

**7. Mikroskopische Bestimmung der Lage
einer spiegelnden Fläche. Optischer Kontakt;
von K. Prytz.**

Bei vielen physikalischen Arbeiten liegt die Aufgabe vor, die gegenseitige Lage zweier spiegelnden Flächen oder die Änderung der Lage einer einzelnen Fläche zu bestimmen. Von besonderer Bedeutung sind die beiden Fälle: bei einer Druckmessung die Höhendifferenz zweier Quecksilberflächen und bei der Messung von Dimensionen eines geschliffenen Körpers die Distanz zwischen zwei geschliffenen Flächen zu bestimmen.

Hat man mit der Einstellung auf eine Quecksilberoberfläche zu tun, ist man gewöhnlich auf das horizontale Visieren mit dem Fernrohr hingewiesen, während die Lage einer festen Fläche gewöhnlich dadurch bestimmt wird, daß man mechanischen Kontakt zwischen der Fläche und dem Ende einer Meßschraube hervorbringt.

Die Genauigkeit der Einstellung mittels des Fernrohres wird begrenzt teils dadurch, daß man einen ziemlich großen Abstand zwischen dem Fernrohr und der Quecksilberoberfläche haben muß, teils dadurch, daß gewöhnlich zwischen den beiden eine gebogene Glaswand vorhanden ist, deren Lichtbrechung nur schwierig sicher kontrolliert werden kann.

Bei der mechanischen Kontakteinstellung auf eine feste Fläche muß immer ein gewisser Druck, um die Berührung zu konstatieren, ausgeübt werden; die hierdurch veranlaßten Biegungen und Zusammendrückungen entziehen sich auch leicht der Kontrolle.

Für die Fälle, wo die genannten Schwierigkeiten sich geltend machen, habe ich die Methoden, über welche man schon disponiert, dadurch zu supplieren versucht, daß ich das Mikroskop zum Einstellen auf eine spiegelnde Fläche so verwende, daß die Achse des Mikroskops gegen die Fläche gerichtet ist. Natürlich kann dies ohne weiteres geschehen, wenn ein mikroskopisches Objekt auf der Fläche angebracht ist, und wenn man diesem Objekt die nötige Beleuchtung geben

kann. Stellt man auf scharfes Sehen des Objektes ein, ist der Abstand letzteren und damit auch der der Fläche mit einer gewissen Genauigkeit bestimmt. Da aber dieses Verfahren keine allgemeine Verwendung finden kann, habe ich es so eingerichtet, daß das Mikroskop selber das nötige Objekt in der Form eines vom Objektiv erzeugten reellen Bildes einer im Mikroskope angebrachten Lichtquelle liefert. Wenn dieses Bild in die spiegelnde Fläche fällt, hat man das, was ich *optischen Kontakt* zwischen Mikroskop und Fläche nenne. Die letztere wird ein mit dem Objektivbild zusammenfallendes Spiegelbild, welches sein Licht hinauf gegen das Mikroskop sendet, erzeugen; es ist folglich so, als ob sich ein Objekt in der Spiegelfläche befände.

Das Mikroskop wird zu diesem Zwecke so ausgerüstet (Fig. 1): In der Höhe des Fokalplans des positiven Okulars wird ein Seitenrohr angebracht, in welches ein konischer Glasstab einer klaren Glassorte, der *Lichtleiter s*, hineingeführt wird. Das innere Ende des Stabes ist kurz gebogen und nach einem mit der Achse des Stabes parallelen Plan geschliffen; in der so dargestellten, gegen das Objektiv gewandten, kleinen Fläche sind zwei feine Striche, welche um $\frac{1}{40}$ mm voneinander abstehen, eingeritzt. Nachdem der ganze Stab mit Ausnahme seiner breiten Endfläche versilbert worden ist, habe ich das Silber von der schmalen Endfläche abgeschliffen, doch so, daß das in den Strichen sitzende Silber dort verblieb, wodurch diese beim Gebrauche dunkel auf hellem Grunde erscheinen.

