



E. Hering: *Ueber die Grenzen der Sehschärfe.* (Vorgetragen in der Sitzung vom 4. December 1899. Manuscript eingeleistet am 13. Januar 1900.)

Im Anschluss an einen von Herrn PULVRICH über den stereoskopischen Entfernungsmesser der Firma C. ZEISS gehaltenen Vortrag fand auf der letzten Versammlung deutscher Naturforscher in München eine Discussion statt, bei welcher insbesondere von Herrn LUMMER betont wurde, dass zwischen den, u. A. auch von HELMHOLTZ für das Auflösungsvermögen des Auges angegebenen Grenzen und den von Herrn PULVRICH über die Genauigkeit der binocularen Tiefenwahrnehmungen gemachten Angaben ein auffallender Widerspruch bestehe. Es gelang nicht, diesen Widerspruch durch die Discussion zu lösen. Derselbe besteht jedoch nur solange, als man übersieht, dass bei der üblichen und auch von HELMHOLTZ benützten Methode zur Messung der Sehschärfe etwas ganz Anderes gemessen wird, als bei der Bestimmung der Genauigkeit des binocularen Tiefsehens.

Man hat sich gewöhnt, als Maass der Sehschärfe den Gesichtswinkel des kleinsten gegenseitigen Abstandes zu benutzen, bei welchem zwei möglichst feine Punkte oder Linien noch gesondert wahrnehmbar sind. Als geeignete Objecte für solche Messungen boten sich z. B. Doppelsterne oder Liniengitter, welche man bei möglichst vollkommener Accommodation eben noch aufzulösen vermag. Auf solche Weise aber bestimmt man zwar die Grenzen des optischen Auflösungsvermögens, nicht aber die eigentliche Feinheit des optischen Raumsinns, d. h. man misst nicht die kleinste Verschiedenheit der Lage bzw. Grösse, welche das Auge noch zu erkennen vermag.

Dieser Unterschied ist von grundlegender Bedeutung, gleichwohl aber, soviel ich weiss, nirgends erörtert. Ich selbst pflege ihn zwar schon seit Jahren in meinen Vorlesungen zu besprechen, habe aber bis jetzt keine Gelegenheit genommen, öffentlich darauf zurückzukommen.

Dass man den kleinsten Abstand zweier feinsten Punkte oder Striche, welche noch auflösbar sind, nicht ohne Weiteres als Maass der Feinheit des optischen Raumsinns nehmen darf, geht zunächst schon daraus hervor, dass z. B. die Auflösung einer hellen Doppellinie die Wahrnehmung einer dunklen, die beiden hellen Linien trennenden Zwischenlinie voraussetzt, daher man hier nicht bloss einen Lagenunterschied der beiden hellen Linien, sondern zugleich auch die noch kleinere Lageverschiedenheit der dunklen Zwischenlinie und je einer hellen Linie erkennt. Somit entspricht der Gesichtswinkel des kleinsten hier wahrgenommenen Lagenunterschieds nicht dem Abstände der beiden hellen Linien, sondern dem Lagenunterschied des dunklen Zwischenraumes und je einer hellen Linie. Für letzteren Gesichtswinkel aber dürfte man höchstens die Hälfte des ersteren annehmen. Wenn also z. B. für die Distanz eines Linienpaares, welches eben noch auflösbar ist, ein Gesichtswinkel von 50 Secunden gefunden würde, so wären für den Gesichtswinkel des kleinsten hierbei erkannten Lagenunterschieds höchstens 25'' zu setzen.

Es ist aber längst festgestellt, dass das Auge noch viel kleinere Lageverschiedenheiten zu erkennen vermag. Schon im Jahre 1863 zeigte VOLKMANN¹⁾ in seinen Untersuchungen „Ueber die kleinsten relativen Grössenunterschiede, welche wir wahrzunehmen im Stande sind“, dass, um nur ein Beispiel (S. 130) zu erwähnen, zwei nebeneinander befindliche, durch feinste Drähte abgegrenzte Strecken von zunächst je 0,5 mm oder je 0,9 mm oder je 1,3 mm bei 200 mm Sehweite noch sicher unterschieden wurden, wenn die eine von beiden um $\frac{1}{90}$ mm vergrössert oder verkleinert wurde, was einer Sehwinkel-Differenz von 12,4 Secunden entspricht.²⁾ Auch VOLKMANN'S Untersuchungen über die Grenzen der verkennbaren Unterschiede kleiner Strecken führten zu Werthen der entsprechenden Gesichtswinkel, welche *weit* unter eine Winkelminute hinabgingen.

