(Aus dem physiologischen Institut der Universität Halle a. S.)

Beobachtungen betreffs der Übereinstimmung der Hering-Hillebrand'schen Horopter- abweichung und des Kundt'schen Teilungs- versuches.

Von

Dr. med. **M. Frank,**

chem. Assistent von Professor Dr. Braunschweig, Halle,
zur Zeit an der Augenklinik zu Kattowitz.

(Mit 1 Textfigur.)

I. Charakterisierung des Problems.

Bekanntlich hat E. Hering¹⁾ gefunden, dass bei Einstellung von Loten oder Stäben in eine scheinbare Ebene — also nach dem sogenannten Augenmass bei festgehaltenem Blick — diese im Allgemeinen nicht in eine wirkliche Ebene gebracht werden, sondern in eine Zylinderfläche, welche beim Nahesehen schwach konkav gegen den Beobachter zu gekrümmt ist. Erst in einem gewissen Abstände, der nach der Individualität des Beobachters variiert, geschieht die Anordnung in einer wirklichen Ebene, jenseits dieser Distanz in einer zunehmend konvexen Zylinderfläche. In dem erstbetrachteten Falle des Nahesehen (auf etwa 30 cm Abstand) ist der konkave Zylinder wenigstens bei der Mehrzahl der Beobachter (nicht so bei Berthold und Dastich — nach Helmholtz) deutlich schwächer gekrümmt, als es dem durch den Fixationspunkt und die Knotenpunkte beider Augen gelegten sogenannten „Horopterkreise“ (Vieth, Johannes Müller) entsprechen würde. Auch Helmholtz (Physiol. Optik I. A. S. 654 ff., 722, II. A. S. 800 ff., 871) hat sich nachträglich von dieser Abweichung überzeugt, sie jedoch auf eine

1) Beiträge zur Physiologie H. 5 S. 298. Leipzig 1864. — Die Gesetze der binokularen Tiefenwahrnehmung. Arch. f. Anat. u. Physiol. 1865 S. 79 bis 97, speziell 82 u. S. 152 bis 165, speziell 161. Kap. Raumsinn. Hermann's Handb. der Physiol. Bd. 3 T. 1 S. 401 bis 403. 1879.

Täuschung bezogen, welche infolge einer falschen Schätzung des Konvergenzgrades bzw. der Entfernung und durch den Mangel sichtbarer vertikaler Distanzen eintrete. Im Gegensatz zu dieser Deutung hatte E. Hering die Anordnung von Loten oder Stäben in einer scheinbaren Ebene als eine empirische Bestimmung des Längshoropters aufgefasst, also des geometrischen Ortes derjenigen Aussenpunkte, welche sich auf korrespondierenden Längsreihen in beiden Augen, also ohne sogenannte Querdissparation abbilden. Die Bestimmung nach dieser stereoskopischen Methode geschieht mit einer verhältnismässig grossen Genauigkeit, während die Aufsuchung des Längshoropters auf Grund des Einfachsehens bzw. des Sehens in rein höhendistanten Doppelbildern relativ weite Grenzen ergibt (Doppelbildermethode von Prevost und von Meissner). Die nach dem Vorgange von Hering ermittelte Fläche liegt beiläufig in der Mitte der Grenzen, ausserhalb welcher Doppelbilder wahrzunehmen sind. — Aus der Horopterabweichung zog Hering den Schluss, dass die korrespondierenden, d. h. funktionell an subjektivem Höhen- und Breitenwert gleichwertigen Netzhautelemente in beiden Augen nicht genau kongruent liegen, dass vielmehr der Abstand je eines Elementes auf der temporalen Netzhauthälfte kleiner sei wie der Abstand des entsprechenden Elementes auf der nasalen. Hering's Beobachtungen und Schlussfolgerungen wurden von F. Hillebrand¹⁾ in eingehenden, messenden Versuchen bestätigt und für die Lehre von der Stabilität der Raumwerte auf der Netzhaut verwertet. Zugunsten von Hering's Identifizierung der geschilderten Stäbeanordnung und des empirischen Längshoropters hat dann A. Tschermak²⁾ folgendes Argument beigebracht. Die durch Stäbe oder Nadeln bezeichnete Zylinderfläche, welche dem Beobachter als Ebene erscheint, erwies sich in besonderen messenden Versuchen zugleich als der Ort der höchsten Empfindlichkeit für Tiefenunterschiede. Für jede andere Anordnung, z. B. im sogenannten Vieth-Müller'schen „Horopterkreise“, ist dieselbe deutlich geringer. Das oben geschilderte Verhalten kann