Durch die äußere Endfläche wird Licht hineingesandt. Dieses Licht wird nach wiederholten Reflexionen die innere Endfläche erreichen; davon hinaustretend geht es weiter nach dem Objektiv hinab. Diese Fläche σ wird somit die Lichtquelle des Mikroskopes, wovon das Objektiv das reelle, verkleinerte Bild σ' erzeugt. Durch das Okular sieht man vorläufig nichts, wenn man von dem durch die Linsenflächen des Objektivs reflektierten schwachen Lichte absieht.

Das Okular wird auf scharfes Sehen des Randes der Lichtquelle σ oder eines im Plan der letzteren ausgespannten Fadenkreuzes eingestellt. Führt man das Mikroskop so weit gegen eine spiegelnde Fläche hinab, daß das Bild σ' darin fällt, wird das vom Spiegel gegen das Objektiv reflektierte

Licht durch die Brechung im Objektiv wieder in der Lichtquelle σ gesammelt; dies ist eine Folge des Umstandes, daß Bild und Gegenstand sich vertauschen lassen. Auch in diesem Falle sieht man nichts durch das Okular; das Dunkelwerden im Mikroskop gibt also an, daß optischer Kontakt vorhanden ist. Wird das Mikroskop ein wenig hinauf oder hinab gegen den Spiegel verstellt, erscheint ein Leuchten rings um den nach oben dunkeln Lichtleiter; vom Bild sieht man aber nichts.

Schon das Dunkelwerden im Mikroskop ist ein einigermaßen brauchbares Mittel zur Herstellung des optischen Kon-

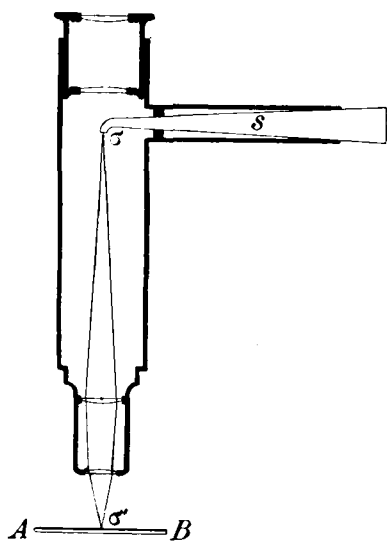


Fig. 1.

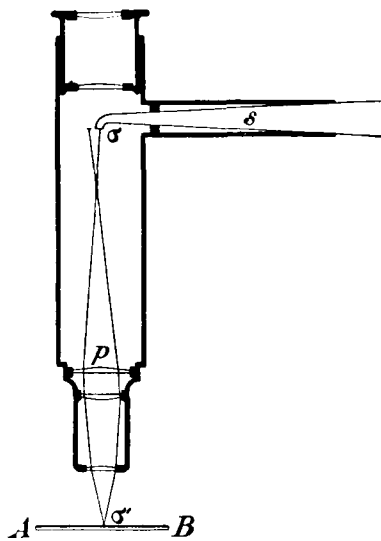


Fig. 2.

taktes; ich begnügte mich jedoch damit nicht, ich wünschte das Bild der Lichtquelle selbst zu sehen. Um dies zu erreichen befestigte ich dicht über dem Objektiv ein kleines Doppelprisma p (Fig. 2), welches so hergestellt worden ist, daß man die eine Seite einer zirkulären Glasplatte flach dachförmig mit einem Rückenwinkel von $179^{\circ} 36'$ geschliffen hat. Jede Hälfte bildet somit ein Prisma mit dem brechenden Winkel $12'$. Das Anbringen des Prismas wird zur Folge haben, daß das Objektiv zwei einander sehr nahe liegende Bilder auf der Spiegelfläche

erzeugt. Der Umstand, daß das Licht, welches durch das eine Prisma hinab gegangen ist, nach der Reflexion durch das andere hinauf geht, hat zur Folge, daß auch oben unter dem Okulare zwei Bilder erzeugt werden, welche auf den beiden Seiten der Lichtquelle liegen. Sie werden daher beide sichtbar

