

Über das Sehen von Bewegungen.

I. Mitteilung.

Die Wahrnehmung kleinster Bewegungen.

Von

Dr. **Adolf Basler**,

Privatdozent und Assistent am physiologischen Institut zu Tübingen.

(Mit 3 Textfiguren.)

Die optische Wahrnehmbarkeit von Bewegungen ist zwar schon mehrfach zum Gegenstand physiologischer Untersuchungen gemacht worden¹⁾, doch wurde meistens nur die Geschwindigkeit berücksichtigt, d. h. man stellte fest, wie schnell ein Körper verschoben werden muss, damit seine Lageveränderung direkt empfunden wird.

Aber über die Beziehung der Wahrnehmbarkeit zur Grösse der Bewegung liegen bis jetzt nur spärliche Angaben vor.

Es schien mir deshalb interessant, festzustellen, wie klein eine Verschiebung werden darf, die eben noch empfunden wird, d. h. wie weit die beiden Punkte voneinander entfernt sein müssen, zwischen denen die Bewegung erfolgt.

Methodisches.

Um möglichst kleine Bewegungen herstellen zu können, deren Exkursionsgrösse jedoch genau zu messen war, konstruierte ich folgenden Apparat.

Auf einer Platte von starkem Messingblech *A* (Fig. 1) ist um eine Achse *F* drehbar ein Hebel *B* angebracht, der sich mittelst einer Handhabe *C* um die Achse verschieben lässt. Dieser Stab ist

1) Zusammenstellungen der Arbeiten auf diesem Gebiete finden sich bei:

- a) W. Stern, Die Wahrnehmung von Bewegungen vermittelt des Auges. Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorgane Bd. 7 S. 321 (335). 1894.
- b) B. Bourdon, La perception visuelle de l'espace p. 176. Paris 1902.
- c) W. Nagel, Handbuch der Physiologie Bd. 3 S. 365. Braunschweig 1905.

durch ein zweites auf dem ersten befestigtes Messingblech *D* vollständig verdeckt bis auf die Handhabe.

In dem zweiten Blech befindet sich 2 cm von der Achse *F* entfernt und senkrecht zum Hebel ein 0,5 cm breiter Spalt *E*.

Unten, wo der Stab aus der Blechverschalung herausragt, um in den Handgriff *C* überzugehen, befindet sich eine Millimeterskala. Diese Skala ist 20 cm von der Achse entfernt, also zehnmal so weit, als die Entfernung des Spaltes von der Achse beträgt. Wird demnach der Hebel auf dem Massstab um 1 mm verschoben, dann beträgt die Verschiebung an der Stelle des Spaltes 0,1 mm.

Da bei rascher Bewegung natürlich an den beiden Endlagen des Stabes nicht die Millimeteinteilung abgelesen werden kann, so sind zwei verstellbare Hemmungen *G* angebracht, durch die die gewünschte Exkursion sich von vornherein festlegen lässt.

Der Teil des Hebels, welcher in dem Spalt *E* sichtbar wird, ist mit weißem Barytpapier überklebt, damit er sich möglichst gut von der Unterlage abhebt. Alles andere ist mit schwarzem Papier überzogen.

Die Untersuchungen mit dieser Vorrichtung führte ich in folgender Weise aus.

Der Apparat wurde an einer Wand befestigt so hoch, dass der Spalt, innerhalb dessen die Bewegung stattfand, sich 1,28 m über dem Fussboden befand.

Der Beobachter, dessen Kopf durch Anlehnen an einen Kopfhalter in bestimmter Lage festgestellt wurde, nahm in 2 m Ent-

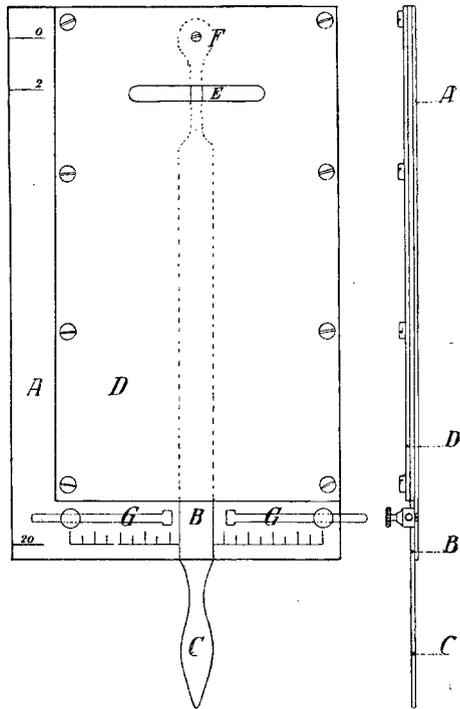


Fig. 1.

fernung vor dem Apparat Platz. Er betrachtete den weissen Streifen, der von dem Versuchsleiter mittelst der Handhabe rasch hin und her geschoben wurde. Letzterer bestimmte die Exkursion der Bewegung und protokollierte dieselbe, wobei der Beobachter keine Vorstellung haben durfte über die Grösse der Verschiebung und das, was der Versuchsleiter erwartete. Die Versuchsperson hatte nur anzugeben, ob der Streifen sich bewegte oder nicht, und im ersten Falle, wie gross die Exkursion geschätzt wurde. Dass dabei zahlreiche Vexierversuche eingeschaltet wurden, braucht wohl nicht erst erwähnt zu werden.

Der ganze Apparat, mit Ausnahme des Spaltes, in dem sich die Bewegung abspielte, wurde mit schwarzem Papier überdeckt. Namentlich erwies es sich als notwendig, die Handhabe und die sie bewegende Hand durch eine entsprechende Überdachung aus schwarzem Karton dem Beobachter unsichtbar zu machen, da diese verhältnismässig grossen Bewegungen die richtige Beobachtung der viel kleineren des weissen Streifens bedeutend erschwerten.

Da bei der beschriebenen Anordnung jeder Versuch zwei Personen erfordert, so führte ich meine ersten Beobachtungen der Einfachheit halber bei einem Augenabstand von 30 cm aus. Damit trotzdem die Bewegung klein genug ausfiel, musste ich den Apparat noch in der Weise ändern, dass der verschiebbare Hebel durch eine 1 m lange Latte ersetzt wurde. Auch hier war der Spalt 2 cm von der Achse, die Skala dagegen 100 cm von derselben entfernt angebracht. Die Grösse der unter dem Spalt wahrgenommenen Exkursion betrug also den 50. Teil der Verschiebung auf der Skala. Man war somit in der Lage, eine Bewegung von 0,02 mm noch ziemlich genau auszuführen, denn dabei wird die Latte auf der Skala um 1 mm verschoben.