1) Die Stabilität der Raumwerte auf der Netzhaut. Zeitschr. f. Psych. u. Physiol. d. Sinnesorgane Bd. 5 S. 1 bis 60. 1893.

2) Beitrag zur Lehre vom Längshoropter. Pflüger's Arch. Bd. 81 S. 328 bis 348, speziell S. 342—347. 1900. Auf diese Arbeit wie auf die Abhandlung: Über Tiefenwahrnehmung auf Grund von Doppelbildern (mit P. Hofer), Pflüger's Arch. Bd. 98 S. 299 bis 321. 1903, sei auch bezüglich der Definition des Horopters, der Korrespondenz und der Stereoskopie verwiesen.

daher mit Fug und Recht als Hering-Hillebrand'sche Horopterabweichung bezeichnet werden.

Bereits Hering, ebenso Hillebrand haben als Stütze ihrer Schlussfolgerung, welche auf inkongruente Lage der korrespondierenden Netzhautelemente lautet, den sogenannten Kundt'schen Teilungsversuch angeführt. Kundt¹⁾ hatte bekanntlich beobachtet, dass beim Halbieren einer horizontalen Strecke nach dem sogenannten Augenmass, und zwar unter Fixieren der halbierenden Spitze mit nur einem Auge, die äussere Hälfte regelmässig etwas grösser ausfällt als die innere, welche sich auf der temporalen Netzhautpartie abbildet. Das entgegengesetzte Resultat, welches H. Münsterberg²⁾ und R. Fischer³⁾ an relativ kleinen Strecken erhielten, ist entweder auf zufällige Fehlerquellen oder auf eine individuelle Eigentümlichkeit ihrer Augen zu beziehen (vergl. F. Hillebrand S. 55). Die wesentliche Übereinstimmung des Kundt'schen Ergebnisses mit der Schlussfolgerung, welche Hering und Hillebrand aus der Horopterabweichung gezogen haben, liegt auf der Hand. Auch die Beobachtung A. Nagels⁴⁾, dass identische Druckschriften bei binokularer Verschmelzung im Haploskop auf einer gegen den Beobachter konvexen Fläche erscheinen, hat Hering als ein weiteres Argument von gleichem Sinne angeführt.

Bereits F. Hillebrand (Seite 55 Anm. 2) betonte ferner, dass die Differenzen der Gesichtswinkel, welche sich für ihn beim Kundt'schen Teilungsversuch ergaben, von derselben Grössenordnung (6 bis 20 Winkelminuten) waren wie die Abweichungen, welche er bei der Bestimmung des Längshoropters mittels eines besonderen des Spiegelhaploskopes fand.

Gleichwohl erschien es nicht überflüssig, die Übereinstimmung der Hering-Hillebrand'schen Horopterabweichung und des Kundt'schen Teilungsversuches an einer und derselben Versuchsanordnung und unter denselben Bedingungen messend darzutun. Die bezüglichen Beobachtungen wurden auf Anregung und unter Beteiligung von A. Tschermak ausgeführt.

1) Untersuchungen über das Augenmass. Poggendorff's Annalen der Physik Bd. 120 S. 118 bis 158. 1863.

2) „Augenmass“. Beiträge zur experim. Psychol. H. 2 S. 125 bis 181. Freiburg 1889.

