Sitzungsberichte

der

mathematisch-physikalischen Klasse

der

Bayerischen Akademie der Wissenschaften

zu München

1920. Heft I

Januar- bis Märzsitzung

München 1920
Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission des G. Franz'schen Verlags (J. Roth)

KGL. PREUSS. AKADEMIE D. WISS.

Über den optischen Ausgleich in der Zeitlupe.

Von **Ludwig Burmester.**

Vorgetragen in der Sitzung am 6. März 1920.

Mit den gewöhnlichen kinematographischen Aufnahmeapparaten können wegen der ruckweisen Bewegungen des Films höchstens 20 Aufnahmen in der Sekunde ausgeführt werden, und deshalb sind sie bei schnellen Bewegungsvorgängen, die eine große Anzahl Aufnahmen in der Sekunde erfordern, nicht verwendbar. Der von Dr. H. Lehmann konstruierte und von der H. Ernemann A.-G. in Dresden hergestellte kinematographische Aufnahmeapparat mit stetiger Bewegung des Films vermittelst optischen Ausgleiches ermöglicht in der Sekunde bis 500 Aufnahmen schneller Bewegungsvorgänge, die bei der kinematographischen Vorführung verlangsamt in den einzelnen Phasen anschaulich erkennbar werden. Der früh verstorbene wissenschaftliche Mitarbeiter in dieser Firma, Lehmann hat die schematische Anordnung dieses Aufnahmeapparates mitgeteilt[1]). Er schreibt: „Wie das Fernrohr und das Mikroskop eine Erweiterung unseres Gesichtssinnes bedeutet, indem sie uns entfernte oder sehr kleine räumliche Elemente durch Vergrößerung bemerkbar machen, so bedeutet auch der neue kinematographische Apparat eine Erweiterung unseres Gesichtssinnes, indem er uns nämlich Bewegungsvorgänge erst bemerkbar

[1]) Photographische Korrespondenz, Juli 1916, S. 227. Ferner hat auch Dr. A. Klughardt über die Zeitlupe berichtet in der Zentralzeitung für Optik und Mechanik 1919, S. 199.

macht, die infolge ihrer sehr großen Bewegungsgeschwindigkeit unsere natürliche Wahrnehmungsfähigkeit übersteigen. Man kann daher mit gutem Rechte den neuen Apparat das »Zeitmikroskop« nennen". Dagegen hat Lehmann in dem mir gesandten Sonderabdruck von seiner Mitteilung anstatt Zeitmikroskop korrigierend die Benennung Zeitlupe gewählt, die auch von jener Firma angenommen wurde und nun üblich geworden ist. Vermutlich deshalb, weil er nur mäßig schnelle Bewegungsvorgänge bei 15- bis 20 fach verlangsamter Wiedergabe: Sprung vom Hund und Pferd, auch Taubenflug und Sprung auf ein Feuerwehrsprungtuch, vorgeführt hat.

Der optische Ausgleich in der Zeitlupe ist auf das Reflionsgesetz des Lichtstrahles gegründet; und wird dadurch bewirkt, daß die photographische Aufnahme von einem schnell bewegten Objekt auf einem stetig schnell bewegten Film erfolgt.

Durch die Zeitlupe wird der Kinematographie ein ergiebiges Gebiet für die Erforschung mannigfaltiger schneller Bewegungen eröffnet; deshalb erscheint es zeitgemäß, den optischen Ausgleich theoretisch zu untersuchen.

Zunächst betrachten wir einen einfachen optischen Ausgleich, der abgeändert in der Zeitlupe vorkommt. In Fig. 1 trifft ein ruhender, einfallender Lichtstrahl $\mathfrak{l}$ in einem Punkt O auf einen Spiegel $s\mathfrak{s}$, der sich um eine in O auf der Zeichenebene senkrechte Achse dreht; und nO ist das Einfallslot. Der reflektierte Lichtstrahl l wird durch den Winkel $\widehat{nl} = \widehat{\mathfrak{l}n}$ bestimmt. Zur Veranschaulichung dieser Beziehung während der Drehung des Spiegels verwenden wir einen fünfgliedrigen Mechanismus, wie bei dem Heliostaten. Die vier Glieder $\mathfrak{l}$, $\mathfrak{g}$, g, l bilden ein gleichschenkeliges Gelenkviereck mit den Gelenken O, $\mathfrak{L}$, N, L. Die beiden Glieder $\mathfrak{l}$, l haben gleiche Länge und ebenso die beiden Glieder $\mathfrak{g}$, g. Das Glied $\mathfrak{l}$ ist fest und als solches durch Schraffierung gekennzeichnet. Das schlitzförmige Glied n mit dem auf ihm senkrechten Spiegel $s\mathfrak{s}$ dreht sich um die feste Achse O, und in dem Schlitz gleitet der zylindrische Zapfen N, durch den die Glieder $\mathfrak{g}$, g drehbar ver-

