

## Die Stereoskopie im Dienste der isochromen und heterochromen Photometrie<sup>1)</sup>.

Von C. Pulfrich, Jena.

Der Gegenstand, mit dem wir uns im folgenden zu beschäftigen haben, bedeutet eine neue Nutzanwendung der messenden Stereoskopie, die ganz abseits liegt von allen bisherigen Anwendungen derselben, die aber ursächlich damit zusammenhängt, so daß es angebracht erscheint, zunächst einmal einen kurzen Rückblick auf die Arbeiten der letzten 25 Jahre zu werfen, während welcher Zeit sich die Entwicklung des Stereoskops zum stereoskopischen Meßinstrument vollzogen hat.

### Rückblick auf die Entwicklung des Stereoskops zum stereoskopischen Meßinstrument.

Bis gegen Ende des vorigen Jahrhunderts war das Stereoskop einschließlich aller Doppelfernrohre nichts mehr und nichts weniger als ein Schauapparat für das beidäugige Betrachten von Gegenständen und Stereoskopbildern, und das sind diese Apparate größtenteils auch jetzt noch. Aber noch vor Beendigung des vorigen Jahrhunderts setzten bereits die Bestrebungen ein, aus dem *Stereoskop ein Meßinstrument* zu machen, zur Ermittlung nicht nur der Entfernung der im Stereoskop geschauten Gegenstände, sondern auch zur Ausmessung dieser Gegenstände nach ihren körperlichen Dimensionen: Breite, Höhe und Tiefe. Den *stereoskopischen Entfernungsmesser* der Firma Carl Zeiss habe ich zuerst im Jahre 1899 auf der Naturforscherversammlung in München, und zwei Jahre später auf der Naturforscherversammlung in Hamburg den *Stereokomparator* vorgeführt. Der Entfernungsmesser ist ein Doppelfernrohr mit erweitertem Objektivabstand zur direkten Betrachtung der Natur, der Stereokomparator ein Stereo-Mikroskop zur Betrachtung von photographischen Platten, die an den Enden einer Standlinie aufgenommen sind, deren Länge sich jedesmal nach der Entfernung des zu messenden Gegenstandes und der verlangten Genauigkeit der Messung richtet. In beiden Fällen beruht das Meßverfahren auf der Anwendung von künstlichen Marken, die, in die Okulare des Betrachtungsapparates eingesetzt, den Eindruck hervorrufen, als wären die durch sie erzeugten Raumbilder der Marken ein Bestandteil des im Stereoskop geschauten Raumbildes, nur mit dem

Unterschied, daß man durch relative Bewegung der Markenhälbbilder zueinander und zu den optischen Teilen des Betrachtungsapparates diesen Bestandteil nach Belieben in dem Raumbild herumführen und die Gegenstände, die man ausmessen will, auf diese Weise an ihrer Oberfläche abtasten kann.

Die Hoffnungen, die damals in dieses Verfahren und die Betätigung der genannten Instrumente gesetzt worden sind, sind in überreichem Maße in Erfüllung gegangen. Von den in erster Linie für militärische Zwecke bestimmten *stereoskopischen Entfernungsmessern* hat Exzellenz *Scheer* in einem am 3. Juni vorigen Jahres in Jena gehaltenen öffentlichen Vortrage rühmend hervorgehoben, welche großen Dienste diese Instrumente seiner Flotte im Kampfe geleistet hätten. Mit den stereoskopischen Entfernungsmessern sei man imstande gewesen, nicht allein die Entfernung (16—18 km) der Maste, sondern auch den Ort des Mündungsfeuers und sogar den Ort der Rauchsäulen und Rauchwolken auf dem Meere zu bestimmen.

Für den Stereokomparator (Fig. 1) kommen andere Anwendungsgebiete in Frage. Die Hauptanwendungsgebiete sind *Astronomie* und *Topographie*. Auf den Sternwarten, die sich mit photographischen Himmelsaufnahmen beschäftigen, ist der Stereokomparator, sei es in Verbindung mit dem Stereomikroskop oder dem später hinzugefügten Blinkmikroskop, ein geradezu unentbehrliches Hilfsmittel der Forschung geworden. Alles im Sinne einer wesentlichen Verkürzung der Arbeitszeit und einer nicht unerheblichen Steigerung der Meßgenauigkeit. In der Topographie ist es nicht anders gewesen. Die alte, um die Mitte des vorigen Jahrhunderts begründete Photogrammetrie konnte nicht leben und nicht sterben. Von ihr hat einmal ein österreichischer Fachmann gesagt, daß über sie mehr Bücher geschrieben als Pläne mit ihr angefertigt seien. Mit der *Stereo-Photogrammetrie* war das gleich anders. Sie ist noch eine junge Wissenschaft. Als der Krieg ausbrach, war sie kaum mehr als 10 Jahre alt. Aber sie hat längst ihre Kinderschuhe ausgezogen und ihre Existenzberechtigung im Vermessungswesen und ihre hohe Leistungsfähigkeit durch zahlreiche Arbeiten für die Zwecke der Landesaufnahme und für Ingenieuraufgaben im Frieden und im Kriege bewiesen. Aufgaben wie die Vermessung der Meereswellen und die Ermittlung der Flugbahn eines Geschosses z. B. können überhaupt nur mit Hilfe der Stereo-Photogrammetrie gelöst werden.

<sup>1)</sup> Im Auszug vorgetragen auf dem Physikertag in Jena am 21. IX. 1921.

Zu dem Stereo-Komparator hat sich der *Stereo-Autograph* (Fig. 2) gesellt, im wesentlichen ein automatischer Schichtenlinienzeichner, durch den die Stereo-Photogrammetrie eine ganz gewaltige Steigerung ihrer Leistungsfähigkeit erfahren hat. Bei diesem Apparat sind die einzelnen Glieder der Gleichungen, welche die Brennweite der Aufnahmekammer, die Bildpunktkoordinaten der linken Platte und die horizontale Bild Differenz der beiden Platten, die sogenannte Parallaxe, mit den zu messenden Raumkoordinaten des Punktes im Objektraum verbinden, durch starre Lineale verwirklicht, die ein automatisches Übertragen der im Stereo-komparator eingestellten Punkte auf das Zeichen-

Zwecke der Landesaufnahme und für Ingenieur-aufgaben — Eisenbahnbauvorarbeiten, Talsperranlagen, Kanalanlagen, Tagebaue und dergleichen — mit bestem Erfolg im Gebrauch. Die Verwertung der Apparate für die vorgenannten Aufgaben des Ingenieurfaches bleibt der mit *Luftbild* G. m. b. H. München verbundenen *Stereographik-Gesellschaft* und deren im Ausland tätigen Zweiggeseellschaften vorbehalten.

Es ist ferner schon lange das Bestreben gewesen, die *Aufnahmen aus dem Flugzeug* für Vermessungszwecke dienstbar zu machen. Das Endziel dieser Bemühungen ist auch hier, daß man imstande ist, aus der Luft ebenso stereophotogrammetrisch und stereoautomatisch zu

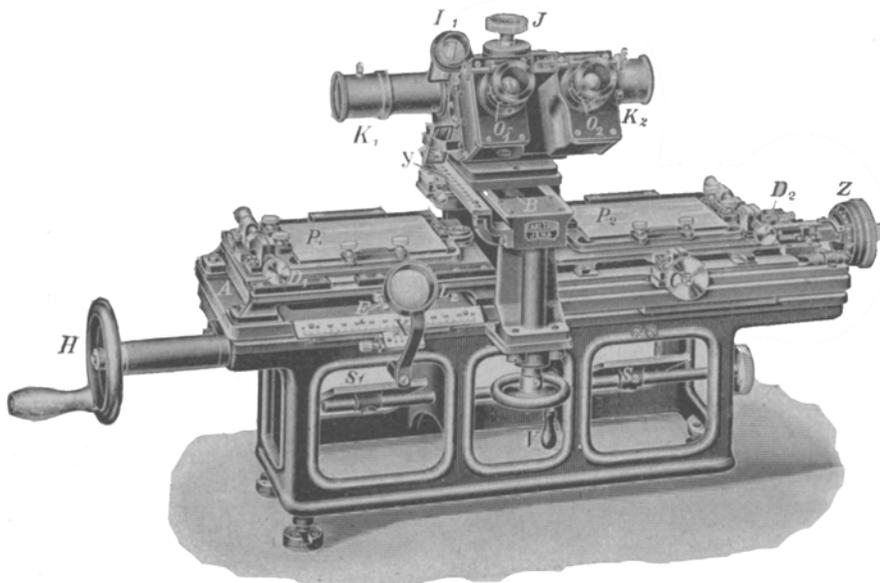


Fig. 1. Stereo-Komparator, Modell E, Plattenformat  $13 \times 18$ , für die punktweise topographische Gelände-Vermessung.

