

Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Die Photometrie der Gestirne

Müller, Gustav

Leipzig, 1897

II. Abschnitt. Die Photometrischen Apparate

II. ABSCHNITT.

DIE PHOTOMETRISCHEN APPARATE.

Einleitung.

Es giebt wohl kaum einen Zweig der praktischen Astronomie, welcher so lange und so gründlich vernachlässigt worden ist, wie die Lichtmessung der Gestirne. Obgleich bereits die Alten die hohe Bedeutung der Helligkeitsbestimmungen für die Erweiterung der menschlichen Vorstellung von der Anordnung des Weltalls erkannt hatten, existiren aus dem Alterthum doch nur Lichtschätzungen, und es ist kein Versuch bekannt geworden, Apparate zur genaueren Messung der Lichtquantitäten zu construiren. Auch in den späteren Jahrhunderten und durch das ganze Mittelalter hindurch ist auf diesem Gebiete so gut wie Nichts geschehen. Selbst die Erfindung des Fernrohres, die auf allen übrigen Gebieten der Astronomie einen gewaltigen Umschwung hervorgebracht hat, ist in dieser Beziehung spurlos vorübergegangen. Noch im 18. Jahrhundert, als Bouguer und Lambert ihre grundlegenden Werke über die theoretische Photometrie verfassten, waren die instrumentellen Hilfsmittel, welche diesen Männern zu Gebote standen, von der allerprimitivsten Art. Die Photometer, deren sich Bouguer und Lambert bedienten, gestatteten nur die Vergleichung von ziemlich hellen Lichtquellen. Am Himmel liessen sie sich allenfalls auf Sonne und Mond anwenden, aber die Messung selbst der allerhellsten Fixsterne blieb damit unausführbar. Erst im gegenwärtigen Jahrhundert hat sich eine erfreuliche Wandlung vollzogen. Arago, der jüngere Herschel und Steinheil haben die erste Anregung zur Construction brauchbarer Instrumente für die Himmelsphotometrie gegeben, und es gebührt diesen Männern das Verdienst, diesem arg vernachlässigten und fast abgestorbenen Zweige der Astronomie neues Leben eingeflösst zu haben. Seit dieser Zeit ist ein Stillstand in den Bestrebungen zur Vervollkommnung der photometrischen Apparate nicht mehr eingetreten. Erst allmählich, dann immer schneller und allgemeiner ist das Interesse für diesen Gegenstand bei den Astronomen gewachsen, und namentlich die letzten Jahrzehnte haben uns mit einer reichen Fülle von nützlichen Instrumenten zur Lichtmessung der Gestirne beschenkt. Nicht wenig hat zu dieser Entwicklung der Umstand beigetragen, dass die grossartigen

Fortschritte der Technik in Bezug auf das Beleuchtungswesen nothwendig die Einführung exacter photometrischer Methoden bedingten und einen regen Erfindungseifer bei Physikern und Technikern hervorriefen. Wenn auch die meisten der für die Zwecke des praktischen Lebens construirten Photometer, deren Zahl bereits zu einer sehr bedeutenden angewachsen ist, nicht unmittelbar zu Messungen am Himmel verwendbar sind, so ist doch manche glückliche Idee, mancher praktische Kunstgriff auch der Himmelsphotometrie zu Gute gekommen.

Noch sind wir weit von der Erreichung des Endzieles entfernt, das uns für die Construction eines vollkommenen Photometers vorschwebt. Die Genauigkeit, die mit den jetzigen Hilfsmitteln erreichbar ist, bleibt verhältnissmässig weit hinter den Ansprüchen zurück, welche die Astronomie auf anderen Gebieten zu stellen pflegt, und ist unter allen Umständen nicht genügend, um subtile Fragen, wie sie z. B. bei dem Problem der Planetenbeleuchtung, bei den Lichterscheinungen der veränderlichen Sterne u. s. w. auftreten, zu entscheiden. So lange es nicht gelingt, die Helligkeit eines Gestirnes bis auf wenige Hundertstel Grössenklassen genau zu bestimmen, fehlt es für die Lösung einer grossen Zahl von photometrischen Aufgaben an den sicheren Grundlagen.

Die meisten bisher gebräuchlichen Astrophotometer verlangen in letzter Instanz das Urtheil des menschlichen Auges; sie messen nicht die objective Helligkeit der betrachteten Lichtquelle, sondern sie erleichtern nur die Ermittlung der physiologischen Intensität. Es ist klar, dass auf diese Weise von vornherein allen Photometern infolge der Unvollkommenheit des Sehorgans eine Genauigkeitsgrenze gesetzt ist, welche unter keinen Umständen, auch wenn der Messapparat und die demselben zu Grunde liegenden photometrischen Methoden noch so sehr verfeinert würden, überschritten werden kann. Durch lange Übung lässt sich allerdings das Auge bis zu einem gewissen Grade schulen, und wer sich viel mit photometrischen Beobachtungen beschäftigt hat, wird z. B. feinere Lichtunterschiede wahrzunehmen vermögen, als ein Anfänger auf diesem Gebiete. Aber die natürlichen Mängel des Auges, die namentlich bei der Vergleichung verschiedenfarbiger Lichtquellen hervortreten, stellen der Erreichung der allerhöchsten Genauigkeit für immer eine unüberwindliche Schranke entgegen. Kein Auge ist im Stande, die relative Stärke zweier merklich von einander verschiedenen Lichteindrücke zahlenmässig festzustellen, ebenso wenig wie es nach einem längeren Zeitraume mit Sicherheit zu constatiren vermag, ob eine Lichtquelle ihre Intensität bis zu einem gewissen Grade bewahrt hat. Was das Auge, namentlich bei einiger Übung, mit Zuverlässigkeit leisten kann, das ist die Beurtheilung der Gleichheit zweier nahe bei einander befindlichen gleichzeitig wahr-

genommenen Lichteindrücke. Dabei müssen aber noch eine Reihe von Bedingungen erfüllt sein. In erster Linie ist es erwünscht, dass die zu vergleichenden Gegenstände dieselbe scheinbare Grösse besitzen und in allen Theilen gleichmässig erleuchtet erscheinen. Die Vergleichung eines leuchtenden Punktes mit einer leuchtenden Fläche ist gänzlich unausführbar, und die Beurtheilung zweier Sterne wird um so unsicherer, je mehr die Durchmesser der Diffractionsscheibchen derselben von einander verschieden sind. Zuverlässiger als Punktvergleichen sind Flächenvergleichen; doch ist es unbedingt nothwendig, dass die beiden Flächen genau in einer geraden Linie oder, was Manche für wünschenswerther halten, in irgend einer scharf begrenzten Curve aneinander stossen, so dass im Falle der vollkommenen Helligkeitsgleichheit die Grenzlinie ganz verschwindet. Gelingt es nicht, den beiden Lichtquellen dieselbe scheinbare Grösse zu geben, so beurtheilt man in vielen Fällen mit Vortheil ihre Intensität nach dem Grade der Erleuchtung, die sie auf einer weissen Fläche hervorrufen, indem man nach den Grundgesetzen der Photometrie annimmt, dass zwei Lichtquellen dieselbe Intensität haben, wenn sie auf einer weissen Fläche, in gleichen Entfernungen und bei denselben Incidenz- und Emanationswinkeln, denselben Beleuchtungseffect hervorbringen. Durchaus erforderlich ist es ferner, dass die zu vergleichenden Lichteindrücke weder allzu intensiv noch allzu schwach sind; im ersten Falle werden die Sehnerven zu stark gereizt, und es tritt eine Abstumpfung ein, die ein richtiges Urtheil erschwert, im anderen Falle muss sich das Auge unter Umständen übermässig anstrengen. Endlich ist für eine sichere Beurtheilung der Gleichheit zweier Lichtquellen die gleiche Färbung derselben unerlässlich. Je auffallender der Farbenunterschied ist, desto schwieriger wird die Entscheidung des Auges, und desto mehr weichen die Urtheile verschiedener Beobachter von einander ab.

Aus dem Vorgehenden folgt, dass, solange das menschliche Auge bei der Lichtmessung hervorragend betheilig ist, die Hauptaufgabe für die Construction brauchbarer Photometer sich darauf reducirt, Mittel ausfindig zu machen, um die lebendige Kraft einer Lichtquelle in messbarer Weise so weit zu verändern, bis dieselbe auf der Netzhaut des Auges denselben physiologischen Eindruck hervorbringt, wie eine andere Lichtquelle. Wenn dabei ein solches Photometer noch möglichst viele der oben angeführten Bedingungen erfüllt, so wird es um so vollkommener seinem Zwecke entsprechen.

Die zahlreichen Methoden, welche im Laufe der Zeit in dieser Hinsicht vorgeschlagen worden sind, lassen sich in die folgenden Hauptkategorien zusammenfassen.

1. Anwendung der Fundamentalsätze der Photometrie, insbesondere des Gesetzes vom Quadrate der Entfernung. Die bekanntesten und verbreitetsten Lichtmessungsapparate, wie das bereits von Lambert, später wieder von Rumford benutzte Schattenphotometer, das Ritchie'sche Photometer und das Bunsen'sche Fettfleckphotometer beruhen auf dieser Methode. Speciell für die Astronomie sind von grosser Bedeutung geworden das Herschel'sche Astrometer und das Steinheil'sche Prismenphotometer, bei denen die Gleichheit der Lichteindrücke auf der Netzhaut des Auges durch Änderung der Distanzen hervorgebracht wird.

2. Veränderung der Öffnung des Fernrohrobjectivs oder des aus dem Objectiv austretenden Strahlenkegels. Diese Methode setzt voraus, dass die Intensität proportional der freien Öffnungsfläche ist. Die Zahl der Photometer, bei denen man dieses Princip zur Anwendung gebracht hat, ist ungemein gross. Schon Bouguer hat sich desselben bedient, und seitdem sind bis in die neueste Zeit alle nur denkbaren Formen von Blendenöffnungen und zahlreiche mechanische Vorrichtungen zur messbaren Änderung dieser Öffnungen versucht worden, obgleich vom theoretischen Standpunkte aus nicht unwichtige Bedenken gegen diese Methode erhoben werden können.

3. Schwächung des Lichtes durch absorbirende Medien. Dabei wird vorausgesetzt, dass gleich grosse Schichten der benutzten Substanz einen gleich grossen Procentsatz des auffallenden Lichtes auslöschten. Diese Methode hat fast noch grössere Verbreitung gefunden als die vorangehende, von den primitivsten Versuchen an, wo die Schwächung durch Übereinanderlegen von Glasplatten oder Papierscheiben oder mittelst absorbirender Flüssigkeitsschichten hervorgebracht wurde, bis zu dem relativ hohen Grade der Vervollkommnung, welcher in den neuesten Formen des Keilphotometers erreicht worden ist.

4. Zurückwerfung des Lichtes an spiegelnden Flächen. Der Intensitätsverlust wird dabei entweder auf rein empirischem Wege mittelst irgend einer anderen photometrischen Methode bestimmt oder durch Rechnung nach den bekannten Fresnel'schen Formeln ermittelt. In der Astrophotometrie sind am häufigsten spiegelnde Kugeln zur Verwendung gekommen.

5. Das Princip der rotirenden Scheiben. Dieselben sind mit sectorförmigen Ausschnitten versehen, deren Winkelöffnung sich messbar verändern lässt. Wird eine solche Scheibe zwischen einer Lichtquelle und dem Auge in schnelle Rotation versetzt, so entsteht bekanntlich auf der Netzhaut ein continuirlicher Lichteindruck, der um so schwächer ist, einen je kleineren Raum die offenen Ausschnitte auf der ganzen Scheibe einnehmen. Besonders in der technischen Photometrie ist dieses Princip

ungemein häufig zur Anwendung gekommen; doch ist es auch für die Lichtmessung der Gestirne nutzbar gemacht worden, hauptsächlich durch Secchi, Langley und Abney.

6. Anwendung der Polarisation und Interferenz des Lichtes. Keine Methode hat sich speciell für die Himmelsphotometrie so nutzbringend gezeigt wie diese, seit Arago zuerst auf sie aufmerksam gemacht hat. Die vollkommensten und am meisten benutzten Messapparate, unter diesen besonders das Zöllner'sche Astrophotometer und das Pickering'sche Meridianphotometer basiren auf diesem Princip. Sie haben in erster Linie die bedeutenden Fortschritte ermöglicht, welche die praktische Astrophotometrie in den letzten Jahrzehnten gemacht hat.

Durch eine der im Vorgehenden flüchtig skizzirten Methoden ist es nun jederzeit möglich, die Helligkeit einer Lichtquelle messbar so weit zu verändern, bis unser Auge von ihr denselben Eindruck empfängt, wie von einer zweiten mit ihr zu vergleichenden Lichtquelle. Bei einem Theile der für die Messungen am Himmel bestimmten Photometer kann auf diese Weise entweder direct das Helligkeitsverhältniss zweier Sterne ermittelt werden, oder es kann auch, was häufig vorzuziehen ist, jedes Gestirn einzeln mit einer künstlichen Lichtquelle verglichen werden.

Wesentlich davon verschieden ist eine Classe von Photometern, bei denen mit Hülfe einer der oben aufgezählten Methoden die Helligkeit eines Gestirnes bis zur vollständigen Auslöschung abgeschwächt wird, so dass gar kein Lichteindruck mehr auf der Netzhaut des Auges hervorgebracht wird. Auf den ersten Blick könnte es scheinen, als ob dieses Verfahren wesentliche Vortheile böte, indem es unter der Voraussetzung, dass das Verschwinden eines Lichteindruckes für jedes menschliche Auge an eine bestimmte unveränderliche Grenze gebunden sei, gewissermassen absolute Helligkeitsmessungen gestatten würde. Indessen ist dies wegen der Unvollkommenheit des Auges keineswegs der Fall, und es kommt streng genommen auch bei diesem Verfahren in letzter Linie auf die Beurtheilung der Gleichheit zweier Lichteindrücke an, indem der Moment fixirt wird, wo das betrachtete Gestirn sich nicht mehr von dem umgebenden Himmelsgrunde unterscheidet.

Bei der im Folgenden versuchten Classificirung der photometrischen Apparate werde ich diese beiden soeben erwähnten Arten der Beobachtung streng von einander trennen. Im ersten Capitel sollen diejenigen Apparate behandelt werden, welche auf dem Princip der Auslöschung beruhen, im zweiten Capitel diejenigen, bei denen direct die Gleichheit zweier leuchtenden Punkte oder Flächen beurtheilt wird. Die erste Classe zeichnet sich im Allgemeinen durch grössere Einfachheit der Construction vor der anderen aus, während sie in Bezug auf die zu erreichende

Genauigkeit hinter ihr zurücksteht. Bei beiden Classen von Photometern wird es sich empfehlen, noch eine besondere Gruppierung vorzunehmen, und zwar nach den verschiedenen oben angeführten Hauptmethoden, welche zur messbaren Veränderung der lebendigen Kraft einer Lichtquelle benutzt werden.

Im dritten Capitel sollen dann die verschiedenen Formen der Spectralphotometer besprochen werden, bei denen die zu untersuchenden Lichtquellen vor der Vergleichung in ihre einzelnen Strahlengattungen zerlegt werden, und im letzten Capitel sollen endlich noch einige Formen von Instrumenten Erwähnung finden, bei denen das Licht eine mechanische Wirkung hervorbringt und das Urtheil des menschlichen Auges entbehrlich ist. Dabei wird namentlich auf die Anwendung der Photographie zu photometrischen Messungen hinzuweisen sein.

Ogleich es mein Bestreben gewesen ist, eine möglichst vollständige Übersicht über alle zu Lichtmessungen am Himmel benutzten Apparate zu geben, so wird mir doch bei der grossen Fülle derselben und bei dem bisherigen Mangel einer geordneten Zusammenstellung auf diesem Gebiete ein oder das andere Photometer entgangen sein. Manche Apparate, die sich in der Praxis bisher wenig eingebürgert haben oder fast ausschliesslich auf technischem Gebiete verwendet worden sind, sollen im Folgenden nur flüchtig berührt oder nur dann etwas näher beschrieben werden, wenn sie in irgend einer Beziehung besonderes Interesse bieten. Eingehende Berücksichtigung soll in erster Linie denjenigen Photometern zu Theil werden, die mit Erfolg zu umfassenderen Beobachtungsreihen verwendet worden sind. Die Vortheile und Mängel derselben verdienen eine kritische Beleuchtung, und es wird nicht überflüssig erscheinen, wenn hier und da praktische Winke zur vortheilhaftesten Handhabung dieser Apparate eingestreut werden, und wenn nebenbei auch die theoretischen Gesichtspunkte, welche bei ihnen in Betracht kommen, wenigstens in Kürze erörtert werden.

Capitel I.

Photometer, bei denen das Verschwinden von Lichteindrücken beobachtet wird.

Bevor wir auf die einzelnen Apparate dieser Gattung näher eingehen, sollen einige Punkte von allgemeinem Interesse hervorgehoben werden. Alle hierher gehörigen Instrumente stellen an die Urtheilfähigkeit des Auges ganz besonders hohe Anforderungen. Die Empfindlichkeit des Auges ist einem beständigen Wechsel unterworfen, und es ist gerade bei dieser Methode eine besonders lange Übung erforderlich, um zu brauchbaren Messungsergebnissen zu gelangen. Wer zum ersten Male versucht, das Bild eines Sternes in einem Fernrohre zum Verschwinden zu bringen, wird sicher kein günstiges Urtheil über die Methode abgeben. Jeder wird anfangs die Erfahrung machen, dass, wenn ein Stern bereits ausgelöscht scheint, häufig nur ein kurzes Schliessen und Wiederöffnen des Auges genügt, um denselben noch deutlich zu erkennen, und ganz besonders schwierig wird die Beurtheilung, wenn die Stelle des Gesichtsfeldes, wo die Auslöschung stattfinden soll, nicht durch eine besondere Einrichtung kenntlich gemacht ist. Auf diesen Punkt sollte bei der Construction jedes auf dem Princip des Verschwindens beruhenden Photometers in erster Linie geachtet werden. Bei der Methode der Gleichmachung zweier Lichteindrücke wird die Fixirung der richtigen Einstellung dadurch wesentlich erleichtert, dass man nach zwei Seiten einen Ausschlag geben und das eine Object abwechselnd heller und schwächer machen kann als das andere. Bei der Auslöschungsmethode dagegen nähert man sich immer nur der einen unteren Grenze und hat keinen sicheren Anhalt zur Beurtheilung, wie weit man eventuell diese Grenze bereits überschritten hat.

Bei längerer Übung gestaltet sich die Sachlage allerdings etwas günstiger. Jeder Beobachter gewöhnt sich daran, einen bestimmten minimalen Helligkeitsgrad als Verschwindungspunkt aufzufassen, und es ist bemerkenswerth, mit welcher Genauigkeit dieser Moment (natürlich bei gleichen äusseren Umständen) immer wieder erreicht wird. Bei verschiedenen Beobachtern können selbstverständlich grosse Unterschiede vorkommen, theils infolge grösserer oder geringerer Sehschärfe, theils infolge der von jeder Person willkürlich getroffenen Wahl des zu fixirenden Momentes. In Potsdam sind von Kempf und mir besondere

Beobachtungsreihen zur Bestimmung der persönlichen Differenz an Keilphotometern angestellt worden, und es hat sich dabei mit bemerkenswerther Constanz während eines längeren Zeitraumes der ziemlich erhebliche Betrag von ungefähr einer halben Grössenklasse ergeben.

Wenn nun aber auch für jeden Beobachter ein bestimmter Grenzwert der Auffassung existirt, so darf doch nicht übersehen werden, dass, zumal bei einer längeren Beobachtungsreihe, dieser Grenzwert nicht fortdauernd innegehalten wird. Bei Beginn der Messungen, wo das Auge zwar noch frisch, aber durch die äussere Helligkeit beeinflusst ist, wird die Auslöschung zu zeitig geschehen. Dann wächst die Empfindlichkeit des Auges und erreicht ziemlich bald den Höhepunkt, auf dem sie mit kleinen zufälligen Schwankungen bleibt, bis eine gewisse Ermüdung eintritt, infolge deren der Auslöschungspunkt ganz allmählich wieder herabsinkt. Dieser Verlauf der Empfindlichkeitscurve scheint für alle Beobachter typisch zu sein; nur lässt sich die Zeitdauer, innerhalb welcher die Empfindlichkeit nahezu constant bleibt, nicht mit Sicherheit angeben. Es wird dies ganz wesentlich von der jedesmaligen Disposition des Beobachters, sowie von einer Anzahl äusserer Umstände abhängen, und es ist klar, dass diese Unbeständigkeit und vor Allem die übermässige Anstrengung, die dem Auge zugemuthet wird, die Hauptschwächen der Auslöschungsmethode bilden. Es kann nicht dringend genug empfohlen werden, die einzelnen Messungsreihen nicht allzu lange (keinesfalls mehr als 30 Minuten) auszudehnen und vor Beginn einer neuen Reihe das Auge eine Zeit lang, womöglich im Finstern, ausruhen zu lassen, damit es die frühere Empfindlichkeit wiedererlangen kann. Aus dem oben charakterisirten allgemeinen Verlaufe der Empfindlichkeitscurve ergeben sich noch die folgenden speciellen Regeln.

Die ersten Einstellungen jeder grösseren Beobachtungsreihe, die stets zu niedrige Auslöschungspunkte geben, sollten nicht zur Bearbeitung verworfen werden, namentlich dann nicht, wenn das Auge vorher einer hellen Beleuchtung ausgesetzt gewesen ist. Ferner ist es unter keinen Umständen rathsam, weit auseinander liegende Messungen mit einander zu combiniren. Handelt es sich um die Vergleichung zweier Objecte, so ist es am besten, die Einstellungen des einen zwischen die des anderen einzuschieben, und wenn mehrere Objecte in Betracht kommen, so sollte das Augenmerk stets auf eine möglichst symmetrische Anordnung der Einstellungen gerichtet sein.

Auf das Strengste ist darauf zu achten, dass während der Messungen jedes fremde Licht von dem Auge fern gehalten wird. Die Beobachtungen geschehen am besten in vollkommen dunklem Raume, und es muss, wenn irgend angängig, vermieden werden, dass der Beobachter

die Ablesungen und Aufzeichnungen selbst besorgt. Wenn man gezwungen ist, nach jeder Auslöschung auf eine erleuchtete Scala oder einen Theilkreis oder auf ein helles Blatt Papier zu blicken, so ist eine beständige Accommodation des Auges nothwendig, welche nicht nur zeitraubend ist, sondern die Beobachtungen unsicher macht. Im Interesse brauchbarer Messungen muss es als eine unerlässliche Bedingung hingestellt werden, dass dem Beobachter entweder ein Gehülfe zum Ablesen und Aufnotiren zur Seite steht, oder dass der Messapparat mit einer geeigneten Registrirvorrichtung versehen ist.

Eine unvermeidliche Fehlerquelle bei allen auf dem Princip der Auslöschung beruhenden Photometern bildet die veränderliche Helligkeit des Grundes, auf welchen sich die beobachteten Himmelsobjecte projectiren. Wir können mit blossem Auge am Tage die Sterne nicht sehen, weil die Intensitätsdifferenz zwischen Stern und umgebendem Himmelsgrunde im Verhältniss zur Helligkeit des letzteren ausserordentlich klein ist. Mit Hülfe des Fernrohres gelingt es wenigstens die helleren Sterne am Tage wahrzunehmen, weil durch die vergrössernde Kraft desselben das Licht des Grundes merklich abgeschwächt und das erwähnte Verhältniss daher vergrössert wird; aber die schwächeren Sterne, die bei Nacht noch mit Leichtigkeit sichtbar sind, können auch durch das Fernrohr nicht am Tage von dem Himmelsgrunde unterschieden werden. Alles dieses folgt von selbst aus dem Fechner'schen psychophysischen Grundgesetze. Ist h die eigene Helligkeit eines Sternes, die er bei ganz dunklem Grunde für unser Auge haben würde, so wird, wenn die Intensität des Grundes g ist, die Stelle, wo der Stern steht, für unser Auge die Gesammthelligkeit $g + h$ besitzen. Die entsprechende Empfindungsdifferenz dE zwischen Stern und Grund wird daher nach dem Fechner'schen Gesetze ausgedrückt sein durch die Gleichung (siehe Seite 14):

$$dE = c \log \frac{g + h}{g}.$$

Je grösser g ist im Verhältniss zu h , desto mehr nähert sich der Bruch $\frac{g + h}{g}$ dem Grenzwerte 1, und die Empfindungsdifferenz dE wird Null, d. h. der Stern unterscheidet sich nicht mehr vom Grunde. Nach den bisherigen Untersuchungen braucht das Verhältniss von g zu h gar nicht einmal sehr gross zu sein, um schon das Verschwinden hervorzubringen. Wie bereits früher mitgetheilt wurde, kann unter besonders günstigen Bedingungen noch ein Helligkeitsunterschied von ungefähr $\frac{1}{100}$ empfunden werden, doch gründet sich dieser Werth fast nur auf Beobachtungen über das Verschwinden von ausgedehnten Lichtflächen. Bei Lichtpunkten

scheint die Grenze noch viel niedriger zu sein, und es braucht, wie einige Beobachter behaupten, die Helligkeit des Grundes nur ungefähr 40 Mal grösser zu sein als die ursprüngliche Intensität des Sternes, um eine Unterscheidung zwischen Grund und Stern unmöglich zu machen. Hat man zwei Sterne von der gleichen objectiven Helligkeit h , die sich aber auf verschieden hellen Grund von der Intensität g_1 resp. g_2 projectiren, so werden nach dem Fechner'schen Gesetze die Empfindungsunterschiede zwischen den Sternen und dem Grunde ausgedrückt durch:

$$dE_1 = c \log \frac{h + g_1}{g_1}$$

und

$$dE_2 = c \log \frac{h + g_2}{g_2},$$

mithin:

$$dE_1 - dE_2 = c \log \frac{1 + \frac{h}{g_1}}{1 + \frac{h}{g_2}}.$$

Ist nun $g_1 > g_2$, so wird die rechte Seite negativ, d. h. $dE_2 > dE_1$, und es folgt, was von vornherein auch ganz selbstverständlich scheint, dass wenn der eine Stern auf dem Grunde g_1 gerade verschwindet, der andere auf dem schwächeren Grunde g_2 noch sichtbar ist. Bei astronomischen Beobachtungen kommen allerdings im Allgemeinen keine sehr auffallenden Helligkeitsunterschiede des Grundes vor, und da bei der Abschwächung der Sterne die Intensität des Grundes ebenfalls vermindert wird, so erfolgt gewöhnlich, namentlich bei den helleren Objecten, die eigentliche Auslöschung auf vollkommen dunklem Grunde. In mondlosen Nächten ist infolge dessen keine merkliche Beeinflussung der Beobachtungen durch verschiedene Helligkeit des Grundes zu befürchten; dagegen dürfen auf keinen Fall Messungen in der Dämmerung oder bei Mondschein mit Messungen in dunklen Nächten combinirt werden, und ebenso wenig ist es gestattet, bei heller Beleuchtung schwache und helle Sterne mit einander zu vergleichen oder Beobachtungen in unmittelbarer Nähe des Mondes mit solchen an anderen weit davon entfernten Stellen des Himmels zu vereinigen.

Durch die vorangehenden Bemerkungen ist der Bereich, innerhalb dessen die Auslöschungsmethode mit Vortheil verwendbar sein dürfte, ziemlich genau fixirt. Wie man sieht, sind die Grenzen eng genug, aber die bisherigen Erfahrungen haben gezeigt, dass bei strenger Befolgung der angedeuteten Vorsichtsmassregeln sehr brauchbare Resultate erhalten werden können.

Von den in der Einleitung erwähnten sechs Hauptmethoden zur messbaren Veränderung der lebendigen Kraft einer Lichtquelle sind bei der Construction der bisher bekannten Auslöschungsphotometer fast ausschliesslich die zweite und dritte zur Verwendung gekommen, während die übrigen nur gelegentlich mit zu Hülfe gezogen wurden. Wir unterscheiden daher im Folgenden nur die beiden Hauptabtheilungen: 1) Auslöschung durch Blendvorrichtungen und 2) Auslöschung durch absorbirende Medien. Ein einzig in seiner Art dastehendes Auslöschungsphotometer, das Parkhurst'sche, welches streng genommen in keine der Hauptkategorien hineinpasst, soll im Anschlusse an die erste Abtheilung besprochen werden.

1. Auslöschung des Lichtes durch Blendvorrichtungen.

Wenn man eine leuchtende Fläche mit dem blossen Auge betrachtet, so entsteht auf der Netzhaut ein Bild dieser Fläche, welches sich je nach der Ausdehnung derselben über eine grössere oder geringere Anzahl von Netzhautelementen ausbreitet. Jedes dieser Elemente empfängt eine Reizung, und man nimmt gewöhnlich an, dass der Reizstärke auch die im Nervensystem hervorgerufene Empfindungsstärke proportional ist. Dabei ist natürlich abgesehen von einer etwaigen Verschiedenheit der Empfindlichkeit einzelner Netzhautelemente oder ganzer Gruppen derselben.

Unter der scheinbaren Helligkeit einer leuchtenden Fläche versteht man die auf ein einzelnes Netzhautelement durch das optische System des Auges übergeführte Lichtmenge oder, entsprechend den Definitionen im ersten Abschnitte, die auf der Netzhaut hervorgebrachte Beleuchtung, mit anderen Worten die gesammte ins Auge gelangende Lichtquantität dividirt durch die Bildfläche auf der Netzhaut. Nun lässt sich diese Bildfläche, die wir b nennen wollen, nach den Lehren der geometrischen Optik ausdrücken durch $k \frac{F}{r^2}$, wo k ein Proportionalitätsfactor ist, F die Grösse der leuchtenden Fläche und r die Entfernung derselben vom Auge (streng genommen von dem vorderen Knotenpunkte des Auges) bedeutet. Ferner ist die gesammte Lichtmenge L , welche auf die Netzhaut gelangt, wenn man die absorbirende Wirkung der brechenden Medien des Auges ausser Acht lässt, identisch mit derjenigen, welche auf die vordere Öffnung des Auges, die Pupille, auffällt, und diese lässt sich nach dem Früheren mit hinreichender Genauigkeit ausdrücken durch $Jp \frac{F}{r^2}$, wo p die Pupillenöffnung und J die der Fläche

innewohnende Leuchtkraft ist. Für die scheinbare Helligkeit h der Fläche ergibt sich daher der Werth:

$$h = \frac{L}{b} = KJp.$$

Daraus folgt, dass die scheinbare Helligkeit proportional der Pupillenöffnung ist und ganz unabhängig bleibt von der Entfernung der leuchtenden Fläche vom Auge. Bei unveränderter Pupillenöffnung ist also die Helligkeit einer leuchtenden Fläche in allen Entfernungen constant, vorausgesetzt natürlich, dass die Entfernung nicht so gross ist, dass jeder Eindruck der Flächenausdehnung verschwindet.

Ist dies letztere der Fall und erblickt das Auge also statt einer leuchtenden Fläche einen leuchtenden Punkt, so verhält sich die Sache allerdings wesentlich anders. Das Bild auf der Netzhaut ist dann ebenfalls ein Punkt und daher klein im Vergleich zu dem minimalsten erregbaren Flächenstücke der Netzhaut. Es kann in diesem Falle von einer Beleuchtung nicht die Rede sein, und der im Auge hervorgebrachte Reiz oder die Bildhelligkeit ist der gesammten auf die Netzhaut oder auf die Pupille gelangenden Lichtmenge proportional, d. h. also nicht nur von der Öffnung der Pupille, sondern auch von der Entfernung abhängig. Es ist schon früher auf diesen Unterschied zwischen Flächen- und Punkthelligkeit hingewiesen worden.

Bei den meisten photometrischen Apparaten kommt ausser dem Auge noch irgend ein dioptrisches System in Betracht, und in der Astronomie speciell wird es sich um die Wirkungsweise des Gesamtsystems »Fernrohr und Auge« handeln.

Es sei df ein der Fernrohraxe nahes, zu ihr senkrecht stehendes Element einer leuchtenden Fläche, J die spezifische Leuchtkraft desselben, dann fällt auf die erste Fläche des Objectivs, deren Grösse o sein möge, die Lichtmenge $Q = \frac{Jdf o}{r^2}$, wenn r der Abstand der Fläche vom Objectiv (oder richtiger von der ersten Hauptebene des Objectivs) ist. Nimmt man keine Rücksicht auf das in dem Linsensysteme des Objectivs durch Reflexion und Absorption verloren gehende Licht und vernachlässigt zunächst auch den Einfluss der Beugung, so geht diese Lichtmenge Q unvermindert auf das vom Objectiv entworfene Bild, dessen Flächeninhalt df' sein möge, über. Man kann sich nun das Bild als selbstleuchtendes Object vorstellen, welches sowohl nach vorwärts als rückwärts Licht ausstrahlt, und es würde daher, da dieselben Lichtstrahlen auftreten, nach dem Objectiv die gleiche Lichtmenge gelangen, wie von dem leuchtenden Elemente df selbst. Nennt man also J'

die spezifische Leuchtkraft des Bildes, r' seinen Abstand vom Objectiv oder von der zweiten Hauptebeue desselben, so ist auch $Q = \frac{J' df' o}{r'^2}$ und folglich:

$$\frac{J'}{J} = \frac{df}{r^2} \frac{r'^2}{df'}$$

Nun besteht aber nach den Sätzen der geometrischen Optik für ein beliebiges System brechender sphärischer Flächen die Relation:

$$\frac{df}{r^2} F^2 = \frac{df'}{r'^2} F'^2,$$

wo F und F' die Hauptbrennweiten des Systems, erstere nach dem Objectraume, letztere nach dem Bildraume zu gerechnet, vorstellen. Da aber diese Brennweiten auch proportional sind den Brechungsindices n und n' der beiden Medien, welche den Objectraum und den Bildraum füllen, so hat man:

$$\frac{J'}{J} = \frac{F'^2}{F^2} = \frac{n'^2}{n^2}.$$

In den meisten Fällen sind die Indices n und n' einander gleich, und es wird daher

$$J = J',$$

d. h. die Leuchtkräfte in conjugirten Punkten von Object und Bild sind einander gleich. Hat das leuchtende Object in allen Punkten dieselbe Leuchtkraft, so findet bei dem Bilde dasselbe statt. In Wirklichkeit geht allerdings durch Reflexion, Absorption etc. Licht verloren, und es wird daher J' fast immer etwas geringer sein als J . Eine Verstärkung der Leuchtkraft im Bilde kann durch ein optisches System unter keinen Umständen hervorgebracht werden.

Ist die leuchtende Fläche sehr weit vom Objective entfernt, so liegt das Bild in der Brennebene desselben. Die gesammte auf das Objectiv auffallende Lichtmenge ist proportional der Grösse der Objectivöffnung, also gleich ko ; die Bildgrösse ist proportional dem Quadrate der Brennweite F des Objectivs, also gleich cF^2 . Mithin ist die Lichtmenge, welche auf die Einheit der Bildfläche gelangt, oder, wie man auch sagt, die objective Flächenhelligkeit H des Brennpunktbildes ausgedrückt durch $K \frac{o}{F^2}$. Für ein zweites Objectiv mit der Öffnung o_1 und der Brennweite F_1 hat man die entsprechende objective Flächenhelligkeit

$$H_1 = K \frac{o_1}{F_1^2}.$$

Mithin ist:

$$H : H_1 = \frac{o}{F^2} : \frac{o_1}{F_1^2},$$

oder wenn man die Durchmesser d und d_1 der Objective einführt:

$$H : H_1 = \frac{d^2}{F^2} : \frac{d_1^2}{F_1^2}.$$

Wenn also das Verhältniss von Objectivdurchmesser zur Brennweite in zwei Fernröhren dasselbe ist, so haben die Brennpunktsbilder in beiden gleiche Flächenintensität.

Das vom Objectiv entworfene Bild wird nun mit dem System »Ocular und Auge« betrachtet, und es ist nach dem Früheren klar, dass die Helligkeit des auf der Netzhaut entstehenden Bildes oder die Beleuchtung der Netzhaut (in letzter Linie also auch die Empfindungsstärke) proportional sein wird der Öffnung des aus dem Ocular austretenden Strahlenbündels oder, wie man gewöhnlich sagt, der Grösse der Austrittspupille des optischen Systems¹⁾. Nennt man diese Grösse o' , und ist h die Helligkeit des mit dem Fernrohre gesehenen Netzhautbildes, während h_0 die Helligkeit des mit blossem Auge gesehenen Bildes sein möge, so hat man:

$$\frac{h}{h_0} = \frac{o'}{p}.$$

Ist die Austrittsöffnung des optischen Systems o' gleich der Augenpupille p , füllt also der aus dem System tretende Strahlencylinder gerade die Pupille aus, so wird $h = h_0$, d. h. das optische System vor dem Auge bringt in Bezug auf die Helligkeit des Netzhautbildes gar keine Änderung hervor. Dasselbe gilt auch noch, wenn $o' > p$ ist; denn dann wird die Augenpupille selbst die Stelle der Austrittsöffnung einnehmen. Ist dagegen $o' < p$, so wird auch $h < h_0$, das optische System bringt eine Abschwächung des Bildes auf der Netzhaut hervor. Vernachlässigt ist dabei immer der Lichtverlust beim Durchgange durch das optische System, welcher bewirkt, dass die vollständige Gleichheit von h und h_0 niemals erreicht werden kann.

Bei jedem astronomischen Fernrohre ist der Quotient $\frac{o}{o'}$, wenn o die wirksame Objectivöffnung ist, gleich dem Quadrate der linearen Vergrösserung v des Systems. Man hat also:

$$\frac{h}{h_0} = \frac{o}{p v^2}.$$

1) Die Austrittsöffnung des optischen Systems ist nicht zu verwechseln mit der Öffnung im Augendeckel des Oculars, welche bei richtig construirten Ocularen stets grösser sein sollte, als die erstere.

Bei Abbildung von Flächen durch ein astronomisches Fernrohr verhalten sich demnach die Helligkeiten der Netzhautbilder direct wie die freien Flächen des Objectivs und umgekehrt wie die Quadrate der Vergrößerungen. Die Grösse $\sqrt{\frac{o}{p}}$ nennt man die Normalvergrößerung des Systems; bezeichnet man dieselbe mit v_0 , so wird:

$$\frac{h}{h_0} = \left(\frac{v_0}{v}\right)^2.$$

Natürlich gilt diese Gleichung nur für Werthe von v , die grösser als v_0 sind; denn wenn die Vergrößerung kleiner ist als die Normalvergrößerung, so muss die Austrittspupille grösser sein als die Augenpupille, und in diesem Falle ist, wie wir oben gesehen haben, die Beleuchtung der Netzhaut stets gleich h_0 .

Bei Betrachtung von Sternen, die sich auf der Netzhaut als Lichtpunkte abbilden, wird die Helligkeit durch die gesammte Lichtmenge gemessen, welche durch das Fernrohr dem Auge zugeführt wird; sie verhält sich also zu der Helligkeit des direct mit blossem Auge gesehenen Sternes wie die freie Objectivöffnung zu der Pupillenöffnung; es ist demnach:

$$\frac{h}{h_0} = \frac{o}{p}.$$

Solange die Austrittsöffnung des Strahlenbündels nicht grösser als die Augenpupille, oder mit anderen Worten, solange die Vergrößerung des Fernrohrs nicht kleiner als die Normalvergrößerung ist, geht alles auf das Objectiv fallende Licht in das Auge, und die Helligkeit des Sternes im Fernrohr im Verhältniss zur Helligkeit mit blossem Auge bleibt constant gleich $\frac{o}{p}$. Wird dagegen die Vergrößerung des Fernrohrs kleiner als die Normalvergrößerung und mithin die Austrittspupille grösser als die Augenpupille, so gelangt nur ein Theil des gesammten Lichtes im Netzhautbilde zur Wirkung. Die Helligkeit des mit dem Fernrohr gesehenen Sternes im Verhältniss zur Helligkeit mit freiem Auge ist dann kleiner als $\frac{o}{p}$, und zwar ist sie, wie man leicht sieht, gleich dem Quadrate der jedesmaligen Vergrößerung.

Die Thatsache, dass bei dem System »Fernrohr und Auge« die Helligkeit des Netzhautbildes (sei es von einer Fläche oder von einem Sterne), falls die Vergrößerung constant bleibt, stets der freien Objectivöffnung proportional ist, lässt auf den ersten Blick die Ablendung des Objectivs oder, was dasselbe ist, des aus dem Objectiv austretenden Strahlen-

kegels als das einfachste und bequemste Mittel erscheinen, um die Intensität einer Lichtquelle in messbarer Weise zu verringern. Auf die Form der Blendenöffnung kommt es dabei nicht an, wenn es nur möglich ist, die Grösse der freien Fläche genau zu bestimmen. Freilich erheben sich sofort einige gewichtige Bedenken gegen diese Methode. Auf die Mitte des Objectivs fallen die Strahlen unter etwas anderen Winkeln auf als auf die Randpartien, und infolge dessen ist der Lichtverlust durch Reflexion am Rande grösser als in der Mitte. Dieser Nachtheil wird dadurch wieder einigermaßen aufgewogen, dass die Mittelstrahlen gewöhnlich eine etwas dickere Glasschicht zu durchlaufen haben als die Randstrahlen und daher etwas mehr Licht durch Absorption einbüssen. Auch kann diesem Übelstande, wie wir später sehen werden, dadurch zum Theil abgeholfen werden, dass man das Objectiv nicht von dem Rande nach der Mitte zu abblendet, sondern fächerartige Blenden anwendet. Trotzdem wird aber eine vollkommen gesetzmässige Lichtschwächung selten zu erzielen sein, weil kleine Fehler in der Glasmasse und vor Allem die niemals gänzlich zu beseitigende sphärische Aberration Unregelmässigkeiten in der Lichtwirkung der einzelnen Partien des Objectivs im Gefolge haben werden.

Ist schon aus diesen Gründen die Anwendung von Blenden zu photometrischen Messungen im Princip durchaus anfechtbar, so kommt noch als weiteres bedenkliches Moment der Einfluss der Beugung des Lichtes an den Rändern der Blendenöffnung hinzu. Auf die Bedeutung der Diffraction für Lichtmessungen ist bisher noch nicht mit dem nöthigen Nachdrucke hingewiesen worden, und es dürfte daher hier am besten Gelegenheit sein, auf diesen Punkt aufmerksam zu machen und zu zeigen, dass unter Umständen photometrische Messungen mittelst Verkleinerung der Objectivöffnung infolge der Beugungswirkung zu gänzlich falschen Resultaten führen können.

Die Theorie der Beugungserscheinungen, wie sie von Airy, Scherard, Knochenhauer, in neuerer Zeit besonders von H. Struve und Lommel entwickelt worden ist, soll dabei als bekannt vorausgesetzt werden, und der Einfachheit wegen soll nur der Fall der Ablendung vom Rande nach der Mitte zu bei Benutzung von kreisförmigen Blendenöffnungen etwas weiter verfolgt werden, weil diese Art der Ablendung in der Praxis wohl am häufigsten vorkommen dürfte. Bei anders gestalteten Öffnungen, beispielsweise dreieckigen, viereckigen u. s. w., welche ebenfalls mitunter in der Himmelsphotometrie zur Verwendung kommen, sind die theoretischen Entwicklungen im Allgemeinen etwas complicirter. Ferner soll hier nur von den Erscheinungen die Rede sein, welche sich bei der Betrachtung von Fixsternen durch das Fernrohr darbieten, während

die schwierigeren Verhältnisse, welche bei der Abbildung von leuchtenden Flächen auftreten, ausser Spiel gelassen werden können.

Wie schon Herschel bemerkt hatte, ist das mit hinreichend starker Vergrößerung in einem Fernrohr betrachtete Bild eines Fixsternes nicht ein wirklicher Punkt, sondern besteht aus einem kleinen kreisrunden Scheibchen, dessen Helligkeit von der Mitte nach dem Rande zu abnimmt und dessen Saum gefärbt erscheint, sowie aus einigen concentrischen, abwechselnd dunklen und hellen Ringen, von denen die letzteren ebenfalls gefärbt sind. Die Intensität der Ringe nimmt nach aussen zu sehr schnell ab, und die Zahl der überhaupt sichtbaren ist für Sterne eine sehr geringe. Es hängt dies von mehreren Umständen ab, in erster Linie natürlich von der Helligkeit des Sternes, dann von der angewandten Vergrößerung und der Helligkeit des Himmelsgrundes, auf den sich das Bild projectirt; im Allgemeinen wird man nur selten mehr als drei Ringe wahrnehmen können.

Ehe man diese Erscheinung richtig zu deuten wusste, nahm man an, dass die Fixsterne messbare Durchmesser besäßen, und versuchte, die Grössen derselben daraus zu bestimmen. Erst Airy wies mit Sicherheit darauf hin, dass die scheibenartigen Bilder der Sterne und die sie umgebenden Ringe eine unausbleibliche Folge der Beugung des Lichtes an den Rändern der Objectivöffnung seien, und dass sich nach den Fresnel'schen Untersuchungen die Lichtvertheilung innerhalb des Beugungsbildchens mit voller Strenge theoretisch berechnen lasse. Aus der Diffractionstheorie ergibt sich auch die Folgerung, dass bei Verkleinerung der Objectivöffnung der Durchmesser des centralen Beugungsscheibchens grösser werden muss, und zwar umgekehrt proportional dem Durchmesser der Öffnung, eine Folgerung, die mit den Resultaten der praktischen Messung in vollem Einklange ist.

Was die Lichtvertheilung innerhalb der in der Focalebene des Fernrohrs entstehenden Beugungsfigur anbelangt, so folgt für die spezifische Leuchtkraft L irgend eines von der optischen Axe um den Abstand ζ entfernten Punktes aus der Lommel'schen¹⁾ Theorie die Formel:

$$(1) \quad L = C\pi^2 r^4 \left[\frac{2}{x} J_1(x) \right]^2.$$

Hierin bedeutet C eine Constante, r den Radius der Objectivöffnung.

Ferner ist gesetzt $x = \frac{2\pi}{\lambda f} \zeta r$, wo f die Brennweite des Objectivs und λ

¹⁾ Lommel, Die Beugungserscheinungen einer kreisrunden Öffnung und eines kreisrunden Schirmchens theoretisch und experimentell bearbeitet (Abh. d. K. Bayer. Akad. d. Wiss. Math.-phys. Cl. Bd. 15, p. 227).

die Wellenlänge des zunächst als homogen angenommenen einfallenden Lichtes ist. Endlich ist $J_1(x)$ die bekannte Bessel'sche Function ersten Grades, nämlich:

$$J_1(x) = \frac{x}{\pi} \int_0^{\pi} \cos(x \cos \omega) \sin^2 \omega d\omega = \frac{x}{2} - \frac{x^3}{2^2 \cdot 4} + \frac{x^5}{(2 \cdot 4)^2 \cdot 6} - \frac{x^7}{(2 \cdot 4 \cdot 6)^2 \cdot 8} + \dots$$

Durch Substitution dieses Werthes in die obige Gleichung für L wird:

$$(2) \quad L = C\pi^2 r^4 \left\{ 1 - \frac{x^2}{2 \cdot 4} + \frac{x^4}{2 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 6} - \frac{x^6}{2 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 8} + \dots \right\}^2.$$

Die numerischen Werthe des Klammerausdruckes sind von Lommel in einer ausführlichen Tabelle für Werthe von x zwischen 0 und 20 von Zehntel zu Zehntel angegeben, und es lässt sich daher sehr leicht in jedem Falle die Intensitätsvertheilung im Beugungsbilde berechnen. Um einen bestimmten Fall zu fixiren, wollen wir ein Fernrohr von 100 mm Öffnung und 1500 mm Focallänge annehmen und voraussetzen, dass es sich um homogenes Licht von der mittleren Wellenlänge 0.0005 mm handelt; ferner wollen wir die Leuchtkraft im Mittelpunkte des Beugungsscheibchens als Einheit annehmen. Dann ergibt sich die Leuchtkraft in verschiedenen Abständen von der optischen Axe aus der folgenden kleinen Tabelle.

Vertheilung der Leuchtkraft im Beugungsbilde eines Sternes bei einem Fernrohr von 100 mm Öffnung und 1500 mm Brennweite.

Abstand von der Axe	Leuchtkraft	Abstand von der Axe	Leuchtkraft
0.000 mm	1.0000	0.013 mm	0.0160
0.001	0.9570	0.014	0.0105
0.002	0.8368	0.015	0.0046
0.003	0.6644	0.016	0.0008
0.004	0.4729	0.017	0.0001
0.005	0.2949	0.018	0.0015
0.006	0.1542	0.019	0.0033
0.007	0.0615	0.020	0.0041
0.008	0.0141	0.021	0.0036
0.009	0.0001	0.022	0.0021
0.010	0.0042	0.023	0.0007
0.011	0.0126	0.024	0.0000
0.012	0.0173	0.025	0.0002

Die drei ersten dunklen Beugungsringe haben die Abstände 0.0091, 0.0167 und 0.0243 mm vom Centrum, und das centrale Diffractionsscheibchen

hat demnach einen Durchmesser von 0.018 mm oder (vom Objectiv aus gesehen) von 2.5 Bogensekunden.

Wird das Objectiv des Fernrohrs kreisförmig abgeblendet, so nimmt die spezifische Leuchtkraft in der Mitte des Bildes, wie aus der obigen Formel unmittelbar hervorgeht, proportional der vierten Potenz des Halbmessers der freien Öffnung ab, gleichzeitig vergrößert sich aber die Dimension des Beugungsbildes proportional der Öffnung selbst, so dass also bei einer Abblendung des obigen Objectivs auf 50, 20 und 10 mm die Durchmesser der betreffenden centralen Beugungsscheiben, in Bogensekunden ausgedrückt, gleich 5".0, 12".5 und 25".0 werden.

In der Praxis kommt es weniger auf die Kenntniss der specifischen Leuchtkraft in irgend einem Punkte des Sternbildes an, als vielmehr auf die Ermittlung der gesammten Lichtmenge, welche von der ganzen Beugungerscheinung oder einem bestimmten Theile derselben ausgeht und sich auf einen gewissen Bezirk der Netzhaut ausbreitet. Denkt man sich in dem Beugungsbilde eine ringförmige Zone mit den Radien ζ und $\zeta + d\zeta$, so wird die Lichtquantität dQ , welche über diese Zone ausgebreitet ist, durch die Formel bestimmt sein:

$$dQ = 2\pi\zeta d\zeta L,$$

wenn L die spezifische Leuchtkraft im Abstände ζ vom Centrum bezeichnet. Die gesammte innerhalb eines Kreises mit einem beliebigen Radius ζ_1 eingeschlossene Lichtmenge des Beugungsbildes ist daher gegeben durch:

$$Q = 2\pi \int_0^{\zeta_1} L \zeta d\zeta.$$

Als Einheit ist die auf die ganze Beugungerscheinung vertheilte Lichtmenge oder, was dasselbe ist, wenn man von Absorption, Reflexion u. s. w. absieht, die auf die freie Objectivöffnung auffallende Lichtquantität zu betrachten.

Substituirt man den Werth von $\zeta = \frac{\lambda f}{2\pi r} x$ und den Werth von L aus Gleichung (1), so ergibt sich:

$$Q = 2C\lambda^2 f^2 \pi r^2 \int_0^{x_1} \frac{J_1^2(x)}{x} dx,$$

wo die Integrationsgrenze x_1 dem Werthe von ζ_1 entspricht.

Nach den Lommel'schen Untersuchungen über die Bessel'schen Functionen ist:

$$2 \int_0^{x_1} \frac{J_1^2(x)}{x} dx = 1 - J_0^2(x_1) - J_1^2(x_1).$$

Man hat also, wenn man noch $C\lambda^2 f^2$ durch eine einzige Constante C_1 ersetzt:

$$Q = C_1 \pi r^2 [1 - J_0^2(x_1) - J_1^2(x_1)].$$

Die numerischen Werthe der Functionen J_0 und J_1 sind für verschiedene Werthe von x von Lommel berechnet und in Tabellen zusammengestellt worden. Daraus ergeben sich für den obigen Klammerausdruck die folgenden Zahlenwerthe:

x	$1 - J_0^2(x) - J_1^2(x)$	x	$1 - J_0^2(x) - J_1^2(x)$
0	0.000	7	0.910
1	0.221	8	0.915
2	0.617	9	0.932
3	0.817	10	0.938
4	0.838	11	0.939
5	0.861	12	0.948
6	0.901		

Betrachtet man nur die Gesamtlichtmenge im centralen Scheibchen, die bei Sternbeobachtungen hauptsächlich in Frage kommt, so ergibt sich, da in diesem Falle $x = 3.8317$ zu setzen ist, für die Lichtquantität der Werth $0.84 C_1 r^2 \pi$; wenn man aber noch den ersten hellen Beugungsring hinzunimmt, so muss man für x den Werth 7.0156 wählen und findet für die gesammte Lichtmenge den Werth $0.91 C_1 r^2 \pi$.

Es sei nun das Objectiv so weit abgeblendet, dass der Radius der freien Öffnung ϱ statt r ist; dann vergrößert sich der Radius des centralen Beugungsscheibchens im Verhältniss von r zu ϱ . Die Gesamtlichtmenge in diesem Scheibchen ist dann $= 0.84 C_1 \varrho^2 \pi$, und es folgt also, dass die in den centralen Beugungsfiguren vereinigten Lichtquantitäten sich zu einander verhalten wie die zugehörigen freien Flächen des Objectivs. Würde das centrale Beugungsbild durch das System »Ocular und Auge« so auf die Netzhaut projicirt, dass es dort stets entweder einen kleineren Raum als ein einzelnes getrennt erregbares Element einnähme oder wenigstens immer dieselbe Dimension besässe, so wäre auch die Beleuchtung der Netzhaut (demnach auch angenähert die Empfindungsstärke) der freien Objectivfläche proportional, und die photometrische Methode der Ablendung wäre, was die Beugungswirkung des Fernrohrs anbetrifft, durchaus einwurfsfrei. Dies ist aber keineswegs der Fall;

vielmehr hängt die Grösse des Netzhautbildes wesentlich von der Vergrößerung des Fernrohrs ab. Ist f' die Brennweite des Oculars und k die hintere Knotenlänge des Auges, für welche man den Werth 15 mm annehmen kann, so verhalten sich die Durchmesser des Brennpunktbildes und des Netzhautbildes zu einander, wie f' zu k . Bei einem Fernrohre mit der Brennweite f und dem Objectivdurchmesser d wird der Durchmesser des centralen Brennpunktbeugungsbildes gemäss der Formel

$$2z = \frac{\lambda f}{r\pi} z, \text{ wo } z = 3.8317 \text{ zu setzen ist, ausgedrückt durch } 0.00122 \frac{f}{d}.$$

Der Durchmesser des Netzhautbildes wird daher gleich $0.00122 \frac{f}{d} \frac{k}{f'}$

oder, wenn man für k seinen Werth einsetzt und für $\frac{f}{f'}$ die Vergrößerung v des Fernrohrs einführt, gleich $0.0183 \frac{v}{d}$ mm.

Bei zwei verschiedenen Fernrohren nimmt die Beugungsfigur eines Sternes nur dann den gleichen Raum auf der Netzhaut ein, wenn die angewandten Gesamtvergrößerungen den Objectivdurchmessern proportional sind, und nur in diesem Falle verhalten sich also die Lichteindrücke des Sternes in beiden Instrumenten genau wie die freien Objectivflächen.

Dasselbe gilt bei der Abblendung eines und desselben Fernrohrs. Auch hier müsste für jede Blende die Gesamtvergrößerung entsprechend der Öffnung verändert werden, wenn man strenge photometrische Messungen ausführen wollte. Bleibt die Vergrößerung, wie es gewöhnlich geschieht, unverändert, so verbreitet sich bei starker Abblendung die Beugungserscheinung über eine grössere Anzahl von einzeln erregbaren Netzhautelementen aus, und die im Nervensystem hervorgerufene Lichtempfindung ist infolge dessen relativ zu schwach. Man gelangt also unter Umständen zu ganz falschen Resultaten.

Da der Durchmesser eines einzelnen Netzhautzapfens etwa 0.005 mm beträgt, so folgt noch aus dem obigen Werthe des Durchmessers des Netzhautbildes, dass das centrale Beugungsscheibchen dann ungefähr mit einem Netzhautzapfen coincidirt, wenn die Vergrößerungszahl etwa gleich dem vierten Theile des in Millimetern ausgedrückten Objectivdurchmessers ist.

Für ein Fernrohr von 100 mm Öffnung und 1500 mm Brennweite sind in der folgenden kleinen Tabelle die Durchmesser des centralen Beugungsscheibchens in der Brennebene sowohl als im Netzhautbilde zusammengestellt bei verschiedenen Abblendungen und verschiedenen Vergrößerungen, und zwar ausgedrückt in Millimetern.

Dimension der centralen Beugungsfigur eines Sternes bei einem Fernrohr von 100mm Öffnung und 1500mm Brennweite und kreisrunder Ablendung.

Durchmesser der freien Öffnung	Durchmesser des Brennpunktbildes	Durchmesser des Netzhautbildes			
		Vergröss. 10	Vergröss. 20	Vergröss. 30	Vergröss. 40
100	0.0183	0.0018	0.0037	0.0055	0.0073
90	0.0203	0.0020	0.0041	0.0061	0.0081
80	0.0229	0.0023	0.0046	0.0069	0.0092
70	0.0261	0.0026	0.0052	0.0078	0.0104
60	0.0305	0.0031	0.0061	0.0092	0.0122
50	0.0366	0.0037	0.0073	0.0110	0.0146
40	0.0458	0.0046	0.0092	0.0137	0.0183
30	0.0610	0.0061	0.0122	0.0183	0.0244
20	0.0915	0.0092	0.0183	0.0275	0.0366
10	0.1830	0.0183	0.0366	0.0549	0.0732

Wie man sieht, ist bei der schwächsten Vergrößerung, selbst wenn das Objectiv bis auf mehr als den halben Durchmesser abgeblendet wird, das Netzhautbild noch kleiner als die Oberfläche eines einzelnen Netzhautzapfens, und der Lichteindruck auf das Auge wird also bis dahin durchaus streng proportional der freien Objectivfläche bleiben. Erst wenn der Objectivdurchmesser bis auf 30 mm und mehr abgeblendet ist, breitet sich das Netzhautbild auf mehr als einen Netzhautzapfen aus, und die Lichtempfindung wird schwächer, als man nach dem Verhältnisse der Objectivöffnungen erwarten sollte. Bei den stärkeren Vergrößerungen tritt dieser Fall schon bei weit geringerer Ablendung ein.