Vor dem Apparat, der an einem Fenster aufgestellt war, sass die Versuchsperson und stützte den Kopf so auf ein Stativ, dass das beobachtende Auge gerade 30 cm von dem sich bewegenden Papierstreifen entfernt war.

Diese Anordnung gewährte den Vorteil, dass der Beobachter selbst mit der Hand die Verschiebung ausführen konnte. Um auch dabei jede suggestive Beeinflussung auszuschliessen, stellte ich die Grösse der Exkursion vor jeder Beobachtung ein, ohne auf die Skala zu sehen, und nahm die Ablesung erst vor, nachdem ich mein Urteil protokolliert hatte.

Sämtliche Beobachtungen wurden ausgeführt von mir (in den

Protokollen mit *B.* bezeichnet) und von einer anderen Person (*N.*). Die Versuche wurden teils mit beiden Augen vorgenommen, teils auch nur mit einem, wobei — wie gleich vorweg erwähnt sein mag — die Ergebnisse vollständig die gleichen blieben.

Versuchsergebnisse.

Gleich bei den ersten Versuchen machte ich die mich in höchstem Masse überraschende Beobachtung, dass man erstaunlich kleine Bewegungen wahrnehmen kann.

Die genauere Untersuchung ergab, dass man bei mittlerer Tagesbeleuchtung bei einer Entfernung des Auges von 30 cm eine Verschiebung von 0,03 mm noch deutlich sehen konnte, eine solche von 0,02 mm dagegen nicht mehr oder wenigstens nur sehr unsicher.

Eine Bewegung von 0,03 mm entspricht einer Winkelverschiebung von ungefähr 20 Sekunden oder einer Verschiebung des Netzhautbildes von 1,5 Mikra. Die Lageveränderung des Retinabildes bei einer nicht mehr gesehenen Bewegung von 0,02 mm beträgt 1 Mikron.

Als Beispiel sei einer meiner Versuche in Tabellenform angeführt.

Versuch vom 1. Mai 1906.

Versuchsperson B., Emmetrop. Rechtes Auge. Augenabstand 30 cm. Richtung der Bewegung vertikal. Die erste Kolumne gibt die laufenden Nummern der einzelnen Beobachtungen an, die zweite die Grösse der Verschiebung in Millimetern. In der dritten Kolumne steht die Antwort der Versuchsperson verzeichnet auf die Frage, ob eine Verschiebung stattgefunden oder nicht. Die Bedeutung der letzten Kolumne soll an anderer Stelle besprochen werden.

Nummer	Exkursion	Sichtbarkeit	Scheinbare Grösse der Bewegung
1	0,02	ja (aber nicht ganz sicher)	unbestimmt
2	0,01	nein	—
3	0,04	ja	$\frac{1}{2}$ mm
4	0,03	ja	$\frac{1}{2}$ mm
5	0,05	ja	$\frac{1}{2}$ mm
6	0,03	ja	sehr klein
7	0,02	nein	—
8	0,01	nein	—
9	0,016	nein	—
10	0,02	ja (sehr gering)	unbestimmt
11	0,03	ja	$\frac{1}{2}$ mm

Vollständig übereinstimmend waren, wie ja auch nicht anders zu erwarten war, die Ergebnisse bei einem Augenabstand von 2 m.

Bei dieser Versuchsanordnung betrug die Exkursionsgrösse, bei der die Bewegung bei mittlerer Tagesbeleuchtung noch mit Bestimm-

heit erkannt wurde, 0,2 mm, während eine solche mit nur 0,15 mm nicht mehr wahrgenommen werden konnte.

Der wahrzunehmenden Lageveränderung von 0,2 mm entspricht aber auf der Netzhaut auch wieder eine Verschiebung von 1,5 Mikra.

Versuch vom 23. Mai 1906.

Versuchsperson N., Myop, korrigiert. Beide Augen. Distanz 2 m.

Nummer	Exkursion	Sichtbarkeit
1	0,1	nein
2	0,2	ja
3	0,3	ja
4	0,2	ja
5	0,2	ja
6	0,1	nein
7	0,1	nein
8	0,1	nein
9	0,2	ja
10	0,18	nein

Sehschärfe für Bewegungen.

Offenbar muss das Bild eines Körpers von einem perzipierenden Netzhautelement auf ein anderes übergehen, damit wir den Eindruck haben, dass der Körper sich bewegt. Nehmen wir als solche Netzhautelemente die Zapfen an, wozu wir wenigstens für die Macula berechtigt sind, dann muss ein Punkt, damit seine Bewegung empfunden wird, zuerst auf dem einen, dann auf einem anderen Zapfen sich abbilden.

Wir können also offenbar die Grösse von Bewegungen, die eben noch wahrgenommen werden, benutzen als Mass für die Sehschärfe.

Nun haben wir aber gesehen, dass auf 2 m Distanz eine Verschiebung von 0,2 mm noch deutlich erkannt wird; eine solche entspricht aber einer Verschiebung des Netzhautbildes um 1,5 Mikra oder einem Sehwinkel von ungefähr 20 Sekunden.

Unsere gewöhnlichen Untersuchungsmethoden zur Bestimmung der Sehschärfe beruhen darauf, dass festgestellt wird, wie weit zwei Punkte sich nähern dürfen, ohne dass dabei die zwei Eindrücke zu einem einzigen verschmelzen¹⁾. Auf diese Weise findet man eine viel geringere Sehschärfe, nämlich als kleinsten Sehwinkel ungefähr 50 Sekunden bis 1 Minute.

1) Vgl. H. Helmholtz, Handbuch d. physiol. Optik 1. Aufl., S. 215. Leipzig 1867.

So habe ich mit Hilfe der Snellen'schen Schriftproben die Sehschärfe meiner Augen bestimmt, und zwar genau unter denselben Bedingungen, unter denen ich die Bewegungswahrnehmung untersucht hatte. Dabei ergab sich folgendes.

Ich las auf 2 m Entfernung, sowohl mit beiden Augen als auch mit jedem Auge allein, eine Schrift, deren Buchstaben 2,5 mm gross sind. Eine 2,0 mm hohe Schrift konnte ich nicht mehr entziffern. Das Netzhautbild eines Buchstabens muss also, damit derselbe erkannt wird, die Grösse von 18,8 Mikra besitzen. Nicht mehr gelesen wurde der Buchstabe, wenn sein Netzhautbild nur 15 Mikra gross war. Da bei diesen Buchstaben jede Strichdicke und auch jeder Zwischenraum $\frac{1}{5}$ der Höhe ausmacht, so wurden demnach zwei Punkte noch als getrennt wahrgenommen, wenn der Abstand ihrer Netzhautbilder 3,8 Mikra betrug oder einem Sehwinkel von ungefähr 50 Sekunden entsprach. Nicht mehr als getrennt wahrgenommen wurden Punkte, deren Netzhautbilder 3 Mikra voneinander entfernt waren, welche also unter einem Gesichtswinkel von 42 Sekunden erschienen.