blatt ermöglichen. Das automatische Aufzeichnen einer Schichtlinie geschieht in der Weise, daß man das Höhenlineal auf eine bestimmte Höhe im Objektraum einstellt und dann durch Verschiebung des Plattenpaares zur Seite und durch Veränderung des Abstandes der beiden Platten voneinander die sogenannte „wandernde Marke“ im Stereo-Komparator so an dem Raumbild der Landschaft entlangführt, daß die Marke immer in Berührung mit der Oberfläche des Raumbildes verbleibt. Durch fortgesetzte Wiederholung dieses Vorgangs für Höhen mit einem beliebig gewählten konstanten Höhenunterschied entsteht dann der sogenannte Schichtlinienplan, der sich von den nach den bisherigen Methoden hergestellten Schichtenplänen vorteilhaft dadurch unterscheidet, daß, abgesehen von der schnelleren Herstellung, das Aufzeichnen jeder einzelnen Schichtlinie vollkommen unabhängig von den vorher gezeichneten erfolgt. Apparate dieser Art sind bereits in größerer Anzahl im In- und Auslande für die

arbeiten, wie das bisher mit dem Stereo-Komparator und dem Stereo-Autographen vom festen Erdboden aus möglich gewesen ist. Eine von mir gefundene grundsätzliche Lösung dieser Aufgabe habe ich bereits im Jahre 1919 in meiner Schrift „Über Photogrammetrie aus Luftfahrzeugen“ angekündigt. Über die Entwicklung welche der diesen Zwecken dienende sogenannte *Stereo-Planigraph* durchgemacht hat, wird noch im Laufe dieses Jahres, sobald die ersten Instrumente dieser Art die Werkstätten der Firma *Carl Zeiss* verlassen, von anderer Seite ausführlich berichtet werden<sup>2)</sup>.

<sup>2)</sup> Herr Prof. *Hugershoff-Heyde*, der damals noch ganz in der Vorstellung befangen war, daß sich das Problem der Erdvermessung aus der Luft nur durch *monokulare* Ausmessung der Bilder lösen lasse, hat inzwischen die Belehrung, die ich ihm in meiner oben erwähnten Schrift sowohl für den Bau der Aufnahmekammer als auch für den Bau eines Autographen habe zuteil werden lassen, anscheinend in allen Punkten befolgt, denn er hat sich seitdem von der monokularen Meßmethode losgesagt und baut seinen Automaten jetzt

Ich muß es mir versagen, auf diese Dinge und auf die mannigfaltigen sonstigen Anwendungen des stereoskopischen Meßverfahrens näher einzugehen. Ich verlasse damit ein Arbeitsgebiet, dem ich einen großen Teil meiner Lebensarbeit gewidmet habe und wende mich nunmehr der in der Überschrift dieses Aufsatzes bezeichneten Aufgabe zu, die darauf hinausläuft, das stereoskopische Meßverfahren in den Dienst der *Photometrie* zu stellen. Wir werden sehen, daß zwischen der Stereoskopie und der Photometrie ein sehr inniger, bisher allerdings völlig un-

den. Hier wie auch sonst ist es mit solchen Störungen ein eigen Ding. Man muß ihnen, so unangenehm sie auch im Augenblick empfunden werden, dankbar sein. Denn, wenn man ihnen nachgeht, sie gleichsam in Reinkultur züchtet, so erweisen sie sich in der Regel, wie im vorliegenden Falle, als Wegweiser zu einem neuen Arbeitsgebiet bzw. zu einer neuen Arbeitsmethode.

Ich habe diese Störungen niemals selbst beobachten können, denn ich bin seit 16 Jahren auf dem linken Auge infolge einer in der Jugend erlittenen blutigen Verletzung des Auges

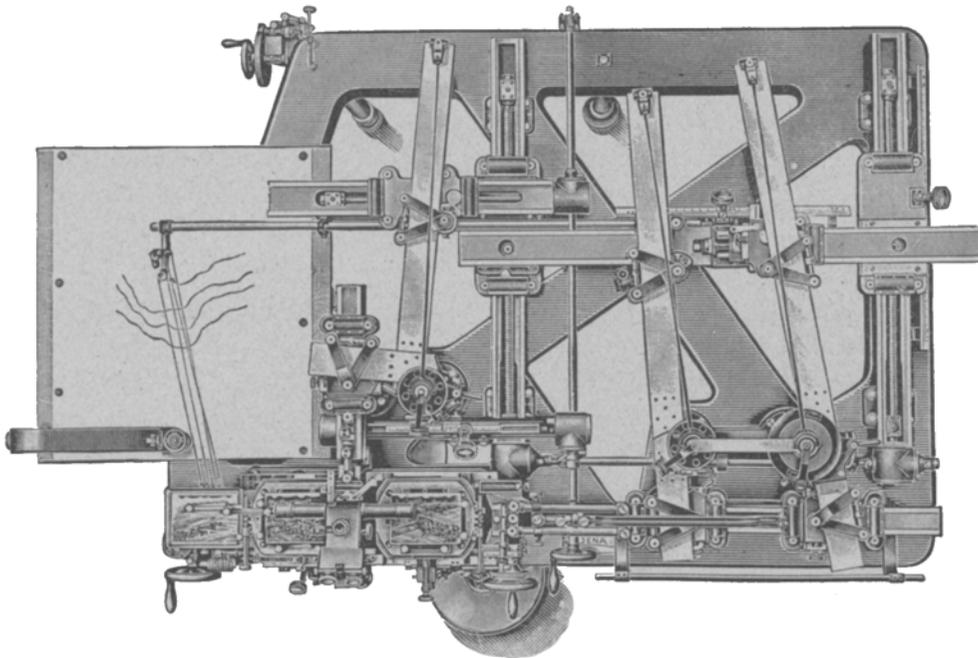


Fig. 2. *Stereo-Autograph, Modell 1914*, für die automatische Herstellung von topographischen Plänen mit Schichtlinien.

beachtet gebliebener Zusammenhang besteht, der die Beachtung nicht nur des *Physikers*, sondern auch des *Physiologen* und selbst des *Psychologen* verdient und besonders für die Zwecke der *heterochromen Photometrie* von der allergrößten praktischen Bedeutung ist.

### I. Teil.

#### Die Grundlagen der neuen Methode.

##### 1. Ein gelegentlich beobachteter Stereo-Effekt als Wegweiser in das neue Arbeitsgebiet.

Die Erscheinungen, um die es sich hier handelt, sind zuerst am Stereo-Komparator und am Stereo-Autographen als gelegentlich auftretende *Störungen* in der Einstellung der Meßmarke zu dem auszumessenden Raumbild beobachtet wor-

nur noch für die stereoskopische Betrachtung. Ob dieser „Autokartograph“ dem oben erwähnten Stereoplanigraphen in bezug auf Leistungsfähigkeit und allgemeine Anwendbarkeit die Wagschale halten wird, erscheint mir mehr als zweifelhaft.

blind. Ich habe von diesen Störungen erst gehört, als Herr Prof. *Max Wolf* vom Königsstuhl in Heidelberg im Jahre 1920 eine Arbeit über 1053 mit dem Stereo-Komparator gemessene Sterne mit Eigenbewegung veröffentlichte<sup>3)</sup>. In dieser Arbeit erwähnt Herr *Wolf* einen merkwürdigen Stereo-Effekt, der ihm bei der Durchmusterung der Plattenpaare zuweilen störend entgegengetreten ist und der darin bestand, daß ein Stern, dessen Raumbild er vorher in die gleiche scheinbare Entfernung mit dem Raumbild der Meßmarke gebracht hatte, bei schneller Bewegung des Plattenpaares *deutlich hinter* oder *vor* die Marke trat.

Wie ich später erfahren habe, sind ähnliche Erscheinungen schon in früheren Jahren von verschiedenen Beobachtern, die beruflich am Stereo-Autographen gearbeitet haben, so z. B. von den Herren *v. Orel*, *E. Wolf*, *Lemberger*, *Tiller*,

<sup>3)</sup> Veröffentlichungen der Badischen Sternwarte zu Heidelberg, Bd. 7, Nr. 10, S. 29.

v. Gruber u. a., beobachtet worden. War in solchen, auch nur vereinzelt vorkommenden Fällen die Marke vorher in aller Ruhe auf einen bestimmten Punkt der Landschaft eingestellt, so machte die Marke beim schnellen Hin- und Herbewegen des Plattenpaares eine Art *kreisende Bewegung* um den Objektpunkt herum. Man hat sich dabei immer mit der Annahme beruhigt, es seien zufällig die Verbände zwischen den beiden Platten etwas locker geworden.