Rechnungsmässig lässt sich der Fehler, den man in jedem einzelnen Falle begeht, nicht mit Sicherheit bestimmen, schon deshalb nicht, weil die physiologische Wirkung des Auges nicht genau genug bekannt ist, insbesondere die Frage, wie sich die einzelnen Netzhautelemente hinsichtlich der Empfindlichkeit für Lichtreize zu einander verhalten, als keineswegs entschieden zu betrachten ist. Auch darf man nicht unberücksichtigt lassen, dass die Helligkeit im Beugungsbilde von der Mitte aus sehr schnell abnimmt und dass daher z. B., wenn das centrale Scheibchen sich in einem Falle über vier Netzhautelemente, in einem anderen nur über ein einziges Element ausbreitet, die Empfindungsstärken keineswegs im Verhältnisse 1 zu 4 stehen werden. Endlich ist nicht zu vergessen, dass die angeführten Zahlenwerthe nur für homogenes Licht von der Wellenlänge 0.0005 mm gelten. Für andere Strahlengattungen ergeben sich etwas verschiedene Verhältnisse, und da es sich bei den Sternbeobachtungen

um gemischtes Licht handelt, so werden die Erscheinungen noch complicirter; die Beugungsbilder sind mit farbigem Saume versehen.

Für ein weiteres Eingehen auf den angeregten Gegenstand ist hier nicht der geeignete Platz. Es möge genügen, auf einen bisher nicht hinreichend beachteten Fall etwas ausführlicher hingewiesen und gezeigt zu haben, dass die centrale Ablendung bei photometrischen Messungen infolge der Beugungerscheinungen grosse Gefahren in sich birgt, und zwar stets in dem Sinne, dass die beobachteten Helligkeitsunterschiede grösser sind, als die gemäss dem Verhältnisse der zugehörigen freien Objectivflächen berechneten. Die begangenen Fehler werden im Allgemeinen um so grösser sein, je erheblicher die Helligkeitsunterschiede der verglichenen Sterne sind, je weiter also das Objectiv abgeblendet werden muss; dagegen werden sich die Fehler wesentlich verkleinern, wenn man möglichst schwache Vergrösserungen zu den Messungen benutzt.

Von den verschiedenen Photometern, bei denen die Auslöschung des Lichtes durch Ablendungsrichtungen bewirkt wird, sollen im Folgenden die wichtigsten angeführt, aber nur kurz besprochen werden, weil die wenigsten von ihnen dauernde Verwendung in der Astrophotometrie gefunden haben. Am gebräuchlichsten ist die Anbringung der Blenden vor dem Objectiv, jedoch sind auch Apparate construirt worden, bei denen erst der aus dem Objectiv austretende Strahlenkegel messbar verkleinert wird.

a. Blenden vor dem Objectiv. Die Photometer von Köhler, Reissig, Dawes, Knobel, Thury und Lamont.

Eins der ältesten Ablendungsphotometer ist das von Köhler¹⁾ construirte. Dasselbe besteht in einer Vorrichtung, die so vor dem Fernrohrobjectiv angebracht werden kann, dass stets eine quadratförmige Öffnung frei bleibt, deren Mittelpunkt unveränderlich mit der Mitte des Objectivs zusammenfällt. Eine nähere Beschreibung des Mechanismus fehlt, es ist von Köhler nur angegeben, dass sich die jedesmalige Diagonallänge des Quadrates an einer willkürlichen Scala von 0 bis 1000 ablesen lässt. Wahrscheinlich ist die Einrichtung ähnlich einer später noch mehrfach benutzten und unter dem Namen »Katzenaugendiaphragma« bekannten, deren Erfindung allgemein s'Gravesande zugeschrieben wird, und die neuerdings wieder von Cornu und Pickering für photometrische Zwecke empfohlen worden ist.

1) Berliner Astronom. Jahrbuch 1792, p. 233.

In einem fest mit dem Objectiv verbundenen Rahmen (Fig. 28) gleiten zwei Metallplatten *A* und *B* dicht übereinander, welche zwei gleich grosse quadratische Ausschnitte haben, deren Diagonale mit der Bewegungsrichtung parallel ist. Jede dieser Platten ist mit einer Triebstange versehen, ausserdem ist auf der unteren Platte *B* eine feine Theilung, auf der oberen *A* ein Indexstrich angebracht.

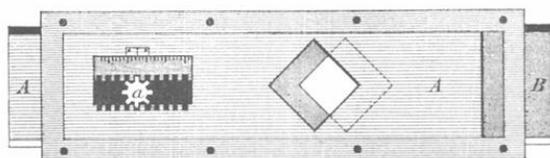


Fig. 28.

Durch Drehung des an dem festen Theile befindlichen Triebes *a* werden die beiden Platten im entgegengesetzten Sinne übereinander fortbewegt und zwar so, dass die Mitte der freien Öffnung, welche stets ein Quadrat ist, über

der Mitte des Objectivs bleibt. Die Ablesungen an der Scala geben direct die Längen der Öffnungsdiagonalen, und die Helligkeiten zweier Sterne verhalten sich zu einander wie die Quadrate der Ablesungen, bei denen diese beiden Sterne zum Auslöschen gebracht werden. Der Apparat liesse sich sehr leicht in der Richtung vervollkommen, dass man die Verschiebung der beiden Platten vom Ocular aus bewerkstelligte und eine Registrirvorrichtung damit in Verbindung brächte.

Ein etwas anderes Arrangement, ebenfalls mit Benutzung von quadratischen Öffnungen, ist von Reissig¹⁾ empfohlen worden. Derselbe befestigte eine Scheibe, die mit einer grossen Anzahl von quadratischen Ausschnitten von verschiedener Grösse versehen war, in der Weise an dem Objectiv eines Fernrohrs, dass bei der Drehung der Scheibe die einzelnen Öffnungen genau vor die Mitte des Objectivs geführt werden konnten. Durch eine bis zum Ocular reichende Stange wurde die Scheibe bewegt, und der jedesmalige Vortritt einer Öffnung vor die Mitte des Objectivs wurde durch das Einspringen eines kleinen Sperrkegels in einen mit der Scheibe verbundenen Zahnkreis markirt. Bei einigermaßen grossen Instrumenten hat diese Einrichtung das Unbequeme, dass die Scheibe sehr beträchtliche Dimensionen haben muss; auch ist dem zu erreichenden Genauigkeitsgrade durch die Anzahl der Öffnungen eine gewisse Grenze gesteckt.

Anstatt quadratischer Öffnungen sind am häufigsten kreisrunde in Vorschlag gebracht worden, die entweder mittelst eines dem Reissig'schen ähnlichen Arrangements oder mit Hilfe einer Art Schiebervorrichtung oder durch einfaches Übereinanderlegen vor die Mitte des Objectivs gebracht

1) Berliner Astronom. Jahrbuch 1811, p. 250.

werden konnten. Ein derartiges Verfahren ist z. B. von Dawes¹⁾ etwas genauer beschrieben worden, und seine Methode verdient noch deswegen eine besondere Erwähnung, weil er statt der Beobachtung der vollständigen Auslöschung der Sterne die Fixirung desjenigen Momentes empfiehlt, wo die Sterne gerade noch mit Mühe sichtbar sind (limit of steady visibility), und weil er alle Helligkeitsbestimmungen auf diejenige Normalöffnung des Teleskops beziehen will, bei welcher die Sterne 6. Grösse diese Sichtbarkeitsgrenze erreichen.

Bei dem Knobelschen²⁾ Astrometer kommen dreieckige Blendenausschnitte zur Verwendung. Diese haben nach dem Urtheile verschiedener Astronomen, unter anderen J. Herschel's, vor anders gestalteten Öffnungen den Vorzug voraus, dass die centrale Beugungsfigur sich durch besondere Schärfe auszeichnet, und dass auch die begleitenden Beugungserscheinungen, welche in sechs gleichweit von einander entfernten, vom Centrum ausgehenden Strahlen bestehen, verhältnissmässig wenig störend sind.

In dem mit dem Fernrohr verbundenen Rahmen *H* (Fig. 29) gleiten zwei Platten übereinander. Die untere *A* hat einen Ausschnitt in der Form eines gleichseitigen Dreiecks, die obere *B* endet in einer scharfen zur Bewegungsrichtung senkrechten Kante. Damit die Mitte der freien Öffnung, welche beim Übereinandergleiten der Platten stets ein gleichseitiges Dreieck bildet, unverändert mit dem Centrum des Objectivs zusammenfällt, muss die Platte *A* sich um eine doppelt so grosse Strecke verschieben, wie die Platte *B*, weil im gleichseitigen Dreieck der Abstand des Mittelpunktes von den Ecken doppelt so gross ist, wie von den Seiten. Dies wird erreicht durch die mit Links- und Rechts-Gewinde versehene Mikrometerschraube *CF*, deren oberer die Platte *A* bewegender Theil *CD* doppelt so grosse Steigung besitzt wie der untere *DE*. Die an dem Mikrometerkopf ange-

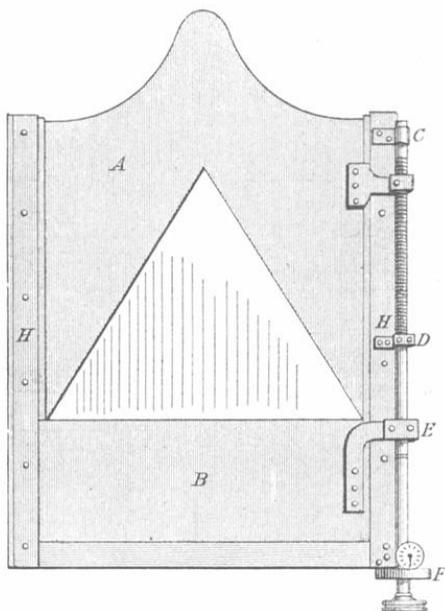


Fig. 29.

1) Monthly Notices. Vol. 11, p. 187.

2) Monthly Notices. Vol. 35, p. 100.

brachte Theilung giebt ein Mass für die jedesmalige Länge der Dreiecksseite, und da der Inhalt des Dreiecks, wenn diese Seite mit s bezeichnet ist, durch $\frac{\sqrt{3}}{4}s^2$ ausgedrückt wird, so verhalten sich die Helligkeiten zweier zum Verschwinden gebrachten Sterne wie die Quadrate der zugehörigen Mikrometerablesungen.

Besonders interessant ist das Thury'sche¹⁾ Photometer, welches zwar meines Wissens niemals zu zusammenhängenden Messungsreihen am Himmel verwendet worden ist, aber schon deswegen der Vergessenheit entrissen zu werden verdient, weil bei ihm das Abbildungsprincip in der rationellsten Weise zur Anwendung gebracht worden ist.

Thury hat bereits in vollem Umfange den schädlichen Einfluss der Diffraction bei Helligkeitsmessungen nach der Abbildungsmethode erkannt und denselben dadurch abzuschwächen versucht, dass er die

Abblendung des Objectivs nur innerhalb mässiger Grenzen und hauptsächlich zum Zwecke der letzten feinen Auslöschung der Sterne benutzte, die Hauptschwächung aber durch Reflexe an Spiegeln hervorbrachte. Die Thury'sche Blendscheibe vor dem Objectiv (Fig. 30) besteht aus 16 über einander verschiebbaren Lamellen, welche ein gleichseitiges Polygon bilden, dessen Mittelpunkt stets die Mitte des Objectivs einnimmt. Jede einzelne Lamelle ist mit einem Stift versehen, welcher in einen zugehörigen gekrümmten Einschnitt einer Metallscheibe eingreift. Diese

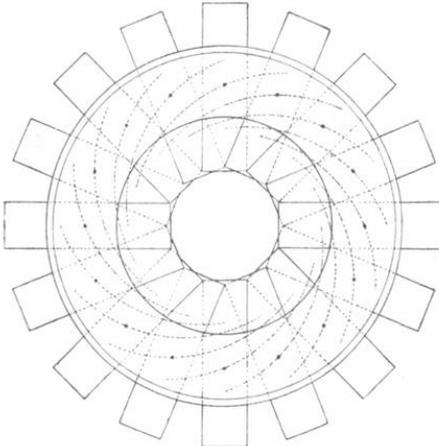


Fig. 30.

Scheibe lässt sich drehen, und da die Einschnitte, in denen sich die Stifte der Lamellen bewegen, die Form von Archimedischen Spiralen haben, so ist die Winkelbewegung der Scheibe proportional der linearen Bewegung der Lamellen und infolge dessen auch dem freien Durchmesser des Objectivs. Die Drehung der Scheibe kann von dem Ocularende des Instrumentes aus dirigirt werden, und auf einer mit dem Bewegungsschlüssel verbundenen Theilscheibe aus mattem Porzellan lässt sich im

1) Bibliothèque universelle et Revue Suisse. Archives des sciences phys. et naturelles. Nouvelle période, t. 51 (1874), p. 209.

Finstern durch eine ganz einfache Registrirvorrichtung der Betrag der Bewegung markiren. Das ganze Arrangement ähnelt den bei photographischen Apparaten vielfach üblichen Irisblenden.

Um bei der Messung heller Objecte die Öffnung des Objectivs nicht allzu sehr verkleinern zu müssen, hat Thury dem Ocularkopfe eine besondere Einrichtung gegeben (Fig. 31).

Ein und dasselbe Ocular kann in die Hülsen bei *a*, *b* und *c* eingeschoben werden; *m* und *n* sind zwei Spiegel, die unter 45° gegen die Richtung der auffallenden Strahlen geneigt sind. Bei *a* beobachtet man die Sterne direct, bei *b* nach einmaliger Spiegelung an *m* und bei *c* nach zweimaliger Spiegelung an *m* und *n*. Die Fassungen der Spiegel gleiten in Schlittenführungen, so dass sie je nach Bedürfniss in den Gang der Lichtstrahlen eingeschoben, oder aus demselben entfernt werden können. Bei gewöhnlichen Quecksilberspiegeln mit Glas wird von dem unter 45° auffallenden Licht etwa 75 Procent zurückgeworfen, und es erscheinen daher bei Benutzung solcher Spiegel die Sterne bei *b* um ungefähr 0.3 Grössenklassen, bei *c* um mehr als 0.6 Grössenklassen schwächer als bei *a*. Ungefähr der gleiche Effect wird erreicht, wenn man anstatt der Spiegel total reflectirende Glasprismen anwendet. Versilberte Glaspiegel reflectiren etwas mehr

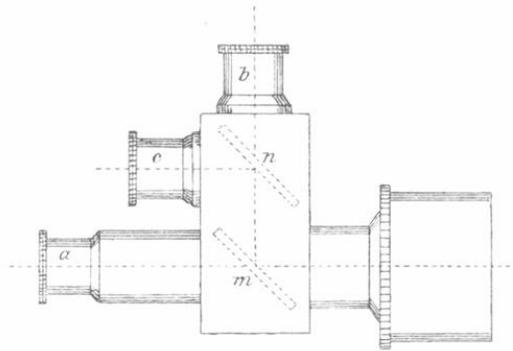


Fig. 31.

Licht, während bei Metallsiegeln der Lichtverlust im Allgemeinen grösser ist. Benutzt man endlich planparallele Glasplatten, so beträgt das zurückgeworfene Licht nur etwa 6 Procent des auffallenden, und ein Stern wird daher nach einmaliger Reflexion um 3, nach zweimaliger um 6 volle Grössenklassen geschwächt. Durch Combination verschiedener reflectirender Mittel lässt sich mit Hülfe der Thury'schen Einrichtung innerhalb gewisser Grenzen ein beliebiger Grad der Lichtschwächung hervorbringen. In der Praxis ist es natürlich, wenn man genaue photometrische Messungen ausführen will, unbedingt erforderlich, in jedem speciellen Falle die Reflexionscoefficienten der benutzten Spiegel, Prismen oder Glasplatten durch besondere Untersuchungen empirisch zu bestimmen, da bei der Verschiedenheit des Verhaltens einzelner Glassorten und Metalle und bei dem Einflusse, den die Art der Politur u. s. w. besitzt, allgemeingültige exacte Angaben über den Betrag des reflectirten Lichtes nicht gemacht werden

können. Diese unentbehrlichen Constantenbestimmungen sind ein Nachtheil der Thury'schen Methode, den dieselbe aber mit vielen anderen photometrischen Methoden gemeinsam hat. Beiläufig bemerkt liesse sich dasselbe Ziel wie durch mehrfache Spiegelung auch durch Anwendung von verschiedenen Blendgläsern oder eines Keiles aus dunklem Glase erreichen, die in den Gang der Lichtstrahlen zwischen Objectiv und Ocular a , am besten in der Nähe des Brennpunktes, eingeschoben werden könnten, und deren Absorptioncoefficienten durch besondere Untersuchungen im Voraus ermittelt werden müssten.

Thury hat seinen Ocularapparat noch benutzt, um einige Untersuchungen über den Einfluss der Beugung auf Helligkeitsmessungen anzustellen. Er gelangt zu dem aus unseren früheren Erörterungen unmittelbar hervorgehenden Resultate, dass, wenn in einem Fernrohre zwei verschieden helle Sterne bei den freien Objectivflächen o und o' (von denen o die grössere sein möge) zum Verschwinden gebracht werden, dann das richtige Intensitätsverhältniss der beiden Sterne nicht durch $\frac{o}{o'}$ gegeben ist, sondern durch $\frac{o}{o' - x}$, wo die Correction x für jeden Werth von o' einen anderen Betrag hat. Thury hat bei seinem Instrumente diese Correction zu ermitteln gesucht, indem er verschiedene Sterne einmal durch starke Verkleinerung des Objectivs allein und dann nach Einfügung des einen oder der beiden Spiegel durch geringe Ablendung des Objectivs zum Verschwinden brachte. Mit Hülfe der bekannten Reflexionsconstanten der Spiegel liessen sich daraus die Correctionen für die kleinen Öffnungen im Verhältnisse zu den grossen ableiten.

Bei den sämmtlichen im Vorangehenden besprochenen Einrichtungen geschah die Ablendung des Objectivs von dem Rande nach der Mitte zu. Da dieses Verfahren, wie ausführlich gezeigt worden ist, aus verschiedenen Gründen die schwerwiegendsten Nachtheile mit sich bringen kann, so ist es rathsamer, die Ablendung so vorzunehmen, dass alle Zonen des Objectivs gleichmässig davon betroffen werden. Ein grosser Theil der Fehlerquellen wird auf diese Weise ganz beseitigt oder wenigstens auf ein Minimum reducirt. Zur Erreichung dieses Zieles sind die verschiedensten Vorschläge gemacht worden; am praktischsten hat sich die Benutzung von sectorförmigen Ausschnitten erwiesen, welche bereits von Bouguer¹⁾ mit den folgenden Worten als die einzig richtigen Ablendungsrichtungen bezeichnet worden sind: »Il n'y a qu'une seule manière légitime de diminuer l'ouverture des objectifs. Puisqu'on veut que la grandeur de la surface du verre exprime la quantité des rayons

1) *Traité d'optique*, p. 36.

qui le traverse, il ne faut pas plus couvrir les parties du centre que celles des bords; les premières étant plus épaisses sont moins transparentes et les autres le sont davantage; mais il n'y a qu'à les couvrir toutes proportionnellement, et pour cela il faut se servir de diaphragmes qui aient exactement la figure des secteurs.» Der Bouguer'sche Vorschlag, der lange ganz unbeachtet geblieben zu sein scheint, ist später wiederholtlich erneuert worden, unter Anderen von Lamont¹⁾, welcher die Benutzung eines vom Mittelpunkte des Objectivs ausgehenden fächerförmig zu entfaltenden Diaphragmas empfiehlt. In Potsdam ist eine ähnliche Blendvorrichtung in Gebrauch, die zwar gewöhnlich nur zur allgemeinen Abschwächung von Sternen benutzt wird, aber auch zu wirklichen Helligkeitsmessungen verwendet werden könnte. Sie besteht (Fig. 32) aus drei auf einander gesteckten Metallkappen, von denen die unterste fest mit der Objectivfassung verbunden ist, während die beiden anderen, einzeln oder zusammen, um die erstere gedreht werden können. An zwei Kreistheilungen lässt sich der Betrag der Drehungen ablesen. Die beiden unteren Kappen haben je vier sectorförmige Ausschnitte von 60° Öffnungswinkel, die dritte Kappe besitzt vier Ausschnitte mit Winkeln von 70°. Man kann durch dieses Arrangement das Objectiv von $\frac{2}{3}$ bis auf $\frac{1}{3}$ der vollen Öffnung abblenden und daher eine Lichtschwächung von ungefähr 2 Grössenklassen hervorbringen.

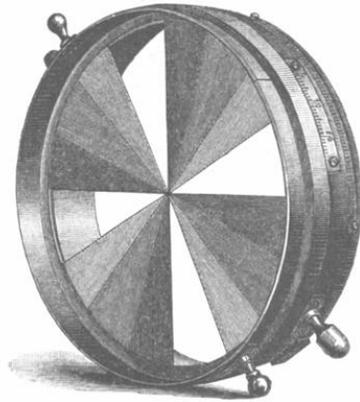


Fig. 32.

b. Blenden zwischen Objectiv und Ocular. Photometer von Hirsch, Dawes, Loewy.

Anstatt den auf das Objectiv auffallenden Strahlencylinder messbar zu verkleinern, ist mehrfach der Versuch gemacht worden, die Abblendung erst nach dem Austritte aus dem Objectiv vorzunehmen. Eins der ältesten auf diesem Princip beruhenden Auslöschungsphotometer rührt von Hirsch²⁾ her und ist für die Sternwarte Neuchâtel von Merz in München angefertigt worden. Eine Scheibe, welche in der Mitte mit einer feinen kreisrunden Öffnung versehen ist, lässt sich innerhalb des Fernrohr tubes vom

1) Jahresbericht der Münchener Sternwarte für 1852, p. 40.

2) Bulletin de la société des sciences naturelles de Neuchâtel. T. 6 (1861—64), p. 94.

Brennpunkte nach dem Objectiv zu verschieben, und diese Verschiebung wird an einer aussen am Rohre angebrachten Scala abgelesen. Je weiter die Blendscheibe vom Focus entfernt ist, desto mehr Licht wird abgeblendet. Ist b der Durchmesser der Blendenöffnung, d der Durchmesser des Objectivs und f seine Brennweite, so ergibt sich, dass, wenn die Blendscheibe um die Strecke m vom Brennpunkte absteht, die Helligkeit h eines Sterns ausgedrückt wird durch $h = \frac{b^2 f^2}{d^2 m^2}$, falls die Helligkeit ohne

Blende mit 1 bezeichnet ist. Die ursprünglichen Helligkeiten zweier zum Verschwinden gebrachten Sterne verhalten sich also wie die Quadrate der zugehörigen vom Focus aus gezählten Scalenableesungen. Bei dem Hirsch'schen Apparate, welcher an einem Fernrohre von 16.2 cm Öffnung und 259.9 cm Brennweite angebracht war, hatte die Diaphragmenöffnung einen Durchmesser von 0.5 cm und liess sich innerhalb der Abstände 7.6 cm und 48.2 cm vom Brennpunkte verschieben. Bei der ersten Stellung wurde die Öffnung gerade von dem vom ganzen Objectiv herkommenden Strahlenkegel ausgefüllt, und die Gesamtlightschwächung, die mit dieser Einrichtung zu erzielen war, betrug ungefähr vier Grössenklassen. Im Allgemeinen werden die im Innern jedes Fernrohres zur Vermeidung von seitlichen Reflexen angebrachten Scheiben einer grösseren Verschiebung des Diaphragmas hinderlich sein, und man wird daher, wenn man eine sehr erhebliche Lichtschwächung hervorbringen will, entweder verhältnissmässig viel feinere Öffnungen als bei dem von Hirsch beschriebenen Apparate anwenden oder noch Blendgläser zu Hülfe nehmen müssen.

Die Hirsch'sche Methode hat dieselben Nachteile wie jede Abblendung des Objectivs. Sie beruht ebenfalls auf der zweifelhaften Voraussetzung, dass alle Theile des Objectivs gleichmässig zur Helligkeit des Bildes beitragen, und ist dem störenden Einflusse der Beugung in nicht geringerem Grade ausgesetzt. Dagegen bietet sie den Vortheil, dass die mechanische Einrichtung ausserordentlich einfach ist.

Eine grössere Verbreitung hat das Verfahren der Abblendung zwischen Objectiv und Ocular niemals gefunden. Mir sind ausser dem Hirsch'schen Vorschlage nur noch zwei andere bekannt geworden, von Dawes¹⁾ und von Loewy²⁾, die offenbar ganz unabhängig von dem ersteren sind, im Wesentlichen aber auf dasselbe hinauskommen. Dawes hat an Stelle der einzigen Öffnung ein Diaphragma mit drei kleinen Öffnungen von verschiedener Grösse benutzt, welche durch Drehung der Diaphragmenscheibe nach einander in die Mitte des Strahlenkegels gebracht werden

1) Monthly Notices. Vol. 25, p. 229.

2) Monthly Notices. Vol. 42, p. 91.

konnten. Loewy warnt davor, allzu kleine Öffnungen zu benutzen oder die Verschiebung nach dem Objectiv hin sehr weit zu treiben, er will die directe Vergleichung nur auf ein Helligkeitsintervall von 5 oder höchstens 6 Grössenklassen anwenden und empfiehlt für die Beobachtung der helleren Sterne die allgemeine Abschwächung durch Reflex von einer vor dem Oculare unter einem Winkel von 45° angebrachten Glasplatte.

c. Das Parkhurst'sche Deflectionsphotometer.

Eine ganz eigenartige Auslöschungsmethode ist in neuester Zeit von Parkhurst¹⁾ eingeführt und bei seinen Helligkeitsmessungen an kleinen Planeten in grösserem Umfange angewendet worden. Die Vorrichtung, welcher Parkhurst den Namen »deflecting apparatus« gegeben hat, besteht im Wesentlichen aus einer sehr dünnen, etwas keilförmigen Glasplatte, welche zwischen Objectiv und Brennpunkt eines parallaktisch montirten Fernrohres von 22.9 cm Öffnung und 284.5 cm Brennweite, etwa 40.6 cm von der Focalebene entfernt angebracht ist, und zwar so, dass die scharfe Kante derselben bis in die Mitte des Rohres hineinragt. Wird das Instrument auf irgend einen Stern gerichtet, so geht die eine Hälfte des Strahlenkegels an der Glasplatte vorbei, die andere fällt auf dieselbe und wird ein wenig abgelenkt, so dass zwei nahe bei einander befindliche Bilder des Sternes entstehen. Es findet also keine eigentliche Ablendung statt in dem Sinne, wie es bei den bisher besprochenen Photometern der Fall war, sondern eine Zerlegung des Lichtkegels in zwei Theile, und es ist klar, dass man durch Verschiebung der Glasplatte in der Richtung senkrecht zur optischen Axe sehr leicht das directe neben der Glasplatte gesehene Bild eines Sternes zur Auslöschung bringen könnte. Parkhurst hat zur Erreichung dieses Zieles einen etwas anderen Weg eingeschlagen. Er lässt bei unbeweglicher Glasplatte den zu beobachtenden Stern durch das Gesichtsfeld des Fernrohres hindurchwandern. Beim Eintritt in dasselbe geht zunächst der ganze vom Objectiv kommende Strahlenkegel an der Glasplatte vorbei, und man erblickt nur ein einziges Sternbild. Sobald aber der Mantel des Kegels die Platte erreicht hat, wird ein zweites schwaches Bild des Sternes sichtbar, während das ursprüngliche Bild an Helligkeit abnimmt. Man kann auf diese Weise das vollständige Verschwinden des directen Bildes beobachten. Sterne von verschiedener Lichtstärke werden natürlich an verschiedenen Stellen des Gesichtsfeldes zum Verschwinden kommen, und die Zeit, die von ihrem Eintritte in das Gesichtsfeld bis zur vollständigen Auslöschung ver-

1) Annals of the Astr. Observatory of Harvard College. Vol. 18, Nr. III.

streicht, wird mit Rücksicht auf die Declination der Sterne ein Mass für ihre Helligkeit geben. Da der Eintritt in das Gesichtsfeld nicht mit der erforderlichen Genauigkeit zu bestimmen ist, so wird statt dessen der Antritt der Sterne an einer dunklen Linie beobachtet, welche auf einer in der Focalebene angebrachten Glasplatte markirt ist. Diese letztere Platte lässt sich noch verschieben und an mehreren Punkten, deren Entfernung von einander in Zeitsecunden genau bestimmt ist, festklemmen. Man kann auf diese Weise, wenn es wünschenswerth sein sollte, die Durchgangszeit abkürzen. Das Ocular ist ebenfalls verschiebbar und zwar parallel zur Focalebene, um es bei der Beobachtung der Auslöschung in die vortheilhafteste Position zu dem Sterne bringen zu können. Die ablenkende Glasplatte kann vom Ocular aus mittelst einer einfachen Vorrichtung ganz zurückgeklappt werden, so dass das Gesichtsfeld nöthigen Falls vollständig frei wird.

Das Eigenthümliche der Parkhurst'schen Methode besteht darin, dass die eigentliche Helligkeitsbeobachtung durch eine Zeitmessung erfolgt, ein Verfahren, welches, wie wir sehen werden, auch beim Keilphotometer und zwar schon lange vor Parkhurst zur Anwendung gekommen ist. Was den Zusammenhang zwischen Durchgangszeit und Helligkeitsabnahme beim Deflectionsphotometer anbelangt, so liesse sich derselbe entweder durch Berechnung des von der ablenkenden Glasplatte aus dem Strahlenkegel ausgeschnittenen Theiles bestimmen, oder auf experimentellem Wege durch

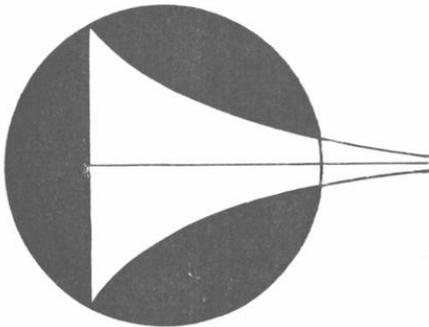


Fig. 33.

Messungen an Sternen von bekannter Helligkeit oder durch irgend eine andere photometrische Methode ermitteln. Parkhurst hat bei seinem Apparate noch eine Einrichtung getroffen, um unmittelbar aus den für zwei verschiedene Sterne beobachteten Durchgangszeiten den Helligkeitsunterschied derselben in Grössenklassen abzuleiten. Zu diesem Zwecke hat er vor dem Objectiv eine Blendekappe angebracht, deren eigenthümliche Construction aus Figur 33 ersichtlich ist.

Die freie Öffnung der Blende wird begrenzt durch eine gerade Linie und zwei Curvenstücke, die symmetrisch zu einer senkrecht auf der Geraden durch die Mitte des Objectivs gezogenen Linie liegen. Die Curven sind logarithmische und durch die Gleichung bestimmt: $x = P \log y$, wo P eine Constante ist. Die x -Axe fällt mit der Mittellinie zusammen. Der Inhalt

der Fläche, welche von irgend einer Ordinate y , der x -Axe und der asymptotisch zu derselben verlaufenden Curve gebildet wird, ist ausgedrückt durch PM_y , wenn M der Modul der Brigg'schen Logarithmen ist. Für zwei bestimmte Ordinaten y_1 und y_2 hat man daher die entsprechenden Flächen PM_{y_1} und PM_{y_2} . Soll nun das Verhältniss dieser beiden Flächen gleich sein dem Verhältnisse zweier auf einander folgenden Sterngrössenklassen (wofür gewöhnlich die Zahl 2.512 angenommen wird), so ist $\log y_1 - \log y_2 = 0.4$ und demnach $x_1 - x_2 = 0.4 P$. Parkhurst hat für die willkürliche Constante P den Werth 5 angenommen, und es ist daher bei ihm $x_1 - x_2$ gleich 2 Zoll. Die Blendkappe ist so auf das Objectiv aufgesetzt, dass die Mittellinie mit der Richtung der täglichen Bewegung der Sterne zusammenfällt. Verschiebt sich nun, durch Bewegung des Sternes, der Strahlenkegel, dessen Querschnitte natürlich überall ähnliche Form haben müssen wie die freie Objectivöffnung, gegen die ablenkende Glasplatte um ein Stück, welches an dem Objectiv einer Strecke von 2 Zoll entspricht, so ändert sich die Helligkeit des Sternes um eine ganze Grössenklasse. Die dazu erforderliche Zeit beträgt für einen Äquatorstern ungefähr 40 Zeitsecunden. Will man zwei beliebige Sterne in Bezug auf ihre Helligkeit miteinander vergleichen, so bestimmt man für jeden die Durchgangszeit vom Antritt an die dunkle Linie bis zum vollständigen Auslöschen des directen Bildes. Die Differenz dieser Durchgangszeiten (in Zeitsecunden ausgedrückt), reducirt auf den Aequator und dividirt durch 40, giebt dann unmittelbar den Helligkeitsunterschied der beiden Sterne in Grössenklassen. Da die Constante P ganz willkürlich ist, und ebenso die Entfernung der ablenkenden Glasplatte von der Focalebene beliebig gewählt werden kann, so lässt sich die Zeitdauer, welche zur Hervorbringung einer Lichtabnahme von einer Grössenklasse erforderlich ist, ganz nach Gutdünken von vornherein festsetzen. Zu berücksichtigen ist noch, dass die Blendenöffnung streng genommen nach der einen Seite hin ins Unendliche sich erstrecken müsste, weil die begrenzenden logarithmischen Curven asymptotisch zur Mittellinie verlaufen. Um daher den ausserhalb des Objectivs fallenden Theil der Öffnung in Rechnung zu ziehen, ist es nothwendig, an dieser Seite der Blendscheibe eine besondere Öffnung anzubringen, welche eine beliebige Form haben kann, deren Fläche aber gleich diesem ausserhalb liegenden Stück sein muss.

Die Parkhurst'sche Objectivblende hat den Vortheil, dass die experimentelle Bestimmung der Beziehung zwischen Durchgangszeit und Helligkeitsänderung überflüssig wird; dagegen dürfte die exacte mechanische Herstellung der complicirten Öffnungsform, von der allein die zu erreichende Messungsgenauigkeit abhängt, mit grossen Schwierigkeiten verknüpft sein. Auch sonst hat das ganze Beobachtungsverfahren mancherlei Bedenken

gegen sich, und es ist kaum zu erwarten, dass das Parkhurst'sche Photometer weite Verbreitung finden wird.

2. Auslöschung des Lichtes durch absorbirende Medien.

a. Die Photometer von Lampadius, Horner, Quetelet, Albert.

Der Gedanke, die Absorption des Lichtes in verschiedenen grossen Schichten eines nicht absolut durchsichtigen Mediums als Helligkeitsmass zu benutzen, ist schon verhältnissmässig früh aufgetaucht. Bouguer erwähnt in seinem *Traité d'optique* (p. 46), dass bereits im Jahre 1700 der Kapuzinerpater François Marie in einer kleinen Schrift, betitelt »Nouvelles découvertes sur la lumière«, die Auslöschung des Lichtes durch Übereinanderlegen mehrerer Glasstücke von gleicher Dicke empfohlen hat. Theoretisch lässt sich gegen dieses Princip kaum etwas einwenden. Unter der Voraussetzung, dass die einzelnen Glasstücke nicht nur hinsichtlich der Dicke, sondern auch hinsichtlich der Beschaffenheit des Glases vollkommen identisch sind, kann man leicht den Lichtverlust bestimmen, der von einer beliebigen Anzahl derselben verursacht wird. Ist J die Intensität eines Lichtstrahles vor dem Eintritte in das erste Glasstück, J' die Intensität beim Austritte aus n solchen Stücken, so hat man nach den Erörterungen auf Seite 113 die einfache Beziehung: $J' = Jc^n$, wobei c , der sogenannte Transmissionscoefficient, das Verhältniss der von einem einzelnen Glasstück hindurch gelassenen Lichtmenge zu der ursprünglichen Intensität ausdrückt. In der Praxis stellen sich diesem Verfahren und ebenso allen anderen auf dem Princip der Absorption beruhenden Auslöschungsmethoden einige Schwierigkeiten entgegen. Zunächst findet man nicht leicht vollkommen homogene absorbirende Medien, und noch bedenklicher ist der Umstand, dass es kaum eine Substanz geben dürfte, welche für Strahlen von verschiedener Brechbarkeit in absolut gleichem Masse durchlässig wäre. Die Vergleichung verschiedenfarbiger Lichtindrücke ist daher bei jedem Absorptionsphotometer ein mehr oder weniger heikler Punkt.

Anstatt der von François Marie benutzten Glasplattensäule bediente sich Lampadius¹⁾ im Jahre 1814 zur Bestimmung der Helligkeit des zerstreuten Tageslichtes, sowie der Sonne und des Mondes, einer Röhre, in welche so viele mit Öl getränkte Papierscheiben eingelegt wurden, bis

1) Lampadius, Beiträge zur Atmosphärologie. II. Phot. Beob. im Jahre 1814, p. 164. Freiberg 1817.

jede Spur von Licht ausgelöscht war. Diese Papierscheiben ersetzte er später durch Hornscheiben, welche sich weit homogener und vor Allem viel haltbarer erwiesen; ferner schlug er vor, an jeder Photometerröhre eine Theilung anzubringen und mit 100 denjenigen Punkt zu bezeichnen, bis zu welchem die Röhre mit aufeinander gelegten Scheiben angefüllt werden muss, falls gerade das Licht eines im Sauerstoffgas brennenden Phosphorstückes zum Verschwinden gebracht werden soll; auf diese Weise würde die Angabe einer beliebigen Zahl der Scala in verschiedenen derartigen Apparaten ein ganz bestimmtes Helligkeitsmass repräsentiren.

Eine ähnliche Einrichtung ist fast zu derselben Zeit von Horner¹⁾ vorgeschlagen worden. Derselbe verwendete einen Rahmen mit 10 neben einander befindlichen, gleich grossen Öffnungen, von denen die erste ganz frei blieb, während die zweite mit einer einzelnen Lage durchsichtigen Papieres, die dritte mit 2 solchen Lagen u. s. w., die zehnte mit 9 Lagen überzogen war. Ausserdem waren Scheiben vorhanden, die aus je 10 Lagen desselben Papieres bestanden und die in dem Photometerrohre mittelst einer Hülse festgehalten werden konnten. Bei der Beobachtung wurden zunächst soviel Zehnerscheiben eingesetzt, als erforderlich waren, um die Lichtquelle nahezu zum Auslöschen zu bringen, dann wurde der Rahmen so weit hineingeschoben, bis der letzte Lichteindruck verschwand, und die Nummer der betreffenden Rahmenöffnung notirt. Das Verfahren ist, wie man leicht einsieht, in mancher Hinsicht bedenklich und dürfte schwerlich sichere Resultate ergeben.

Dasselbe gilt von den zahlreichen Versuchen, Flüssigkeitsschichten zur Auslöschung zu verwenden. Quetelet²⁾ hat bereits im Jahre 1833 vorgeschlagen, in den Gang der Lichtstrahlen ein Gefäss einzuschalten, welches oben und unten mit parallelen Glasplatten verschlossen ist. Diese Platten können durch eine einfache Vorrichtung einander genähert oder von einander entfernt werden, sodass die eingeschlossene Flüssigkeitsschicht, welche in ein seitlich angebrachtes Rohr zurücktreten kann, jede beliebige Länge erhält. Dieselbe Idee ist bis in die jüngste Zeit immer wieder von Neuem mit nur geringen Modificationen aufgetaucht. Am bekanntesten ist wohl das Albert'sche Photoscop³⁾ geworden, welches im Wesentlichen mit dem Quetelet'schen Apparate die grösste Ähnlichkeit hat. Die Benutzung von Flüssigkeiten hat ausser vielen anderen Übelständen noch den Nachtheil, dass sich die selective Absorption der einzelnen Farben in ganz besonders starkem Masse fühlbar macht.

1) Bibliothèque universelle des sciences. Genève. Tome 6 (1817).

2) Bibliothèque universelle des sciences. Genève. Tome 52 (1833), p. 212.

3) Dinglers polytechnisches Journal. Bd. 100 (1846), p. 20.

b. Das Keilphotometer.

Alle im Vorangehenden erwähnten Einrichtungen und viele andere auf demselben Princip beruhenden eignen sich wenig zu Untersuchungen am Himmel und können auch nicht im Entferntesten rivalisiren mit dem hervorragendsten Repräsentanten dieser Gattung von Instrumenten, dem Keilphotometer, welches zweifellos überhaupt als das vollkommenste Auslöschungsphotometer zu bezeichnen ist. Es wird häufig auch das Pritchard'sche Keilphotometer genannt, weil Pritchard dasselbe am Eingehendsten studirt und zuerst zu umfangreichen Messungen benutzt hat. Der Gedanke selbst ist ziemlich alt, und die Geschichte der Entwicklung dieses Photometers ist ein deutlicher Beweis dafür, welch geringes Interesse stets von Seiten der Astronomen den Helligkeitsbestimmungen der Gestirne entgegengebracht worden ist, da sonst schwerlich eine so einfache und praktische Methode immer wieder in gänzliche Vergessenheit gerathen wäre. Es existiren nicht weniger als fünf verschiedene Abhandlungen, in denen die Benutzung von Glaskeilen zu photometrischen Zwecken als neu in Vorschlag gebracht worden ist, zum Theil bereits mit allen denjenigen Modificationen und Verbesserungen, die sich erst seit Pritchard dauernd in der Praxis eingebürgert haben.

Der älteste Vorschlag scheint aus dem Jahre 1832 von dem Grafen de Maistre¹⁾ herzurühren. Derselbe benutzte zwei Prismen von ungefähr 11° brechendem Winkel und fast 9 Zoll Länge, das eine aus weissem, das andere aus blauem Glase, welche so aufeinander gelegt waren, dass sie ein Parallelepipedum bildeten, damit die hindurchgehenden Lichtstrahlen nicht von ihrer ursprünglichen Richtung abgelenkt würden. Das Prisma aus weissem Glase erhielt bei der Messung eine feste Stellung, während das andere mit Hülfe einer Mikrometerschraube dagegen verschoben werden konnte. Das de Maistre'sche Photometer ist ein Jahr später von Quetelet²⁾ in der Weise modificirt worden, dass anstatt eines weissen und eines blauen Prismas zwei Keile von demselben dunklen Glase benutzt wurden; doch hat Quetelet dieses Instrument sehr bald wieder aufgegeben, weil er die Unmöglichkeit einsah, Glas von solcher Färbung zu erhalten, dass die verschiedenen Farben gleichmässig dadurch absorbirt würden.

In den Berichten der Schwedischen Akademie beschreibt C. D. v. Schumacher³⁾ im Jahre 1852 eine ganz ähnliche Einrichtung, ohne offenbar von den früheren Vorschlägen Kenntniss zu haben; er bewegt die beiden

1) Bibliothèque universelle des sciences. Genève. Tome 51 (1832), p. 323.

2) Bibliothèque universelle des sciences. Genève. Tome 52 (1833), p. 212.

3) Öfversigt af K. Vetensk. Akad. Förh. 1852, p. 236.

Keile durch eine Schraube mit Doppelgewinde gleichmässig gegeneinander und bringt dieselben (was als eine wesentliche Verbesserung zu bezeichnen ist) nicht vor dem Objectiv oder Ocular, sondern in der Focalebene des Fernrohres an.

Kayser¹⁾ in Danzig hat zum ersten Male die Prismen nicht getrennt von einander benutzt, sondern zu einem festen Doppelprisma zusammengekittet, bestehend aus einem weissen durchsichtigen und einem dunklen Keile. Sein Instrument gleicht bis ins Kleinste unseren besten heutigen Photometern, und es ist fast unbegreiflich, dass dasselbe in der damaligen Zeit gar keinen Anklang gefunden hat. Von Kayser stammt auch zuerst der Vorschlag, den Doppelkeil in der Brennebene eines parallaktischen Fernrohres feststehen zu lassen und zwar mit seiner Längsausdehnung in der Richtung der täglichen Bewegung, und die Secunden zu zählen von dem Antritt der Sterne an den Glasstreifen bis zu dem Momente, wo die Sterne unsichtbar werden.

Dawes²⁾ hat sich ebenfalls Verdienste um das Keilphotometer erworben und insbesondere seine Anwendung ausser zu Sternbeobachtungen noch in solchen Fällen empfohlen, wo andere photometrische Methoden schwierig zu benutzen sind, beispielsweise zur Vergleichung der Helligkeit verschiedener Partien der Mondoberfläche und zur Vergleichung der Lichtstärke der von der Sonne beleuchteten Atmosphäre und der Photosphäre der Sonne selbst.

Ausser der Dawes'schen Einrichtung und einem weniger bekannten Vorschlage von Piazzi Smyth aus dem Jahre 1843, der nirgends veröffentlicht zu sein scheint, ist Pritchard bei der Construction seines Keilphotometers im Jahre 1881 offenbar keiner der älteren Vorschläge bekannt gewesen. Sein Apparat enthält in keiner Hinsicht etwas Neues, im Gegentheil bedeutet

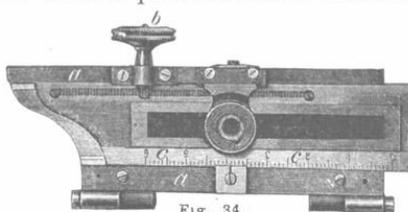


Fig. 34.

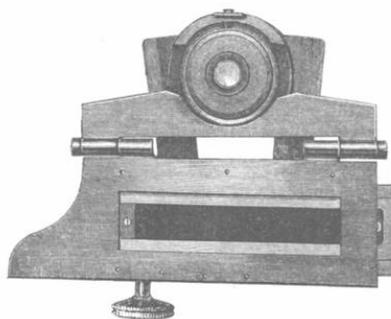


Fig. 35.

er insofern sogar einen gewissen Rückschritt, als die Verschiebung des Keiles wieder aus der Focalebene vor das Ocular verlegt worden ist. Die Figuren 34 und 35 stellen das Pritchard'sche Keilphotometer dar, wie es

1) Astron. Nachr. Bd. 57, Nr. 1346.

2) Monthly Notices. Vol. 25, p. 229.

in der optischen Anstalt von Grubb in Dublin angefertigt wird. In dem Rahmen *a* bewegt sich mit Hilfe eines Triebes *b* der aus weissem und neutralem Glase zusammengekittete Doppelkeil, dessen Verschiebung an der Theilung *c* abgelesen werden kann. Um dem Auge die nöthige Sehrichtung zu geben, ist vor dem Keil noch eine Hülse mit einer Augenöffnung angebracht. Der ganze Rahmen *a* lässt sich mittelst eines Scharniers herunterklappen (Fig. 35), so dass das Ocular nach Bedürfniss sofort frei ohne Keil benutzt werden kann. Diese Einrichtung ist in mancher Hinsicht vorthellhaft, sie hat aber den grossen Nachtheil, dass der Keil viel leichter der Gefahr einer Beschädigung oder des Beschlagens durch den Hauch des Beobachters ausgesetzt ist, als wenn er sich im Innern des Fernrohres befindet, und dass im Momente des Verschwindens der Sterne das ganze Gesichtsfeld verdunkelt ist, was in vielen Fällen die Beobachtung erschwert. Da der Augendeckel nicht zu weit von der Ocularlinse entfernt sein darf, so ist die vorn befindliche Hülse so kurz, dass, wie Young¹⁾ bei einer Besprechung des Pritchard'schen Keilphotometers missbilligend bemerkt, Nase und Stirn des Beobachters der Bewegung des Keiles unter Umständen hinderlich sind.

Entschiedenem Vorzug vor dem Pritchard'schen Instrumente verdient der in Potsdam eingeführte, vom Mechaniker Töpfer construirte Apparat, welcher zugleich mit einer bequemen Registrirvorrichtung versehen ist.

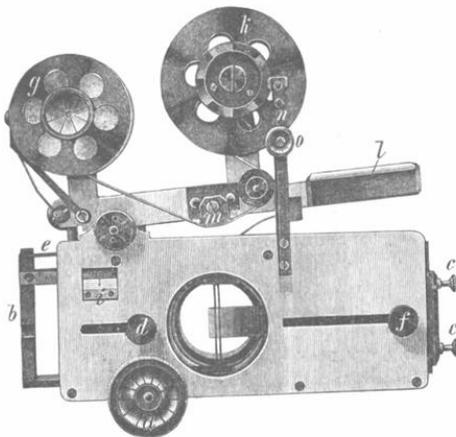


Fig. 36.

festen Index *i* abgelesen werden kann; ausserdem befindet sich eine zweite zur Registrirung benutzte Theilung mit erhabenen Strichen und

1) Investigations on light and heat published with appropriation from the Rumford Fund. 1886, p. 391.

Figur 36 stellt diesen Apparat in etwa $\frac{1}{3}$ der natürlichen Grösse (mit abgeschraubtem Ocular) dar. Er wird mittelst eines Zwischenringes an das zur Verwendung kommende Fernrohr so angesetzt, dass sich der Keil ungefähr in der Brennebene desselben befindet. In dem eigentlichen aus Aluminiumblech angefertigten Kasten des Apparates bewegt sich mit Hilfe des Triebes *a* der Rahmen *b*, in welchem der Keil mittelst der Schrauben *c* befestigt wird. Auf der Vorderseite dieses Rahmens ist eine Millimetertheilung angebracht, die an dem

Zahlen auf der oberen Kante e des Rahmens. Durch die Mitte des Gesichtsfeldes geht ein aus zwei schmalen Lamellen gebildeter, unmittelbar vor dem Keil sitzender Steg, welcher mit Hülfe des Knopfes d nach Wunsch ganz aus dem Gesichtsfelde zurückgezogen werden kann. Bei der Benutzung eines parallaktisch montirten Fernrohres wird das Keilphotometer so angesetzt, dass dieser Steg in die Richtung der täglichen Bewegung zu stehen kommt und die Sterne den schmalen Streifen zwischen den Lamellen zu durchlaufen haben. Das positive Ocular, welches nicht zu stark zu wählen ist, wird so eingestellt, dass der Steg und die Begrenzung des Keils scharf erscheinen, und dann erst wird der ganze Apparat mittelst des Fernrohrtriebes so weit verstellt, bis auch die Sterne scharf zu sehen sind. Der Umstand, dass zu beiden Seiten des Keils das Gesichtsfeld frei bleibt, ist bei den meisten Sternbeobachtungen als ein Vortheil zu betrachten; denn erstens wird dem Auge dadurch die Mühe erleichtert, diejenige Stelle richtig zu fixiren, wo der Stern verschwindet, und dann giebt die Entfernung der beiden Lamellen und ebenso die Breite des Keils ein vortreffliches Mittel an die Hand, die Distanzen benachbarter Sterne in beiden Coordinaten richtig zu taxiren und daher bei grösseren Beobachtungsreihen Verwechslungen von Sternen zu vermeiden. Wenn es erforderlich sein sollte, kann mittelst des Knopfes f ein Schieber vorgeschoben werden, welcher das ganze Gesichtsfeld bis auf einen schmalen Ausschnitt in der Mitte verdeckt; es kann endlich auch noch eine andere Blende mit feinen runden Öffnungen eingesetzt werden, um nach dem Dawes'schen Vorschlage einzelne Stellen der Mond- oder Sonnenoberfläche, bei sehr grossen Brennpunktbildern auch verschiedene Partien einer Planetenscheibe mit einander zu vergleichen.

Als Registrirvorrichtung, welche beim Keilphotometer durchaus unentbehrlich ist, empfiehlt sich am meisten die von E. v. Gothard¹⁾ herührende, welche im Wesentlichen auch bei dem Potsdamer Instrument beibehalten ist. Auf das Rad g ist eine Rolle schmalen Telegraphenpapieres aufgesteckt, welches sich in der aus der Figur ersichtlichen Weise auf das zweite etwas grössere Rad k aufwickelt. Durch einen Druck auf den Hebel l wird dieser Papierstreifen mittelst des elastischen Kissens m an die erhabene Theilung angedrückt. Ausser dieser Theilung presst sich noch ein an dem festen Theile des Photometers ebenfalls erhaben angebrachter Indexstrich in das Papier ein. Die Markirung ist so deutlich, dass die Ablesung des Streifens, namentlich mittelst einer schwachen Lupe, keine Schwierigkeiten bereitet. Man kann auch noch zwischen Streifen und Theilung, wie es E. v. Gothard gethan hat, einen zweiten Streifen

1) Zeitschrift für Instrumentenkunde. Jahrg. 7, p. 347.

mit Farblösung getränktem Papieres einschieben; die Ablesung wird dann noch bequemer, indessen ist diese Complication der Einrichtung, welche auch einige Übelstände mit sich führt, nicht unbedingt erforderlich. Beim Herabdrücken des Hebels l fasst die starke Feder n in eine Art Zahnkranz ein, welcher auf dem Rade k fest aufsitzt, und beim Loslassen des Hebels wird das Rad um ein Stück gedreht und der Papierstreifen eine kleine Strecke fortgezogen, so dass für eine neue Einstellung Raum wird. Um den Streifen nach Beendigung der Beobachtung schnell abwickeln zu können, wird die Feder n mittelst der Schraube a ein wenig angehoben, so dass das Rad k sich frei und schnell drehen lässt.

Die Theorie des Keilphotometers ist die denkbar einfachste. Es stelle in Figur 37 ABC das dunkle und ADC das durchsichtige Prisma dar.

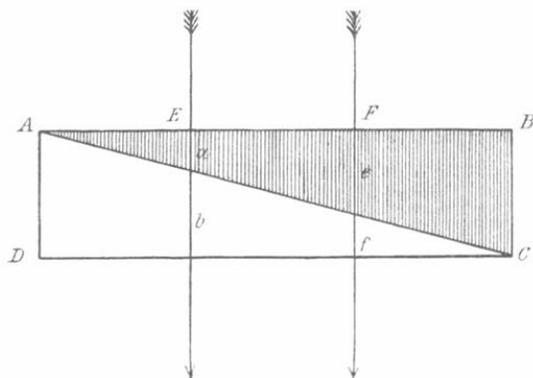


Fig. 37.

Die Länge des Keils AB sei l , seine Gesamtdicke AD sei d . Die von zwei Sternen mit den Lichtstärken J_1 und J_2 herkommenden Lichtstrahlen mögen bei E und F in den Keil eintreten und innerhalb desselben die Strecken a und b , resp. e und f durchlaufen. Die Lichtstärken beim Austritt aus dem Keil seien J'_1 und J'_2 . Nennt man den Durchlässigkeitscoefficienten des dunklen Glases k , den des weissen

Glases c , so hat man nach dem Früheren:

$$J'_1 = J_1 k^a c^b, \quad \text{oder:} \quad \log J'_1 - \log J_1 = a \log k + b \log c,$$

oder endlich, da $b = d - a$ ist:

$$\log J'_1 - \log J_1 = a(\log k - \log c) + d \log c.$$

Ebenso ist auch:

$$\log J'_2 - \log J_2 = e(\log k - \log c) + d \log c.$$

Sind nun beide Sterne gerade zum Auslöschten gebracht, also $J'_2 = J'_1$, so erhält man aus den letzten Gleichungen:

$$\log J_1 - \log J_2 = (e - a)(\log k - \log c).$$

Es ist aber, wenn man die Strecke EF mit s bezeichnet, $e - a = \frac{sd}{l}$; folglich:

$$\log J_1 - \log J_2 = \frac{sd}{l} (\log k - \log e).$$

Statt der Differenz der Helligkeitslogarithmen kann man den Intensitätsunterschied der beiden Sterne in Grössenklassen (nach der üblichen Weise durch Division mit 0.4) einführen. Bezeichnet man denselben mit g , und ersetzt noch die verschiedenen Constanten durch eine einzige Constante K , so hat man endlich:

$$g = Ks.$$

Der Grössenunterschied zweier im Keilphotometer ausgelöschten Sterne ergibt sich also aus der Differenz s der Scalenablenungen unmittelbar durch Multiplication mit einer Constante K , welche man die Keilconstante nennt, und die von der Beschaffenheit des dunklen Glases, sowie von dem Winkel des Keiles abhängt. Giebt die Theilung Millimeter an, so ist K die Grössenabnahme eines Sternes bei einer Verschiebung des Keiles um 1 mm. Bestimmte Vorschriften über die Wahl dieser Constante lassen sich nicht geben. Ist der Keilwinkel sehr klein und das Glas nicht sehr dunkel, so tritt wegen der ausserordentlich langsamen Auslöschung leicht eine Ermüdung des Auges ein; ist dagegen die Steigung des Keiles gröss, so liegt die Gefahr vor, dass ein verhältnissmässig unbedeutendes Überschreiten des Auslöschungspunktes schon einen merklichen Fehler hervorruft. Die in England angefertigten Keile sind im Allgemeinen etwas flach und wenig stark absorbierend, sie müssen daher, um eine grössere Lichtschwächung hervorzubringen, ziemlich lang gewählt werden (die beiden von Pritchard benutzten Keile waren ungefähr 10 resp. 16½ cm lang, die zugehörigen Keilconstanten waren 0.10 resp. 0.07 Grössenklassen), und dies bringt den Übelstand mit sich, dass die Beschaffung von so grossen Stücken homogenen Glases schwierig ist. Die in Potsdam angewendeten Keile sind merklich kürzer (ungefähr nur 6 bis 8 cm lang), dagegen ist ihre Constante etwa doppelt so gross wie die der Pritchard'schen Photometer. Nach den in Potsdam gemachten Erfahrungen eignet sich eine Keilconstante von 0.15 bis 0.20 Grössenklassen am besten zu photometrischen Messungen. Werthe unter 0.10 und über 0.25 sind nach Möglichkeit zu vermeiden.

Die genaue Bestimmung der Keilconstante kann bei jedem Apparate nur auf experimentellem Wege erfolgen. Pritchard hat dafür zwei Methoden vorgeschlagen, die Anwendung von Blendvorrichtungen und die Benutzung von polarisirenden Medien. Die erstere Methode ist nach dem,

was im Vorangehenden über die Beugungswirkungen gesagt worden ist, entschieden zu verwerfen. Die zweite Methode ist theoretisch unanfechtbar, aber in der von Pritchard angewandten Form nicht empfehlenswerth. Pritchard benutzt zwei neben einander befindliche schmale Spalte, die eine genau bestimmte Entfernung von einander haben und setzt hinter dieselben seinen Keil. Auf die Spalte gelangt paralleles Licht, welches nach dem Passiren des Keiles auf ein doppeltbrechendes Prisma auffällt. Es entstehen so zwei Bilder von jedem Spalt, die senkrecht zu einander polarisirt sind. Durch ein vor dem Auge befindliches Nicolprisma lässt sich die Gleichheit der von beiden Spalten herrührenden Bilder herstellen und daher die einem bestimmten Stücke des Keiles entsprechende Absorption ermitteln.

Gegen dieses Verfahren kann man zweierlei einwenden. Erstens wird die Constante für ein viel zu kleines Stück des Keiles bestimmt, da die Entfernung der Spalte nicht sehr gross sein darf (bei Pritchard nur 9.5 mm); der Fehler der Messung geht also zu stark ein. Zweitens wird die Gleichheit zweier Lichteindrücke beurtheilt, der Keil also unter ganz anderen Bedingungen benutzt, als bei den Sternbeobachtungen. Spitta hat ausserdem noch darauf aufmerksam gemacht, dass bei der Pritchard'schen Methode infolge der an den inneren Flächen der Nicolprismen stattfindenden Reflexe leicht Fehler entstehen können, wenn nicht ein geeignetes Diaphragma zwischen Auge und Nicolprisma eingesetzt ist.