bunden sind. Infolge dieser Anordnung halbiert n als Gerade betrachtet beständig den veränderlichen Winkel $\mathfrak{l}\hat{l}$ und ist das Einfallslot für die jeweilige Lage des Spiegels. Sonach wird durch diesen Mechanismus zu jeder Drehung des Spiegels der entsprechende reflektierte Lichtstrahl l bestimmt. Und wenn umgekehrt ein von dem bewegten Punkt L ausgehender Lichtstrahl den Spiegel in O trifft, so befindet sich $\mathfrak{l}$ als reflektierter Lichtstrahl in Ruhe.

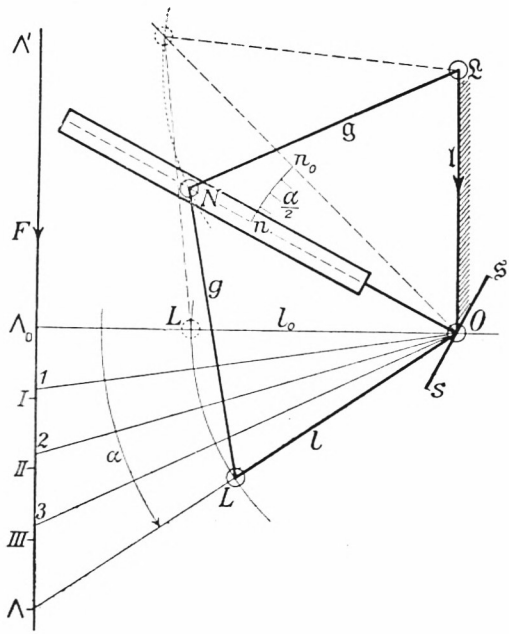

Fig. 1

Betrachten wir n_0 als eine Ausgangslage des Einfallslotes, das sich um einen Winkel $n_0\hat{n} = \frac{\alpha}{2}$ gedreht hat, und machen wir den Winkel $n_0\hat{l}_0 = \mathfrak{l}\hat{n}_0$; dann schwenkt der reflektierte Lichtstrahl von seiner Ausgangslage l_0 nach l um den Winkel $l_0\hat{l}$.

Hiernach ist

$$\widehat{n l_0} + \widehat{l_0 l} = \widehat{\mathfrak{l} n_0} + \widehat{n_0 n} \text{ und } \widehat{n_0 n} + \widehat{n l_0} = \widehat{\mathfrak{l} n_0}.$$

Indem wir die zweite Gleichung von der ersten abziehen, ergibt sich

$$\widehat{l_0 l} - \widehat{n_0 n} = \widehat{n_0 n}; \text{ mithin } \widehat{l_0 l} = 2.\, \widehat{n_0 n} = \alpha.$$

Das gleiche folgt, wenn wir n anderseits von n_0 um den Winkel $\frac{\alpha}{2}$ drehen. Hiernach gilt der Satz:

Dreht sich bei einem ruhenden, einfallenden Lichtstrahl $\mathfrak{l}$ der Spiegel $s\mathfrak{s}$ um einen Winkel; dann schwenkt der reflektierte Lichtstrahl l in gleichem Sinn um einen doppelt so großen Winkel.

Bildet die Lage n_0 des Einfallslotes, wie es insonderheit gewählt ist, mit $\mathfrak{l}$ den Winkel $\widehat{\mathfrak{l} n_0} = 45^0$, so ist der entsprechende reflektierte Lichtstrahl l_0 senkrecht auf $\mathfrak{l}$.

Wir nehmen nun an, daß ein zu l_0 senkrechter Film F sich proportional der Drehung des Spiegels $s\mathfrak{s}$ bewegt; und während dessen Einfallslot sich von n_0 nach n um den Winkel $\frac{\alpha}{2}$ dreht, durchläuft der Film F die Wegstrecke $\Lambda_0 \Lambda$, die von l_0, l begrenzt wird. Demnach entspricht dieser Wegstrecke $\Lambda_0 \Lambda$ die Schwenkung des reflektierten Lichtstrahls von l_0 bis l. Ferner nehmen wir an, daß der bewegte reflektierte Lichtstrahl in allen seinen Lagen einen photographischen Bildpunkt von einem in $\mathfrak{l}$ liegenden Objektpunkt, etwa von $\mathfrak{L}$, auf dem bewegten Film F erzeugt. Die Wegstrecke $\Lambda_0 \Lambda$ teilen wir beispielsweise in vier gleiche Teile, deren Teilpunkte I, II, III sind; und den Winkel $\widehat{l_0 l}$ teilen wir auch in vier gleiche Teile, wodurch die drei reflektierten Lichtstrahlen bestimmt werden, die den Film in den Punkten 1, 2, 3 treffen.