3) Grössenschätzungen im Gesichtsfeld. Graefe's Arch. f. Ophthalm. Bd. 37 H. 1 S. 97 bis 136, vgl. ebenda H. 3 S. 55 bis 85. 1891.

4) Das Sehen mit zwei Augen. S. 58. Heidelberg 1861.

E. Pflüger, Archiv für Physiologie. Bd. 109.

II. Versuchsanordnung.

Der Kopf des Beobachters war durch einen metallenen Gebisshalter festgestellt und blickte in symmetrischer Konvergenz durch eine querovale, innen geschwärzte Röhre (27 cm breit, 23 cm hoch), welche einen passenden Ausschnitt für die Stirne trug. Am abliegenden Ende der Röhre war ein rechtwinkliges Diaphragma angebracht, dessen vier Wangen eine weitgehende Variation des Ausschnittes nach Höhe und Breite erlaubten. Als Beobachtungsobjekte wurden drei schwarze Chinesenhaare mit Loten benutzt, welche durch Vermittlung kleiner Schlitten nebeneinander von einem metallenen Querbalken herabhingen. Der Querbalken ruhte auf zwei weit seitlich abstehenden Säulchen. Die Schlitten gestatten eine Kreuzverschiebung der Lote mittels feiner Schrauben. Der Seitenabstand der beiden seitlichen Lote von dem genau median gestellten Mittellote konnte an der Skala des Querbalkens bis auf Zehntelmillimeter abgelesen werden. Eine andere kleine Skala gestattet die Verschiebungen nach vorne und hinten (sc. von der durch das Mittellot gelegten frontalen Ebene) zu messen. Die Lote hingen zur Dämpfung gegen Erschütterungen in einem Ölbad. Die ganze Aufhängevorrichtung ruhte auf einer Holztafel, welche wiederum auf einer grösseren wagerechten Platte, die mit Millimeterpapier bespannt war, verschoben werden konnte.

Der Beobachter sah nur drei feine schwarze Linien von angenähert gleichem Öffnungswinkel auf einer gleichmässig weissen, rechteckigen Fläche. Die mittlere Linie fixierte er dauernd: als Fixationspunkt diente zunächst eine ganz kleine Wachspferle, nach erreichter Übung eine kleine Ungleichmässigkeit an dem betreffenden Lothaar. Alle übrigen Teile der Versuchsanordnung waren dem Blicke entzogen. Alle sogenannten empirischen Motive für die Tiefenlokalisation waren durch die Versuchsanordnung ausgeschlossen; der Beobachter war bei binokularer Beobachtung ausschliesslich auf die Tiefenwahrnehmung beschränkt, wie sie auf Grund der Querdissparation der Eindrücke in beiden Augen erfolgt. Bei unokularer Beobachtung fehlte jede Grundlage für eine Tiefenauslegung: die drei Lote erschienen dem Beobachter auch bei Anordnung in erheblich verschiedener Tiefe dennoch in einer und derselben frontalen Ebene.

Bei den Versuchen beschränkte ich mich auf die beiden Beobachtungsdistanzen von 30 und 40 cm (Abstand des Mittellotes

vom äusseren Augenwinkel bezw. vom mittleren Knotenpunkte beiderseits: im ersteren Falle war das Diaphragma auf 13 cm Breite, 8 cm Höhe gestellt und befand sich 8 cm vor den Loten, im letzteren Falle waren die Zahlen: 10 cm Breite, 6 cm Höhe, 13 cm Abstand. Die beiden seitlichen Lote, welche indirekt beobachtet wurden, hatten entweder 40 oder 50 mm Seitenabstand. Die Konvergenz der auf das Mittellot gerichteten Gesichtslinien war eine genau symmetrische. Sie entsprach bei 67,7 mm Pupillardistanz (am Helmholtz'schen Visierzeichen bestimmt)

für 30 cm Beobachtungsdistanz . . 12° 57' 26"

„ 40 „ „ . . 9° 42' 32".