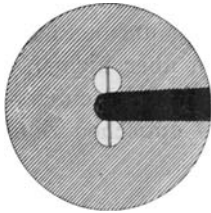


Fig. 3.

durch das Okular, wenn nicht, wie es der Fall in Fig. 2 ist, die beiden Prismenkanten senkrecht auf der Achse des Lichtleiters ist, in welchem Falle letztere das eine der beiden Bilder verdeckt. Fig. 3 gibt die Ansicht des Gesichtsfeldes, wenn die genannten Kanten parallel dem Lichtleiter sind. Daß die beiden Bilder die ganze Lichtmenge teilen müssen, schadet nichts,

da man, wenigstens wenn man mit einem Metallspiegel zu tun hat, reichliches Licht hat.

Sofern die brechenden Kanten des Doppelprisma senkrecht auf den in der Lichtquelle eingeritzten Strichen sind, erscheinen letztere mit erwünschter Schärfe und Deutlichkeit, jedenfalls, wenn man mit Objektivvergrößerungen bis zu zwanzig Mal zu tun hat. Sind aber die brechenden Kanten den Strichen parallel, dann macht sich die Unvollkommenheit der Prismenbilder, trotz der Kleinheit des brechenden Winkels, so geltend, daß die Strichbilder unscharf werden. Es soll hier bemerkt werden, daß die Vergrößerung des Objectives ohne Einfluß auf die Größe der beiden Bilder im Gesichtsfelde ist.

Man wird das Doppelprisma durch eine achromatische Linse ersetzen können, welche nach einem Schnitte durch die Achse geteilt worden ist, und welche, nachdem man eine Schicht parallel jeder der beiden Schnittflächen weggeschliffen hat, wieder gesammelt worden ist. Hat die Linse eine Brennweite von ungefähr 8 cm, und wird $\frac{1}{3}$ mm von jeder Linsenhälfte weggeschliffen, dann wird die zusammengesetzte Linse ungefähr das Prisma äquivalieren. Wahrscheinlich wird man in dieser Weise gute Bilder in allen Fällen erhalten. Ich werde diese Anordnung gelegentlich prüfen. Übrigens wird man ein Doppelprisma mit bedeutend kleinerem berechnenden Winkel als 12' verwenden können.

Das mit Lichtleiter und Doppelprisma versehene Mikroskop

wird so verwendet, daß man seinen Abstand vom Spiegel so lange ändert, bis das Bild der beiden Striche möglichst scharf erscheint.

Es ist nicht notwendig, daß die Achse des Mikroskopes genau senkrecht auf der Spiegelfläche steht; wird es so aus der senkrechten Lage gedreht, daß die beiden vom Objektiv erzeugten Bilder in der Spiegelfläche verbleiben, dann wird die Lage der beiden Bilder unter dem Okular unverändert bleiben; nur wird etwas Licht, nämlich das, welches, vom Spiegel reflektiert, an dem Objektiv vorbeigeht, verloren. Bei der senkrechten Lage wird fast alles Licht nach der Reflexion wieder vom Objektiv aufgefangen. Es ist ebenfalls ohne Einfluß auf die Lage der Bilder, ob die spiegelnde Fläche gekrümmt oder eben ist. In dieser Verbindung mache ich darauf aufmerksam, daß die Objektivbilder sehr klein sind. Die Lichtquelle hat einen Durchmesser von ungefähr 1 mm, bei der von mir gewöhnlich verwendeten Vergrößerung um 20 mal wird jeder der beiden Objektivbilder ungefähr $\frac{1}{20}$ mm groß; der Abstand zwischen ihren Zentren wird $\frac{1}{10} - \frac{1}{20}$ mm groß; die Bilder der beiden Striche liegen nur um $\frac{1}{800}$ mm voneinander ab.

Die Genauigkeitsgrenze der Kontakteinstellung.

