

## Über einen Polarisierungseffekt an aufgedampften Aluminiumschichten bei senkrechter Lichtinzidenz

Von

G. THIESSEN und P. BROGLIA

Mit 2 Textabbildungen

(Eingegangen am 8. Juni 1959)

Aluminium mirrors produced by the technique of evaporation in vacuum may have a polarizing property, which in the case of normal incidence of unpolarized light may give polarization up to 10% in the reflected light. Such a polarization effect may be the origin of considerable errors not only for polarimetric but also for photometric work.

This polarization effect can be avoided if the glow discharge for final cleaning of the mirror face is everywhere normal to the mirror face, so that the electrical field component lying in the mirror face is zero and the direction of incidence of the charged particles is perpendicular to the mirror. This can be managed by using a complete disk as cleaning electrode with a diameter  $\geq$  the diameter of the mirror.

### A. Einleitung

Zur Durchführung präziser photoelektrischer Polarisationsmessungen mit Hilfe von Spiegelfernrohren wird man möglichst Cassegrain-Spiegelanordnungen benutzen, um die störende instrumentelle Polarisierung durch Reflexion bei schiefer Inzidenz weitgehend zu vermeiden. Bei einem Öffnungsverhältnis des Hauptspiegels von 1:5 ist der maximale Einfallswinkel am äußeren Spiegelrand für achsenparallel einfallende Strahlen  $\varepsilon = 0,05 \sim 3^\circ$ . Die zugehörige Polarisierung hängt dann nur noch von der Größe der optischen Konstanten ab. Diese variieren für aufgedampfte Aluminiumschichten in einem weiten Bereich — sie sind abhängig von der Schichtdicke, der Oberflächenbeschaffenheit des Glasträgers, dem Aufdampfvorgang in seinen Einzelheiten: Höhe des Vakuums, Geschwindigkeit des Aufdampfens usw. Nehmen wir als Beispiel die Werte für den Brechungsindex  $n$  und den Absorptionsindex  $K$  einer etwa 1000 Å dicken Aluminiumschicht, die im normalen Verfahren mit der Berge-dorfer Hochvakuumanlage auf einer hochplanen Glasfläche (interferenzgenau) hergestellt worden ist. Die Bestimmung der optischen Konstanten erfolgte (4 Wochen nach der Bedampfung) über die Messung des Polarisationszustandes des reflektierten Lichtes und ergab  $n = 0,86$  und

$K = 5,27$ . Mit diesen Werten würde für die äußeren Randstrahlen des oben genannten Spiegels 1:5 folgender Polarisierungseffekt auftreten: Phasenverzögerung von  $3'$  zwischen den beiden Hauptkomponenten (parallel und senkrecht zur Einfallsebene) und Verhältnis des Reflexionsvermögens  $1-3 \cdot 10^{-4}$  für die beiden Hauptkomponenten. Ist das einfallende Lichtbündel vollständig unpolarisiert, dann besitzt das reflektierte Licht einen Polarisierungsgrad von 0,015%. Wegen der zweiten Reflexion am Cassegrain-Spiegel haben die Randstrahlen insgesamt eine instrumentelle Polarisation von etwa 0,03% mit der Schwingungsrichtung jeweils senkrecht zur Einfallsebene. Für die der Spiegelachse näheren Strahlen ist der Polarisierungsgrad natürlich entsprechend kleiner. Da bei der praktischen Polarisationsmessung das resultierende Licht des Gesamtspiegels verwandt wird, ist wegen der rotationssymmetrischen Verteilung der instrumentellen Polarisation auf der Spiegelfläche der Polarisierungsgrad des Gesamtlichtes sicher  $< 0,01\%$  für unpolarisiert einfallendes Licht, selbst dann, wenn die Spiegel über ihre Flächen hinweg etwas unterschiedliche Reflexionswerte besitzen, wie es bei älteren Spiegelschichten vorkommen wird, so daß keine volle Symmetrie herrscht. Natürliches einfallendes Licht bleibt also nach der Reflexion unpolarisiert. Ferner liegt der Depolarisationsgrad für vollständig linear polarisiert einfallendes Licht, wie man leicht sieht, erheblich unter der Meßgenauigkeitsgrenze, auch für die genauesten photoelektrischen Meßverfahren.