Zur Zeit als Herr *Max Wolf* seine oben erwähnte Arbeit veröffentlichte, haben die am Stereo-Autographen mit der Ausarbeitung der Pläne für die Saaltalsperre beschäftigten Beamten der Firma *Carl Zeiss*, Herr Ingenieur *Franke* und Herr Studienassessor *Fertsch*, sich die Erforschung dieser auch von ihnen beobachteten Störungen angelegen sein lassen. Die beiden Herren wurden zuerst auf diese Störungen aufmerksam durch die Beobachtung, daß dieselbe Schichtlinie, wenn sie einmal in der einen und dann in der entgegengesetzten Richtung gezogen wurde, an verschiedenen Stellen lag, so daß man nicht wußte, welche der beiden Linien die richtige war. Der Lagenunterschied wuchs hierbei mit der Geschwindigkeit der Bewegung des Plattenpaares. Natürlich war das nicht immer so. In den meisten Fällen fielen die beiden Linien selbst bei schnellster Bewegung des Plattenpaares in eine zusammen, und es galt dies mit Recht als Prüfstein und Beweis für die hohe Präzision und Leistungsfähigkeit des Autographen.

Als Ergebnis ihrer Untersuchung haben die beiden vorgenannten Herren festgestellt, daß zur *Erklärung der Störungen* in keiner Weise eine Abstandsänderung der beiden Platten während der Verschiebung verantwortlich gemacht werden darf, sondern daß *hierfür einzig und allein der Unterschied der Helligkeiten links und rechts maßgebend ist*. So konnten Platten, welche die Erscheinung nicht zeigten, sofort durch eine ungleiche Beleuchtung der beiden Platten dahin gebracht werden, und ebenso war man bei Platten, die die Störung zu erkennen gaben, imstande, sie durch einen entsprechenden Ausgleich der Beleuchtung zum Verschwinden zu bringen.

Jetzt erklärt es sich auch, weshalb die Störung nur in Ausnahmefällen beobachtet wurde. Wie der Helligkeitsunterschied in jedem einzelnen Falle zustande gekommen, läßt sich natürlich jetzt nicht mehr sagen. Es können die Lampen ungleich hell gewesen sein, oder sie hingen nicht gleichmäßig vor den Objektivöffnungen des Stereo-Mikroskops, oder der Okularabstand war nicht vollkommen dem Augenabstand des Beobachters angepaßt, so daß eine teilweise Abblendung einer der beiden Austrittspupillen des Stereomikroskops durch das Auge des Beobachters eintrat, oder endlich die Platten waren an sich verschieden durchsichtig, so z. B. dann, wenn bei stereophotogrammetrischen Auf-

nahmen auf dem einen der beiden Bilder der Schatten einer Wolke lag. Auch kann die Störung durch von oben auf eine der Platten auffallendes Sonnen- oder Tageslicht hervorgerufen werden.

Jedenfalls wissen wir jetzt, wie die Störung zustande kommt, und jeder am Stereokomparator oder am Stereoautographen arbeitende Beobachter tut gut, diesen Dingen in Zukunft seine besondere Aufmerksamkeit zuzuwenden. Er braucht nur vor Beginn der Messung die Marke auf irgendeinen Punkt der Landschaft oder auf einen Stern einzustellen und dann das Plattenpaar hin und her zu verschieben, so sieht er gleich, ob die Helligkeiten links und rechts gleich oder verschieden sind. Im ersten Falle geht die Marke in der gleichen scheinbaren Entfernung mit dem Objektpunkt geradlinig hin und her, im anderen Falle kreist sie um den Objektpunkt herum und zwar *von oben gesehen rechts herum*, wie die Kaffeemühle, *wenn das rechte Auge die größere Helligkeit erhält* und *links herum*, wenn die größere Helligkeit auf dem linken Auge liegt. Auch während des Ziehens einer Schichtlinie kann man eine solche Prüfung leicht in der Weise vornehmen, daß man in der Bewegung des Plattenpaares *plötzlich* einen Stillstand eintreten läßt und zusieht, wo die Marke dann steht. Waren die Helligkeiten gleich, so bleibt die an der Oberfläche entlang geführte Marke in Berührung mit ihr, im anderen Falle liegt sie davor oder dahinter.

So ist die anfänglich als unbequeme Störung empfundene Erscheinung der „kreisenden Marke“ *nicht mehr als Störung*, sondern als ein sehr nützlicher *Indikator* für das Vorhandensein eines Helligkeitsunterschiedes und als *Aufforderung* für den Beobachter anzusehen, diesen Helligkeitsunterschied entweder zum Verschwinden zu bringen — am einfachsten durch Dämpfung der helleren Lampe durch einen oder mehrere Bogen Pauspapier — oder, wo das nicht sofort tunlich ist, dem Einfluß des Helligkeitsunterschiedes auf die Messung durch eine entsprechend verlangsamte Bewegung des Plattenpaares aus dem Wege zu gehen.

Herr *Fertsch*, der sich um die Klarstellung dieser Dinge am meisten verdient gemacht hat, hat dann noch, als er mir das Ergebnis der Untersuchung mitteilte, darauf hingewiesen, daß sich alle diese Erscheinungen wohl dadurch erklären lassen, daß man annimmt, *daß die Bewegung der Marke auf dem helleren Bilde früher empfunden werde als die Bewegung der Marke auf dem weniger hellen Bilde*.

Ich habe, wie gesagt, den beschriebenen Stereoeffekt niemals selbst beobachten können, auch am Stereoautographen nie selbst gearbeitet. Wohl aber reizte es mich, die Erscheinung weiter zu verfolgen und mir Rechenschaft darüber zu geben, welchen Gesetzen sie folgt. Vor allem aber sagte ich mir, daß die Erscheinung der kreisenden

Marke — eine genügend große Empfindlichkeit vorausgesetzt — sich vielleicht als ein neues, äußerst willkommenes Hilfsmittel für die Aufgaben der *heterochromen Photometrie* verwerten lasse. Diese Vermutung hat sich in der Tat weit mehr als ich erwartet hatte bestätigt.

Über die erhaltenen Resultate werde ich im folgenden berichten. Bei den hierbei vorkommenden stereoskopischen Versuchen war ich natürlich, wie bei allen meinen Stereoarbeiten seit 1906 ausschließlich auf meine Überlegungen und, soweit es sich um eine experimentelle Bestätigung dieser Überlegungen handelte, auf die Hilfe anderer, gut stereoskopisch sehender Beobachter angewiesen.

2. Demonstration des in Frage stehenden Stereoeffektes.

Die vorbeschriebenen Erscheinungen lassen sich in folgender Weise leicht einem größeren Kreis von Personen sichtbar machen, wobei nur

baren Scheibe mit einer Reihe von daran befestigten Marken. Im allgemeinen wird jeder Beobachter im freien Anblick noch nichts von dem in Frage stehenden Stereoeffekt wahrnehmen. Sobald aber das Rauchglas vor das eine oder das andere Auge gehalten wird, tritt der Effekt sofort in größter Deutlichkeit in die Erscheinung. Dreht man die Scheibe so, daß sich auf dem Schirm die Marken von links nach rechts bewegen, so gehen die Marken, wenn das Rauchglas vor das linke Auge gehalten wird, *hinter* der feststehenden vorbei. Dreht man in umgekehrter Richtung, so gehen die Marken *vorn* vorbei. Steigere ich die Geschwindigkeit, so wird der Effekt immer größer. Halte ich plötzlich an, so erscheinen die Marken wieder in der gleichen Entfernung mit der feststehenden.

Wir können die dunklen Marken auf hellem Grunde auch durch helle Marken auf dunklem Grunde ersetzen und zwar dadurch, daß wir die Scheibe mit den Marken zum Auswechseln gegen

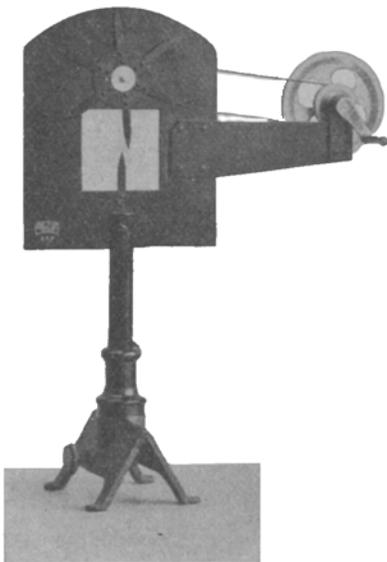


Fig. 3. Hilfsapparat A für die Demonstration des Stereo-Effektes im Auditorium.