Man kann also eine Bewegung wahrnehmen zwischen zwei Punkten, welche an der gleichen Stelle der Netzhaut nicht mehr als getrennt unterschieden werden können.

Schon Exner¹⁾ hat die gleiche Beobachtung gemacht, aber nur in bezug auf die peripheren Teile des Sehfeldes. Zur Feststellung dieser Tatsache verfuhr er folgendermassen. Ein Draht, der in Form einer Stimmgabel gebogen war, trug an seinen beiden freien Enden je eine Pappscheibe von 2 cm Durchmesser. Durch Auf- und Abwärtsbewegen des ganzen Drahtes wurde erstens die geringste Elongation ermittelt, bei der die Bewegung noch erkannt wurde; zweitens aber entfernte Exner die beiden Scheiben durch Verbiegung des Drahtes so weit voneinander, bis dieselben gerade als zwei getrennte erkannt werden konnten. Dabei zeigte sich, dass die Elongation kaum halb so gross zu sein brauchte, als die Entfernung der beiden Scheiben voneinander. Er machte auch auf die Zweckmässigkeit dieser Erscheinung aufmerksam, da wir dadurch

1) S. Exner, Über das Sehen von Bewegungen und die Theorie des zusammengesetzten Auges. Wiener Sitzungsber. Bd. 72, math.-naturw. Klasse, Abt. 3 S. 156 (162). 1875.

veranlasst werden, den Blick nach dem sich bewegenden Gegenstand zu wenden.

Nach meinen Erfahrungen hat die oben ausgesprochene Behauptung Geltung für die gesamte Netzhaut, auch für die Stelle des deutlichsten Sehens.

Nach Abschluss dieser Versuchsreihe fand ich, dass Stern¹⁾ mit einer anderen Methodik zu ganz ähnlichen Ergebnissen gelangt war. Stern befestigte am Ende eines langen verdunkelten Korridors vor einer Milchglasplatte einen Pappschild mit quadratischem Ausschnitt von 10 cm Seitenlänge. Der Ausschnitt diente als leuchtendes Objekt. Der Pappschild liess sich nach der Seite leicht und geräuschlos bewegen. Der Beobachter war 6 m 60 cm von dem leuchtenden Objekt entfernt, das durch die Objektivlinse eines Mikroskopes auf $\frac{1}{400}$ der natürlichen Grösse verkleinert, andererseits aber dem Auge näher gerückt wurde. Ferner war stets ein fester Punkt sichtbar, mitunter auch deren zwei. Mit dieser Versuchsordnung wurde als untere Grenze einer wahrnehmbaren Bewegung eine solche gefunden, die einem Schwinkel von 15 Sekunden entspricht.

Wie ist es zu erklären, dass die Empfindung von Bewegungen feiner ist als das Unterscheidungsvermögen an derselben Stelle der Netzhaut?

Es scheint auf den ersten Blick auffallend, dass die Sehschärfe viel feiner gefunden wird, wenn wir sie mit Hilfe kleinster Bewegungen untersuchen als dadurch, dass wir zwei Punkte beobachten und sehen, wie lange sie noch als einfach wahrgenommen werden. Dieser Unterschied wird verständlich, wenn man andere Arten der Bestimmung der Sehschärfe in Betracht zieht. So konnte Volkmann²⁾ schon im Jahre 1863 eine viel grössere Sehschärfe nachweisen.

Er unterschied zwei nebeneinander befindliche durch Drähte abgegrenzte Strecken noch sicher, wenn ihre Differenz einem Schwinkel von 12,4 Sekunden entsprach.

1) W. Stern, Die Wahrnehmung von Bewegungen vermittelt des Auges. Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorgane Bd. 7 S. 321 (341). 1894.

2) W. Volkmann, Über die kleinsten relativen Grössenunterschiede, welche wir wahrzunehmen imstande sind. Physiol. Untersuchungen im Gebiete der Optik, 1. Heft, Leipzig 1863, zit. nach E. Hering, Über die Grenzen der Sehschärfe. Berichte d. sächs. Gesellsch. d. Wissensch. zu Leipzig, math.-phys. Klasse, naturw. Teil, Bd. 51 S. 16 (17). 1899.

Wülfing¹⁾ konstruierte sich einen Spalt von etwa $\frac{1}{3}$ mm Breite, der so eingerichtet war, dass man seine untere Hälfte parallel mit sich selbst messbar verschieben konnte, während die obere Hälfte feststand. Der Spalt wurde offenbar von hinten her beleuchtet und bildete so eine helle Linie auf dunklem Grunde. War nun die untere Spalthälfte so eingestellt, dass sie gegenüber der oberen um 0,1 mm verschoben war, dann war diese Dislokation noch auf 2 m Entfernung zu erkennen, also bei einem Gesichtswinkel von 10 Sekunden. Ähnliche Beobachtungen konnte Wülfing machen mit Hilfe von Nonien, die mit schwarzer Tusche auf weissem Karton ausgeführt waren.

Übereinstimmend damit fand eine Sehschärfe, die 11—12 Sekunden entspricht, auch Hering²⁾, der zwei Liniengruppen, die auf einer Glasplatte in Pupillardistanz eingraviert waren, stereoskopisch vereinigte. Für das eine Auge hatten die Striche alle einen gegenseitigen Abstand von 1 mm, für das andere Auge dagegen war der Abstand um kleine Bruchteile eines Millimeters grösser oder kleiner als 1 mm.

Hering fand mit dieser Anordnung, „dass bei günstiger Beleuchtung Abstandsunterschiede der Striche, denen ein Gesichtswinkel von 11 Sekunden entsprach, einen noch sicher merklichen Entfernungsunterschied im Verschmelzungsbilde zu bewirken vermochten“.

Für die Unterschiede je nach der angewandten Methode gab auch Hering³⁾ eine Erklärung.

Denken wir uns die Netzhaut als Mosaik aus lauter regulären Sechsecken bestehend, wobei jedes Sechseck ein Sehelement darstellen soll, dann ist es klar, dass zwei Linien oder zwei Punkte nur dann als solche erkannt werden, wenn dazwischen ein Sechseck freibleibt. Soll letzteres der Fall sein, dann muss die Entfernung von zwei Reizen mindestens um ein geringes grösser sein als der Durchmesser eines solchen Sechseckes; denn ist der Abstand kleiner, dann kann niemals ein freies Sehelement dazwischen bleiben, sondern zwei Nachbarelemente werden erregt, und die Folge ist, dass die

1) E. A. Wülfing, Über den kleinsten Gesichtswinkel. Zeitschr. f. Biol. N. F. Bd. 11 S. 199 (201). 1892.