Mit einer normalen astronomischen Cassegrain-Spiegelanordnung sollte also bei einer Genauigkeitsschranke  $< 0,01\%$  keine instrumentelle Polarisation auftreten. Tatsächlich jedoch wurde nach einer neuen Aluminisierung des 1 m-Reflektors in Merate/Como bei Sternen, deren Polarisation nach amerikanischen Messungen  $< 0,2\%$  sein sollte (HILTNER [2]), nicht weniger als 4% Polarisation gemessen. Eine Untersuchung des 1 m-Spiegels zeigte, daß für einfallendes unpolarisiertes Licht bei praktisch völlig senkrechter Inzidenz lokal unterschiedliche Polarisationsbeträge bis zu 10% auftraten.

Die einzige Publikation, in der ein ähnlicher, möglicherweise derselbe Effekt beschrieben wird, ist die von DOLLFUS [1]. Er beobachtete bei einer Reihe von im Hochvakuum aluminisierten Spiegeln bei senkrecht einfallendem unpolarisiertem Licht ebenfalls über die Spiegelfläche hinweg verschiedene Polarisationsbeträge bis zu etwa 10% im reflektierten Licht; andere aluminisierte Spiegel hingegen zeigten keinerlei derartige Polarisation. Bei mit Silber bedampften Spiegeln wurde niemals ein solcher Polarisierungseffekt beobachtet. DOLLFUS stellte keine weiteren Untersuchungen über die Ursache dieser eigenartigen Polarisation an — er weist jedoch nachdrücklich auf die Möglichkeit des Auftretens dieses Phänomens hin, das bei Benutzung von aluminisierten Spiegeln zur Polarisationsuntersuchung erhebliche Fehler bewirken kann.

### B. Experimente zur Klärung des Effektes

Die beobachtete Polarisation bei senkrechter Lichtinzidenz am 1 m-Reflektor in Merate ist natürlich nur möglich, wenn eine anisotrope Struktur der Aluminiumschicht vorliegt. Diese Asymmetrie der Spiegelschicht kann hervorgerufen werden durch 1. eine nicht symmetrische, d. h. eine beschädigte Glasoberfläche\*, und 2. durch nicht symmetrische Verhältnisse beim Aufdampfverfahren. An der Spiegeloberfläche selbst konnte bei einer vorläufigen Prüfung keine in Frage kommende Beschädigung beobachtet werden. Das Aufdampfen des Aluminiums erfolgte von 16 gleichmäßig über den vollen Kreis von  $360^\circ$  mit Durchmesser von 1 Meter verteilten Heizspiralen aus, die symmetrisch etwa 50 cm oberhalb der Spiegelfläche angeordnet waren. Eine Drehung des Spiegels im Vakuumtank war nicht möglich. Die Verdampfung des Aluminiums in den 16 Spiralen konnte nur zeitlich nacheinander vorgenommen werden. Die einzige ernsthafte Asymmetrie jedoch bestand während des üblichen Reinigungsglimmens bei Vorvakuumdruck (einige  $10^{-2}$  Torr). Das Glimmen erfolgte zwischen dem Vakuumtank und einem geraden Draht, der etwa in einer Durchmesserrichtung des zylindrischen Tanks 60 cm oberhalb der Spiegelschicht verlief.

Die Möglichkeit eines Zusammenhanges des Polarisationseffektes mit dem Glimmvorgang wurde nun dadurch wahrscheinlich gemacht, daß die beobachtete Schwingungsrichtung der Scheinpolarisation für tatsächlich unpolarisiert einfallendes Sternlicht relativ zum Spiegel die gleiche Richtung war wie die des Glimmdrahtes relativ zum Spiegel bei der Aluminisierung.

Mit der Bergedorfer Hochvakuumanlage wurde eine große Zahl weiterer Experimente zur Klärung des Effektes durchgeführt. Um von Effekten, die von optisch nicht vollkommenen Glasoberflächen herrühren könnten, frei zu sein, wurden als Träger-Testgläser nur gute einwandfreie Planspiegel bzw. Interferenzspiegel verwandt. Der erste Versuch bei gespanntem Glimmdraht und nicht rotierenden Spiegeln (den Verhältnissen in Merate entsprechend) ergab:

Die senkrecht unterhalb des Drahtes gelegenen Spiegel 3, 4, 5 und 6 zeigten keinerlei Polarisation bei senkrechter Inzidenz, die seitlich herausgelegenen Spiegel 1, 2, 7 und 8 ergaben eine Polarisation von etwa 4,7% im reflektierten Licht. Die Schwingungsrichtung war in erster Näherung parallel zum Draht, wie durch die kleinen Doppelpfeile in Abb. 1 angedeutet. Bedampft wurde von den Verdampferquellen  $V_I$  und  $V_{II}$ , von  $V_{II}$  die doppelte Menge Aluminium wie von  $V_I$ . Die Spiegel 2, 7, 4 und 5, die den Verdampferquellen am nächsten lagen, waren völlig undurchsichtig,