Anstatt des Pritchard'schen Verfahrens zur Bestimmung der Keilconstante wendet man mit Vortheil eine der folgenden Methoden an.

1. Vorschlag von Abney. Das Photometer wird auf einen durch ein geeignetes Arrangement hergestellten künstlichen Stern gerichtet. Vor demselben ist eine Scheibe mit verstellbaren sectorförmigen Ausschnitten angebracht, die in schnelle Rotation versetzt werden kann. Man giebt nun dem künstlichen Stern durch geeignete Wahl der Sektoren nacheinander bestimmte Helligkeitsgrade und bringt den Stern jedesmal durch Verschieben des Keiles zum Verschwinden. Auf diese Weise lässt sich die Keilconstante aus Messungen an beliebigen Stellen und über beliebig grosse Strecken des Keiles durchaus einwurfsfrei ermitteln.

2. Vorschlag von Spitta. Eine Anzahl von kleinen Spiegeln, deren Reflexionsvermögen genau gleich sein muss, wird so aufgestellt, dass von jedem derselben das Licht einer Flamme in gleichem Betrage auf eine sehr kleine weisse Scheibe geworfen wird. Diese Scheibe erscheint im Photometer als winziger weisser Fleck, und ihre Helligkeit ändert sich im Verhältniss der Anzahl der exponirten Spiegel; sie wird mit Hülfe des Keiles ausgelöscht. Die Methode ist etwas complicirter und nicht ganz

so sicher wie die Abney'sche, auch ist sie dadurch etwas beschränkt, dass die Anzahl der Spiegel nicht zu gross gewählt werden darf. Eine sorgfältige Untersuchung dieser Spiegel hinsichtlich ihrer Reflexionsfähigkeit ist ein unerlässliches Erforderniss, und dadurch werden leicht Fehlerquellen herbeigeführt.

3. Potsdamer Methode. Am einfachsten und sichersten lässt sich die Keilconstante mit Hülfe des Zöllner'schen Photometers bestimmen. Das Keilphotometer wird unmittelbar an Stelle des Oculars an ersteres angesetzt und der künstliche Stern zum Auslöchen gebracht, nachdem dessen Helligkeit durch Verstellung der Nicolprismen am Intensitätskreise in messbarem Grade verändert worden ist. Man kann das Verfahren auch in der Weise umkehren, dass man den Keil zunächst um eine ganz bestimmte Strecke verschiebt und den künstlichen Stern durch Drehung des Intensitätskreises zum Verschwinden bringt; die eigentliche Messung geschieht dann nicht mit dem Keil, sondern mit den polarisirenden Mitteln. Das erstere Verfahren ist entschieden vorzuziehen.

4. Benutzung von photometrisch bestimmten Sternen. Diese Methode hat den grossen Vortheil, dass keinerlei besondere instrumentellen Einrichtungen erforderlich sind, und dass die Constantenbestimmung unter genau den gleichen äusseren Bedingungen erfolgt, wie die gewöhnlichen Beobachtungen mit dem Keilphotometer. Man sucht aus den Helligkeitscatalogen (Harvard Photometry, Uranometria nova Oxoniensis, Potsdamer Durchmusterung) Sternpaare aus, die in Bezug auf Farbe nicht allzu sehr von einander verschieden sind, dagegen beträchtliche Intensitätsunterschiede aufweisen, und misst dieselben mit dem Keil. Um von den zufälligen Fehlern der Cataloghelligkeiten möglichst frei zu werden, thut man gut, eine sehr grosse Zahl von Sternpaaren zu benutzen.

Langley hat zur Constantenbestimmung die Anwendung des Bolometers empfohlen, und mehrfach ist der Vorschlag aufgetaucht, die Photographie nutzbar zu machen. Man blendet die eine Seite des Keiles bis auf zwei schmale, in einer bestimmten Entfernung von einander befindliche Spalte ab und bringt auf der anderen Seite einen Streifen photographischen Papiere an. Lässt man dann auf die Vorderseite paralleles Licht auf fallen, so giebt der Grad der Schwärzung auf dem Papiere ein Mass für das Verhältniss des an den beiden betreffenden Stellen des Keiles hindurchgegangenen Lichtes. Die Langley'sche Methode berücksichtigt nur die Wirkung des Keiles auf die Wärmestrahlen, die photographische Methode zieht nur die brechbareren Strahlen in Betracht, die letztere ist ausserdem nur einer geringen Genauigkeit fähig. Beide Methoden sind wenig zu empfehlen.

Der Benutzung jedes Keilphotometers muss ausser der Constantenbestimmung, die am besten nicht nur nach einer, sondern gleichzeitig nach mehreren der oben empfohlenen Methoden geschieht, noch eine specielle Untersuchung des Keiles in Bezug auf Homogenität des Glases, Regelmässigkeit der Gestalt und Durchlässigkeit für verschiedene Farben vorangehen.

Bei der Vollkommenheit, mit welcher heutigen Tages Glas hergestellt wird, sind auffallende Mängel in der Homogenität von vornherein kaum zu befürchten, namentlich wenn man die Keile nicht zu lang wählt und daher auch nicht zu grosse Glasstücke nöthig hat; dagegen bereitet das Anschleifen von absolut ebenen Flächen bei den verhältnissmässig dünnen Keilen einige Schwierigkeit, und es liegt die Gefahr vor, dass die begrenzenden Flächen eine leichte Krümmung besitzen, und dass infolge dessen einer Verschiebung des Keiles um gleiche Strecken nicht überall ein gleichmässiger Zuwachs der absorbirenden Schicht entspricht. Zur Untersuchung dieser Punkte wendet man ein ähnliches Verfahren an, wie bei der Ermittlung der Theilungsfehler von Massstäben oder Kreistheilungen. Man misst ein bestimmtes Helligkeitsintervall an verschiedenen Stellen des Keiles, indem man den Endpunkt der ersten Messung zum Anfangspunkte der zweiten wählt u. s. f. über die ganze zum Gebrauch bestimmte Länge des Keiles hinweg. Dann nimmt man ein anderes doppelt so grosses Helligkeitsintervall, ebenso ein dreimal, viermal u. s. w. so grosses und misst auch diese von denselben Anfangspunkten aus. Durch ein geeignetes Ausgleichungsverfahren leitet man dann die Fehler der einzelnen Anfangspunkte her und kann auf diese Weise eine vollkommene »Kalibrirung« des Keiles bewerkstelligen. Am besten eignet sich zu dieser Prüfung die oben empfohlene dritte Methode mit Benutzung des Zöllner'schen Photometers; die zur Hervorbringung bestimmter Helligkeitsunterschiede erforderlichen Einstellungen am Intensitätskreise werden dabei im Voraus berechnet.

Die Durchlässigkeit des Keiles für verschiedene Farben hängt von der Beschaffenheit des dunklen Glases ab. Vollkommen neutral gefärbtes Glas ist äusserst schwierig zu beschaffen. Loewy giebt an, dass er unter 50 verschiedenen Sorten nicht eine einzige gefunden habe, die seinen Anforderungen entsprochen hätte. In der That haben die meisten sogenannten neutralen Gläser eine schwach grünliche Färbung und lassen daher die rothen Strahlen weniger leicht hindurch als die gelben und grünen. Man überzeugt sich am einfachsten von der allgemeinen Absorptionswirkung eines Glases, indem man dasselbe durch ein Spektroskop betrachtet und sieht, an welchen Stellen Absorptionsstreifen auftreten. Man wird fast immer drei mehr oder weniger starke Bänder, zwei davon

im rothen und eins im blaugrünen Theile des Spectrums erkennen. Zur specielleren Untersuchung bedient man sich mit Vortheil wieder der künstlichen Sterne des Zöllner'schen Photometers, denen man mit Hülfe des Colorimeters die verschiedensten Farben geben kann. Man erhält so Sterne von ähnlichen Farbennüancen, wie sie auch bei den wirklichen Sternen vorkommen; nur weisse oder bläulichweisse Sterne lassen sich nicht herstellen. Wenn man nun dasselbe Helligkeitsintervall in den verschiedenen Farben mit dem Keil misst, so kann man die Unterschiede in der Absorptionsfähigkeit rechnungsmässig bestimmen. Die von Töpfer in Potsdam gelieferten Keile zeichnen sich in dieser Beziehung durch bemerkenswerthe Gleichförmigkeit aus.

Über den Gebrauch und den Anwendungsbereich des Keilphotometers lassen sich noch folgende allgemeine Vorschriften aufstellen.

Da Fehler in der Constantenbestimmung die Resultate der Messungen um so stärker verfälschen, je grösser der beobachtete Helligkeitsunterschied ist, so empfiehlt es sich nicht, sehr helle und sehr schwache Sterne direct mit einander zu vergleichen; jedenfalls ist es unstatthaft, den Keil ausserhalb der Strecke, für welche speciell die Constante bestimmt ist, zu benutzen. Bei sorgfältig untersuchten Keilen wird man eine Differenz von 4 bis 5 Grössenklassen unbedenklich messen können.

Die Unmöglichkeit, absolut neutrales Glas zu erhalten, bedingt grosse Vorsicht bei der Vergleichung sehr verschieden gefärbter Sterne. Die Messungen rother oder röthlicher Sterne sind nach Möglichkeit ganz zu vermeiden.

Mit allen Auslöschungsphotometern hat das Keilphotometer die schon früher besprochenen Übelstände gemein, welche durch die Erleuchtung des Grundes und die wechselnde Empfindlichkeit des Auges herbeigeführt werden. Es sind demnach Beobachtungen in der Dämmerung und in hellen Mondnächten zu unterlassen, jedenfalls dürfen unter keinen Umständen Sterne in der Nähe des Mondes mit anderen weit davon entfernten verbunden werden. Es ist rathsam, nur unmittelbar aufeinander folgende Differenzmessungen auszuführen und die Beobachtungen stets vollkommen symmetrisch anzuordnen*. Die ersten Messungen jedes Abends sind wegen der am Anfange der Beobachtungen besonders stark veränderlichen Empfindlichkeit des Auges am besten gar nicht zu verwerthen.

Die zuerst von Kayser empfohlene, später wieder von Pickering in Vorschlag gebrachte Beobachtungsmethode, bei welcher die Zeitdauer des Durchganges der Sterne durch den Keil bis zum Verschwinden als Mass benutzt wird, ist aus zwei Gründen zu verwerfen. Erstens ist die Genauigkeit der Auslöschungsbeobachtung nicht die gleiche für Sterne von verschiedener Declination, weil diese den Keil mit verschiedener

Geschwindigkeit passiren, und zweitens erfordert diese Methode einen unverhältnissmässigen Zeitaufwand, da bei jeder einzelnen Messung der Stern immer wieder den ganzen Weg von dem Antrittsfaden bis zum Verschwindungspunkte durchlaufen muss. Es ist auch ein Nachtheil, dass die Auslöschung, je nach der Helligkeit der Sterne, an verschiedenen Stellen des Gesichtsfeldes stattfindet.

In Figur 38 ist die Abbildung eines nach meinen Angaben von Töpfer in Potsdam gebauten Instrumentes mit Keilphotometer beigelegt, welches wegen seiner bequemen Handhabung sehr zu empfehlen ist. Es hat die Form eines Équatorial coudé und kann für jede Polhöhe eingestellt werden. Das Ocular ist nach dem Pole gerichtet, der Beobachter braucht also seine Stellung niemals zu verändern. Die Declination der Sterne wird an dem Kreise *a* eingestellt, welcher mit dem vor dem Objectiv befindlichen drehbaren Prisma fest verbunden ist; *b* ist der Stundenkreis und *c* eine Vorrichtung zur Feinbewegung, um die Sterne immer in der Mitte des Gesichtsfeldes zu halten. Da das Photometer sich bei der Drehung im Stundenwinkel mitbewegt, so bleibt infolge der Spiegelung an den beiden Prismen (eins vor dem Objectiv, das andere im Innern des gebrochenen Fernrohrs) der im Keilphotometer angebrachte Steg nicht parallel der täglichen Bewegung. Das Photometer ist daher noch für sich im Positionswinkel drehbar, und, wie man leicht sieht, braucht man an dem Positionskreise *d* nur die jedesmalige Declination des Sterns einzustellen, damit derselbe sich innerhalb des Steges, also senkrecht zur Richtung der Keilverschiebung, durch das Gesichtsfeld bewegt. Bei dem für das Potsdamer Observatorium construirten Apparate hat das Objectiv eine Öffnung von 5.5 cm und eine Brennweite von 60 cm. Es eignet sich in diesen Dimensionen zur Beobachtung aller Sterne bis zur achten Grösse.

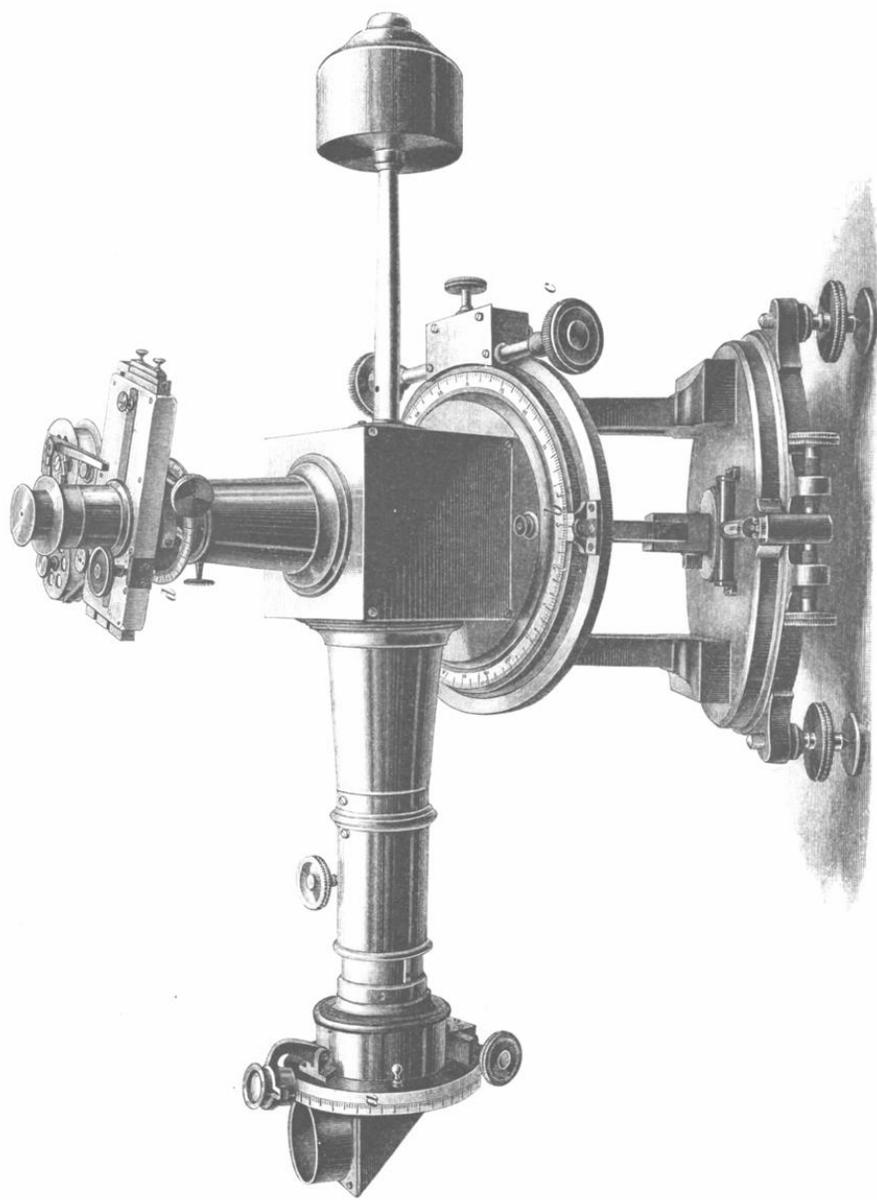


Fig. 38.

Capitel II.

Photometer, bei denen die Gleichheit zweier Lichteindrücke beurtheilt wird.

Die zweite Classe von Photometern, bei denen die zu messende Lichtquelle durch irgend welche Mittel soweit geschwächt wird, bis ihre Helligkeit der einer anderen Lichtquelle gleichkommt, hat vor den Auslöschungsphotometern so viele Vortheile voraus, dass ihre grössere Verbreitung ganz selbstverständlich erscheint. Einer der Hauptvorzüge dieser Methode besteht darin, dass das Auge viel weniger angestrengt wird, als bei der Beobachtung des Verschwindens, und dass eine Änderung der Empfindlichkeit des Auges wenig oder gar keinen Einfluss auf die Messungen ausübt, weil die beiden zu vergleichenden Lichtquellen gleichmässig davon betroffen werden. Dabei ist die Sicherheit der einzelnen Einstellung grösser als bei der Auslöschungsmethode, schon deshalb, weil die eigentliche Pointirung keine einseitige ist, vielmehr das zu messende Object abwechselnd heller und schwächer gemacht werden kann als das Vergleichsobject. Die verschiedene Helligkeit des Grundes kommt bei dieser Gattung von Photometern zwar auch in Betracht, der störende Einfluss derselben lässt sich aber durch geeignete Vorrichtungen bei den meisten Apparaten so gut wie ganz unschädlich machen; es ist nämlich fast immer zu erreichen, dass sich die Helligkeiten des Grundes, auf den die zu vergleichenden Objecte, beispielsweise zwei Sterne, projicirt erscheinen, im Instrumente mit einander vermischen, so dass die Objecte auf einem gleichmässig hellen Untergrunde sichtbar sind. Es wäre also nur die Frage zu entscheiden, ob die Genauigkeit der Vergleichung von der grösseren oder geringeren Intensität dieses gemeinschaftlichen Grundes abhängt. Nach allen bisherigen Untersuchungen ist dies nicht der Fall. Die meisten Beobachter stimmen zwar darin überein, dass die Vergleichung für das Auge am Angenehmsten auszuführen ist bei einem schwach erhellten Gesichtsfelde, dass die Sicherheit aber keineswegs grösser ist als bei ganz hellem oder ganz dunklem Gesichtsfelde. Die Methode hat demnach den Vortheil, dass Sterne mit einander verglichen werden können, die am Himmel sehr weit von einander entfernt sind, und dass Beobachtungen bei heller Dämmerung und in Mondscheinmächten durchaus unbedenklich sind. Dafür treten aber auch einige Übelstände auf. Wie schon in der

Einleitung zu diesem Abschnitte hervorgehoben wurde, müssen die beiden Lichteindrücke gleichzeitig unmittelbar neben einander betrachtet werden, da das Auge nicht im Stande ist, den Eindruck einer Helligkeit auch nur kurze Zeit festzuhalten; auch ist es unbedingt erforderlich, dass die beiden Objecte in Bezug auf ihr Aussehen und ihre scheinbare Grösse einander vollkommen ähnlich sind. Diese Bedingungen lassen sich zum Theil nur durch ziemlich complicirte mechanische Einrichtungen erfüllen, und in dieser Beziehung stehen die meisten Gleichheitsphotometer den Auslöschungsphotometern nach. Da die Vergleichung von Flächen im Allgemeinen sicherer ausführbar ist, als diejenige von Punkten, so wäre die Benutzung solcher Apparate vorzuziehen, in denen, wie bei dem Steinheil'schen Prismenphotometer, das Licht der zu messenden Himmelskörper in eine Fläche ausgebreitet werden kann. Diese Methode ist aber wegen des bedeutenden Lichtverlustes nur auf hellere Objecte anwendbar; bei der Messung schwächerer Sterne ist allein die Punktvergleichung möglich. Ganz besonders brauchbar für die Himmelsphotometrie hat sich die Einführung von künstlichen Vergleichsobjecten erwiesen, deren Helligkeit messbar verändert werden kann. Man ist dabei freilich bis zu einem gewissen Grade von der Constanz der benutzten Lichtquelle abhängig, und das Aussehen eines künstlichen Sterns unterscheidet sich stets nicht unmerklich von dem des wirklichen Sterns, schon aus dem Grunde, weil das Bild des letzteren durch die Unruhe der Luft, durch Scintillation u. s. w. beeinflusst wird; aber diese Nachtheile werden zum grossen Theil wieder durch die grössere Einfachheit der Construction und die bequemere Handhabung aufgewogen. Ein Hauptübelstand der Vergleichungsmethode ist der Einfluss der Farbe. Es ist schwierig, ja fast unmöglich, die Gleichheit der Intensität zweier sehr verschiedenen gefärbten Objecte richtig zu beurtheilen, und die Angaben verschiedener Beobachter weichen daher auch unter Umständen sehr beträchtlich von einander ab. So lange man keine zuverlässigen Mittel besitzt, um die Färbung einer Lichtquelle in der Weise zu ändern, dass man zugleich auch angeben kann, um wie viel die lebendige Kraft derselben sich vermindert oder vergrössert hat, so lange wird jede Vergleichung verschiedenfarbiger Objecte mit einer gewissen Unsicherheit verbunden sein.

Aus der überaus grossen Zahl der zur unmittelbaren Vergleichung zweier Lichteindrücke bestimmten Photometer sollen im Folgenden die wichtigsten besprochen und dabei speciell diejenigen bevorzugt werden, deren Brauchbarkeit durch Beobachtungen direct nachgewiesen worden ist. Die Eintheilung erfolgt wieder nach den in der Einleitung zu diesem Abschnitte angeführten Hauptkategorien, welche bei dieser Gattung von Photometern fast sämmtlich zur Anwendung gekommen sind.

1. Benutzung des photometrischen Hauptgesetzes vom Quadrate der Entfernung.

Das erste Grundgesetz der Photometrie, nach welchem sich die lebendigen Kräfte der Ätherbewegung an zwei verschiedenen Punkten eines Lichtstrahls umgekehrt wie die Quadrate der Entfernungen dieser Punkte von der Lichtquelle verhalten, ist naturgemäss schon sehr früh bei der Construction von photometrischen Apparaten zur Anwendung gebracht worden und liefert uns auch heute noch eins der einfachsten und sichersten Hilfsmittel zur Prüfung von neuen Lichtmessungsmethoden. Bouguer und Lambert haben sich bei ihren photometrischen Untersuchungen fast ausschliesslich dieses Principes bedient, und eine ganze Reihe der bekanntesten und weitverbreitetsten Instrumente der technischen Photometrie beruht auf diesem Gesetze.

Da es bei den älteren hierher gehörigen Apparaten auf eine indirecte Vergleichung zweier Lichtquellen ankam, indem nur die von ihnen auf einer Fläche hervorgebrachten Beleuchtungen in Betracht gezogen wurden, so ist es erklärlich, dass dieselben für die Astrophotometrie, insbesondere für die Photometrie der Fixsterne, wo es sich um ausserordentlich schwache Lichteindrücke handelt, keine wesentliche Bedeutung gewonnen haben. Immerhin verdanken wir denselben die ersten brauchbaren Helligkeitsmessungen an Sonne und Mond, sowie werthvolle Resultate bezüglich mancher Fragen der atmosphärischen Photometrie.

Es dürfte daher nicht gerechtfertigt sein, diese älteren Instrumente ganz mit Stillschweigen zu übergehen; es wird aber eine kurze Beschreibung derselben, ohne näheres Eingehen auf ihre Besonderheiten und ihre Handhabung, ausreichend erscheinen.

a. Die Photometer von Bouguer, Ritchie und Foucault.

Bouguer¹⁾ hat zwei verschiedene Formen von Apparaten benutzt, je nachdem es sich um die Messung von verhältnissmässig wenig ausgedehnten leuchtenden Flammen oder um die Vergleichung von grossen Flächen handelte. Das erste dieser Bouguer'schen Photometer (Fig. 39, Seite 196) besteht aus zwei unter einem stumpfen Winkel aneinander stossenden Brettchen, beide mit gleich grossen kreisrunden Öffnungen versehen, die mit geöltem Papier bedeckt sind. Die zu vergleichenden Lichtquellen S und S' sind so aufgestellt, dass ihr Licht senkrecht auf die beiden Öffnungen auffällt, und das Auge des Beobachters befindet sich, gegen jedes fremde

1) *Traité d'optique*, p. 9 und 32.

Licht durch geeignete Vorrichtungen geschützt, in der den stumpfen Winkel halbirenden Ebene. Ein drittes Brettchen ist noch in der verlängerten Halbiringsebene angebracht, um von jeder Öffnung das für sie nicht bestimmte Licht abzuhalten. Während die eine Lichtquelle unverändert stehen bleibt, wird die andere immer in der Richtung senkrecht zur beleuchteten Ebene verschoben, bis die beiden Öffnungen dem Auge gleich hell erscheinen. Die Quadrate der Entfernungen der Lichtquellen von den Öffnungen geben dann das Mass für das Helligkeitsverhältniss derselben.

Das zweite Bouguer'sche Photometer (Fig. 40) besteht aus zwei Holzröhren, die an dem einen Ende durch ein Scharnier so miteinander verbunden sind, dass sie jeden beliebigen, an einem Gradbogen einstellbaren Winkel miteinander einschliessen können. Die unteren Enden dieser

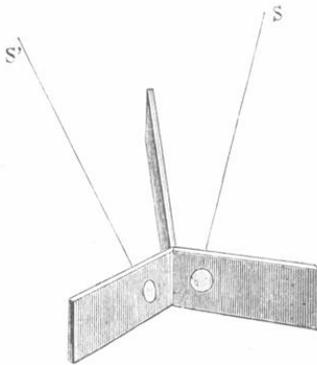


Fig. 39.

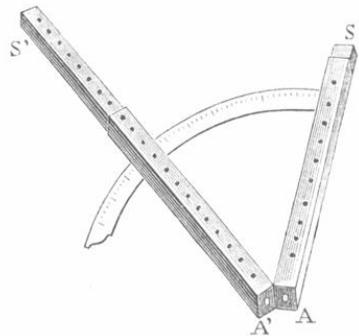


Fig. 40.

Röhren sind mit Deckeln verschlossen, in welchen sich kleine, mit geöltem Papier überzogene Öffnungen A und A' befinden. In die oberen Enden der Röhren lassen sich andere Röhren einschieben, die mit freien Öffnungen S und S' von bedeutend grösserem Durchmesser als A und A' versehen sind. Die beiden Röhren werden auf die zu vergleichenden Flächen, z. B. auf zwei verschiedene Stellen des Himmels oder auf zwei von der Sonne beleuchtete Wände etc., eingestellt, und die auf die hellere Fläche gerichtete Röhre wird dann soweit ausgezogen, bis die kleinen Öffnungen A und A' gleich hell erscheinen. Unter der Voraussetzung, dass jede der beiden zu vergleichenden Flächen an allen Punkten gleichmässig hell ist, dass ferner die Öffnungen S und S' , ebenso auch A und A' unter einander gleich sind, findet man, dass die Flächenhelligkeiten sich zu einander verhalten, wie umgekehrt die Quadrate der Rohrlängen.

Eine Verbesserung des ersten Bouguer'schen Photometers ist das viel benutzte Ritchie'sche¹⁾ Photometer. Dasselbe (Fig. 41) ist ein innen geschwärzter Kasten, in dessen oberer Wand bei *abc* eine rechteckige Öffnung angebracht ist, bedeckt mit geöltem Papier. Im Innern des Kastens sind zwei Spiegel befestigt, die bei *b* unter einem rechten Winkel aneinander stoßen. Die zu vergleichenden Lichtquellen werden vor die offenen Enden des Kastens gestellt, und der letztere wird zwischen ihnen längs eines Massstabes so lange verschoben,

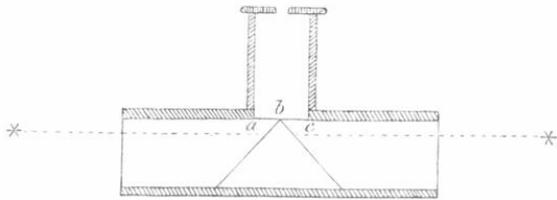


Fig. 41.

bis die beiden in *b* aneinander grenzenden Theile der Öffnung gleich hell erscheinen. Man blickt auf diese Öffnung durch eine längere, innen geschwärzte Röhre, um fremdes Licht vom Auge fern zu halten. Der Vortheil der Einrichtung gegenüber dem Bouguer'schen Photometer besteht darin, dass die beiden erleuchteten Felder unmittelbar aneinander grenzen. Haben die zu vergleichenden Lichtquellen verschiedene Färbung, so empfiehlt Ritchie, die Öffnung im Photometer mit einem in kleiner Schrift bedruckten Papierstreifen zu bedecken. Die Gleichheit der Beleuchtung wird dann als erreicht betrachtet, wenn die Schrift über die ganze Länge der Öffnung hin gleich gut gelesen werden kann.

Fast noch grössere Verbreitung als das Ritchie'sche Photometer hat das Foucault'sche²⁾ gefunden (photomètre à compartiment), welches ebenfalls als eine Modification des Bouguer'schen Photometers zu betrachten ist. Ein innen geschwärzter Holzkasten (Fig. 42) ist an der einen Seite offen und hat an der gegenüberliegenden Seite eine kreisrunde Öffnung, die mit einem halbdurchsichtigen Schirm bedeckt ist. Dieser Schirm wird von zwei Glasplatten gebildet, zwischen denen sich eine dünne gleichförmige Stärkemehlschicht befindet.

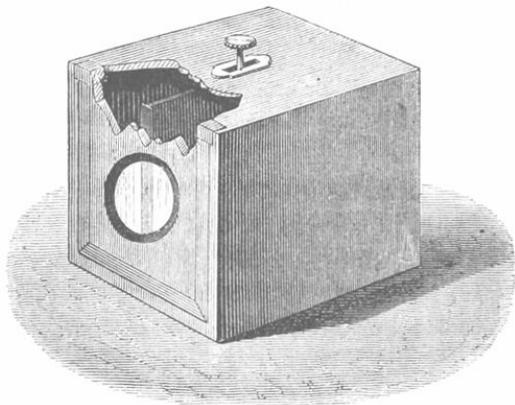


Fig. 42.

1) Transactions of the R. Soc. of Edinburgh. Vol. 10.

2) Recueil des travaux scientifiques de Léon Foucault, Paris 1878, p. 100.

Eine undurchsichtige Zwischenwand theilt den Kasten in zwei Theile und lässt sich mittels eines Knopfes vorwärts und rückwärts bewegen. Dadurch kann man erreichen, dass die von den beiden Lichtquellen beleuchteten Halbkreise in einer scharfen Linie aneinander stossen. Die Entfernungen der Lichtquellen von dem Schirme müssen mittels Massstabes direct gemessen werden.

b. Das Rumford'sche Schattenphotometer.

Etwas weniger genaue Resultate, als die im Vorangehenden beschriebenen Apparate liefert das gewöhnlich unter dem Namen »Rumford'sches Schattenphotometer« bekannte Instrument¹⁾. Dasselbe sollte eigentlich Lambert'sches Photometer heissen, weil sich Lambert bei den meisten Helligkeitsmessungen einer vollkommen ähnlichen Einrichtung bedient hat. Ausser von Lambert ist dieses Photometer auch von anderen Beobachtern mehrfach zu Messungen an helleren Himmelskörpern benutzt worden, und noch in der allerneuesten Zeit hat Abney bei seinen Helligkeitsvergleichen der verschiedenen Partien des Sonnenspectrums von diesem Principe Gebrauch gemacht.

Vor einer senkrechten weissen Fläche AA_1 (Fig. 43) ist ein runder

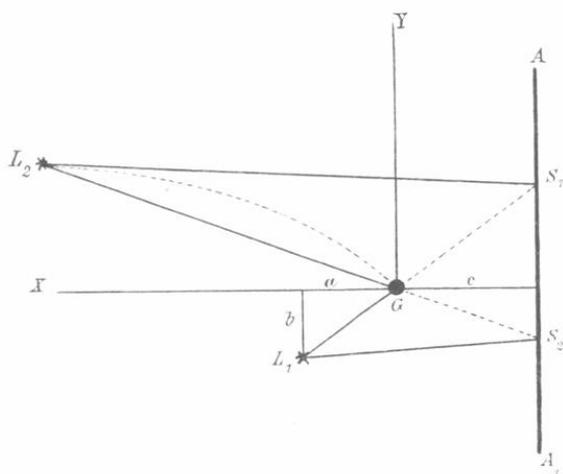


Fig. 43.

Stab G senkrecht aufgerichtet, von welchem durch die beiden zu vergleichenden Lichtquellen L_1 und L_2 die Schatten S_1 und S_2 entworfen werden. S_1 erhält nur Licht von L_2 , dagegen S_2 nur Licht von L_1 , während die übrige Fläche von beiden Lichtquellen zusammen beleuchtet wird. L_1 bleibt in constanter Entfernung von dem Schirme AA_1 , und L_2 wird nun so lange verschoben, bis die beiden

Schatten gleich intensiv erscheinen; die Distanzen $L_1 S_2$ und $L_2 S_1$ sind dann genau zu bestimmen. Sind die Lichtquellen etwas ausgedehnter, so stören bei der Vergleichung die verwaschenen Halbschatten. Es ist

1) Philos. Trans. of the R. Society of London. 1794, p. 67.

erwünscht, dass L_1 und L_2 sich in der Nähe der Normalen zum Schirm befinden, welche durch den Stab G hindurch geht, damit einerseits die Schatten nahe bei einander liegen, andererseits die Beleuchtung von S_1 und S_2 unter angenähert denselben Incidenzwinkeln erfolgt. Ist diese Bedingung nicht erfüllt, und hat L_1 eine unveränderliche Position, so lässt sich sehr leicht die Curve bestimmen, auf welcher L_2 verschoben werden muss, damit die Schatten unter gleichen Incidenzwinkeln beleuchtet werden. Macht man nämlich G zum Anfangspunkte eines rechtwinkligen Coordinatensystems, dessen x -Axe mit der Normalen zum Schirme zusammenfällt, nennt die Coordinaten von L_1 in Bezug auf dieses System a und b , ferner den senkrechten Abstand des Stabes G vom Schirme c , so findet man für den geometrischen Ort der Lichtquelle L_2 die Gleichung:

$$abx^2 - (a^2 + 2ac)xy + bc(c + 2a)x - ac^2y = 0.$$

Dies ist die Gleichung einer Hyperbel, welche durch den Coordinatenanfang G hindurch geht. Mittels der bekannten Werthe von a , b und c kann man bei jedem Photometer den Weg der Lichtquelle L_2 aufzeichnen und die jedesmalige Distanz L_2S_1 tabellarisch berechnen.

e. Das Bunsen'sche Fleckphotometer.

Bei diesem Instrumente, welches in der technischen Photometrie eine der ersten Stellen einnimmt, werden die zu vergleichenden Lichtquellen zu beiden Seiten eines Papierschirmes aufgestellt, auf welchem sich ein durch Öl oder Stearin hervorgebrachter Fettfleck befindet. Derselbe erscheint bei auffallendem Lichte dunkel auf hellem Grunde, dagegen bei durchgehendem Lichte hell auf dunklem Grunde, und wenn daher die Beleuchtung von beiden Seiten gleich stark ist, so wird der Fettfleck sich gar nicht mehr von dem übrigen Schirme unterscheiden lassen. Ist dieser Effect durch Verschiebung der beiden Lichtquellen erreicht, so verhalten sich die Helligkeiten derselben zu einander, wie die Quadrate ihrer Entfernungen vom Schirme.

Die gebräuchlichste von Rüdorff¹⁾ empfohlene Anordnung dieses Photometers wird durch die schematische Figur 44 (Seite 200) erläutert. L_1 und L_2 sind die beiden Lichtquellen, P der Photometerschirm mit dem Fettfleck F in der Mitte, S_1 und S_2 zwei Spiegel, die einen stumpfen Winkel mit einander bilden, in dessen Halbirungsebene der Schirm steht. Das Auge sieht durch eine Öffnung o in einem dunklen Schirm auf die

1) Pogg. Annalen. Jubelband, p. 234.

Spiegel und erblickt daher die beiden Seiten des Fettflecks. Es lässt sich leicht nachweisen, dass derselbe nie gleichzeitig auf beiden Seiten verschwinden kann, weil der nicht gefettete Theil des Schirmes mehr

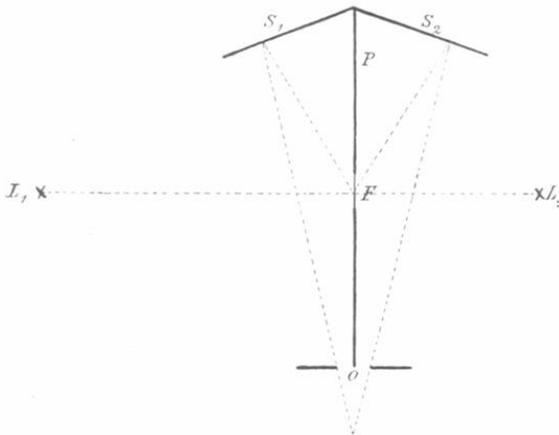


Fig. 44.

Licht absorbiert als der gefettete Theil des Schirmes. Man beobachtet daher meist so, dass man erst den Fettfleck auf der rechten, dann auf der linken Seite verschwinden lässt und das Mittel aus den gemessenen Distanzen zur Berechnung benutzt. Man kann auch eine bestimmte Hilfslichtquelle stets in unveränderter Entfernung auf der einen Seite des Papierschirmes stehen lassen und die zu messenden

Lichtquellen nach einander auf der anderen Seite in solche Entfernungen bringen, dass der Fettfleck jedesmal auf dieser Seite unsichtbar wird.

Die Litteratur über das Bunsen'sche Photometer ist ausserordentlich umfangreich, und es sind eine Menge von wichtigen Verbesserungen von v. Hefner-Alteneck, Krüss, Weber u. A. vorgeschlagen worden, um die Empfindlichkeit der Messungen zu steigern. Es soll hier nicht weiter auf diese Verbesserungen eingegangen werden, weil das Bunsen'sche Photometer in der Astrophotometrie überhaupt nur sehr wenig Verwendung gefunden hat. In der Technik scheint es neuerdings etwas verdrängt zu werden durch die ausgezeichneten Lichtmesser von Lummer und Brodhun¹⁾ und von Weber²⁾, die im Princip eine gewisse Ähnlichkeit mit demselben haben, aber eine weit grössere Genauigkeit zu erreichen gestatten. Auf eine nähere Beschreibung dieser, für die Himmelsphotometrie ebenfalls nur in ganz beschränktem Grade anwendbaren Instrumente muss hier verzichtet werden.

d. Das Herschel'sche Astrometer.

Wenn von einer weit entfernten leuchtenden Fläche Licht auf eine Linse von sehr kurzer Brennweite auffällt, so entsteht in dem Focus der-

1) Zeitschrift für Instrumentenkunde. Jahrg. 9, p. 41 und 461.

2) Wiedemann, Annalen. Bd. 20, p. 326.

selben ein punktförmiges Bildchen, welches als künstlicher Stern benutzt werden kann. Betrachtet man diesen künstlichen Stern aus verschiedenen Entfernungen mit dem blossen Auge, so ist nach dem früher Gesagten klar, dass die auf der Netzhaut hervorgebrachte Lichtempfindung umgekehrt proportional sein muss dem Quadrate der jedesmaligen Entfernung des Auges von dem Brennpunkte der Linse. Dieses Princip hat J. Herschel¹⁾ der Construction seines Photometers zu Grunde gelegt, indem er die Helligkeiten der mit blossem Auge sichtbaren Sterne mit der Helligkeit der durch eine Linse sternartig verkleinerten Mondscheibe verglich. So primitiv und mangelhaft auch der ganze Messapparat ist und so sehr er in mancher Hinsicht zu Bedenken Anlass giebt, so hat dieses Instrument

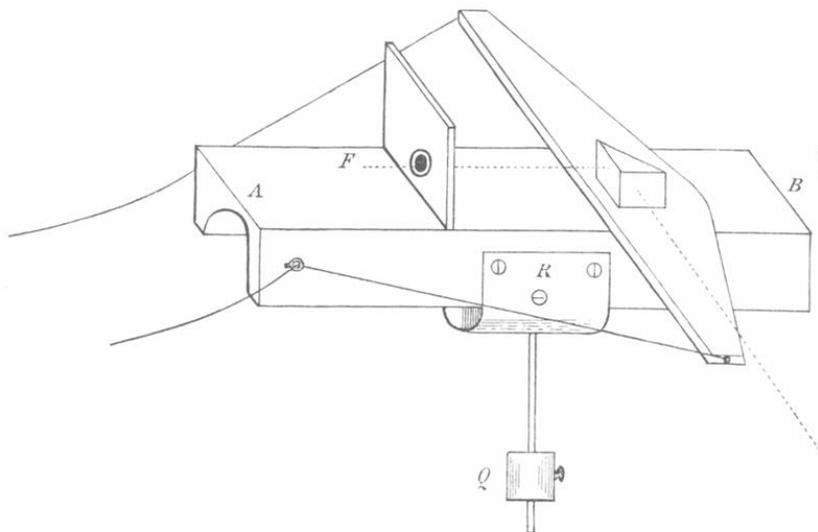


Fig. 45.

für die Entwicklungsgeschichte der Astrophotometrie doch eine gewisse Bedeutung, weil mittels desselben der erste nicht auf blossen Schätzungen beruhende Helligkeitscatalog einer Anzahl von hellen Sternen hergestellt worden ist.

Die Einrichtung des Haupttheils dieses Photometers ist aus Figur 45 ersichtlich.

Ein Holzkasten *AB* von ungefähr 38 cm Länge kann auf einer cylindrischen Walze von 366 cm Länge hin und her geschoben werden. Durch eine federnde Vorrichtung, die an dem eisernen Bande *R* befestigt

1) Results of astron. observ. made during 1834—1838 at the Cape of Good Hope. London 1847, p. 353.

ist, wird der Kasten leicht gegen die Walze gedrückt, ohne dass die Beweglichkeit dadurch gehindert würde. Ein Gegengewicht Q balancirt den Kasten aus und bewirkt, dass derselbe bei einer Drehung um die Walze in jeder Lage stehen bleiben kann. Die Walze selbst endet in zwei Zapfen, von denen der eine frei beweglich in einem Lager ruht, welches an einem tragbaren dreifüssigen Stativ in Augenhöhe angebracht ist. An dem anderen Zapfen ist ein Seil befestigt, vermittelst dessen die Walze an einem feststehenden Balken über eine nach allen Richtungen drehbare Rolle bis zu einer beträchtlichen Höhe hinaufgezogen werden kann. Durch diese Einrichtung und durch geeignete Aufstellung des tragbaren Stativs lässt sich der Apparat nach jedem dem Zenith nicht allzu nahen Punkte des Himmels richten, und man betrachtet die zu messenden Sterne durch Visiren längs der Walze mit dem blossen Auge. Auf dem verschiebbaren Kasten AB ist, um einen Zapfen drehbar, ein Brettchen angebracht mit einem darauf befestigten rechtwinkligen total reflectirenden Prisma. Dieses Brettchen kann mittelst zweier Schnüre ein wenig nach jeder Seite hin um den Zapfen bewegt werden, so dass von Stellen des Himmels, die etwa 60° bis 100° von dem Punkte, auf welchen die Walze gerichtet ist, abstehen, noch das Licht längs des Kastens hin total reflectirt wird. Eine Linse von kurzer Brennweite, die in einem auf dem Kasten senkrecht befestigten Brette sitzt, entwirft bei F ein punkartiges Bild von dem durch das Prisma reflectirten Mondlichte. Der Beobachter erblickt den so erzeugten künstlichen Stern gleichzeitig mit dem direct anvisirten Sterne und kann ihn durch Bewegen des Kopfes nach Belieben rechts, links, oben oder unten neben den wirklichen Stern bringen. Der ganze Kasten wird nun auf der Walze soweit dem Auge genähert oder von ihm entfernt, bis der künstliche und der wirkliche Stern gleich hell erscheinen, und dann wird die Entfernung des Brennpunktes F vom Auge möglichst genau gemessen. Hat man in derselben Weise einen zweiten Stern beobachtet, so ergiebt sich das Helligkeitsverhältniss der beiden Objecte unmittelbar aus dem umgekehrten Verhältnisse der Quadrate der gemessenen Distanzen zwischen Auge und künstlichem Stern. Die zu vergleichenden Gestirne dürfen nicht allzu verschiedene Abstände vom Monde haben, weil sonst die Incidenzwinkel, unter welchen die Mondstrahlen auf die Prismenflächen auffallen, zu stark von einander differiren würden und dadurch die Constanz der Helligkeit des künstlichen Sterns gefährdet sein würde. Man wird gut thun, in Betreff der Abstände zwischen Mond und Sternen bei den Beobachtungen sich etwa auf das oben angegebene Intervall von 60° bis 100° zu beschränken, wodurch freilich der Anwendung des Herschel'schen Astrometers von vornherein eine gewisse Grenze gesteckt ist.

Solange der künstliche Mondstern, wie bisher vorausgesetzt ist, nur als Vergleichslichtquelle dient, und lediglich Helligkeitsdifferenzen zwischen Sternen mittelst dieses Verbindungsgliedes bestimmt werden, lassen sich mit Hülfe des Herschel'schen Photometers, so unvollkommen es auch ist, ganz brauchbare Messungsergebnisse erzielen.

Wenn der Herschel'sche Catalog, in welchem alle Helligkeiten auf einen einzigen Stern (α Centauri) als Einheit bezogen sind, heute nur noch ein historisches Interesse beanspruchen kann, so liegt dies weniger an den Messungen selbst, als an der unzureichenden Bearbeitung derselben und insbesondere an der Vernachlässigung des Extinctionseinflusses. Zöllner¹⁾ hat aus den Herschel'schen Beobachtungen die Werthe für das Helligkeitsverhältniss zweier Sterne zusammengestellt, die an neun verschiedenen Abenden mit einander verglichen waren. Mit Berücksichtigung der Extinction ergibt sich daraus für den wahrscheinlichen Fehler eines einzelnen Abends der Werth ± 0.0236 im Helligkeitslogarithmus oder ± 0.06 Grössenklassen, ein Genauigkeitsgrad, der selbst mit den besten modernen Photometern kaum übertroffen werden kann.

Eine Vereinigung der an verschiedenen Abenden mit dem Astrometer angestellten Messungen, wie sie Herschel ausgeführt hat, ist natürlich nur dann möglich, wenn man das Gesetz kennt, nach welchem die Helligkeit des Mondes von seiner Phase abhängt. Herschel hat sich zur Reduction der jedesmaligen Mondhelligkeit auf die Vollmondsintensität der von Euler aufgestellten Formel bedient und hat auf diese Weise für die Lichtstärke desselben Sterns an verschiedenen Abenden sehr erheblich von einander abweichende Werthe erhalten. Er suchte diese Unterschiede durch den Einfluss der verschiedenen Erleuchtung des Himmelsgrundes bei wechselndem Abstände des Sterns vom Monde zu erklären. Bond und Zöllner haben aber nachgewiesen, dass, wenn man zur Reduction der einzelnen Mondphasen auf einander anstatt der Euler'schen Formel eine von ihnen empirisch abgeleitete Intensitätscurve anwendet, die Herschel'schen Beobachtungen desselben Sterns an verschiedenen Abenden in durchaus befriedigende Übereinstimmung gebracht werden können; Bond hat auch noch direct gezeigt, dass die Erleuchtung des Himmelsgrundes auf die Messungen mit dem Herschel'schen Astrometer nur einen geringen Einfluss ausüben kann. Die Benutzung des Mondes zur Hervorbringung des künstlichen Sterns bleibt jedenfalls der bedenklichste Punkt dieses Photometers. Herschel hat dies wohl selbst gefühlt und daher später den Vorschlag gemacht, anstatt des Mondes den Planeten Jupiter zu benutzen, dessen Licht, abgesehen von den durch die veränderlichen Abstände

1) Zöllner, Photometrische Untersuchungen. Leipzig 1865, p. 176.

von Sonne und Erde bedingten Schwankungen, als hinreichend constant angesehen werden darf. Man könnte ebenso gut, wenn man sich nur auf Differenzmessungen beschränken wollte, zur Hervorbringung des künstlichen Sterns eine irdische Lichtquelle benutzen, die in geeigneter Weise mit dem Apparate in Verbindung zu bringen wäre.

e. Das Steinheil'sche Prismenphotometer.

Fast genau zu derselben Zeit, in welcher Herschel sein Astrometer zu Helligkeitsmessungen am Fixsternhimmel benutzte, trat Steinheil¹⁾ mit seinem Prismenphotometer hervor. Wenn dieses Instrument auch ebenso wie das Herschel'sche heute veraltet und durch bessere verdrängt ist, so gebührt ihm doch wegen der Eigenartigkeit seiner Construction und vor Allem wegen der ausgezeichneten Resultate, welche Seidel mit Hilfe dieses Photometers gewonnen hat, in der Geschichte der Helligkeitsmessungen für alle Zeiten ein hervorragender Platz. Dem Herschel'schen Astrometer ist es, sowohl was die mechanische Einrichtung als die Genauigkeit der Beobachtungen anbelangt, weit überlegen.

Das von Steinheil erstrebte Endziel ist die directe Vergleichung zweier beliebigen Sterne am Himmel, und das Charakteristische, was sein Instrument überhaupt von allen anderen Photometern unterscheidet, ist der zum ersten Male gemachte Versuch, die Sterne nicht im Bilde, sondern ausserhalb desselben zu beobachten und die Punktvergleichung durch die anerkanntermassen sicherere Flächenvergleichung zu ersetzen. Ein Nachtheil dieser Methode, welcher sofort in die Augen springt, ist der bedeutende Lichtverlust, und dieser Nachtheil ist wohl auch der hauptsächlichste Grund, weshalb das Steinheil'sche Photometer trotz seiner grossen Vorzüge keine weitere Verbreitung gefunden hat. Wollte man dasselbe für die schwächeren Sterne am Himmel benutzen, so müsste man die Dimensionen so gross wählen, dass die Handhabung des Apparates ausserordentlich erschwert wäre, und die Kosten seiner Herstellung ganz unerschwinglich würden. Die Verwandlung der punktierten Sternbilder in ausgedehntere Flächen erreicht Steinheil durch Verschiebung des Objectivs gegen das feststehende Ocular. Seine Methode hat also eine gewisse Ähnlichkeit mit dem früher (Seite 196) besprochenen zweiten Bouguer'schen Photometer, bei welchem die grösseren Öffnungen gegen die feststehenden kleineren verschoben werden. Die Theorie des Steinheil'schen Apparates ist nach den Gesetzen der geometrischen Optik ausserordentlich

1) Steinheil, Elemente der Helligkeitsmessungen am Sternenhimmel. Preisschrift. (Denkschriften der K. Bayer. Akad. d. Wiss. Math.-phys. Classe, Bd. II.) München 1836.

einfach. Wenn das Objectiv eines Fernrohrs sich in seiner normalen Stellung zum Oculare befindet, so wird von einer unendlich entfernten punktförmigen Lichtquelle auf der Netzhaut des Auges auch ein punktförmiges Bild entworfen. Wird aber das Objectiv dem Oculare genähert oder von ihm entfernt, so fallen die Lichtstrahlen auf die vordere Fläche des Auges divergent oder convergent auf und verbreiten sich in beiden Fällen über ein grösseres oder kleineres Stück der Netzhaut, je nach der Grösse der Verschiebung des Objectivs. Aus den gewöhnlichen Formeln der Dioptrik folgt nun, wenn man Grössen von der Ordnung des Unterschiedes zwischen Tangente und Bogen vernachlässigt, dass das Flächenstück, welches auf der Netzhaut von dem Lichtkegel ausgeschnitten wird, proportional sein muss der freien Objectivfläche einerseits und dem Quadrate der Verschiebung des Objectivs aus seiner normalen Stellung andererseits. Nennt man also die Grösse der beleuchteten Fläche der Netzhaut F , die benutzte freie Objectivfläche O und die Verschiebung des Objectivs a , so hat man:

$$F = m O a^2,$$

wo m eine Constante bedeutet. Auf diese Fläche F vertheilt sich nun die gesammte Lichtmenge, welche von der freien Objectivöffnung aufgenommen wird, abgesehen natürlich von jedem durch Reflex, Absorption u. s. w. in dem ganzen Systeme hervorgebrachten Lichtverlust. Ist J die Lichtquantität, welche ein Stern auf die Flächeneinheit des Objectivs sendet, so gelangt demnach die Quantität JO auf die Fläche F der Netzhaut, und die Flächeneinheit der Netzhaut empfängt daher die Lichtmenge

$h = \frac{J}{m a^2}$. Es ist also die Flächenintensität auf der Netzhaut ganz unabhängig von der Grösse der freien Öffnung. Für einen zweiten Stern, welcher auf die Flächeneinheit des Objectivs die Lichtmenge J' sendet, wird bei einer Verschiebung a' des Objectivs die Flächenintensität auf

der Netzhaut $h' = \frac{J'}{m a'^2}$. Beurtheilt das Auge die beiden Flächenintensitäten gleich, so ergibt sich unmittelbar:

$$J : J' = a^2 : a'^2,$$

d. h. die Helligkeiten zweier Sterne verhalten sich wie die Quadrate der Grössen, um welche man das Objectiv aus seiner normalen Stellung verschieben muss, damit die Flächenhelligkeiten auf der Netzhaut gleich sind. Auf diesem Satze beruht das Steinheil'sche Photometer. Um die beiden Sternbilder gleichzeitig vor Augen zu haben, was für eine sichere Beurtheilung ihrer Gleichheit durchaus nothwendig ist, benutzt Steinheil nicht, wie es später Schwerd und De la Rive gethan haben, getrennte

Objective, sondern die beiden Hälften eines und desselben Objectivs, welches ebenso wie beim Heliometer in der Mitte durchgeschnitten ist. Die beiden Hälften sitzen in demselben Rohre und lassen sich, jedes für sich, dem gemeinschaftlichen Oculare messbar nähern oder von ihm ent-

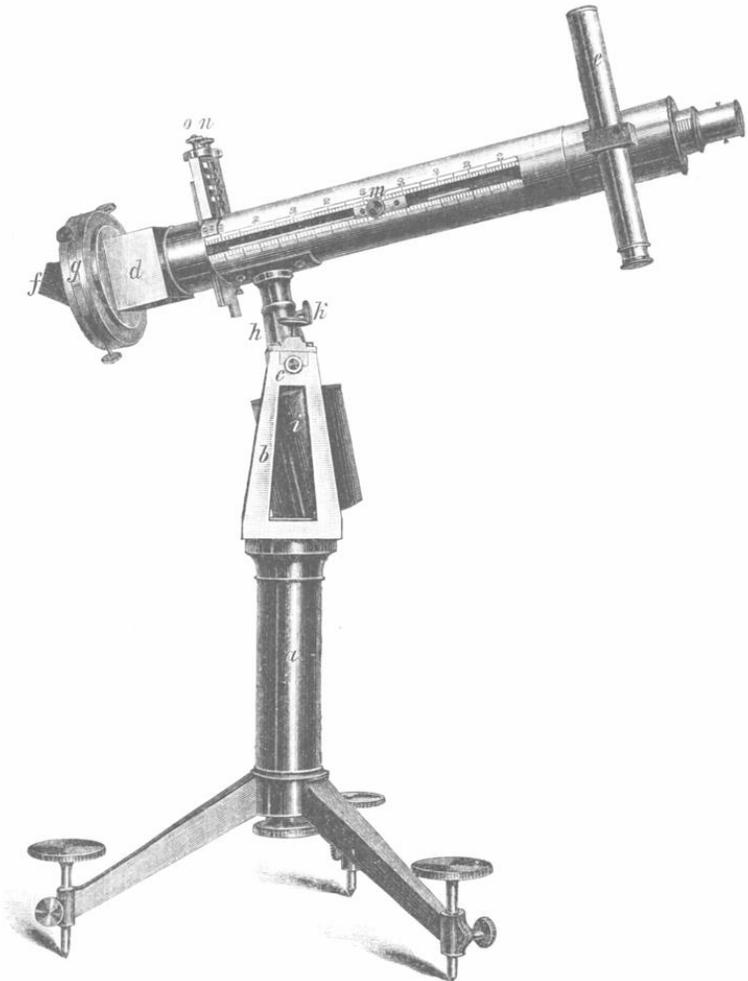


Fig. 46.

fernen. Die Einrichtung des Instruments geht aus Figur 46 hervor, welche nach einer photographischen Aufnahme des auf der Münchener Sternwarte befindlichen Steinheil'schen Originalphotometers (etwa in $\frac{1}{6}$ der natürlichen Grösse) hergestellt ist, desselben Apparates, der durch die Untersuchungen von Seidel Berühmtheit erlangt hat.