2) E. Hering, Über die Grenzen der Sehschärfe. Berichte d. sächs. Gesellsch. d. Wissensch. zu Leipzig, math.-phys. Klasse naturw. Teil, Bd. 51 S. 16 (22). 1899.

3) E. Hering, l. c. S. 18.

beiden Reize verschmelzen, wodurch wir nicht zwei Punkte sehen, sondern nur einen.

Anders verhält es sich aber mit der noniusartigen Anordnung von zwei Linien. Bei diesen ist kein Zwischenraum nötig, damit ein Unterschied erkannt wird. Solange keine Verschiebung der beiden Striche gegeneinander stattgefunden hat, sehen wir dieselben in einer geraden Linie, „deren scheinbare Lage bestimmt ist durch die Raumwerte (Breitenwerte) sämtlicher Sehfeldelemente, auf welche das Bild der Linie zu liegen kommt“.

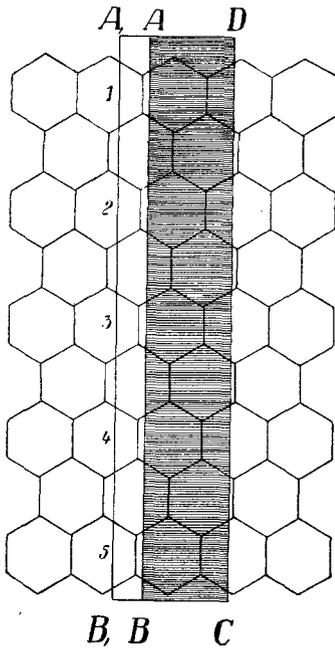


Fig. 2.

Ganz ebenso verhält es sich bei der Untersuchung mit Hilfe von Bewegungen, d. h. mit Hilfe einer sich bewegenden Linie. Denken wir uns die Netzhaut auch wieder dargestellt durch eine grosse Zahl von Sechsecken, deren jedes einem Sehelement entsprechen soll, dann wird der zunächst ruhig gedachte Streifen sich auf der Netzhaut in einer Weise abbilden, wie es in Fig. 2 durch das schraffierte Reckteck *ABCD* dargestellt sein möge. Wird jetzt

parallel mit sich selbst verschoben, dann macht sich der Unterschied in der Lage bemerkbar, sobald der bewegliche Teil eine weitere Reihe von Netzhautelementen trifft, die der feststehende noch nicht erregt hat. Man kann sich leicht überzeugen, dass eine Verschiebung um einen Bruchteil des Durchmessers eines Sechsecks genügt, um eine neue Reihe von Netzhautelementen in Aktion zu versetzen.

Auf diese Weise wird nun die tatsächliche Feinheit des optischen Raumsinnes bestimmt, von der Hering¹⁾ das „optische Auflösungsvermögen“ unterscheidet, welches in der Weise gefunden wird, dass man den kleinsten Abstand zweier Punkte bestimmt, die gerade noch als getrennt erkannt werden.

1) E. Hering, l. c. S. 16.

der Streifen um ein geringes bewegt, dann verschiebt sich die Linie AB nach $A, B,$. Die Folge dieser Verschiebung wird sein, dass jetzt eine Reihe ganz neuer Sehelemente erregt wird, welche früher in Ruhe waren, nämlich 1, 2, 3, 4 und 5.

Eine solche zu einer bestimmten Zeit auftretende Erregung neuer perzipierender Elemente der Netzhaut wird aber offenbar als Bewegung empfunden.

Bei dieser Erklärung habe ich die Tatsache, dass jeder Punkt sich als Zerstreungskreis auf der Netzhaut abbildet, vollständig ausser acht gelassen. Man sieht also, dass die von mir beobachteten Erscheinungen sich vollständig erklären lassen, ohne Berücksichtigung der physikalischen Irradiation. Dass dabei noch Lichtzerstreuung in Betracht kommen kann und sicher auch in Betracht kommt, soll durchaus nicht bestritten werden.

Die Wahrnehmbarkeit für Bewegungen stimmt also offenbar überein mit der Feinheit des optischen Raumsinnes überhaupt, ist aber, wie oben hervorgehoben wurde, feiner als das von Hering so genannte Auflösungsvermögen.

Nun kommt aber Stern¹⁾ in seiner mehrfach zitierten Arbeit zu dem Schlusse, dass im direkten Sehen die Sehschärfe für Bewegung und für Ruhe gleich ist, wobei er, wie seiner Arbeit zu entnehmen, unter Sehschärfe das Auflösungsvermögen versteht.

Dieser Gegensatz erklärt sich leicht aus der Art, wie Stern²⁾ die Sehschärfe für ruhende Objekte prüfte. In demselben Korridor, in welchem er die Wahrnehmung von Bewegungen untersuchte, stellte er eine grosse von hinten her gleichmässig und ziemlich intensiv beleuchtete Milchglastafel auf. Über diese wurde in senkrechter Richtung ein schwarzer Papierstreifen gespannt. War dieser breit genug, so sah man zwei durch einen schwarzen Strich getrennte Felder. Er liess nun das Papier so schmal werden, bis die beiden hellen Felder scheinbar zusammenstiessen, oder mit anderen Worten, bis der Streifen unsichtbar wurde. Und eine Bewegung, welche dieselbe Exkursion hatte, wie die Breite des gerade noch erkannten Streifens, konnte ebenfalls wahrgenommen werden. Nun hat aber das Erkennen eines dunklen Streifens auf weisser Unterlage gar

1) W. Stern, Die Wahrnehmung von Bewegungen vermittelt des Auges. Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorgane Bd. 7 S. 321 (327). 1894.

2) W. Stern, l. c. S. 341.

nichts mit der Sehschärfe zu tun¹⁾. Es ist gerade so, wie wenn man aus der Kleinheit eines wahrnehmbaren Punktes, etwa eines Sternes, irgend einen Rückschluss auf die Sehschärfe machen wollte. Die Ergebnisse von Stern besagen also: Eine Bewegung wird an der Stelle des deutlichsten Sehens dann wahrgenommen, wenn ihre Exkursion ebenso gross ist, wie ein auf leuchtender Unterlage eben noch wahrnehmbarer Streifen. In dieser Form enthalten auch die Ergebnisse von Stern absolut keinen Widerspruch gegen meine Befunde.

Schätzung der Grösse kleiner Bewegungen.

Zu den auffallendsten Erscheinungen bei der Bewegungsempfindung gehört, wie ich sofort beobachten konnte, wohl die, dass die kleinen Lageveränderungen erheblich überschätzt werden. Alle Personen, die nichts von der Anordnung wussten, schätzten die Exkursion etwa auf das Zehnfache ihrer wirklichen Grösse. Ich liess deshalb bei allen meinen Versuchen auch angeben, für wie gross die Bewegung gehalten wurde. Das ist der Zweck der letzten Kolumne im Versuche vom 1. Mai 1906 auf S. 585. Man sieht ganz deutlich, dass die Exkursion, wo überhaupt ein Wert angegeben werden konnte, viel zu gross angeschlagen wurde. Lange nicht so sehr wurden die Bewegungen überschätzt bei einer Entfernung des beobachtenden Auges von 2 m, was aus folgendem Versuch hervorgehen dürfte.