Wird durch Drehung des Spiegels ein Filmpunkt nacheinander in die Lagen Λ_0, I, II, III, Λ bewegt, dann entstehen durch die entsprechenden reflektierten Lichtstrahlen die photo-

graphischen Bildpunkte Λ_0, 1, 2, 3, Λ auf dem Film, die den Filmpunkten Λ_0, I, II, III, Λ entsprechen. In den Punkten Λ_0, Λ liegen Bildpunkt und Filmpunkt vereint, aber in den drei anderen Lagen getrennt, wie es die Zeichnung veranschaulicht. Während der Bewegung bleibt der Bildpunkt innerhalb der Wegstrecke $\Lambda_0 \Lambda$ immer hinter dem Filmpunkt zurück. Demnach entsteht nur ein angenäherter optischer Ausgleich; denn ein vollkommener optischer Ausgleich erfordert, daß Bildpunkt und Filmpunkt beständig vereint sich auf der Wegstrecke $\Lambda_0 \Lambda$ bewegen.

Bei dem angenäherten optischen Ausgleich wird infolge der Abweichungen des Bildpunktes von dem entsprechenden Filmpunkt auf dem Film als Bild des Objektpunktes ein kurzer Strich erzeugt, dessen Länge gleich der auf dem Weg $\Lambda_0 \Lambda$ erlangten größten Abweichung ist; um diese nun zu ermitteln, verfahren wir in der folgenden Weise. Es sei x der Winkel, den ein reflektierter Lichtstrahl mit seiner Ausgangslage l_0 bildet, und der Abstand des Films F von dem Spiegelpunkt O gleich f; ferner seien die dem Winkel x entsprechenden Wegstrecken des von Λ_0 ausgehenden Filmpunktes und Bildpunktes beziehlich $\mathfrak{w}_f$, $\mathfrak{w}_b$. Da die Wegstrecke $\mathfrak{w}_f$ proportional dem Winkel x ist, so folgt, wenn k eine Konstante bezeichnet, $\mathfrak{w}_f = f \cdot k \cdot x$; ferner ist $\mathfrak{w}_b = f \cdot \tan x$. Für $x = \alpha$ ergibt sich, weil im Punkt Λ, Filmpunkt und Bildpunkt vereint liegen

$$f \cdot k \cdot \alpha = f \cdot \tan \alpha;$$

mithin ist die Konstante $k = \frac{\tan \alpha}{\alpha}$.

Bezeichnet y die Abweichung des Bildpunktes von dem Filmpunkt, so ist $y = \mathfrak{w}_f - \mathfrak{w}_b$.

Demnach ergibt sich die Abweichung

$$y = f \frac{\tan \alpha}{\alpha} x - f \cdot \tan x = f \left(\frac{\tan \alpha}{\alpha} x - \tan x \right)$$

und der Differential-Quotient von dieser Funktion

$$\frac{dy}{dx} = f \left(\frac{\tan \alpha}{\alpha} - \frac{1}{\cos^2 x} \right).$$

Für das Maximum der Abweichung ist

$$\frac{\tan \alpha}{\alpha} - \frac{1}{\cos^2 x} = 0,$$

also

$$\cos x = \sqrt{\frac{\alpha}{\tan \alpha}};$$

wobei die Winkel α, x in Gradmaß und in Bogenlänge des Kreises vom Radius $= 1$ gemessen werden.

Sind nun die konstanten Größen α, f gegeben, so erhalten wir rechnerisch den Wert des Winkels x, durch den die Wegstelle des Bildpunktes bestimmt wird, wo sich dessen größte Abweichung von dem entsprechenden Filmpunkt befindet. Durch die Einsetzung dieses Wertes in die Gleichung für y folgt das Maximum $y_{\max}$ der Abweichung. Wir haben nur die unterhalb der auf F senkrechten Geraden $\Lambda_0 O$ erfolgenden Schwenkung des reflektierten Lichtstrahls betrachtet, weil zu ihr die oberhalb stattfindende Schwenkung bezüglich $\Lambda_0 O$ symmetrisch ist. Demnach bewegt sich auf der Wegstrecke $\Lambda' \Lambda_0$, die gleich $\Lambda_0 \Lambda$ ist, der Bildpunkt vor dem Filmpunkt und es entstehen oberhalb dieselben Abweichungen nach vorwärts wie unterhalb nach rückwärts. Mithin ist die Länge des kurzen Striches, der als Bild des in I liegenden Objektpunktes erscheint, gleich $2 \cdot y_{\max}$. Für die in der Zeitlupe vorkommende Strecke $f = 60$ mm und den kleinen Winkel $\alpha = 9^0$, dessen Bogenlänge gleich 0,15707 ist, ergibt sich durch Rechnung der Wert des Winkels $x = 5^0\, 12'\, 28''$, und die entsprechende Bogenlänge gleich 0,09089.