\* Herrn Dr. W. A. HILTNER, McDonald-Observatory, danken wir für Diskussionen hierzu.

während die entfernter gelegenen Spiegel 1, 3, 6 und 8 noch ziemlich durchsichtig waren. Trotz dieses Unterschiedes in der Schichtdicke war der Polarisationsgrad der Spiegel 2, 7 und 1, 8 fast völlig identisch. Die Spiegel 1, 2, 3 und 4 waren Interferenzspiegel, 5, 6, 7 und 8 waren gute Laboratoriumsspiegel.

Daß die Dampfstrahlrichtung nicht von entscheidendem Einfluß ist, zeigt sich darin, daß 1, 8 genau die gleiche Polarisation wie 2, 7 besitzen, während 3, 6 ohne jede Polarisation sind. Es wurde dies auch noch durch unabhängige Sonderexperimente bestätigt.

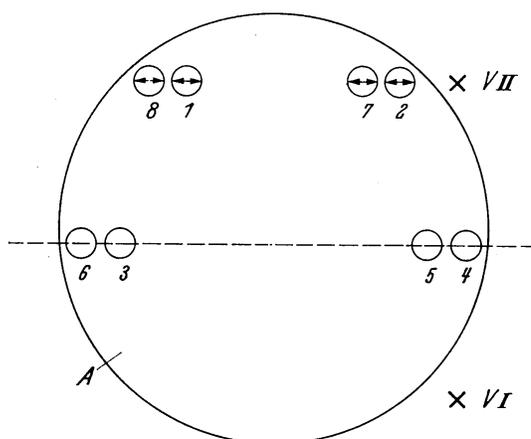


Abb. 1. *A* metallische Auflagefläche im Vakuumtank; — — — senkrechte Projektion des Glimmrahtes, bezüglich Auflagefläche;  $V_I$ ,  $V_{II}$  senkrechte Projektion der Verdampfungsquellen bezüglich Auflagefläche; 1, 2, ..., 8 Testspiegel. ↔ Hauptschwingungsrichtung im reflektierten Licht bei senkrechter Inzidenz unpolarisierten Lichtes

Es sollen nicht alle angestellten Experimente und deren Ergebnisse im einzelnen hier wiedergegeben werden. Zusammengefaßt ergab sich folgendes: 1. Es war nicht möglich durch noch so sorgfältige und genaue Wiederholung aller Maßnahmen: chemische Vorreinigungsart und -qualität, Höhe des Vakuums, Spannung und Dauer des Glimmens usw., sogar an den gleichen Spiegeln den oben beschriebenen Effekt genau zu reproduzieren. Es wurde jedoch niemals eine Polarisation gefunden für die senkrecht unter dem Glimmraht gelegenen Spiegel. Für die seitwärts gelegenen Spiegel war, wenn ein Effekt bemerkt wurde, die

Schwingungsrichtung die gleiche wie oben beschrieben (parallel zum Draht); der Polarisationsgrad war aber geringer. In den meisten Fällen jedoch wurde kein meßbarer Effekt beobachtet.

2. Es konnte nicht entschieden werden, ob die Art der chemischen Reinigung: benutzte Chemikalien und Sorgfältigkeit in der Beseitigung der Reste der Chemikalien von der Spiegelfläche einen Einfluß auf das Auftreten und die Stärke der Polarisation hat. Ebenfalls konnte nicht entschieden werden, ob das Glimmen mit Gleich- oder Wechselstrom das Auftreten des Effektes begünstigt; er wurde bei beiden Stromarten beobachtet.

Man hat nach unseren zahlreichen Experimenten den Eindruck, als ob das Auftreten, jedenfalls in großer Stärke, des beschriebenen Effektes allgemein ziemlich unwahrscheinlich ist, möglicherweise dadurch bedingt, daß eine ganze Reihe von noch nicht vollständig bekannten Bedingungen gleichzeitig erfüllt sein müssen.

### C. Deutungsversuch

Wenn auch von einer einwandfreien Erklärung des beschriebenen Phänomens noch keine Rede sein kann, so soll doch kurz angedeutet werden, wie möglicherweise der Effekt zustande kommen kann.