Versuch vom 5. Juli 1906. Vormittags 11 Uhr.

Versuchsperson B., Emmetrop. Rechtes Auge. Bewegungsrichtung vertikal.

Nummer	Exkursion in mm	Sichtbarkeit	Scheinb. Grösse der Bewegung in mm
1	1,0	ja	3
2	0,8	ja	3
3	0,6	ja	2
4	0,4	ja	1
5	0,2	unbestimmt	—
6	0,3	ja	1/2
7	0,2	unbestimmt	—
8	0,15	nein	—
9	0,25	ja	—
10	0,3	ja	1/2—1
11	0,3	ja	1/2—1

1) Zur Präcision des Begriffes Sehschärfe vergl. W. Nagel, Handbuch der Physiologie Bd. 3 S. 339. Braunschweig 1905.

Exner¹⁾ hat vor längerer Zeit die interessante Beobachtung gemacht, dass an der Peripherie des Gesichtsfeldes die Bewegungen grösser erscheinen als zentral. Nach meinen Erfahrungen beschränkt sich das Überschätzen der Bewegungsgrösse nicht auf die peripheren Teile des Gesichtsfeldes, sondern auch zentral werden, wenigstens die kleinen Bewegungen, ganz erheblich überschätzt.

Empfindlichkeit verschiedener Netzhautabschnitte für kleinste Bewegungen.

Da nach den eben erwähnten Beobachtungen von Exner eine Bewegung grösser erscheint, wenn sie nur mit den peripheren Teilen der Netzhaut wahrgenommen wird, so wäre eigentlich zu erwarten, dass mit der Peripherie Bewegungen wahrgenommen werden können, die so klein sind, dass wir sie zentral nicht bemerken. Dieser Annahme steht jedoch eine Angabe von Stern gegenüber. Stern²⁾ hatte die Beobachtung gemacht, dass ein sich bewegendes Objekt, wenn es als bewegt erkannt werden soll, in einer Entfernung vom Fixationspunkt von 20° eine Bewegung ausführen muss, die das Fünffache von der beträgt, die bei direktem Sehen noch erkannt wird.

Ich konnte nun diese Angabe von Stern durch eine genauere Untersuchung des Sehfeldes ergänzen, wobei ich zu nachstehenden Ergebnissen gelangte.

Eine Bewegung muss, damit sie wahrgenommen wird, um so grösser sein, je mehr ihr Netzhautbild von der Macula lutea entfernt ist. Die Grösse, bei der die Empfindung über die Schwelle tritt, wächst in allen Richtungen kontinuierlich von der Macula aus.

Dieses Ergebnis bildet eine schöne Analogie zu der Beobachtung Aubert's³⁾, der gefunden hatte, dass eine Bewegung, um wahrgenommen zu werden, um so rascher erfolgen muss, je weiter sie vom Zentrum des Gesichtsfeldes entfernt ist.

Mit diesem Befunde Aubert's steht auch offenbar die Er-

1) S. Exner, Ein Versuch über die Netzhautperipherie als Organ zur Wahrnehmung von Bewegungen. Pflüger's Arch. Bd. 38 S. 217. 1886.

2) W. Stern, Die Wahrnehmung von Bewegungen vermittelt des Auges. Zeitschr. f. Psychol. und Physiol. d. Sinnesorgane Bd. 7 S. 321 (327). 1894.

3) H. Aubert, Die Bewegungsempfindung. Pflüger's Arch. Bd. 39 S. 347 (362). 1886.

scheinung im Zusammenhang, auf die zuerst Czermak¹⁾ hingewiesen hat, dass der Sekundenzeiger einer Taschenuhr langsamer vorwärts zu rücken scheint, wenn wir den Blick auf eine davon entfernte Stelle der Uhr, etwa auf die XII richten.

Die Empfindlichkeit für die Wahrnehmung kleinster Bewegungen nimmt nun aber nach der Peripherie hin nicht in allen Richtungen gleichmässig ab. Ganz allgemein lässt sich sagen, dass kleine Bewegungen in der Richtung nach rechts und nach links vom Fixationspunkt sehr weit hinaus im Gesichtsfeld bis zur Peripherie empfunden werden, viel weniger weit nach unten und nach oben.

Diese perimetrischen Untersuchungen könnten nun so vorgenommen werden, dass man einen bestimmten Punkt an der Wand fixiert und in verschiedenen Entfernungen die zu untersuchende Bewegung ausführt. Dazu war aber mein Apparat, an dem die Bewegungen hervorgebracht wurden, nicht geeignet.

Deshalb verfuhr ich auf folgende, viel einfachere Weise. Der Apparat, der an der Wand befestigt war, blieb an seiner Stelle. Dagegen wurde der Fixationspunkt geändert, der an der Wand durch eine bestimmte Marke, etwa einen hineingedrückten Reissnagel, sichtbar gemacht war.

Sollte also ein Punkt untersucht werden, der in dem 2 m vom Auge entfernten Gesichtsfeld 10 cm nach rechts vom Fixationspunkt liegt, dann musste man einen Punkt fixieren, der 10 cm links von der zu untersuchenden Bewegung vorhanden war.

Bei dieser Anordnung, wobei die Bewegung stets an der gleichen Stelle der Wand erfolgte, war somit auch dafür gesorgt, dass die Entfernung vom Auge stets die gleiche war, nämlich 2 m. Das Gleiche gilt aber nicht für den Fixationspunkt. Denn wenn derselbe weit von der zu beobachtenden Bewegung entfernt lag, so war er natürlich vom Auge etwas mehr als 2 m entfernt. Infolgedessen wird für die Bewegung zu weit eingestellt. Der durch die Akkommodation bedingte Fehler ist aber bei der Entfernung von 2 m offenbar ziemlich unbedeutend, wie ich mich durch Kontrollversuche — wenigstens für die horizontale Richtung des Gesichtsfeldes — leicht überzeugen konnte. Ich befestigte zu diesem Zweck das Fixationszeichen in der Höhe von 1,28 m über dem Fussboden an einem

1) J. Czermak, Ideen zu einer Lehre vom Raumsinn. Moleschott's Untersuchungen Bd. 5 S. 65 (70). 1858.

Stativ, welches ich in der gewünschten Lage rechts oder links von der Bewegung so aufstellen konnte, dass dabei die Entfernung vom Auge stets 2 m blieb. Auch bei dieser Anordnung waren die Ergebnisse die gleichen.