Das Objekt für die Einstellung des Mikroskopes ist das Spiegelbild des vom Objektiv erzeugten reellen Bildes σ' der Lichtquelle σ ; da der Abstand dieses Bildes vom Objektiv, wenn der Abstand zwischen Mikroskop und Spiegel geändert wird, die doppelte Änderung erfährt, wird die Genauigkeit der Einstellung auf dem Spiegelbild doppelt so groß, als wenn man auf ein wirkliches Objekt mit demselben Mikroskop einstellte. Um die Genauigkeitsgrenze bestimmen zu können, habe ich es so eingerichtet, daß ich die mikroskopische Einstellung mittels der ungefähr zwanzigmal genaueren Einstellung mittels Lichtinterferenzen kontrollierte. Dies wurde mittels der in Fig. 4 schematisch dargestellten Anordnung ausgeführt.

Ein Planglas P ist beiderseits spiegelnd versilbert; es wird von einem Schlitten, welcher mit Hilfe der Schraube F bewegt werden kann, getragen. Auf der einen Seite der Glasplatte P ist das Mikroskop mit Lichtleiter und Doppelprisma, auf der anderen Seite eine schwach gekrümmte Linse, welche mit der Glasplatte zusammen Newtonsche

Interferenzringe bildet, angebracht. Mikroskop und Linse sind beide an der Unterlage des Schlittens befestigt.

Die Linse ist auf der gegen P gewandten Seite durchsichtig versilbert, ebenso das schräg gestellte Planglas M . Als Lichtquelle für die Interferenz diente eine von Siedentopf konstruierte Quecksilberbogenlampe von Zeiss¹⁾; sie liefert ein außerordentlich kräftiges, ziemlich konstantes Licht bei einer Stromstärke von 9 Amp. Nachdem das Licht mittels der Linse l_1 parallel gegen M gerichtet worden ist, wird es

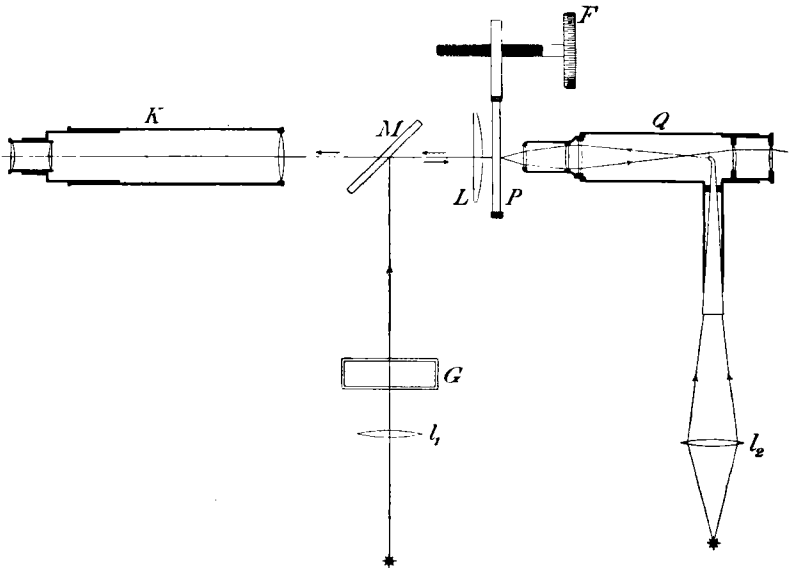


Fig. 4.

gegen die Interferenzgläser hin reflektiert; hiervon gehen die interferierenden Lichtstrahlen zurück nach M und durch diese Platte nach dem Fernrohr K , wo die Interferenzstreifen beobachtet werden.

Von den beiden Beobachtern, welche den Apparat bedienen, stellt der eine die Glasplatte P auf optischen Kontakt mit dem Mikroskop ein, während der andere die Lage des Interferenzbildes gegen das Fadenkreuz des Fernrohres

1) H. Siedentopf, Zeitschr. f. Instrumentenk. 24. p. 22. 1904.

notiert. Hiernach wird die Glasplatte *P* außer Kontakt gebracht, um gleich nachher wieder eingestellt zu werden, und nach der neuen Einstellung wird die Lage des Interferenzbildes wieder notiert. Dies wird so lange wiederholt, als es die Ermüdung des Auges zuläßt. Aus den Unterschieden in der Lage des Interferenzbildes bei den verschiedenen Einstellungen wird der mittlere Fehler bei der Kontakteinstellung berechnet.