Durch das asymmetrische Glimmen muß die äußerste Oberflächenschicht des Trägers vor der Bedampfung asymmetrisch so präpariert worden sein, daß nach der Bedampfung der Polarisationseffekt wie beobachtet auftreten kann, daß sich also die zeitlich nacheinander aufgedampften Aluminium-Atome nicht völlig wahllos statistisch verteilt auf der Spiegelfläche anordnen, sondern infolge der Oberflächenbeweglichkeit einem gewissen Ordnungsschema folgen, das durch das Glimmen in der äußersten Trägerschicht vorgebildet sein muß. Daß eine vorhandene Ordnung in der obersten Trägerschicht, etwa ein Trägergitter (Kristall) zu einer Kristallordnung auch in der durch Bedampfung darüber aufwachsenden Fremdschicht führen kann, ist bekannt [5]. Die durch das Glimmen präparierte Trägeroberflächenschicht könnte nun eine sehr dünne Restschicht der bei der chemischen Reinigung benutzten Substanzen sein, oder auch eine neue Schicht, die durch die Glimmentladung selbst erzeugt worden ist, wie dies auch bei den verhältnismäßig niedrigen Spannungen, wie sie beim Reinigungsglimmen in der Hochvakuumtechnik gebräuchlich sind, beobachtet worden ist [4]\*. Ferner könnten auch während des Reinigungsglimmens nach HOLLAND [3] glasfremde kohlenstoffhaltige Schichten aufgestäubt worden sein, die ihren Ursprung in zersetztem Pumpenöl oder dgl. haben könnten.

Eine asymmetrische Struktur in diesen Oberflächenschichten kann durch das Glimmen nur dann entstehen, wenn das elektrische Feld und die Einfallrichtung der Ladungsträger nicht gerade senkrecht zur Oberfläche stehen. Ist dies aber der Fall wie für die genau unterhalb des Glimmdrahtes gelegenen Testspiegel, dann sollte sich dort keine Asymmetrie ausbilden können, und damit sollte auch in der aufwachsenden Aluminiumschicht keine asymmetrische Ordnung entstehen, d. h. es sollte keine Polarisation bei senkrechter Inzidenz bei der Reflektion erzeugt werden können, genau den Beobachtungen entsprechend.

Liegt das elektrische Feld bei der Gasentladung aber nicht senkrecht zur Glasoberfläche, dann ist eine von 0 verschiedene Feldkomponente in der Spiegeloberfläche selbst vorhanden, und weiterhin fallen die geladenen Teilchen während des Bombardements schräg auf die Glasfläche ein. Diese beiden Effekte können natürlich zu einer asymmetrischen Struktur der Trägeroberflächenschicht führen, etwa zu polykristalliner Anordnung mit parallel zur elektrischen Feldstärkenkomponente, also senkrecht zum

\* Herrn Dr. K. MOELLER, Mineralogisches Institut der Universität Hamburg, und Herrn Dipl.-Phys. H. KOCH, in Fa. Carl Zeiss, Jena, danken wir für Diskussionen zu diesem Punkt.

Draht, ausgerichteten Längsachsen. Das heftige Bombardement durch die Ladungsträger gibt den Kristalliten die nötige Beweglichkeit, sich der elektrischen Feldstärke entsprechend, vielleicht nur sehr wenig, auszurichten. Möglicherweise trägt auch der schräge Einfall der Ladungsträger zur Ausrichtung bei. In der aufwachsenden Aluminiumschicht wird sich nun ebenfalls eine möglicherweise nur schwache polykristalline Struktur mit teilweise ausgerichteten Längsachsen ausbilden können und den Polarisierungseffekt erzeugen, etwa wenn die Absorption an Kristalliten für parallel zur Längsachse schwingendes Licht größer ist als für senkrecht dazu schwingendes Licht. Ein solcher Effekt tritt aber nur dann ein, wenn die Größenordnung der Kristallite vergleichbar mit der Wellenlänge des Lichtes ist, denn bei sehr kleinen und auch bei sehr großen Kristalliten kann kein entsprechender Unterschied im Reflexionsvermögen bestehen. Gerade dieser Punkt nun, daß die Kristallite der Aluminiumschicht die richtige Größe haben müssen, um einen Polarisierungseffekt im Sichtbaren zu erzeugen, mag dafür mit verantwortlich sein, daß in den Experimenten häufig kein Effekt gefunden wurde.