Wie sich die verschiedenen Teile der Netzhaut hinsichtlich ihrer Empfindlichkeit für kleine Bewegungen verhalten, dürfte am besten aus der nachstehenden Tabelle hervorgehen.

Auf dieser bezeichnet die erste Kolumne die Lage des Fixationspunktes in bezug auf die untersuchte Bewegung. Die Entfernungen sind ausgedrückt in Zentimetern. In der zweiten Kolumne sind die Entfernungen in Gesichtswinkeln angegeben, auf einen halben Grad abgerundet. Aus der dritten und vierten Reihe sind die kleinsten bei der betreffenden Stellung des Auges gesehenen Bewegungen zu entnehmen, wobei die dritte die Grösse der Verschiebungen als Strecke in Millimetern angibt, die vierte in Seh winkeln. In der gleichen Weise sind die nicht mehr wahrgenommenen Verschiebungen aus der fünften und sechsten Kolumne ersichtlich.

**Übersichtliche Zusammenstellung eines Versuches vom 7. Juni 1906,
morgens 10 Uhr.**

Versuchsperson N., Myop, korrigiert. Rechtes Auge. Zimmerbeleuchtung recht hell.

Fixationspunkt in bezug auf den bewegten Gegenstand (b. G.)	Abstand des Fixationspunktes in Winkeln auf $\frac{1}{2}$ Grad abgerundet	Gesehen		Nicht gesehen	
		in mm	in Gesichtswinkeln	in mm	in Winkeln
Bew. Gegenstand (b. G.)	0	0,2	20,6 Sek.	0,15	15,45 Sek.
13 cm rechts vom b. G.	3,5	0,2	20,6 Sek.	0,15	15,45 Sek.
13 cm links vom b. G.	3,5	0,2	20,6 Sek.	0,15	15,45 Sek.
13 cm über dem b. G.	3,5	0,4	41,2 Sek.	0,3	30,9 Sek.
13 cm unter dem b. G.	3,5	0,5	51,5 Sek.	0,4	41,2 Sek.
26 cm rechts vom b. G.	7,5	0,5	51,5 Sek.	0,4	41,2 Sek.
26 cm links vom b. G.	7,5	0,7	1 Min. 12,1 Sek.	0,5	51,5 Sek.
26 cm über dem b. G.	7,5	1,0	1 Min. 43 Sek.	0,9	1 Min. 32,7 Sek.
26 cm unter dem b. G.	7,5	1,5	2 Min. 34,5 Sek.	1,4	2 Min. 24,2 Sek.
46 cm rechts vom b. G.	13,0	1,2	2 Min. 3,6 Sek.	1,0	1 Min. 43 Sek.
46 cm links vom b. G.	13,0		blinder Fleck		
46 cm über dem b. G.	13,0	3,0	5 Min. 9 Sek.	2,5	4 Min. 17,5 Sek.
46 cm unter dem b. G.	13,0	3,0	5 Min. 9 Sek.	2,5	4 Min. 17,5 Sek.
66 cm rechts vom b. G.	18,5	1,4	2 Min. 24,2 Sek.	1,3	2 Min. 13,9 Sek.
66 cm links vom b. G.	18,5		blinder Fleck		
66 cm über dem b. G.	18,5			6,0	10 Min. 18 Sek.
66 cm unter dem b. G.	18,5			6,0	10 Min. 18 Sek.
100 cm rechts vom b. G.	26,5	1,5	2 Min. 34,5 Sek.	1,4	2 Min. 24,2 Sek.
100 cm links vom b. G.	26,5	1,7	2 Min. 55,1 Sek.	1,5	2 Min. 34,5 Sek.
100 cm über dem b. G.	26,5			6,0	10 Min. 18 Sek.
100 cm unter dem b. G.	26,5			6,0	10 Min. 18 Sek.

Am besten lassen sich die Verhältnisse veranschaulichen durch eine bildliche Darstellung, wie sie in der Perimetrie allgemein üblich ist.

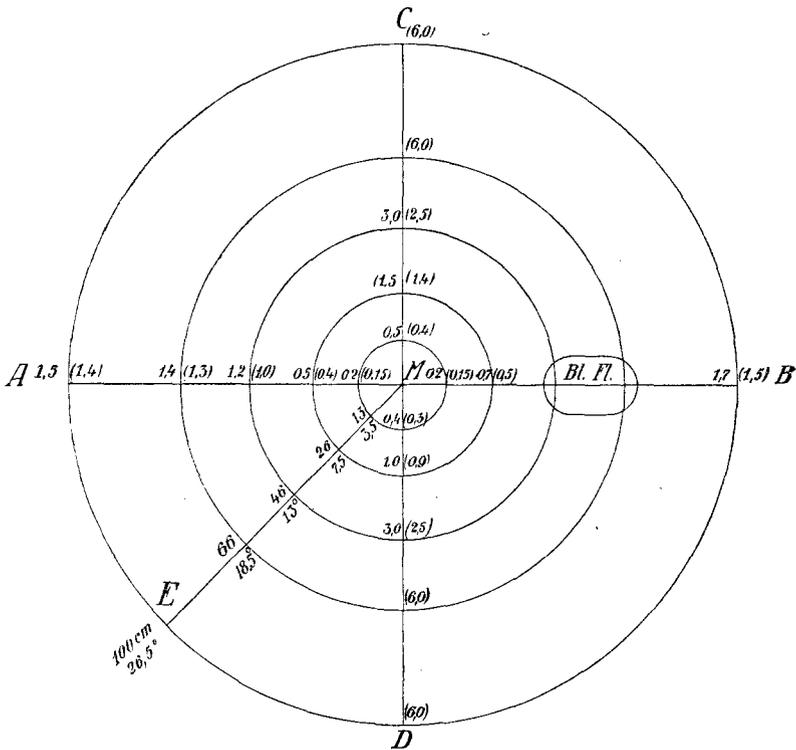


Fig. 3. Gesichtsfeld des rechten Auges bei einer Distanz von 2 m. Die konzentrisch um den Fixationspunkt M gelegten Kreise entsprechen Seh winkeln von 3,5, 7,5, 13, 18,5 und 26,5 Grad. Diese Winkelgrößen sind längs einer schrägen Linie EM verzeichnet. Die darüber stehenden Zahlen bedeuten die Radien grössen der Kreise, auf die 2 m vom Auge entfernte Wand projiziert in Zentimetern. Die auf den Kreisen in horizontalem (AB) und vertikalem (CD) Durchmesser stehenden Zahlen geben die wahrnehmbare Verschiebung an der betreffenden Stelle des Gesichtsfeldes an (in Millimetern ausgedrückt). Die eingeklammerten Zahlen bedeuten die nicht mehr wahrnehmbaren Exkursionen. Das auf dem rechten horizontalen Radius MB eingezeichnete Oblongum $Bl. Fl.$ stellt schematisch die Projektion des blinden Fleckes dar.