Die Säule *a* des dreifüssigen Stativs enthält die verticale Drehungsaxe, mittels deren das Instrument im Azimuth beliebig bewegt werden kann. Durch den oberen Theil des gabelförmigen Stückes *b* geht die horizontale Axe *c*, um welche eine Bewegung in Höhe ausführbar ist. Das Fernrohr hat einen würfelförmigen Ansatz *d*; dieser ist an der oberen Seite offen und enthält im Innern, in der einen Hälfte festsitzend, ein total reflectirendes rechtwinkliges Prisma, von welchem das durch die offene Seite des Würfels auffallende Licht auf das eine halbe Objectiv reflectirt wird. Parallel mit der einen Seitenfläche dieses Prismas ist an dem Ocularende des Fernrohrs ein kleiner Sucher *e* angebracht. Wird derselbe durch Drehung des Instrumentes in Azimuth und Höhe auf irgend einen Stern gerichtet, so erscheint derselbe auch durch Reflex an dem Prisma im Oculare des Hauptfernrohrs. Um nun auch einen zweiten Stern in das Gesichtsfeld zu bringen, ist vor dem Würfel *d* ein zweites total reflectirendes Prisma *f* drehbar angebracht, welches durch die freie Hälfte des Würfels hindurch Licht auf die zweite Objectivhälfte sendet. Die Drehung dieses Prismas kann an dem getheilten Kreise *g* abgelesen werden, und man hat die Einstellung Null, wenn die sämmtlichen Seiten der beiden Prismen einander paarweise parallel sind. Das Fernrohr ist endlich noch um die Axe *h*, welche das Gegengewicht *i* trägt, drehbar und kann mittels der Schraube *k* in jeder Lage festgeklemmt werden. Bei der Drehung um diese Axe bleibt der Sucher *e* und das im Würfel festsitzende Prisma unveränderlich auf denselben Punkt des Himmels gerichtet. Nachdem der eine Stern mit Hilfe des Suchers in das Ocular gebracht ist, wird an dem Kreise *g* der vorher berechnete Winkelabstand der beiden Sterne eingestellt und dann das Fernrohr um die Axe *h* so lange bewegt, bis der zweite Stern im Gesichtsfelde erscheint. Um die beiden Sterne während der Dauer der Messung im Gesichtsfelde zu halten, muss man um alle drei mechanischen Axen des Instruments Bewegungen ausführen, was die Handhabung des Apparates beträchtlich erschwert. Dann werden die beiden Objectivhälften, von denen jede mittelst eines Knopfes *m* in einem Schlitze längs des Rohres verschoben werden kann, so lange bewegt, bis die beiden Flächenhelligkeiten gleich erscheinen; die Stellung der Objectivhälften wird an Scalen, die auf dem Rohre angebracht sind, abgelesen. Die Lichtflächen, in welche die Bilder der Fixsterne verwandelt werden, haben natürlich die Form des erleuchteten Objectivtheiles und erscheinen daher ohne Ablendung als Halbkreise. Um aber die Grösse dieser Lichtscheiben beliebig verändern zu können, was unter Umständen erwünscht sein kann, ist noch hinter dem Würfel eine Vorrichtung angebracht zur Verkleinerung der Objectivhälften. Dieselbe besteht für jede Hälfte aus zwei durch die Schrauben *n* und *o* mit Links-

und Rechts-Gewinde gleichzeitig gegeneinander verschiebbaren Metallplatten, die stets ein gleichseitiges rechtwinkliges Dreieck offen lassen. Die Hypotenusen der beiden Dreiecke stossen genau aneinander, und wenn die Flächen gleich gross gemacht, ausserdem die beiden Lichtflächen genau gleich hell sind, so erscheint das Gesichtsfeld als gleichmässig helles Quadrat, in welchem die Trennungslinie der beiden Hälften gänzlich verschwunden ist. Auf die Messung der Flächenhelligkeit darf nach dem Obigen die Grösse der Objectivöffnung theoretisch keinen Einfluss haben, und auch praktisch ist es nach den Versicherungen Seidel's, der sich am Eifrigsten mit diesem Instrumente beschäftigt hat, ohne Einfluss auf das Messungsergebnis, ob die beiden Dreiecke dieselbe Grösse haben oder wesentlich von einander verschieden sind. Um die Grösse der Verschiebung der Objectivhälften genau angeben zu können, müsste man noch diejenige Ablesung der Scalen wissen, bei welcher die Brennpunkte von Objectiv und Ocular zusammenfallen. Anstatt diese Ablesung durch den Versuch direct zu ermitteln, verfährt man besser so, dass man immer zwei Vergleichen nach einander ausführt, indem man die beiden Objectivhälften von der normalen Stellung aus einmal in der Richtung nach dem Oculare hin, das andere Mal von ihm hinweg verschiebt und in beiden Fällen die Helligkeitsgleichheit herstellt. Sind die zugehörigen Ablesungen der einen Scala m_1 resp. n_1 , die der zweiten m_2 resp. n_2 , sind ferner f_1 und f_2 die Scalenableesungen bei normaler Focustellung der beiden Objectivhälften, so ist das Helligkeitsverhältniss P der verglichenen Sterne ausgedrückt durch die Gleichungen:

$$P = \frac{(f_1 - m_1)^2}{(f_2 - m_2)^2},$$

$$P = \frac{(n_1 - f_1)^2}{(n_2 - f_2)^2},$$

aus denen unmittelbar folgt:

$$P = \frac{(n_1 - m_1)^2}{(n_2 - m_2)^2}.$$

Kleine Unterschiede in der Reflexionsfähigkeit der Prismen, sowie in der Absorption der beiden Objectivhälften, welche einen schädlichen Einfluss auf die Beobachtungen ausüben könnten, lassen sich eliminiren, wenn man bei jeder Messung die Sterne abwechselnd in beiden Objectivhälften einstellt. Man kann aber auch an jedem Beobachtungsabende das Verhältniss der beiden Hälften zu einander experimentell bestimmen, indem man ein und denselben Stern gleichzeitig in beiden Hälften einstellt und ihn also mit sich selbst vergleicht. Dass die verschiedene

Helligkeit des Himmelsgrundes, auf welchen sich die Sterne projiciren, bei dem Steinheil'schen Photometer gar nicht in Betracht kommt, geht daraus hervor, dass sich die beiden Helligkeiten, da es sich ja eigentlich um ein einziges Fernrohr handelt, zu einer mittleren Helligkeit in dem gemeinsamen Gesichtsfelde vermischen.

Die Genauigkeit der Messungen, welche mit dem Steinheil'schen Instrumente erreicht werden kann, ist sehr befriedigend. Seidel hat für den wahrscheinlichen Fehler einer Helligkeitsvergleichung zwischen zwei Sternen den durchschnittlichen Werth ± 0.024 im Logarithmus, also ± 0.06 in Grössenklassen, gefunden und glaubt, dass unter besonders günstigen äusseren Umständen ein noch grösserer Genauigkeitsgrad erreicht werden kann. Es ist schon oben der starke Lichtverlust als der empfindlichste Nachtheil des Steinheil'schen Photometers bezeichnet worden, und in der That hat Seidel bei den freilich nur geringen Dimensionen des Apparates (das Objectiv besass eine Öffnung von 35 mm) seine Beobachtungen kaum bis zu Sternen der fünften Grösse ausdehnen können. Um diesem Nachtheil abzuhelpen und seine photometrische Methode auch auf schwächere Sterne anwendbar zu machen, hat Steinheil später die Construction eines Ocularphotometers¹⁾ vorgeschlagen, welches mit jedem beliebigen Refractor in Verbindung gebracht werden kann. Dasselbe besteht im Wesentlichen aus einem um die optische Axe des Hauptfernrohrs drehbaren Rohre, in welchem ein kleines Hilfsobjectiv mit davor sitzendem totalreflectirenden Prisma angebracht ist. Durch dieses Hilfsobjectiv wird das Licht eines hellen Sternes in das gemeinsame Ocular geworfen, während das Hauptfernrohr nacheinander auf die zu vergleichenden schwächeren Sterne gerichtet wird. Durch Verschiebung des Oculars werden diese Sterne in Lichtscheiben verwandelt und mit dem durch Verschieben des Hilfsobjectivs ebenfalls in eine Lichtfläche verwandelten hellen Sterne verglichen. Da dieser Apparat meines Wissens niemals zu Messungen verwerthet worden ist, so soll hier nicht näher auf denselben eingegangen werden, ebensowenig wie auf ein zweites von Steinheil empfohlenes Ocularphotometer, bei welchem die Sterne nicht als Lichtscheiben, sondern als Lichtpunkte beobachtet werden.

Dagegen verdient noch ein auf der Wiener Sternwarte befindliches Prismenphotometer Erwähnung, bei welchem eine wesentliche Vereinfachung in der Handhabung dadurch erzielt worden ist, dass dasselbe parallaktisch montirt ist. Das Hauptrohr (Fig. 47, Seite 210) ist auf einem soliden Stativ in der Meridianebene nach dem Pol gerichtet und lässt sich um seine eigene optische Axe drehen.

1) Astron. Nachr. Bd. 48, Nr. 1152.

Das Licht der Sterne fällt nicht direct auf die vor den Objectivhälften sitzenden Prismen, sondern erst nach Reflexion von Spiegeln,

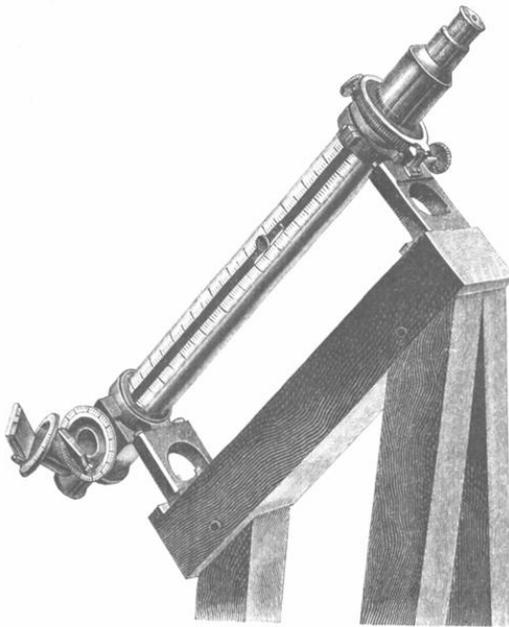


Fig. 47.

die in der aus der Figur ersichtlichen Weise mit drehbaren Kreistheilungen verbunden sind. Der Vortheil der Einrichtung besteht darin, dass nicht erst vor jeder Beobachtung der Winkelabstand der zu vergleichenden Sterne berechnet zu werden braucht, sondern dass unmittelbar die Stundenwinkel und Declinationen bei den Einstellungen benutzt werden, und dass ferner, wenn die beiden Sterne einmal in das Gesichtsfeld gebracht sind, sie allein durch die Feinbewegung des Hauptrohres um seine Axe darin gehalten werden können. Der einzige Nachtheil

des Arrangements ist der Umstand, dass der ohnehin schon grosse Lichtverlust noch durch die Zurückwerfung an den Spiegeln gesteigert wird.

2. Anwendung von Objectivblenden.

Alles was bei den Auslöschungsphotometern über die Abblendungsmethode gesagt worden ist, trifft auch bei den hier zu besprechenden Apparaten in vollem Umfange zu. Insbesondere ist es die Beugungswirkung, welche sich hier vielleicht noch störender fühlbar macht und von vornherein nur eine beschränkte Anwendung der Methode rathsam erscheinen lässt.

a. Die Methoden von Bouguer und W. Herschel.

Als ältestes Instrument dieser Gattung darf wohl ein von Bouguer¹⁾ vielfach benutztes bezeichnet werden. Dasselbe besteht aus zwei Ob-

1) *Traité d'optique*, p. 35.

jectiven von vollkommen gleicher Öffnung und Brennweite. Die Röhren, an deren einem Ende sich diese Objective befinden, haben genau die Länge der Brennweite und sind am anderen Ende mit Deckeln verschlossen, in denen kleine kreisrunde Öffnungen von 7 mm bis 9 mm Durchmesser angebracht sind, bedeckt mit feinem weissen Papier oder mit mattgeschliffenem Glase. Die beiden Objective werden auf die zu vergleichenden Lichtquellen gerichtet und die Öffnung des einen durch Sectorblenden so weit verringert, bis die kleinen in der Brennebene befindlichen Löcher für das Auge gleich hell beleuchtet erscheinen. Die Helligkeiten der beiden Lichtquellen verhalten sich dann wie die freien Objectivöffnungen. Um etwaige kleine Unterschiede in der Beschaffenheit der beiden Objective unschädlich zu machen, kann man dieselben bei jeder Beobachtung mit einander vertauschen. Durch eine geeignete Schutzvorrichtung wird noch Sorge getragen, dass alles äussere Licht von dem Auge des Beobachters fern bleibt. Die Sicherheit der Beobachtungen mit diesem Instrumente ist von vornherein dadurch etwas eingeschränkt, dass die beleuchteten Flächen nicht unmittelbar aneinander grenzen. Auch ist es klar, dass der Apparat nur zur Vergleichung von leuchtenden Flächen, nicht von Lichtpunkten verwendet werden kann. Bouguer hat damit die Helligkeit des Himmels an verschiedenen Stellen gemessen und Helligkeitsvergleichen einzelner Partien der Sonnenscheibe angestellt.

Zur Vergleichung von Sternen hat W. Herschel¹⁾ ein Verfahren vorgeschlagen, welches dem Bouguer'schen ähnlich ist. Er benutzt zwei unmittelbar nebeneinander aufgestellte Fernrohre von gleicher Öffnung und Focallänge. Mit dem einen betrachtet er das Bild des einen der zu vergleichenden Sterne, mit dem zweiten unmittelbar darauf das des anderen und schwächt das hellere Bild durch Ablenden des betreffenden Objectivs, bis ihm die Bilder in den beiden Fernrohren gleich intensiv erscheinen. Durch Umwecheln der Instrumente lässt sich auch hier jeder durch Verschiedenheit der Objective hervorgerufene Fehler eliminiren. Wie man übrigens sofort sieht, steht das Herschel'sche Verfahren dem Bouguer'schen entschieden nach, denn die Betrachtung der Bilder geschieht hier nicht gleichzeitig, sondern nacheinander, und wenn auch die Zeit, die man braucht, um von dem einen Instrument auf das andere überzugehen, noch so kurz ist, so vermag das Auge doch nicht die Erinnerung an den empfangenen Lichteindruck mit vollkommener Sicherheit festzuhalten. Herschel macht bei der Beschreibung seines photometrischen Verfahrens schon selbst auf die störenden Einflüsse der Diffractionserscheinungen und der Helligkeit des Himmelsgrundes aufmerksam.

1) Philos. Trans. of the R. Soc. of London. 1817, p. 302.

b. Die Benutzung des Spiegelsextanten und des Heliometers als Photometer.

Von verschiedenen Seiten, unter Anderen auch von A. v. Humboldt, ist der Gedanke angeregt worden, den Spiegelsextanten zu Helligkeitsvergleichen am Himmel zu verwenden. Die gewöhnliche Form des Sextanten ist für diesen Zweck dahin abzuändern, dass das Fernrohr nicht fest auf die Mitte des zur Hälfte belegten, zur Hälfte unbelegten Spiegels gerichtet bleibt, sondern nach Belieben um messbare Beträge gehoben oder gesenkt werden kann. Durch den unbelegten Theil des Spiegels blickt man direct nach dem einen Sterne, während man das Bild des zweiten damit zu vergleichenden Sternes durch Reflex von dem drehbaren Spiegel des Sextanten und von der belegten Hälfte des anderen Spiegels in das Gesichtsfeld gelangen lässt. Durch Heben oder Senken des Fernrohrs wird die Helligkeitsgleichheit der Bilder hergestellt, und das Verhältniss der beiden Abschnitte des Objectivs, welche auf den belegten und unbelegten Theil des Spiegels gerichtet sind, giebt ein Mass für das Helligkeitsverhältniss der miteinander verglichenen Sterne. Natürlich muss der durch die zweimalige Spiegelung verursachte Lichtverlust experimentell bestimmt werden, was am Besten dadurch geschieht, dass man das directe und das reflectirte Bild eines und desselben Sternes miteinander vergleicht.

Die Verwendung des Sextanten zu photometrischen Messungen am Himmel muss wegen der verhältnissmässig kleinen Dimensionen des Instrumentes und wegen der Schwierigkeit, zwei beliebige Objecte in das Gesichtsfeld des Fernrohrs zu bringen und darin während der Vergleichen festzuhalten, auf die helleren Sterne beschränkt bleiben. Auch dürfte der Umstand, dass das Licht der reflectirt gesehenen Sterne unter verschiedenen Incidenzwinkeln auf den ersten Spiegel auffällt, leicht zu Fehlern Anlass geben.

Handelt es sich nur um die Vergleichung nahe bei einander befindlicher Himmelsobjecte, so kann mit Vortheil anstatt des Spiegelsextanten auch ein anderer zu Winkelmessungen am Himmel bestimmter Apparat, das Heliometer, benutzt werden. Bekanntlich rührt die Bezeichnung »Heliometer« von Bouguer her, welcher dieses Instrument in der Form construirte, dass er zwei Objective unmittelbar nebeneinander in ein Rohr einsetzte und ein einziges Ocular für beide zur Anwendung brachte. Von ihm ist auch zum ersten Male der Vorschlag gemacht worden, ein solches Instrument zu photometrischen Zwecken zu gebrauchen, indem das eine der beiden Objective durch Blenden soweit verkleinert wurde, bis die beiden Sterne gleich hell erschienen. In der Form, in welcher das Heliometer heutzutage construiert wird, mit einem einzigen in der

Mitte durchschnittenen Objectiv, ist dasselbe von Johnson¹⁾ sehr angelegentlich zu photometrischen Beobachtungen empfohlen worden. Johnson fand bei der Untersuchung seines Heliometers, dass die eine Objectivhälfte ein helleres Bild gab als die andere (Helligkeitsverhältniss 100 zu 95.5), und dass bei beiden Hälften die Centralpartien verhältnissmässig durchsichtiger waren als die Randpartien. Dem ersteren Fehler liess sich bei den photometrischen Beobachtungen sehr leicht durch Vertauschen der Objectivhälften abhelfen. Sieht man von allen Übelständen ab, die beim Gebrauche jeder Blendvorrichtung ins Spiel kommen, und vermeidet man vor allen Dingen eine allzu starke Verkleinerung der einen Objectivhälfte, so eignet sich das Heliometer ohne Zweifel sehr gut zu Helligkeitsmessungen an Doppelsternen, sowie zur Vergleichung von Veränderlichen mit nahe dabei stehenden Sternen. Schur²⁾ hat dasselbe gelegentlich einer Conjunction von Venus und Mercur auch zu Messungen der relativen Lichtstärke dieser beiden Planeten mit Erfolg verwendet.

c. Das Schwerd'sche Photometer.

Dieses Instrument dürfte wohl das complicirteste sein, welches jemals zu Helligkeitsmessungen am Himmel construirt worden ist, es hat daher auch trotz mancher interessanten Einrichtungen so wenig Verbreitung gefunden, dass es heute fast ganz in Vergessenheit gerathen ist. Die Litteratur über dieses Photometer ist äusserst spärlich. Schwerd selbst hat seine Beobachtungen mit diesem Instrumente niemals veröffentlicht, und ausser einer Beschreibung von Argelander³⁾, der sich sehr lebhaft für den Apparat interessirte, ist mir nur eine kleine Abhandlung von F. Berg⁴⁾ in Wilna bekannt geworden, welcher Extinctionsbestimmungen

1) Astron. Observ. made at the Radcliffe Observatory, Oxford, in the year 1851. Vol XII, Appendix I. (Siehe ausserdem Monthly Notices. Vol. 13, p. 278.)

2) Astron. Nachr. Bd. 94, Nr. 2245.

3) Sitzber. des naturhistorischen Vereins der preuss. Rheinlande und Westphalens. Neue Folge, Jahrg. 6, 1859, p. 64, Bonn. (Siehe auch Heis, Wochenschrift. Jahrg. 1859, p. 275.)

4) F. Berg, Über das Schwerd'sche Photometer und die Lichtextinction für den Wilnaer Horizont. Wilna 1870. — NB. Diese kleine in russischer Sprache gedruckte Schrift befindet sich in der Bibliothek der Sternwarte Pulkowa. Herr E. Lindemann in Pulkowa hat die Güte gehabt, mir eine Übersetzung des auf das Instrument selbst bezüglichen Theiles dieser Abhandlung zuzusenden, der ich zum grössten Theil die obige Beschreibung entnommen habe. Herrn Lindemann verdanke ich auch die Mittheilung, dass von dem Schwerd'schen Photometer überhaupt nur vier Exemplare angefertigt worden sind, von denen zwei sich in Russland, auf den Sternwarten zu Pulkowa und Wilna, befinden, eins im Besitze der Familie Schwerd geblieben ist, während das vierte auf der Sternwarte Bonn in einer besonderen Kuppel aufgestellt ist. Der Abbildung (Fig. 48) liegt eine photographische Aufnahme des letzteren Instrumentes zu Grunde.

mit einem solchen Instrumente ausgeführt hat. Das Photometer (Fig. 48) besteht aus zwei Fernrohren. Das grössere ist parallaktisch aufgestellt und durch ein Uhrwerk beweglich, während das kleinere um zwei zu einander senkrechte Axen drehbar ist, von denen die eine zur optischen Axe des grossen Fernrohrs senkrecht steht. Die Drehungen sind an zwei Kreisen ablesbar; *aa* sind die Klemmen für den einen, *bb* die für den anderen Kreis, *cc* und *dd* die entsprechenden Feinbewegungsschrauben. Ist das grosse Fernrohr auf einen Stern gerichtet, so kann man das kleinere durch Einstellung an diesen Kreisen auf irgend einen anderen Stern richten, wenn der Abstand desselben von dem ersteren, sowie der Positionswinkel in Bezug auf ihn bekannt sind. Zur bequemeren Einstellung des kleineren Fernrohrs dient noch ein damit fest verbundenes Hilfsfernrohrchen *e*.

In den beiden würfelförmigen Ansatzstücken *f* und *g* sind total-reflectirende Prismen angebracht, welche das Licht der beiden Sterne in ein gemeinschaftliches Ocular *h* werfen. Man sieht die Sterne im Gesichtsfelde nahe bei einander, jeden aber auf den ihm zugehörigen Himmelsgrund projicirt. Um nun dem schädlichen Einflusse der verschiedenen Helligkeit des Grundes zu begegnen, werden beide Fernrohre durch Lampenlicht erleuchtet, und diese Beleuchtung lässt sich nach Belieben so moderiren, dass die beiden Hälften des Gesichtsfeldes gleich hell erscheinen.

Die Dimensionen des Schwerd'schen Photometers sind so gewählt, dass das Verhältniss von Objectivdurchmesser zur Focaldistanz in beiden Fernrohren gleich ist, und zwar hat das grosse Objectiv einen Durchmesser von 5.2 cm und eine Brennweite von 126 cm, das kleine einen Durchmesser von 2.6 cm und eine Brennweite von 63 cm. Infolge dessen erscheint ein Stern in dem kleinen Fernrohr viermal schwächer als in dem grossen. Vor dem Objectiv des ersteren ist excentrisch eine Scheibe mit verschiedenen grossen kreisrunden Öffnungen angebracht, die durch Drehung der Scheibe nacheinander vor die Mitte des Objectivs geführt werden können. Sind die Fernrohre auf zwei Sterne gerichtet, so wird das Licht des helleren (im kleinen Fernrohr eingestellten) durch Drehung dieser Scheibe so weit abgeschwächt, bis die Bilder im Ocular gleiche Helligkeit besitzen. Wenn die ursprüngliche Helligkeit des einen der beiden zu vergleichenden Sterne die des anderen um weniger als das Vierfache übertrifft, so ist eine Gleichmachung durch Abblenden des kleinen Objectivs nicht möglich, und es sind daher auch für das grosse Fernrohr Blendvorrichtungen vorhanden. Diese können auch benutzt werden, um bei Einstellung beider Fernrohre auf einen und denselben Stern die Gleichheit der Bilder herzustellen und auf diese Weise das

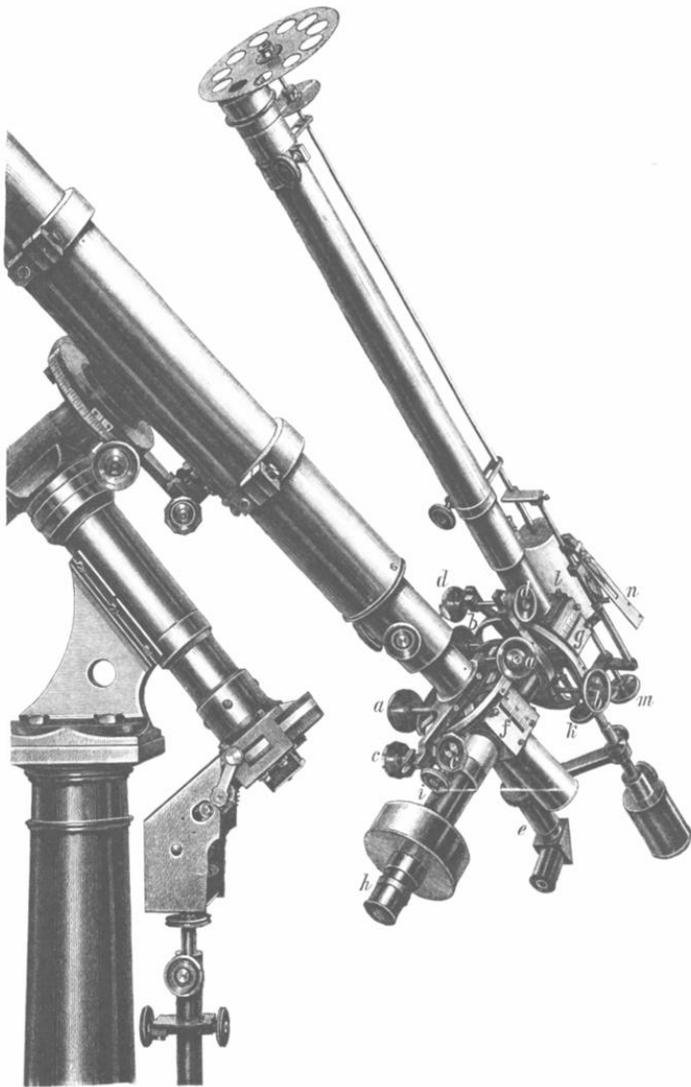


Fig. 48.

Verhältniss der beiden Objective zu einander experimentell genau zu bestimmen.

Schwerd hat den wichtigen Einfluss, welchen die Beugung des Lichtes bei Benutzung von Blenden hat, richtig erkannt und infolge dessen Einrichtungen getroffen, um stets den beiden Beugungsbildern die gleiche Grösse geben zu können. Dadurch ist allerdings jeder theoretische Einwand gegen das Princip seiner Methode gehoben, aber zugleich auch die praktische Handhabung des Apparates wesentlich erschwert. Wie bereits im vorangehenden Capitel auseinandergesetzt wurde, nimmt die Beugungsfigur eines Sternes bei zwei verschiedenen Fernrohren nur dann den gleichen Raum auf der Netzhaut des Auges ein, wenn die angewandten Gesamtvergrösserungen den Objectivdurchmessern proportional sind, und nur in diesem Falle geben die freien Öffnungen ein streng richtiges Mass für das Helligkeitsverhältniss zweier Sterne. Da bei dem Schwerd'schen Photometer für beide Fernrohre ein gemeinschaftliches Ocular benutzt wird, so ist also Bedingung für eine theoretisch einwurfsfreie Benutzung des Instrumentes, dass das Verhältniss von Objectivöffnung und Brennweite in beiden Fernrohren stets dasselbe bleibt. Bei nicht abgeblendeten Objectiven ist diese Bedingung durch die gewählten Dimensionen von vornherein erfüllt, wenn aber das eine Objectiv abgeblendet wird, muss gleichzeitig auch eine Verkürzung der Brennweite desselben stattfinden. Um dies bewerkstelligen zu können, hat Schwerd in beiden Fernrohren zwischen Objectiv und Brennpunkt Sammellinsen eingesetzt, die längs der optischen Axen verschiebbar sind. Bei dem grossen Fernrohre sitzt die Sammellinse vor dem totalreflectirenden Prisma in dem langen Theile des gebrochenen Rohres, bei dem kleinen dagegen hinter dem Prisma in dem kurzen Theile. Die Schrauben i und k dienen zur Verschiebung dieser Linsen, und der Betrag der Verschiebung lässt sich an den beiden auf den würfelförmigen Stücken f und g angebrachten Scaln ablesen. Sind die beiden Sammellinsen auf den Nullpunkt der Scala eingestellt, dann verhalten sich die Brennweiten der Gesamtsysteme »Objectiv und Sammellinse« zu einander, wie die nicht abgeblendeten Objectivöffnungen. Die Theilung auf der Scala steht in Beziehung zu den benutzten mit Nummern versehenen Blendenöffnungen, so dass beispielsweise bei Benutzung der Blendennummer 10 die Sammellinse auf den Theilstrich 10 eingestellt werden muss, damit freie Öffnung und Brennweite wieder das bestimmte Verhältniss zu einander haben. Natürlich muss auch noch das Gesamtsystem »Objectiv-Sammellinse« zusammen verschiebbar sein, wenn das Ocular h unverändert an seiner Stelle bleiben soll.

Die Vergleichung zweier Sterne mit dem Schwerd'schen Photometer erfordert nach dem Gesagten die folgenden Manipulationen. Der schwächere

Stern wird mit Hilfe des Declinations- und Stundenkreises in dem grossen Fernrohre, der hellere, dessen Distanz und Positionswinkel in Bezug auf ersteren vorher berechnet sein müssen, mit Hilfe der beiden anderen Kreise in dem kleineren Fernrohre eingestellt. Durch das Uhrwerk werden beide Sterne im Gesichtsfelde fest gehalten. Dann wird das kleine Objectiv so weit abgeblendet, bis die Bilder ungefähr gleich hell erscheinen, die Sammellinse wird auf den Theilstrich, welcher der betreffenden Blendenöffnung entspricht, eingestellt und das ganze System »Objectiv-Sammellinse« so weit verschoben, bis der Stern im Oculare wieder scharf erscheint. Die beiden Hälften des Gesichtsfeldes werden sodann durch Moderirung der Beleuchtung gleich hell gemacht, und die letzte feine Einstellung auf gleiche Intensität der beiden Sternbilder wird endlich durch Drehen der Blendscheibe bewirkt. Die Nummer der richtigen Blendenöffnung giebt dann mit Hilfe einer für jedes Instrument berechneten Tabelle unmittelbar den Helligkeitsunterschied der beiden Sterne. Bei dem von Berg in Wilna benutzten Instrumente waren die 25 verschiedenen Blendenöffnungen, welche zu Gebote standen, so abgestuft, dass jede folgende Öffnung immer um 0.1 Grössenklassen weniger Licht hindurch liess als die vorangehende. Da nun der Helligkeitsunterschied der beiden unabgeblendeten Objective etwa 1.5 Grössenklassen betrug, so konnten mit diesem Apparate Sterne bis zu vier Grössenklassen Helligkeitsdifferenz gemessen werden. Es ist wegen des Aussehens der Bilder nicht rathsam, das Objectiv mehr als bis auf etwa $\frac{1}{3}$ der Öffnung abzublenden; will man daher noch grössere Unterschiede als vier Grössenklassen direct messen, so muss das kleine Fernrohr durch ein anderes von noch geringeren Dimensionen ersetzt werden. Mit dem Apparate ist endlich noch eine Art Registrirvorrichtung verbunden, um die jedesmalige vor dem Objective befindliche Öffnung zu notiren. Diese Vorrichtung besteht im Wesentlichen aus einer mit Papier überzogenen Trommel oder Walze *l*, welche auf der langen bis zur Blendscheibe reichenden Bewegungsstange fest aufgesteckt ist und mittels des Handgriffes *m* zugleich mit der Blendscheibe gedreht wird. Durch einen Druck auf den Hebel *n* wird auf der Walze ein Zeichen markirt und dadurch die Stellung der Blendscheibe registriert.

Die Handhabung des Schwed'schen Photometers ist, wie man aus dem Vorangehenden sieht, viel zu umständlich, als dass an eine Verwendung des Instrumentes zu grösseren Beobachtungsreihen zu denken wäre. Sofern das Photometer nicht im Freien aufgestellt findet, ist ausserdem noch eine besondere Einrichtung der Kuppel erforderlich, um die beiden Fernrohre gleichzeitig nach zwei beliebigen Punkten des Himmels richten zu können. Das drehbare Dach der kleinen Kuppel, in

welcher das Bonner Instrument aufgestellt ist, besteht aus einer grossen Anzahl von Klappen, die nach Bedürfniss einzeln geöffnet werden können.

Eine grosse Ähnlichkeit mit dem Schwerd'schen Photometer besitzt ein von De la Rive¹⁾ construirtes Instrument, welches hier noch kurz Erwähnung finden mag, obgleich es ursprünglich nicht zu Beobachtungen am Himmel bestimmt war. Es besteht ebenfalls aus zwei Fernrohren, die sich gleichzeitig auf zwei beliebige Punkte richten lassen. Durch ein System von Spiegeln oder totalreflectirenden Prismen werden die Lichtstrahlen in ein gemeinschaftliches Ocular geworfen, und die gleiche Helligkeit der Bilder wird durch Ablenden der Objective erreicht. Als eine Verbesserung des Schwerd'schen Photometers kann das De la Rive'sche nicht betrachtet werden, schon darum nicht, weil der schädliche Einfluss der Beugungswirkung dabei gar keine Berücksichtigung findet.

d. Das Hornstein'sche Zonenphotometer.

Wie schon aus der Bezeichnung dieses Photometers hervorgeht, ist dasselbe speciell zu Zonenbeobachtungen, d. h. zur Messung von ganzen Gruppen nahe bei einander stehender, an Helligkeit nicht allzu verschiedener Sterne bestimmt. Das Princip ist Ablenden des Objectivs und Vergleichung der Bilder mit dem Bilde eines Hilfssternes, welcher durch einen Theil des Objectivs in das Gesichtsfeld gebracht wird. Die Einrichtung geht aus der von Hornstein²⁾ selbst gegebenen Abbildung (Fig. 49) hervor.

Auf die Fassung des Objectivs *O* ist ein Ring *BB* aufgesetzt, der sich vom Ocularausmittelsteines Schlüssels um die optische Axe des Fernrohrs drehen lässt. Mit dem Ringe ist

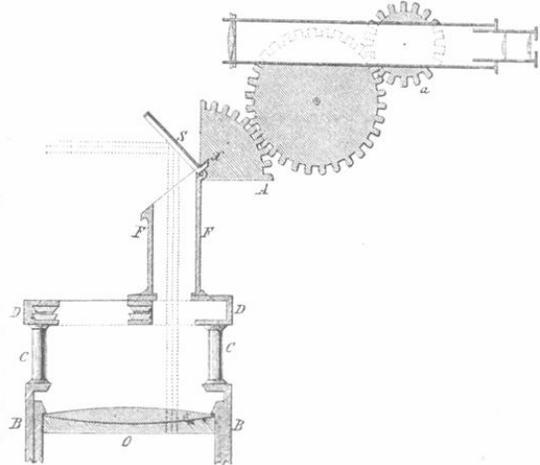


Fig. 49.

durch die Säulchen *CC* ein Rahmen *DD* verbunden, in welchem zwei Blendschieber zur Ablendung eines Theiles des Objectivs übereinander verschoben werden können. Auf dem Rahmen sitzt ferner noch eine

1) Annales de chim. et de phys. Série 4, tome 12 (1867), p. 243.

2) Sitzber. der K. Akad. der Wiss zu Wien. Math.-naturw. Classe, Bd. 41, p. 261.

cylindrische Röhre FF , an deren oberem Ende bei x ein kleiner Spiegel S , drehbar um eine zur Zeichnungsebene senkrechte Axe, angebracht ist. Mit Hilfe dieses Spiegels, der ebenfalls vom Ocular aus dirigirt werden kann, wird nun das Bild eines Hilfssterne in das Fernrohr reflectirt, und die direct gesehenen Sterne werden durch Verschieben der Blenden so weit geschwächt, bis sie dem Hilfssterne an Helligkeit gleich sind. Man sieht sofort, dass der Anwendungsbereich des Photometers zur Vergleichung zweier beliebigen Sterne am Himmel an gewisse Grenzen gebunden ist. Der Spiegel darf nicht so gross sein, dass er bei irgend einer Stellung etwas von dem für die directe Beobachtung der Sterne bestimmten Theil des Objectivs verdeckt, und er darf nur unter solchen Neigungswinkeln gegen die optische Axe des Fernrohrs benutzt werden, dass immer der ganze Querschnitt der cylindrischen Röhre FF Licht erhält.

Um das Bild des Hilfssterne bequem und sicher in das Hauptrohr zu bringen, wird ein kleines Hilfsfernrohr benutzt, welches in folgender Weise mit dem Apparate verbunden ist. Mit dem Spiegel S gemeinschaftlich um Punkt x drehbar ist ein gezahnter Sector A , dessen Drehung mit Hilfe eines gezahnten Zwischenrades auf das Rad a übertragen wird, an welchem letzteren das kleine Fernrohr befestigt ist. Da der Durchmesser von a gerade halb so gross ist wie der von A , während die Breite der Zähne bei allen drei Rädern übereinstimmt, so entspricht einer beliebigen Bewegung des Spiegels S eine doppelt so grosse Bewegung des Hilfsfernrohrs. Man probirt nun an einem hellen Sterne aus, in welcher Lage das Hilfsfernrohr mit dem Rade a zu befestigen ist, damit der Stern gleichzeitig in diesem und, durch Reflex an dem Spiegel, auch in dem Hauptfernrohre sichtbar wird. Ist diese Justirung einmal bewirkt, so wird auch jeder andere Stern, auf welchen das Hilfsfernrohr gerichtet wird, im Gesichtsfelde des grossen erscheinen. Man verfährt bei den Beobachtungen mit dem Hornstein'schen Photometer meistens so, dass man für eine ganze Reihe (Zone) ein und denselben Hilfsstern benutzt, welcher durch Feinbewegung des Ringes B und des Spiegels S während der Dauer einer solchen Reihe beständig in der Mitte des Gesichtsfeldes gehalten wird. Da dieser Hilfsstern lediglich als Verbindungsglied dient, um die Helligkeitsunterschiede der einzelnen Zonensterne gegeneinander zu ermitteln, so braucht die Helligkeit desselben gar nicht bekannt zu sein, ebensowenig wie das Intensitätsverhältniss eines direct gesehenen Sternes zu seinem reflectirten Bilde. Dass die Zonensterne nicht allzu weit auseinander stehen dürfen, ist schon deshalb geboten, weil sonst die vom Vergleichssterne kommenden Strahlen unter merklich verschiedenen Incidenzwinkeln auf den Spiegel auffallen würden, und die Helligkeit des Vergleichssterne während der Zone nicht constant wäre. Den Schiebern,

mit welchen die eigentliche Lichtmessung ausgeführt wird, hat Hornstein Ausschnitte gegeben, welche die Form von Hyperbeln haben; die Axen dieser Hyperbeln sind zu einander und zu der Bewegungsrichtung der Schieber parallel. In Figur 50 ist $abede$ der untere, $a'b'e'd'e'$ der obere Schieber, und o ist der freie, durch die Schieber nicht verdeckte Theil des Objectivs. In welcher Weise die Grösse der freien Fläche o von der Verschiebung der Blenden abhängt, ist von Hornstein nicht angegeben. Am sichersten würde es wohl sein, die Scalenerthe empirisch durch Messungen an Sternen von anderweitig bekannter Helligkeit zu ermitteln.

Das Hornstein'sche Photometer, welches aus dem Jahre 1860 herstammt, hat übrigens bereits im Jahre 1834 einen Vorgänger gehabt. Infolge einer von der Kgl. Gesellschaft der Wissenschaften in Göttingen ausgeschriebenen Preisaufgabe über Astrophotometrie waren mehrere Bewerbungsschriften eingegangen, von denen die oben citirte Steinheil'sche Abhandlung über das Prismenphotometer mit dem Preise gekrönt wurde. Eine zweite Schrift, deren Verfasser nicht bekannt ist, enthält nun die Beschreibung eines Photometers, welches fast vollkommen mit dem Hornstein'schen identisch ist. Der einzige Unterschied besteht darin, dass die eine ganze Hälfte des Objectivs (nicht bloss ein kleiner Theil desselben) von dem Spiegel Licht erhält, und dass die Ablendung nicht durch Schieber, sondern durch eine drehbare Scheibe erfolgt, welche immer eine Hälfte des Objectivs bedeckt, die andere freilässt.

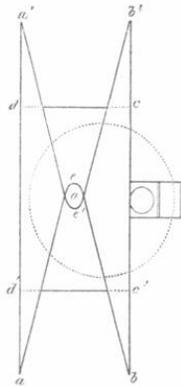


Fig. 50.

e. Die Methoden von Searle und Cornu.

Ganz eigenartig ist das von G. Searle¹⁾ empfohlene Photometer, bei welchem, ähnlich wie bei dem Parkhurst'schen Deflectionsphotometer, eine Theilung des auf das Objectiv auffallenden Lichtcylinders, also nicht eine Ablendung im eigentlichen Sinne stattfindet. Eine keilförmig geschliffene Glasplatte von ausserordentlich kleinem Winkel wird so vor dem Objectiv des Beobachtungsfernrohrs angebracht, dass sie über dasselbe hinweg bewegt werden kann und daher einen beliebig grossen messbaren Theil desselben bedeckt. Von jedem Sterne entstehen so zwei Bilder, deren Intensitäten durch Verschieben der Glasplatte nach Gefallen verändert werden können. Da der Winkel des Prismas sehr klein ist, so sind die

1) Astron. Nachr. Bd. 57, Nr. 1353.

beiden Bilder nicht sehr weit voneinander entfernt, und die prismatischen Farben des abgelenkten Bildes treten nicht wesentlich störend hervor. Hat man nun zwei Sterne von verschiedener Helligkeit, so kann man durch Verschieben der Glasplatte das directe Bild des einen gleich dem abgelenkten des anderen machen, und das Verhältniss des bedeckten zum unbedeckten Theile des Objectivs giebt dann unmittelbar das ursprüngliche Intensitätsverhältniss der beiden Sterne, vorausgesetzt, dass der durch Absorption und Reflexion an der Glasplatte hervorgebrachte Lichtverlust bekannt ist. Derselbe kann entweder durch Vergleichung der beiden Bilder ein und desselben Sternes bestimmt oder auch dadurch zum grössten Theil eliminirt werden, dass man immer die Bilder der beiden zu messenden Sterne kreuzweise miteinander vergleicht. Grosse Helligkeitsunterschiede zu messen ist mit diesem Instrumente nicht rathsam, auch sieht man sofort, dass die Benutzung des Photometers auf die Vergleichung sehr nahe bei einander stehender Sterne beschränkt ist. Wie aber die von Searle mitgetheilten Beobachtungen zeigen, erweist sich das Instrument innerhalb seines Anwendungsbereiches durchaus brauchbar.

In neuerer Zeit hat Cornu¹⁾ noch einige Modificationen zu diesem Photometer vorgeschlagen. Um die Anwendung einer Correction wegen der Absorption in der prismatischen Glasplatte überflüssig zu machen, empfiehlt er, anstatt eines Prismas deren zwei anzubringen, von absolut gleichem Winkel und womöglich aus derselben Glasplatte herausgeschnitten. Dieselben stossen mit ihren scharfen Kanten gegeneinander, die Ablenkungen erfolgen daher im entgegengesetzten Sinne. Das Verhältniss der beiden bedeckten Objectivsegmente giebt dann ohne jede Correction das gesuchte Intensitätsverhältniss. Will man grössere Ablenkungen als etwa $\frac{1}{2}^\circ$ hervorbringen, so würden die Farben schon störend sein, und es wäre dann rathsam, die prismatischen Glasplatten zu achromatisiren. Da die Anwendung von Objectivprismen bei Fernrohren von grossen Dimensionen wegen der schwierigen Herstellung und der bedeutenden Kosten kaum möglich sein würde, so hat Cornu noch den Gebrauch von sogenannten photometrischen Ocularen vorgeschlagen, d. h. von gewöhnlichen terrestrischen Ocularen, bei denen zwischen der ersten und zweiten Linse an der Stelle, wo ein reelles Bild des Fernrohrobjectivs liegt, zwei prismatische Glasstücke angebracht sind, die messbar verschoben werden können und von jedem Gestirn zwei Bilder von variabler Helligkeit erzeugen. Über praktische Versuche mit solchen Ocularphotometern ist bisher Nichts bekannt geworden.

1) Comptes Rendus. Tome 103, p. 1227.

3. Anwendung von rotirenden Scheiben. Die photometrischen Methoden von Talbot, Secchi, Abney.

Wenn die Augennerven durch irgend einen Lichtreiz afficirt worden sind, so dauert bekanntlich die Wirkung noch eine Zeitlang fort, nachdem die Lichtquelle entfernt ist. Die Dauer dieser Nachwirkung hängt von der Intensität des Lichtes und ausserdem von dem jeweiligen Zustande des Auges ab. Sendet ein leuchtender Gegenstand intermittirend Licht auf unser Sehorgan, und folgen sich die einzelnen Impulse in so kurzen Zwischenräumen, dass der erste Eindruck noch fort dauert, wenn der zweite eintritt, so erhalten wir die Empfindung einer vollkommen continuirlichen Beleuchtung, die Helligkeit des leuchtenden Gegenstandes erscheint aber geschwächt und zwar im Verhältniss der Erscheinungsdauer zur Summe der Erscheinungs- und Verschwindungsdauer. Dieser Satz ist von Talbot¹⁾ und Plateau²⁾ fast zu derselben Zeit aufgestellt und durch eine Reihe von Versuchen mit rotirenden Scheiben bewiesen worden. Versetzt man eine weisse mit einem schwarzen Sector bemalte Scheibe in schnelle Rotation und beleuchtet dieselbe, so erscheint sie gleichmässig grau, und wenn man zwei solcher Scheiben, die mit verschiedenen grossen schwarzen Sektoren versehen sind, nahe bei einander aufstellt und die Entfernung der einen von der Lichtquelle so lange verändert, bis beide Scheiben bei der Rotation die gleiche graue Färbung zeigen, so findet man, dass die Quadrate der Entfernungen von der Lichtquelle sich umgekehrt verhalten wie die Winkelöffnungen der beiden Sektoren, wodurch also der obige Satz bestätigt ist. Etwas Ähnliches gilt auch, wenn es sich nicht um diffus reflectirtes, sondern um durchgehendes Licht handelt, wenn man also undurchsichtige, mit sectorförmigen Ausschnitten versehene Scheiben vor einem leuchtenden Gegenstande rotiren lässt. Je kleiner der Ausschnitt ist, desto schwächer erscheint der Gegenstand, und es folgt unmittelbar, dass die Helligkeit proportional ist dem Öffnungswinkel des Sectors. Enthält die Scheibe, wie es gewöhnlich der Fall ist, mehrere Ausschnitte, so wird die Helligkeit durch das Verhältniss der Summe der Winkelöffnungen dieser Ausschnitte zum ganzen Kreisumfang ausgedrückt, vorausgesetzt, dass die Helligkeit ohne die Scheibe als Einheit genommen ist. Es fragt sich, mit welcher Geschwindigkeit die Scheibe vor der Lichtquelle rotiren muss. Eine bestimmte Vorschrift darüber lässt sich nicht geben; jedenfalls ist Bedingung, dass

1) Philosophical Magazine. Ser. 3, Vol. 5, p. 321.

2) Pogg. Ann. Bd. 35, p. 457.

die Lichterscheinung vollkommen continuirlich ist und jedes Flimmern oder Zittern, welches bei zu langsamer Drehung eintritt, verschwindet. Schnelleres Rotiren hat auf die Intensität des Lichtes gar keinen Einfluss. Nach den Versuchen von Plateau, Emsmann, Helmholtz u. A. ist eine Umdrehungsgeschwindigkeit von 24 bis 30mal in der Secunde unter allen Umständen ausreichend, um Gleichförmigkeit in der Helligkeit zu erzielen. Es kommt dabei auch wesentlich darauf an, wie die offenen und geschlossenen Abschnitte auf der rotirenden Scheibe vertheilt sind. Hat man z. B. eine Scheibe, in welcher sich nur ein einziger Ausschnitt in Grösse eines Halbkreises befindet, und daneben eine zweite Scheibe mit vier Ausschnitten von der Winkelöffnung 45° , so werden diese beiden Scheiben die gleiche Lichtschwächung hervorbringen, die zweite braucht aber nicht so schnell gedreht zu werden, wie die erste.

Das Princip der rotirenden Scheiben ist schon von Talbot zu photometrischen Zwecken empfohlen worden, und in der That ist dasselbe nicht nur in theoretischer Beziehung durchaus einwurfsfrei, sondern auch in praktischer Beziehung so bequem anwendbar, dass es nur zu verwundern ist, dass diese photometrische Methode sich noch nicht mehr Eingang verschafft hat.

Um nach dieser Methode die Helligkeit eines leuchtenden Gegenstandes messen zu können, muss man im Stande sein, die sectorförmigen Ausschnitte nach Belieben zu vergrössern oder zu verkleinern. Talbot hat zu diesem Zwecke zum ersten Male die Benutzung von zwei Scheiben mit gleich vielen und gleich grossen Ausschnitten vorgeschlagen, welche um eine gemeinschaftliche Axe rotiren und messbar gegeneinander verstellt werden können. Ein ähnliches Arrangement ist schon früher bei der Besprechung der verschiedenen Blendvorrichtungen erwähnt worden.

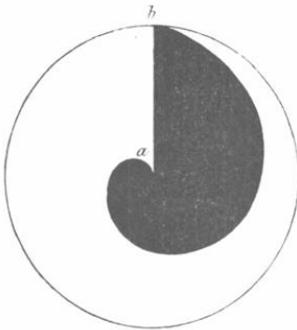


Fig. 51.

Ein zweites ebenfalls von Talbot empfohlenes Messungsmittel besteht darin, dem Ausschnitte in der Scheibe eine durch Figur 51 repräsentirte Form zu geben.

Der Ausschnitt wird begrenzt durch den Radius ab und durch eine Archimedische Spirale, deren Gleichung in Polarcordinaten bekanntlich ausgedrückt werden kann durch $r = \frac{2\pi - v}{2\pi}$ oder $1 - r = \frac{v}{2\pi}$, wenn der Radius der Scheibe mit 1 bezeichnet wird, und die Winkel v von

ab aus nach rechts gezählt werden. Die Grösse $1 - r$ ist der Abstand vom Rande der Scheibe, und da das Verhältniss $\frac{v}{2\pi r}$ das Helligkeitsmass abgiebt, so sieht man, dass die Helligkeit eines leuchtenden Gegenstandes, wenn man ihn an verschiedenen Punkten der rotirenden Scheibe betrachtet, in demselben Verhältnisse zu- oder abnimmt, wie die Abstände dieser Punkte vom Scheibenrande. Von dieser Methode ist mehrfach Gebrauch gemacht worden.

Statt der rotirenden Scheibe hat Talbot, speciell zur Messung des Sonnenlichtes, noch einen rotirenden Spiegel in Vorschlag gebracht, welcher das Bild einer Lichtquelle im Kreise herumführt. Das Auge des Beobachters wird bei jeder Umdrehung des Spiegels einmal von den reflectirten Strahlen getroffen und erblickt bei genügend schneller Rotation ein stetiges Bild der Lichtquelle, dessen scheinbare Helligkeit sich zur Helligkeit der Lichtquelle selbst verhält, wie die Winkelbreite derselben zum Kreisumfang. Streng genommen ist dabei noch der Incidenzwinkel der auffallenden Strahlen oder der Winkel zwischen Lichtquelle, Spiegelmittelpunkt und Auge zu berücksichtigen, da von diesem die Intensität des reflectirten Lichtes abhängt. Von der Sonne, deren scheinbarer Durchmesser ungefähr einen halben Grad beträgt, wird durch einen solchen rotirenden Spiegel eine Lichtzone hervorgebracht, deren Intensität im centralen Streifen sich zur Intensität der Sonne selbst wie 1:720 verhält. Um das Sonnenlicht mehr abschwächen zu können, hat Talbot noch einen zweiten rotirenden Spiegel eingeführt, welcher zunächst das von dem ersten kommende Licht empfängt und dasselbe dann entsprechend geschwächt in das Auge sendet.

Für Helligkeitsmessungen an Sternen ist das Princip der rotirenden Scheiben zum ersten und meines Wissens bisher auch einzigen Male von Secchi¹⁾ in Anwendung gebracht worden. Derselbe verglich, allerdings nur mit blossem Auge, zwei nicht allzuweit voneinander entfernte Sterne, indem er den helleren durch eine rotirende Scheibe hindurch, den schwächeren ohne dieselbe betrachtete, und die sectorförmigen Öffnungen der Scheibe so weit verkleinerte, bis die beiden Sterne gleich erschienen. Er bediente sich dabei, ebenso wie Talbot, theils zweier gegeneinander verstellbaren Scheiben, deren gegenseitige Stellung an einer am Rande angebrachten Theilung abgelesen werden konnte, theils einer einzelnen Scheibe mit Ausschnitten, die etwa wie in Figur 52, Seite 224, von der Mitte nach dem Rande zu immer schmaler wurden.

1) Atti dell' accad. Pontificia dei nuovi Lincei. Tomo 4, anno 4 (1850—1851), p. 10.

Bei dem zweiten Beobachtungsverfahren wurde diejenige Stelle auf der rotirenden Scheibe bestimmt, wo der geschwächte Stern dem direct gesehenen an Intensität gleich erschien. Aus dem gemessenen Abstände dieses Punktes vom Rande liess sich dann leicht der gesuchte Helligkeitsunterschied berechnen. Dass das erste Verfahren dem zweiten bei Weitem vorzuziehen ist, liegt auf der Hand. Da der Himmelsgrund, auf dem der hellere Stern steht, durch Verkleinerung der Ausschnitte in der Scheibe mit verdunkelt wird, so sieht man die beiden zu vergleichenden Sterne stets auf verschieden hellem Grunde, was das ohnedies schon ziemlich unsichere

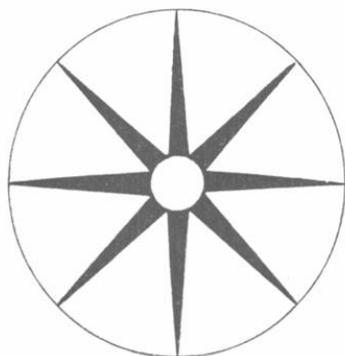


Fig. 52.

Beobachtungsverfahren Secchi's noch weniger empfehlenswerth macht.

Es sind noch eine ganze Reihe von photometrischen Einrichtungen bekannt geworden, bei denen die rotirenden Scheiben in den mannigfachsten Formen zur Verwendung kommen. Ich erwähne speciell die Vorschläge von Guthrie¹⁾, Napoli²⁾, Hammerl³⁾, Langley⁴⁾ und Abney⁵⁾, gehe aber nicht näher auf dieselben ein, da sie fast alle lediglich für die technische Photometrie von Interesse sind. Nur Abney hat die Methode auch auf die Messung der Lichtintensität in verschiedenen Theilen des Sonnenspectrums angewendet. Er und vor ihm schon Napoli haben insofern einen Fortschritt erreicht, als sie mechanische Einrichtungen getroffen haben, um zwei auf derselben Axe rotirende Scheiben während der Drehung gegeneinander um jeden beliebigen Betrag zu verschieben. Dadurch ist die Methode eigentlich erst aus einem blossen Mittel, die Helligkeit einer Lichtquelle zu variiren, zu einem feinen Messungsverfahren umgewandelt worden.

Auch Lummer und Brodhun haben sich bei ihren photometrischen Untersuchungen eines ähnlichen Arrangements zur Verstellung der Scheiben während der Rotation bedient.

Diese wichtige Verbesserung der Methode legt den Gedanken nahe, die Secchi'schen Vorschläge wieder aufzunehmen und die rotirenden Scheiben

1) The Chemical News and Journal of phys. science. Vol. 40 (1879), p. 262.

2) Séances de la soc. Franç. de physique. 1880, p. 53.

3) Elektrotechn. Zeitschrift. Jahrg. 4 (1883), p. 262.

4) American Journ. of science. Ser. 3, Vol. 30 (1885), p. 210.

5) Phil. Trans. of the R. Soc. of London. 1886, p. 423 und 1888 p. 547; ausserdem Proc. of the R. Soc. of London. Vol. 43, p. 247.

zur Helligkeitsmessung der Sterne nutzbar zu machen. Versuche in dieser Richtung können nicht dringend genug empfohlen werden, und es scheint nicht allzu schwierig, auf irgend einem Wege zum Ziele zu gelangen. Es lässt sich z. B. leicht ein compendiöser Apparat, bei welchem zwei gegeneinander beliebig verstellbare Scheiben mit gleich grossen Ausschnitten durch ein Uhrwerk oder irgend einen kleinen Motor in schnelle Rotation versetzt werden, so an einem beliebigen Refractor anbringen, dass die Scheiben durch den vom Objectiv kommenden Lichtkegel in der Nähe des Brennpunktes hindurchgehen. Wird das Fernrohr auf irgend einen Stern gerichtet, so kann man durch Verstellen der beiden Scheiben gegeneinander (während der Rotation) die Helligkeit desselben so weit verändern, bis er gleich hell erscheint mit einem künstlichen Sterne von constanter Helligkeit, welcher durch ein seitliches Rohr und durch Reflex an einer unter 45° gegen die optische Axe des Fernrohrs geneigten planparallelen Glasplatte (ähnlich wie beim Zöllner'schen Photometer) in das Gesichtsfeld des Oculars gebracht wird. Auf dieselbe Weise beobachtet man einen zweiten Stern und findet so das Helligkeitsverhältniss desselben zu dem ersten. Die verschiedene Helligkeit des Himmelsgrundes hat dabei keinen schädlichen Einfluss, weil sich stets der Untergrund des künstlichen Sternes mit dem des wirklichen vermischt. Wir wollen annehmen, dass jede der beiden Scheiben vier Ausschnitte von 45° Öffnungswinkel hat; dann wird eine vollständige Abschliessung des Lichtes eintreten, sobald die Ausschnitte der einen Scheibe mit den undurchsichtigen Theilen der anderen coincidiren, dagegen wird die grösste nutzbare Öffnung 180° betragen. Man sieht übrigens sofort, dass die Empfindlichkeit der Messungen sehr verschieden sein kann. Sind die Scheiben möglichst weit, also auf 180° , geöffnet, so muss man sie um 16° gegeneinander verstellen, um eine Lichtschwächung von 0.1 Grössenclassen hervorzu bringen; lassen die Scheiben aber nur eine Öffnung von 4° frei, so genügt bereits eine Verschiebung von 0.4 , um denselben Effect hervorzu bringen. Je kleiner also der Öffnungswinkel ist, desto grösser muss die Genauigkeit der Einstellung und Ablesung sein, wenn man die gleiche Genauigkeit des Resultates verbürgen will. Es wird sich daher empfehlen, nicht allzu grosse Helligkeitsdifferenzen direct zu messen. Benutzt man bei dem hier ins Auge gefassten Apparate nur Öffnungswinkel von 180° bis etwa 10° , so könnte man bereits Intensitätsunterschiede von drei Grössenclassen messen, was für viele Zwecke der Himmelsphotometrie ausreichend sein würde.

4. Anwendung von spiegelnden Kugeln. Die photometrischen Methoden von Wollaston und Bond.

Wenn von einer nicht allzu ausgedehnten Lichtquelle auf eine vollkommen spiegelnde Kugel Licht auffällt, so sieht ein Beobachter ein verkleinertes Spiegelbild der Lichtquelle, dessen Helligkeit variirt, je nachdem die Entfernung der Kugel von der Lichtquelle oder dem Beobachter zu- oder abnimmt. Diese Erscheinung ist vielfach zu Helligkeitsmessungen benutzt worden und hat sich namentlich bei der Vergleichung von sehr hellen Objecten, wie Sonne, Mond und grossen Planeten, als ein sehr werthvolles Hilfsmittel erwiesen. Es handelt sich dabei um

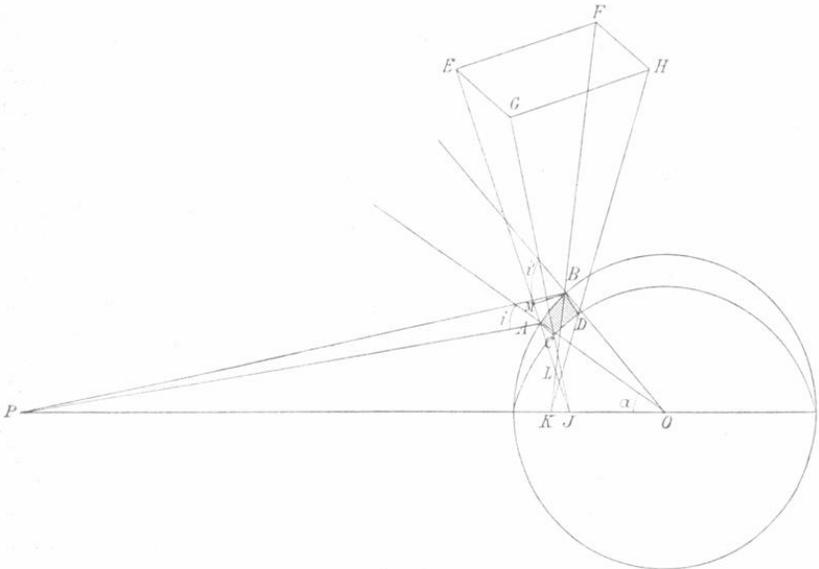


Fig. 53.

die Lösung der folgenden Aufgabe. Das von der spiegelnden Kugel reflectirte Licht breitet sich nach allen Richtungen im Raume aus; man soll die an irgend einer bestimmten Stelle hervorgebrachte Beleuchtung berechnen, wenn die Leuchtkraft der Lichtquelle und ihre Entfernung von der Kugel, ausserdem der Radius der letzteren bekannt sind. Es sei in Figur 53 P ein leuchtender Punkt, $ABCD$ ein kleines Element einer spiegelnden Kugel, welches von zwei unendlich nahen Meridianen und zwei unendlich nahen Parallelkreisen begrenzt wird.