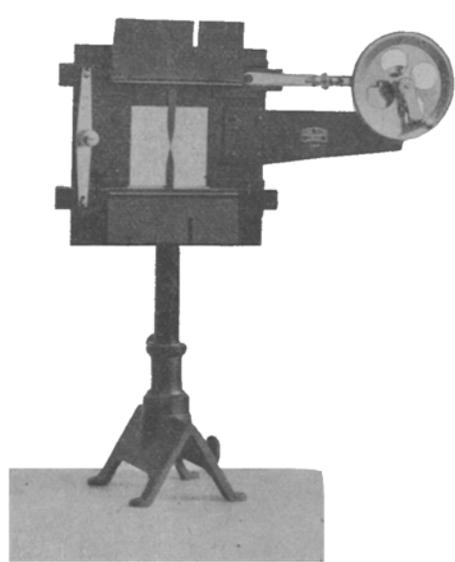


Fig. 4. Hilfsapparat B für die Demonstration des Stereo-Effektes im Auditorium.

vorausgesetzt wird, daß jeder Beobachter vorher in den Besitz eines Rauchglases oder irgendeiner anderen Vorrichtung gesetzt wird, die ihn in den Stand setzt, die Verdunkelung des einen oder des anderen Auges vorzunehmen. Personen, die aus irgendeinem Grunde nicht stereoskopisch sehen können, müssen natürlich auf die Wahrnehmung des Effektes verzichten.

Wir projizieren auf den weißen Schirm das Schattenbild von zwei übereinander stehenden vertikalen Marken, von denen die eine ihren Ort unverändert beibehält, während die andere immer in der gleichen Richtung an der feststehenden vorbeigeführt wird. Die hierzu dienende in den Projektionsapparat einzusetzende Anordnung ist aus Fig. 3 zu ersehen. Sie besteht aus einer dreh-

eine Scheibe mit Löchern oder gegen eine andere Scheibe mit radialen Schlitzen am Rande einrichten. Der Effekt bleibt der gleiche. Die Anordnung eignet sich besonders zum Studium der hinter den Marken herlaufenden Nachbilder, aber weniger für die eigentlichen photometrischen Messungen.

Um *das Kreisen der Marke* zu zeigen, benutzen wir eine ebenfalls in den Projektionsapparat einzusetzende Vorrichtung, wie sie in Fig. 4 wiedergegeben ist. Setzen wir durch Drehen an der Kurbel den Apparat in Bewegung, so sieht man die bewegte Marke gradlinig hin- und hergehen. Wird jetzt wieder das Rauchglas vor das eine oder das andere Auge gehalten, so macht sich das Kreisen der Marke um die fest-

stehende herum sofort bemerkbar. Der *Sinn der Bewegung* ist immer so, wie ich oben angegeben hatte: *von oben gesehen rechts herum, wenn das rechte Auge, und links herum, wenn das linke Auge die größere Helligkeit erhält.* Läßt man auch hier die Marke langsam hin- und hergehen, so wird man, auch wenn man das Rauchglas vor ein Auge hält, kaum noch ein Kreisen der Marke wahrnehmen.

Auch hier können wir die dunklen Marken auf hellem Grund durch helle auf dunklem Grund ersetzen. Wir haben zu dem Ende, wie aus Fig. 4 ersichtlich, an dem Träger der hin- und hergehenden Marke eine vorschlagbare Klappe mit einem Fenster und an dem Träger der feststehenden Marke eine vorschlagbare Klappe mit einem ebensolchen Fenster angebracht. Wir brauchen also nur die Klappen umzulegen, um von dunklen zu hellen Marken überzugehen<sup>4)</sup>.

Wie ich bereits oben erwähnte, kann man zur Verdunkelung des Auges auch jede andere hierfür geeignete Vorrichtung benutzen, so z. B. ein Stück schwarzes Papier mit einem Loch darin von etwa 2—3 mm Durchmesser, welches die Pupille einengt. Auch kann man das Kreisen der Marke in der Weise sehen, daß man ein Auge halb zukneift.

Selbstverständlich kann zur Verdunkelung des Auges *auch jedes beliebige Farbglas* benutzt werden, da ja die Farbwirkung dieser Gläser ausschließlich darauf beruht, daß ein Teil des auffallenden weißen Lichtes darin zurückgehalten wird. Auf das Verhalten der verschiedenen Farben zur kreisenden Marke komme ich weiter unten näher zurück.

Endlich sei noch darauf hingewiesen, daß man das „Kreisen der Marken“ *auch ohne Projektionsapparat* demonstrieren kann. Wir brauchen nur einen Bleistift oder einen Stock in vertikaler Lage vor einen hellen Hintergrund hin und her zu bewegen. Im Zimmer und am Tage finde ich folgende Anordnung empfehlenswert. Man befestigt an einer gegen den hellen Himmel gerichteten Fensterscheibe mit etwas Wachs einen Bleistift in vertikaler Lage, hält darunter ebenfalls in vertikaler Lage einen zweiten Bleistift und bewegt ihn auf der Scheibe hin und her. Im freien Handgebrauch gerät man leicht mit der Hand in eine kreisende Bewegung, was durch das Auflegen des Stiftes auf die Scheibe vermieden wird. Abends kann man ein auf den Tisch gelegtes und von der Tischlampe beleuchtetes Blatt weißes Papier als Hintergrund für die beiden Bleistifte verwenden.

<sup>4)</sup> Der in Fig. 4 wiedergegebene Apparat ist noch mit einigen weiteren Einrichtungen versehen, über deren Verwendung weiter unten (unter 12) nähere Angaben erfolgen werden. So können wir 1. die Länge der Kurbelstange verändern und damit den Mittelpunkt der kreisenden Marke zur Seite verlegen und 2. durch Einschalten eines Hebels die bisher als feststehend bezeichnete Marke an der Bewegung in entgegengesetzter Richtung teilnehmen lassen.

Wenn man bedenkt, mit welcher einfachen Mitteln die Erscheinung der kreisenden Marke hervorgerufen werden kann, so kann man sich nur darüber wundern, daß sie anscheinend nicht schon früher einmal beobachtet worden ist, wozu doch jeder Uhrenladen die Gelegenheit bietet. Der Fall zeigt wieder einmal, wie wenig im allgemeinen beim Kulturmenschen die Gabe der reinen, durch keine Überlegung und Erfahrung beeinflussten Beobachtung entwickelt ist. Gibt es doch, wie sich jetzt herausgestellt hat, Personen, die auch im freien Sehen das Kreisen der Marke sehen, links oder rechts herum, je nachdem bei dem betreffenden Beobachter das linke oder das rechte Auge schneller reagiert als das andere. In solchen für den Augenarzt besonders beachtenswerten Fällen konnte jedesmal eine mehr oder weniger große, durch einseitigen Gebrauch oder andere Ursachen erworbene Ungleichheit der beiden Augen nachgewiesen werden.

### 3. Die nähere Erklärung des Stereoeffektes.

Es sei  $SS$  in Fig. 5 der Projektionsschirm, es seien ferner  $A_1$  und  $A_2$  die auf die feststehende Marke  $n$  gerichteten Augen des Beobachters und

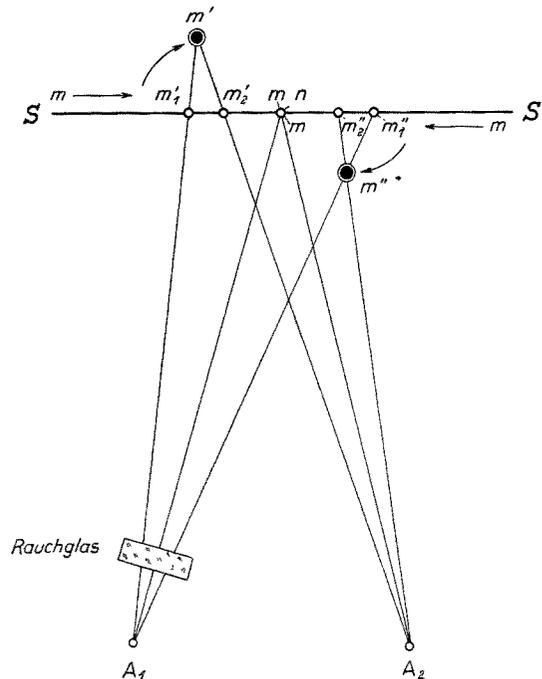


Fig. 5. Wie das Kreisen der Marke zustande kommt.