Nach Einsetzung in die Gleichung für y folgt:

$$y_{\max} = 0{,}000502 \cdot 60 = 0{,}03012 \text{ mm};$$

mithin ist die Strichlänge $2 \cdot y_{\max} = 0.06024$ mm, und dieser optische Ausgleich also ein sehr angenäherter.

In Fig. 2 ist die schematische Anordnung der Zeitlupe nach Lehmanns Angabe gezeichnet. Der angenäherte optische Ausgleich wird vermittelt durch eine um die im Punkt M zur Zeichenebene senkrechte Achse rotierende Spiegeltrommel T,

deren metallische Mantelfläche aus versilberten, die Spiegel bildenden Seitenflächen eines regulären Primas besteht; und der Zentriwinkel dieser Spiegel, von denen der Einfachheit halber nur 8 angenommen sind, ist mit α bezeichnet. Ein von einem Objektpunkt kommender horizontaler Lichtstrahl λ trifft einen gegen ihn unter 45^0 geneigten festen Spiegel Σ, und ist so gewählt, daß der reflektierte Lichtstrahl $\mathfrak{l}$ den zu Σ parallelen Spiegel $s\mathfrak{s}$ in seiner Mitte S trifft. Der nun weiter reflektierte Lichtstrahl l geht in der optischen Achse $S\Lambda_0$

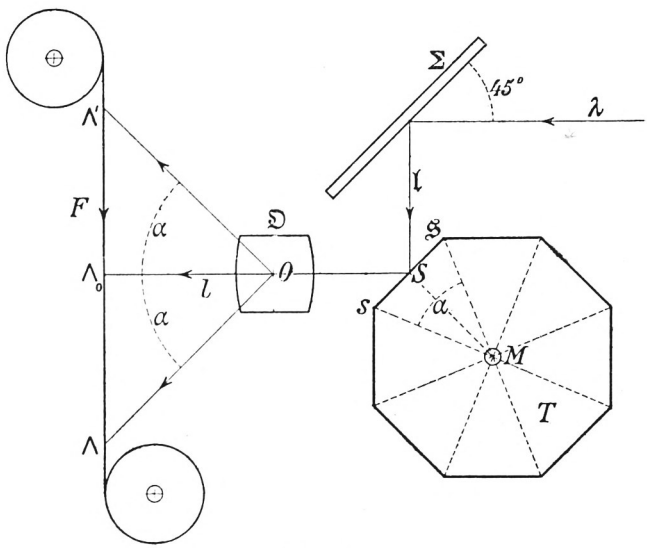

Fig. 2

durch das abbildende Objektiv $\mathfrak{D}$, in dem der Einfachheit halber die beiden identischen Paare der Hauptpunkte und der Knotenpunkte vereint in einem Punkt O liegend angenommen werden. Der Lichtstrahl l trifft in dem Punkt Λ_0 den auf ihm senkrechten Film F, der von einer Rolle auf eine andere geht, und sich von dem Punkt O im Abstand $\Lambda_0 O$ gleich der Brennweite f das Objektiv befindet. Vermittelst Übertragung durch Zahnräder wird der Film proportional der Drehung der Spiegeltrommel fortbewegt, so daß jedem Spiegel ein Bild auf

dem Film entspricht. Während der Drehung der Spiegeltrommel um den Winkel α durchläuft der Film am Bildfenster eine Strecke $\Lambda'\Lambda$, die gleich der kinematographischen Bildhöhe ist; dabei geht der von dem gedrehten Spiegel reflektierte, bewegte Lichtstrahl im Objektiv durch den Punkt O und schwenkt von $O\Lambda'$ nach $O\Lambda$ um den Winkel $\Lambda' O \Lambda = 2\alpha$, der von $\Lambda_0 O$ halbiert wird. Dabei kann das Bildfenster vermittelst einer nahe vor dem Film F befindlichen, von außen verstellbaren Schlitzblende verengert und erweitert werden.