Das Centrum der Kugel liegt in O , der Radius derselben sei q . Ferner seien die Entfernungen PO und PA mit a und b bezeichnet, und der Winkel POA mit α . Der unter dem Incidenzwinkel i in A auf-

fallende Lichtstrahl PA wird in der Richtung nach AE reflectirt. Durch E lege man eine Ebene senkrecht zur Richtung AE , dieselbe werde in den Punkten F, G, H von den in den Punkten B, C und D an der Kugel zurückgeworfenen Strahlen getroffen. Die Strahlen AE und CG , welche von Punkten desselben Parallels herkommen, schneiden sich rückwärts verlängert in einem Punkte J , der auf der Axe PO liegen muss; ebenso schneiden sich die Strahlen BF und DH in einem Punkte K der Axe PO . Dagegen schneiden sich die von den Meridianpunkten A und B herkommenden Strahlen in dem Punkte L . Wir nehmen nun an, dass der leuchtende Punkt P in der Entfernung 1 auf die Flächeneinheit senkrecht die Lichtquantität q sendet, dann erhält das Kugeloberflächenelement $ABCD$, dessen Inhalt mit df bezeichnet werden möge, die Lichtmenge $Q = q \frac{df}{b^2} \cos i$. Nun ist aber $df = AB \times AC$, und wenn man von B auf die Richtung AE das Perpendikel BM fällt, so hat man $AB \cos i = BM$; folglich:

$$Q = q \frac{AC \times BM}{b^2}.$$

Von dieser Lichtmenge wird ein bestimmter Bruchtheil, der von der Politur der Kugelfläche u. s. w. abhängt, nach dem Element $EFGH$ reflectirt. Bezeichnet man diesen Bruchtheil durch den Factor k , so erhält $EFGH$ die Lichtmenge $kq \frac{AC \times BM}{b^2}$.

Die auf die Flächeneinheit von $EFGH$ gelangende Lichtmenge (die Beleuchtung der Fläche), welche δ heissen möge, wird daher, wenn der Inhalt des Elementes $EFGH$ mit $d\varphi$ bezeichnet ist, gegeben durch die Gleichung:

$$\delta = \frac{kq}{b^2} \frac{AC \times BM}{d\varphi},$$

oder, da $d\varphi$ ausgedrückt werden kann durch $EF \times EG$:

$$\delta = k \frac{q}{b^2} \frac{AC \times BM}{EF \times EG}.$$

Nun ist, zwar nicht streng, aber bei den vorauszusetzenden kleinen Verhältnissen ausreichend genau:

$$AC : EG = JA : (JA + AE).$$

Ferner ist streng:

$$BM : EF = LM : LE,$$

oder, wenn man das kleine Stück AM vernachlässigt:

$$BM : EF = LA : (LA + AE).$$

Durch Substitution wird daher, wenn noch die Entfernung AE der auf-
fangenden Fläche von der Kugel mit c bezeichnet wird:

$$\delta = k \frac{q}{b^2} \frac{JA \times LA}{(c + JA)(c + LA)}.$$

Es handelt sich nun noch darum, JA und LA durch die Grössen ϱ , i
und α auszudrücken. Im Dreieck AJO hat man ohne Weiteres:

$$JA = \frac{\varrho \sin \alpha}{\sin(i + \alpha)}.$$

Etwas umständlicher ist die Bestimmung von LA . Betrachtet man AB
als geradlinig und bezeichnet den Incidenzwinkel bei B mit i' , so hat
man in den beiden Dreiecken ABP und ABL :

$$AP : AB = \sin(90^\circ - i') : \sin APB,$$

$$AL : AB = \sin(90^\circ - i') : \sin ALB.$$

Mithin:

$$AP \times \sin APB = AL \times \sin ALB,$$

und da der Winkel $APB = di - d\alpha$, Winkel $ALB = di + d\alpha$, ferner
noch $AP : \varrho = \sin \alpha : \sin(i - \alpha)$ ist, so wird:

$$LA = \frac{\varrho \sin \alpha}{\sin(i - \alpha)} \frac{1 - \frac{d\alpha}{di}}{1 + \frac{d\alpha}{di}}.$$

Es ist aber auch:

$$a : \varrho = \sin i : \sin(i - \alpha),$$

und daraus:

$$\frac{d\alpha}{di} = \frac{\sin \alpha}{\sin i \cos(i - \alpha)};$$

daher endlich durch Substitution:

$$LA = \frac{\frac{1}{2} \varrho \sin \alpha \cos i}{\sin \alpha + \frac{1}{2} \sin(i - \alpha) \cos i}.$$

Setzt man die Werthe von JA und LA in die Gleichung für δ ein, so
erhält man eine etwas complicirte Formel, aus welcher man für jeden
Punkt der spiegelnden Kugel die Beleuchtung in der Entfernung c von
derselben finden kann. Die Formel vereinfacht sich aber ganz wesent-
lich, wenn die Entfernung des leuchtenden Punktes von der Kugel im
Verhältniss zum Kugelradius sehr gross ist. Dann kann man ohne
grossen Fehler b durch a ersetzen, ferner $i = \alpha$ annehmen. Man hat
dann:

$$JA = \frac{1}{2} \frac{\varrho}{\cos \alpha} \quad \text{und} \quad LA = \frac{1}{2} \varrho \cos \alpha,$$

und damit:

$$\delta = k \frac{q}{a^2} \frac{\frac{1}{4} q^2}{(c + \frac{1}{2} q \sec \alpha)(c + \frac{1}{2} q \cos \alpha)} = k \frac{q}{a^2} \frac{q^2}{4c^2 + 2qc(\sec \alpha + \cos \alpha) + q^2}.$$

Ist endlich auch die Entfernung c gross im Verhältniss zum Kugelradius q , so ergibt sich:

$$\delta = kq \frac{q^2}{4a^2 c^2},$$

d. h. die Beleuchtung ist in diesem Falle unabhängig von dem Incidenzwinkel und allein bestimmt durch die Grösse der Kugel und die Entfernungen derselben von Lichtquelle und Auffangfläche. Denkt man sich an Stelle der letzteren das Auge oder das Fernrohrobjectiv, so erblickt man stets ein gleich helles Reflexbild, in welcher Richtung man auch nach der Kugel sieht. Dabei ist allerdings die Voraussetzung gemacht, dass der Factor k für alle Incidenzwinkel derselbe bleibt, was in aller Strenge keineswegs der Fall ist.

Man kann zu dem eben gefundenen Resultate noch auf einem andern viel kürzeren Wege gelangen, wenn man einen wichtigen Satz aus der theoretischen Astrophotometrie (Seite 36) benutzt. Wir wollen dabei noch annehmen, dass die Lichtquelle nicht ein leuchtender Punkt sei, sondern eine auf der Axe PO senkrecht stehende leuchtende Scheibe mit der Leuchtkraft q , deren scheinbarer Radius, von der Kugel aus gesehen, s sein möge. Die Lichtmenge dl , welche diese Scheibe auf das Element df der Kugeloberfläche sendet, ist nach dem betreffenden Satze ausgedrückt durch:

$$dl = qdf\pi \sin^2 s \cos i.$$

Es ist aber (Fig. 53) $df = q^2 d\alpha \sin \alpha dv$, wenn dv der Winkel zwischen den beiden Meridianen ist, welche das Element df einschliessen. Mithin gelangt auf die ganze Kugel von der leuchtenden Scheibe die Lichtquantität:

$$l = q^2 \pi \sin^2 s \int_0^{2\pi} dv \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos i \sin \alpha d\alpha.$$

Ist die Entfernung der Lichtquelle sehr gross im Verhältniss zu q , so kann man α durch i ersetzen und erhält dann:

$$l = q\pi^2 q^2 \sin^2 s.$$

Wir setzen wieder voraus, dass bei allen Incidenzwinkeln ein gleich grosser Bruchtheil des auffallenden Lichtes reflectirt wird; dann strahlt die Kugel die Gesamtlichtmenge kl aus, und wenn man sich concentrisch

um die spiegelnde Kugel eine Hohlkugel mit dem Radius c gelegt denkt, so empfängt die Flächeneinheit dieser Hohlkugel die Lichtquantität:

$$\delta = \frac{kl}{4\pi c^2} = \frac{kqQ^2}{4c^2} \pi \sin^2 s.$$

Statt $\pi \sin^2 s$ kann man schreiben $\frac{F}{a^2}$, wenn F den Flächeninhalt der leuchtenden Scheibe ausdrückt, und man hat endlich:

$$\delta = kqF \frac{Q^2}{4a^2 c^2}.$$

Diese Formel stimmt bis auf den Factor F mit der oben abgeleiteten überein; sie sagt aus, dass die Helligkeit des von einer spiegelnden Kugel reflectirten Bildes direct proportional ist dem Quadrate des Kugelradius und umgekehrt proportional den Quadraten der Entfernungen der Kugel von Lichtquelle und Beobachter.

Der Erste, der von diesem wichtigen Satze in der Astrophotometrie Gebrauch gemacht hat, war Wollaston¹⁾. Derselbe liess das Licht der Sonne von einer kleinen Thermometerkugel reflectiren und betrachtete von grosser Entfernung aus das punkttartige Bildchen im Ocular eines Fernrohrs mit dem einen Auge, während er mit dem anderen Auge das von einer zweiten Thermometerkugel reflectirte Bild einer Kerzenflamme durch eine Linse von kurzer Brennweite ansah. Durch Verschiebung der Kerze stellte er die Gleichheit der beiden Helligkeiten her. Dann richtete er das Fernrohr direct auf einen hellen Stern und verglich denselben ebenfalls mit dem von der zweiten Kugel reflectirten Kerzenlichte. Mit Benutzung der obigen Formel liess sich auf diese Weise das Helligkeitsverhältniss der Sonne zu dem Fixstern aus den gemessenen Distanzen und den Kugeldurchmessern berechnen. Das Wollaston'sche Verfahren hat einen bedenklichen Mangel. Da der Stern direct, das Sonnenlicht aber nach der Spiegelung betrachtet wurde, so war zur Reduction der Beobachtungen die Kenntniss des Reflexionscoefficienten k erforderlich, welcher sich nur schwer bestimmen lässt und von Wollaston sehr willkürlich gleich $\frac{1}{2}$ angenommen wurde.

Steinheil²⁾ hat ein ähnliches Verfahren wie das Wollaston'sche zur Vergleichung von Sonne und Fixsternen in Vorschlag gebracht und hat sich zur Prüfung seines Prismenphotometers eines Hilfsapparates bedient, bei welchem das Princip der spiegelnden Kugeln ebenfalls zur Anwendung kam.

1) Phil. Trans. of the R. Soc. of London. 1829, p. 19.

2) Elemente der Helligkeitsmessungen am Sternenhimmel, p. 33 und 49.

Noch empfehlenswerther ist die Methode, welche Bond¹⁾ bei Vergleichung des Mondes mit den Planeten Jupiter und Venus, sowie bei der Messung der Lichtstärke der verschiedenen Mondphasen eingeschlagen hat. Derselbe benutzte nur eine einzige spiegelnde Kugel, von welcher er sowohl das Licht der Himmelskörper als dasjenige der Vergleichsflamme reflectiren liess. Es kam daher nur auf die jedesmalige genaue Bestimmung des Abstandes der Flamme von der Kugel an, bei welcher die mit blossem Auge von constanter Entfernung aus betrachteten Reflexbilder gleich hell geschätzt wurden.

In ähnlicher Weise ist die Methode noch oft in der Photometrie angewendet worden. Zu spiegelnden Kugeln eignen sich sehr gut aussen versilberte oder mit Quecksilber gefüllte Glaskugeln, noch vortheilhafter sind Stahlkugeln, bei denen sich leichter die vollkommene Kugelgestalt herstellen lässt. Um übrigens den Einfluss etwaiger Abweichungen von der regelmässigen Gestalt, sowie auch ungleicher Reflexionsfähigkeit an verschiedenen Stellen der Kugel unschädlich zu machen, empfiehlt es sich, vor jeder einzelnen Messung die Kugel ein wenig zu drehen, damit stets möglichst viele verschiedene Partien der Kugeloberfläche zur Wirkung kommen.

5. Benutzung der Eigenschaften des polarisirten Lichtes.

Die merkwürdigen Eigenschaften des polarisirten Lichtes haben sehr bald, nachdem durch die epochemachenden Untersuchungen von Arago und Fresnel das Wesen der Erscheinungen richtig erkannt und die hauptsächlichsten Gesetze auf experimentellem und theoretischem Wege festgestellt waren, den Gedanken angeregt, die Polarisation des Lichtes für die Photometrie nutzbar zu machen, und in der That hat wohl keine andere Methode die Lichtmessungen in gleicher Weise gefördert. Nicht ganz mit Unrecht nennt man daher bisweilen Arago, der die ersten wichtigen Schritte auf diesem Gebiete gethan hat, den Begründer der modernen praktischen Photometrie. Auch die Himmelsphotometrie verdankt dieser Methode ihre besten instrumentellen Hilfsmittel.

Da man es bei den meisten photometrischen Aufgaben, sowohl in der Technik als am Himmel, mit natürlichem oder nur partiell polarisirtem Lichte zu thun hat, so kommt es in erster Linie darauf an, Mittel zu besitzen, um aus solchem Lichte vollkommen polarisirtes herzustellen. Es giebt eine Menge Wege, welche zu diesem Ziele führen. Für die Photometrie haben sich hauptsächlich zwei als brauchbar erwiesen: erstens

1) Memoirs of the Amer. Acad. of science. New series, Vol. 8, p. 221.

die Reflexion an der Oberfläche isotroper Medien und zweitens die Doppelbrechung in Krystallen.

Bekanntlich hat Malus durch Zufall die Entdeckung gemacht, dass das von der Oberfläche des Wassers oder einer Glasplatte reflectirte Licht die Eigenschaften des natürlichen Lichtes verloren hat und je nach der Grösse des Incidenzwinkels mehr oder weniger polarisirt ist. Alle durchsichtigen festen und flüssigen Substanzen besitzen diese Eigenschaft, und für jede existirt ein ganz bestimmter Incidenzwinkel, bei welchem die Polarisation des reflectirten Strahles vollständig wird. Man nennt diesen Incidenzwinkel den Polarisationswinkel der Substanz. Für Glas beträgt derselbe etwa 56° — 60° , für Wasser etwa 53° . Brewster¹⁾ hat das nach ihm genannte Gesetz aufgestellt, welches aussagt, dass bei jeder durchsichtigen Substanz das zurückgeworfene Licht dann vollständig polarisirt ist, wenn der reflectirte Strahl auf dem gebrochenen senkrecht steht. Ist p der Polarisationswinkel einer Substanz, n der Brechungs-exponent derselben und r der Brechungswinkel, so ist $\sin p = n \sin r$, und da nach dem Brewster'schen Gesetze $p + r = 90^{\circ}$ sein soll, so hat man $n = \tan p$, wodurch also für jeden durchsichtigen Körper der Polarisationswinkel bestimmt ist. Die Kenntniss dieses Winkels giebt, wie man sieht, ein vortreffliches Mittel, gewöhnliches Licht in vollständig polarisirtes zu verwandeln, doch ist dabei zu beachten, dass für jede Farbengattung ein besonderer Polarisationswinkel existirt, und dass infolge dessen bei Benutzung von zusammengesetztem Lichte streng genommen niemals eine vollkommene Polarisation stattfinden kann. Je stärker brechend die spiegelnde Substanz ist, desto grösser ist natürlich die Quantität des unpolarisirt bleibenden Lichtes, doch wird in der Praxis der störende Einfluss meistens von geringer Bedeutung sein, wenn man den Spiegel auf denjenigen Polarisationswinkel einstellt, welcher der intensivsten Strahlengattung entspricht.

Fällt das Licht unter einem anderen als dem Polarisationswinkel auf, so findet nur eine partielle Polarisation statt, und das reflectirte Licht ist aus natürlichem und polarisirtem gemischt; wenn man aber dieses zurückgeworfene Licht noch mehrmals und zwar unter beliebigen Winkeln reflectiren lässt, so wird dasselbe endlich, wie schon Brewster hervor-gelassen hat, beinahe vollständig polarisirt. Man kann also auch mehrfache Reflexion unter beliebigen Winkeln zur Herstellung von vollkommen polarisirtem Licht benutzen, hat aber natürlich mit dem Übelstande zu kämpfen, dass eine ausserordentliche Lichtschwächung eintritt.

Was noch die in durchsichtigen Medien gebrochenen Strahlen an-

1) Phil. Trans. of the R. Soc. of London. 1815, p. 125.

betrifft, so sind dieselben niemals vollständig polarisirt, sie enthalten natürliches und polarisirtes Licht, und zwar ist die Polarisationsebene des letzteren senkrecht zur Polarisationsebene der reflectirten Strahlen. Arago hat das wichtige Gesetz aufgestellt, dass, wenn natürliches Licht auf ein durchsichtiges Medium auffällt, der reflectirte und der gebrochene Strahl gleiche Quantitäten polarisirten Lichtes enthalten. Da nun bei nicht allzu grossen Incidenzwinkeln das reflectirte Licht schwächer ist als das durchgehende, so folgt, dass das letztere nur eine partielle Polarisation aufweisen kann. Wenn man aber eine grössere Anzahl von durchsichtigen planparallelen Platten übereinander legt, so wird bei dem Durchgange durch jede folgende immer ein neuer Bruchtheil des Lichtes polarisirt, und schliesslich ist fast alles durchgehende Licht polarisirt. Die sogenannte Glasplattensäule dient also ebenfalls als Polarisator und ist als solcher z. B. bei dem Wild'schen Photometer verwendet worden. Neumann¹⁾ hat speciell die Theorie dieser Glassäule sehr ausführlich behandelt.

Die bei weitem gebräuchlichsten Polarisatoren, speciell in der Himmelsphotometrie, sind die doppeltbrechenden einaxigen Krystalle, und zwar benutzt man fast ausschliesslich entweder das Rochon'sche und Wollaston'sche Prisma, bei welchen beide Strahlen, sowohl der ordentliche als der ausserordentliche, zur Wirksamkeit gelangen, oder die verschiedenen Formen des sogenannten Nicol'schen Prismas, bei welchem der ordentliche Strahl durch Totalreflexion fortgeschafft wird. Einige Bemerkungen über diese wichtigen Hilfsmittel der Photometrie mögen hier am Platze sein²⁾.

Das Rochon'sche³⁾ Prisma, das älteste von allen Polarisationsprismen, wird gewöhnlich aus Bergkrystall (seltener aus Kalkspath) angefertigt und besteht aus zwei vollkommen gleichen rechtwinkligen Prismen, welche mit ihren Hypotenusenflächen an einander gekittet sind. Die Hauptaxe des Krystalles steht in dem einen Prisma auf der Eintrittsfläche senkrecht, in dem anderen liegt sie parallel der brechenden Kante. Ein Strahl natürlichen Lichtes, welcher senkrecht auf die Vorderfläche des ersten Prismas auffällt, geht daher ohne Ablenkung und Zerlegung durch dasselbe hindurch und wird erst bei dem Eintritte in das zweite Prisma in zwei Strahlen zerspalten, die nach dem Verlassen des Doppelprismas

1) Neumann, Vorlesungen über theoretische Optik, herausg. von E. Dorn. Leipzig, 1885, p. 147.

2) Ausführliche Angaben über die verschiedenen Polarisationsprismen findet man in den beiden folgenden Abhandlungen: W. Grosse, Die gebräuchlichen Polarisationsprismen mit besonderer Berücksichtigung ihrer Anwendung in Photometern. Clausthal, 1886, und: K. Feussner, Über die Prismen zur Polarisation des Lichtes (Zeitschr. für Instrumentenkunde, Jahrg. 4, 1884, p. 41).

3) Recueil de mémoires sur la mécanique et sur la physique. Brest, 1873. Siehe auch Gilberts Annalen, Bd. 40, p. 141.

vollkommen polarisirt sind, und zwar in Ebenen, die aufeinander senkrecht stehen. Der ordentliche Strahl behält nach dem Austritte aus dem Doppelprisma die Richtung des auffallenden Lichtes bei, erleidet aber meistens durch die Kittschicht eine kleine seitliche Versetzung. Nur wenn die Kittsubstanz genau denselben Brechungsexponenten wie der ordentliche Strahl hat, findet gar keine solche Verschiebung statt. Der ausserordentliche Strahl tritt abgelenkt von der ursprünglichen Richtung aus dem Doppelprisma aus in einer Ebene, die auf der brechenden Kante senkrecht steht. Die Grösse der Ablenkung hängt von dem brechenden Winkel der Prismen und von dem Unterschiede der Brechungsexponenten des ordentlichen und ausserordentlichen Strahles ab. Ist bei Verwendung von Quarz der Prismenwinkel ungefähr 60° , so beträgt die Ablenkung fast einen ganzen Grad. Wenn das Doppelprisma aus Kalkspath angefertigt ist, so wird entsprechend der grösseren Differenz zwischen den Brechungsexponenten des ordentlichen und ausserordentlichen Strahles auch eine grössere Ablenkung der austretenden Strahlen erzielt werden, was unter Umständen von Wichtigkeit sein kann. Das ordentliche Bild beim Rochon'schen Prisma ist farblos, während das ausserordentliche gefärbt erscheint. Dies macht sich als empfindlicher Nachtheil bemerklich, wenn man das ordentliche Bild einer Lichtquelle mit dem ausserordentlichen einer anderen direct vergleichen will.

Eine Modification des Rochon'schen Prismas, bei welcher eine besonders weite Trennung der beiden austretenden Strahlen erreicht ist, rührt von Wollaston¹⁾ her. Bei dieser Form ist das erste Prisma so hergestellt, dass die Hauptaxe des Krystals (Quarz oder Kalkspath) parallel zur Eintrittsfläche und senkrecht zur brechenden Kante liegt. Das zweite Prisma ist genau so gearbeitet, wie bei dem Rochon'schen Polarisator. Die beiden austretenden Strahlen sind von der ursprünglichen Richtung um gleiche Beträge nach entgegengesetzten Seiten abgelenkt, und die Gesammttrennung ist doppelt so gross, wie bei dem Rochon'schen Prisma. Ordentliches und ausserordentliches Bild erscheinen in gleicher Weise gefärbt.

Häufig wird in photometrischen Apparaten auch von dem sogenannten achromatisirten Kalkspathprisma Gebrauch gemacht. Bei diesem besteht die eine Hälfte aus Kalkspath, die andere aus Crown Glas, dessen Brechungscoefficient nahe mit dem des ausserordentlichen Strahles im Kalkspath übereinstimmt. Als Kittungsmittel ist Canadabalsam verwendet. Die ausserordentlichen Strahlen gehen ohne Ablenkung und fast ohne jede seitliche Verschiebung hindurch und sind bei geeigneter Wahl

1) Phil. Trans. of the R. Soc. of London. 1820, part. I, p. 126.

des brechenden Winkels fast vollkommen achromatisirt; die ordentlichen Strahlen erfahren eine ziemlich starke Totalablenkung und zwar, wenn die Kalkspathhälfte dem auffallenden Lichte zugekehrt ist, eine etwas grössere, als wenn das Licht zuerst die Glashälfte passirt.

Von der grössten Bedeutung für die Photometrie sind das Nicol'sche Prisma und die verschiedenen Modificationen desselben, die im Laufe der Zeit eingeführt worden sind. Diese Prismen sind aus zwei Kalkspathstücken zusammengesetzt, die so aus dem Krystall herausgeschnitten und mit geeigneten Kittsubstanzen wieder vereinigt sind, dass der ordentliche Strahl durch Totalreflexion ganz beseitigt wird, und nur der ausserordentliche unabgelenkt hindurchgeht. Von den verschiedenen Formen sind die gebräuchlichsten: das ursprüngliche Nicolprisma mit schrägen Endflächen, das Nicolprisma mit geraden Endflächen, das Hartnack-Prazmowski'sche, das Foucault'sche und das Glan-Thompson'sche Prisma. Sie unterscheiden sich voneinander durch die Art des Schnittes und durch die Schicht zwischen den beiden Hälften. Bei den drei ersten Formen wird zum Kitten Canadabalsam oder Copaivabalsam oder Leinöl benutzt, bei den beiden letzten Formen ist die Kittschicht ganz weggelassen und durch eine dünne Luftschicht ersetzt. Jede dieser Formen hat ihre Vorzüge und Nachtheile, und man wird je nach dem Zwecke, den man erreichen will, von einer oder der anderen Gebrauch machen. Ein Hauptübelstand fast aller Nicolprismen ist die nicht zu vermeidende geringe seitliche Abweichung. Dadurch wird bewirkt, dass in photometrischen Apparaten, wo Nicolprismen und Linsen combinirt werden, die Bilder etwas seitlich von der optischen Axe liegen, und da meistens Drehungen der Prismen erforderlich sind, so findet infolge dessen eine Rotation des Bildes um die Axe, ein sogenanntes Schleudern, statt. Bei photometrischen Beobachtungen ist dieses Schleudern sehr störend; am Besten ist dem Fehler bei Nicolprismen mit geraden Endflächen abgeholfen, und in dieser Beziehung eignen sich dieselben in erster Linie zur Verwendung in Photometern. Sehr gefährlich sind die Nebenreflexe, welche an den Seitenflächen der Prismen und an der Zwischenschicht auftreten und nicht nur die Reinheit der Bilder erheblich beeinträchtigen, sondern auch zur Entstehung von elliptisch polarisirtem Lichte und zur directen Verfälschung der Messungsergebnisse beitragen können. Durch sorgfältige Schwärzung der Seitenflächen und vor Allem durch passende Anwendung von Diaphragmen, welche nur den Hauptlichtkegel frei hindurchgehen lassen, kann dieser Fehler wesentlich abgeschwächt werden, und es sollte bei der Construction von Photometern niemals verabsäumt werden, die Prismen in Bezug auf diesen Punkt einer genauen Prüfung zu unterwerfen. Das Foucault'sche und Glan'sche Prisma stehen in

Bezug auf Reinheit der Bilder den anderen nach, weil die Reflexionen innerhalb der Luftschicht eine nicht unbeträchtliche Trübung hervorbringen. Bei manchen photometrischen Aufgaben kommt es auf ein möglichst grosses Gesichtsfeld an, und in dieser Beziehung verdienen die älteren Formen des Nicolprismas und das Hartnack-Prazmowski'sche den Vorzug vor den anderen. Was endlich noch die Lichtstärke anbetrifft, so ist von vornherein zu bedenken, dass infolge der Trennung in ordentlichen und ausserordentlichen Strahl bei keiner der erwähnten Formen mehr als die Hälfte des einfallenden Lichtes zur Ausnutzung kommen kann, und dass durch die Absorption und Reflexion im Prisma selbst noch ein weiterer Lichtverlust eintritt. Das eigentliche Nicolprisma ist das lichtstärkste von allen, es lässt etwa 40 bis 45 Procent des auffallenden Lichtes hindurch. Dann folgt das Prazmowski'sche und erst hinter diesem das Foucault'sche und das Glan'sche Prisma. In der Astrophotometrie, wo es fast immer auf die äusserste Ausnutzung des vorhandenen Lichtes ankommt, verwendet man daher mit Vorliebe das Nicolprisma und zwar aus den oben schon erwähnten Gründen dasjenige mit senkrechten Endflächen.

Wir haben im Vorangehenden die verschiedenen in photometrischen Apparaten üblichen Hilfsmittel zur Hervorbringung von vollständig polarisiertem Lichte besprochen. Um nun aus den Eigenschaften dieses so erhaltenen Lichtes auf die ursprüngliche Intensität schliessen zu können, muss in jedem Photometer noch ein sogenannter Analysator zur Verwendung kommen, welcher es ermöglicht, die Beschaffenheit des polarisierten Lichtes zu untersuchen. Man benutzt hierzu fast ausschliesslich eine der erwähnten Formen des Nicol'schen Prismas. Die theoretische Berechnung der Lichtstärken stützt sich dann auf das wichtige Malus'sche Gesetz oder, wie es gewöhnlich genannt wird, das Cosinusquadratgesetz. Dieses Gesetz sagt aus, dass, wenn ein geradlinig polarisierter Lichtstrahl auf einen doppelbrechenden Krystall auffällt, die Lichtstärke des austretenden ordentlichen Strahles proportional dem Quadrate des Cosinus, die des ausserordentlichen proportional dem Quadrate des Sinus desjenigen Winkels ist, welchen die Polarisationsebene des auffallenden Lichtes mit dem Hauptschnitte des Krystalls bildet. Hat man als Polarisator ein Rochon'sches oder Wollaston'sches Prisma verwendet, so theilt sich der auffallende Strahl, dessen Intensität J sein möge, in zwei gleichstarke Strahlen, von denen der ordentliche in der Ebene des Hauptschnittes, der ausserordentliche in der Ebene senkrecht zum Hauptschnitte polarisirt ist. Bezeichnet man die Helligkeiten derselben mit O und E , so hat man, wenn noch m einen Schwächungsfactor beim Durchgange durch die Substanz ausdrückt:

$$O = \frac{1}{2} mJ \quad \text{und ebenso} \quad E = \frac{1}{2} mJ.$$

Fallen diese beiden Strahlen auf ein Nicolprisma als Analysator, so liefert jeder nur einen einzigen austretenden Strahl. Die Intensitäten derselben mögen O' und E' heissen. Bildet dann der Hauptschnitt des Nicols mit dem Hauptschnitte des Polarisators den Winkel φ , so hat man nach dem Malus'schen Gesetze:

$$O' = \frac{1}{2} m^2 J \sin^2 \varphi, \\ E' = \frac{1}{2} m^2 J \cos^2 \varphi.$$

Wir denken uns nun zwei Lichtquellen mit den ursprünglichen Intensitäten J_1 und J_2 , welche ihr Licht nebeneinander auf den Polarisator werfen. Dann treten aus dem analysirenden Nicol im Ganzen vier Lichtbündel heraus mit den Intensitäten:

$$O'_1 = \frac{1}{2} m^2 J_1 \sin^2 \varphi, \quad O'_2 = \frac{1}{2} m^2 J_2 \sin^2 \varphi, \\ E'_1 = \frac{1}{2} m^2 J_1 \cos^2 \varphi, \quad E'_2 = \frac{1}{2} m^2 J_2 \cos^2 \varphi.$$

Man findet stets eine Stellung des Nicols, bei welcher die Werthe O'_1 und E'_2 einander gleich sind. Wird der dieser Stellung entsprechende Werth von φ mit α bezeichnet, so folgt:

$$(1) \quad \frac{J_2}{J_1} = \tan^2 \alpha.$$

Ebenso giebt es eine zweite Stellung des Nicols, bei welcher die Werthe E'_1 und O'_2 einander gleich werden. Heisst der entsprechende Winkel α' , so wird:

$$\frac{J_1}{J_2} = \tan^2 \alpha',$$

und es folgt daher unmittelbar: $\alpha' = 90^\circ - \alpha$.

Wenn man als Polarisator anstatt des Rochon'schen oder Wollaston'schen Prismas ein Nicolprisma benutzt, so liefert eine Lichtquelle mit der ursprünglichen Intensität J nur einen einzigen aus dem analysirenden Nicol austretenden Strahl, dessen Intensität gegeben ist durch:

$$E = \frac{1}{2} m^2 J \cos^2 \varphi.$$

Wählt man diese Lichtquelle als Vergleichsobject für eine andere mit der Intensität J_1 , die man ohne polarisirende Medien direct neben derselben erblickt, so kann man E durch Drehung des analysirenden Nicols so weit verändern, bis es gleich J_1 wird. Man hat dann, wenn der entsprechende Winkel zwischen den Hauptschnitten der beiden Nicols mit α_1 bezeichnet wird:

$$J_1 = \frac{1}{2} m^2 J \cos^2 \alpha_1.$$

Für eine dritte Lichtquelle mit der Intensität J_2 wird ebenso bei einem

gewissen Winkel α_2 die Gleichheit mit dem Vergleichslichte hergestellt werden können. Man erhält:

$$J_2 = \frac{1}{2} m^2 J \cos^2 \alpha_2,$$

und mithin:

$$(2) \quad \frac{J_1}{J_2} = \frac{\cos^2 \alpha_1}{\cos^2 \alpha_2}.$$

Wenn endlich noch als Polarisator eine unter dem Polarisationswinkel gegen die auffallenden Strahlen geneigte reflectirende Glasplatte dient, so hat der einzige aus dem analysirenden Nicol austretende Strahl die Intensität:

$$E' = mJ \sin^2 \varphi.$$

Hier bedeutet φ den Winkel, den die Einfallsebene des Lichtes mit dem Hauptschnitte des Nicols bildet. Benutzt man die Lichtquelle J wieder als Vergleichslicht für zwei andere Lichtquellen mit den Intensitäten J_1 und J_2 und stellt nacheinander durch Drehung des analysirenden Nicols die Gleichheit der Helligkeiten dar, so ergibt sich:

$$(3) \quad \frac{J_1}{J_2} = \frac{\sin^2 \alpha_1}{\sin^2 \alpha_2},$$

wo α_1 und α_2 die entsprechenden Werthe des Winkels φ sind.

Jede der drei im Vorangehenden angedeuteten Methoden hat in der Photometrie Verwendung gefunden, die erste z. B. bei den Pickering'schen Photometern und dem Glan-Vogel'schen Spectralphotometer, die zweite bei dem Zöllner'schen Astrophotometer, und die dritte bei dem ersten Wild'schen Photometer.

Was die Richtigkeit des zu Grunde liegenden Cosinusquadratgesetzes anbelangt, so ist dieselbe durch zahlreiche Beobachtungen innerhalb der bei Lichtmessungen zu verbürgenden Genauigkeit nachgewiesen. In der That stimmen die meisten Beobachter darin überein, dass der Helligkeitsunterschied zwischen den beiden durch ein doppeltbrechendes Prisma erzeugten Bildern nicht mehr als etwa $\frac{1}{30}$ oder $\frac{1}{33}$ der Intensität betragen kann. Die ganz strengen Ausdrücke für die Intensitäten O und E des ordentlichen und ausserordentlichen Strahles, in welche ein linear polarisirter Lichtstrahl von der Intensität J beim Durchgange durch einen doppeltbrechenden Krystall zerlegt wird, sind von Wild¹⁾ auf Grund der von Neumann gegebenen Theorien aufgestellt worden; sie lauten:

$$O = \frac{16a^2}{(1+a)^4} J \cos^2 \omega,$$

$$E = \frac{16 [a^2 - (a^2 - c^2) \sin^2 \nu]}{[1 + \sqrt{a^2 - (a^2 - c^2) \sin^2 \nu}]^4} J \sin^2 \omega.$$

1) Poggend. Annalen. Bd. 118, p. 193.

Hierin ist ω der Winkel zwischen der Polarisationsebene des einfallenden Lichtes und dem Hauptschnitte des Krystalls, ferner bedeuten a und c die reciproken Brechungsindices des ordentlichen und ausserordentlichen Strahles und ν den Winkel zwischen optischer Axe und Einfallslot. Für $\nu = 0$ und für $a^2 - c^2 = 0$ gehen die Formeln in das einfache Malus'sche Gesetz über; dasselbe wird also um so besser erfüllt sein, je geringer die Doppelbrechung des benutzten Polarisationsprismas ist. Der Bergkrystall verdient in dieser Beziehung den Vorzug vor dem Kalkspath. Man sieht noch, dass die Formeln (2) und (3) auch mit Benutzung der strengen Wild'schen Ausdrücke ganz einwurfsfrei sind, da stets nur Werthe von der Form O oder E miteinander combinirt sind. Nur bei Formel (1) würde die Abweichung vom einfachen Malus'schen Gesetze in Betracht kommen; doch darf man dieselbe bei allen Aufgaben der Himmelsphotometrie unbedenklich ausser Acht lassen.

Bei den drei oben erwähnten Methoden kommt es auf die Beurtheilung der Gleichheit zweier Lichteindrücke an. Arago hat noch ein anderes Polarisationsprincip zu photometrischen Messungen vorgeschlagen, welches von Babinet und namentlich von Wild mit Erfolg angewendet worden ist. Nach diesem Principe verhalten sich gleiche Quantitäten senkrecht zu einander polarisirten Lichtes bei ihrer Mischung wie natürliches Licht. Nun giebt aber das bekannte Polariskop ein vortreffliches Mittel, auch die geringsten Mengen von polarisirtem Lichte nachzuweisen, da in einem solchen Apparate bei vollständig oder partiell polarisirtem Lichte Interferenzfiguren auftreten, während solche bei natürlichem Lichte nicht vorhanden sind. Kann man also von zwei Lichtquellen Strahlenbüschel zum Zusammenfallen bringen, die senkrecht zu einander polarisirt sind, und deren Intensität durch Drehung eines Polarisators nach Belieben um messbare Quantitäten geändert werden kann, so braucht man diese Drehung nur so weit auszuführen, bis in einem Polariskope die Interferenzfiguren verschwinden. Die gemischten Quantitäten sind dann nach Obigem gleich, und die Drehung des Polarisators erlaubt die Berechnung des ursprünglichen Lichtverhältnisses. An Stelle der Gleichheitsbeurtheilung tritt also bei dieser Methode die Beobachtung des Auftretens oder Verschwindens von Interferenzerscheinungen, welche bei einiger Übung ausserordentlich fein ist.

In der folgenden Besprechung der wichtigsten Polarisationsphotometer sind in erster Linie diejenigen bevorzugt worden, welche bei Beobachtungen am Himmel ausgedehnte Verwendung gefunden haben; von den übrigen sind nur solche hervorgehoben, die für die ganze Entwicklung dieser Classe von Instrumenten bedeutungsvoll sind, oder die durch

besonders eigenthümliche Einrichtungen Interesse verdienen. Eine Gruppierung der einzelnen Apparate nach einem bestimmten Gesichtspunkte, etwa nach den verschiedenen im Vorangehenden erwähnten Methoden, ist nicht durchgeführt worden; es ist vielmehr bei der Zusammenstellung lediglich die chronologische Reihenfolge massgebend gewesen.

a. Die Photometer von Arago, Bernard, Babinet.

Von den zahlreichen Apparaten, welche Arago zur Lichtmessung vorgeschlagen hat, wird gewöhnlich einer mit dem speciellen Namen des Arago'schen Photometers bezeichnet, bei welchem die Helligkeitsänderungen des von einer planparallelen Glasplatte unter verschiedenen Winkeln reflectirten und durchgelassenen Lichtes zur Verwendung kommen. Dieses Instrument ist von Arago¹⁾ erst verhältnissmässig spät (im Jahre 1850) beschrieben worden, während seine ersten Vorschläge zur Verwendung der Polarisationserscheinungen in der Photometrie bereits aus den dreissiger Jahren herrühren. Der Apparat (Fig. 54) besteht aus einem kreuz-

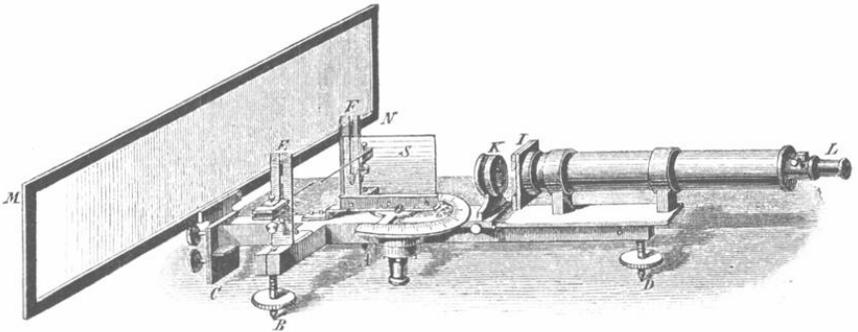


Fig. 54.

förmigen Untergestell, welches mittels der drei Fusschrauben *A*, *B*, *D* horizontal gestellt werden kann. Bei *C* ist ein transparenter senkrecht stehender Papierschirm *MN* angebracht, welcher von den zu untersuchenden Lichtquellen beleuchtet wird. Senkrecht zum Horizont und zur Ebene dieses Schirmes steht die planparallele Glasplatte *S*. Zu beiden Seiten derselben zwischen ihr und dem Schirme befinden sich die Träger *E* und *F*, welche zwei horizontale Stäbchen oder Nadeln enthalten, die in jeder Höhe festgeklemmt werden können. Auf dem Stativ befestigt ist ferner ein getheilter Kreis, dessen Mittelpunkt *O* genau unter der Glasplatte liegt. Um einen durch *O* gehenden Zapfen lässt sich ein das Rohr *IL* tragender horizontaler Arm frei drehen, so dass dieses Rohr unter jedem

1) Arago. Sämmtliche Werke. Deutsche Ausgabe von Hankel. Bd. 10, p. 156.

beliebigen Winkel von beiden Seiten her auf die Glasplatte gerichtet werden kann. Der Betrag der Drehung wird mit Hülfe eines gleichzeitig mit dem Arme beweglichen Nonius abgelesen. Das Rohr enthält keine Linsen, die Beobachtungen werden mit blossem Auge ausgeführt, und an Stelle des Objectivs befindet sich ein schmaler verticaler Spalt, welcher das Gesichtsfeld beschränkt.

Ist der Schirm *MN* ganz gleichmässig durch eine Lichtquelle von hinten erleuchtet, und sieht man durch das Rohr auf die Glasplatte, so erblickt man gleichzeitig einen Theil des Schirmes durch die Platte hindurch und einen anderen Theil gespiegelt. An der Stelle, wo das gespiegelte Bild der einen horizontalen Nadel erscheint, sieht man nur das durchgelassene Licht des Schirmes, und an der Stelle, wo die andere Nadel im durchgehenden Lichte sichtbar ist, sieht man bloss das gespiegelte Licht des Schirmes. Man kann das Rohr so weit gegen die Glasplatte drehen, bis die beiden schwarzen Streifen, welche man nebeneinander auf dem gleichmässig hellen Untergrunde erblickt, gleich intensiv erscheinen; dann weiss man, dass bei dieser Stellung das gespiegelte und durchgelassene Licht gleich sind. Um nun empirisch feststellen zu können, wie sich die Quantitäten des reflectirten und durchgehenden Lichtes bei jedem beliebigen anderen Winkel zu einander verhalten (theoretisch liesse sich dies nach den Formeln von Fresnel und Neumann berechnen), benutzte Arago doppeltbrechende Krystallplatten, die in einer Hülse *K* und am Ende des Rohres bei *I* angebracht werden konnten, und bestimmte zunächst durch Versuche diejenigen Stellungen des Beobachtungsrohres, bei denen das reflectirte Licht das Vierfache, Doppelte, Halbfache, Viertel-fache des durchgehenden betrug. Durch Interpolation ergab sich dann eine Tabelle, aus der für jeden beliebigen Winkel das betreffende Helligkeitsverhältniss entnommen werden konnte. Mit einem derartig auf empirischen Wege kalibrirten Photometer liess sich nun das Helligkeitsverhältniss zweier beliebigen Lichtquellen ermitteln, wenn dieselben so aufgestellt waren, dass die erste nur die eine Hälfte des transparenten Schirmes, die zweite nur die andere Hälfte beleuchtete.

Weiter auf die Theorie dieses Instrumentes und die Vorsichtsmassregeln, welche bei seiner Anwendung erwünscht sind, einzugehen, dürfte schon aus dem Grunde überflüssig erscheinen, weil dasselbe ausser von Arago (und auch von diesem nur zur Prüfung der Polarisationsgesetze) niemals wieder benutzt worden ist und in der Himmelsphotometrie jedenfalls nur in ganz beschränktem Grade zur Verwendung kommen könnte.

Für die Lichtmessungen der Gestirne hat Arago eine ganze Reihe anderer Einrichtungen empfohlen, die fast alle später für die Construction von Photometern massgebend gewesen sind, von ihm selbst aber nur in

ganz wenigen Fällen zu wirklichen Beobachtungen am Himmel benutzt worden sind. Er hat zuerst auf die Wichtigkeit der Doppelbrechung im Kalkspath und Bergkrystall für die Photometrie hingewiesen und unter Anderem das Rochon'sche Prismenfernrohr (ein gewöhnliches astronomisches Fernrohr, bei welchem durch ein in der Nähe des Brennpunktes in den Strahlengang eingesetztes Rochon'sches Doppelprisma zwei Bilder eines Objectes hervorgerufen werden, deren Helligkeiten durch ein vor das Ocular gesetztes Nicolprisma beliebig verändert werden können) zur Vergleichung der centralen Partien der Sonnenscheibe mit den Randtheilen und zur Vergleichung des aschfarbenen Mondlichtes mit dem übrigen

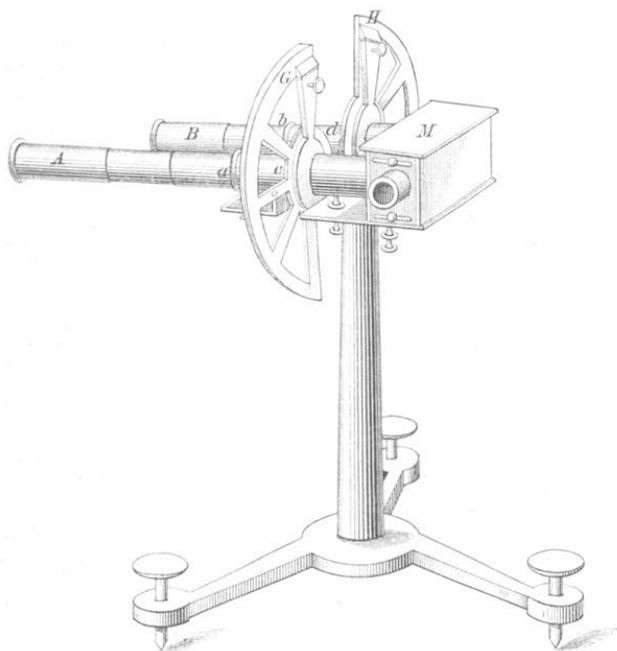


Fig. 55.

Mondlichte empfohlen. Von ihm rührt auch der Vorschlag her, das Licht der Sterne mit einem ganz ähnlichen Apparate in der Weise zu messen, dass man bei jedem Stern diejenige Stellung des Nicols bestimmt, bei welcher das eine Bild verschwindet.

Die Arago'schen Vorschläge sind ohne Zweifel für die Photometer von Bernard¹⁾ und Babinet²⁾ vorbildlich gewesen. Diese Instrumente sind zwar in erster Linie zu tech-

nischen Zwecken bestimmt worden; ihre Verwendung bei gewissen Aufgaben der Himmelsphotometrie scheint aber keineswegs ausgeschlossen. Bernard hat sein Photometer insbesondere zu Absorptionsuntersuchungen benutzt. Die Einrichtung desselben ist aus Figur 55 ersichtlich.

Die beiden Röhren *A* und *B*, welche an dem einen Ende durch Diaphragmen verschlossen sind, werden auf die zu vergleichenden Lichtquellen oder beleuchteten Flächen gerichtet. Im Innern dieser Röhren

1) Annales de chimie et de physique. Série 3, tome 35, p. 385.

2) Comptes Rendus. Tome 37, p. 774.

sind bei *a* und *b* zwei Nicolprismen fest eingesetzt, zwei andere Nicolprismen sind bei *c* und *d* beweglich angebracht, die Drehungen können an zwei getheilten Halbkreisen *G* und *H* abgelesen werden. In dem Kasten *M* sitzen zwei total reflectirende Prismen, welche das von den kleinen Diaphragmenöffnungen herkommende Licht nebeneinander in ein gemeinschaftliches Ocular werfen. Durch Drehung eines der beiden beweglichen Prismen oder auch beider lässt sich Intensitätsgleichheit herstellen, und durch Vertauschen der beiden Lichtquellen lassen sich die etwaigen Unterschiede der beiden optischen Systeme eliminiren. Das Cosinusquadratgesetz ermöglicht dann die Berechnung des Intensitätsverhältnisses. Wenn man die Diaphragmen an den Enden der Röhren durch Fernrohrobjective von gleicher Grösse ersetzte und vor denselben drehbar totalreflectirende Prismen anbrächte, so liesse sich das Bernard'sche Instrument, falls noch die Fernrohre in die Richtung Ost—West gestellt würden, in ähnlicher Weise, wie wir es später bei dem Pickering'schen Instrumente sehen werden, als Meridianphotometer am Himmel benutzen. Im Principe ganz ähnlich dem Bernard'schen Photometer sind die von Beer¹⁾ und Becquerel²⁾ construirten, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll.

Wesentlich anders ist das Babinet'sche, welches in erster Linie zur Vergleichung der Helligkeit von Gasflammen bestimmt war. Dasselbe (Fig. 56) besteht aus einer Röhre *AB*, in welche seitlich unter einem Winkel von etwa 60° eine zweite Röhre *CD* einmündet. Beide Röhren sind durch mattgeschliffene Glasplatten oder durch Diaphragmen mit messbar veränderlichen Öffnungen verschlossen. Bei *E* ist im Innern der Röhre *AB* ein Glasplattensatz *M* eingesetzt, welcher den Winkel der beiden Röhren halbirt. Die zu vergleichenden Lichtquellen befinden sich vor den Öffnungen *A* und *C*. Das bei *C* eindringende Lichtbündel wird nahe unter dem Polarisationswinkel von der Glassäule reflectirt und ist daher beinahe vollständig in der Einfallsebene polarisirt; dagegen besteht das durch die Glassäule hindurchgegangene, von *A* herkommende Licht-

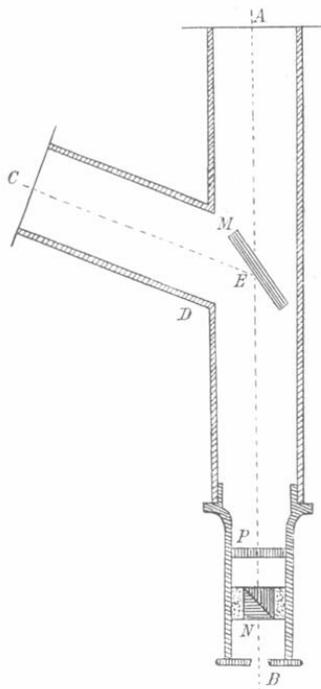


Fig. 56.

1) Pogg. Annalen. Bd. 86, p. 78.

2) Annales de chimie et de physique. Série 3, tome 62, p. 14.

bündel zum Theil aus natürlichem Lichte, zum Theil aus solchem, welches in einer zur Einfallsebene senkrechten Ebene polarisirt ist. Sind die beiden Lichtquellen gleich intensiv, so enthalten nach dem früher erwähnten Satze von Arago das reflectirte und das durchgelassene Lichtbündel gleiche Quantitäten von entgegengesetzt polarisirtem Lichte, und das aus beiden zusammengesetzte Doppellichtbündel *EB* verhält sich ganz wie natürliches Licht. Sind aber die Lichtquellen ungleich intensiv, so bleibt dieses Doppellichtbündel partiell polarisirt. In das Rohrende *B* ist ein Soleil'sches Polarisirkop eingeschoben, bestehend aus dem analysirenden Nicol *N* und einer davor befindlichen Doppelquarzplatte *P*, die aus zwei aneinander gekitteten Hälften zusammengesetzt ist, von denen die eine rechtsdrehend, die andere linksdrehend ist. Wenn auf ein solches Polarisirkop partiell oder vollständig polarisirtes Licht auffällt, so erscheinen die beiden Hälften des Bildes verschieden gefärbt, dagegen sind sie gleich gefärbt, falls das auffallende Licht natürliches ist. Bei Benutzung des Babinet'schen Photometers stellt man entweder durch Veränderung der Distanzen der Lichtquellen von der Eintrittsfläche oder durch Variirung der Diaphragmenöffnungen die gleiche Färbung der beiden Hälften im Polarisirkop her und kann daraus das Helligkeitsverhältniss der beiden Lichtquellen ermitteln.

b. Die Zöllner'schen Photometer.

Von den beiden Instrumenten, welche Zöllner in die Photometrie eingeführt hat, stammt das eine aus dem Jahre 1857¹⁾, das zweite, das bekannte Astrophotometer, ist zuerst in einer im Jahre 1861 erschienenen Abhandlung²⁾ beschrieben worden, die ursprünglich als Bewerbungsschrift für eine von der Akademie der Wissenschaften in Wien ausgeschriebene Preisaufgabe eingereicht war. Beide Instrumente sind dann nach wesentlichen Modificationen und Verbesserungen ausführlich in Zöllners »Photometrischen Untersuchungen« behandelt worden mit Berücksichtigung derjenigen Formen, die nachher im Grossen und Ganzen massgebend geblieben sind.

Das erste Instrument war ausser zu technischen Zwecken nur für die Beobachtung der allerhellsten Himmelskörper bestimmt und ist von Zöllner selbst zu seinen Lichtmessungen von Sonne und Mond verwendet worden. Es kommt dabei auf die Vergleichung der Helligkeit zweier unmittelbar aneinander grenzenden Flächen an, und es wird die durch Reflex hervorgerufene Polarisation verwerthet.

1) Pogg. Annalen. Bd. 100, p. 381.

2) Zöllner, Grundzüge einer allgemeinen Photometrie des Himmels. Berlin, 1861.

In einem Stativ *C* (Fig. 57) ist der Haupttheil des Apparates um die horizontale Axe *AB* drehbar und kann in jeder Zenithdistanz festgeklemmt werden. Eine Petroleumlampe *F* ist auf einem starken Arme befestigt und dreht sich im Azimuth zugleich mit dem ganzen Apparate um eine verticale Axe. Das Licht der Flamme *a* fällt durch ein Diaphragma *r* auf die Convexlinse *b*, tritt aus dieser parallel aus, gelangt auf den kleinen Silberspiegel *c*, von diesem auf den Polarisationspiegel *f* aus schwarzem Glase, dessen Normale mit der Axe *DE* den Polarisationswinkel für Glas einschliesst, und tritt endlich durch die Convexlinse *g* und das Nicolprisma *h* in das Auge bei *o*. Der Spiegel *f* steht so, dass die scharfe Kante das kreisförmige Gesichtsfeld halbirt, und wenn die Linse *g* auf diese Kante eingestellt ist, so erblickt man die eine Hälfte des Feldes durch das in der Ebene der Zeichnung polarisirte Licht der Flamme *a* beleuchtet. An dem Ende des Hauptrohres ist der ebenfalls aus schwarzem Glase gefertigte Polarisationspiegel *d* angebracht, und zwar so, dass seine Ebene senkrecht liegt

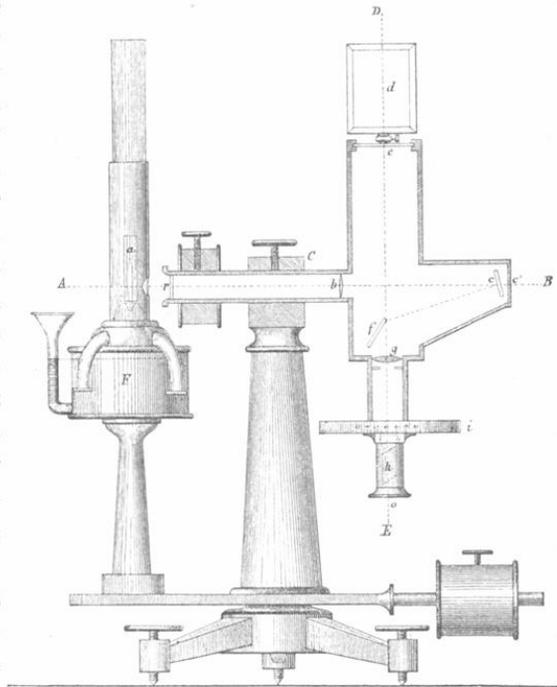


Fig. 57.

zu einer durch *DE* normal zur Zeichnungsfläche stehenden Ebene, und dass ausserdem die Normale zu diesem Spiegel mit der Axe *DE* den Polarisationswinkel bildet. Das von *d* reflectirte Licht einer Lichtquelle geht bei *f* vorbei und beleuchtet die zweite Hälfte des Gesichtsfeldes. Das Licht ist senkrecht zur Ebene der Zeichnung polarisirt und kann daher durch Drehung des Nicols *h* dem Lichte der Vergleichsflamme gleich gemacht werden. Die Berührung der beiden Hälften des Gesichtsfeldes ist so vollkommen, dass bei eintretender Gleichheit der Intensität das Gesichtsfeld als eine einzige leuchtende Scheibe erscheint. Das Quadrat

der Tangente des Drehungswinkels des Nicols, welcher an dem Kreise i abgelesen wird, giebt dann das Verhältniss der Helligkeit der beobachteten Lichtquelle zum Vergleichslichte. Um noch die bei den meisten Beobachtungen störende röthlichgelbe Färbung der von der Lampe erleuchteten Hälfte zu beseitigen, wird in den Blecheylinder der Lampe ein Stück blauen Kobaltglases eingesetzt, welches der Flamme einen gelblich-weissen Farbenton giebt. Handelt es sich um die Messung des Sonnenlichtes, so wird vor dem Spiegel d noch eine mattgeschliffene Glasplatte angebracht, um eine gleichförmige Erleuchtung zu erzielen; auch können bei e zur Schwächung des allzu intensiven Sonnenlichtes Blendgläser in den Strahlengang eingesetzt werden. Die Genauigkeit der Messungen ist bei diesem Apparate ausserordentlich gross. Nach Zöllner beträgt der wahrscheinliche Fehler einer einzelnen Vergleichung zweier Lichtquellen nur etwa 2—3 Procent des Helligkeitsverhältnisses. Sehr sorgfältig ist darauf zu achten, dass die zu untersuchenden Lichtquellen kein polarisirtes Licht enthalten, da sonst die Resultate erheblich verfälscht werden könnten.