$m$  die hin- und hergehende Marke. Wie bei allen Nervenreizungen vergeht auch hier zwischen dem Moment der Erregung der Netzhaut durch einen Lichtreiz und dem seiner Empfindung eine gewisse Zeit. Es ist also ganz natürlich, daß wir *einen bewegten Gegenstand niemals an seiner wahren Stelle sehen*, sondern dort, wo er um die Zeitdifferenz zwischen Erregung und Empfindung vorher gewesen ist, und ferner, daß diese Orts-

verschiebung um so größer ist, je größer die Geschwindigkeit des bewegten Körpers ist. In dem Augenblick also, in dem die bewegte Marke  $m$  von links kommend, an der feststehenden Marke  $n$  vorbeigeht, sehen beide Augen, sofern der Zeitverlust für beide Augen gleich groß ist, die Marke  $m$  an einer mehr oder weniger links gelegenen Stelle, beispielsweise in  $m'_2$ . Dieses Zurückbleiben des scheinbaren Ortes hinter dem wahren Ort von  $m$  werden wir, da die Geradlinigkeit der Bewegung erhalten bleibt, natürlich nicht gewahr. Sobald wir aber ein Auge, z. B. in Fig. 5 das linke Auge, durch ein Rauchglas verdunkeln, so wird jetzt unter der obigen Annahme, daß die Zeitdifferenz zwischen Erregung und Empfindung infolge der Verdunkelung größer wird, das linke Auge die bei  $n$  befindliche Marke  $m$  nicht mehr in  $m'_2$ , wie dies das rechte Auge tut, sondern in dem noch weiter links gelegenen Punkt  $m'_1$  sehen. Für den stereoskopischen Anblick resultiert hieraus also ein Raumbild  $m'$ , das nicht mehr in der gleichen Entfernung mit  $n$ , sondern mehr oder weniger dahinter gesehen wird. Die aus der Helligkeitsdifferenz der beiden Augen hervorgegangene Zeitdifferenz der beiden Empfindungen hat sich in eine Raumdifferenz, den beobachteten Tiefenunterschied von  $m$  und  $n$  umgewandelt, gewissermaßen eine Bestätigung des Ausspruches, den Richard Wagner im Parsival dem Gralsritter Gurnemanz in den Mund legt: „Du siehst, mein Sohn, zum Raum wird hier die Zeit.“

Kommt die Marke  $m$  aus ihrer Extremlage rechts bei  $n$  an, so liegen ihre beiden scheinbaren Orte  $m''_1$  und  $m''_2$  rechts von  $n$  und wieder für das linke Auge weiter fort von  $n$  als für das rechte Auge. Das Raumbild  $m''$  erscheint also jetzt vor  $n$ . In den Umkehrlagen links und rechts wird die Marke  $m$  jedesmal sehr nahe an ihrer wahren Stelle gesehen, so daß eine Art kreisende Bewegung entsteht, deren Tiefenausdehnung mit der Helligkeitsdifferenz der beiden Lichteindrücke und der Geschwindigkeit des bewegten Körpers immer mehr zunimmt.

Wir hatten gesehen, daß es für den Verlauf der Erscheinung keinen Unterschied macht, ob die Marken dunkel auf hellem Grund oder hell auf dunklem Grunde sind. Und doch besteht zwischen beiden Vorgängen ein Unterschied, der der Beachtung wert ist. Denn bei der Verschiebung einer hellen Marke findet jedesmal an der Stelle der Netzhaut, wo die helle Marke vorüberzieht, zuerst ein Lichtreiz statt, dem dann nach kurzer Dauer ein Erlöschen des Lichtreizes folgt, während bei einer bewegten dunklen Marke auf hellem Grunde an derselben Stelle der Netzhaut der vorhandene Lichtreiz zuerst gelöscht wird und nach kurzer Ausschaltung wieder von neuem einsetzt. Der Unterschied ist aber vielleicht deshalb für den Verlauf der Erscheinung belanglos, weil anscheinend das Erlöschen eines Lichtreizes und das Auftreten eines gleich starken Lichtreizes um

die gleiche Zeit später empfunden wird. Wäre es anders, so müßte eine von parallelen Seiten begrenzte hin- und hergehende Marke beim Kreisen abwechselnd den rechten oder linken Rand vortreten lassen, eine Erscheinung, die aber von gut stereoskopisch sehenden Beobachtern nicht bestätigt wird. Vielmehr bleibt nach diesen Versuchen die ebene Fläche der Marke beim Kreisen selbst parallel.

Ich muß dahingestellt sein lassen, ob und inwieweit bei der Erscheinung der kreisenden Marke nicht auch Kontrastwirkungen in Rechnung zu stellen sind. Über „Wesen und Veränderlichkeit der Konturen optischer Bilder“ hat Herr Dr. A. Köhl, München, auf der vorjährigen Astronomenversammlung in Potsdam einen sehr interessanten Vortrag (abgedruckt in der Centralzeitung für Optik und Mechanik, Jahrg. 42, Nr. 25, S. 375, 1921) gehalten, in dem er auf „eine neue physiologisch begründete Definition des Wesens der Bildumrandung“ aufmerksam macht und nachweist, daß die auf Grund der Kontrastwirkung aufgebaute Theorie der Bildumrandung in Übereinstimmung ist mit der Erfahrung. Seine Ausführungen beziehen sich aber fast ausschließlich auf ruhende Bilder, nicht aber, wie im vorliegenden Falle, auf bewegte und für beide Augen ungleich helle Bilder.

#### 4. Der Weg, den die kreisende Marke $m$ auf ihrem Umlauf um $n$ zurücklegt.

Der zur Demonstration der kreisenden Marke von uns benutzte Apparat Fig. 4 ist in Fig. 6 rechts unten in schematischer Zeichnung wiedergegeben. Wir bezeichnen mit  $l$  die Länge der Kurbelstange und mit  $r$  den Radius der Drehscheibe. Es ist dann der Abstand  $s$  der Marke  $m$  von ihrer äußersten Lage links (für  $\alpha = 0$ ) gegeben durch:

$$s = l + r - (\sqrt{l^2 - r^2 \sin^2 \alpha} + r \cdot \cos \alpha).$$

Wird gleichmäßig gedreht, so haben wir in dem Drehungswinkel  $\alpha$  der Scheibe zugleich ein Maß für die Zeit. Durch die Strecke  $s$  ist also der Ort der bewegten Marke in jedem beliebig gewählten Zeitpunkt festgelegt, sofern die Zeit einer Umdrehung der Scheibe bekannt ist. Wir tragen also als Ordinate die Zeit und als Abszisse die Strecke  $s$  auf und erhalten beispielsweise für  $l = 3r$  die ausgezogenen Kurven in Fig. 6, von denen die eine links der langsameren Bewegung (1 Umdrehung = 2 sec.), die andere rechts der schnelleren Bewegung (1 Umdrehung = 1 sec.) zukommt.

Da wir den Zeitunterschied zwischen Erregung und Empfindung als unabhängig von der Geschwindigkeit des bewegten Körpers ansehen dürfen, so brauchen wir, um auch seinen scheinbaren Ort zu finden, nur die Kurve für den wahren Ort um den dem betreffenden Auge zukommenden Zeitunterschied in der Richtung der Ordinatenachse zu verschieben, in dem der Fig. 5

zugrunde gelegten Beispiel also für das linke Auge mehr als für das rechte. So entstehen die beiden punktierten Kurven in Fig. 6, und wir sehen, daß dadurch in jedem beliebig gewählten Zeitpunkt die Lage der drei Orte nebeneinander bestimmt ist. Wir können also jetzt, wenn wir für jedes Auge die Größe des Zeitunterschiedes zwischen Erregung und Empfindung kennen, berechnen oder konstruieren, wo sich das Raumbild in dem betreffenden Moment befindet. Auch ist zu sehen, daß sich der seitliche Abstand der drei Orte und damit auch der Stereoeffekt mit zu-

dadurch ausgezeichnet, daß wir gleich *eine ganze Schar von Kurven* erhalten, deren jede einem bestimmten Zeitintervall zwischen den beiden Empfindungen entspricht, und die wir je nach der Wahl des Vorzeichens der Zeitdifferenz als rechts- oder linksläufig ansehen können. Wir bezeichnen die so erhaltenen Kurven zum Unterschied von den in der Stereo-Photogrammetrie bekannten und durch eine analoge Konstruktion erhaltenen „Kurven gleicher Parallaxen“ als *Kurven gleicher Zeitparallaxen*.