Im Jahre 1892 zeigte WÜLFING³⁾, dass man Lagenunterschiede zu erkennen vermag, denen ein Gesichtswinkel von 12—10''

1) Physiol. Unterss. im Gebiete der Optik. Leipzig. I. Heft. 1863.

2) Für so kleine Strecken, wie sie hier benützt wurden, gilt nicht mehr das Gesetz von der Constanz des relativen Unterschiedes eben merklich verschiedener Strecken.

3) Ueber d. kleinst. Gesichtswinkel. Zeitschr. f. Biol. N. Folge. XI. Bd. S. 199.

oder noch weniger entspricht. Er verschob an einer noniusartigen Vorrichtung die eine Hälfte eines feinen geraden Striches gegen die andere Hälfte mittels einer Mikrometerschraube so weit, bis die Lageverschiedenheit beider Hälften eben sicher merklich wurde, und berechnete den der Verschiebung entsprechenden Gesichtswinkel.

WÜLFING fand seine Ergebnisse ebenfalls in Widerspruch mit der üblichen Ansicht und schloss aus seinen Versuchen, welche für „den kleinsten Gesichtswinkel“ nur beiläufig ein Fünftel des nach der Doppelobject-Methode gewonnenen Werthes ergab, dass auch der Durchmesser der Netzhautelemente an der Stelle des directen Sehens (bzw. die Axendistanz zweier benachbarter Netzhautzapfen) entsprechend kleiner sein müsse, als man bis dahin angenommen. Dieser Schluss, der gegenüber den Angaben der Histologen befremden muss, ist, wie wir sogleich sehen werden, ebensowenig zwingend, wie die seinerzeit von VOLKMANN unter Einrechnung der Irradiation aus den Ergebnissen der Doppelobject-Methode gezogenen Schlüsse.

Denken wir uns einmal in üblicher Weise den centralen Theil der Netzhaut in so viel hexagonale Flächenelemente zerlegt, als es auf gleicher Fläche Netzhautzapfen giebt, und nehmen wir ferner an, dass für die räumliche Wahrnehmung jedem dieser Sehfeldelemente, wie ich sie nennen will, ein Raumwerth zukommt, welcher eben merklich verschieden ist von den Raumwerthen aller seiner Nachbarn. Soll unter solchen Umständen ein leuchtender Doppelpunkt noch auflösbar sein, so dürfen seine beiden Netzhautbilder bzw. ihre Irradiationsgebiete einander nicht so nahe kommen bzw. sich nicht soweit übereinander schieben, dass nicht zwischen zwei belichteten Sehfeldelementen ein merklich minder belichtetes noch Platz hat. Der gegenseitige Abstand der Punkte kann daher, selbst wenn wir eine ideale, in Wirklichkeit nie erreichte Schärfe ihrer Netzhautbilder annehmen, nie kleiner sein als der Durchmesser eines Sehfeldelementes. Dasselbe gilt von Doppellinien, wobei ich, wie auch im Folgenden, ganz davon absehe, dass das Netzhautbild einer Geraden selbst bei der regelmässigsten Anordnung der Sehfeldelemente doch nur in ganz besonderen Fällen eine in gerader Flucht liegende Reihe von Elementen treffen könnte, im Allgemeinen aber auf eine Reihe mehr oder weniger zickzackförmig angeordneter Elemente zu liegen kommt.¹⁾

1) Die Raumgebilde, welche auf Grund der Netzhautbilder in unserm Bewusstsein entstehen oder anders gesagt durch unser Vor-

Während also für den Abstand auflösbarer Doppelobjecte in der Grösse der Sehfeldelemente eine grundsätzlich unüberschreitbare Grenze gegeben scheint, gilt nicht dasselbe von den mittels der Noniusmethode oder der Methode der Streckenvergleichung beobachteten räumlichen Unterschieden.