In dieser Beziehung ist jede Gefahr ausgeschlossen bei dem zweiten Zöllner'schen Photometer, welches ausschliesslich zu Himmelsbeobachtungen bestimmt ist, und bei welchem die polarisirenden Medien nur zur Veränderung der Helligkeit der Vergleichsflamme benutzt werden. Die Form, welche Zöllner nach manchen Änderungen diesem Instrumente gegeben hat, ist durch Figur 58 illustriert.

Die Fernrohrlaxe AB wird durch Bewegung in Höhe und durch Drehung des ganzen Apparates im Azimuth auf das zu messende Himmelsobject gerichtet, und das in der Brennebene bei b entstehende Sternbild wird mit zwei in derselben Ebene durch die Petroleumlampe F entworfenen künstlichen Sternen gg verglichen. Zur Erzeugung der künstlichen Sterne dienen die verschiedenen in der seitlichen Axe CD angebrachten Medien. Bei o' ist eine feine Öffnung (in den neueren Instrumenten befindet sich an dieser Stelle eine drehbare Scheibe mit verschieden grossen Öffnungen, um den künstlichen Sternen beliebige Grösse geben zu können); durch diese Öffnung fällt das Licht der Lampe auf die Biconcavlinse m , welche die Bestimmung hat, das Bild der Öffnung zu verkleinern. Das Licht passirt dann das Nicolprisma k , die senkrecht zur Axe geschliffene Bergkrystallplatte l , ferner die beiden Nicolprismen i und h und wird dann durch die Sammellinse f auf die planparallele Glasplatte ee' geworfen und endlich zu zwei punktförmigen Bildern (durch Reflex an der vorderen und hinteren Glasfläche) gg vereinigt. Die Bilder werden mit dem schwach vergrössernden Oculare o betrachtet. Um gleichzeitig die wirklichen und die künstlichen Sterne scharf einstellen

zu können, war bei den älteren Formen des Zöllner'schen Photometers die Convexlinse f verschiebbar; diese Verschiebung gestattete die Pointirung auf die künstlichen Sterne, nachdem der wirkliche Stern mittelst des Oculares o eingestellt war. Bei den neueren Formen des Apparates wird meistens das Objectiv O durch Trieb verstellbar eingerichtet und die Convexlinse f bleibt unverändert. Das letzte Nicolprisma h sitzt in dem seitlichen Rohre fest, und da das austretende polarisirte Licht von

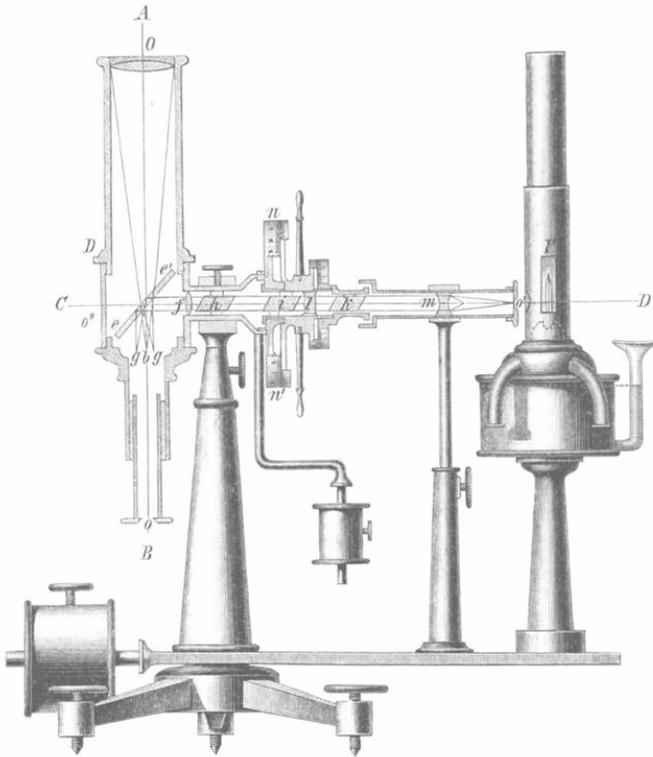


Fig. 58.

der Glasplatte zurückgeworfen wird, so ist zur Erzielung des grössten Lichteffectes erforderlich, dass der Hauptschnitt dieses Prismas in der durch die Figur repräsentirten Schnittebene liegt, eine Vorschrift, die nicht immer genügend beachtet wird. Die beiden Nicolprismen i und h mit der zwischen ihnen befindlichen Bergkrystallplatte sind gegen das feste Prisma h drehbar, und die Drehung kann an zwei Nonien n und n' abgelesen werden. Der mitgehende getheilte Kreis, der Intensitätskreis, wird am besten in jedem der vier Quadranten von 0° bis 90°

getheilt, und die Stellung von i wird so regulirt, dass bei der Ablesung 0° gar kein Licht auf die Glasplatte fällt; dann wird bei irgend einer anderen Ablesung die Helligkeit des künstlichen Sternes nach dem Malus'schen Gesetze proportional dem Quadrate des Sinus des abgelesenen Winkels. In der Figur ist die Biconcavlinse m auf einer besonderen Säule montirt und bleibt sowohl bei Bewegung des ganzen oberen Instrumenttheiles mit dem Fernrohre AB , als auch bei der Drehung des Intensitätskreises fest vor der Lampenöffnung stehen. Bei den meisten neueren Apparaten bleibt die Säule weg; die Linse, sowie die Diaphragmenscheibe sitzen in dem seitlichen Rohre und nehmen an der Drehung des Intensitätskreises Theil. Die Bergkrystallplatte l und das Nicolprisma k haben den Zweck, den künstlichen Sternen eine beliebige Färbung zu geben. Das Prisma k ist nämlich für sich (gewöhnlich zusammen mit m und o') gegen die anderen polarisirenden Medien drehbar, und der Winkel, den der Hauptschnitt von k mit demjenigen von i bildet, kann mittelst der Indices e und e' an einem getheilten Kreise, dem Colorimeterkreise, abgelesen werden. Ist dieser Winkel bekannt, und nimmt man eine bestimmte Dicke der Bergkrystallplatte an (man wählt gewöhnlich 5 mm), so ist die Farbe des Sternes unzweideutig charakterisirt. Die ganze Einrichtung dient in erster Linie dazu, die Farbe der künstlichen Sterne möglichst der der wirklichen Sterne gleich zu machen, sie kann aber auch zu directen Farbenmessungen der Gestirne benutzt werden. Will man auf den letzteren Zweck von vornherein verzichten, so wäre es einfacher, l und k ganz fortzulassen und dafür ein geeignetes blaues Glas in den Gang der von der Lampe kommenden Strahlen einzuschalten, welches den künstlichen Sternen eine mittlere Sternfarbe giebt. Die mechanische Ausführung des Apparates würde dadurch erheblich vereinfacht werden.

Es ist übrigens merkwürdig, dass ausser Zöllner Niemand ernstlich versucht hat, das Colorimeter zu umfangreicheren Farbenmessungen am Himmel zu verwenden. Die hervorgebrachten Farben sind zwar eigenthümliche Mischfarben; sie gehen von röthlich Violett schnell in Blau über, dann etwas langsamer durch grünliche Nüancen nach Hellgelb und dann sehr allmählich durch die verschiedenen Stufen des Gelb nach Orange und Purpurroth. Die Farbe der am Himmel am meisten verbreiteten weisslichen und gelblichweissen Sterne lässt sich überhaupt nicht vollständig herstellen; dagegen finden sich für alle gelblichen, gelben und röthlichen Sterne entsprechende Farben am Colorimeter, und es würde zweifellos eine höchst verdienstliche und lohnende Arbeit sein, an solchen Sternen, zu denen auch die meisten Veränderlichen gehören, ausgedehnte Farbenmessungen mit dem Zöllner'schen Colorimeter anzustellen. Das

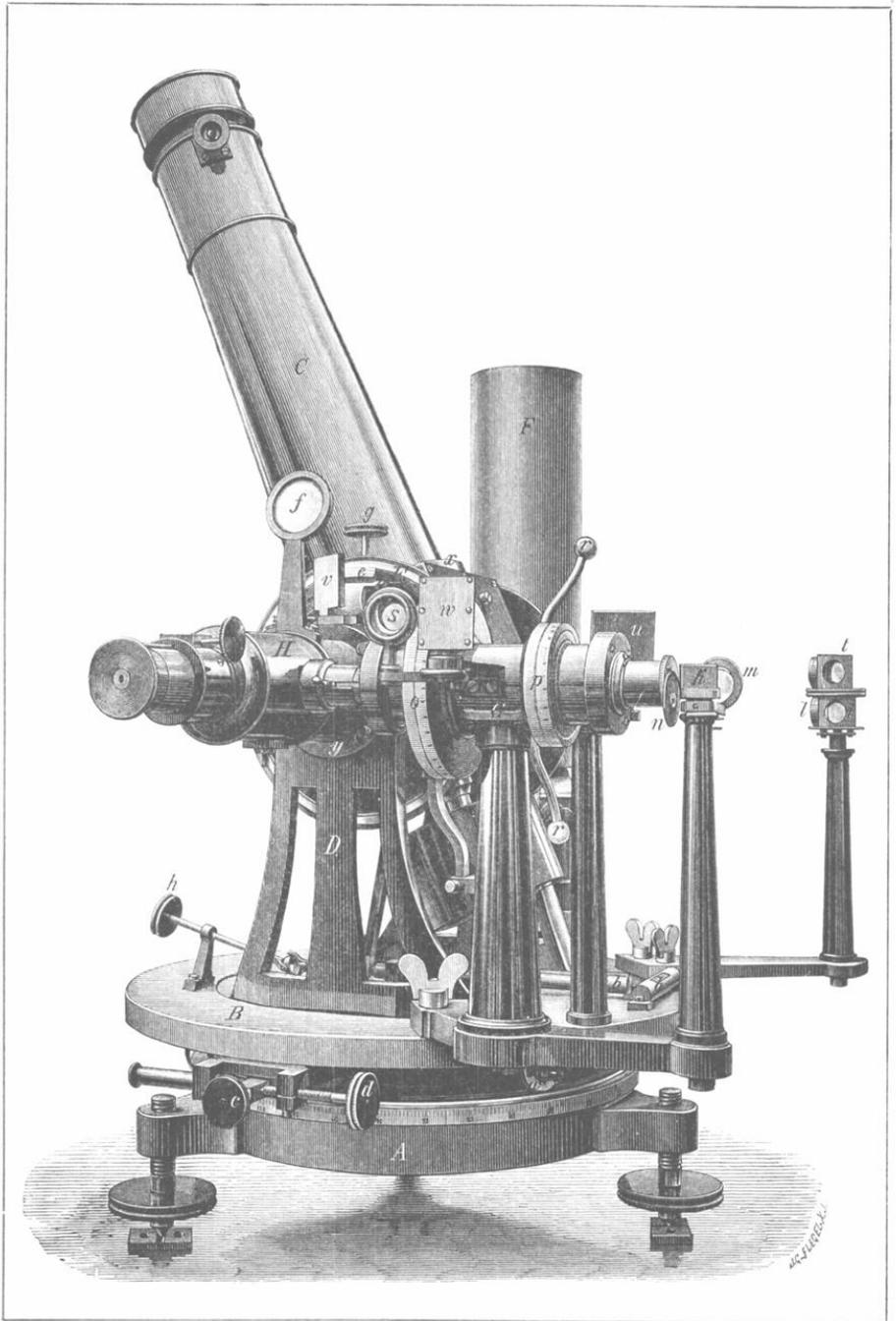


Fig. 59.

Colorimeter kann noch zu einer interessanten Untersuchung über die Beurtheilung der Gleichheit verschieden gefärbter Sterne benutzt werden. Man richtet das Fernrohr auf irgend einen Stern am Himmel, giebt den künstlichen Sternen durch Einstellen auf bestimmte Striche des Colorimeterkreises verschiedene Farben und stellt die Gleichheit am Intensitätskreise her. Durch Vergleichung der von verschiedenen Beobachtern auf diese Weise erhaltenen sogenannten Intensitätstabellen ist es möglich, ein Urtheil über die Farbauffassung derselben zu gewinnen. Wie eine von mir gegebene Zusammenstellung¹⁾ zeigt, kommen, mit Ausnahme bei den allerextremsten Farben, keine sehr merklichen Auffassungsunterschiede vor.

Zur Vervollständigung der Beschreibung der alten Form des Zöllner'schen Photometers ist noch zu bemerken, dass der obere Theil des Fernrohrs bei *D* abgeschraubt und nach Bedarf durch Objective von längerer oder kürzerer Brennweite ersetzt werden kann. Ferner muss vor das Ocular *o* bei den meisten Beobachtungen, um die unbequeme Lage des Kopfes zu vermeiden, ein total reflectirendes Prisma gesetzt werden, was leider die Sicherheit der Messungen ein wenig beeinträchtigt.

Figur 59 stellt ein auf der Potsdamer Sternwarte befindliches Zöllner'sches Photometer dar, bei welchem der zuletzt erwähnte Übelstand vermieden ist. Dasselbe hat die Form eines Passageninstrumentes; der Beobachter blickt daher stets in horizontaler Richtung in das Fernrohr. Die Lampe befindet sich nicht unmittelbar vor der Diaphragmenöffnung, sondern steht dem Ocular gegenüber auf dem festen im Azimuth drehbaren Untergestelle *B*. Das Licht gelangt durch Reflex an den total reflectirenden Prismen *i* und *k* in den seitlichen Theil *G* des Photometers, welcher die drei Nicolprismen mit der Bergkrystallplatte enthält. Zwei Linsen *l* und *m*, welche in den Gang der Lichtstrahlen eingefügt sind, sammeln das Licht und entwerfen auf der Diaphragmenscheibe *n* ein scharfes rundes Lichtbildchen. Was die Handhabung dieses Apparates noch mehr erleichtert, ist der Umstand, dass alle Kreise von der Photometerlampe selbst mit Hülfe des total reflectirenden Prismas *t* und der Spiegel *u*, *v* und *w* beleuchtet werden, so dass die Einstellungen und Ablesungen ohne Beobachtungslampe ausgeführt werden können. Das grosse Objectiv von 67 mm Öffnung und 700 mm Brennweite lässt sich mit zwei kleineren (36.5 mm Öffnung und 350 mm Brennweite, resp. 21.5 mm Öffnung und 137 mm Brennweite) vertauschen, die an den in der Figur mit *x* und *y* bezeichneten Stellen eingesetzt werden können. Auf diese Weise ist es möglich, mit dem

1) Publ. des Astrophys. Obs. zu Potsdam. Bd. 3, p. 245.

Apparate Sterne von der siebenten Grösse bis zu den allerhellsten zu beobachten und auch die grossen Planeten in den Messungsbereich zu ziehen, da diese mit dem kleinsten Objective durchaus punktförmig erscheinen¹⁾.

Um auch die schwächsten Sterne beobachten zu können, hatte bereits Zöllner eine Einrichtung getroffen, die gestattete, sein Photometer mit jedem beliebigen Refractor in Verbindung zu bringen. Eine dafür sehr geeignete handliche Form des Apparates, welche in Potsdam benutzt wird, ist in Figur 60 dargestellt.

In dem Ringe *A*, welcher an Stelle des Oculars an den Refractor angeschraubt wird, dreht sich das Photometer frei, so dass die Axe *CD* bei

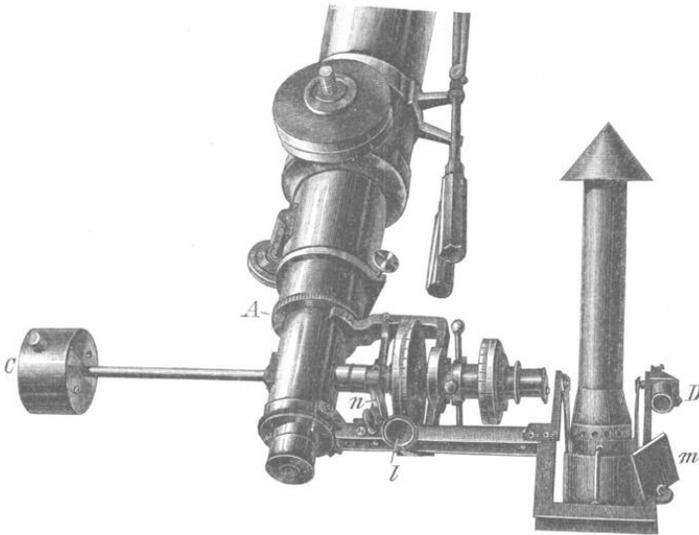


Fig. 60.

jeder Stellung des Fernrohrs horizontal bleiben und die bewegliche Lampe genau vertical hängen kann. Auch hier ist es so eingerichtet, dass das Licht der Flamme zur Beleuchtung des Intensitätskreises benutzt wird, indem dasselbe mittelst des Prismas *D* und der Spiegel *m* und *n* auf die Theilung geworfen wird; die Ablesung geschieht mit Hilfe der schwach vergrössernden Lupe *l*.

Beachtenswerth ist ein Vorschlag, den Ceraski²⁾ gemacht hat, um ohne Vertauschen der Objective sowohl schwache als auch sehr helle Sterne beobachten zu können. Ceraski bringt in der Axe *CD* (Figur 58)

1) Eine ausführliche Beschreibung des Apparates findet sich in den Publ. des Astrophys. Obs. zu Potsdam, Bd. 8, p. 17.

2) Annales de l'Obs. de Moscou. Série 2, Vol. I, livr. 2, p. 13. — Siehe auch Astr. Nachr. Bd. 120, Nr. 2870.

an dem der Lampe entgegengesetzten Ende ungefähr bei o'' ein zweites Ocular an, mit welchem der künstliche Stern direct gesehen werden kann, während die wirklichen Sterne von der Glasplatte ee' in das Ocular reflectirt werden. Da der Lichtverlust bei der Reflexion unter 45° etwa 3 bis 4 Grössenklassen beträgt, so kann man mit Hilfe des doppelten Oculars ein sehr beträchtliches Helligkeitsintervall durchmessen.

Über den Gebrauch des Zöllner'schen Photometers und die mit demselben zu erreichende Genauigkeit mögen noch einige Bemerkungen Platz finden. Gewisse Vorurtheile haben dem Instrumente nicht diejenige Verbreitung verschafft, welche es ohne Zweifel verdient. Man macht ihm hauptsächlich die Benutzung des künstlichen Vergleichslichtes zum Vorwurfe. Zöllner hatte sich anfangs bemüht, den künstlichen Sternen durch Construction einer besonderen Gaslampe constante Helligkeit zu geben, um so zu verschiedenen Zeiten und an verschiedenen Orten angestellte Messungen direct miteinander vergleichbar zu machen. Die Einrichtung erwies sich jedoch als viel zu complicirt, und Zöllner führte daher eine einfache Petroleumlampe ein, deren Flamme auf eine durch ein Diopter bestimmte Höhe eingestellt wurde. Auch heute bedient man sich noch ausschliesslich dieses Hilfsmittels. Man kann freilich nicht erwarten, dass auf diese Weise die künstlichen Sterne lange Zeit hindurch constante Helligkeit besitzen. Dies wird, abgesehen von anderen Umständen, dadurch unmöglich gemacht, dass sich an der die Cylinderöffnung abschliessenden Glasplatte Russtheilchen und an den Öffnungen der Diaphragmenscheibe Staubpartikelchen ansetzen, welche allmählich die Helligkeit verringern. Zöllner hat zwar bei seinen Vergleichen von Sonnen- und Mondlicht viele Wochen hindurch die unveränderte Intensität der Lampe zu constatiren vermocht und infolge dessen die Messungen unbedenklich auf die Lampenhelligkeit als Einheit bezogen. Indessen dürfte dieses Beispiel doch nicht nachahmenswerth sein, und man sollte es sich zur strengen Regel machen, die künstlichen Sterne stets nur als Verbindungsglied zu benutzen und lediglich Differenzmessungen am Himmel anzustellen. Alle Beobachter, die sich eingehend mit dem Zöllner'schen Photometer beschäftigt haben, stimmen darin überein, dass an ein und demselben Beobachtungsabende die Lampe stundenlang vollkommen gleichmässig brennt, namentlich wenn man die nöthigen Vorsichtsmassregeln nicht ausser Acht lässt, nämlich erstens Flachbrenner (nicht Rundbrenner) benutzt, zweitens für sorgfältige Reinhaltung des Doctes sorgt und endlich nur das beste Petroleum verwendet. Ceraski¹⁾ hat ausführliche Untersuchungen über diesen Gegenstand angestellt, insbesondere den

1) Annales de l'obs. de Moscou. Série 2, Vol. I, livr. 2, p. 13.

wirksamsten Theil der Flamme bestimmt und Einrichtungen zur genauen Einstellung auf denselben empfohlen; er findet, dass bei gehöriger Vorsicht die Flamme 10 Stunden lang constant bleibt. Nach meinen eigenen Erfahrungen halte ich es, auch wenn man nicht besondere Vorsicht anwendet, für durchaus unbedenklich, sich ein bis zwei Stunden lang auf die Constanz der Lampe zu verlassen. Längere Zeit wird bei zweckmässiger Anordnung der Beobachtungen kaum erforderlich sein. Empfehlenswerth ist es, vor Beginn der Beobachtungen die Lampe erst einige Zeit (vielleicht 10 bis 15 Min.) brennen zu lassen, weil sich die Helligkeit bald nach dem Anzünden gewöhnlich etwas ändert. Eine grosse Gefahr ist das durch Wind und Luftzug hervorgebrachte Flackern der Flamme, welches namentlich das Beobachten im Freien wesentlich erschwert. Man kann sich zwar durch zweckmässige Construction der Blecheylinder, wie es bei den Potsdamer Photometern geschehen ist, theilweise dagegen schützen, es würde aber eine wesentliche Verbesserung des Apparates erzielt werden können, wenn es gelänge, anstatt der Petroleumlampe das elektrische Licht nutzbar zu machen. Bei der gegenwärtig erreichten grossen Vervollkommnung der elektrischen Beleuchtungseinrichtungen und nach den Erfahrungen, die z. B. in jüngster Zeit in Bezug auf die constante Helligkeit der Glühlampen in der technischen Reichsanstalt in Charlottenburg gemacht worden sind¹⁾, erscheint die Sache keineswegs aussichtslos, und es kann nicht dringend genug zu Versuchen in dieser Richtung aufgefordert werden.

Ein zweiter Einwurf gegen die Benutzung der künstlichen Sterne beim Zöllner'schen Photometer, der viel schwieriger als der Vorwurf nicht genügend gleichmässiger Lichtintensität zurückzuweisen ist, bezieht sich auf das nicht vollkommen gleichartige Aussehen der wirklichen und der künstlichen Sterne. Hier liegt wirklich ein Mangel vor. Denn die Bilder der künstlichen Sterne sind kleine scharf begrenzte runde Scheibchen von etwas mattem Aussehen, die sich von den strahlenförmigen Sternbildern auf den ersten Blick unterscheiden, besonders auffallend dann, wenn die letzteren durch starke Luftunruhe in wallende Bewegung versetzt werden. Es gehört eine ziemlich lange Übung dazu, bevor das Auge sich an das verschiedene Aussehen gewöhnt und das Gefühl der Unsicherheit verloren hat, und die Gefahr ist niemals ganz ausgeschlossen, dass bei directer Vergleichung sehr heller und sehr schwacher Sterne Auffassungsfehler ins Spiel kommen. Von der grössten Wichtigkeit ist daher die Wahl der Diaphragmenöffnung, die sich stets nach der speciellen Aufgabe, die man im Auge hat, richten sollte. Man wird am Besten

1) Zeitschr. f. Instrumentenkunde. Jahrg. 40 (1890), p. 119.

eine solche Öffnung benutzen, dass die Bildgrösse der künstlichen Sterne etwa in der Mitte liegt zwischen den Bildgrössen der hellsten und der schwächsten Sterne, die man beobachten will. Je grösser die zu messende Helligkeitsdifferenz ist, desto mehr wird sich die Verschiedenheit des Aussehens geltend machen, und es ist bedauerlich, dass der dadurch herbeigeführte Fehler die Resultate stets in einem bestimmten Sinne beeinflusst. Man misst die schwachen Sterne verhältnissmässig zu hell und die hellen verhältnissmässig zu schwach, und die Folge davon ist, dass man im Allgemeinen ein bestimmtes Helligkeitsintervall mit dem Zöllner'schen Photometer zu klein findet. Um diesem Mangel nach Möglichkeit abzuhelpen, ist es streng zu vermeiden, grosse Helligkeitsdifferenzen direct zu messen. In dieser Beziehung ist etwa ein Helligkeitsintervall von drei Grössenklassen als Grenze anzusehen, und es sollte als Regel gelten, wenn es irgend angeht, nur Ablesungen zwischen 10^0 und 40^0 am Intensitätskreise zu benutzen. Wenn es erforderlich ist, grössere Unterschiede zu messen, so ist es entschieden rathsam, das Intervall zu theilen und verschiedene Objective und Diaphragmenöffnungen, eventuell auch Blendgläser, zu verwenden und zur Übertragung Sterne von mittlerer Helligkeit zu benutzen. Bei einiger Übung lernt man sehr bald die geeignetsten Vorsichtsmassregeln kennen, um den gefährlichen Einfluss des verschiedenartigen Aussehens, wenn nicht ganz zu beseitigen, so doch auf ein Minimum zu beschränken.

Infolge der Reflexion von der Vorder- und Rückfläche der Glasplatte sieht man, wie schon erwähnt, im Zöllner'schen Photometer zwei künstliche Sterne, deren Distanz von der Dicke der Glasplatte abhängt, und von denen der eine etwas schwächer als der andere ist. Da sie nicht gleichzeitig scharf erscheinen, so benutzt man zur Vergleichung gewöhnlich nur den helleren und betrachtet den anderen nur nebenbei zur Controle. Die meisten Beobachter bringen den wirklichen Stern in eine bestimmte Stellung zu dem künstlichen, und zwar möglichst nahe an denselben heran. Es ist aber vielleicht besser, die beiden Bilder in verschiedenen Positionswinkeln zu vergleichen, damit nicht stets dieselben Stellen auf der Netzhaut von ihnen eingenommen werden. Bei der photometrischen Durchmusterung in Potsdam wird so beobachtet, dass der wirkliche Stern der Reihe nach links, oben, rechts und unten neben den künstlichen gebracht und gleichzeitig auch mit den vier Quadranten des Intensitätskreises abgewechselt wird. Letzteres Verfahren ist deswegen erwünscht, weil auf diese Weise der Indexfehler des Intensitätskreises und der Excentricitätsfehler der Nicolprismen eliminirt wird.

Was die Sicherheit der Messungen mit dem Zöllner'schen Photometer anbetrifft, so ist zunächst klar, da die Helligkeit sich proportional

dem Quadrate des Sinus des Drehungswinkels der Nicolprismen ändert, dass der wahrscheinliche Fehler einer einzelnen Einstellung, in Winkelwerth ausgedrückt, bei kleinen Ablesungen des Intensitätskreises viel geringer sein muss als bei grossen. Wenn man aber den wahrscheinlichen Fehler in Helligkeitslogarithmen oder in Grössenklassen ausdrückt, so zeigt sich, dass die Genauigkeit der Einstellung bei den meisten Beobachtern fast über die ganze Ausdehnung des Intensitätskreises von etwa 5° bis 50° nahezu dieselbe ist; nur Lindemann¹⁾ kommt zu dem Resultate, dass bei grösseren Einstellungen am Intensitätskreise, also im Allgemeinen bei Beobachtung hellerer Sterne, die Messungen am sichersten sind. Als wahrscheinlichen Fehler einer einzelnen Einstellung am Photometer findet man im Durchschnitt bei einer grossen Zahl von geübten Beobachtern ± 0.092 Grössenklassen und mithin für einen Mittelwerth aus vier Einstellungen ± 0.046 Grössenklassen. Berechnet man aber für eine an verschiedenen Abenden gemessene Helligkeitsdifferenz zweier Sterne den wahrscheinlichen Fehler eines Abends, so findet man, allerdings nur in besonders günstigen Fällen, wenn z. B. die Sterne nahe bei einander stehen und in Farbe nicht wesentlich verschieden sind, den Werth ± 0.06 Grössenklassen oder etwa 6 Procent des Helligkeitsverhältnisses. Diese Genauigkeitsgrenze ist bisher mit keinem anderen Sternphotometer überschritten worden und wird wohl auch schwerlich bei Messungen am Himmel übertroffen werden können, weil die von Tag zu Tage, ja von Stunde zu Stunde schwankenden Durchsichtigkeitsverhältnisse der Atmosphäre und die Unsicherheit der Extinctionscorrectionen unüberwindliche Hindernisse in den Weg stellen, die um so stärker einwirken, je weiter die zu vergleichenden Sterne am Himmel voneinander entfernt sind.

c. Die Wild'schen Photometer.

Man rühmt den von Wild zu Helligkeitsmessungen construirten Apparaten allgemein eine Empfindlichkeit nach, wie sie bei keinem anderen Photometer erreicht worden ist, und es dürfte schon aus diesem Grunde gerechtfertigt erscheinen, dieselben hier zu erwähnen, obgleich sie bisher in der Astrophotometrie nicht benutzt worden sind und auch künftig höchstens zu Messungen der allerhellsten Himmelsobjecte Verwendung finden könnten. Eine kurze Beschreibung möge hier genügen. In Betreff der ausführlichen, etwas complicirten Theorie muss auf die Abhand-

1) Observations de Poulkova. Supplément II, p. 118.

lungen von Wild¹⁾ und die neueren Arbeiten von Möller²⁾ verwiesen werden, welcher auch einige Abänderungen an den Apparaten vorgeschlagen hat.

Von den beiden verschiedenen Formen des Wild'schen Photometers beruht die erste (Fig. 61) auf einer Idee von Neumann³⁾ und ähnelt im Principe dem oben beschriebenen Babinet'schen Photometer.

Die zu vergleichenden Lichtquellen senden ihr Licht durch die kurzen Röhren *A* und *B*. Die von *A* kommenden Strahlen fallen unter dem Polarisationswinkel auf eine in dem Rahmen *C* befindliche, senkrecht stehende planparallele Glasplatte, werden von dort auf eine im Rahmen *D* sitzende mit *C* parallele Glasplattensäule reflectirt und von dort in die Beobachtungsröhre *E* zurückgeworfen. Diese Strahlen sind vollständig in der Horizontalebene polarisirt. Die aus *B* kommenden Strahlen gehen zunächst durch einen im Rahmen *F* befestigten Glassatz, dann durch die Glasplattensäule in *D* und treten zugleich mit den reflectirten in *E* ein. Ein Theil des durchgehenden Lichtes bleibt unpolarisirt, ein Theil ist in der Verticalebene polarisirt, und die Intensität des letzteren ändert sich mit dem

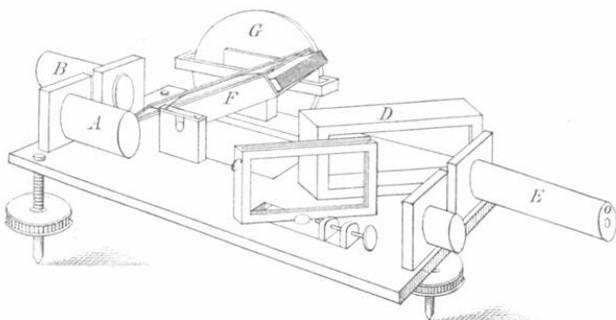


Fig. 61.

Winkel, den der Glassatz in *F* mit der Horizontalebene bildet und der an einer Kreistheilung auf der Scheibe *G* abgelesen werden kann. In der Beobachtungsröhre *E* ist ein Polariskop, bestehend aus einer senkrecht zur Axe geschliffenen Kalkspathplatte und einem Turmalin, angebracht. Wenn nun die Quantitäten entgegengesetzt polarisirten Lichtes in den beiden sich vermischenden Strahlenbündeln gleich sind, so erblickt das Auge in *o* Nichts von der sonst sichtbaren Interferenzerscheinung. Man kann aber durch Drehung des Rahmens *F* stets erreichen, dass die Interferenzfarben verschwinden, und da mit Hülfe der Neumann'schen Formeln für jede Stellung von *F* die Menge des in *E* eintretenden, in der Verticalebene polarisirten Lichtes in Theilen der ursprünglichen von *B*

1) Pogg. Annalen. Bd. 99, p. 235 und Bd. 118, p. 193. — Ausserdem Bull. de l'Acad. Imp. des sciences de St. Pétersb. Vol. 28, p. 392.

2) Wiedem. Annalen. Bd. 24, p. 266 und p. 446.

3) Neumann, Vorles. über theor. Optik; herausg. von Dorn. Leipzig, 1885, p. 152.

herkommenden Lichtmenge ausgedrückt werden kann, ebenso ein für alle Male die Menge des von A kommenden in der Horizontalebene polarisirten Lichtes, so lässt sich das ursprüngliche Helligkeitsverhältniss der beiden Lichtquellen berechnen.

Die Complicirtheit der zur Berechnung erforderlichen Formeln und der Umstand, dass wegen des erheblichen Lichtverlustes bei der zweimaligen Reflexion nur die Vergleichung von verhältnissmässig intensiven Lichtquellen möglich war, veranlasste Wild zur Construction seines zweiten Photometers, bei welchem die Doppelbrechung zur Benutzung kommt. Die Anordnung des Apparates geht aus der schematischen Zeichnung (Fig. 62) hervor.

A_1 und A_2 sind zwei total reflectirende Prismen, auf welche das Licht der zu vergleichenden Lichtquellen auffällt. Die aus der Nähe der

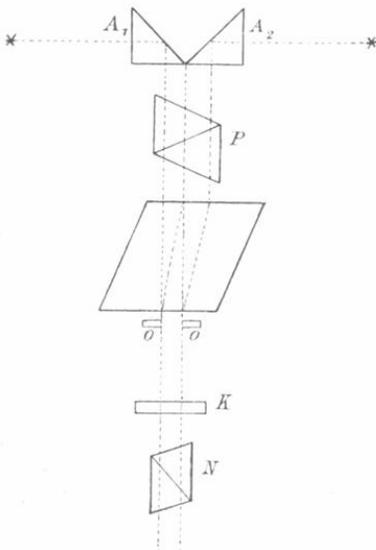


Fig. 62.

Trennungslinie der Prismen herkommenden beiden Strahlenbündel werden zunächst durch das Nicolprisma P polarisirt und fallen dann senkrecht auf die vordere Begrenzungsfläche eines Kalkspathrhomboëders. An der Austrittsfläche dieses Rhomboëders ist ein Diaphragma O angebracht von solchen Dimensionen, dass vom Prisma A_2 nur die ordentlich gebrochenen, vom Prisma A_1 nur die ausserordentlich gebrochenen Strahlen austreten können. Das vereinigte Strahlenbündel geht dann durch ein Savart'sches Polarisoskop, bestehend aus einer Krystallplatte K und einem analysirenden Nicol N . Die Interferenzstreifen verschwinden, wenn das aus O austretende vereinigte Strahlenbündel gleich grosse Mengen senkrecht zu einander polarisirten Lichtes

enthält. Nach dem Malus'schen Gesetze ist dies aber der Fall, wenn man für die ursprünglichen Lichtintensitäten J_1 und J_2 die Relation hat:

$$\frac{J_1}{J_2} = C \tan^2 \varphi,$$

wo φ der Winkel ist, den der Hauptschnitt von P mit dem Hauptschnitte des Kalkspathrhomboëders bildet. Die Grösse C , welche nach der Neumann'schen Theorie berechnet werden kann und bei strenger Gültigkeit des Malus'schen Gesetzes gleich 1 sein sollte, lässt sich experimentell durch Vergleichung zweier gleich intensiven Lichtquellen bestimmen.

Möller hat den Apparat in der Weise abgeändert, dass er das Polariskop fortgelassen und den Gang der Strahlen so eingerichtet hat, dass die beiden aus dem Kalkspathrhomboëder austretenden Lichtbündel nicht zusammenfallen, sondern in einer scharfen Trennungslinie aneinander grenzen. Anstatt des Polariskops wird ein kleines Fernrohr benutzt, welches in der Brennebene mit einem Diaphragma versehen ist, um das Gesichtsfeld bis auf die beiden erleuchteten Felder abzublenden. Die Gleichheit der Helligkeit dieser Felder wird dann durch Drehung des Prismas P hergestellt, und das Quadrat der Tangente des Drehungswinkels giebt das gesuchte Intensitätsverhältniss.

d. Das Chacornac'sche Sternphotometer.

Im Jahre 1864 hat Chacornac¹⁾ der Pariser Akademie eine Methode zur Helligkeitsvergleichung zweier Sterne vorgeschlagen, die, wenn auch umständlich und nicht sehr genau, doch von einigem Interesse ist. Ein parallaktisch montirtes Fernrohr wird auf den einen der zu vergleichenden Sterne gerichtet, und der zweite Stern wird, ähnlich wie bei dem Hornstein'schen Zonenphotometer, mit Hülfe eines Spiegels in das Gesichtsfeld gebracht, der in einer Ringfassung um den Objectivrand drehbar ist und ausserdem beliebig gegen die Ebene des Objectivs geneigt werden kann. Die eine Hälfte desselben erhält Licht von dem reflectirten, die andere von dem direct eingestellten Stern. Durch die Dimensionen des Spiegels ist der Anwendungsbereich des Apparates etwas eingeschränkt. Bei dem Chacornac'schen Arrangement konnten nur Sterne miteinander verglichen werden, deren Winkeldistanz am Himmel zwischen 20° und 160° betrug. Das Licht beider Sterne geht durch ein in der Nähe des Oculars befindliches doppeltbrechendes Prisma und wird mit Hülfe eines zwischen Ocular und Auge drehbar angebrachten Nicols analysirt. Bildet der Hauptschnitt des Nicols mit dem Hauptschnitt des doppeltbrechenden Prismas den Winkel φ , und ist J_1 die Intensität des direct gesehenen Sternes, so werden die beiden Bilder desselben nach dem Malus'schen Gesetze die Helligkeiten haben:

$$(1) \quad \begin{cases} J'_1 = \frac{1}{2}zJ_1 \sin^2 \varphi, \\ J''_1 = \frac{1}{2}zJ_1 \cos^2 \varphi, \end{cases}$$

wo z den Schwächungscoefficienten beim Durchgange des Lichtes durch beide polarisirenden Prismen repräsentirt.

Für den reflectirten Stern ist die Berechnung der Helligkeiten etwas schwieriger, weil bei der Reflexion ein Theil des Lichtes polarisirt wird.

1) Comptes Rendus. Tome 58, p. 657.

Die ursprüngliche Lichtstärke des zweiten Sternes sei J_2 . Ein gewisser Procentsatz Licht geht von vornherein bei der Zurückwerfung verloren. Bezeichnen wir den Reflexionscoefficienten des Spiegels mit k , so gelangt auf das doppeltbrechende Prisma von dem zweiten Stern die Lichtmenge kJ_2 . Dieselbe setzt sich aus zwei Theilen zusammen, einer Quantität in der Einfallsebene polarisirten Lichtes, die wir kL_2 nennen wollen, und einer Quantität natürlichen Lichtes, die demnach gleich $k(J_2 - L_2)$ ist. Es bilde zunächst die Einfallsebene mit dem Hauptschnitte des doppeltbrechenden Prismas den Winkel ω ; dann erhält man für die beiden im Gesichtsfelde sichtbaren Bilder des reflectirten Sternes die Intensitäten:

$$\begin{aligned} J'_2 &= zk \left[\frac{1}{2}(J_2 - L_2) + L_2 \cos^2 \omega \right] \sin^2 \varphi, \\ J''_2 &= zk \left[\frac{1}{2}(J_2 - L_2) + L_2 \sin^2 \omega \right] \cos^2 \varphi. \end{aligned}$$

Zur Vereinfachung kann man das doppeltbrechende Prisma so drehen, dass sein Hauptschnitt mit der Einfallsebene zusammenfällt. Dann ist $\omega = 0$, und man hat, wenn der Winkel zwischen den Hauptschnitten des doppeltbrechenden Prismas und des Nicols wieder φ heisst, für die beiden Bilder die Intensitäten:

$$(2) \quad \begin{cases} J'_2 = \frac{1}{2}zk(J_2 + L_2) \sin^2 \varphi, \\ J''_2 = \frac{1}{2}zk(J_2 - L_2) \cos^2 \varphi. \end{cases}$$

Durch Drehung des analysirenden Nicols lässt sich, wenn man die zu vergleichenden Bilder der beiden Sterne nahe aneinander gebracht hat, die Gleichheit von J'_1 und J''_2 herstellen. Ist der betreffende Drehungswinkel φ_1 , so hat man:

$$J_1 \sin^2 \varphi_1 = k(J_2 - L_2) \cos^2 \varphi_1.$$

Ebenso kann man die beiden Bilder des reflectirten Sternes durch Drehung des Nicols gleich machen. Heisst der hierbei abgelesene Drehungswinkel α_1 , so ergibt sich:

$$(J_2 + L_2) \sin^2 \alpha_1 = (J_2 - L_2) \cos^2 \alpha_1.$$

Aus den beiden letzten Formeln erhält man durch Elimination von L_2 die Gleichung:

$$(3) \quad \frac{J_1}{J_2} = 2k \sin^2 \alpha_1 \cot^2 \varphi_1.$$

Hieraus würde man unmittelbar das gesuchte Helligkeitsverhältniss der beiden Sterne erhalten, wenn der Reflexionscoefficient des Spiegels bekannt wäre. Ist dies nicht der Fall, so kann man k dadurch eliminiren, dass man zwei weitere Beobachtungen ausführt, indem man die Sterne miteinander vertauscht, d. h. den vorher reflectirt gesehenen Stern direct betrachtet und den anderen vom Spiegel reflectiren lässt. Man erhält

dann statt der obigen Formeln (1) und (2) vier andere, die sich von den ersteren nur dadurch unterscheiden, dass die unteren Indices 1 und 2 miteinander vertauscht sind. Selbstverständlich ist dabei die Voraussetzung, dass auch hier wieder der Hauptschnitt des doppelbrechenden Prismas zu der Einfallsebene des reflectirten Sternes parallel gestellt ist. Macht man dann wieder durch Drehung des Nicols das erste Bild des direct gesehenen Sternes und das zweite des reflectirt gesehenen einander gleich, ebenso die beiden Bilder des reflectirt gesehenen Sternes untereinander gleich, so ergibt sich, wenn die betreffenden Drehungswinkel φ_2 und α_2 heissen, entsprechend der Formel (3) die Gleichung:

$$(4) \quad \frac{J_2}{J_1} = 2k \sin^2 \alpha_2 \cot^2 \varphi_2.$$

Aus (3) und (4) folgt dann endlich:

$$\frac{J_1}{J_2} = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} \cot \varphi_1 \tan \varphi_2.$$

Wie man sieht, ist das ganze Beobachtungsverfahren äusserst umständlich. Denn es sind nicht nur vier getrennte Messungen zur Bestimmung der Winkel φ_1 , α_1 , φ_2 , α_2 erforderlich, sondern es muss auch noch zweimal der Hauptschnitt des doppelbrechenden Prismas zu der Einfallsebene des vom Spiegel reflectirten Sternes parallel gestellt werden. Übrigens ist die Endformel nur dann streng richtig, wenn der Reflexionscoefficient des Spiegels für die beiden in Betracht kommenden Einfallswinkel als gleich angenommen werden darf, was keineswegs immer statthaft ist. Die ganze Methode ist schon aus diesem Grunde wenig zu empfehlen. Chacornac scheint sie auch selbst nicht in grösserem Umfange angewendet zu haben, wenigstens sind von ihm ausser einer Helligkeitsvergleichung von Sirius und Arctur keine weiteren Bestimmungen bekannt geworden.

e. Die Pickering'schen Photometer.

Das Verdienst, welches sich Pickering um die Himmelsphotometrie durch seine alle Gebiete derselben umfassenden Arbeiten erworben hat, wird noch dadurch erhöht, dass er eine Anzahl von Apparaten construiert hat, die zwar im Princip nichts wesentlich Neues enthalten, bei denen aber ältere Vorschläge in so zweckentsprechender Weise verwerthet sind, dass sie genug des Lehrreichen und Nachahmenswerthen bieten. Je nach der Aufgabe, deren Lösung Pickering im Auge hatte, unterscheiden sich die verschiedenen Formen dieser Instrumente voneinander. Der eine Typus umfasst alle diejenigen Apparate, welche speciell zur Messung

nahe bei einander stehender Himmelsobjecte, insbesondere der Doppelsterne, bestimmt waren; ein zweiter Typus repräsentirt alle Instrumente, mit denen die schwächsten Objecte am Himmel, vornehmlich die Planeten-
trabanten, gemessen werden sollten. Den hervorragendsten Platz unter allen aber nimmt das Meridianphotometer ein, mit welchem Picking seine grossen Helligkeitscataloge, die umfangreichsten, die wir bisher besitzen, hergestellt hat. Mit Recht wird dieses Instrument in gleicher Linie mit dem Pritchard'schen Keilphotometer und dem Zöllner'schen Photometer zu den besten modernen Hilfsmitteln der Astrophotometrie gerechnet.

Als Hauptvertreter des ersten Typus ist das in Figur 63 abgebildete Instrument zu erwähnen. Dasselbe gleicht vollkommen dem unter dem Namen Rochon'sches Fernrohr bekannten Mikrometer, welches zu Messungen kleiner Distanzen am Himmel vielfach Verwendung findet.

Die Röhre *E* wird an dem Ocularende eines parallaktisch montirten Fernrohrs eingeschoben. In derselben kann ein Rochon'sches Bergkrystall-

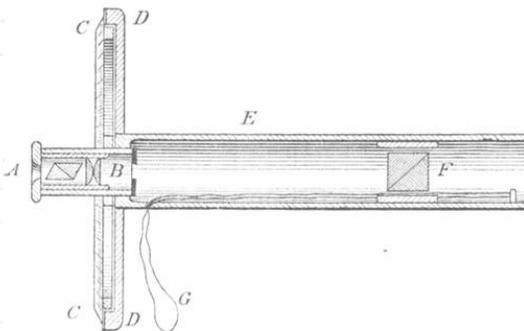


Fig. 63.

prisma *F* mittelst eines Schnurlaufes *G* dem Objectiv des Fernrohrs genähert oder von demselben entfernt werden. Vor dem Ocular *B*, dessen Gesichtsfeld durch ein geeignetes Diaphragma etwas abgeblendet ist, befindet sich ein Nicolprisma *A*, welches zugleich mit dem getheilten Kreise *C* drehbar ist; die

jedesmalige Stellung des Kreises wird an den Indices *D* abgelesen. Von zwei nahe stehenden Objecten werden durch das Rochon'sche Prisma je zwei Bilder hervorgebracht, deren Distanzen durch Nähern oder Entfernen des Prismas innerhalb gewisser Grenzen nach Belieben verändert werden können. Man bringt durch Drehung des Nicols das ordentliche Bild des einen und das ausserordentliche Bild des anderen Objects auf gleiche Intensität. Ist φ_0 die Ablesung, bei welcher das eine Bild ganz verschwindet, dagegen φ die Ablesung, bei welcher die beiden Bilder einander gleich sind, so erhält man das gesuchte Helligkeitsverhältniss $\frac{J_1}{J_2}$ der beiden verglichenen Objecte aus der Gleichung:

$$\frac{J_1}{J_2} = \operatorname{tang}^2(\varphi - \varphi_0).$$

Die Gleichheit der Bilder kann in allen vier Quadranten des Kreises C hergestellt werden; dadurch eliminirt man einerseits einen etwaigen Fehler in der Stellung der Axe des Nicols, andererseits macht man die Bestimmung der Nulllage φ_0 überflüssig. Für den speciellen Zweck, zu welchem der Apparat bestimmt ist, erweist er sich ausserordentlich werthvoll. Ein Nachtheil ist nur der erhebliche Lichtverlust, der durch die Trennung in zwei Bilder bedingt wird, und ferner die Beschränkung auf die Messung verhältnissmässig sehr kleiner Distanzen. In Verbindung mit einem Fernrohr von 38 cm Öffnung und 683 cm Brennweite liessen sich nur Objecte messen, die weniger als 64" voneinander entfernt waren, und mit Anwendung eines Fernrohrs von 12.7 cm Öffnung und 231 cm Brennweite betrug die grösste verwendbare Distanz etwa 190". Um dem letzteren Übelstande abzuhelpfen, hat Pickering¹⁾ in allerneuester Zeit eine Modification dieses Photometers vorgeschlagen. Er befestigt das doppeltbrechende Prisma in der Nähe des Brennpunktes und bringt zwischen Focus und Objectiv nebeneinander zwei achromatische Prismen von kleinem Winkel an, die sich längs des Rohres im Innern mittelst Triebwerkes hin und her bewegen lassen. Die Winkel des doppeltbrechenden Prismas und der achromatischen Prismen sind so gewählt, dass bei der Verbindung dieses Photometers mit dem ersten der oben genannten Refractoren noch die Bilder von zwei Sternen, die 35' auseinander stehen, zusammengebracht werden können; dabei haben die achromatischen Prismen den grösstmöglichen Abstand (40 cm) von der Focalebene. Sind die Prismen aber in unmittelbarer Nähe der Brennebene, so fallen die Bilder von zwei Sternen zusammen, die nur eine Distanz von 3' haben. Man kann auf diese Weise durch Bewegung der Prismen Sternpaare mit Distanzen zwischen 3' und 35' photometrisch messen.

Der Nachtheil des Lichtverlustes durch die Trennung in zwei Bilder ist von Pickering bei der zweiten Classe von Photometern vermieden worden, welche speciell zur Beobachtung der lichtschwächsten Objecte am Himmel bestimmt sind. Figur 64 (Seite 262) stellt eins dieser Instrumente dar. Der schwache Stern wird direct in dem grossen Fernrohre durch das Ocular A in der einen Hälfte des Gesichtsfeldes betrachtet, während das Bild eines hellen zur Vergleichung dienenden Sternes durch das Prisma B in das seitliche Hilfsfernrohr mit dem Objectiv D reflectirt und nach dem Austritt aus demselben durch das Prisma F in die andere Hälfte des Gesichtsfeldes gebracht wird. Das Prisma B ist um die Axe des Hilfsfernrohrs drehbar, und das ganze Photometer kann endlich noch um die

1) The Astrophysical Journal. Vol. 2, p. 89.

Axe des Hauptinstrumentes gedreht werden, so dass es möglich ist, jeden beliebigen Stern zur Vergleichung zu benutzen.

In dem seitlichen Rohre sitzen die beiden Nicolprismen *C* und *E*; das letztere ist zusammen mit dem Kreise *G* drehbar, und der Betrag

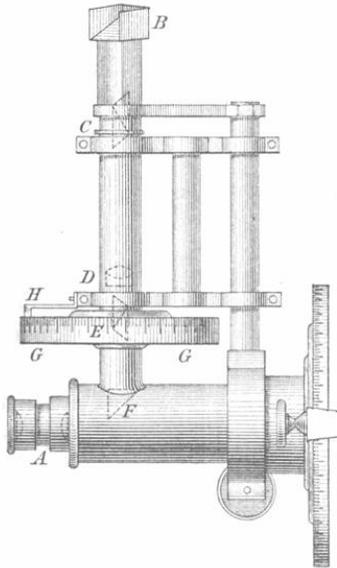


Fig. 64.

der Drehung wird an dem Index *H* abgelesen. Durch Bewegung von *E* wird der Vergleichstern so weit abgeschwächt, bis er dem direct gesehenen an Helligkeit gleichkommt. Die Einrichtung hat drei bedenkliche Übelstände. Erstens erscheinen die beiden verglichenen Sterne auf verschiedenem Himmelsgrunde, zweitens wird das Bild des Vergleichsternes durch die Nicolprismen merklich verschlechtert, so dass sein Aussehen von dem des direct gesehenen etwas verschieden ist, und drittens ist die Constante des Photometers, d. h. das Verhältniss eines im Hilfsfernrohr bei parallel gestellten Nicols gesehenen Sternes zu seinem Bilde im Hauptfernrohre, durch besondere Versuche zu ermitteln. Der erste Übelstand kann, wie schon Pickering selbst bemerkt hat, dadurch beseitigt werden, dass das

Prisma *F*, ebenso wie beim Zöllner'schen Photometer, durch eine planparallele Glasplatte ersetzt wird, dem zweiten Nachtheil hat Pickering später dadurch zu begegnen versucht, dass er an Stelle der Nicolprismen eine Ablendungsrichtung vor dem Objectiv *D* angewandt hat. Dadurch ist aber keine Verbesserung erzielt, vielmehr können durch die bekannten Mängel der Ablendungsmethode unter Umständen merkliche Fehler verursacht werden. Der dritte Übelstand ist überhaupt nicht zu beseitigen, und da die Bestimmung der Constante des Photometers, für welche Pickering verschiedene Methoden in Vorschlag gebracht hat¹⁾, ziemlich schwierig ist, so steht die hier besprochene Form von Photometern an Genauigkeit hinter dem ersten Typus zurück.

Wir kommen nun zu dem wichtigsten der Pickering'schen Apparate, dem Meridianphotometer, welches dazu bestimmt ist, die Sterne beim Durchgange durch den Meridian zu messen. Pickering hat zwei solcher Instrumente construiert; Figur 65 stellt das grössere derselben dar.

1) Annals of the Astr. Obs. of Harvard College. Vol. 11, part II, p. 195.

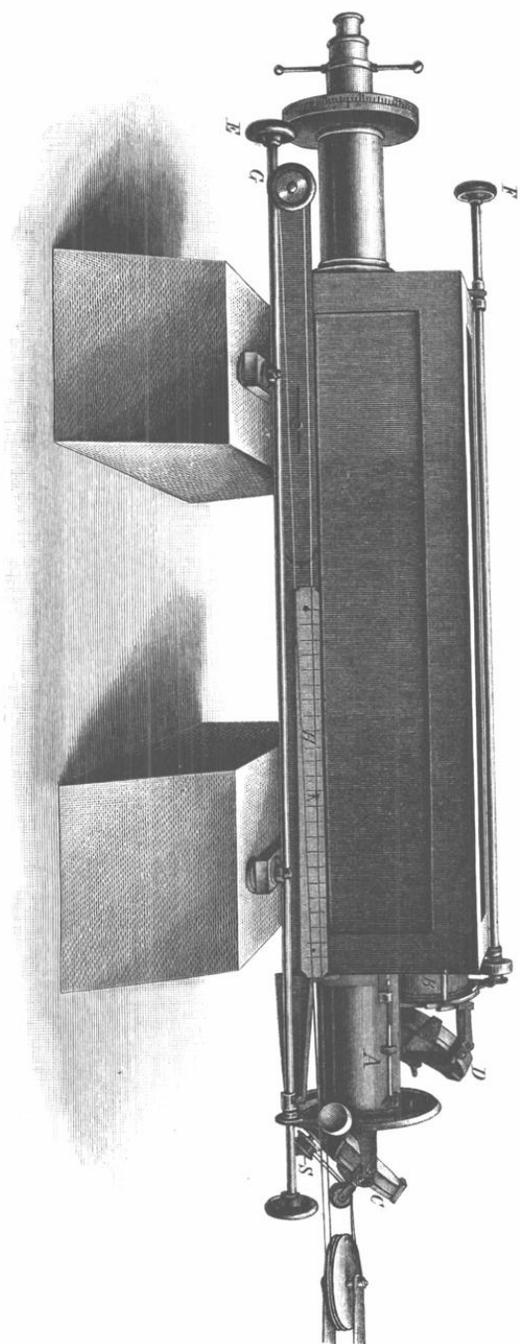


Fig. 65.

Ein Holzkasten ist in der Richtung Ost-West auf Pfeilern fest montirt. An dem östlichen Ende des Kastens sind zwei Röhren *A* und *B* angesetzt, welche zwei gleich grosse Objective von 10.5 cm Öffnung enthalten. Vor diesen Objectiven sitzen, unter 45° gegen dieselben geneigt, die versilberten Glasspiegel *C* und *D*, welche mit ihren Fassungen vermittelt der langen Triebstangen *E* und *F* um die optischen Axen der Objective gedreht werden können. An zwei Kreistheilungen lassen sich bei richtiger Justirung des Apparates unmittelbar die Declinationen der Sterne einstellen. Das südliche Objectiv (im Rohre *A*) hat eine etwas längere Brennweite (166 cm) als das nördliche (145 cm); es ragt nach Osten zu um 21 cm über das nördliche hinaus, und für den Spiegel *C* ist daher die ganze Meridianebene frei. Vermittelt der Schraube *S* kann man die Neigung des Spiegels *C* gegen das Objectiv innerhalb kleiner Grenzen variiren, um während der Beobachtung den eingestellten Stern an derselben Stelle im Gesichtsfelde zu halten. Die Schraube *S* wird durch einen über mehrere Rollen geführten Schnurlauf vom Ocular aus mittelst des Griffes *G* bewegt, und an einer auf der Längsseite des Kastens angebrachten Scala *H* kann die jedesmalige Stellung des Spiegels (die Collimation desselben) abgelesen werden. Eine ähnliche Bewegungseinrichtung für den Spiegel *D* befindet sich auf der entgegengesetzten Seite des Apparates. Dieser zweite Spiegel ist dazu bestimmt, das Bild eines Polsternes (Pickering hat λ Ursae minoris gewählt) in das Gesichtsfeld zu bringen. Mit diesem constanten Vergleichsobject werden die in *C* eingestellten Sterne beim Passiren des Meridians verglichen. In dem Ocularansatze an dem westlichen Ende des Instrumentes sitzt in der Nähe der Brennebene ein doppeltbrechendes achromatisirtes Kalkspathprisma. Zwischen Ocular und Auge befindet sich endlich noch ein drehbares Nicolprisma, dessen Stellung gegen das feste doppeltbrechende Prisma an einem getheilten Kreise abgelesen wird. Die Winkel der beiden Theile des doppeltbrechenden Prismas, von denen der eine aus Glas, der andere aus Kalkspath besteht, sind so gewählt, dass das ordentliche Bild eines mit *C* betrachteten Sternes genau coincidirt mit dem ausserordentlichen Bilde eines mit Hülfe von *D* gesehenen Sternes. Dadurch, dass das doppeltbrechende Prisma in der Nähe des Focus steht, wird der Vortheil erreicht, dass die Bilder sehr wenig gefärbt erscheinen, und dass ausserdem ordentliches und ausserordentliches Bild desselben Objectivs möglichst weit voneinander getrennt sind. Die beiden nicht zur Beobachtung benutzten Bilder sind durch den Augendeckel des Oculars vom Gesichtsfelde ausgeschlossen. Ist *J* die Helligkeit des Meridiansternes, J_0 diejenige des Polsternes, ist ferner φ der am Kreise abgelesene Winkel, wenn die in Betracht kommenden Bilder der beiden Sterne gleich hell

erscheinen, und endlich φ_0 die Ablesung am Kreise, wenn das Bild des Polsternes verschwindet, so hat man:

$$\frac{J}{J_0} = \text{tang}^2 (\varphi - \varphi_0).$$

Es versteht sich von selbst, dass die Einstellungen in sämtlichen Quadranten des Intensitätskreises ausgeführt werden müssen, wenn man den Indexfehler desselben, sowie eine etwaige schiefe Stellung der Axe des Nicols eliminiren will; auch empfiehlt es sich, wie bei den Beobachtungen mit dem Zöllner'schen Photometer, die Vergleichen bei verschiedenen Stellungen der beiden Bilder zu einander anzustellen, um von Auffassungsfehlern möglichst frei zu sein. Nicht ganz unbedenklich ist die Benutzung der Spiegel vor den Objectiven, weil bei der Reflexion eine partielle Polarisation des Lichtes stattfindet, und der Winkel, den die Einfallsebene mit dem Hauptschnitte des doppeltbrechenden Prismas bildet, je nach der Meridianhöhe des Gestirns verschieden ist. In dieser Hinsicht ist bei dem kleineren, von Pickering zuerst construirten Meridianphotometer¹⁾, dessen Objective nur Öffnungen von 4 cm und Brennweiten von 80 cm besitzen, und bei welchem α Urs. min. an Stelle von λ Urs. min. als Vergleichstern dient, jedes Bedenken ausgeschlossen, weil statt der Spiegel total reflectirende Prismen zur Anwendung gekommen sind. Bei grösseren Dimensionen können freilich solche Prismen wegen der Schwierigkeit und Kostspieligkeit ihrer Herstellung nicht in Frage kommen.