#### D. Vermeidung des Effektes

Für die praktische astronomische Beobachtung ist es natürlich sehr wichtig, diesen Polarisierungseffekt bei aufgedampften Aluminiumschichten möglichst zu vermeiden, und zwar nicht nur bei Arbeiten zur Polarisation astronomischer Objekte. Auch die normale photographische und photoelektrische Photometrie von Sternen und Nebeln kann zu Fehlern führen, wenn die Spiegel selber polarisieren und die betreffenden Objekte auch polarisiert sind, wie bei vielen frühen Sternen und Nebeln. Es ist durchaus möglich, daß die gelegentlich selbst bei lichtelektrischen Beobachtungen auftretenden Unterschiede in den Ergebnissen zweier Beobachter, die oberhalb der Genauigkeitsschranken liegen, ihre Ursache in unterschiedlichen Eigenpolarisationen der benutzten Spiegel haben, die ja Werte bis zu etwa 10% erreichen können.

Nach den Ausführungen der vorhergehenden Abschnitte ist es nun zur sicheren Vermeidung eines solchen Polarisierungseffektes, soweit er nicht andere als die oben dargestellten Ursachen hat, nicht voll ausreichend, die Reinigungsglimmentladung symmetrisch anzuordnen, denn dann können immer noch lokale Polarisierungen auftreten, die für verschiedene Partien des Spiegels verschieden stark sind, so daß im Gesamtlicht der Effekt sich nicht weghebt; außerdem können erhebliche Depolarisationseffekte auftreten. Es muß vielmehr lokal der Polarisierungseffekt vermieden werden, was dadurch erreicht werden kann, daß über die ganze zu bedampfende Spiegeloberfläche hinweg die Glimmentladung möglichst senkrecht zur Spiegeloberfläche erfolgt, so daß keine elektrische Feldkomponente in der Spiegelfläche selbst liegt und das Bombardement mit

Ladungsträger senkrecht zur Oberfläche erfolgt. Dies kann am besten erreicht werden durch Benutzung einer vollen Glimmscheibe, parallel und symmetrisch zum Spiegel gelagert, mit Durchmesser  $\geq$  Spiegeldurchmesser und nicht zu großem Abstand Glimmscheibe–Spiegel (Abb. 2). Die Glimmscheibe selbst wird am besten als Doppelscheibe aus zwei gegeneinander isoliert und in kleinem Abstand voneinander angebrachten Blechscheiben mit Randstreifen am größeren äußeren Blech gefertigt. Das etwas kleinere innere Blech, welches der Spiegelfläche zugekehrt ist, erhält die Entladungsspannung, während das äußere Blech geerdet ist. Dadurch wird die Entladung im wesentlichen senkrecht nach unten auf den Spiegel gelenkt.

Beim Glimmen mit dieser Glimmscheibe und anschließender Bedampfung mit Aluminium ist an den Testgläsern keinerlei Polarisation bei senkrechter Lichtinzidenz im reflektierten Licht beobachtet worden und nach den obigen Darstellungen auch nicht zu erwarten.

Für wertvolle Diskussionen sowie tatkräftige Hilfe bei der Durchführung der Experimente sind wir Herrn K. LÜBECK, Hamburg-Bergedorf, sehr zu Dank verpflichtet. Ferner hat einer von uns (G. THIESSEN) dem Direktor des Observatoriums in Merate/Como, Herrn Prof. Dr. ZAGAR, für die freundlich erteilte Erlaubnis, in Merate arbeiten zu können, sowie der Deutschen Forschungsgemeinschaft für eine finanzielle Unterstützung zu danken.

### Literatur

[1] DOLLFUS, A.: Suppl. Ann. d'Astrophysique, Fasc. Nr. 4, 32 (1957). — [2] HILTNER, W. A.: Astrophys. J. Suppl. Ser. 2, Nr. 24 (1956). — [3] HOLLAND, L.: Nature (Lond.) 181, 1451–1452 (1958). — [4] KOCH, H.: Jenaer Jb. 1958 I, 275–291 (1958). — [5] MAYER, H.: Physik dünner Schichten, Teil I u. II. Stuttgart: Wiss. Verlagsges. 1950 u. 1955.

Privatdozent Dr. G. THIESSEN, Hamburger Sternwarte, Hamburg-Bergedorf  
Dr. P. BROGLIA, Osservatorio Astronomico, Merate/Como

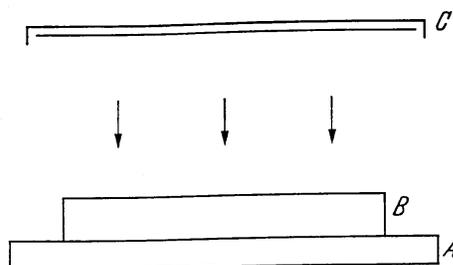


Abb. 2. A metallische Auflagefläche im Vakuumtank; B zu bedampfender Spiegel; C volle Glimmscheibe