Eine zur einen seitlichen Hälfte schwarze, zur andern weisse Fläche sei durch einen horizontal und rechtwinklig zur geraden Grenzlinie des Weiss und Schwarz geführten Schnitt in eine obere und untere Hälfte getheilt, und die untere Hälfte gegen die obere mittels Mikrometerschraube verschiebbar. Solange beide Hälften der verticalen Grenzlinie in einer Flucht liegen, sehen wir eine einzige gerade Linie, deren scheinbare Lage bestimmt ist durch die Raumwerthe (Breitenwerthe) sämtlicher Sehfeld-elemente, auf welche das Bild der Linie zu liegen kommt. Setzen wir den idealen, aber vielleicht nie genau verwirklichten Fall, dass die betroffenen Sehfeldelemente in geraden und zufällig dem Bilde der Grenzlinie parallelen Reihen angeordnet wären, so ergeben sich zunächst zwei, durch die Figuren 1 a und b und Fig. 2 versinnlichte Möglichkeiten. Fig. 1 a zeigt uns die untere Bildhälfte der Grenzlinie des Weiss auf der Elementenreihe *m m* derart liegend, dass eine kleine Verschiebung, wie sie die obere Hälfte des Linienbildes bereits zeigt, zureichend ist, um ausser den schon betroffenen auch noch Elemente der Reihe *n n* durch das Licht der weissen Flächenhälfte zu erregen. Sobald nun die Erregung der letztgenannten Elemente gross genug wird, um merklich zu werden, wird auch die Lageverschiedenheit der beiden Linienhälften merklich werden können, insoweit unsere Annahme richtig ist, dass je zwei

stellungsvermögen geschaffen werden, sind im Vergleich zum bezüglichen Netzhautbilde stets schematisirt und idealisirt, sonst könnte es unter unsern Gesichtswahrnehmungen eine genau gerade Linie, eine genaue Kreislinie etc. überhaupt nicht geben. Wenn das Bild einer geraden Linie auf der Netzhaut ganz festläge, so liesse sich fragen, warum uns dieselbe entsprechend der Lage der betroffenen Netzhautelemente nicht im Allgemeinen gezahnt erscheint; da aber in Folge der unaufhörlichen kleinen Bewegungen des Auges das Linienbild sich fortwährend auf der Netzhaut verschiebt, so schwanken die relativen Raumwerthe der einzelnen Linienelemente innerhalb gewisser enger Grenzen um einen Mittelwerth hin und her, welcher letztere für die Wahrnehmung das Bestimmende sein wird. Derartige Betrachtungen sind unvermeidlich, solange man verhältnissmässig so grosse Gebilde, wie es die Zapfen sind, als Sehfeldelemente im oben entwickelten Sinne gelten lässt.

benachbarten Sehfeldelementen eben merklich verschiedene Orts-
werthe zukommen. Freilich wird eine kleine Verschiebung des
Linienbildes auf der Netzhaut hinreichen, um beide Linienhälften
wieder auf eine und dieselbe Elementenreihe von durchgängig
gleichem Breitenwerth zu bringen, wie es Fig. 1 b zeigt; aber
eine kleine abermalige Verschiebung des Auges in derselben oder
in entgegengesetzter Richtung wird beide Linienhälften wieder
auf Reihen verschiedenen Breitenwerthes schieben, und so kann

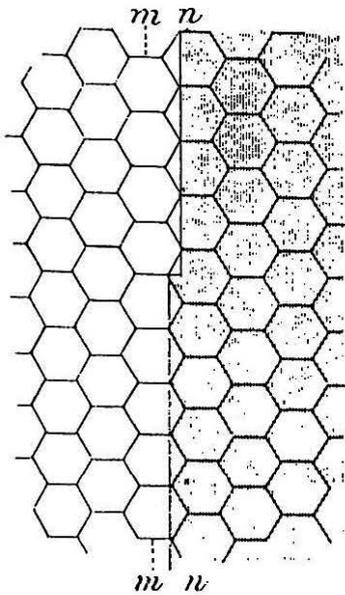


Fig. 1 a.