Da bei dem Meridianphotometer die beiden zu vergleichenden Sterne durch verschiedene Objective abgebildet werden, so ist bei jedem Instrumente die Bestimmung einer Constante erforderlich, welche das Helligkeitsverhältniss der beiden Objective zu einander angiebt. Diese Constante wird sehr einfach dadurch ermittelt, dass ein und derselbe Stern in beiden Objectiven eingestellt und mit sich selbst verglichen wird, und da diese Constante durch äussere Einflüsse, wie Staub etc., sich von Tag zu Tag verändern kann, so empfiehlt es sich, nach dem Vorgange Pickering's, dieselbe am Anfange und am Ende jeder grösseren Beobachtungsreihe zu bestimmen.

Aus der vorangehenden Beschreibung des Pickering'schen Meridianphotometers geht hervor, dass der Hauptvorteil desselben vor vielen anderen Photometern darin zu sehen ist, dass direct zwei Sterne am Himmel miteinander zur Vergleichung kommen, deren Bilder, mit fast gleichen Objectiven und mit demselben Ocular betrachtet, ein absolut

1) Annals of the Astr. Obs. of Harvard College. Vol. 14, part I, p. 1.

gleiches Aussehen haben, abgesehen natürlich von den Unterschieden der Färbung. Diesem sehr hoch zu schätzenden Vortheile stehen freilich einige Mängel gegenüber. Durch die feste Aufstellung des Apparates wird zunächst der Anwendungsbereich desselben wesentlich beschränkt. Man kann nicht jederzeit beliebige Sterne am Himmel miteinander vergleichen, und die mehrmalige Beobachtung eines Sternes an ein und demselben Abend ist unmöglich. Der Umstand, dass ein Polstern als constantes Mittelglied benutzt wird, bringt den Nachtheil mit sich, dass die beiden verglichenen Objecte unter Umständen weit am Himmel voneinander entfernt sind, und dass infolge dessen Verschiedenheiten in der Durchsichtigkeit der Atmosphäre schädlichen Einfluss auf die Messungen haben können. An Beobachtungsorten in niedrigen Breiten ist von der Benutzung des Photometers ganz abzurathen, weil infolge der geringen Höhe der Polsterne über dem Horizonte die Extinction eine allzu bedenkliche Rolle spielt. Ferner ist es ein empfindlicher Übelstand, dass durch die Anwendung des doppeltbrechenden Prismas eine starke Lichtverminderung herbeigeführt wird, und dass das Instrument daher, wenn es für die Beobachtung schwächerer Sterne dienen soll, verhältnissmässig grosse Dimensionen haben muss. Die Theilung in ordentliches und ausserordentliches Bild reducirt schon die ursprüngliche Lichtmenge auf die Hälfte, und da noch eine weitere Verminderung bei der Gleichmachung mit dem Vergleichsterne stattfinden muss, auch etwas Licht durch Absorption und Reflexion verloren geht, so wird man nur solche Sterne in den Bereich der Messungen ziehen dürfen, die mindestens $1\frac{1}{2}$ bis 2 Grössenklassen heller sind als die schwächsten, welche man mit dem betreffenden Objective ohne polarisirende Medien gerade noch wahrnehmen kann. Die Benutzung des Intensitätskreises bei sehr kleinen Winkeln ist ebenso wenig rathsam als beim Zöllner'schen Photometer, weil schon ganz geringfügige Ablesungsfehler einen grossen Einfluss ausüben. Macht man bei einer Einstellung von 4° einen Ablesefehler von $0^{\circ}1$, so ändert dies schon die berechnete Helligkeit, da das Quadrat der Tangente in Frage kommt, um 0.05 Grössenklassen, ein Betrag, der als unzulässig zu bezeichnen ist. Will man daher solche oder noch kleinere Winkel benutzen, so müsste die Theilung genauer als bis auf $0^{\circ}1$ abzulesen sein, und auch die Bewegung des Kreises müsste feiner bewirkt werden können, als es bei der Drehung mit der Hand möglich ist. Grössere Helligkeitsunterschiede als etwa vier Grössenklassen direct zu messen scheint daher beim Pickering'schen Meridianphotometer kaum statthaft. Pickering ist mit dem kleineren seiner beiden Instrumente nicht viel über die 6. Grössenklasse, mit dem grösseren nicht weit über die 9. Grössenklasse hinausgegangen, und es fragt sich, ob er nicht damit bereits die zulässige Grenze überschritten

hat. Wollte man gar noch ganz schwache Sterne in den Messungsbereich des Meridianphotometers ziehen, so müssten die Dimensionen noch erheblich gesteigert werden, und damit würden die Kosten der Herstellung unverhältnissmässig wachsen. In dieser Hinsicht steht das Meridianphotometer jedem anderen Photometer, welches sich mit einem beliebigen Refractor in Verbindung bringen lässt, entschieden nach.

Capitel III.

Die Spectralphotometer.

1. Die Methoden von Fraunhofer, Vierordt, Draper, Crova, Abney zur Bestimmung der Helligkeitsvertheilung im Sonnenspectrum.

Wenn man das von verschiedenen Lichtquellen ausgesandte Licht mit Hilfe eines Prismas in die einzelnen Strahlengattungen zerlegt und auf irgend eine Weise die Gleichheit der Intensität in einem bestimmten Farbenbezirke bei sämtlichen Spectren herstellt, so sieht man, dass an anderen Stellen diese Gleichheit nicht mehr besteht. Bei einzelnen Lichtquellen überwiegen die weniger brechbaren, bei anderen die brechbareren Strahlen. Die Lichtvertheilung im Spectrum ist durchaus charakteristisch für jede Lichtquelle; sie wird im Allgemeinen bedingt durch die Temperatur und, die damit im Zusammenhang stehende Färbung derselben. Je höher die Temperatur einer Lichtquelle und je weisser infolge dessen gewöhnlich auch ihre Färbung ist, desto reicher ist ihr Spectrum an blauen und violetten Strahlen. Umgekehrt macht sich eine niedrigere Temperatur durch das stärkere Hervortreten der rothen Strahlengattungen bemerkbar. Es geht hieraus hervor, wie wichtig die Kenntniss der Lichtcurve des Spectrums für die Beurtheilung einer Lichtquelle ist, es ist aber auch unmittelbar klar, dass die Bestimmung dieser Curve, da es sich um die Vergleichung verschiedener Farben handelt, aus physiologischen Gründen grosse Schwierigkeit bereitet.

Der Erste, welcher den Versuch gemacht hat, verschiedene Partien des Sonnenspectrums in Bezug auf Helligkeit miteinander zu

vergleichen, war Fraunhofer¹⁾. Er bediente sich dabei der folgenden Methode.

Vor dem Objectiv *A* eines Fernrohrs (Fig. 66) wurde ein Prisma *P* aufgestellt und das entstehende Sonnenspectrum durch das Ocular *B* betrachtet. Im Innern des Rohrs ist ein kleiner, unter einem Winkel von 45° gegen die optische Axe geneigter Metallspiegel *s* angebracht, auf dessen

scharfe, bis in die Mitte des Rohrs reichende Kante das Ocular *B* eingestellt wird. In der vom Spiegel nicht verdeckten Hälfte des Gesichtsfeldes, welches durch ein Diaphragma beschränkt ist, erblickt man ein Stück des prismatischen Spectrums. Vom Spiegel *s* wird das Licht einer kleinen Lampe *L* reflectirt, aus deren Flamme durch die Blende *b* ein kleiner Theil herausgeblendet ist, und die in einem seitlichen,

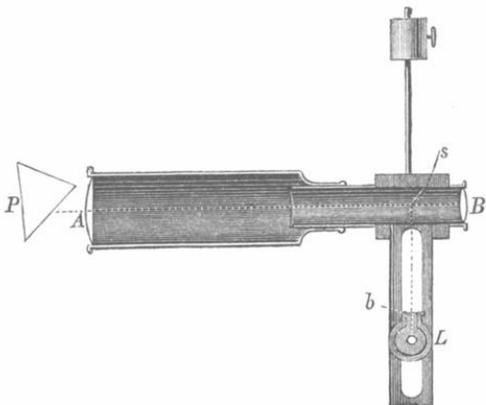


Fig. 66.

oben und unten durchbrochenen Rohre messbar verschoben werden kann. Die Intensität der von diesem Vergleichslichte ausgehenden Beleuchtung ändert sich umgekehrt proportional dem Quadrate des Abstandes der Lampe vom Spiegel. Man verschiebt nun die Lampe jedesmal so weit, bis die von ihr beleuchtete Hälfte des Gesichtsfeldes und der in der anderen Hälfte sichtbare Theil des Spectrums gleich hell erscheinen. Einer sehr grossen Genauigkeit ist diese Beobachtungsmethode, welche Fraunhofer auf acht verschiedene Bezirke des Sonnenspectrums angewandt hat, nicht fähig, weil die Vergleichung verschieden gefärbter Flächen ungemein schwierig ist. Die einzelnen Messungsreihen von Fraunhofer zeigen daher auch grosse Abweichungen untereinander, und noch stärkere Unterschiede würden zwischen verschiedenen Beobachtern zu erwarten sein.

Die Fraunhofer'schen Versuche zur Vergleichung verschiedener Spectralbezirke sind erst ein halbes Jahrhundert später von Vierordt²⁾ wieder aufgenommen worden, und zwar nach einer gänzlich anderen Methode.

1) Denkschriften der K. Bayer. Akad. der Wiss. Math.-phys. Classe, Bd. 5 (1817), p. 193. — Siehe auch Gilberts Annalen, Bd. 56, p. 264.

2) Vierordt, Die Anwendung des Spectralapparates zur Messung und Vergleichung der Stärke des farbigen Lichtes. Tübingen, 1871. — Siehe auch Pogg-Annalen, Bd. 137, p. 200.

In dem Scalenrohre eines gewöhnlichen Spectralapparates wird an Stelle der Scala ein horizontaler Spalt angebracht, welcher durch eine Petroleumlampe beleuchtet wird. Durch ein vorgesetztes blaues Glas kann die Farbe der Flamme in Weiss verwandelt werden. Das Bild des Spaltes gelangt durch Reflex an der letzten Prismenfläche in das Beobachtungsfernrohr und projicirt sich als weisser Streifen auf das Spectrum. Die Höhe des Spaltes ist so bemessen, dass das Spectrum ober- und unterhalb des Streifens sichtbar bleibt. Das Licht der Lampe kann dann durch vorgesetzte Blendgläser von verschiedener Absorptionsfähigkeit so weit geschwächt werden, bis der weisse Streifen in den einzelnen Farbenbezirken, die durch geeignete Ocularschieber herausgeblendet werden können, verschwindet. Sind die Absorptioncoefficienten der Blendgläser durch besondere Untersuchungen bekannt, so lässt sich aus den Quantitäten des zugemischten weissen Lichtes das gesuchte Helligkeitsverhältniss der betreffenden Spectralbezirke berechnen. Um nicht allzu viele verschiedene Blendgläser nöthig zu haben und um die Messungen noch mehr zu verfeinern, hat Vierordt den Vorschlag gemacht, eine Abschwächung der Vergleichsflamme innerhalb kleiner Grenzen durch Verengung des Hülffspaltes zu erreichen. Die Vierordt'sche Methode leidet ebenso wie die Fraunhofer'sche an dem Mangel, dass die Empfindlichkeit des Auges sich für die verschiedenen Farben ändert und auch mit der absoluten Intensität des Spectrums variirt. Fast in noch stärkerem Grade trifft dies eine von W. Draper¹⁾ empfohlene Methode, welcher das Spectrum auf eine von weissem Licht beleuchtete Fläche projicirt und untersucht, bei welchen Intensitäten des weissen Lichtes die einzelnen Spectralbezirke nicht mehr von der erleuchteten Fläche unterschieden werden können. Zu erwähnen ist noch, dass Vierordt der Erste gewesen ist, welcher sein Verfahren auch für die Untersuchung der Sternspectren in Vorschlag gebracht hat²⁾.

Ein wesentlich anderer Weg ist von Crova und Lagarde³⁾ eingeschlagen worden. Diese bringen vor den Spalt eines gewöhnlichen Spectralapparates eine Glasplatte, auf welcher eine Anzahl feiner Striche eingeritzt sind. Letztere projiciren sich als schwarze Querstreifen auf das Spectrum, und indem das Licht desselben durch polarisirende Medien geändert wird, lässt es sich erreichen, dass die Striche in den einzelnen Farbenregionen verschwinden. Die Sehschärfe des menschlichen Auges ist also hierbei der entscheidende Factor, und es unterliegt keinem Zweifel, dass die Methode einer etwas grösseren Genauigkeit fähig ist, als die vorher besprochenen.

1) Philos. Mag. Ser. 5, Vol. 8 (1879), p. 75.

2) Astr. Nachr. Bd. 78, No. 1863.

3) Comptes Rendus. T. 93 (1881), p. 959.

Eines ähnlichen Verfahrens haben sich auch Macé de Lépinay und Nicati¹⁾ bedient.

Besondere Beachtung gebührt endlich noch der Methode, welche in neuerer Zeit von Abney und Festing²⁾ bei ihren farbenphotometrischen Untersuchungen angewendet worden ist. Die von einem Heliostat kommenden Sonnenstrahlen RR (Fig. 67) werden durch die Linse L_1 zu einem Bilde auf dem Spalt S_1 des Collimators vereinigt. Nach dem Austritt aus dem Collimatorobjectiv L_2 gehen die Strahlen durch die Prismen P_1 und P_2 , fallen auf die Linse L_3 und bilden auf dem schräg zu ihrer Richtung stehenden Schirme D ein reines Sonnenspectrum. Der Schirm D enthält eine spaltförmige Öffnung S_2 und lässt sich parallel mit sich selbst verschieben, so dass S_2 auf jede beliebige Stelle des Spectrums eingestellt werden kann. Man erhält dann mit Hilfe der Linse L_4 auf einem weissen Schirme ein monochromatisches Bild F von der Austrittsöffnung des zweiten Prismas; die Farbe desselben kann durch Verschieben von D beliebig geändert werden. Als Vergleichslicht kommt keine Lampe zur Verwendung, sondern es werden dazu die von der ersten Prismenfläche reflectirten Sonnenstrahlen benutzt. Dieselben fallen auf einen versilberten Glasspiegel G , werden durch die Linse L_5 gesammelt und bilden bei F' ein weisses Bild der freien Prismenfläche. Vor dem auffangenden Schirme bei F' steht ein dünner senkrechter Stab, und es kommt, genau so wie beim Rumford'schen Photometer, auf die Beurtheilung der von diesem Stabe hervorgebrachten Schatten an. In den Gang der von G kommenden Strahlen ist bei M noch ein kleiner elektrischer Motor

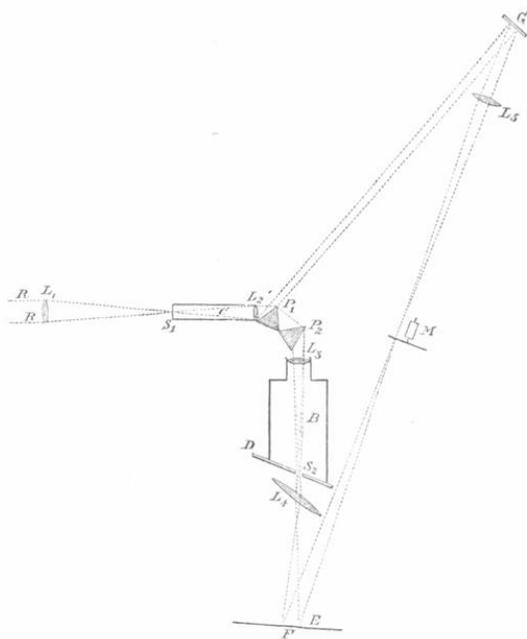


Fig. 67.

1) Annales de chimie et de physique. Série 5, t. 24 (1881), p. 289 und t. 30 (1883), p. 145.

2) Phil. Trans. of the R. Soc. of London. 1886, part II, p. 455.

eingefügt, welcher eine mit sectorförmigen Ausschnitten versehene Scheibe in schnelle Rotation versetzt. Durch Vergrößerung oder Verkleinerung der Ausschnitte lässt sich die Gleichheit der Schatten auf dem Schirme herstellen. Die Methode hat den Vortheil, dass Spectrum und Vergleichslicht von derselben Lichtquelle herkommen, und dass infolge dessen kleine Schwankungen des Sonnenlichtes während der Messungen die Resultate nicht schädlich beeinflussen können. —

Die Lichtcurve des Sonnenspectrums, die man mit Hülfe einer der im Vorangehenden beschriebenen Methoden findet, hängt ganz und gar von der Dispersion des benutzten Spectralapparates ab. Um allgemein vergleichbare Werthe für die Lichtvertheilung zu erhalten, muss man die gefundenen Intensitäten auf das sogenannte Normalspectrum reduciren, d. h. auf dasjenige Spectrum, welches durch Diffractionsmitter hervorgebracht wird. Diese Reductionen bestimmt man auf folgende Weise. Hat man in irgend einem prismatischen Spectrum für einen gewissen Bezirk, der zwischen den Wellenlängen λ und $\lambda + d\lambda$ enthalten ist, und dessen lineare Ausdehnung dx sein möge, die mittlere Flächenhelligkeit i nach einer der obigen Methoden gefunden, so ist die Gesamtlichtmenge des betreffenden Spectralstreifens proportional dem Werthe $i dx$. In dem Normalspectrum würde der entsprechende Bezirk eine lineare Ausdehnung haben, die direct dem Wellenlängenintervall $d\lambda$ proportional ist. Nennt man daher die Flächenintensität an dieser Stelle des Normalspectrums J , so hat man:

$$J d\lambda = C i dx,$$

wo C eine Constante bedeutet. Daraus ergibt sich:

$$J = C i \frac{dx}{d\lambda}.$$

Rechnet man die Abstände x im prismatischen Spectrum von irgend einem Anfangspunkte aus, so lässt sich nach den Dispensionsgesetzen x angenähert ausdrücken durch die Formel:

$$x = a + \frac{b}{\lambda^2} + \frac{c}{\lambda^4},$$

wo a, b, c Constanten sind, die von der Beschaffenheit des Prismas u. s. w. abhängen. Man hat also:

$$dx = -2 \left(\frac{b}{\lambda^3} + \frac{2c}{\lambda^5} \right) d\lambda,$$

und folglich:

$$\frac{J}{i} = K \left(\frac{b}{\lambda^3} + \frac{2c}{\lambda^5} \right),$$

wo eine neue Constante K statt $-2C$ eingeführt ist.

Bezieht man alle Intensitäten auf eine bestimmte Stelle des Spectrums, so ergeben sich die Werthe von J aus den entsprechenden beobachteten Werthen von i durch Multiplication mit dem Ausdrücke $\frac{b}{\lambda^3} + \frac{2c}{\lambda^5}$, der für jeden Spectralapparat zu ermitteln ist. Man kann die gesuchten Reductionen anstatt durch Rechnung auch durch einfaches graphisches Verfahren bestimmen.

Das Maximum der Lichtintensität liegt im Normalspectrum etwa in der Mitte zwischen den Spectrallinien D und E , also ungefähr bei der Wellenlänge $558 \mu\mu$, dagegen im prismatischen Spectrum ungefähr in der Gegend von D .

Aus der beobachteten Lichtcurve eines Spectrums ergibt sich noch die gesammte Intensität L der untersuchten Lichtquelle mittelst der Formel:

$$L = k \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} J d\lambda,$$

wo k eine Constante bedeutet, und λ_1 und λ_2 diejenigen Wellenlängen an den beiden Enden des Spectrums sind, wo jede Lichtwirkung aufhört. Hat man den Zusammenhang zwischen J und λ an hinreichend vielen Stellen durch Messungen ermittelt, so kann man L durch mechanische Quadratur bestimmen.

Alle Versuche, die verschiedenen Partien eines und desselben Spectrums in Bezug auf ihre Helligkeit miteinander zu vergleichen, haben hauptsächlich wegen der Schwierigkeiten, die sich in physiologischer Hinsicht entgegenstellen, nur wenig befriedigende Resultate ergeben. Weit fruchtbarer hat sich der Gedanke erwiesen, die Spectra zweier Lichtquellen nebeneinander zu bringen und die verschiedenen Partien des einen mit den gleichgefärbten Partien des anderen zu vergleichen. Durch dieses Verfahren erhält man nicht nur sehr zuverlässige Werthe für das Helligkeitsverhältniss der in beiden Lichtquellen enthaltenen Strahlengattungen, woraus sich dann auch leicht das Verhältniss ihrer Gesamtintensitäten finden lässt, sondern man gewinnt gleichzeitig auch eine ungefähre Vorstellung von dem Temperaturverhältniss derselben. Wenn nämlich die Spectra zweier Lichtquellen in den mittleren Partien gleiche Intensität haben, dagegen an dem brechbaren Ende starke Intensitätsunterschiede zeigen, so weiss man, dass diejenige Lichtquelle, deren Helligkeit im Blau überwiegt, die höhere Temperatur besitzt, und wenn man Flammen von bekannter Temperatur zur Vergleichung benutzt, so kann man auf rein optischem Wege eine Art Temperaturbestimmung ausführen. Das Spectrum einer Petroleumflamme sieht neben dem Sonnenspectrum, wenn die Gleichheit in den grünen Theilen hergestellt ist, in

den blauen und violetten Partien vollkommen dunkel aus, und das Spectrum des elektrischen Lichtes übertrifft dasjenige einer Gasflamme durch einen Überschuss an brechbaren Strahlen.

Die Bedeutung der spectralphotometrischen Methode für die Technik, bei der die Frage nach der Ausnutzung einer Leuchtkraft im Vordergrund des Interesses steht, liegt auf der Hand; sie ist für dieselbe von unschätzbarem Werthe geworden. Aber auch für die Himmelsphotometrie ist diese Methode zweifellos von der allergrössten Wichtigkeit. Die Vergleichung verschiedener Sternspectren giebt einen Begriff von den Temperaturverhältnissen der betreffenden Himmelsobjecte und erlaubt in Verbindung mit spectralanalytischen Forschungen einen Schluss auf das Entwicklungsstadium, in welchem sich dieselben befinden. Bei sehr verschieden gefärbten Sternen, wo die directe photometrische Vergleichung mit Schwierigkeiten verknüpft ist, darf man von spectralphotometrischen Messungen bessere Resultate erwarten. Von allerhöchstem Interesse sind solche Untersuchungen in Bezug auf den Lichtwechsel der veränderlichen Sterne. Leider ist eine erfolgreiche Anwendung der Methode auf alle Probleme der Himmelsphotometrie wegen der verhältnissmässig geringen Lichtstärke der meisten Gestirne nur mit Benutzung der mächtigsten Instrumente möglich.

Die Zahl der bisher speciell zu spectralphotometrischen Beobachtungen construirten Apparate, der sogenannten Spectrophotometer oder Spectralphotometer, ist bereits ausserordentlich gross. Fast alle in den vorangehenden Capiteln erörterten Verfahren kommen dabei zur Anwendung, am häufigsten die Polarisationsmethode. Im Folgenden sollen nur die wichtigsten derselben einer etwas eingehenderen Besprechung unterworfen werden.

2. Das Govi'sche Spectralphotometer.

Das erste Spectralphotometer rührt von Govi¹⁾ her, welcher sich bereits im Jahre 1850 mit dem Plane zu diesem Instrumente beschäftigt hatte, aber erst im Jahre 1860 eine Mittheilung darüber an die Pariser Akademie gelangen liess. Sein Apparat hat grosse Ähnlichkeit mit dem Ritchie'schen Photometer. Ein länglicher viereckiger Holzkasten hat an den beiden Enden zwei vollkommen gleiche verticale Spalte, auf welche das Licht der zu untersuchenden Lichtquellen fällt. Im Innern des Kastens, ungefähr in der Mitte, sind zwei total reflectirende Prismen so angebracht, dass sie das von den Spalten herkommende Licht auf eine

1) Comptes Rendus. T. 50 (1860), p. 156.

in der oberen Seite des Kastens befindliche Öffnung werfen. Vor dieser Öffnung sitzt eine achromatische Linse, welche das aus beiden Prismen austretende Licht parallel macht. Die Strahlen fallen dann auf ein grosses Flintglasprisma, dessen Kante der Längsrichtung des Kastens parallel ist, und welches auf das Minimum der Ablenkung für mittlere Strahlen eingestellt ist; die beiden entstehenden Spectra werden auf einer matten Glasscheibe aufgefangen. Durch eine verschiebbare Platte mit schmalen Ausschnitt kann ein kleines Stück aus ihnen herausgeblendet werden. Die gleiche Helligkeit der beiden Spectralstreifen wird dann durch Verschiebung der einen oder beider Lichtquellen hergestellt; etwaige Unterschiede in den Spectralspalten und den reflectirenden Prismen können dadurch unschädlich gemacht werden, dass der ganze Apparat um 180° gedreht wird oder, was dasselbe ist, die Lichtquellen miteinander vertauscht werden.

Es ist von mehreren Seiten, besonders von Vierordt¹⁾, versucht worden, Goni die Priorität der Erfindung des Spectralphotometers streitig zu machen. Jedenfalls mit Unrecht. Denn wenn sich Goni auch nicht der ganzen Bedeutung und vollen Anwendungsfähigkeit seines Apparates, den er selbst »photomètre analyseur« nennt, bewusst gewesen ist, so entspricht derselbe, mit geringen Modificationen, so vollkommen allen Anforderungen, die man heute an ein Spectralphotometer stellt, dass er unbedingt als Vorbild für diese Classe von Instrumenten anerkannt werden muss, wenn auch bei den späteren Apparaten dieser Gattung eine wesentlich andere Form und ein anderes Beobachtungsverfahren gewählt worden ist.

3. Das Vierordt'sche Spectralphotometer²⁾.

Dasselbe ist ein gewöhnlicher Spectralapparat, dessen Spalt durch einen besonders construirten Doppelspalt ersetzt ist. Die eine Schneide desselben ist fest, während die andere in zwei Hälften getheilt ist, von denen jede für sich mittelst einer feinen Mikrometerschraube hin und her bewegt werden kann. Die beiden Spalthälften entwerfen im Beobachtungsfernrohre von einer Lichtquelle zwei scharf aneinander grenzende Spectra, welche gleich lichtstark sind, sobald die Spalthälften gleichweit geöffnet sind. Um einen beliebig grossen Spectralbezirk benutzen zu können und nicht von den angrenzenden Theilen beeinflusst zu werden, kann man in der Brennebene des Oculars durch zwei gegeneinander

1) Wiedem. Annalen. Bd. 3, p. 375.

2) Pogg. Annalen. Bd. 140, p. 172.

verschiebbare Metallplatten einen Ocularspalt von willkürlicher Breite herstellen. Gewöhnlich wird der Apparat direct auf die zu untersuchende Lichtquelle gerichtet, während die andere Spalthälfte durch ein davor gesetztes total reflectirendes Prisma Licht von einer Vergleichsflamme (einer Petroleumlampe etc.) erhält. Die Gleichheit der Helligkeit in den beiden Spectren wird durch Veränderung der Spaltbreiten bewirkt. Erweitert man den Spalt, so wächst die Lichtstärke des Spectrums proportional der Breite desselben. Denn man kann sich den Spalt in lauter nebeneinander befindliche Spalte getheilt denken, von denen jeder für sich ein Spectrum entwirft, und da die einzelnen Spectra sich übereinander lagern, so nimmt die Helligkeit direct proportional der Spaltbreite zu. Je breiter der Spalt ist, desto mehr Elementarspectra legen sich übereinander, desto unreiner werden aber auch die Farben in dem entstehenden Gesamtspectrum, weil die einzelnen Farben sich nicht genau decken. Man darf also, um diesen Nachtheil zu vermeiden, den Spalt nicht über eine gewisse Grenze hinaus öffnen. Andererseits ist es aber auch nicht rathsam, den Spalt allzu sehr zu verengen. Denn in diesem Falle können Unvollkommenheiten der Spaltbacken, anhaftende Staubpartikelchen u. s. w. sehr leicht die Proportionalität zwischen Öffnung und Intensität stören. Unter allen Umständen wird man demnach mit dem Vierordt'schen Doppelspalt nicht sehr grosse Intensitätsunterschiede direct messen dürfen. Vierordt hat diesen Mangel schon selbst erkannt und daher vorge schlagen, die stärkere der zu vergleichenden Lichtquellen durch vorge setzte Blendgläser zu schwächen; da es aber schwierig, wenn nicht ganz unmöglich ist, Blendgläser zu erhalten, welche alle Farben ganz gleichmässig absorbiren, so bleibt es bei Anwendung solcher Gläser eine sehr lästige aber unumgängliche Forderung, die Absorptionscoefficienten derselben für möglichst viele verschiedenen Farben zu bestimmen. Der Vierordt'sche Doppelspalt hat in neuerer Zeit noch eine wesentliche Verbesserung erfahren. Ursprünglich war die eine Spaltschneide fest. Wenn daher die beiden Hälften verschieden weit geöffnet werden mussten, dann fielen ihre Mitten nicht zusammen, und die Folge davon war, dass die beiden entstehenden Spectra ein wenig gegeneinander verschoben waren, und nicht vollkommen gleiche Farbenbezirke verglichen werden konnten. Diesem Übelstande ist von Krüss abgeholfen worden, welcher die beiden Spalthälften so eingerichtet hat, dass bei jeder beide Backen sich symmetrisch bewegen, so dass die Mitten der beiden Hälften stets zusammenfallen.

Vierordt hat seinen Apparat hauptsächlich zu Untersuchungen der Absorptionsspectren benutzt, er hat aber auch auf seine Verwendbarkeit für Messungen an den Himmelskörpern hingewiesen und bereits betont,

dass die Kenntniss der Helligkeiten der Einzelfarben in den Sternspectren ebenso wichtig, wenn nicht wichtiger sei, als die der Gesamthelligkeiten. Meines Wissens sind Versuche in dieser Richtung niemals angestellt worden, aber ohne Zweifel eignet sich gerade das Vierordt'sche Spectralphotometer sehr gut zu Beobachtungen an Sternspectren, schon deshalb, weil bei ihm die erste Bedingung, die volle Ausnutzung des vorhandenen Lichtes, viel besser erfüllt ist, als bei den meisten anderen Spectralphotometern. Als ein Vorzug der Vierordt'schen Methode ist die grosse Genauigkeit anzusehen, die sich mittelst derselben erreichen lässt, sowie der Umstand, dass diese Genauigkeit für alle Grade der Intensität, bei welchen die Vergleichenungen ausgeführt werden, dieselbe bleibt, was z. B. bei den auf dem Polarisationsprincipe beruhenden Spectralphotometern nicht der Fall ist. Aus einer grösseren Reihe von Messungen mit einem Vierordt'schen Apparate habe ich als wahrscheinlichen Fehler einer Helligkeitsvergleichung in den grünen Theilen des Spectrums 0.61 Procent, in den blauen Theilen 0.75 Procent des gemessenen Intensitätsverhältnisses gefunden.

4. Das Glan-Vogel'sche Spectralphotometer.

Dasjenige Spectralphotometer, welches am meisten verbreitet ist und bisher allein von allen ausgedehntere Verwendung in der Astrophotometrie gefunden hat, ist das unter dem Namen des Glan-Vogel'schen bekannte. Das Princip und die allgemeine Einrichtung rührt von Glan¹⁾ her, während Vogel²⁾ dem Apparate diejenige Form gegeben hat, in welcher er heute gewöhnlich benutzt wird, und die sich am besten zu Untersuchungen am Himmel bewährt hat; auch sind von Vogel die eingehendsten Studien an diesem Instrumente angestellt worden. Der folgenden Beschreibung ist dasjenige Photometer zu Grunde gelegt, welches für das Potsdamer Observatorium von Schmidt und Hänsch in Berlin angefertigt worden ist. Der Apparat (Fig. 68, Seite 276) kann entweder auf ein festes Holzstativ aufgelegt werden oder er wird mittelst des Rohrendes *O* in den Ocularstutzen eines grösseren Refractors so weit eingeschoben, dass der Spalt in die Brennebene fällt.

Der im Innern des Rohres liegende Spalt, welcher durch die Schraube *s* symmetrisch zur Mitte geöffnet oder geschlossen werden kann, wird durch

1) Wiedem. Annalen. Bd. 1, p. 351.

2) Monatsber. der K. Preuss. Akad. der Wiss. 1877, p. 104. — Eine ausführliche Kritik des Glan'schen Photometers findet sich in einem Aufsätze von Ketteler und Pulfrich in Wiedem. Annalen, Bd. 15, p. 337.

einen etwa 2 mm breiten Metallsteg in zwei Hälften getheilt. Die eine Hälfte empfängt direct von O her das Licht der zu untersuchenden Lichtquelle, während die andere Hälfte durch eine zur Vergleichung dienende Petroleumlampe l beleuchtet wird. Diese Lampe, durch ein Gegengewicht G ausbalancirt, ist in den Gabeln gg beweglich, ausserdem noch um eine andere Axe drehbar, so dass sie bei allen Lagen des Apparates eine senkrechte Stellung behalten kann; eine Wasserwage w dient zur Controle der richtigen Lage. Das Licht der Lampe fällt zunächst auf das total reflectirende Prisma p und gelangt von diesem auf ein zweites unmittelbar vor dem Spalt sitzendes Prisma (in der Figur

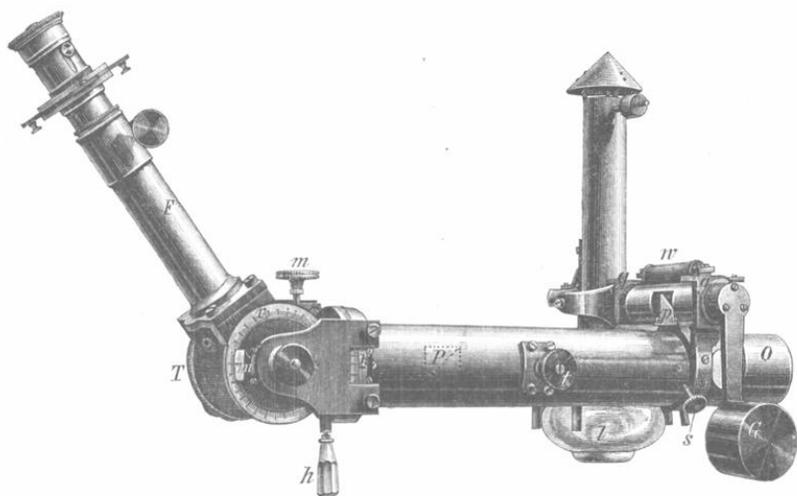


Fig. 68.

nicht sichtbar), welches sich durch eine einfache Vorrichtung nach Belieben vor die eine oder andere Hälfte des Spaltes oder auch ganz bei Seite schieben lässt. Das Vergleichslicht kann auf diese Weise sowohl durch die eine als durch die andere Spalthälfte in das Photometer geleitet werden oder auch ganz davon ausgeschlossen bleiben. Für die Justirung des Apparates ist dies von Vortheil. Die von den beiden Spalthälften kommenden Lichtstrahlen werden durch eine Collimatorlinse, welche mit Hilfe des Triebes t bewegt werden kann, parallel gemacht und gelangen dann auf ein doppeltbrechendes Bergkrystallprisma P , dessen Hauptschnitt der Spaltichtung parallel ist. Das Ende des Hauptrohres nimmt ein Nicolprisma als Analysator ein, welches mittelst des Handgriffes h gedreht werden kann; mit demselben fest verbunden ist eine Kreistheilung k , die an zwei einander gegenüberliegenden Nonien

abgelesen wird. Auf dem runden tellerartigen Stück T ist ein stark zerstreues Flintglasprisma befestigt und zwar in der Weise, dass seine brechende Kante der Spaltrichtung parallel ist, und dass es für Strahlen von mittlerer Brechbarkeit im Minimum der Ablenkung steht. Das Beobachtungsfernrohr F ist wie bei den Vierordt'schen Apparaten mit Schiebervorrichtungen in der Brennebene versehen, welche gestatten, eine rechteckige Öffnung von beliebiger Breite und Höhe herzustellen. Durch die Wirkung des doppeltbrechenden Prismas P und des Flintglasprismas entstehen im Beobachtungsfernrohre vier Spectra, zwei von jeder Spalthälfte, von denen je zwei senkrecht zu einander polarisirtes Licht enthalten. Die Breite des vor der Mitte des Spaltes sitzenden Steges ist so bemessen, dass zwei Spectra unmittelbar aneinander grenzen, während die beiden anderen durch die Schieberplatten verdeckt werden. Mittelst der anderen Schieber lässt sich noch ein beliebig schmaler Streifen aus den Spectren herausblenden, und durch Drehung des analysirenden Nicols kann die Helligkeit beider gleich gemacht werden. Das Intensitätsverhältniss der untersuchten Lichtquelle zu der Petroleumlampe an der betreffenden Stelle des Spectrums wird dann bei richtiger Justirung der einzelnen Theile durch das Quadrat der Tangente des an der Kreistheilung k abgelesenen Winkels gegeben. Natürlich ist es rathsam, behufs Elimination des Index- und Excentricitätsfehlers, wie bei jedem Polarisationsphotometer, die Einstellungen in allen vier Quadranten zu machen. Das Fernrohr F lässt sich noch mittelst der Schraube m um eine durch die Mitte des Flintglasprismas, parallel zu seiner brechenden Kante gehende Axe bewegen, und diese Drehung kann mit Hülfe des Nonius n an der Kreistheilung v abgelesen werden. Man ist so im Stande, jeden beliebigen Theil des Spectrums in die Mitte des Gesichtsfeldes zu bringen. Um die Wellenlänge der untersuchten Stelle aus den Ablesungen an v angenähert angeben zu können, muss für jeden Apparat auf graphischem Wege eine Tabelle hergeleitet werden, welche den Zusammenhang zwischen Wellenlänge und Einstellung am Kreise angiebt. Zu diesem Zwecke wird am Besten das Sonnenspectrum benutzt. Man bringt die bekanntesten Fraunhofer'schen Linien der Reihe nach in die Mitte des schmalen Ocularspaltes, notirt die entsprechenden Ablesungen am Gradbogen v und leitet daraus graphisch eine Einstellungstabelle ab. Da der Ocularspalt öfter mit oder ohne Absicht verändert wird, so muss man sich vor jeder Beobachtungsreihe überzeugen, ob die Tabelle noch Gültigkeit hat; man stellt zu diesem Zwecke den Kreis v auf diejenige Ablesung, welche nach der Tabelle einer bestimmten Spectrallinie, z. B. der D -Linie, entspricht, und verändert eventuell die Stellung der Ocularschieber, bis die Linie genau in der Mitte des Spaltes erscheint.

Es empfiehlt sich im Allgemeinen nicht, diesen Ocularspalt zu breit zu wählen, weil dann, namentlich in den ziemlich dicht zusammengedrängten weniger brechbaren Theilen des Spectrums, ein viel zu grosser Wellenlängenbezirk mit einem Male übersehen wird; andererseits darf aber der Ocularspalt auch nicht zu eng gemacht werden, weil dann die Sicherheit der Beobachtungen leidet. Grossen Vortheil würde die Verwendung von Reflexgittern anstatt der Dispersionsprismen bieten, denn in diesem Falle würde man an allen Stellen des Spectrums ein gleich grosses Wellenlängenintervall übersehen, und die Einstellungen an dem Gradbogen v wären unmittelbar den Wellenlängen proportional. Die directe Benutzung des Normalspectrums hat freilich auch den Nachtheil, dass das Spectrum noch lichtschwächer ist, auch wird man meistens nur das Spectrum erster oder höchstens zweiter Ordnung benutzen dürfen, weil sonst Übereinanderlagerungen störend wären.

Ein grosser Vorzug des Glan-Vogel'schen Spectralphotometers vor dem Vierordt'schen besteht darin, dass viel grössere Helligkeitsunterschiede direct ohne Zuhülfenahme von Blendgläsern gemessen werden können, und dass die Spectralfarben im Allgemeinen viel reiner sind, weil der Spectralspalt nicht weiter geöffnet zu werden braucht, als gerade nöthig ist, damit die störenden Fraunhofer'schen Linien verschwinden. Ein Nachtheil ist dagegen der Lichtverlust, welcher durch die Trennung in zwei Lichtbündel bedingt wird; derselbe erschwert insbesondere die Ausführung der Messungen in den brechbareren Theilen des Spectrums. Was die Genauigkeit anbetrifft, welche bei den Messungen zu erreichen ist, so scheint im Grossen und Ganzen der Vierordt'sche Apparat überlegen zu sein. Während meine Messungen mit diesem für den wahrscheinlichen Fehler einer Beobachtung Werthe zwischen 0.61 und 0.75 Procent ergaben, erhielt ich aus Messungen an dem Glan-Vogel'schen Instrumente Werthe zwischen 1.2 und 2.8 Procent. Die meisten Beobachter finden eine verhältnissmässig grössere Genauigkeit in den mittleren Theilen des Spectrums, als im äussersten Roth und Violett; auch von der absoluten Intensität, bei welcher die Gleichheit in beiden Spectren stattfindet, scheint der Genauigkeitsgrad abhängig, und zwar in der Weise, dass die Sicherheit bei mittleren Helligkeitsgraden am grössten ist, bei sehr heller Beleuchtung am kleinsten. Bei Ablesungen des Intensitätskreises k in der Nähe von 0° oder 90° wäre es ebenso wie bei dem Pickering'schen Meridianphotometer erwünscht, das Nicolprisma feiner als aus freier Hand drehen zu können und den Kreis selbst genauer als bis auf Zehntel Grade abzulesen, weil das Resultat schon durch sehr geringe Fehler in dieser Beziehung merklich beeinflusst wird.

Ein Hauptmangel, der dem Glan-Vogel'schen Instrumente zur Last

gelegt wird, bezieht sich darauf, dass die beiden zu vergleichenden Spectra nicht der ganzen Länge nach in einer scharfen Linie aneinander stossen. Es rührt dies von der Wirkung des doppeltbrechenden Prismas her, welches für violettes Licht das ordentliche und ausserordentliche Bild etwas weiter auseinander bringt, als für rothes Licht. Da dies nun für die Bilder beider Spaltheilften gilt, so müssen die beiden aneinander grenzenden, entgegengesetzt polarisirten Spectra, falls sie sich an einer bestimmten Stelle, z. B. im Grün genau berühren, in den violetten Partien etwas übereinander liegen, dagegen im Roth durch einen dunklen Zwischenraum getrennt sein. Um diesen Übelstand, welcher die Sicherheit der Messungen beeinträchtigt, zu beseitigen, kann man nach Glans Vorgange das Collimatorobjectiv mit Hilfe des Triebes t dem Spalt nähern oder von ihm entfernen. Eine derartige Verschiebung bringt eine Änderung in dem Gange der Strahlen hervor und bewirkt, dass ordentliches und ausserordentliches Bild derselben Spaltheilfte weiter auseinanderfallen oder näher zusammenrücken. Auf diese Weise lassen sich die beiden Spectra in jedem beliebigen Farbenbezirke zum Contact bringen; freilich ist dabei auch jedesmal eine entsprechende Verstellung des Fernrohroculars erforderlich, damit die Linie, in welcher sich die Spectra berühren, scharf erscheint. Crova¹⁾ hat ein einfaches Mittel vorgeschlagen, um die lästige und nicht ganz unbedenkliche Verschiebung von Collimatorobjectiv und Fernrohrocular zu vermeiden. Dasselbe besteht darin, dass man als Trennungssteg einen Metallstreifen benutzt, dessen Ränder nicht parallel sind, sondern einen kleinen Winkel miteinander bilden, und der vermittelt einer Schraube in der Richtung senkrecht zur Spaltlänge verschoben werden kann. Dadurch ist ein Steg von variabler Breite hergestellt, und die genaue Berührung der Spectren lässt sich an jeder beliebigen Stelle erreichen.

Zu erwähnen ist noch, dass durch innere Reflexe an den verschiedenen Linsen und Prismenflächen sehr leicht diffuses Licht erzeugt wird, welches sich wie ein dünner Nebel über das ganze Spectrum verbreitet und die Messungen erschwert. Es wird dies namentlich dann fühlbar, wenn die untersuchte Lichtquelle im Vergleich zur Petroleumlampe sehr intensiv ist; denn in diesem Falle wird die nicht aus dem Nicol austretende ordentliche Componente im Innern desselben mehrfache Reflexion erleiden und einen Lichtschimmer auch auf das Spectrum der anderen Spaltheilfte werfen. Man sieht daher häufig, auch wenn das Licht der Petroleumlampe ganz abgeblendet wird, diejenige Stelle im Gesichtsfelde, wo das Spectrum derselben hinfällt, nicht vollkommen dunkel. Am Auf-

1) Annales de chimie et de physique. Série 5, t. 19, p. 495.

fallendsten und Störendsten treten diese Nebenlichtwirkungen in den brechbareren Partien des Spectrums hervor. Bis zu einem gewissen Grade lässt sich durch sorgfältige Schwärzung der inneren Theile des Apparates Abhilfe schaffen.

5. Das Crova'sche Spectralphotometer.

In mancher Hinsicht verdient das von Crova¹⁾ construirte Spectralphotometer den Vorzug vor dem Glan-Vogel'schen. Bei demselben können entweder einfache Prismen oder Prismensätze à vision directe zur Verwendung kommen; die letzteren haben den Nachtheil, dass die Absorption im Blau und Violett sehr bedeutend ist, und dass ausserdem die Kittung der einzelnen Theile Veränderungen unterworfen ist und die Bilder daher mit der Zeit leicht trübe werden. Crova benutzte einen Satz von fünf Prismen, von denen das mittelste ohne Ablenkung von den Strahlen mittlerer Brechbarkeit durchlaufen wurde, während die anderen paarweise symmetrisch dazu standen. Die Stellung des Beobachtungsfernrohrs lässt sich, wie bei den meisten Spectroskopen à vision directe, an einem Gradbogen ablesen, und mit Hilfe einer Tabelle kann man jeden beliebigen Theil des Spectrums in die Mitte des Gesichtsfeldes einstellen. Das Ocular ist mit der üblichen Schieber-einrichtung versehen. Vor der einen

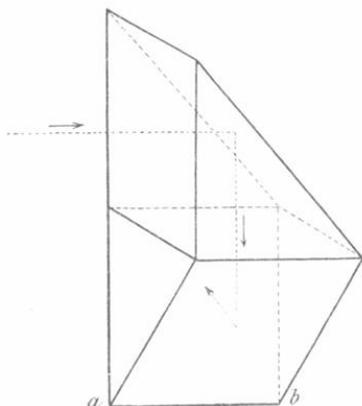


Fig. 69.

totaler Reflexion, welches die aus Fig. 69 ersichtliche Gestalt hat.

Dasselbe besteht aus zwei rechtwinkligen Prismen, von denen das eine so vor der Spaltplatte befestigt ist, dass die scharfe Kante ab senkrecht zur Spaltrichtung ist. Das zweite Prisma sitzt auf dem ersten, und zwar in der Weise, dass die eine Kathetenfläche nach unten, die andere nach der Seite gekehrt ist. Eine seitlich aufgestellte, oder ähnlich wie beim Glan-Vogel'schen Photometer beweglich aufgehängte Vergleichslampe sendet dann ihr Licht auf dem in der Figur durch Pfeile angedeuteten Wege in die eine Spalthälfte, während die andere von der zu untersuchenden Lichtquelle beleuchtet wird. Das Arrangement hat den

1) Annales de chimie et de physique. Série 5, t. 29, p. 556.

Vortheil, dass die beiden Spectra der ganzen Länge nach in einer feinen Linie zusammenstossen, was selten vollkommen zu erreichen ist, wenn man nur ein gewöhnliches totalreflectirendes Prisma anwendet. In einem kurzen seitlichen Rohre, durch welches die Vergleichsflamme ihr Licht sendet, befindet sich ein Nicol, dessen Drehung an einem Theilkreise abgelesen wird; dasselbe dient als Polarisator. Ein zweites festes Nicolprisma ist ebenfalls in dem seitlichen Rohre unmittelbar hinter dem ersten, also vor dem total reflectirenden Prisma angebracht. Ist J die Intensität der direct beobachteten Lichtquelle, J' diejenige der Vergleichsflamme, und ist α der am beweglichen Nicol abgelesene Winkel für den Fall, dass an irgend einer Stelle die Gleichheit der Spectren hergestellt ist, so findet man das Helligkeitsverhältniss der beiden Lichtquellen für die betreffende Spectralfarbe ausgedrückt durch die Formel:

$$\frac{J}{J'} = \frac{1}{2} k \sin^2 \alpha,$$

wo k eine Constante ist, die von der Absorption des Lichtes in den Prismen abhängt. Dabei ist die Stellung des festen Nicols so regulirt, dass am Kreise der Winkel 0 abgelesen wird, wenn gar kein Licht durch die beiden Nicols hindurch gelangt. Wie man sofort sieht, hat das Crova'sche Spectralphotometer den grossen Vorzug, dass die zu untersuchende Lichtquelle nicht, wie beim Glan'schen, durch Doppelbrechung geschwächt wird, und dass auch ein etwaiges Vorhandensein von polarisirtem Lichte keinen Fehler in die Messung bringt. Das Crova'sche Instrument eignet sich daher mehr zur Untersuchung schwächerer Lichtquellen, und es empfiehlt sich, dasselbe für die Sternspectren in Anwendung zu bringen. Da nur die seitliche Vergleichsflamme geschwächt werden kann, so muss dieselbe stets heller und zwar mindestens zweimal so hell sein, als die zu untersuchende Lichtquelle. Wenn dies nicht der Fall ist, so muss man die direct gesehene Lichtquelle durch Blendgläser oder irgend ein anderes Verfahren abschwächen. Es ist dies ein Nachtheil des Crova'schen Apparates.

Eine ganze Anzahl von Spectralphotometern, bei denen ebenfalls die Polarisation des Lichtes zur Verwendung kommt, sind dem Crova'schen ähnlich. Unter ihnen sind besonders hervorzuheben die Photometer von Gouy¹⁾ und Glazebrook²⁾, welche sich dadurch von den bisher erwähnten unterscheiden, dass für die beiden zu vergleichenden Lichtquellen zwei besondere Collimatoren benutzt werden, was für manche Untersuchungen von Vortheil ist.

1) Annales de chimie et de physique. Série 5, t. 18, p. 1.

2) Proc. of the Cambridge Philos. Soc. T. 4, p. 304.

6. Das Interferenz-Spectralphotometer von Trannin.

Kurze Erwähnung verdient noch eine Classe von Spectralphotometern, bei denen das Verschwinden von Interferenzstreifen beobachtet wird. Das bekannteste dieser Instrumente, welches noch älter als die Photometer von Glan und Crova ist, rührt von Trannin¹⁾ her. Die beiden zu vergleichenden Lichtquellen werfen ihr Licht von entgegengesetzten Seiten auf zwei total reflectirende Prismen, welche die obere und die untere Spaltheilte eines Spectralapparates bedecken. Beim Austritt aus dem Collimator werden die Strahlen durch irgend einen Polarisator (Nicol'sches oder Foucault'sches Prisma), dessen Hauptschnitt der Spaltrichtung parallel ist, polarisirt, passiren dann eine senkrecht zur Axe geschnittene Quarzplatte von etwa 1 cm Dicke, deren Hauptschnitt einen Winkel von 45° mit dem des Polarisators bildet, gehen ferner durch ein Rochon'sches oder Wollaston'sches Prisma, dessen Hauptschnitt wieder parallel dem des Polarisators ist, und werden dann erst durch die Prismen des Spectralapparates in die einzelnen Farben zerlegt. Im Beobachtungsfernrohre erblickt man vier Spectra, von denen je zwei entgegengesetzt zu einander polarisirt sind, und von denen die beiden mittleren (den beiden Lichtquellen zugehörig) zum Theil übereinander liegen. Durch die Quarzplatte werden in allen vier Spectren Interferenzstreifen hervorgebracht, und zwar wechseln in den senkrecht zu einander polarisirten Spectren die dunklen und hellen Streifen miteinander ab. In dem Theile, wo die Spectra übereinander liegen, und der allein beobachtet wird, verschwinden die Streifen vollständig, sobald das Licht beider Lichtquellen in dem betreffenden Spectralbezirke gleich ist. Man stellt diese Gleichheit dadurch her, dass man eine der beiden Lichtquellen oder auch beide verschiebt; das Verhältniss der Quadrate der Distanzen von dem Spalt giebt dann das gesuchte Helligkeitsverhältniss. Dabei ist Rücksicht zu nehmen auf die ungleiche Durchlässigkeit der Dispersionsprismen für die senkrecht zu einander polarisirten Strahlensysteme, was dadurch erreicht werden kann, dass man während der Beobachtungen das doppeltbrechende Prisma um 180° dreht. Das Verfahren wird noch exacter, wenn man stets eine dritte constante Lichtquelle, die unveränderlich mit dem Apparate in Verbindung gebracht werden kann, als Vergleichsobject benutzt, und diese mit jeder der zu untersuchenden Lichtquellen vergleicht. Die Veränderung der Intensitäten kann natürlich anstatt durch Variation der Distanzen auch durch irgend eine andere Methode bewirkt werden, z. B. durch Drehung eines Nicolprismas zwischen Ocular und Auge.

1) Comptes Rendus. T. 77 (1873), p. 1495. Siehe auch Journal de physique, T. 5 (1876), p. 297.

Auf ganz ähnlichen Principien wie das Trannin'sche Photometer beruhen die Apparate von Gouy¹⁾, Krech²⁾ und Violle³⁾. Auch Wild⁴⁾ hat sein zweites Photometer in ein Spectralphotometer umgewandelt. Sämmtliche Instrumente gestatten eine grosse Genauigkeit der Messungen, leiden aber an dem gemeinsamen Übelstande, dass ein beträchtlicher Theil des Lichtes absorbirt wird, und dass sie daher nur zur Messung sehr intensiver Strahlungen geeignet sind. Für die Sternphotometrie dürften sie kaum verwendbar sein.

7. Spectralphotometer mit Absorptionskeil.

Zu Untersuchungen über die Helligkeitsvertheilung im Spectrum der Sonne und des Mondes ist in neuester Zeit für das Potsdamer Observatorium nach meinen Angaben von Töpfer ein Apparat construirt worden, bei welchem das Auslöschungsprincip zur Anwendung kommt. Der äusseren Form nach ist das Instrument (Fig. 70, Seite 284) vollkommen ähnlich dem grossen Potsdamer Keilphotometer (Seite 192); es ist parallaktisch montirt, und das Beobachtungsfernrohr H' ist nach dem Pol gerichtet.

Der Collimator C ist seitlich in den Würfel w eingeschraubt, und der Spalt wird durch die Schraube s symmetrisch zur Mitte verbreitert oder verengt. Vor dem Spalte sitzt in dem Rohre R ein total reflectirendes rechtwinkliges Prisma. Das Rohr ist um die Axe des Collimators drehbar, und an der Kreistheilung k lässt sich die Declination des betrachteten Himmelsobjectes einstellen. Eine kleine Linse l am Ende des Rohres entwirft auf der Scheibe m ein punktförmiges Bild der Sonne oder des Mondes, und die Justirung der einzelnen Theile ist so angeordnet, dass das Bildehen sich auf die Mitte dieser Scheibe projicirt, wenn das Licht genau auf die Mitte des Spaltes fällt. Während der Beobachtung hat ein Gehülfe durch langsames Drehen an der Feinbewegung f des Stundenkreises dafür zu sorgen, dass das Sonnenbildehen beständig auf der Scheibenmitte bleibt. Im Innern des Würfels w ist ein Rowland'sches Diffractionsgitter angebracht, dessen Striche der Spalt-richtung parallel sind. Dieses Gitter kann mittelst des Knopfes n um

1) Comptes Rendus. T. 83 (1876), p. 269 und Annales de chimie et de physique, Série 5, t. 18, p. 15.

2) Krech, Photometrische Untersuchungen. (Wissensch. Beilage zum Programm des Luisenstädtischen Gymnasiums zu Berlin, 1883.)

3) Annales de chimie et de physique. Série 6, t. 3, p. 391.

4) Bull. de l'acad. Imp. des sciences de St. Pétersbourg. T. 28, p. 392. — Siehe auch Wiedem. Annalen, Bd. 20, p. 452.

grössere Beträge, mittelst der Feinbewegung i um minimale Strecken gedreht werden, und die Drehung wird an dem Gradbogen v mit Hilfe von Nonius und Lupe abgelesen. Auf diese Weise wird jeder beliebige Theil des Spectrums in die Mitte des Gesichtsfeldes gebracht. An dem Ocularende des Beobachtungsfernrohrs ist das auf Seite 184 beschriebene Keilphotometer angesetzt; an Stelle des dort erwähnten Steges wird durch den Knopf r ein Schieber unmittelbar vor den Keil eingeführt, welcher das ganze Gesichtsfeld bis auf eine schmale spaltförmige Öffnung, die genau parallel den Spectrallinien zu stellen ist, abblendet.

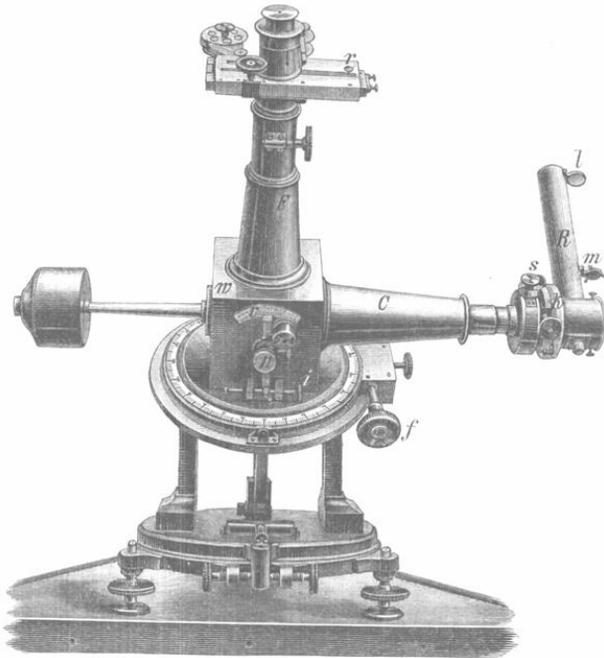


Fig. 70.