Die unsymmetrische Form der Kurven in

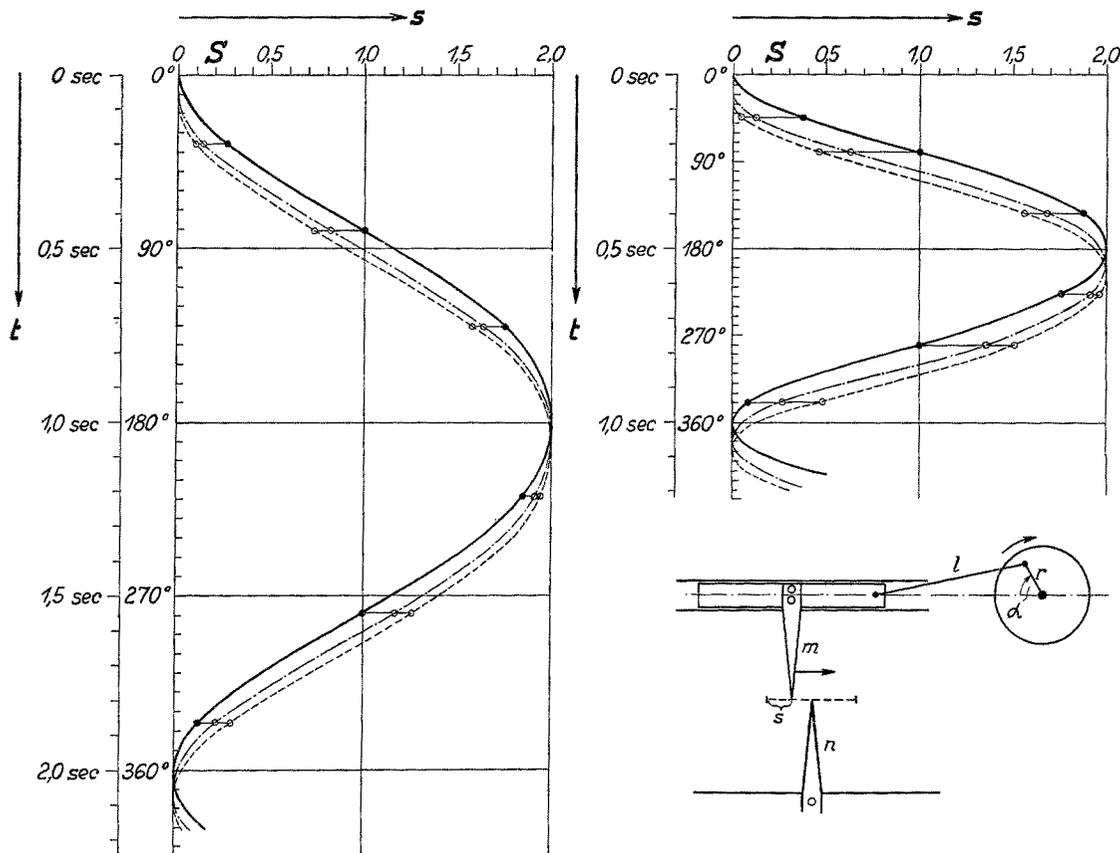


Fig. 6. Die Lage der einzelnen Markenbilder zueinander für einen Umlauf und ihre Abhängigkeit von der Geschwindigkeit.

nehmender Geschwindigkeit immer mehr vergrößert.

Einfacher finden wir den Weg, den die kreisende Marke nimmt, durch die in Fig. 7 wiedergegebene Konstruktion. Sie rührt von meinem Sohn Dr. phil. *Hans Pulfrich* her, der mir vorschlug, die nach gleichen Zeitintervallen fortschreitenden Strecken  $s$  auf einer Geraden aufzutragen und durch die so gewonnenen Endpunkte und die beiden Augen ( $A_1$  und  $A_2$  in Fig. 7) des Beobachters Geraden zu ziehen. Verbindet man dann die zusammengehörigen Schnittpunkte dieser Geraden durch eine Linie, so erhält man in ihr ohne weiteres den Weg, den das Raumbild der Marke genommen hat. Die Konstruktion ist

Fig. 7 links hat in dem der Rechnung zugrunde gelegten Verhältnis  $l : r = 3$  ihren Grund. Wählt man die Kurbelstange  $l$  sehr groß im Verhältnis zu  $r$ , oder sorgt in anderer Weise für eine reine Sinusbewegung, so nehmen die Kurven gleicher Zeitparallaxen die in Fig. 7 rechts angegebene Form an. Der Unterschied der beiderseitigen Kurven tritt auch im Experiment deutlich in die Erscheinung.

Ich möchte bei dieser Gelegenheit noch auf einen *weiteren* hierher gehörigen *Versuch* aufmerksam machen. Wir setzen auf eine horizontale *Drehscheibe* zwei Stäbe, den einen zusammenfallend mit der Drehachse, den anderen außerhalb derselben und setzen die Scheibe in schnelle

rechtsläufige Bewegung. Hält man jetzt vor das linke Auge das Rauchglas, so bleibt der Sinn der Drehung (rechts herum) des Raumbildes erhalten, nur sind die scheinbaren Ausschläge nach vorn und hinten sehr viel größer geworden. Hält man dagegen das Rauchglas vor das rechte Auge, so kehrt sich schon bei mäßiger Geschwindigkeit der Sinn der Drehung um. Man sieht also dann den

Stab *links herum* laufen. Überläßt man jetzt die Scheibe sich selbst, so werden in dem Maße, wie die Geschwindigkeit abnimmt, die Ausschläge nach vorn und hinten immer kleiner. In einem bestimmten Moment sieht man dann den Stab geradlinig hin und her gehen und gleich darauf *rechts herum* laufen, wie er es in Wirklichkeit tut. Über den Weg, den in diesen Fällen das Raum-

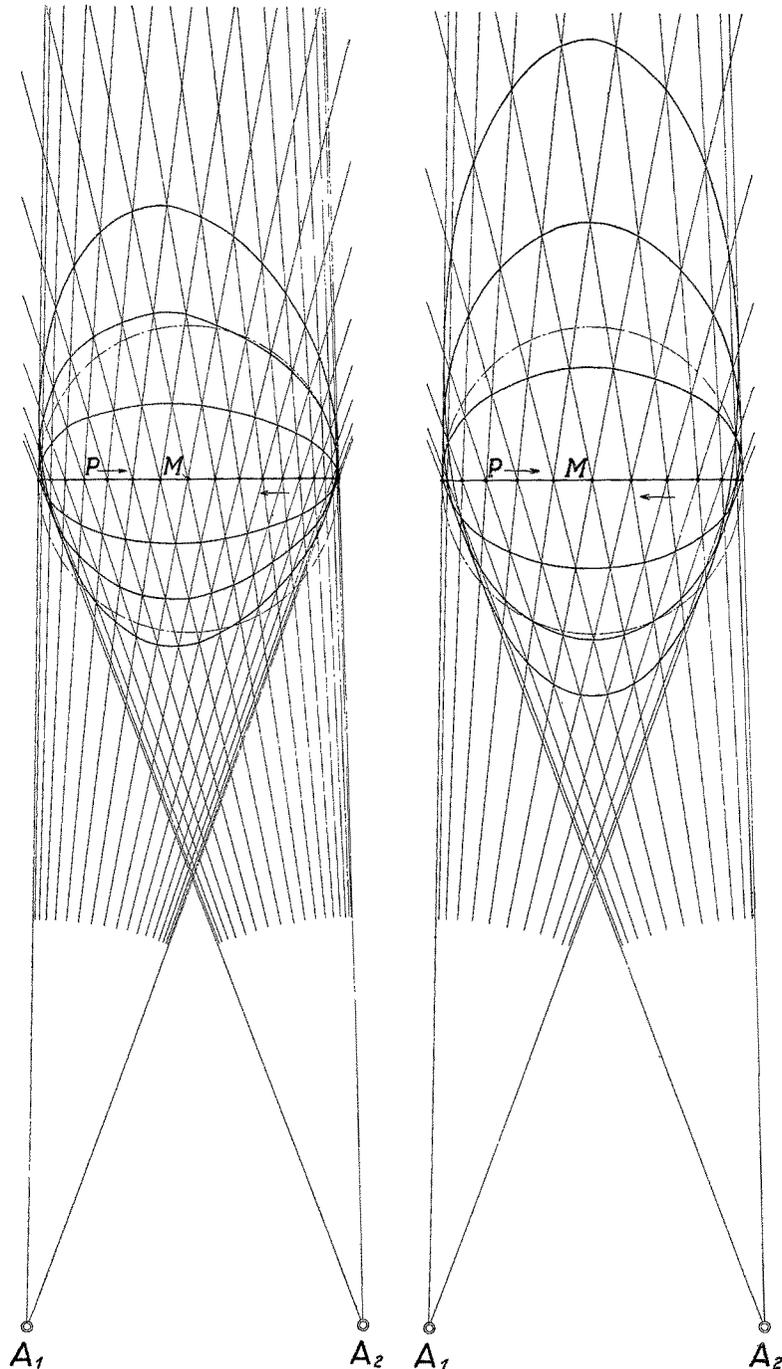


Fig. 7. Kurven gleicher Zeitparallaxen für den Fall, daß der Punkt  $P$  in der Ebene der beiden Blickrichtungen eine geradlinige und ungleichförmig beschleunigte Bewegung ausführt.  
 Schlittenweg für Kurbelbetrieb  $l:r = 3$ .  
 Einfache Sinusbewegung  $l:r = \infty$ .