Die Spiegeltrommel enthält 40 Spiegel, und demnach ist der Zentriwinkel

$$\alpha = \frac{360^0}{40} = 9^0;$$

ferner ist der Abstand der Spiegel von der Achse der Spiegeltrommel

$$MS = 125 \text{ mm},$$

und die Brennweite des Objektivs,

$$\Lambda_0 O = f = 60 \text{ mm}.$$

Hiernach ergibt sich die Spiegelbreite

$$s\mathfrak{s} = 2.125 \cdot \tan 4^0, 30' = 19{,}6 \text{ mm}$$

und die übliche Bildhöhe

$$h = 2.60 \cdot \tan 9^0 = 19 \text{ mm}.$$

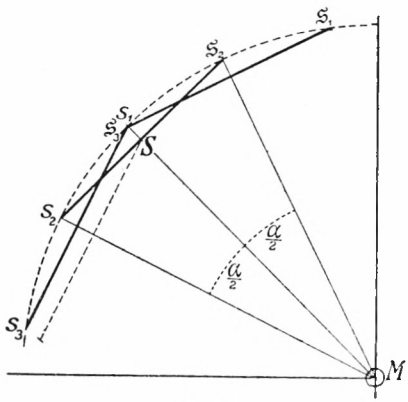

Fig. 3

Um den Strahlengang in der Zeitlupe für die einzelnen Spiegellagen zu veranschaulichen, und seinen Eintritt in das Objektiv zu konstruieren, nehmen wir zuvörderst in der schematischen Fig. 3 die Eingangslage $s_1 \mathfrak{s}_1$, die Mittellage $s_2 \mathfrak{s}_2$ und die Ausgangslage $s_3 \mathfrak{s}_3$ eines der Deutlichkeit halber sehr breiten Spiegels $s\mathfrak{s}$ an, der um die

Achse M eine Drehung gleich seinem Zentriwinkel α ausführt. Die beiden äußersten Lagen $s_1 \mathfrak{s}_1$, $s_3 \mathfrak{s}_3$ stoßen in dem Endpunkt des in der Mitte S auf $s_2 \mathfrak{s}_2$ senkrechten Radius zusammen. Der Abstand dieses Endpunktes von S sei gleich φ. Da der Radius des Kreises gleich $\frac{MS}{\cos\frac{\alpha}{2}}$ ist, so folgt

$$\varphi = \frac{MS}{\cos\frac{\alpha}{2}} - MS = \left(\frac{1}{\cos\frac{\alpha}{2}} - 1\right) MS,$$

und für die Werte $\alpha = 9^0$, $MS = 125$ mm ergibt sich

$$\varphi = 0{,}386 \text{ mm}.$$

Die anderen Lagen des Spiegels sind innerhalb des Kreisbogens $\widehat{\mathfrak{s}_1 s_3}$ liegende Sehnen, welche die kurze Strecke φ schneiden.

Zur leichteren Übersicht der Strahlengänge ist erforderlich, daß wir die Spiegellagen abändern. Zu diesem Zweck denken wir uns jede Sehne mit ihrem Schnittpunkt auf der Strecke φ nach dem Punkt S parallel zu sich verlegt; sowie z. B. die Sehne $s_3 \mathfrak{s}_3$ mit ihrem Endpunkt $\mathfrak{s}_3$ nach S parallel zu sich verlegt und als solche durch Gestrichelung gekennzeichnet ist. Damit ist die Vereinfachung erlangt, daß die parallel verlegten Lagen der Spiegel durch die Mitte S der einzigen unveränderten Mittellage $s_2 \mathfrak{s}_2$ gehen, und in dieser Mitte die Eingangslage und die Ausgangslage zusammenstoßen. Diese Anordnung, durch die das Verständnis des optischen Ausgleiches sehr erleichtert wird, wollen wir die Hilfsspiegel-Schwenkung nennen. Die dabei entstehende Abweichung von den wirklichen Strahlengängen ist wegen der verhältnismäßig kurzen Strecke φ gering. Diese Abweichung ist am größten für jene beiden äußersten Lagen, weil sie um die ganze Strecke φ verlegt sind; dagegen bleibt für die unveränderte Mittellage der wirkliche Strahlengang bestehen; und sie ist dadurch von allen anderen Lagen ausgezeichnet.

