

Dreiteiliger oder zweiteiliger Polarimeter-Halbschatten?

Von Dr. J. FLÜGGE

Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Firma Zeiss-Winkel GmbH,
Optische Werke, Göttingen

Im Jahre 1896 bereits wurde von LIPPICH¹ für Polarimeter höchster Meßgenauigkeit statt des zweiteiligen Halbschattens der dreiteilige empfohlen, weil auf Grund theoretischer Berechnungen nachgewiesen werden kann, daß mit dem dreiteiligen Halbschatten eine verbesserte Einstellgenauigkeit erzielbar ist. Es soll hier unternommen werden, das Für und das Wider des dreiteiligen Halbschattens zu erörtern.

Wir gehen dabei von dem Halbschatten des LIPPICH-Polarimeters aus, für das allein damals auch der dreiteilige Halbschatten erfunden wurde und für das allein dieser auch berechtigt sein kann.

Das kreisrunde Gesichtsfeld im Polarimeter ist in drei etwa flächengleiche Teile zerlegt, die in bekannter Weise in zwei scharfen Trennungslinien aneinander grenzen. Jedes Teilfeld empfängt Licht, das in einer genau bestimmten Ebene schwingt. Die *Schwingungsrichtung* für das Mittelfeld beträgt z. B. 86° ; für das linke Feld sei sie $93,99^\circ$ und für das rechte Feld $94,01^\circ$, entsprechend einer Winkelhalbierenden von 94° . Die Schwingungsrichtungen des linken und des rechten Feldes unterscheiden sich also nur um $0,02^\circ$, d. h. $1/400$ des Winkels zwischen der erwähnten Winkelhalbierenden und der Schwingungsrichtung des mittleren Feldes; das ist zweifellos ein sehr kleiner Winkel, auf den es aber gerade ankommt. Man hat häufig den Irrtum begangen, diesen Winkel gleich 0° zu machen, also im linken und im rechten Feld die Schwingungsrichtungen gleich zu wählen. Wir werden bald sehen, daß man mit dieser Vereinfachung den Sinn des dreiteiligen Halbschattens völlig verkennt und in seinem Nutzen dadurch zumichte hat werden lassen.

¹ Wiener Berichte 105, Abt. 2 a, S. 317 (1896).

Wir verfallen jetzt nicht in diesen Fehler, sondern achten darauf, daß die Schwingungsrichtungen im linken und rechten Feld um den kleinen Betrag $0,02^\circ$ verschieden sind.

Dreht man nun den *Analysator*, so findet man eine Analysatorstellung, bei der die Leuchtdichten in den drei Feldern um gleiche Beträge abgestuft sind (siehe Abb. 1, obere Reihe). Das linke Feld ist das dunkelste, das mittlere Feld hat eine mittlere Leuchtdichte, und das rechte Feld ist das hellste. Die Helligkeitssprünge betragen an jeder Trennkante 0,5 % der Leuchtdichte des mittleren Feldes. Das menschliche *Auge* besitzt nun aber für Helligkeitsunterschiede, die kleiner als 1 % sind, kein Wahrnehmungsvermögen mehr. Erst bei Helligkeitsstufen von mindestens 1 % aufwärts sieht das *Auge* unterschiedliche Helligkeiten. In der angenommenen Analysatorstellung, bei der die Helligkeitsstufen nur 0,5 % betragen, *erscheinen* dem *Auge* daher alle drei Felder *gleich* hell. Nun drehen wir den *Analysator* um $0,005^\circ$ einmal nach links, das anderemal aus der Nullstellung nach rechts. Bei der Linksdrehung werden das linke und das rechte Feld um 0,25 % dunkler, das mittlere Feld um 0,25 % heller. Infolgedessen ist nun zwischen dem linken und dem mittleren Feld ein Helligkeitsunterschied von 1 % erreicht, während das rechte Feld genau dieselbe Helligkeit hat wie das mittlere Feld. Die geringe *Analysator*verstellung um $0,005^\circ$ nach links hat also genügt, den Helligkeitsunterschied des linken gegen das mittlere Feld eben gerade erkennbar zu machen. Dreht man den *Analysator* aus der Nullstellung um den kleinen Betrag $0,005^\circ$ nach rechts, so werden linkes und rechtes Feld um 0,25 % heller, das mittlere Feld um 0,25 % dunkler. Jetzt ist die für die Erkenn-