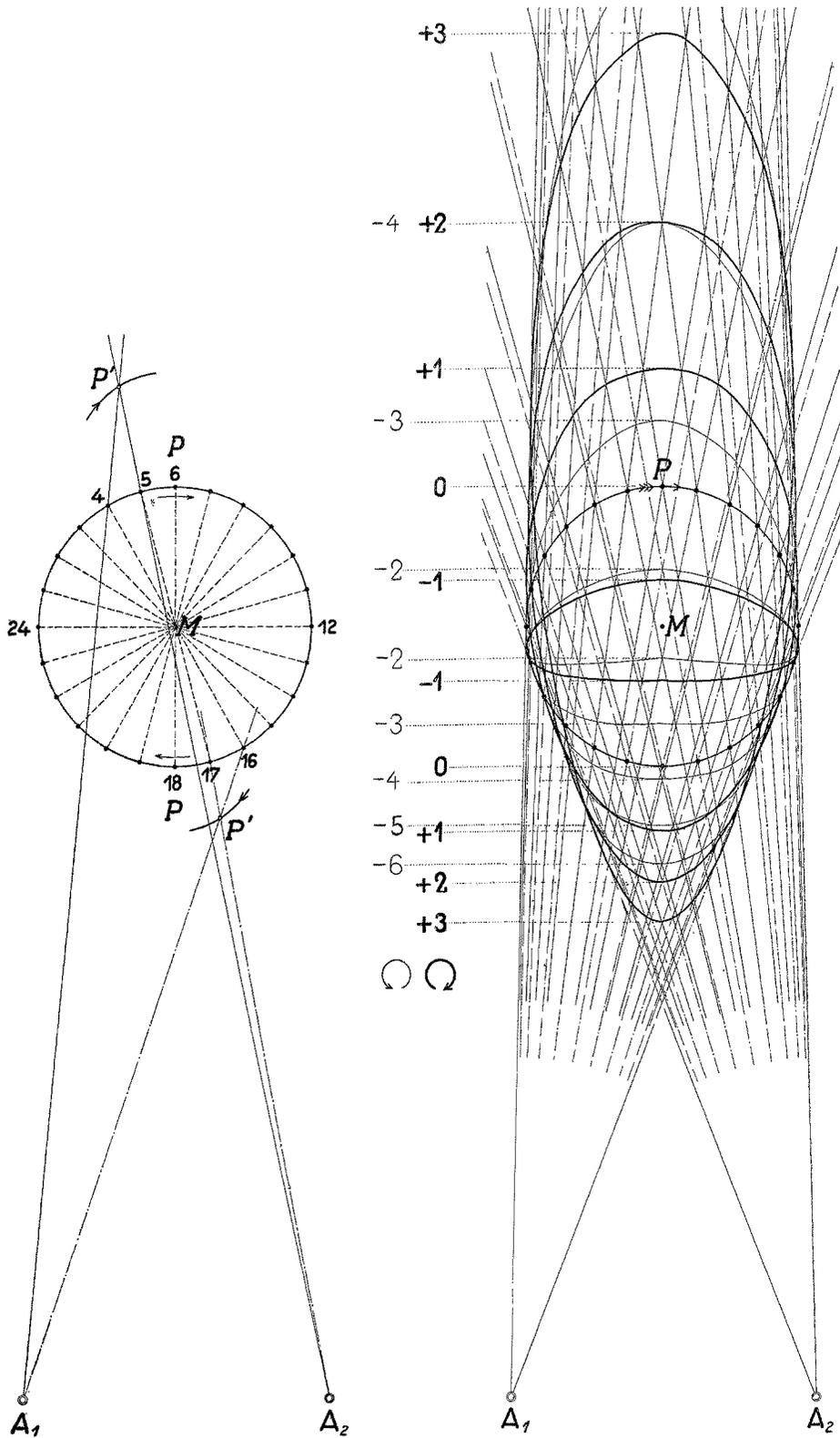


Fig. 7 a. Kurven gleicher Zeitparallaxen für den Fall, daß der Punkt  $P$  in der Ebene der beiden Blickrichtungen eine gleichmäßige Kreisbewegung um  $M$  ausführt.

bild nimmt, gibt die nach der obigen Konstruktion gefundene Schar von Kurven gleicher Zeitparallaxen, wie sie in Fig. 7a wiedergegeben sind, Aufschluß. Setzt man zwei Stäbe in verschiedenem Abstand vom Zentrum auf die Scheibe, so tritt die scheinbare Umkehr der Bewegung für die beiden Stäbe nicht zu der gleichen Zeit ein, der äußere Stab scheint dem inneren nachzulaufen.

##### 5. Ermittlung des Zeitunterschiedes der beiden Empfindungen.

Den absoluten Betrag des Zeitunterschiedes zwischen Erregung und Empfindung wollen wir vorläufig unerörtert lassen und uns damit begnügen, die Differenz der beiderseitigen Zeitunterschiede zu ermitteln. Zu dem Zwecke wurden auf den Stereo-Komparator zwei identische Kreuzgitter auf Glas im Format  $13 \times 18 \text{ cm}^2$  (Kontaktkopien des bei photographischen Himmelsaufnahmen im Gebrauch befindlichen sog. Gautier-Gitters mit 5 mm Strichabstand) gelegt und so justiert, daß von den senkrecht zueinander stehenden Strichen die einen der Horizontalverschiebung des Plattenpaares parallel gerichtet waren. Hatte man dann einen der Vertikalstriche mit aller Sorgfalt auf die gleiche scheinbare Entfernung mit der Meßmarke im Stereo-Mikroskop eingestellt, so war das bei der bekannten Güte dieser Gitter auch für alle übrigen Vertikalstriche der Fall. Sind die Helligkeiten links und rechts gleich, so kann man das Plattenpaar mehr oder weniger schnell an den Augen des Beobachters vorbeiführen, ohne daß eine Änderung in der Tiefenlage der Gitterstriche zur Meßmarke beobachtet wird. Die maximale Geschwindigkeit, bei der ein gut stereoskopisch sehender Beobachter noch mit Sicherheit die Tiefenlage der Striche zur Meßmarke beurteilen kann, wird erreicht, wenn ein Strich des Gitters das Gesichtsfeld in rund  $\frac{1}{2}$  sec. durchläuft. Das entspricht einer Winkelbewegung im freien Sehen von etwa  $50^\circ$  pro Sekunde. Natürlich kann man bei einer solchen Geschwindigkeit in den zwischen den Extremlagen gelegenen Phasen der Bewegung die einzelnen Striche nicht mehr unterscheiden. Man sieht hier wie bei dem hin und her gehenden Taktstock des Kapellmeisters infolge der den einzelnen Strichen nachlaufenden Nachbilder ein verwachsenes Etwas vorüber huschen, von dem man nicht sagen kann, was eigentlich sein Inhalt ist. Eben- sowenig kann man bei dieser Geschwindigkeit der Bewegung ein Urteil darüber abgeben, ob die Striche wirklich gerade sind oder nicht. Und trotzdem diese Sicherheit im Erfassen des stereoskopisch wahrgenommenen Raumbildes! Das ist eben der große Vorzug der Stereo-Methode vor der monokularen, auf den ich schon früher einmal (Z. f. Instr. Kunde XXII, 1902, S. 70), als ich noch stereoskopisch sehen konnte, hingewiesen

habe. Ich sagte damals, daß es mit dem stereoskopischen Entfernungsmesser mit Tiefenskala ein Leichtes sei, „die Entfernung von nur kurze Zeit sichtbaren Objekten zu ermitteln, die, wie z. B. ein vorüberfliegender Vogel oder die durch den Geschoßeinschlag aufgeworfenen Erd- oder Wassergarben schon längst wieder verschwunden sind, ehe man sich über ihre Gestalt und Gliederung eine rechte Vorstellung gebildet hat“.