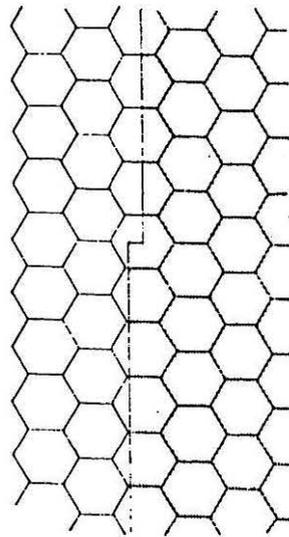


Fig. 1 b.

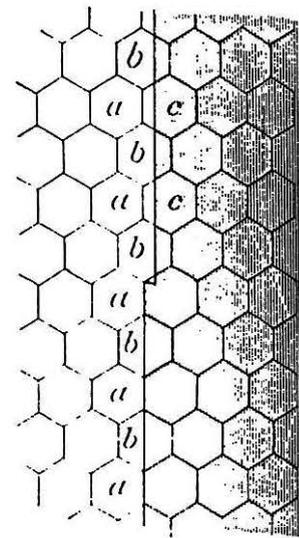


Fig. 2.

die zwar vorübergehende, aber sich wiederholende Merklichkeit der
Lageverschiedenheit genügend sein, die letztere für die Wahr-
nehmung zu sichern.

Ein zweiter schematischer Fall ist in Fig. 2 dargestellt, wo
die Grenzlinie je zwei Seiten der regelmässig hexagonalen Sehfeld-
elemente zufällig parallel liegt. Die untere Hälfte des Bildes der
Grenzlinie läuft abwechselnd über die Mittellinie eines Elementes
(*b*) und über die Grenzlinie zwischen je zwei Elementen; ihre
scheinbare Breitenlage wird also eine Resultirende aus den Breiten-
werthen der mit *a* und *b* bezeichneten Elemente sein. Die obere
Hälfte der Grenzlinie des Weiss aber ist über die Grenze der mit *a*
bezeichneten Elemente etwas nach rechts auf die mit *c* be-
zeichnete Elementenreihe gerückt, und ihre scheinbare Breitenlage
wird durch die Breitenwerthe der mit *b* und *c* bezeichneten Ele-
mente bestimmt und von der Lage der unteren Bildhälfte eben
merklich verschieden sein, sofern die Erregung der *c*-Elemente
merklich wird.

Die soeben beschriebenen Fälle sind Grenzfälle; ihnen liessen sich diejenigen anreihen, in denen die Grenzlinie zwischen Schwarz und Weiss eine beliebig schiefe Lage zu den Elementenreihen hat, und schliesslich könnte man statt der angenommenen regelmässigen eine mehr oder weniger abweichende Anordnung der Sehfeldelemente annehmen. Immer aber kommt man zu dem Ergebnisse, dass unter günstigen Umständen schon die Verschiebung der einen Linienhälfte um einen Bruchtheil eines Elementendurchmessers zur Ebenmerklichkeit der Lagenänderung schon genügend erscheint, falls nur die der weissen Objectfläche entsprechende „Lichtfläche“ des Netzhautbildes an ihrer Grenze steil genug abfällt.