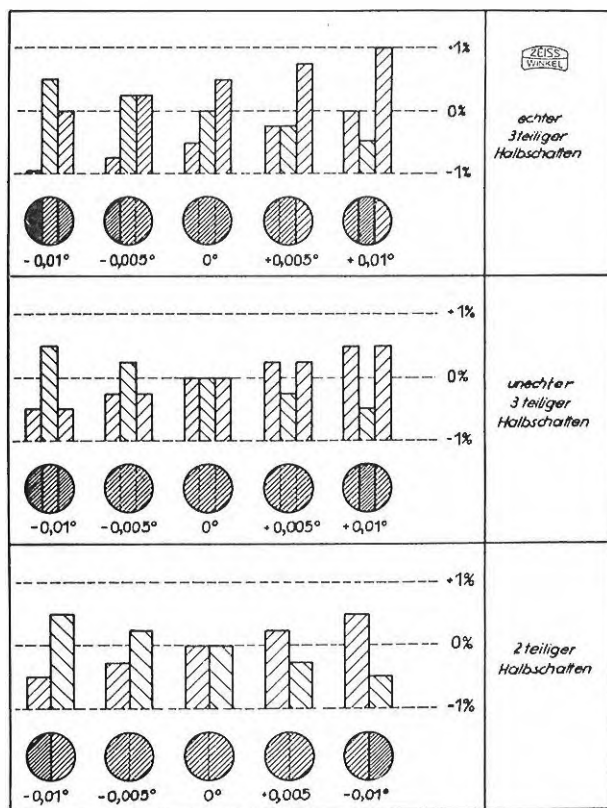


Abb. 1

barkeit eines Helligkeitsunterschiedes notwendige Stufe von 1 % an der Trennkante zwischen dem mittleren und dem rechten Feld erreicht. Demnach ist die Einstellunsicherheit aus der Nullstellung nach beiden Seiten nicht größer als $\pm 0,005^\circ$.

Wie liegen nun die Dinge, wenn man die Schwingungsrichtungen im linken und rechten Feld nicht um $0,02^\circ$ verschieden macht, sondern gleich wählt (siehe Abb. 1, mittlere Reihe)? In der Nullstellung des Analysators erscheinen dann die drei Felder nicht nur *gleich* hell, sondern *sind* es auch *wirklich*. Dreht man den Analysator um $0,005^\circ$ nach links, so werden linkes und rechtes Feld wieder wie vorhin um 0,25 % dunkler, das mittlere Feld um 0,25 % heller. Linkes und rechtes Feld behalten untereinander gleiche Leuchtdichten, das mittlere Feld ist um 0,5 % heller als die äußeren Felder. Das genügt noch nicht für die Erkennung des Helligkeitsunterschiedes durch das Auge. Man müßte den Analysator noch einmal so weit nach links drehen, um das mittlere Feld um das mindestens notwendige 1 % heller zu machen als die äußeren Felder. Dreht man den Analysator aus der Nullstellung heraus um $0,005^\circ$ nach rechts, so wird das mittlere Feld entsprechend nur um 0,5 % dunkler als die beiden äußeren Felder. Das genügt wiederum nicht, man muß den Analysator nochmals um denselben Betrag nach rechts drehen, bis das Auge beginnt, einen Helligkeitsunterschied zu empfinden. Der Mißerfolg liegt auf der Hand: *die Gleichrichtung der Schwingungsrichtungen im linken und im rechten Feld bedingt sofort*

eine Verdoppelung der Einstellunsicherheit des Analysators.

