartiges Guinierdiffraktometer zur Untersuchung von Kristallstrukturen. Seit 1994 arbeitet er in der Prozeßentwicklung Polieren bei der Firma Wacker Siltronic AG in Wasserburg. Hauptaufgabe ist die Entwicklung neuer Herstellungsverfahren für extrem reine und planare Wafer, die die Anforderungen der Submikron-Technologie erfüllen.

Rudolf Kellner, Jahrgang 1968, studierte an der FH Landshut den Studiengang Maschinenbau. Derzeit schreibt er bei der Firma Wacker Siltronic AG seine Diplomarbeit mit dem Thema Entwicklung eines Meßverfahrens mittels Autokollimator für rotationssymmetrische Flächen

Literatur

- 1 Duis Wilhelm: >Höchstpräzise Winkelmessung mit Hilfe der Autokollimation<, Jahrbuch für Optik und Feinmechanik, 1990
- 2 Ulbrich G.-J., Duis, W, Trede J.: >Die Winkelmeßgenauigkeit steigern<, Industrie-Anzeiger 75/1989
- 3 GFM Gesellschaft für Meßtechnik GmbH, Bedienungsanleitung Geradheit PC GER, Version 3/11-92
- 4 GFM Gesellschaft für Meßtechnik GmbH, Bedienungsanleitung Ebenheit PC EBE, Version 2/10-92
- 5 Dr.-Ing. J. Kanta: >Einsatzmöglichkeiten von Richtungs- und Fluchtungsprüfgeräten für die Formprüfung<, Feingerätetechnik 19. Jg. Heft 12/1970
- 6 Prof. Dr.-Ing. habil W. Lotze: Bemerkung zum Aufsatz Kanta: >Einsatzmöglichkeiten von Richtungs- und Fluchtungsprüfgeräten für die Formprüfung<, Feingerätetechnik 20. Jg. Heft 4/1971