Auf Grund der Hilfsspiegel-Schwenkung wollen wir in der schematischen Fig. 4 den mit starken Pfeilen gekennzeichneten Strahlengang für die zu dem festen Spiegel Σ parallelen Mittellage $s_2 \mathfrak{s}_2$ und den mit schwachen Pfeilen gekennzeichneten Strahlengang für die parallel verlegte Ausgangslage $s_3 \mathfrak{s}_3$ des Spiegels konstruieren. Wir haben diese beiden Strahlengänge deshalb gewählt, weil sie nach ihrem Gang durch den Objektivpunkt O bis an den bewegten Film F in der Lage mit den reflektierten Strahlen bei dem optischen Ausgleich in Fig. 1 übereinstimmen. Wir nehmen anstatt der wirklichen Größe des Zentriwinkels $\alpha = 9^0$ schematisch 30^0 an. Die beiden Lagen $s_2 \mathfrak{s}_2$, $s_3 \mathfrak{s}_3$, sowie die auf sie gefällten Senkrechten MS, Ms_2 bilden den Winkel $\frac{\alpha}{2}$. Ferner setzen wir die vertikale Strecke AIB, deren Mitte I ist, als Objekt für die Zeitlupe ohne Vorsatzlinse nahe vor den Spiegel Σ. Dadurch wird die Zeichnung der Strahlengänge absichtlich der Deutlichkeit halber verzerrt.

Für den Spiegel Σ ist zu dem Objekt AIB das Spiegelbild $A_s I_s B_s$ symmetrisch, und für den Spiegel $s_2 \mathfrak{s}_2$ ist zu $A_s I_s B_s$ das Spiegelbild $A'' I'' B''$ symmetrisch. Durch den zu O bezüglich $s_2 \mathfrak{s}_2$ symmetrischen Punkt O_s'', der in der Geraden $I_s S$ liegt; und durch den zu O_s'' bezüglich Σ symmetrischen, in der Geraden $O_s'' O$ liegenden Punkt O'', wobei IO'' gleich und parallel $I'' O$ ist, wird der Strahlengang für den Spiegel $s_2 \mathfrak{s}_2$ bestimmt. Die betreffenden von dem Objekt AIB kommenden Strahlen sind nach dem Punkt O'' gerichtet, treffen den Spiegel Σ, und die von ihm reflektierten Strahlen sind nach dem Punkt O_s'' gerichtet. Die von dem Spiegel $s_2 \mathfrak{s}_2$ reflektierten Strahlen gehen dann durch den Objektivpunkt O nach dem bewegten Film F, auf dem das entsprechende Bild $a'' i'' b''$ von dem Objekt AIB entsteht. Demnach bewirkt die Spiegellage $s_2 \mathfrak{s}_2$, daß, von O aus gesehen, das Objekt AIB durch die Spiegelungen nach dem Spiegelbild $A'' I'' B''$ verlegt erscheint.

In ähnelnder Weise ergibt sich der andere Strahlengang; denn für die Ausgangslage $s_3 \mathfrak{s}_3$ ist zu $A_s I_s B_s$ das Spiegelbild

$A''' I''' B'''$ symmetrisch. Durch den zu O bezüglich $s_3 \mathfrak{s}_3$ symmetrischen Punkt O_s''' und den zu O_s''' bezüglich Σ symmetrischen Punkt O''' wird der Strahlengang für den Spiegel $s_3 \mathfrak{s}_3$ bestimmt. Die betreffenden von dem Objekt $A I B$ kommenden Strahlen sind nach dem Punkt O''' gerichtet und die von dem Spiegel Σ reflektierten Strahlen sind nach dem Punkt O_s''' gerichtet. Nun aber treffen diese reflektierten Strahlen in der schematischen Zeichnung den über S verlängert gedachten Spiegel $s_3 \mathfrak{s}_3$, von dem die reflektierten Strahlen durch den Objektivpunkt O gehen und das entsprechende Bild $a''' i''' b'''$ auf dem bewegten Film F erzeugen. Demnach bewirkt die verlängerte Spiegellage $s_3 \mathfrak{s}_3$, daß, von O aus gesehen, das Objekt $A I B$ durch die Spiegelungen nach dem Spiegelbild $A''' I''' B'''$ verlegt erscheint.