Ein dreiteiliges Halbschattenfeld mit gleichen Schwingungsrichtungen im linken und im rechten Feld ergibt also *keine größere Einstellgenauigkeit* als das zweiteilige Feld (siehe Abb. 1, untere Reihe).

Fest steht allein, daß der dreiteilige Halbschatten nur dann berechtigt ist, wenn man im linken und im rechten Feld die Schwingungsrichtungen um einen sehr kleinen Betrag *verschieden* macht.

Wie steht es nun in der Praxis? Hier liegt die Sache gar nicht so einfach, wie es scheint. Die Halbschattenvorrichtungen sind ja Kalkspatprismen, und Kalkspat ist ein natürlich gewachsenes Mineral, dessen Gleichmäßigkeit zu wünschen übrig läßt. Es gibt Kalkspate, die einen hohen Lichtdurchlässigkeitsgrad besitzen, und andere Kalkspate, die weniger lichtdurchlässig sind. Wenn man nun für linkes und rechtes Halbschattenfeld Prismen von auch nur *minimal* verschiedenen Durchlässigkeiten verwendet, so wird die Symmetrie der Helligkeitsabstufung in einem Ausmaße gestört, daß es praktisch unmöglich ist, die theoretischen Genauigkeiten in der Einstellung zu erreichen. Die Kalkspatprismen für das linke und das rechte Feld müssen paarweise ausgesucht werden, und es gehört ein größerer Vorrat dazu, um einzelne brauchbare Paare herauszufinden. Deshalb ist es in höchstem Grade unrationell, den echten dreiteiligen Halbschatten für die *Scrienherstellung* von LIPPICH-Polarimetern anzuwenden. In den Druckschriften über Polarimeter wird meist nur gesagt, daß der dreiteilige Halbschatten auf Wunsch geliefert wird. Er bedingt einen nicht geringen *Mehrpreis* allein schon wegen des erheblich vergrößerten Justieraufwandes. Gewisse Firmen propagieren in ihren Druckschriften den dreiteiligen Halbschatten für *alle* ihre großen Polarimeter. Es ist wahrscheinlich anzunehmen, daß es sich hierbei nur um den *unechten* dreiteiligen Halbschatten handelt, der, wie schon oben gesagt, *keinen* Vorteil an Meßgenauigkeit gegenüber dem zweiteiligen Halbschatten besitzt.

Wenn nun schon ein Abnehmer unbedingt auf dem dreiteiligen Halbschatten besteht, so muß ihm klar sein, daß er dann natürlich auch die übrigen Bedingungen für höchste Einstellgenauigkeit beachten muß, insbesondere eine genügende *Temperaturkonstanz* der untersuchten Substanzen. Der dreiteilige Halbschatten beim Lippich soll ja eine Einstellgenauigkeit von $\pm 0,005^\circ$ mindestens garantieren. Nun ändert sich aber bei *flüssigen* Substanzen der Drehwinkel mit der Temperatur. Ein Temperaturfehler von $2/100^\circ\text{C}$ gibt z. B. bei Fruchtzuckerlösungen schon einen Drehfehler von $0,005^\circ$. Wirklicher Nutzen wird daher mit dem dreiteiligen Halbschatten nur erzielt, wenn gleichzeitig mit dem Polarimeter ein *hochwertiger Thermostat* zur Verfügung steht, der eine Temperaturkonstanz von mindestens $1/100^\circ\text{C}$ garantiert. Wenn der Abnehmer glaubt, ohne einen solchen Thermostaten auskommen zu können, so sind die von ihm

aufgewandten Mehrkosten für den dreiteiligen Halbschatten herausgeworfenes Geld.