Der Refraktionszustand meiner beiden Augen ist Emmetropie. Die Beobachtungen wurden in der Zeit von April bis Dezember 1904 mit zeitweiligen, grösseren Unterbrechungen bei guter Tagesbeleuchtung ausschliesslich von mir ausgeführt.

III. Ergebnis der Versuche.

In der ersten, binokularen Versuchsreihe wurde mittels der drei Lote der empirische Längshoropter bestimmt, d. h. die Lote wurden so eingestellt, dass sie in einer und derselben Frontalebene („Kernebene“ nach Hering), und zwar in gleichem Abstände voneinander erschienen. Die Einstellung wurde mehrmals nach je einer Pause in der Weise überprüft, dass zuerst nur das Mittellot sichtbar gemacht wurde, während die beiden Seitenlote durch je einen Schirm aus schwarzem Karton verdeckt waren. Dann wurde das eine, endlich auch das andere Seitenlot freigegeben. Die von A. Tschermak regulierte Einstellung nach der Tiefe zeigte eine sehr geringe Schwankungsbreite, deren zahlenmässige Registrierung hier wohl überflüssig ist. Andererseits lehrten besondere messende Versuche, dass die Einstellung auf scheinbar gleichen Seitenabstand, welche ich selbst bei konstant belassener Tiefenanordnung regulierte, mit geringer Schwankungsbreite um den objektiv richtigen Wert variierte. Das Nähere erhellt aus der nachstehenden Tabelle I meiner binokularen Versuche.

Nach dem obigen Resultat konnte in einer Anzahl von Versuchen auf die „freie“ binokulare Prüfeinstellung verzichtet werden und die objektiv symmetrische Einstellung gleich als „subjektiv richtig“ für binokulare Beobachtung vorausgesetzt werden. — Aus den

Seiten- und Tiefendistanzen, welche bei dieser Bestimmung des empirischen Längshoropters nach Hering's stereoskopischer Methode ermittelt wurden, konnte nun ohne weiteres die schematische Lage der Bildpunkte in beiden Augen berechnet werden. Es ergibt sich ferner daraus die Abweichung der korrespondierenden Netzhautelemente von der kongruenten oder identischen Lage. Aus der sehr angenäherten Übereinstimmung der objektiven und subjektiven Abstandsgleichheit bei binokularem Sehen ist endlich zu schliessen, dass jene Inkongruenz oder „Discrepanz“ nach Tschermak sehr angenähert gleichmässig auf meine beiden Augen verteilt ist. Zu demselben Schlusse führen übrigens auch die gleich zu erwähnenden Teilungsversuche mit je einem Auge. Hillebrand fand zwischen seinen beiden Augen einen nicht unbeträchtlichen Unterschied (siehe S. 56 bis 57 und Tab. S. 60).

Tabelle I.

Beobachtungs- distanz	Seitenabstand des fixen Seitenlotes mm	Beide Seitenlote stehen vor der Frontalebene des Mittellotes mm	Binokulare Einstellungen des beweglichen Seitenlotes (die Ziffern in Klammer bedeuten die Anzahl der Einzel- versuche)							Mittel aus allen Versuchen
			Mittel	Schwan- kungs- breite	Umschlagsgrenzen					
					eben zu nahe		eben zu fern			
					Mittel	Schwank- breite	Mittel	Schwank- breite		
I. 30 cm (Versuch vom 26. Dez. 1904)	40	1,6	39,98 (5)	39,7-40,4	39,9 (2)	—	40,2 (3)	40,0-40,4	39,94 (10)	
II. 30 cm (Versuch vom 26. Dez. 1904)	50	2,2	50,12 (5)	40,9-50,4	49,75 (2)	49,6-49,9	50,1 (3)	50,0-50,3	50,15 (11)	
III. 40 cm (Versuch vom 23. Dez. 1904)	40	1,43	40,02 (6)	39,6-40,4	39,87 (3)	39,8-40,0	40,33 (3)	40,2-40,4	39,95 (12)	
IV. 40 cm (Versuch vom 23. Dez. 1904)	50	1,8	50,18 (5)	49,9-50,4	49,77 (3)	49,6-50,0	50,13 (3)	50,0-50,3	50,17 (9)	