Das Licht der Quecksilberbogenlampe geht durch das Glasgefäß *G*, welches eine schwache Lösung von Kaliumbichromat, die das blaue Quecksilberlicht absorbiert, enthält. Das interferierende Licht enthält somit das gelbe und grüne Quecksilberlicht, welches ein prachtvolles Interferenzbild erzeugt. Zwischen den mit Rücksicht auf Lichtstärke vorherrschenden grünen Ringen sieht man in wechselnder Reihenfolge Gruppen von schwarzen und gelben Zwischenräumen, welche nach einer verwickelten Periode variieren, weil das gelbe Licht zwei Wellenlängen enthält. Die Anwesenheit der gelben Ringe macht es möglich, feste Anhaltspunkte im Interferenzbilde zu finden, indem man immer mittels einer geringen Verschiebung der Platte *P* eine solche gegenseitige Lage der gelben und grünen Streifen im Gesichtsfeld des Fernrohres hervorschaffen kann, daß man irgend einen der Streifen nach einer Verschiebung des Bildes sicher wieder erkennen kann, wenn man voraussetzen darf, daß die Verschiebung nur wenige Streifen beträgt. Als spezielle Versuche die Zulässigkeit dieser Voraussetzung in meiner Untersuchung bewiesen hatten, wurde dadurch der Vorteil gewonnen, daß der Beobachter beim Fernrohr nicht die vorbeipassierenden Streifen zu zählen brauchte, wenn sein Mitarbeiter die Platte *P* außer Kontakt brachte, oder wenn er sie wieder einstellte. Der letztere konnte daher die Platte mit der zur Einstellung am besten geeigneten Geschwindigkeit bewegen, ungeachtet, daß die Streifen dadurch so schnell passierten, daß sie unmöglich gezählt werden konnten.

Nach jeder Einstellung auf den optischen Kontakt wurde notiert die Anzahl grüner Streifen zwischen einem der beiden Fäden im Fernrohr und der Mitte des Nullstreifens, d. h. des Streifens, welcher als Merkstreifen dient.

Der Lichtleiter des Mikroskopes wurde mittels einer $\frac{1}{8}$,

bis 1 m entfernten Glühlampe, wovon die Linse l_2 ein reelles Bild auf der Endfläche des Leiters erzeugt, beleuchtet. Der Apparat war gegen die Wärmestrahlung der Lampe geschützt.

Aus den in einer Beobachtungsreihe gefundenen verschiedenen Lagen des Nullstreifens zum Faden wurde die mittlere Lage dieses Streifens berechnet. Die Abweichungen davon in den einzelnen Beobachtungen wurden als Beobachtungsfehler bei den zugehörigen Kontakteinstellungen angesehen, und daraus wurde der mittlere Fehler, vorläufig im Abstand zwischen zwei grünen Streifen als Einheit, berechnet.

Im Mikroskop wurde in allen Versuchen das positive Kompensationsokular Nr. 8 von Zeiss (Vergrößerung = 8) verwendet. Als Objektiv diente in den meisten Versuchen (sieben Reihen) Zeiss' Achromat B, für welches die Äquivalentbrennweite auf 12 mm, der freie Objektastand auf 3 mm und die Vergrößerung auf 20 angegeben ist. Zwei Versuchsreihen wurden mit einem Trockenapochromat, Vergrößerung 63, von Zeiss ausgeführt.

In den nachstehenden Tab. I u. II bedeutet a die beobachtete Anzahl von grünen Streifen zwischen der Mitte des Nullstreifens und dem Faden, b bedeutet den Abstand des Nullstreifens von seiner mittleren Lage und somit den Beobachtungsfehler bei der Einstellung; die laufende Nummer der Beobachtungsreihe ist oberhalb gegeben. Unterhalb ist der aus den Werten von b berechnete mittlere Fehler aufgeführt. Unterhalb der Tabelle ist der aus sämtlichen Werten von b , diese als *eine* Reihe von Fehlerwerten zusammen genommen, berechnete mittlere Fehler aufgeführt.