In diesem Zusammenhang interessiert, was ein maßgebender Spezialist auf dem Gebiete der Polarimetrie, nämlich der inzwischen verstorbene Abteilungsleiter an der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt Deutschlands, O. SCHÖNROCK, über den dreiteiligen Halbschatten sagt²:

«Ein gutes LIPPICHSches Polarimeter mit zweiteiligem Gesichtsfelde ermöglicht in den Drehungsbestimmungen einen so hohen Grad der Genauigkeit, daß der Fehler im Drehungswinkel fast immer klein bleibt gegenüber den Fehlern der anderen Beobachtungsgrößen, zumal was den Einfluß der Temperatur betrifft. Es hat daher praktisch wenig Wert, die Genauigkeit durch Mehrteilung des Gesichtsfeldes noch weiter steigern zu wollen. Im günstigsten Falle ließe sich die Unsicherheit der Einstellung höchstens auf die Hälfte verkleinern, was aber meist nicht erreicht wird, weil sich die Halbprismen für praktische Zwecke nicht in dem gewünschten Maße empfindlich genug justieren lassen. Dies trifft schon auf den Polarisator mit dreiteiligem Gesichtsfeld, bei welchem zwei Halbprismen in symmetrischer Stellung verwendet werden, und erst recht auf den ganz überflüssigen Polarisator mit vierteiligem Kontrastfelde, zu dem gar vier Prismen erforderlich sind. Die mit diesen Instrumenten angeblich zu erzielende Vergrößerung der Einstellungsgenauigkeit ist, falls überhaupt vorhanden, meist so unwesentlich, daß es vorzuziehen ist, mit dem zweiteiligen Felde zu arbeiten, bei dem die Einstellungen überdies einfacher und mit der Zeit weniger ermüdend und anstrengend sind. Beim Kontrastphotometer mit dem LUMMER-BRODHUNSENschen Würfel liegen andere Verhältnisse vor, weil es hier keine Schwierigkeiten macht, auf drei gleich hellen Feldern genau gleich starke Kontraste zu erzeugen.»

Nun müssen wir auch noch von der Anwendung des dreiteiligen Halbschattens in *einfachen* Polarimetern sprechen. Zu den einfachen Polarimetern gehören der *Mitscherlich* und die in Kliniken und Apotheken verwendeten kleinen Polarimeter zur Harnanalyse. Als Halbschattenvorrichtung wird bei diesen einfachen Geräten meist die LAURENTSche Quarzplatte für gelbes Na-Licht benutzt. Sie ist parallel zur optischen Achse des Kristalls geschnitten. Wenn eine ebene, monochromatische, linear polarisierte Welle senkrecht einfällt, wobei die Schwingungsrichtung mit der Richtung der optischen Achse des Kristalls einen Winkel bildet, so führt die Platte zwischen den beiden Schwingungskomponenten parallel und senkrecht zur Achse einen Gangunterschied ein. Bei der LAURENTSchen Platte ist die Dicke auf den Gangunterschied von einer halben Wellenlänge für gelbes Na-Licht abgestimmt. Beim Austritt aus der Platte setzen sich daher die Komponenten wieder zu einer linearen Schwingung zusammen, die jedoch in

bezug auf die Achsenrichtung symmetrisch zur Einfallsschwingung liegt. Die LAURENTSche Platte wird direkt hinter dem Polarisator angeordnet. Beim zweiteiligen Gesichtsfeld bedeckt sie die eine Hälfte des Gesichtsfeldkreises, beim dreiteiligen Halbschattenfeld überdeckt sie nur den Teil, den wir in Polarimetern als Mittelfeld bezeichnen. Die Plattendicke für eine halbe Wellenlänge Gangunterschied im gelben Na-Licht ist 0,03236 mm oder ein ungerades Vielfaches davon. In der Dicke 0,03236 mm wäre die Platte eine hervorragende Halbschatteneinrichtung, die sogar im gelb gefilterten weißen Licht für Saccharimeter brauchbar wäre. Aus technischen Gründen wird die Platte aber 3- oder 5mal dicker gehalten, also 0,097 oder 0,1618 mm. Dann stört für Präzisionsmessungen schon der geringe Wellenlängunterschied zwischen den beiden gelben Na-Linien, weil es nicht vermieden werden kann, daß elliptisch polarisiertes Licht von merklich verschiedenen Formen aus der Platte austritt. Durch ihre Interferenz im Analysator in Verbindung mit der Rotationsdispersion des untersuchten Körpers können Meßfehler im Drehwinkel bis zu 0,25 % zustandekommen. Deshalb wird die LAURENTSche Quarzplatte nur in Polarimetern benutzt, deren direkte Ablesung nicht unter 0,05° heruntergeht.