Ohne auf die ausgedehnte Literatur über die indirekte Sehschärfe näher einzugehen, möchte ich einer Arbeit von Wertheim¹⁾ zum Vergleiche folgende Angaben entnehmen, die sich im wesentlichen mit den Ergebnissen von Aubert und Förster²⁾ decken.

1) Th. Wertheim, Über die indirekte Sehschärfe. Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorgane Bd. 7 S. 172 (188). 1894.

2) Vgl. W. Nagel, Handb. d. Physiol. Bd. 3 S. 354.

Die Sehschärfe nimmt nach oben und unten schneller ab als nach rechts und links, nach oben schneller als nach unten, und nach medialwärts schneller als lateralwärts.

Bei der Sehschärfe für Bewegungen ist nun, wie wir gesehen haben, etwas ganz Ähnliches zu beobachten, indem bei Entfernung vom Fixationspunkt in der Richtung nach oben und unten die Exkursion der Bewegung viel rascher zunehmen muss, um noch gesehen zu werden, als nach rechts und links. Dagegen konnte ich bei meinen Untersuchungen für Bewegungsempfindung keinen wesentlichen Unterschied einerseits zwischen medial und lateral andererseits zwischen oben und unten beobachten.

Bei dem Übergang auf den blinden Fleck hört die Wahrnehmung von Bewegungen nicht plötzlich auf, sondern die Empfindlichkeit wird allmählich immer geringer, so dass je weiter man in das Gebiet des blinden Fleckes kommt, die Bewegungen immer grösser werden müssen, damit sie erkannt werden.

Abhängigkeit der Empfindung kleiner Bewegungen von ihrer Geschwindigkeit.

Als wesentliches Moment, damit die kleinsten Bewegungen wahrgenommen werden, erwies sich die Geschwindigkeit, mit der die Verschiebung ausgeführt wurde. Nach den Untersuchungen von Aubert¹⁾, wonach eine Bewegung leichter empfunden wird, wenn sie rasch vor sich geht, war zu erwarten, dass eine Verschiebung, je kleiner ihre Exkursion ist, um so schneller erfolgen muss, damit sie noch erkannt wird. Diese Erwartung liess sich auch in zahlreichen Fällen bestätigen. Allerdings habe ich keine eingehenden Untersuchungen hierüber gemacht; ich konnte aber häufig die Beobachtung machen, dass eine Bewegung nicht bemerkt wurde, wenn man den Hebel verhältnismässig langsam verschob; setzte man aber hierauf bei gleicher Exkursion den Hebel in schnellere Bewegung, dann wurde die Verschiebung mit Bestimmtheit erkannt.

Um deshalb möglichst vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, musste die Geschwindigkeit für alle Versuche die gleiche bleiben. Dieses wurde in ziemlich vollkommener Weise dadurch erreicht, dass man sich vornahm, die Verschiebung so schnell wie möglich auszuführen.

1) H. Aubert, Die Bewegungsempfindung. Pflüger's Arch. Bd. 39 S. 347. 1886.

Um mir eine Vorstellung zu bilden, wie schnell die Bewegungen bei meinen Versuchen erfolgten, registrierte ich die Verschiebungen mittelst der Marey'schen Methode der Luftübertragung auf einer rotierenden Kymographiontrommel. Dabei zeigte sich, dass bei einer Exkursion von 2 mm zu jeder Hin- und Herverschiebung eine Zeit von $\frac{1}{5}$ Sekunde erforderlich war. Die Zeit einer einmaligen Verschiebung betrug $\frac{1}{15}$ Sekunde.

Ob diese Geschwindigkeit nun gerade die günstigste für die Wahrnehmung der Bewegung ist, kann ich natürlich nicht sagen, da ich bis jetzt noch keine systematischen Untersuchungen über die Beziehung der Geschwindigkeit zur Wahrnehmbarkeit einer Bewegung vorgenommen habe.

Mit dem Ergebnis, dass eine schnelle Bewegung leichter erkannt wird als eine langsame, stehe ich in einem gewissen Gegensatz zu Stern¹⁾, welcher fand, dass die langsamsten Bewegungen am besten erkannt werden.

Der Widerspruch dürfte vielleicht dadurch zu erklären sein, dass Stern stets mit einem Vergleichslicht als Ruhepunkt arbeitete, häufig auch mit zwei, während ich bei meinen Untersuchungen nie einen ruhenden Punkt hatte. So ist es denn sehr leicht denkbar, dass wenn das Objekt sich zu langsam bewegt, man vielleicht geneigt ist, der Bewegung mit dem Auge zu folgen, oder aber man verliert die Beurteilung, wo sich vor Ablauf der Bewegung das Bild des Gegenstandes befunden hatte.

Aubert²⁾ fand, dass in völliger Dunkelheit, wo also Vergleichsgegenstände fehlten, selbst Bewegungen mit grosser Exkursion und ziemlich bedeutender Geschwindigkeit kaum erkannt werden können. Dieselbe Beobachtung machte Stern³⁾. Bourdon⁴⁾ gelangte jedoch zu der Ansicht, dass die Behauptung Aubert's übertrieben sei.

Ich arbeitete zwar nicht im Dunkeln, hatte aber bei meiner Versuchsanordnung nirgends einen festen Punkt, den ich mit dem bewegten Streif direkt vergleichen konnte. Trotzdem konnte ich aber, wenn überhaupt die Exkursion zur Wahrnehmung ausreichend

1) W. Stern, Die Wahrnehmung von Bewegungen mittelst des Auges. Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorgane Bd. 7 S. 321 (347). 1894.

2) H. Aubert, Die Bewegungsempfindung. 2. Mitteilung. Pflüger's Arch. Bd. 40 S. 459 (473). 1887.

3) W. Stern, l. c. S. 343.

4) B. Bourdon, La perception visuelle de l'espace p. 178. Paris 1902.

war, mit aller Bestimmtheit sagen, ob eine Bewegung ausgeführt wurde oder nicht.

Worauf bei meinen Versuchen diese Sicherheit des Urteils beruht, vermag ich nun allerdings nicht zu entscheiden. Vielleicht rührt sie daher, dass das Auge — wenn auch nur peripher — einige Gegenstände sah, die es als Anhaltspunkt verwenden konnte. Versuche im Dunkeln habe ich bisher nicht angestellt.

Abhängigkeit der Bewegungsempfindung von der Gesamthelligkeit.

Ich machte gelegentlich meiner Untersuchungen die Beobachtung, dass die Schwelle der Empfindung ganz erheblich beeinflusst wird durch Schwankungen in der Helligkeit. Je heller es innerhalb gewisser Grenzen ist, um so kleinere Lageveränderungen kann man noch wahrnehmen. Dieser Einfluss der Gesamthelligkeit machte sich mehr geltend bei indirektem Sehen als bei direktem.