Nunmehr wurden die beiden Gitter ungleich hell beleuchtet, und zwar geschah das in einfacher Weise so, daß auf der einen Seite zwischen Lampe und Spiegel einige Bogen dünnes Pauspapier eingeschaltet wurden. Während ich durch tunlichst gleichmäßiges Drehen an der Kurbel das Plattenpaar verschob und mit der Stoppuhr in der Hand die Geschwindigkeit der Bewegung des Plattenpaares bestimmte, stellte der in den Apparat schauende Beobachter mit Hilfe der Parallaxenschraube die wandernde Marke auf das vorüberziehende scheinbar nach vorn oder nach rückwärts im Raum verschobene Gitter ein. Diese Einstellung an sich macht, wie gesagt, keinerlei Schwierigkeit. Nur zeigte sich, daß man mit der Hand die Kurbel nicht gleichmäßig genug drehen kann, um eine konstante Tiefenlage des vorüberziehenden Raumbildes zu erwirken. Es pendelte bei jeder Umdrehung der Kurbel etwas nach vorn und hinten, so daß immer nur auf eine mittlere Lage des Raumbildes eingestellt werden konnte. Daher ist die Genauigkeit der so gewonnenen Parallaxen nicht so groß, wie sie bei Benutzung eines gleichmäßig gehenden Motors hätte sein können. Die für verschiedene Geschwindigkeiten und verschiedene Grade der Verdunkelung so gewonnenen Zeitparallaxen wurden graphisch aufgetragen und durch die beiden in Fig. 8 wiedergegebenen Geraden ausgeglichen. Wir verzeichnen vorbehaltlich der Wiederholung dieser Versuche mit Motorantrieb als Resultat der vorliegenden Messungsreihen, daß die durch den Helligkeitsunterschied hervorgerufene Parallaxenänderung sowohl der Geschwindigkeit der Bewegung als auch dem Helligkeitsunterschied einfach proportional ist.

Setzen wir wie oben voraus, daß der Zeitunterschied zwischen Reiz und Empfindung von der Geschwindigkeit des bewegten Körpers unabhängig ist, so muß dieselbe Unabhängigkeit von der Geschwindigkeit auch gelten für den Zeitunterschied der beiden Empfindungen. Dieser Unterschied hängt also nur ab von der Helligkeitsdifferenz. Das geht auch aus unseren Versuchen in Fig. 8 hervor. Zwar wird die Parallaxe mit wachsender Geschwindigkeit immer größer, so daß das eine Gitter um einen immer größer werdenden linearen Betrag hinter dem anderen herläuft, aber gleichzeitig wird auch der vom Gitter in einer Sekunde zurückgelegte Weg immer größer, und zwar so, daß das Verhältnis der beiden Strecken, das ist die gesuchte Zeitdifferenz, konstant bleibt. Für die obere Versuchsreihe in

Fig. 8 berechnet sich somit die Zeitdifferenz der beiden Empfindungen zu 0,02 sec. und für die untere Reihe zu 0,01 sec. Wenn man bedenkt, daß ein gut stereoskopisch sehender Beobachter noch mit Leichtigkeit Parallaxen im Betrage von 0,01 mm erkennen kann, so ist klar, daß auf diese Weise noch Zeitdifferenzen der beiderseitigen Empfindungen im Betrage von weniger als 0,001 sec. gemessen werden können.

Für die später noch anzustellenden Überlegungen ist es ferner von Interesse, zu wissen, wie groß die Zeit ist, während der die einzelnen

hervorgerufene Helligkeitsdifferenz die Geschwindigkeit in der Fortbewegung des Plattenpaares beim Ziehen einer Schichtlinie nicht über 0,5 mm, bei 4 Blatt Pauspapier nicht über 1 mm hinausgehen darf. Das sind schon ziemlich starke Helligkeitsunterschiede, die in der Regel beim Stereo-Autographen nicht vorkommen. Immerhin ist aus diesen Zahlen zu ersehen, daß man auch bei einer nicht vollkommen beseitigten Helligkeitsdifferenz, wie bereits früher (S. 556) erwähnt wurde, fehlerfreie Schichtlinien ziehen kann, wenn man nur auf den Helligkeitsunter-

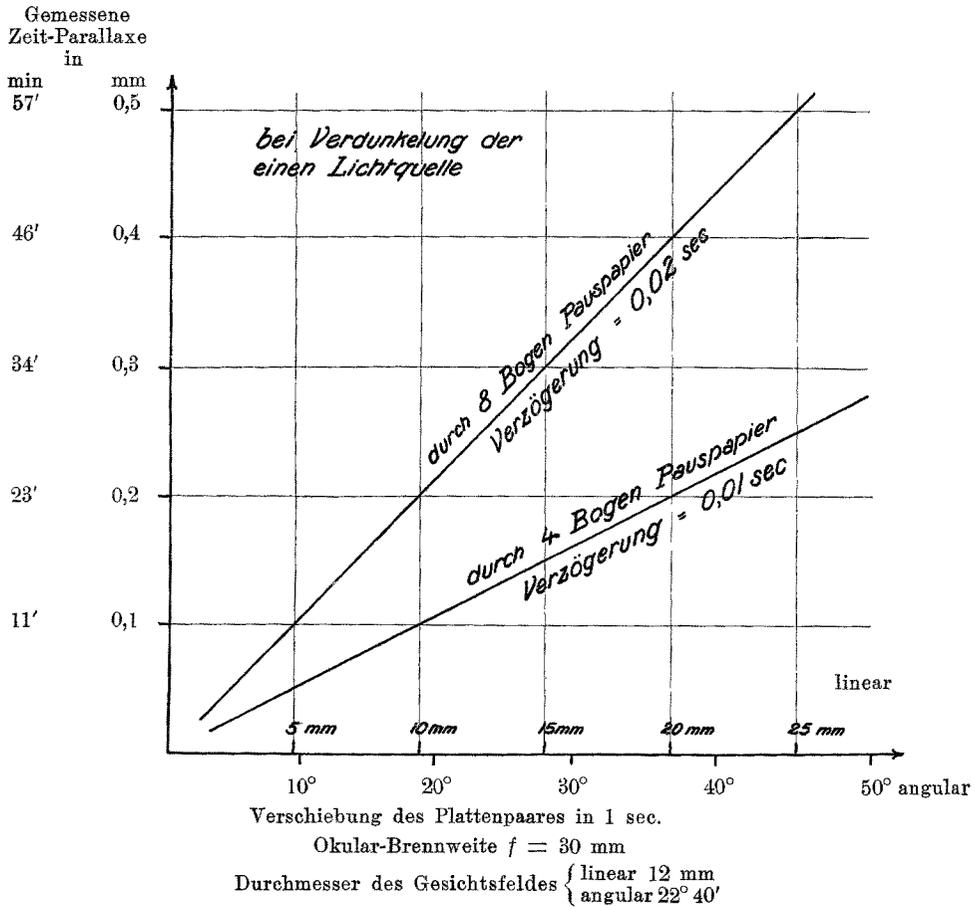


Fig. 8. Auf dem Stereo-Komparator gemessene Zeit-Parallaxen.

Empfindungselemente der Netzhaut dem Lichtreiz durch die vorüberziehenden Gitterstriche ausgesetzt sind. Sie beträgt für die in Fig. 8 angegebenen Geschwindigkeiten von 5 bis 35 mm pro Sekunde 2 bis herab zu 0,3 Tausendstel einer Sekunde.

Von praktischer Bedeutung ist endlich die Frage, wie groß die Geschwindigkeit in der Bewegung des Plattenpaares höchstens sein darf, wenn die eben noch erkennbare Parallaxe im Betrage von 0,01 mm nicht überschritten werden soll. Die Antwort gibt uns wieder Fig. 8: Man sieht, daß für eine durch 8 Blatt Pauspapier

schied achtet und dafür sorgt, daß an den Stellen des Plattenpaares, wo eine solche Helligkeitsdifferenz vorkommt, nicht gar zu schnell die Schichtlinien gezogen werden. Übrigens ist die Gefahr, bei geringen Helligkeitsunterschieden Fehler zu begehen, an sich schon gering, da selbst geübte Beobachter selten über eine Geschwindigkeit von 2 mm in der Bewegung des Plattenpaares beim Ziehen einer Schichtlinie hinauskommen.

(Fortsetzung folgt.)