In der zweiten, unokularen Versuchsreihe war dem Beobachter die Aufgabe gestellt, ausgehend von der Horopteranordnung der drei Lote, ein Seitenlot nach dem Augenmasse scheinbar in dieselbe Entfernung von dem dauernd fixierten Mittellote einzustellen, wie sie dem anderen feststehenden Seitenlote gegeben worden war. In den einen Versuchen war das rechte, in den anderen das linke Auge abgeschlossen; bald wurde die messende, rein seitliche Verschiebung am rechten, bald am linken Seitenlote vorgenommen.

Die Tiefenanordnung blieb während der unokularen Versuchsreihe dieselbe, wie sie in der binokularen Versuchsreihe als „zutreffend“ befunden worden war. Die zahlreichen Einzelversuche ergaben nun immer wiederum, dass die einäugige Einstellung, welche im Prinzip dem Kundt'schen Teilungsversuche gleichkommt, zu demselben Resultate, nämlich zu einer sehr angenähert objektiv richtigen Abstandsgleichung führt, wie die zweiäugige Einstellung. Da die erstere hinwiederum der Hering-Hillebrand'schen Horopterabweichung entspricht, so erscheint damit der messende Nachweis für die Übereinstimmung der Horopterabweichung und des Teilungsversuches erbracht.

Es sei zunächst das Ergebnis meiner unokularen Versuche zu einer Tabelle vereinigt (siehe Tab. II).

Tabelle II.

Beobachtungsdistanz	Seitenabstand des fixen Seitenlotcs	Beide Seitenlote stehen vor der Frontalebene des Mittellotes um	Unokulare Einstellungen des beweglichen Seitenlotes in Millimetern (die Ziffern in Klammern bedeuten die Anzahl der Einzelversuche)		
			beobacht. Auge	Mittel	Schwankungsbreite
I. 30 cm (Vers. vom 4. Mai 1904)	} 40 mm	1,6 mm {	R. A.	40,02 (7)	39,4—40,5
			L. A.	39,93 (7)	39,6—40,3
II. 40 cm (Vers. vom 27. Juli 1904)	} 40 "	1,43 " {	R. A.	40,05 (6)	39,7—40,6
			L. A.	39,97 (6)	39,6—40,4
III. 40 cm (Vers. vom 1. Aug. 1904)	} 50 "	1,8 " {	R. A.	49,72 (5)	49,2—50,5
			L. A.	49,9 (5)	49,6—50,3

Be- obachtungs- distanz	Unokulare Einstellungen des beweglichen Seitenlotes in Millimetern (die Ziffern in Klammern bedeuten die Anzahl der Einzelversuche)				Mittel aus allen Versuchen		Gleichheit der Winkel für ein Auge bestünde bei Stellung
	Umschlagsgrenzen eben zu nah		Umschlagsgrenzen eben zu fern				
	Mittel	Schwan- kungsbreite	Mittel	Schwan- kungsbreite		mm	
I. 30 cm (Vers. vom 4. Mai 1904.)	39,9 (3) 39,7 (4)	39,8—40,0 39,4—39,9	40,37(3) 40,33(3)	40,1—40,6 40,2—40,5	39,96(40) 39,97(36)	{ 39,98(76)	39,19 mm
II. 40 cm (Vers. vom 27. Juli 1904)	39,57(3) 39,6 (3)	39,2—39,9 39,3—39,8	40,4 (3) 40,23(3)	40,2—40,7 40,1—40,4	39,93(12) 39,85(12)	{ 39,89(24)	39,57 "
III. 40 cm (Vers. vom 1. Aug. 1904)	49,63(3) 49,43(3)	49,3—49,8 49,2—49,6	50,43(3) 50,27(3)	50,2—50,7 50,0—50,7	49,80(22) 49,85(20)	{ 49,82(42)	49,26 "