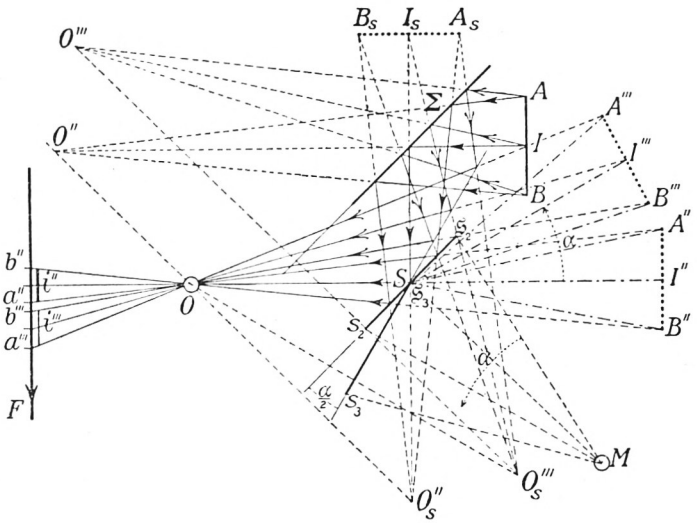

Fig. 4

Analoge Beziehungen würden sich für die Eingangslage ergeben, der ein unterhalb $S I''$ liegendes nicht eingezeichnetes Spiegelbild $A' I' B'$ entspricht; und deshalb können wir auf die Konstruktion des zugehörigen Strahlenganges verzichten, durch den die Übersicht in der Zeichnung beeinträchtigt würde.

Es sei nur bemerkt, daß die durch den Objektivpunkt O gehenden reflektierten Strahlen dann von der unterhalb OS befindlichen Verlängerung der Spiegellage erfolgt.

Die beiden den Winkel $\frac{\alpha}{2}$ einschließenden nach rechts hin verlängerten Spiegellagen $s_2 \mathfrak{s}_2$, $s_3 \mathfrak{s}_3$ sind Mittelsenkrechte auf den Strecken $I_s I''$, $I_s I'''$, und die Fußpunkte liegen auf einem über den Durchmesser $I_s S$ beschriebenen Halbkreis, in dem $\frac{\alpha}{2}$ ein Peripheriewinkel ist. Für die kongruenten Spiegelbilder $A'' I'' B''$, $A''' I''' B'''$ ist S der selbstentsprechende Punkt und mithin liegen die Punkte I'', I''' auf einen um S beschriebenen durch I_s gehenden Halbkreis; demzufolge ist in ihm der Zentriwinkel $I'' S I''' = \alpha$. Hiernach ergibt sich der Satz:

Bei der Hilfsspiegel-Schwenkung entspricht einer Schwenkung des Spiegels um einen Winkel eine Drehung des Spiegelbildes um den doppelt so großen Winkel.

Von dem Objektivpunkt O aus gesehen erscheint das Objekt AIB in den Lagen $A' I' B'$, $A'' I'' B''$, $A''' I''' B'''$ des Spiegelbildes; demnach können wir uns den Bewegungsvorgang in der Zeitlupe so vorstellen, daß während der Drehung der Spiegeltrommel um den Winkel α das gespiegelte Objekt um S als feste Achse eine Drehung vollzieht, die gleich dem Winkel 2α ist, und von allen seinen Lagen durch das Objektiv ein Bild auf dem Film F entsteht, der sich proportional der Drehung der Spiegeltrommel bewegt.

Zur Erklärung des optischen Ausgleiches wollen wir nur den von der Mitte I des Objektes nach dem Objektivpunkt O gehenden Strahl betrachten, ferner in der Zeichnung die wirkliche Größe des Winkel $\alpha = 9^0$ und der Strecke $OS = 32$ mm. Beachten wir nun, daß sich das wirkliche Objekt in größerer Entfernung von der Zeitlupe befindet, also die Strecke SI''' verhältnismäßig lang gegen die Strecke OS ist; dann folgt anschaulich aus dem Dreieck SOI''', daß je länger die Strecke SI''' ist, desto mehr nähert sich der Winkel $I'' O I'''$ dem

Winkel $I'' S I''' = \alpha$, aber mehr noch für die Zwischenlagen von $S I'''$ nach $S I''$, und dabei ist der Winkel $I'' O I'''$ stets kleiner als der Winkel $I'' S I'''$. Hiernach entspricht der Drehung der Spiegeltrommel um einen Winkel eine Schwenkung des durch O gehenden Strahles um den angenähert doppelt so großen Winkel. Mithin ergibt sich auf dem bewegtem Film von der Mittellage i'' an in allen anderen Lagen eine Abweichung des Bildpunktes von dem entsprechenden Filmpunkt, die am größten in der Ausgangslage i''' ist; und der Bildpunkt bleibt immer hinter dem Filmpunkt zurück.