Die relativ geringe Meßgenauigkeit mit dem LAURENTSchen Halbschatten nimmt der Anwendung des dreiteiligen Feldes eigentlich schon ihre Berechtigung. Tatsächlich arbeitet der dreiteilige Halbschatten nach LAURENT nicht genauer als der zweiteilige. Das muß einmal offen und ehrlich ausgesprochen werden. Trotzdem findet man in vielen Polarimetern den dreiteiligen Halbschatten nach LAURENT vor, weil erhebliche fabrikatorische Schwierigkeiten bei dieser Art Halbschatten nicht vorhanden sind. Natürlich kann man ihn nicht mit einer erhöhten Meßgenauigkeit begründen. Man kann allerdings sagen, daß man mit dem dreiteiligen Halbschattenfeld etwas schneller die richtige Einstellung auf Halbschattengleichheit findet. Das liegt am Folgenden. Beim Einstellen beobachtet man erst die eine Kante und stellt diese auf Verschwinden ein. Infolge der Trägheit in der Dunkelanpassung des Auges wird man gar nicht bemerken, daß in Wirklichkeit an der beobachteten Trennungslinie noch ein Helligkeitsunterschied besteht. Glaubt man die richtige Einstellung gefunden zu haben, so beobachtet man nun die andere Trennungslinie und wird eventuell feststellen, daß an dieser noch ein Helligkeitsunterschied besteht, der in Wirklichkeit gar nicht größer ist als der an der zuerst beobachteten Trennungslinie. Aber da sich beim Blickwechsel von der ersten zur zweiten Trennungslinie eine Seitenvertauschung der verschiedenen hellen Felder ergibt, bildet sich nun das dunklere Feld an denjenigen Stellen des Augenhintergrundes ab, die vorhin mit dem helleren Feld gereizt waren. In diesem Netzhautgebiet ist die Dunkelanpassung des Auges daher noch nicht so weit fortgeschritten wie in den benachbarten Teilen, die zuerst nur von dem dunkleren Feld gereizt wurden und jetzt an der

² GEIGER-SCHUELL, *Handbuch der Physik*, Band XIX, S. 749/50.

zweiten Trennungslinie dem helleren Feld zugeordnet sind. Das Auge wird daher an der zweiten Trennungslinie den Helligkeitsunterschied karikieren, d. h. deutlicher hervortreten lassen, so daß man mit dem Analysator nachstellen kann. Das erklärt den Nutzen des dreiteiligen Gesichtsfeldes beim *Mitscherlich*, eine Erklärung, die aber *nicht* bedeutet, daß die Meßgenauigkeit des Apparates höher ist als bei Anwendung des zweiteiligen Feldes. Auch beim zweiteiligen Feld kann man auf die Trägheit der Dunkelanpassung Rücksicht

nehmen, indem man nach einer anfänglichen Einstellung auf scheinbare Gleichheit das Auge kurzzeitig schließt, um es schneller der Verdunkelung anzupassen, dann wieder öffnet und den nun zu bemerkenden Helligkeitsunterschied, der vorher nicht auffiel, nachkorrigiert. Das dauert etwas länger als beim dreiteiligen Halbschatten der Blickwechsel von der einen zur anderen Trennungslinie. Die zum Schluß erreichte Einstellgenauigkeit ist aber bei beiden Halbschattenarten, wohlgemerkt mit der LAURENTSchen Quarzplatte, dieselbe.