Denn das von einem leuchtenden Punkte ausgehende Licht wird selbst unter den günstigsten Umständen auf der Netzhaut nicht wieder in einem Punkte vereinigt, sondern beleuchtet auf derselben eine kleine Fläche. Denken wir uns für einen gegebenen Fall in jedem Punkte eines solchen kleinen flächenhaften Punktbildes eine Ordinate errichtet, deren Höhe der Stärke der Belichtung ihres Fusspunktes entspricht, so erhalten wir die von MACH sogenannte Lichtfläche des Bildes. Ebenso entspricht der erwähnten Grenzlinie einer leuchtenden Fläche des Aussenraumes auf der Netzhaut nicht wieder eine scharfe Grenzlinie, wie wir sie auf unsern Figuren angenommen haben, sondern die Lichtfläche greift mehr oder weniger schnell abfallend über die theoretisch geforderte Grenze des beleuchteten Bildtheiles hinüber (physikalische Irradiation). Soll nun die Lageverschiedenheit der beiden Hälften einer solchen Grenzlinie schon merklich werden, wenn sie im Netzhautbilde auch nur einen Bruchtheil des Durchmessers eines Sehfeldelementes beträgt, so ist erforderlich, dass die erwähnte Lichtfläche steil genug abfällt, um bei so kleiner Verschiebung die Belichtung der neu ergriffenen Elementenreihe schon merklich zu ändern. Es wird also der Werth der kleinsten merklichen Lagenänderung ebenfalls von der Schärfe des Netzhautbildes, der mehr oder minder günstigen Beleuchtungsintensität und dem Adaptationszustande des Auges mit abhängen.

Analoge Betrachtungen, wie die eben angestellten, gelten auch für die Methode der Streckenvergleichung, wie sie VOLKMANN benützte. Wenn von den Netzhautbildern der beiden nebeneinander liegenden Strecken das eine auch nur um einen Bruchtheil eines Elementen-Durchmessers länger ist, so wird es

günstigenfalls ein Sehfeldelement mehr zu afficiren vermögen, als das andere.

Beim binocularen Tiefsehen handelt es sich ebenfalls um die Wahrnehmung von Lageverschiedenheiten, und es gelten für die Versuche über die Genauigkeit der binocularen Tiefenwahrnehmung die analogen Gesichtspunkte wie für die Untersuchungen nach der Noniusmethode oder nach der Methode der Streckenvergleichung. Schon HELMHOLTZ hat diese Genauigkeit zu messen versucht. Er benutzte dazu drei zunächst in einer dem Gesichte parallelen und 340 mm von den Augen entfernten Ebene angeordnete Nadeln, deren gegenseitiger Abstand 12 mm betrug. Die mittlere Nadel wurde sodann soweit aus der Ebene der beiden andern verschoben, bis ihre von der Ebene der beiden andern abweichende Lage eben merklich wurde, wozu eine Verschiebung von $\frac{1}{2}$ mm genügte. Bei dieser Abweichung entspricht der Mittelnadel, wenn die beiden seitlichen auf correspondirenden Stellen des Doppelauges abgebildet sind, eine binoculare Parallaxe von $00\frac{1}{2}$ Winkelsecunden. Diese zufällige Uebereinstimmung mit dem kleinsten Gesichtswinkel eines noch auflösbaren Doppelpunktes oder Doppelstriches hat es wohl verschuldet, dass HELMHOLTZ seinen Versuch gar nicht variirt, sondern ohne Weiteres geschlossen hat, „dass die Vergleichung der Netzhautbilder beider Augen zum Zweck des stereoskopischen Sehens mit derselben Genauigkeit geschieht, mit welcher die kleinsten Abstände von einem und demselben Auge gesehen werden.“¹⁾ Dieser Schluss war ungerechtfertigt, weil hier unter den „kleinsten vom Auge gesehenen Abständen“ die Abstände der eben noch auflösbaren feinen Doppelobjecte, nicht aber die kleinsten noch merklichen Lageverschiedenheiten (nach Breite oder Höhe) verstanden waren, und weil eine weitere Variirung seines Versuches auch HELMHOLTZ zu ganz andern Werthen für die Genauigkeit der Tiefenwahrnehmung geführt haben würde.