Die unokularen Versuche lieferten, wie gesagt, eine objektiv richtige Abstandsgleichung ebenso wie die binokularen Beobachtungen. Der objektiv wie subjektiv richtigen Abstandsgleichung entspricht jedoch im Winkelmass eine nicht unerhebliche objektive Ungleichung. Die subjektiv gleichwertigen Netzhautelemente auf der inneren und auf der äusseren Netzhauthälfte desselben Auges, ebenso die korrespondierenden Netzhautelemente in beiden Augen zeigen demnach die bekannte, charakteristische Abweichung (Inkongruenz, Diskrepanz) von der geometrisch richtigen Lage. Die bezüglichen Zahlenwerte sind aus Tabelle III zu ersehen.

Tabelle III.
(Pupillendistanz 67,7 mm.)

Beobachtungs- distanz	Seitenabstand beider Seitenlote vom Mittellot mm	Beide Seitenlote stehen vor der Frontalebene des um Mittellotes	Winkel- abstand der Netzhaut- stelle auf der nasalen Netzhaut- hälfte (Winkel $\frac{\alpha}{2} + \delta$)	Winkel- abstand der Netzhaut- stelle auf der temporalen Netzhaut- hälfte (Winkel β)	Diskrepanz zugunsten der nasalen Netzhaut- hälfte	Entspräche d. Teilung einer zur Gesichts- linie im Fixations- punkt senkrechten Strecke im Verhält- nis der nasal abge- bildeten Hälfte zur temporalen
I. 30 cm	40	1,6	7° 40' 2''	7° 30' 36''	9' 26''	40,39 : 39,55 mm
II. 30 cm	50	2,2	9° 36' 11''	9° 20' 42''	15' 29''	50,76 : 49,37 "
III. 40 cm	40	1,43	5° 44' 30''	5° 40' 48''	3' 42''	40,22 : 39,79 "
IV. 40 cm	50	1,8	7° 11' 7''	7° 4' 43''	6' 24''	50,43 : 49,67 "

[Die Berechnung der einzelnen Winkelmasse ergibt sich für die verschiedenen Entfernungen aus folgender geometrischer Figur.

Gegeben: d (Entfernung vom mittleren Knotenpunkt zum Mittellot, Rubrik 1 in den Tabellen),

b (Pupillardistanz),

t (Rubrik 3 in den Tabellen),

s ($\frac{s}{2}$ bildet Rubrik 2 in den Tabellen),

$$N = \sqrt{d^2 - \frac{b^2}{4}}; \sin \frac{\alpha}{2} = \frac{b}{2d}; \tan \frac{\alpha}{2} = \frac{b}{2N}; \tan \left(\frac{\alpha}{2} + \beta \right) = \frac{s+b}{2(N-t)};$$

$$\tan \delta = \frac{s-b}{2(N-t)}.$$

Die für meine Augen gefundenen Diskrepanzwerte sind etwas kleiner als jene, welche F. Hillebrand für seine Augen, speziell für sein linkes Auge, bestimmt hat. Mein empirisch ermittelter Längs-horopter zeigt eine etwas geringere Abweichung vom Müller'schen

Hier sei es mir noch einmal gestattet, Herrn Professor Dr. Tschermak aufrichtig für die Unterstützung bei dieser Arbeit zu danken und ferner meinem Dank Ausdruck zu verleihen für die Einführung in die physiologische Optik, die mir durch den Genannten vor zwei Jahren zuteil wurde gelegentlich einer Studienreise, die ich im Auftrag des Kgl. Bayer. Staatsministeriums nach Halle und Wien unternahm.

auf deren angeborene Grundlage. Vortrag auf dem I. Kongress für experimentelle Psychologie zu Giessen 1904, Bericht S. 28—29. Leipzig 1904. — Eine eingehendere Darstellung „über die Grundlagen der optischen Lokalisation nach Höhe und Breite“ wird A. Tschermak im 4. Jahrgang der Ergebnisse der Physiologie von Asher-Spiro geben.