Um ein Beispiel von der Annäherung des Winkels $I'' O I'''$ an den Winkel $\alpha = 9^0$ und der größten Abweichung des Bildpunktes von dem entsprechenden Filmpunkt zu geben, nehmen wir das Objekt noch verhältnismäßig nahe vor der Zeitlupe, nämlich die Strecke $S I''' = 1000$ mm an; dann folgt aus dem Dreieck $O S I'''$, in welchem die Seite $O S = 32$ mm, die Seite $S I''' = 1000$ mm und der Außenwinkel $\alpha = 9^0$ ist, durch Rechnung der Winkel $I'' O I''' = 8^0\, 43'$. Da ferner die Brennweite des Objektivs, die Strecke $O i'' = 60$ mm ist, so ist der Weg des Filmpunktes von i'' an $60 . \tan 9^0 = 9{,}504$ mm und der Weg des Bildpunktes $60 \cdot \tan 8^0\, 43' = 9.202$ mm, mithin ist die Differenz dieser beiden Wege, die größte Abweichung gleich 0.302 mm. Diese verhältnismäßig große Abweichung verkleinert sich mit der Vergrößerung der Entfernung des Objektes, und der optische Ausgleich nähert sich dann immer mehr dem sehr angenäherten optischen Ausgleich in Fig. 1. Ferner verkleinert sich diese Abweichung, wenn das Objektiv näher an S verschoben, also die Strecke $O S$, soweit es praktisch zulässig ist, verkürzt wird. Der optische Ausgleich wird sehr gefördert durch eine vermittelst Zahnräder bewirkte präzise Übertragung der Bewegung von der Spiegeltrommel auf den Film. Wir haben nur die Beziehungen in dem Bewegungsvorgang von der Mittellage bis zur Ausgangslage des Spiegels betrachtet, weil analoge Beziehungen in dem Bewegungsvorgang von der Eingangslage bis zur Mittellage stattfinden.

Da wir durch die Hilfsspiegel-Schwenkung nur annäherungsweise zur Kenntnis der Bewegungsvorgänge gelangt sind, so müssen wir noch erörtern, wie die Reflexion der Strahlen in den wirklichen Lagen des sich um die Achse M drehenden Spiegels vor sich geht. In der schematischen Fig. 4 treffen die von $A_s I_s B_s$ nach O_s''' gerichteten Strahlen auf die verlängert gedachte Spiegellage $s_3 \mathfrak{s}_3$ und können daher nicht nach dem Objektivpunkt O reflektiert werden. Wenn wir aber den von $s_2 \mathfrak{s}_2$, $s_3 \mathfrak{s}_3$ eingeschlossenen Winkel $\frac{\alpha}{2}$ auf seine wirkliche Größe 4^0, $30'$ verkleinern, dann rückt der zu O bezüglich $s_3 \mathfrak{s}_3$ symmetrische Punkt O_s''' sehr nahe an den Punkt O_s'', so daß der Strahl $B_s O_s'''$ die Spiegellage $s_3 \mathfrak{s}_3$ trifft, aber der mittlere Strahl $I_s O_s'''$ geht nahe an S über sie vorüber. Da die Spiegellage $s_3 \mathfrak{s}_3$ von der wirklichen um die berechnete Strecke $\mathfrak{s}_3 S = 0{,}386$ parallel verlegt ist, so ist es nun notwendig, in einem großen Maßstab bei den wirklichen Maßverhältnissen die Konstruktion der reflektierten Strahlen einige Spiegellagen genau auszuführen. Dabei ergibt sich zeichnerisch, daß die Spiegellage bei 1^0 vor dem Ausgang die von $B_s I_s$ kommenden und von der unteren Hälfte des Objektes $A\,I\,B$ ausgehende Strahlen reflektiert; und daß die Spiegellage nach 1^0 bei dem Eingang die Strahlen von der oberen Hälfte reflektiert. Hiernach können die von einem Objekt kommenden Strahlen nur zum Teil reflektiert werden und zur Erzeugung der Bildpunkte auf dem Film gelangen. Und erst vermittelst Aufnahmen sehr schneller feiner Bewegungsvorgänge kann erkannt werden, wie sich die Zeitlupe als „Zeitmikroskop“ bewährt. Ob z. B. bei einem Sandstrahlgebläse die Bewegung der schleifenden Sandkörner veranschaulicht wird, und bei der schnellen Bewegung des Auges die durch dessen sechs Muskeln bewirkten verschiedenen Phasen erkennbar werden[1]).

---

[1]) Siehe L. Burmester, Kinematische Aufklärung der Bewegung des Auges. Diese Sitzungsberichte, Jahrg. 1918, S. 200.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Sitzungsberichte der mathematisch-physikalischen Klasse der Bayerischen Akademie der Wissenschaften München

Jahr/Year: 1920

Band/Volume: 1920

Autor(en)/Author(s): Burmester Ludwig

Artikel/Article: Über den optischen Ausgleich in der Zeitlupe 183-196