Vor mehreren Jahren hatte Herr Dr. CZAPSKI von der Anstalt C. ZEISS die Güte, mir zwei Glastafeln mit eingravirten Liniensystemen zur Benutzung zu überlassen, welche zur Untersuchung der Grenzen des stereoskopischen Sehens hergestellt worden waren. Auf der von mir benutzten Tafel befanden sich jederseits (in Pupillendistanz) mehrere Gruppen von 5 mm hohen Strichen, deren

1) Handbuch der physiol. Optik. I. Aufl. S. 645.

gegenseitiger Abstand für das eine Auge ziemlich genau 1 mm auf der andern z. Th. um kleine Bruchtheile eines Millimeters grösser oder kleiner war. Da ich mässig kurzsichtig bin, vermochte ich leicht bei Sehweiten zwischen 30 und 40 mm mit freien Augen je zwei dieser Strichgruppen binocular zu vereinigen und festzustellen, welche Striche deutlich näher oder ferner erschienen als ihre Nachbarn. Die jeweilige Entfernung der Glastafel vom Knotenpunkt der Augen wurde genau bestimmt, und die gegenseitigen Abstände der Striche unter dem Mikroskope gemessen. Es ergab sich, dass bei günstiger Beleuchtung Abstandsunterschiede der Striche, denen ein Gesichtswinkel von 11" entsprach, einen noch sicher merklichen Entfernungsunterschied im Verschmelzungsbilde zu bewirken vermochte. Man denke sich also jederseits drei je ein Millimeter von einander abstehende 5 mm hohe Verticalstriche und sodann den mittlern Strich der einen Gruppe soweit seitlich verschoben, dass die Strecke seiner Verschiebung einem Gesichtswinkel von nur 11 Secunden entspricht: so verräth sich im binocularen Verschmelzungsbilde diese Lageänderung durch ein Heraustreten des Mittelstriches aus der Ebene der beiden andern. Ich habe nicht untersucht, ob sich mir noch kleinere Lageverschiedenheiten der Striche streoskopisch bemerkbar machen würden. Herr Dr. F. HOFMANN, welcher auf meine Veranlassung an der zweiten Tafel Beobachtungen angestellt hat, fand als *Grenzwert* des fraglichen Gesichtswinkels 11—12". Nach PULVRICH'S Angabe vermögen jugendliche Personen mit recht scharfen, in gleichmässiger Uebung gehaltenen Augen noch parallaktische Richtungsunterschiede von 10" und noch weniger im freien Sehen als Tiefenverschiedenheiten zu erkennen. Ueber die zu diesen Bestimmungen benutzten Objecte ist nichts angegeben, daher vorläufig eine Vergleichung mit den Versuchen von VOLKMANN, WÜLFING etc. ausgeschlossen ist.

Ueberhaupt will ich hier auf die interessanten und noch nicht genügend untersuchten Beziehungen zwischen der Feinheit des binocularen Tiefsehens und der Feinheit des binocularen Sehens nach Breite und Höhe, kurz gesagt der Tiefensehschärfe und der Flächensehschärfe nicht eingehen. Nur eines sei hier noch kurz erwähnt, nämlich dass ich bei meinen Beobachtungen an den Strichgruppen der erwähnten Glastafel abermals die Beobachtung machen konnte, wie ungleich leichter und sichrer sich kleine Verschiedenheiten zweier Distanzen auf stereoskopischem

Wege feststellen lassen als bei gewöhnlicher binocularer Betrachtung, eine Thatsache, die mir eingehender Untersuchung werth scheint. Dabei müssten beide Beobachtungsweisen an genau denselben Objecten vergleichend zur Anwendung kommen. —

Es braucht schliesslich kaum gesagt zu werden, dass wenn man die, der vorliegenden Abhandlung zu Grunde gelegten Voraussetzungen über die Sehfeldelemente und ihre räumlichen Beziehungen zu den Netzhautzapfen durch wesentlich abweichende Annahmen ersetzt, z. B. die Verschiedenheit des Querschnittes der Aussenglieder von dem der Innenglieder mit in Rechnung zieht, auch die Deutung der besprochenen Thatsachen eine z. Th. andre werden muss. Hier kam es mir nur darauf an zu zeigen, wie sich diese Thatsachen den jetzt üblichen Annahmen über die Sehfeldelemente, deren Richtigkeit hier dahingestellt bleibt, unterordnen lassen.

21.2.17