Im direkten Sehen schwankte die untere Grenze der wahrgenommenen Bewegung zwischen 0,2 und 0,3 mm, bei einem Abstand des Auges von 2 m. Bei nur wenig abgewendetem Blick (entsprechend einem Sehwinkel von 3,5 Grad) dagegen zwischen 0,2 und 0,7 mm. In Sehwinkeln ausgedrückt betragen diese bei zwei verschiedenen Helligkeiten wahrgenommenen kleinsten Verschiebungen für die Macula lutea ungefähr 20 und 30 Sekunden, im indirekten Sehen, d. h. bei einem Winkelabstand der Bewegungen von 3,5 Grad etwa 20 Sekunden und 1 Minute 12 Sekunden. Als Beispiel diene ein Vergleich des folgenden Versuches mit dem auf S. 595 wiedergegebenen.

Versuch vom 31. Mai 1906.

Versuchsperson N., Myop, korrigiert. Rechtes Auge. Düsteres Wetter.

Nr.	Fixationspunkt in bezug auf den bewegten Gegenstand	Abstand des Fixationspunktes in Winkeln auf $\frac{1}{2}$ Grad abgerundet	Exkursion in mm	Sichtbarkeit.
1	13 cm links vom bew. Gegenstand	3,5	0,15	nein
2	13 cm links vom bew. Gegenstand	3,5	0,2	nein
3	13 cm links vom bew. Gegenstand	3,5	0,5	nein
4	13 cm links vom bew. Gegenstand	3,5	0,7	nein
5	Bewegter Gegenstand	0	0,2	nein
6	Bewegter Gegenstand	0	0,3	ja
7	Bewegter Gegenstand	0	0,3	ja
8	Bewegter Gegenstand	0	0,2	nein
9	Bewegter Gegenstand	0	0,2	nein
10	13 cm links vom bew. Gegenstand	3,5	0,8	ja
11	13 cm links vom bew. Gegenstand	3,5	0,7	nein

Nr.	Fixationspunkt in bezug auf den bewegten Gegenstand	Abstand des Fixationspunktes in Winkeln auf $\frac{1}{2}$ Grad abgerundet	Exkursion in mm	Sichtbarkeit
12	13 cm links vom bew. Gegenstand	3,5	0,8	ja
13	13 cm links vom bew. Gegenstand	3,5	0,8	ja
14	13 cm links vom bew. Gegenstand	3,5	0,7	ja
15	13 cm links vom bew. Gegenstand	3,5	0,7	ja
16	13 cm links vom bew. Gegenstand	3,5	0,6	nein
17	13 cm links vom bew. Gegenstand	3,5	0,7	ja
18	13 cm links vom bew. Gegenstand	3,5	0,6	nein
19	13 cm links vom bew. Gegenstand	3,5	0,7	ja

In der gleichen Weise wurde auch das Gesichtsfeld 13 cm vom Fixationspunkt nach der anderen Seite hin untersucht, wobei ebenfalls eine Exkursion von 0,7 mm wahrgenommen wurde, eine solche von 0,6 mm nicht mehr.

Richtung der Bewegung.

Alle im vorhergehenden genannten Ergebnisse wurden gewonnen durch Untersuchungen, bei denen die Bewegung in der Richtung von oben nach unten erfolgte; d. h. der unter dem Spalt meines Apparates sichtbare Papierstreif hatte eine horizontale Lage und liess sich in vertikaler Richtung verschieben.

Durch gelegentliche Untersuchungen konnte ich mich nun überzeugen, dass kein Unterschied in den Ergebnissen besteht, ob die Bewegung in vertikaler oder horizontaler Richtung erfolgt. Aber die genaueren Untersuchungen über die Empfindlichkeit für Bewegung in horizontaler Richtung muss ich für eine spätere Mitteilung aufschieben, namentlich wurden bis jetzt, was natürlich notwendig ist, aus technischen Gründen noch keine direkt vergleichenden Untersuchungen vorgenommen zwischen horizontaler und vertikaler Bewegung.

Zusammenfassung der Ergebnisse.

Der Übersichtlichkeit halber seien die Ergebnisse vorliegender Arbeit nochmals in aller Kürze zusammengefasst

1. Wir können an der Stelle des deutlichsten Sehens eine Lageveränderung wahrnehmen, deren Grösse einem Sehwinkel von ungefähr 20 Winkelsekunden entspricht, bzw. einer Verschiebung auf dem Augenhintergrunde um 1,5 Mikren oder den halben Durchmesser eines Zapfennengliedes.

2. Da im allgemeinen zwei Punkte nur als getrennt wahrgenommen werden können, wenn ihre gegenseitige Entfernung einem Sehwinkel von 50 Sekunden — oder auf den Augenhintergrund bezogen 3,5 Mikren — gleichkommt, so erkennen wir offenbar auch mit der Macula lutea eine Bewegung, die zwischen zwei Punkten erfolgt, welche nicht mehr als getrennt unterschieden werden.

3. Die kleinen Bewegungen wurden bei meinen Versuchen erheblich überschätzt, und zwar mehr, wenn sich das bewegte Objekt nur in geringer Entfernung vom Auge (30 cm) befand, als wenn es 2 m von demselben entfernt war. Grosse Bewegungen werden, wie aus den Untersuchungen von Exner hervorgeht, nur im indirekten Sehen überschätzt, zentral dagegen richtig beurteilt.

4. Die kleinste Lageveränderung eines gesehenen Gegenstandes wurde mit der Macula lutea wahrgenommen. Nach der Peripherie zu musste die Exkursion, um die Empfindung einer Bewegung hervorzurufen, viel grösser sein. Und zwar nahm die Schwelle am schnellsten zu in der Richtung von unten nach oben, viel langsamer in der horizontalen Linie nach rechts und nach links.

5. Im allgemeinen erwies sich die Empfindlichkeit abhängig von der Geschwindigkeit, mit der die Bewegung ausgeführt wurde, in der Weise, dass eine kleine Bewegung bei schnellerem Verschieben leichter erkannt wurde als bei langsamem.

6. Auch die Gesamthelligkeit war nicht ohne Einfluss, indem bei grösserer Helligkeit schon kleinere Bewegungen sicher erkannt wurden als bei dunkler Beleuchtung. Es bestand aber insofern ein gewisser Gegensatz zwischen den zentralen und peripheren Teilen der Netzhaut, als die Helligkeitsverschiedenheit in der Peripherie einen viel grösseren Einfluss ausübte als zentral.

7. Die Ergebnisse wurden gewonnen bei einer Bewegung in vertikaler Richtung, erwiesen sich aber als im wesentlichen gleich auch für horizontale Verschiebungen.