Daß das Interferenzbild 1 Streifenabstand von der dem genauen Kontakt entsprechenden Lage abweicht, gibt an, daß die Platte P um $\frac{1}{2}$ Wellenlänge des Lichtes, welches die Streifen bilden, von dem richtigen Abstand verstellt ist. Da der mittlere Fehler bei der Objektivvergrößerung 20, Gesamtvergrößerung 160, gleich 2,1 Streifenabständen gefunden ist, wird der Fehler gleich 1,05 Wellenlänge; da diese Größe für das grüne Quecksilberlicht gleich $0,546 \mu$ ist, so ist das Resultat der Untersuchung, daß man unter den gegebenen Verhältnissen *auf optischen Kontakt mit einer Genauigkeit einstellen kann, welche einem mittleren Fehler gleich $0,57 \mu$ entspricht.*

Tabelle I.
Objektivvergrößerung = 20, Okularvergrößerung = 8.

1		2		3		4		5		6		7	
a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
0	+3,4	-1	+1,4	-3	-2,0	+4	+2,9	+3	+2,1	0	-1,2	0	-1,2
-6	-2,6	0	+2,4	+1	+2,0	+3	+1,9	-1	-1,9	+3	+1,8	+1	-0,2
-4	-0,6	-6	-3,6	-1	0,0	+2	+0,9	+1	+0,1	0	-1,2	+6	+4,8
-3	+0,4	+1	+3,4	-1	0,0	0	-1,1	-1	-1,9	+2	+0,8	-2	-3,2
-4	-0,6	-5	-2,6	+2	+3,0	+1	-0,1	+2	+1,1			+3	+1,8
		0	+2,4	+3	+4,0	+2	+0,9	+1	+0,1			+1	-0,2
		-6	-3,6	-3	-2,0	0	-1,1	+4	+3,1			0	-1,2
				0	+1,0	+1	-0,1	+3	+2,1			-1	-2,2
				-4	-3,0	0	-1,1	-4	-4,9			0	-1,2
				-1	0,0	+3	+1,9					+4	+2,8
				0	+1,0	-2	-3,1						
				-1	0,0	0	-1,1						
				-2	-1,0	+1	-0,1						
				-3	-2,0	+1	-0,1						
				-3	-2,0	0	-1,1						
Mittl. Fehler	2,2	3,1		2,0		1,5		2,5		1,5		2,4	

Der aus sämtlichen 65 Werten für *b* berechnete mittlere Fehler ist gleich 2,1 Streifendistanzen.

Tabelle II.
Objektivvergrößerung = 63, Okularvergrößerung = 8.

1		2	
a	b	a	b
+1,0	-1,1	-1,0	-0,3
+4,0	+1,9	-1,5	-0,8
+2,5	+0,4	-2,0	-1,3
+5,0	+2,9	0	+0,7
+1,5	-0,6	-2,5	-1,8
+2,5	+0,4	-1,2	-0,5
-1,5	-3,6	+1,5	+2,2
+2,0	-0,1	+2,0	+2,7
-0,5	-2,6	-2,0	-1,3
+4,5	+2,4		
Mittl. Fehler	2,1	1,6	

Der aus sämtlichen 19 Werten für *b* berechnete mittlere Fehler ist gleich 1,8 Streifendistanzen.

An die in den beiden Tabellen mitgeteilten Zahlenwerte mag ich die folgenden Bemerkungen knüpfen. Zur Führung des Planglases P verwendete ich einen älteren Schlittenapparat mit vorzüglicher Steuerung für den Schlitten, aber mit großem toten Gange; ich konnte daher nicht das gewöhnliche Mittel zur Erleichterung der scharfen Einstellung auf ein Objekt, welches darin besteht, daß man schnell zwischen zu großen und zu kleinen Abständen wechselt, verwenden. Die Einstellungsbedingungen waren daher ungünstiger als die, welche man bei den meisten Verwendungen der Methode erwarten darf. Was die beiden Striche in der Lichtquelle σ (Fig. 1) betrifft, wird es nach meinen Erfahrungen vorzuziehen sein, sie verhältnismäßig breit zu haben, aber mit kleinerem Zwischenraum als $\frac{1}{40}$ mm, so daß die Scharfeinstellung vom deutlichen Hervortreten des hellen Zwischenraumes bedingt wird. Eines Mißverständnisses zufolge wurden in den Versuchen mit der Vergrößerung 20 die Zahlen a in der Tab. I, welche die Lage des Interferenzbildes angeben, nur in ganzen Zahlen notiert, obschon die Einstellungsgenauigkeit wohl die Mitnahme einer Dezimalziffer hätte motivieren können; hierdurch dürfte der mittlere Fehler etwas zu groß gefunden worden sein.