Man bringt nun durch Drehung des Gitters die einzelnen Spectralbezirke in diesen Ocularspalt und löscht dieselben mit Hilfe des Keiles aus. Es versteht sich ganz von selbst, dass der Beobachter durch Bedecken mit einem dunklen Tuche vor jedem äusseren Lichte geschützt sein muss. Die früher erwähnten Übelstände des Keilphotometers machen sich natürlich im vollen Grade fühlbar, und ganz besonders bedenklich ist hier der Umstand, dass die dunklen Glassorten, aus denen die Keile gefertigt werden, selten alle Farben gleichmässig absorbiren. Eine sorgfältige Untersuchung der benutzten Keile in dieser Beziehung ist durchaus er-

forderlich, und es ist rathsam, für alle diejenigen Spectralgegenden, in denen man Messungen vornehmen will, die Keilconstante besonders zu bestimmen.

Im Grossen und Ganzen bietet die Auslöschungsmethode in der Spectralphotometrie manche Vortheile und dürfte sich vielleicht, mit entsprechenden Modificationen, auch zur Beobachtung der Sternspectren eignen.

Capitel IV.

Einiges über Lichtmessungsverfahren, bei denen nicht das Urtheil des Auges zur Anwendung kommt.

In den vorangehenden Capiteln sind nur solche lichtmessenden Apparate besprochen worden, bei denen es in letzter Instanz auf das Urtheil des Auges ankommt, sei es, um das Verschwinden eines Lichteindruckes auf der Netzhaut zu constatiren, sei es, um die Gleichheit zweier verschiedenen Lichteindrücke zu beurtheilen. Wenn wir die Definitionen Lichtstärke, Helligkeit u. s. w. ausschliesslich auf diejenige Wirkung der Ätherbewegung beziehen, welche in unserem Auge eine Gesichtsempfindung hervorruft, so ist damit das Gebiet der Photometrie streng abgegrenzt, und unsere messenden Hilfsmittel sind mit den bisher aufgezählten nahezu erschöpft. Gleichzeitig ist damit auch die Genauigkeitsgrenze, die bei photometrischen Messungen überhaupt erreichbar ist, festgelegt; sie hängt ganz und gar von der Empfindlichkeit der Netzhaut ab, und da wir wissen, dass diese von Person zu Person verschieden ist, und selbst bei demselben Beobachter im Laufe der Zeit merklichen Schwankungen unterworfen sein kann, so sind wir gezwungen, uns mit einem Grade der Sicherheit zu begnügen, den wir durch keine Verfeinerung unserer instrumentellen Hilfsmittel erhöhen können. Der berechtigete Wunsch, diese Grenze, wenn irgend möglich, noch zu überschreiten, hat immer wieder den Gedanken angeregt, bei den Helligkeitsmessungen das unvollkommene Sehorgan ganz entbehrlich zu machen und

die physiologische Wirkung durch irgend eine andere weniger subjective zu ersetzen. Insbesondere hat man versucht, die von jeder Lichtquelle ausgehende Wärmewirkung und die von ihr hervorgerufenen chemischen Prozesse als Mass der Helligkeit zu verwerthen. Die Berechtigung zu diesen Versuchen bedarf keiner Vertheidigung, und da jede Veränderung der Lichtstärke (in dem gewöhnlichen Sinne) auch von einer Veränderung der Wärme und der chemischen Wirkung begleitet ist, so kann man mit gewissem Fug und Recht Apparate, welche zur Messung dieser Wirkungen dienen, auch Photometer nennen; nur darf man nicht vergessen, dass photographische, optische und thermische Photometrie, wenn man sie so nennen will, wesentlich voneinander verschieden sind, und dass ein directer Zusammenhang zwischen ihnen, wenn überhaupt, jedenfalls nur mit grossen Schwierigkeiten ermittelt werden kann. Man nimmt zwar nicht mehr an, wie es früher häufig geschah, dass allein die am Wenigsten brechbaren Strahlen eine Wärmewirkung, die brechbarsten lediglich eine chemische Wirkung ausüben, während die mittleren die Gesichtsempfindung hervorrufen; man weiss jetzt, dass innerhalb des ganzen sichtbaren Spectrums sowohl eine erwärmende als eine chemische Wirkung der Strahlen vorhanden ist, und dass nur das Maximum derselben sich verschiebt, je nach der Beschaffenheit derjenigen Körper, welche dem Lichte ausgesetzt sind. Das Maximum der Wärmewirkung im Spectrum bei Verwendung von gewöhnlichen Glasprismen liegt im Roth, dagegen bei Benutzung eines Wasserprismas im Gelb; ebenso kann das Maximum der photographischen Wirkung aus dem Violett nach jedem anderen Theile des sichtbaren Spectrums rücken, je nach den Substanzen, mit denen man die empfindlichen Platten imprägnirt. Die Frage, ob es möglich ist, aus der Stärke der einen Wirkung unmittelbar auf die der anderen zu schliessen, und ob man daher berechtigt ist, die verschiedenen Wirkungen nach Gefallen durch einander zu ersetzen, ist im Princip durchaus zu verneinen. Eine Proportionalität findet unter gewissen Bedingungen allerdings statt. Handelt es sich z. B. um zwei Lichtquellen, welche nur Strahlen von ein und derselben bestimmten Wellenlänge aussenden, so wird man finden, dass, wenn die eine doppelt so hell erscheint als die andere, dann auch die thermische und chemische Wirkung der ersten doppelt so stark ist als diejenige der zweiten. Etwas Ähnliches wird sich ergeben, wenn es sich nicht um homogenes Licht handelt, sondern um zusammengesetztes Licht von solcher Beschaffenheit, dass die einzelnen Strahlengattungen bei beiden Lichtquellen in gleichem Verhältnisse vorkommen. Hat man z. B. zwei Sterne von genau gleichem Spectraltypus, so wird man für ihr Energieverhältniss dieselben Werthe erwarten können, sei es, dass man sie mit Hülfe der Thermosäule oder

eines unserer optischen Photometer oder auf photographischem Wege miteinander vergleicht. Handelt es sich jedoch um Licht von ganz verschiedener Zusammensetzung, so hört jede Proportionalität zwischen den drei fraglichen Wirkungen auf, und man kann nicht unmittelbar von der einen auf die andere schliessen. Bestimmt man z. B. die Extinctionscurve in der Erdatmosphäre durch thermische, optische und photographische Messungen, so ist der Verlauf derselben in allen drei Fällen ein absolut anderer, weil die selective Absorption der Atmosphäre die Zusammensetzung des Spectrums beständig verändert. Aus dem Gesagten dürfte bereits zur Genüge hervorgehen, dass Apparate, welche speciell zur Messung der thermischen und chemischen Wirkung des Lichtes bestimmt sind, nur in sehr beschränktem Masse die physiologischen Photometer zu ergänzen oder gar zu ersetzen vermögen. Es wäre daher in einem Lehrbuche der Astrophotometrie, welches in erster Linie die physiologische Wirkung des Lichtes behandeln will, ohne Zweifel erlaubt, von diesen Apparaten ganz abzusehen und in Betreff derselben auf die ausführlichen Schriften über Actinometrie und Photographie zu verweisen. Vielleicht wird aber doch ein kurzer Überblick über die wichtigsten Hilfsmittel und Messungsverfahren auf diesen Gebieten nicht unerwünscht sein. Insbesondere dürfte ein Hinweis auf die Anwendung der Photographie vollauf berechtigt erscheinen, schon aus dem Grunde, weil heute die photographischen Helligkeiten der Fixsterne neben den optischen bereits Bedeutung erlangt haben. Ich möchte aber ausdrücklich hervorheben, dass dieses Capitel weder auf Vollständigkeit noch auf besondere Gründlichkeit Anspruch macht.

1. Apparate zur Messung der thermischen Wirkungen des Lichtes.

a. Die wichtigsten Actinometer.

In seiner »Photometria« (§ 886) erwähnt Lambert die Versuche, die er zur Bestimmung der Extinction des Sonnenlichtes in der Erdatmosphäre angestellt hat. Diese Versuche sind nicht mit eigentlichen Photometern ausgeführt worden, vielmehr hat sich Lambert dabei der thermischen Methode bedient, indem er ein gewöhnliches Thermometer den directen Sonnenstrahlen aussetzte, dasselbe mit einem zweiten, im Schatten liegenden Thermometer verglich und die Differenz der Ablesungen als Mass für die Stärke der Sonnenstrahlung betrachtete. Dass Lambert diese Messungen ganz gleichbedeutend mit irgend welchen anderen Lichtmessungen auffasste, geht aus seinen Worten unzweideutig hervor; man

wird sich aber wohl mit Rücksicht auf die grundverschiedenen Verfahren kaum wundern dürfen, dass die Lambert'schen Extinctionsresultate sehr erheblich von allen anderen, auf rein photometrischem Wege abgeleiteten abweichen.

Nach Lamberts Vorgange ist noch häufig die Differenz der Angaben zweier Thermometer zu Strahlungsmessungen benutzt worden, und um die Empfindlichkeit zu erhöhen, hat man Thermometer mit geschwärzten oder versilberten Kugeln benutzt. Von den älteren Apparaten dieser Art sind besonders das Heliothermometer von de Saussure¹⁾, das Differentialthermometer von Leslie²⁾, dem der Erfinder selbst den Namen Photometer beigelegt hat, das Rumford'sche³⁾ Thermoskop und das Ritchie'sche⁴⁾ Photometer, welches eine Modification des Leslie'schen Instrumentes ist, zu erwähnen. Die drei letzten Apparate sind Luftthermometer mit zwei gleich grossen Glaskugeln, die durch eine gebogene Röhre miteinander verbunden sind; in der Röhre ist irgend eine Flüssigkeit enthalten. Wird die eine Kugel von einer Lichtquelle bestrahlt, während die andere durch einen Schirm vor Bestrahlung geschützt ist, so bewegt sich die Flüssigkeit, sobald die Luft in den beiden Gefässen sich ungleich ausdehnt. Die eine Kugel ist gewöhnlich geschwärzt. Die Genauigkeit der Differentialthermometer wird nicht unwesentlich beeinträchtigt durch den Umstand, dass die Strahlung erst das Glas zu passiren hat, ehe sie auf die Luft einwirken kann, und ferner noch mehr dadurch, dass sich in der benutzten Flüssigkeit Dämpfe entwickeln, deren Expansion die Bewegung der Flüssigkeit mit beeinflusst und daher die Angaben des Instrumentes verfälscht.

Bei den meisten der vorher erwähnten Apparate kommt es darauf an, zu constatiren, wann der Überschuss der Temperatur der bestrahlten über die unbestrahlte Thermometerkugel den Höhepunkt erreicht hat. Man nennt diese Methode die statische. Häufig wird an Stelle derselben die dynamische Methode angewandt, welche darin besteht, die Verschiebung der Flüssigkeit in den Thermometern während eines bestimmten Zeitintervalles, abwechselnd bei Bestrahlung und Nichtbestrahlung, zu messen. Das erste Instrument dieser Art ist das Actinometer von J. Herschel⁵⁾, welches aus einem sehr empfindlichen Thermometer mit grosser Kugel und einer dunkel gefärbten Flüssigkeit besteht. Man wendet dasselbe in der Weise an, dass man es eine Minute lang der

1) De Saussure, Voyage dans les Alpes. Bd. 2, p. 294.

2) Leslie, Inquiry into the nature and propagation of heat. London, 1804.

3) Phil. Trans. of the R. Soc. of London. 1804, p. 77.

4) Phil. Trans. of the R. Soc. of London. 1825, p. 141.

5) The Edinburgh Journal of science. Vol. 3 (1825), p. 107.

Strahlung aussetzt und das Anwachsen der Temperatur während dieser Zeit beobachtet, dann das Instrument eine Minute lang vor den directen Strahlen durch einen Schirm schützt und das weitere Anwachsen oder Abnehmen der Temperatur während dieser Zeit beobachtet. Ein Anwachsen im Schatten deutet darauf hin, dass das Steigen während der Bestrahlung nicht dem Einflusse derselben allein zuzuschreiben war, sondern zum Theil von indirecter Wärmezufuhr (z. B. durch die umgebenden Gegenstände oder die Theile des Apparates u. s. w.) herrührt. Um den reinen Einfluss der Strahlung und somit ein Mass für ihre Intensität zu erhalten, hat man also in diesem Falle die Zunahme im Schatten von der Zunahme während der Bestrahlung zu subtrahiren. Im anderen Falle, wenn eine Abnahme im Schatten eintritt, muss der Betrag derselben zu dem Anwachsen während der Bestrahlung hinzuaddirt werden.

Noch brauchbarer als das Herschel'sche Actinometer hat sich das Pouillet'sche Pyrheliometer¹⁾ erwiesen, welches im Wesentlichen aus einem flachen, cylindrischen, mit Wasser gefüllten Gefässe besteht, dessen vordere geschwärzte Fläche die Sonnenstrahlen senkrecht aufängt. In das Gefäss taucht ein Thermometer ein. Da die Quantität des Wassers bekannt ist, so kann man aus dem Steigen des Thermometers während eines bestimmten Zeitraums (nach Pouillet 5 Min.) die Strahlungsmenge bestimmen, welche die geschwärzte Oberfläche in dieser Zeit von der Sonne empfängt. Um den durch Ausstrahlung in die Umgebung bewirkten Verlust zu berücksichtigen, beobachtet man während weiterer 5 Minuten das Sinken des Thermometers im Schatten und addirt diesen Betrag zu der vorher erhaltenen Strahlungsmenge hinzu. Als Masseinheit für die Strahlung betrachtet man diejenige Wärmemenge, welche erforderlich ist, um 1 kg Wasser um 1° (C.) zu erhöhen.

Aus neuerer Zeit stammen eine grosse Anzahl von Actinometern, bei denen zum Theil die im Vorangehenden erwähnten Methoden mit wichtigen Verbesserungen zur Anwendung kommen, zum Theil noch empfindlichere Hilfsmittel, insbesondere die Thermosäule in Verbindung mit dem Galvanometer, benutzt werden. Die wichtigsten dieser Instrumente, auf die hier nicht näher eingegangen werden kann, sind die Actinometer von Secchi²⁾, Violle³⁾, Crova⁴⁾ und Eriesson⁵⁾.

1) Comptes Rendus. Tome 7, p. 24.

2) Bollettino dell'osserv. del Collegio Romano. 1863, p. 19.

3) Comptes Rendus. Tome 78, p. 1425; t. 82, p. 729 und 896.

4) Crova, Mesures de l'intensité calorifique des radiations solaires et de leur absorption par l'atmosphère terrestre (Mém. de l'acad. des sciences et lettres de Montpellier). Paris 1876.

5) Nature. Vol. 4, p. 204 u. 449; Vol. 5, p. 287, 344, 505; Vol. 12, p. 517.

b. Das Langley'sche Bolometer.

Die vorhergenannten Apparate zur Messung der Lichtstrahlung werden an Empfindlichkeit wesentlich durch das von Langley¹⁾ erfundene Bolometer übertroffen, welches die allergeringsten Strahlungsänderungen anzeigt und daher vielleicht auch für die lichtschwachen Himmelsobjecte nutzbar zu werden verspricht. Das Bolometer beruht auf der bekannten Thatsache, dass sich der elektrische Widerstand in dünnen Metallstreifen unter dem Einflusse einer Bestrahlung ändert. Es besteht aus einer Wheatstone'schen Brücke, in deren beide Zweige je ein System von dünnen Eisen- oder Platinstreifen eingeschaltet ist. Das eine dieser Systeme wird der zu untersuchenden Strahlung ausgesetzt. Hierdurch vermehrt sich der elektrische Leitungswiderstand im entsprechenden Stromzweige, und das Gleichgewicht in der Wheatstone'schen Brücke wird gestört. Das in diese Brücke eingeschaltete Galvanometer, welches sich bei gleicher Temperatur der beiden Streifensysteme in Ruhe befindet, wird nun bei Verschiedenheit des Leitungswiderstandes einen Ausschlag zeigen, und die Grösse dieses Ausschlages ist ein Mass für die Intensität der ausgetübten Strahlungswirkung. Langley hat mit diesem empfindlichen Instrumente seine epochemachenden Untersuchungen über die Vertheilung der Energie im Diffractionsspectrum der Sonne ausgeführt, und es ist ihm gelungen, die Strahlungswirkungen nicht nur in allen Theilen des sichtbaren Spectrums, sondern auch bis weit über die Grenzen desselben hinaus zu bestimmen. Das kleine Instrument, dessen Behandlung allerdings wegen verschiedener Fehlerquellen die alleräusserste Vorsicht erfordert, ist in jüngster Zeit noch in mancher Hinsicht verfeinert worden²⁾.

c. Das Boys'sche Radiomikrometer.

Von Boys³⁾ ist zur Messung sehr schwacher Strahlungen ein Instrument construirt worden, bei welchem ein empfindliches Thermoelement zur Verwendung kommt. Dieses Element besteht im Wesentlichen aus einem Rahmen, gebildet von sehr schmalen Lamellen aus Antimon und Wismuth, die mit ihren unteren Enden an ein dünnes Kupferscheibchen gelöthet sind, während die oberen Enden durch einen gekrümmten Kupferdraht miteinander verbunden sind. Der Rahmen hängt an einem dünnen

1) Proc. of the Amer. Acad. of arts und sciences. Vol. 16 (1880—81), p. 342.

2) Wiedem. Annalen. Bd. 46, p. 204.

3) Proc. of the R. Soc. of London. Vol. 42, p. 189. Ausserdem Phil. Trans. of the R. Soc. of London. 1889 A, p. 159.

Quarzfaden zwischen den Polen eines kräftigen Magneten. Wird die Lötstelle von einer Strahlung getroffen, so tritt der erzeugte Thermostrom mit dem magnetischen Felde in Wechselwirkung, und der Rahmen erhält daher eine Ablenkung aus der Ruhelage, welche der Strahlungsintensität proportional ist. Eine einfache Spiegelablesung mit Scala giebt den Betrag der Drehung an. Das Instrument hat neben hoher Empfindlichkeit noch den Vortheil, dass es von den störenden Einwirkungen der äusseren Temperatur und des äusseren Magnetismus unabhängig ist. Boys hat dasselbe zu Versuchen über die vom Monde, von Planeten und hellen Fixsternen ausgehende Strahlungsintensität benutzt¹⁾ und ist dabei im Gegensatz zu anderen Beobachtern zu dem Resultate gekommen, dass sich eine Sternenstrahlung nicht mit Sicherheit nachweisen lässt.

d. Das Crookes'sche Radiometer und das Zöllner'sche Scalenphotometer.

Ein gewisses Aufsehen hat das von Crookes²⁾ erfundene Radiometer erregt, bei welchem die von einer Lichtquelle ausgesandte Strahlung direct in Bewegung umgesetzt wird. Ein vierarmiges Kreuz aus Aluminiumdraht ruht mittelst eines Glashütchens auf einer feinen Spitze. An jedem Arme ist ein Blättchen aus Glimmer befestigt, welches auf der einen Seite mit Russ überzogen ist; die schwarzen Seiten aller vier Blättchen sind nach derselben Drehungsrichtung hingewandt. Die ganze Vorrichtung befindet sich innerhalb einer Glaskugel, in welcher die Luft ausserordentlich verdünnt worden ist. Unter der Einwirkung einer Lichtstrahlung beginnt das Kreuz zu rotiren und zwar stets in solchem Sinne, dass die nicht beruhten Flächen vorangehen. Die Bewegung ist um so schneller, je stärker die Strahlung ist, und durch die verschiedenartigsten Versuche ist nachgewiesen, dass die Rotationsgeschwindigkeit direct der Strahlungsintensität proportional ist. Zöllner³⁾ hat nach dem Crookes'schen Princip ein sehr compendiöses Instrument construiert, dem er den Namen Scalenphotometer gegeben hat, und bei dem das Radiometerkreuz wie bei einer Drehwage an einem Coconfaden aufgehängt ist. Massgebend für die Schnelligkeit der Drehung ist der Grad der Verdünnung der in dem Glasrecipienten enthaltenen Luft; im Allgemeinen steigert sich die Empfindlichkeit mit zunehmender Verdünnung, jedoch nur bis zu einer

1) Proc. of the R. Soc. of London. Vol. 47, p. 480.

2) Phil. Trans. of the R. Soc. of London. 1873, p. 277.

3) Zöllner, Das Scalen-Photometer, ein neues Instrument zur mechanischen Messung des Lichtes etc. Leipzig, 1879.

gewissen Grenze. Ferner wird die Beweglichkeit um so grösser, je ungleichartiger die beiden Seiten der Radiometerflügel in Betreff ihres Strahlungsvermögens sind. Lampenruss und Versilberung sind die wirksamsten Contraste; bei gleicher Beschaffenheit der Seiten findet überhaupt keine Drehung statt.

Lässt man nur Strahlen von bestimmter Brechbarkeit auf das Radiometer einwirken, so findet man, dass die Bewegungsgeschwindigkeit um so grösser wird, je weniger brechbar die Strahlen sind, ein Beweis, dass die thermischen Wirkungen den hauptsächlichsten Einfluss auf die Vorgänge ausüben. Meistens nimmt man zur Erklärung der Erscheinungen die kinetische Gastheorie zur Hülfe, nach welcher die einzelnen Moleküle eines Gases in rascher Bewegung nach allen Richtungen begriffen sind und daher theils gegeneinander, theils gegen die umgebenden Gefässwände und andere Hindernisse anprallen und zurückgestossen werden. An den höher erwärmten geschwärzten Flächen werden die Moleküle häufiger zurückgeworfen als an den nicht geschwärzten, und dadurch wird die Reaction auf die beweglichen Blättchen bestimmt. Obgleich diese Hypothese nicht alle Einzelheiten der Erscheinung erklärt, so verdient sie doch vor vielen anderen weit complicirteren Hypothesen den Vorzug.

2. Apparate zur Messung der chemischen Wirkungen des Lichtes.

a. Das chemische Photometer von Bunsen und Roscoe.

Von der schon früher bekannten Fähigkeit des Lichtes, chemische Veränderungen hervorzubringen, ist mehrfach zu Strahlungsmessungen Gebrauch gemacht worden. Nachdem im Jahre 1843 Draper einen Apparat construirt hatte, bei welchem die Strahlungsintensität aus der Wirkung des Lichtes auf ein Gemenge von Chlor und Wasserstoff bestimmt wurde, ist diese Methode von Bunsen und Roscoe¹⁾ weiter ausgebildet und vervollkommenet worden. Das von ihnen construirte chemische Photometer ist eine thermometerartige Vorrichtung, bestehend aus einem kleinen zum Auffangen der Strahlung bestimmten Gefässe, einem dünnen mit Scala versehenen Rohre und einem grösseren Behältnisse am anderen Ende. Dieses Behältniss und ein Theil des kleinen Gefässes sind mit Wasser gefüllt. Durch das Ganze wird mittelst eines besonderen Verfahrens ein Gemenge

1) Pogg. Annalen. Bd. 96, p. 373; Bd. 100, p. 43 u. 481; Bd. 101, p. 235; Bd. 108, p. 193; Bd. 117, p. 529.

von gleichen Volumtheilen Chlor und Wasserstoff so lange hindurchgeleitet, bis die Flüssigkeiten vollständig gesättigt sind und der übrige Raum damit erfüllt ist. Wird nun das Insolationsgefäss allein dem Lichte exponirt, so verbindet sich unter der Einwirkung desselben der Wasserstoff mit dem Chlor zu Salzsäure, und da diese von dem Wasser im Gefässe absorbirt wird, so bewirkt die Volumverminderung des Gasgemenges ein Vorrücken der Flüssigkeit aus dem grösseren Behälter in das Scalrohr. Aus der Grösse der Verschiebung lässt sich die Stärke der Lichtwirkung bestimmen, und zwar folgt aus zahlreichen Versuchen, dass die chemische Wirkung (d. h. die Volumveränderung des Gases) direct der Intensität der Strahlung proportional ist. Dabei sind freilich eine Menge von Nebenumständen zu beachten, insbesondere ist darauf Rücksicht zu nehmen, dass der Beginn des Processes eine gewisse Zeit verlangt, die von der Lichtstärke abhängt, und dass ebenso wieder von dem Beginn der chemischen Wirkung bis zur Erreichung des Maximums eine Zeit vergeht, deren Dauer mit der Intensität der Strahlung variirt. Auf diese und andere damit zusammenhängende Fragen kann hier nicht näher eingegangen werden.

b. Das Selenphotometer.

Das krystallinische Selen besitzt die merkwürdige Eigenschaft, unter Einwirkung des Lichtes die Elektrizität besser zu leiten als im Dunklen. Dieses Verhalten des Selens ist zuerst von Sale¹⁾, dann besonders eingehend von Siemens²⁾ studirt worden, und es sind mehrfach Versuche gemacht worden, dasselbe zur Construction von Photometern zu verwerthen. Ein vollständiger Erfolg ist bisher nicht zu erzielen gewesen, hauptsächlich wegen der Unbeständigkeit der Erscheinungen. Eine längere Dauer der Belichtung hat nämlich eine Abnahme der Wirkung, eine »Ermüdung« der Substanz zur Folge, und ein ähnlicher Effect wird durch allzu intensive Lichtstrahlungen hervorgebracht, ferner wird durch die geringste Verunreinigung des Selens mit anderen Metallen die Lichtempfindlichkeit vermindert. Nach den Untersuchungen von Siemens nimmt die Leitungsfähigkeit nicht proportional der Lichtstärke selbst zu, sondern nahezu proportional der Quadratwurzel aus derselben. Die Wirkung geht hauptsächlich von den sichtbaren Strahlen des Spectrums aus; sie beginnt mit dem Violett, steigt von da ziemlich gleichmässig bis zum Roth, ist noch im Ultraroth zu constatiren, verschwindet aber darüber hinaus.

1) Proc. of the R. Soc. of London. Vol. 21, p. 283.

2) Monatsb. der K. Preuss. Akad. der Wiss. 1875, p. 280; 1876, p. 95; 1877, p. 299.

Siemens erklärt die Erscheinungen dadurch, dass die Lichtstrahlen direct eine Molekularveränderung des Selen hervorbringen, indem sie das krystallinische Selen zu metallischem, viel besser leitendem reduciren; nach Aufhören der Beleuchtung bildet sich die metallische Selenoberfläche wieder in krystallinisches Selen zurück.

Siemens hat noch auf eine andere eigenthümliche Eigenschaft des Selen im Verhalten gegen die Lichtstrahlen aufmerksam gemacht¹⁾. Er hat nämlich gefunden, dass manche Selenplatten bei der Beleuchtung nicht besser leitend werden, dagegen selbst elektromotorisch wirken, als ob die Energie des Lichtes unmittelbar in elektrische Energie umgewandelt würde. Die auffallende Erscheinung ist in neuerer Zeit von Minchin²⁾ weiter verfolgt worden. Derselbe hat photoelektrische Elemente, ähnlich den galvanischen Elementen, construiert, bestehend aus Selen, Aluminium und einer Flüssigkeit. Im Dunklen zeigen dieselben keinerlei Wirkungen, dagegen entwickeln sie bei Belichtung des Selen eine elektromotorische Kraft, die mittelst eines empfindlichen Elektrometers gemessen werden kann. Die einwirkende Lichtquantität ist direct dem Quadrate der beobachteten elektromotorischen Kraft proportional. Minchin hat in allerjüngster Zeit³⁾ solche photoelektrischen Elemente in einem grossen Teleskop an Stelle des Oculares angebracht und versucht, mittelst derselben die von den Sternen ausgehende Energie zu bestimmen. Bei der Vergleichung gleich gefärbter Sterne zeigen seine Resultate eine vollkommene Übereinstimmung mit den Ergebnissen der photometrischen Messungen. Eine weitere Ausbildung der im hohen Grade beachtenswerthen photoelektrischen Methode könnte für die ganze Photometrie des Fixsternhimmels bedeutungsvoll werden.

c. Die Photographie als photometrisches Hilfsmittel.

Bald nachdem durch die epochemachende Entdeckung Daguerres (im Jahre 1839) die Möglichkeit gegeben war, das auf einer jodirten Silberplatte unter Einwirkung des Lichtes erzeugte latente Bild durch Behandlung mit Quecksilberdämpfen hervorzurufen und dauernd auf der Platte zu erhalten, tauchte der Gedanke auf, das neue Verfahren auch zu quantitativen Lichtmessungen nutzbar zu machen. Arago ist wohl der Erste gewesen, welcher auf die Bedeutung der Photographie für Lichtmessungen hingewiesen hat, und auf seinen Einfluss sind auch die ersten gründlichen

1) Sitzungsber. der K. Preuss. Akad. der Wiss. 1885, p. 147.

2) Philos. Mag. Ser. 5, Vol. 31, p. 207.

3) Nature. Vol. 49, p. 270; Vol. 52, p. 246. — Ausserdem Proc. of the R. Soc. of London. Vol. 58, p. 142.

Untersuchungen auf diesem Gebiete zurückzuführen, die im Jahre 1844 von Fizeau und Foucault¹⁾ angestellt worden sind. Diese gingen von dem durchaus plausibel erscheinenden Grundsatz aus, dass die von einer Lichtquelle auf einer empfindlichen Platte geleistete Arbeit, die sich in der Zersetzung der Schicht bemerkbar macht, direct proportional sein müsse der ursprünglichen Intensität der Lichtquelle und ferner der Zeitdauer der Belichtung. Hat man also verschiedene Lichtquellen, welche mit den Intensitäten $i_1, i_2, i_3 \dots$ auf eine Platte einwirken, und bei den Expositionszeiten $t_1, t_2, t_3 \dots$ dieselbe Arbeit auf der empfindlichen Schicht ausüben, so ist nach dem obigen Grundsatz:

$$i_1 t_1 = i_2 t_2 = i_3 t_3 = \dots; \quad \text{allgemein: } it = \text{const.}$$

Man findet also für zwei zu untersuchende Lichtquellen das Intensitätsverhältniss $\frac{i_1}{i_2}$, nachdem die Expositionszeiten t_1 und t_2 bestimmt sind, bei denen von ihnen der gleiche Effect auf der Platte hervorgebracht wird, aus der Gleichung:

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{t_2}{t_1}.$$

Um ein für alle Male einen bestimmten Grad der Veränderung in den benutzten Jodsilberplatten als Fixpunkt für die Lichtvergleichungen zu normiren, wählten Fizeau und Foucault denjenigen Moment, wo die empfindliche Schicht die Quecksilberdämpfe gerade zu verdichten beginnt, wo also das photographische Bild zu entstehen anfängt. Ihre Lichtmessungen geschahen in der Weise, dass sie das in einer Camera entworfene Bild einer Lichtquelle nacheinander auf verschiedene Stellen derselben Platte einwirken liessen, wobei sie jedesmal die Expositionszeit um kleine Beträge veränderten. Ebenso verfahren sie mit einer zweiten Lichtquelle, und indem sie nun in beiden Reihen von Aufnahmen denjenigen Punkt bestimmten, wo bei der Entwicklung das Bild gerade zu entstehen begann, erhielten sie aus dem Verhältnisse der zugehörigen Expositionszeiten nach der obigen Gleichung das Intensitätsverhältniss der beiden Lichtquellen. Die Untersuchungen von Fizeau und Foucault erstreckten sich auf das Licht der Sonne, auf das elektrische Kohlenlicht und auf das Kalklicht und lieferten unter Anderem das interessante Resultat, dass für diese Lichtquellen die chemischen Intensitäten den optischen gleich seien. Bei den Mängeln, die den Daguerreotypieplatten anhaften, sind die Lichtmessungen von Fizeau und Foucault nur als erste Versuche in dieser Richtung zu betrachten, die auf grosse Genauig-

1) Comptes Rendus. Tome 18, p. 746 u. 860.

keit keinen Anspruch machen können. Es ist übrigens von grossem Interesse, dass die beiden französischen Gelehrten in der citirten Abhandlung bereits durch besondere Versuche nachgewiesen haben, dass das von ihnen benutzte Gesetz von dem reciproken Verhältniss der Expositionszeiten und Intensitäten zweier Lichtquellen bei gleicher chemischen Wirkung nur innerhalb beschränkter Grenzen Gültigkeit hat, und zwar dass Abweichungen von diesem Gesetze schon bemerkbar werden, wenn das Verhältniss der Intensitäten oder Expositionszeiten das Zehnfache übersteigt.

Anstatt der jodirten Silberplatten versuchte man unmittelbar nach der Entdeckung der Daguerreotypie auch das billiger herzustellende Chlorsilberpapier zu Messungen der chemischen Lichtstärke zu benutzen. Es sind Untersuchungen von Jordan, Hunt, Herschel und Anderen in dieser Richtung bekamt, die aber zu keinen befriedigenden Resultaten führten, weil es nicht gelang, ein photographisches Papier von vollkommen gleich bleibender Empfindlichkeit herzustellen, sowie eine gesetzmässige Abhängigkeit der Schwärzung des Papiers von der Intensität und Expositionsdauer aufzufinden. Erst Bunsen und Roscoe¹⁾ haben die Methode so weit vervollkommenet, dass sie zu exacten Messungen brauchbar geworden ist. Durch zahlreiche sehr sorgfältige Versuche haben sie zunächst den Satz bewiesen, »dass innerhalb sehr weiter Grenzen (Änderung der Intensität um das 25fache) gleichen Producten aus Lichtintensität und Belichtungsdauer gleiche Schwärzungen auf Chlorsilberpapier von gleicher Sensibilität entsprechen«. Die Einschränkungen, welchen dieses Gesetz nach den Untersuchungen von Fizeau und Foucault bei den Daguerreotypieplatten unterworfen ist, und welche nach den neuesten Untersuchungen auch für die photographischen Trockenplatten gültig sind, kommen also bei den lichtempfindlichen mit Chlorsilber getränkten Papieren in Wegfall. Besonderen Fleiss haben Bunsen und Roscoe auf die Herstellung eines unveränderlichen photographischen Normalpapiers verwandt, und ihre Versuche zeigen, dass es in der That möglich ist, ein solches Papier von hinlänglich constant bleibender Lichtempfindlichkeit zu bereiten. Um ferner bei der Beurtheilung des Schwärzungsgrades einen bestimmten unveränderlichen Farbenton als Ausgangspunkt benutzen zu können, der jederzeit auch leicht wieder hergestellt werden kann, bereiteten sie eine Mischung von 1000 Theilen Zinkoxyd und 1 Theil reinen Lampenruss, die auf Papier aufgetragen sich als eine Normalschwärze von gleicher und unveränderlicher Beschaffenheit erwies. Als willkürliche Masseinheit für alle ihre photometrischen Bestimmungen legten Bunsen und Roscoe

1) Phil. Trans. of the R. Soc. of London. 1863, p. 139. — Pogg. Annalen. Bd. 117, p. 529.

diejenige Lichtintensität zu Grunde, welche in einer Secunde auf dem Normalpapier die Normalschwärze hervorbringt.

Bunsen und Roscoe haben ihre photometrische Methode, die einer beträchtlichen Genauigkeit fähig ist, hauptsächlich zu Messungen der chemischen Intensität des Tageslichtes an verschiedenen Beobachtungsorten und zur Aufsuchung der Beziehung zwischen Sonnenhöhe und Tageslicht angewandt, ausserdem hat Roscoe¹⁾ nach dieser Methode Bestimmungen der chemischen Helligkeit an verschiedenen Stellen der Sonnenoberfläche ausgeführt. Dass das Verfahren in der Astronomie keine weitere Verbreitung gefunden hat, liegt wohl, abgesehen von der Umständlichkeit, die mit der Herstellung des photographischen Normalpapiers verbunden ist, besonders daran, dass bei sehr schwachen Lichtindrücken die Empfindlichkeit nicht ausreichend ist, um genaue Bestimmungen zu ermöglichen. Für die technische Photographie sind dagegen die Untersuchungen von Bunsen und Roscoe von der grössten Bedeutung gewesen, weil ihr Verfahren vorbildlich geworden ist für die Construction einer ganzen Reihe von sogenannten chemischen Photometern und Sensitometern.

Während Fizeau und Foucault, ebenso Bunsen und Roscoe von den Himmelskörpern nur die Sonne in den Bereich ihrer Untersuchungen zogen, wandten Bond²⁾ und nach ihm Warren de la Rue³⁾ bereits in den fünfziger Jahren die Photographie auch zu quantitativen Bestimmungen am Monde und an den helleren Planeten an. Sie machten anfangs auf Daguerreotypie-, dann auf Collodiumplatten die ersten gelungenen Aufnahmen von diesen Himmelskörpern und schlossen aus den Expositionszeiten, die erforderlich waren, um fertige Negative zu erlangen, auf die chemischen Intensitätsverhältnisse dieser Gestirne. So erhielt Bond die ersten, wenn auch nicht sehr zuverlässigen Werthe für das photographische Helligkeitsverhältniss von Sonne zu Mond und von Mond zu Venus, Jupiter und Saturn und fand unter Anderem in Übereinstimmung mit Warren de la Rue das bemerkenswerthe Resultat, dass Jupiter von einer bestimmten Menge auffallenden Sonnenlichtes einen viel grösseren Theil der chemischen Strahlen reflectirt als der Mond. Ferner ergaben sich aus diesen Photographien interessante Aufschlüsse über die Vertheilung der Helligkeit auf den sichtbaren Scheiben dieser Himmelskörper; so zeigte sich Jupiter im Centrum der Scheibe beträchtlich heller als am Rande, während beim Mond eine Zunahme der Helligkeit von der Mitte nach dem Rande hin angedeutet war. Es ist merkwürdig, dass die Bond'schen

1) Proc. of the R. Soc of London. Vol. 12, p. 648.

2) Memoirs of the American Acad. New Series. Vol. 8, p. 221.

3) Monthly Notices. Vol. 18, p. 54.

Versuche in dieser Richtung später nicht weiter verfolgt und zu genaueren Messungen der Helligkeitsvertheilung auf Planetenscheiben ausgebildet worden sind; gerade auf diesem Gebiete könnte die Photographie ein sehr werthvolles Hilfsmittel für die Photometrie werden.

Der Gedanke, auch die Helligkeiten der Fixsterne auf photographischem Wege zu ermitteln, ist ebenfalls von Bond¹⁾ zuerst angeregt worden. Er fand, dass die Durchmesser der in der Focalebene eines Fernrohrs auf einer photographischen Platte erzeugten Sternscheibchen je nach der Expositionszeit verschieden gross waren, und folgerte daraus, dass Durchmesserbestimmungen verschiedener Sterne auf derselben Platte ein Mass für ihre relativen Helligkeiten liefern müssten. Die wichtigsten Resultate, zu denen Bond durch die Discussion einer grossen Zahl von Sternaufnahmen geführt wurde, gipfeln in den folgenden Sätzen: 1) »Das erste Bild eines Sternes entsteht auf der photographischen Platte ganz plötzlich, und dieser Moment kann mit grosser Genauigkeit festgestellt werden.« 2) »Der Flächeninhalt eines Sternscheibchens nimmt direct proportional der Expositionszeit zu.« 3) »Für jeden Stern und jede Platte gilt die empirische Gleichung: $Pt + Q = y^2$, wo y der zur Expositionszeit t gehörige Durchmesser des photographischen Scheibchens ist und Q eine Constante bedeutet. Wendet man diese Gleichung auf Sterne von verschiedener Helligkeit an, so können die daraus abgeleiteten Werthe von P ein Mass für die photographische Intensität derselben abgeben.«

Bond hat durch seine wichtigen Untersuchungen zweifellos den Grund zu einer exacten photographischen Photometrie der Fixsterne gelegt, und es ist fast unbegreiflich, dass seine Vorschläge bis in die Neuzeit gänzlich unbeachtet geblieben sind, ja so vollständig in Vergessenheit gerathen konnten, dass die meisten Ergebnisse, zu denen er bereits in den Jahren 1857 und 1858 gelangt war, ganz von Neuem hergeleitet werden mussten.

Der Erste, der nach Bond das Problem der photographischen Fixsternhelligkeiten, und zwar auf einem ganz anderen Wege, in Angriff nahm, war Janssen²⁾. Er hatte dabei das specielle Ziel im Auge, das Intensitätsverhältniss der Sonne zu den helleren Fixsternen zu ermitteln, und construirte zu diesem Zwecke ein Instrument, welches er photographisches Photometer nannte, und welches dazu bestimmt war, die Beziehungen festzulegen zwischen der Intensität der Strahlung und dem Dichtigkeitsgrade des Silberniederschlages, den die-

1) Astron. Nachr. Bd. 47, Nr. 1105; Bd. 48, Nr. 1129; Bd. 49, Nr. 1158—1159.

2) Comptes Rendus. Tome 92, p. 821.

selbe auf der Platte hervorbringt. Dieses Photometer besteht im Wesentlichen aus einer Cassette, welche die empfindliche Platte enthält. Vor derselben wird mit Hilfe eines Uhrwerks, oder wenn eine sehr grosse Schnelligkeit erwünscht ist, mit Hilfe von starken Federn ein undurchsichtiger mit einer Öffnung versehener Schieber mit constanter Geschwindigkeit vorbeigeführt. Hat die Öffnung die Form eines Rechtecks, so wird die Platte überall die gleiche Schwärzung annehmen; ist die Öffnung aber ein Dreieck, welches parallel zu der einen Seite über die Platte hinwegbewegt wird, so erscheint dieselbe an demjenigen Ende, welches dieser Seite des Dreiecks entspricht, dunkler als an dem entgegengesetzten Ende, wo die Spitze des Dreiecks vorbeigeht, und da die Bewegung gleichförmig ist, so wird man unter Berücksichtigung der Dimensionen des Dreiecks für jede Stelle der Platte den Zusammenhang zwischen Schwärzung und Intensität finden. Janssen hat mit diesem Apparate das bereits von Fizeau und Foucault nachgewiesene Resultat bestätigt, wonach die Zunahme der Schwärzung nicht streng proportional bleibt der Zunahme der Lichtintensität, sobald dieselbe sehr beträchtlich ist, und er hat daher, um diesen Fehler zu corrigiren, den Seiten der Schieberöffnung eine Curvenform gegeben, welche die gefundenen Abweichungen berücksichtigt. Mit einem solchen corrigirten Instrumente hat Janssen zahlreiche Aufnahmen der Sonne gemacht und auf diese Weise eine Reihe von Sonnenscalen erhalten. Zur Vergleichung der Fixsterne mit der Sonne empfiehlt er, die ersteren in einiger Entfernung von der Focalebene aufzunehmen, die so erhaltenen Scheibchen mit den Sonnenscalen zu vergleichen und auf denselben den Punkt der gleichen Schwärzung aufzusuchen. Aus den zugehörigen Zeiten lässt sich dann das photographische Intensitätsverhältniss der betreffenden Himmelskörper ermitteln, wenn noch gebührende Rücksicht auf den Abstand der photographischen Platte von der Brennebene bei den Fixsternaufnahmen genommen wird. Eine praktische Anwendung dieser Methode in grösserem Umfange scheint weder von Janssen noch von Anderen versucht worden zu sein; auch ist sehr zweifelhaft, ob dieselbe eine hinreichende Genauigkeit gestattet.

Die Frage nach den photographischen Fixsternhelligkeiten trat erst dauernd in den Vordergrund des Interesses bei Gelegenheit der Vorbereitungen und der ersten Arbeiten für die internationale Himmelskarte, und ist auch heute noch lange nicht als abgeschlossen zu betrachten. Ganz allgemein wurde bald die Methode der Durchmesserbestimmung als die bei Weitem beste anerkannt. Die Vorbedingungen für die Anwendung dieser Methode sind heutzutage viel günstiger als zu der Zeit, wo Bond sie zuerst in Vorschlag brachte. Durch die Construction besonderer

photographischer Objective, welche speciell für die chemisch wirksamen Strahlen achromatisirt sind, gelingt es, den Sternbildchen auf der Platte vollkommen scharf begrenzte regelmässige Form zu geben. In dieser Beziehung dürfte der Ausbildung der photographischen Photometrie kaum noch ein ernstes Hinderniss im Wege stehen, zumal wenn man gewisse Vorsichtsmassregeln nicht ausser Acht lässt und namentlich nicht in zu grossen Abständen von der optischen Axe auf der Platte Messungen ausführt. Dass die Sternscheibchen am Rande der Platte etwas anders aussehen, als in der Mitte, beruht, abgesehen von unvermeidlichen kleinen Mängeln des Objectivs, schon darauf, dass die exacte Abbildung der Sterne auf einer Kugelfläche erfolgt, während die Platte eben ist. Man hat zwar, um diesem Übelstande zu begegnen, die Benutzung von gekrümmten Platten vorgeschlagen; indess dürfte dies in der Praxis aus verschiedenen Gründen schwer ausführbar sein. Gewöhnlich haben die Bilder am Rande der Platte eine elliptische, in der Richtung nach dem Centrum der Platte zu verlängerte Form. Es empfiehlt sich daher, wenn man die Randbilder nicht ganz von den Helligkeitsbestimmungen ausschliessen will, die Durchmesser sowohl in der radialen als in der dazu senkrechten Richtung zu messen und die Mittelwerthe aus beiden Bestimmungen zu benutzen. Bei guten photographischen Objectiven ist übrigens der Unterschied in der Form der Sternscheibchen bis zu nicht unbeträchtlicher Entfernung von der Mitte der Platte kaum merklich. Im Allgemeinen erhält man aus Messungen am Rande der Platte die Helligkeiten der Sterne etwas zu gross.

Voraussetzung ist natürlich bei allen photographisch-photometrischen Bestimmungen, dass die Sternbilder richtig ausexponirt sind. Ist die Expositionszeit verhältnissmässig sehr gross, so werden die hellsten Sterne überexponirt, und die Begrenzung der Scheibchen wird dann durch verschiedene Ursachen, insbesondere durch Reflexe von der Rückseite der Platte, unscharf und verwaschen. Dagegen wird bei sehr schwachen unterexponirten Sternen infolge der kleinen Mängel des Objectivs, ferner infolge der nicht in aller Strenge erreichbaren exacten Focussirung und anderer Ursachen der erste Bildeindruck auf der Platte verhältnissmässig einen zu grossen Durchmesser haben, jedoch nicht vollständig schwarz erscheinen. Es ist daher nicht gerathen, die Helligkeiten der schwächsten sowohl als der hellsten Sterne auf einer Platte aus den Durchmesserbestimmungen zu ermitteln, und man wird sich am Besten auf ein gewisses Helligkeitsintervall, über dessen Grenzen bei jedem Objective die Erfahrung entscheiden muss, beschränken.

Während Bond bei seinen Helligkeitsmessungen im hohen Grade von den Mängeln der damaligen photographischen Verfahren, insbesondere

auch von den Unvollkommenheiten der Daguerreotypieplatten und der Collo-diumplatten abhängig war, ist heute in dieser Beziehung bei den ausserordentlichen Fortschritten der photographischen Technik so gut wie keine Gefahr mehr zu befürchten. Die trockenen Bromsilber-Gelatineplatten werden in den verschiedenen renommirten Fabriken, sowohl was Gleichmässigkeit der empfindlichen Schicht als deren Feinheit anbetrifft, in solcher Güte hergestellt, dass man sogar Aufnahmen auf verschiedenen Platten derselben Emulsion unbedenklich zu vergleichenden Helligkeitsbestimmungen benutzen kann, wenn man nicht gerade die höchsten Anforderungen an Genauigkeit stellt. Selbstverständlich muss die Entwicklung solcher Aufnahmen unter genau gleichen Bedingungen erfolgen, und die Aufnahmen dürfen zeitlich nicht allzu weit auseinander liegen, weil erfahrungsmässig die Empfindlichkeit der Platten bei längerer Aufbewahrung sich allmählich etwas verändert. Da man in neuerer Zeit photographische Platten hergestellt hat, die nicht nur für die violetten und ultravioletten, sondern auch für andere Strahlen des Spectrums empfindlich sind, so liegt der Gedanke nahe, solche Platten zur photographischen Photometrie zu verwenden. Wenn es gelänge, einen Sensibilisator zu finden, der die Platten gerade nur für die im Auge wirk-samen Strahlen empfänglich macht, so würde die Platte unmittelbar das menschliche Auge vertreten, und die photographischen Helligkeiten wären direct mit den optischen vergleichbar. Vorläufig ist dieses Ziel noch nicht erreicht, und es bereitet insbesondere Schwierigkeit, orthochromatische Platten von vollkommen gleichartiger Beschaffenheit herzustellen, aber es unterliegt wohl keinem Zweifel, dass die Überwindung dieser Schwierigkeit nur eine Frage der Zeit ist.

Bedenklicher für die ganze photographische Photometrie ist ein Übel-stand, gegen den sich voraussichtlich überhaupt keine vollständige Ab-hülfe treffen lässt. Es ist dies der enorme Einfluss der Luftunruhe auf die Durchmesser der photographischen Sternscheibchen. Bei unruhiger Luft werden die Bilder grösser als bei ruhiger Luft, und demnach werden im ersten Falle die Helligkeiten zu gross gefunden. Nach Untersuchungen von Scheiner kann der Fehler bis zu einer halben Grössenklasse und darüber anwachsen. Es folgt daraus, dass, wenn es sich um Erreichung der höchsten Genauigkeit handelt, die Helligkeitsvergleichen nur auf Messungen an ein und derselben Aufnahme beschränkt bleiben sollten, wo die Durchmesser aller Sterne im gleichen Sinne durch die Luftunruhe beeinflusst worden sind. Die besten Resultate wird man daher bei der Ausmessung von dicht gedrängten Sterngruppen, sowie bei der Ver-gleichung von Veränderlichen mit nahestehenden Vergleichsternen erwarten können. Am Günstigsten liegen in dieser Beziehung die Bedingungen an

hochgelegenen Beobachtungsstationen, wo im Allgemeinen die Ruhe der Luft gleichmässiger zu sein pflegt.

Auch in Betreff der Extinction des Lichtes in der Erdatmosphäre ist bei den photographischen Helligkeitsbestimmungen viel grössere Vorsicht geboten als bei den photometrischen Messungen. Die chemisch wirksamen Strahlen werden durch die Atmosphäre am Stärksten absorhirt, und es ist daher zur Reduction der photographischen Helligkeiten eine besondere Extinctionstabelle erforderlich. Da aber die Bestimmung einer solchen Tabelle namentlich für die grösseren Zenithdistanzen mit grossen Schwierigkeiten verbunden ist (bisher existiren über diesen Gegenstand nur zwei keineswegs ausreichende Untersuchungen von Schäberle¹⁾ und Pickering²⁾), so ist es dringend gerathen, sich bei der photographischen Photometrie nur auf Beobachtungen in kleinen Zenithdistanzen zu beschränken.

Um aus den Durchmesserbestimmungen der photographischen Sternscheibchen die Helligkeiten abzuleiten, ist es nöthig, eine gewisse Masseneinheit für dieselben zu Grunde zu legen. Man könnte eine solche natürlich ganz willkürlich wählen, doch drängt sich von selbst der Gedanke auf, die photographische Helligkeitsscala in möglichste Übereinstimmung mit der üblichen optischen Sterngrössenscala zu bringen und demnach die Intensitätsdifferenz zweier Sterne, deren Helligkeiten sich zu einander wie 1 : 2.512 verhalten, als eine Grössenklasse zu definiren. Es handelt sich dann darum, die Beziehungen zwischen optischen Sterngrössen und den photographischen Durchmessern zu ermitteln. Über diesen Gegenstand sind im letzten Jahrzehnt eine ganze Reihe von Untersuchungen, insbesondere von Scheiner³⁾, Charlier⁴⁾, Schäberle⁵⁾, Wolf⁶⁾ angestellt worden, auch in dem »Bulletin du comité international pour l'exécution photographique de la carte du ciel« finden sich zahlreiche wichtige Notizen von Seiten verschiedener Astronomen. Am Gründlichsten und Erschöpfendsten ist die Frage bisher von Charlier und Scheiner behandelt worden. Ersterer findet für die Relation zwischen dem Durchmesser D und der Sterngrösse m den Ausdruck:

$$m = a - b \log D,$$

worin a und b Grössen sind, die für jede Aufnahme bestimmte Werthe haben. Die Grösse a hängt ausser von der Empfindlichkeit der Platte und dem Luftzustande hauptsächlich von der Expositionszeit t ab,

1) Schäberle, Terrestrial atmospheric absorption of the photographic rays of light. (Contributions from the Lick Observatory, No. 3), Sacramento 1893.

2) Annals of the Astr. Obs. of Harvard College. Vol. 19, part II, p. 247.

3) Astr. Nachr. Bd. 121, Nr. 2884; Bd. 124, Nr. 2969; Bd. 128, Nr. 3054.

4) Publ. der Astr. Gesellschaft, Nr. XIX.

5) Publ. of the Astr. Soc. of the Pacific. Vol. I, p. 51.

6) Astr. Nachr. Bd. 126, Nr. 3006.

dagegen kann b für ein bestimmtes Instrument und für eine bestimmte Plattensorte innerhalb gewisser Grenzen als constant betrachtet werden. Vergleicht man zunächst nur Sterne auf derselben Aufnahme miteinander, so ist auch a als constant anzusehen, und man erhält für die Grössendifferenz zweier Sterne die Gleichung:

$$m_1 - m_2 = b (\log D_2 - \log D_1).$$

Scheiner hat gefunden, dass, wenn man nicht allzu grosse Helligkeitsdifferenzen in Betracht zieht, die Zunahme der Sterngrössen direct der Zunahme der Durchmesser proportional gesetzt werden kann, so dass also die noch einfachere Relation besteht:

$$m_1 - m_2 = k (D_2 - D_1).$$

Beide Formeln, ebenso wie alle anderen bisher aufgestellten, sind nur als Interpolationsformeln aufzufassen und haben keine physikalische Bedeutung. Mit Hilfe derselben kann man auf jeder Aufnahme für alle ausexponirten Sterne die photographische Grösse ermitteln, nachdem aus einer Anzahl von Sternen derselben Aufnahme, deren optische Grössen genau bekannt sind, die Constanten der Formel abgeleitet worden sind. Diese Anhaltsterne sind am Besten aus ein und derselben Spectralklasse und zwar der ersten (weisse Sterne), welche am Meisten am Himmel verbreitet ist, auszuwählen. Für diese Spectralklasse wird so ein enger Anschluss der photographischen und optischen Grössen erreicht, während natürlich für Sterne anderer Spectralclassen sehr erhebliche Unterschiede zwischen den beiden Systemen bestehen können.

Etwas weniger zuverlässige photographische Grössen lassen sich in Ermanglung einer genügenden Anzahl von photometrisch gut bestimmten Anhaltsternen auf folgende Weise erlangen. Man benutzt bei jeder Himmelsaufnahme nur einen gewissen Theil der Platte, z. B. die Hälfte, und nimmt jedesmal unmittelbar vor- oder nachher auf dem anderen Theile der Platte mit Beibehaltung der betreffenden Expositionszeit eine bestimmte Region des Himmels auf, welche eine Menge sorgfältig photometrisch gemessener Sterne aller möglichen Grössen enthält; diese Sterne dienen dann zur Berechnung der Constanten für die Platte. Da die beiden Aufnahmen nicht absolut gleichzeitig gemacht sind, so wirken bei diesem Verfahren kleine Schwankungen in der Luftbeschaffenheit störend ein; auch ist man nicht immer von der Verpflichtung befreit, die Extinction des Lichtes in der Atmosphäre in Rechnung zu ziehen. Immerhin gestattet auch dieses Verfahren bei einiger Vorsicht in der Wahl der Beobachtungstage eine recht befriedigende Genauigkeit, zumal wenn man sich nicht nur auf eine einzige Gruppe von Anhaltsternen beschränkt, sondern mehrere an verschiedenen Stellen des Himmels auswählt und in jedem gegebenen Falle die günstigste benutzt.

Ein drittes Verfahren, welches jedoch nur beschränkte Genauigkeit giebt, besteht darin, die photographischen Sternscheibchen mit einer festen Scala zu vergleichen. Eine solche Scala kann man sich dadurch verschaffen, dass man von einem Sterne bekannter Helligkeit, etwa dem Polarstern, auf derselben Platte nebeneinander eine Anzahl von Aufnahmen bei gleicher Expositionszeit macht, indem man jedes Mal durch irgend eine Methode, sei es durch Ablendung des Objectivs, sei es durch die einwurfsfreiere Verwendung von rotirenden Scheiben, die Helligkeit um einen bestimmten Betrag, etwa eine ganze Grössenklasse, verändert. Man erhält dann eine Reihe von Scheibchen, welche Helligkeitsdifferenzen von je einer Grössenklasse entsprechen, und wenn man diese feste Scala mit den zu untersuchenden Aufnahmen vergleicht, so kann man für jeden Stern derselben die Stellung innerhalb dieser Scala angeben und durch Schätzung die Helligkeit bis auf Zehntel Grössenklassen ermitteln. Abgesehen davon, dass hier in letzter Linie alles auf eine Beurtheilung des Auges ankommt, wirken Veränderungen in der Luftbeschaffenheit, Extinction u. s. w. ebenso störend wie bei der zweiten Methode, und ausserdem kommt noch die verschiedene Empfindlichkeit der Platten in Betracht. Die Methode kann daher nur als ein Näherungsverfahren angesehen werden. Pickering¹⁾ hat sich einer ähnlichen Methode bei seinen zahlreichen photographisch-photometrischen Untersuchungen bedient; er hat aber in den meisten Fällen nicht die Durchmesser der Sterne in Betracht gezogen, sondern die Spuren, welche dieselben auf der Platte einzeichnen, wenn man während der Exposition das Uhrwerk des Fernrohrs entweder ganz ausser Thätigkeit setzt oder demselben eine geringere Geschwindigkeit giebt, als der täglichen Bewegung der Sterne entspricht. Das Aussehen dieser Striche wird ebenfalls durch Schätzung mit einer festen Scala verglichen, die durch Aufnahmen der Spuren eines oder mehrerer bekannter Sterne bei messbar veränderter Helligkeit derselben erhalten ist. Da der Schwärzungsgrad der Striche wegen der verschiedenen grossen linearen Bewegung der Sterne von der Declination derselben abhängt, so ist bei dieser Methode noch eine besondere Correction erforderlich, und die Pickering'schen photographischen Sternhelligkeiten können schon aus diesem Grunde kaum einen höheren Werth beanspruchen, als er z. B. blossen Helligkeitsschätzungen zukommt.

1) Memoirs of the American Acad. Vol. 11, p. 179. Ausserdem Annals of the Astr. Obs. of Harvard College. Vol. 18, p. 119; Vol. 26, part. I; Vol. 32, part. I.