Mit dem stärkeren Objektiv, Vergrößerung 63, konnten die beiden Striche nicht deutlich gesehen werden, wahrscheinlich infolge der Unvollkommenheit der Prismenbilder; dagegen bekam man ein scharfes Bild eines vor der Lichtquelle σ ausgespannten, ziemlich dicken Kokonfadens; dies deutet darauf hin, daß die Bilder der Striche unsichtbar werden, weil das Prisma ihre Breite vermindert, wenn sie senkrecht auf der brechenden Kante stehen. Es scheint, daß beim Gebrauch des stärkeren Objektivs nicht viel in bezug auf Genauigkeit gewonnen wird; die Einstellung wird doch dadurch erleichtert, daß das Bild des Fadens ziemlich plötzlich hervortritt bez. verschwindet, wenn man die Platte P hin und wieder verschiebt. Der Objektabstand ist für dieses Objektiv auf 0,2 mm angegeben.

Die Verwendungen der Methode.

Mein Augenmerk bei der Ausbildung der Methode war in erster Reihe ihre Verwendung zur Bestimmung oder zur

Einstellung der Höhe einer Quecksilberoberfläche bei Druckmessungen. Da die Genauigkeit 20—30 mal so groß ist als bei der Verwendung des Fernrohres, wird man mit dem Mikroskop rücksichtlich der Untersuchung von gasförmigen Körpern in stark verdünntem Zustande oder von kleinen Druckänderungen in Gasen gewöhnlicher Dichte beträchtlich weiter als bisher reichen können. Außer der Erreichung der größeren Genauigkeit hat man hier noch den Vorteil, bedeutend günstigere Bedingungen für die Herstellung einer konstanten Temperatur im Quecksilber und im Gase zu haben. Bei der Beobachtung mittels des Fernrohres muß der Raum oberhalb des Quecksilbers für das Durchsehen zugänglich sein; dadurch wird man gehindert, das zuverlässigste Mittel zur Herstellung einer konstanten und bekannten Temperatur, nämlich die Umgebung mittels Eises, zu verwenden. Mit dem Mikroskop hat man nicht diesen Übelstand, weil es selber das bei der Einstellung nötige Licht liefert. Man wird auf diesem Wege dem Gas-thermometer eine ausgedehntere Verwendung geben können, teils weil das Instrument empfindlicher wird, teils weil man eine sichere Bestimmung der Temperatur im schädlichen Raum erhalten kann, wenn man das Mikroskop zur Einstellung der Quecksilberoberfläche in diesem Raume verwendet; die sonst verwendete gläserne oder metallene Spitze wird dann durch die Spitze des aus dem Objektiv austretenden Lichtkegels ersetzt.

Man wird zwei gegeneinander gerichtete Mikroskope in gegenseitigen optischen Kontakt bringen können, so daß man in dem einen Mikroskop das Objektivbild der Lichtquelle des anderen scharf sieht. Ist das eine der beiden Mikroskope mittels Mikrometerschraube verschiebbar, so wird man die Dicke eines zwischenliegenden Körpers, ohne auf denselben Druck auszuüben, messen können. Auf diesem Wege wird man z. B. die Dicke eines Flüssigkeitsstrahles oder eines Tropfens mit einer Genauigkeit von μ bestimmen können.

Kopenhagen, Februar 1905.

(Eingegangen 13. Februar 1905.)
