(Physiologisches Laboratorium in Leyden.)

Eine einfache physiologische Erklärung für verschiedene geometrisch-optische Täuschungen.

Von

W. Einthoven.

(Mit 22 Textfiguren.)

Inhalt:

	Seite
Einleitung	1
Verschiedene optische Täuschungen und ihre Erklärung	4
Die Grösse der durch das Müller-Lyer'sche Paradoxon verursachten optischen Täuschung	14
Indirecte Sehschärfe	21
Die Grösse der durch das Poggendorff'sche Paradoxon erzeugten Täuschung	27
Schlussbetrachtungen	30
Anhang I	37
Anhang II	39
Anhang III	40

Einleitung.

Die geometrisch-optischen Täuschungen, wobei man zwei gleiche Abstände ungleich, gerade Linien gebrochen, parallele Linien nicht parallel u. s. w. zu sehen glaubt, sind von vielen Forschern untersucht und erklärt worden. Bei nahezu allen bis jetzt gegebenen Erklärungen hat man psychische Erscheinungen in den Vordergrund gestellt. In der Regel ist man jedoch erst dann berechtigt, die Psyche zur Hülfe zu rufen, wenn eine einfache physische oder physiologische Erklärung auf Schwierigkeiten stösst.

Hier möge ein physiologisches Moment erörtert werden, das beim Verursachen der erwähnten optischen Täuschungen wahrscheinlich eine wichtige Rolle spielt, während es doch, für soweit ich aus der ziemlich umfangreichen Literatur in Erfahrung bringen konnte, von keinem der Forscher auf diesem Gebiete erwähnt wird.

Wenn man eine Figur betrachtet, wird davon in einem und demselben Augenblicke nur ein kleiner Theil deutlich wahrgenommen, und zwar derjenige Theil, der im Centrum der Retina abgebildet wird. Die übrigen Punkte und Linien fallen auf die Netzhautperipherie und werden undeutlich gesehen. Lässt man den Blick über die Figur hin- und hergehen, so wird man zwar alle einzelnen Theile hinter einander scharf wahrnehmen können, aber doch auf keine andere Weise, als jedes Mal ein einzelnes Theilchen in einem einzelnen Zeitpunkte. In demselben Zeitpunkte muss man noth-

Fig. 1.

Müller-Lyer'sches Paradoxon.

wendig die ganze übrige Figur undeutlich sehen. Und weil man sich bei der Ortsbestimmung einer undeutlich wahrgenommenen Figur durch den Schwerpunkt ihres Netzhautbildes führen

lässt, wird es möglich, dass Figuren oder Figurtheile von bestimmter Form beim indirecten Sehen verschoben erscheinen. Erläutern wir dies mit einem Beispiele.

Im Müller-Lyer'schen Paradoxon, siehe Fig. 1, scheint von den gleich langen Linien AB und BC die letztere die längere zu sein. Fixirt man den Mittelpunkt B , so werden die Enden bei A und C indirect gesehen, also unscharf wahrgenommen. Man projectirt das Ende A dem Schwerpunkte des Netzhautbildes gemäss mehr nach B hin, das Ende C dahingegen mehr von B weg. AB wird also verkürzt, BC verlängert erscheinen. Fixirt man einen andern Punkt, z. B. C , so müssen A und B undeutlich gesehen werden, während dies ebensowohl für B und C zutrifft, sobald man A fixirt, und wohin man auch das Auge richtet, immer muss der Erfolg derselbe bleiben: AB scheinbar BC gegenüber verkürzt.

Der Eindruck, welchen eine unscharf wahrgenommene Figur auf uns machen muss, kann plastisch vorgestellt werden, indem man sie in Zerstreungskreisen abbildet.

Untenstehende Figur 2 stellt eine Müller-Lyer'sche Zeichnung¹⁾ dar, welche in allmählig wachsenden Zerstreuungskreisen photographirt ist. Man sieht, wie die optische Täuschung, welche bei der Betrachtung der obersten, scharf abgebildeten Zeichnung zum Vorschein tritt, allmählig zur Wirklichkeit wird. Der Schwerpunkt der Zerstreuungsfigur bei *A* nähert sich in Wirklichkeit dem Schwerpunkt der Zerstreuungsfigur bei *B*, während das ebenfalls in Zerstreuungskreisen abgebildete Ende *C* sich von *B* entfernt.

1) Die Anfertigung von Photogrammen einer linearen Zeichnung in Zerstreuungskreisen bietet keine Schwierigkeiten dar. Einige Figuren geben schönere Bilder, wenn sie aus schwarzen Linien auf weissem Grunde bestehen, andere, wenn sie umgekehrt aus weissen Linien auf schwarzem Grunde zusammengesetzt sind. Das muss wohl erklärt werden durch die Verschiedenheit der relativen Empfindlichkeit einer photographischen Platte für Licht von wechselnder Intensität.

Wünscht man eine scharfe lineare Zeichnung behufs eines Auditoriums in Zerstreuungskreisen auf einen Schirm zu projectiren, so trage man dafür Sorge, dass jeder Punkt der Zeichnung eine gleichmässig beleuchtete kreisförmige Zerstreuungsfigur bildet. Ich warf dazu ein scharfes Bild des Lichtbrunnens — des Kraters einer Bogenlampe oder der glühenden Seite eines Kalklichtes — auf ein photographisches Objectiv, mittelst welchem wieder ein scharfes Bild der Zeichnung auf den Schirm projectirt wurde. Nahe am Objectiv befand sich ein Irisdiaphragma, das ein ziemlich gleichmässig beleuchtetes, kreisförmiges Stück aus dem Bilde des Lichtbrunnens schnitt. Um das Bild auf dem Schirme in allmählig wachsenden Zerstreuungskreisen erscheinen zu lassen, wird das Objectiv durch gewöhnliche Linsen aus einer Brillendose verstärkt oder abgeschwächt.

Fig. 2.

Diese plastische Vorstellung soll aber nicht mit der Erklärung selbst verwechselt werden. Die Erklärung trägt nur der verminderten Sehschärfe in der Netzhautperipherie Rechnung, während die Frage, welchen Ursachen dieselbe zugeschrieben werden muss, noch einer besonderen Untersuchung bedarf.

Als erste Ursache für die erwähnte Verminderung der Sehschärfe muss die geringere Netzhautempfindlichkeit bezeichnet werden, aber zweitens darf man nicht vergessen, dass auch die Bilder selbst in der Netzhautperipherie diffus sind. Und insofern die auf der Netzhaut vorhandenen Zerstreuungskreise zur Erzeugung der optischen Täuschungen beitragen, kommt unsere plastische Vorstellung mit der Wirklichkeit überein¹⁾.

Verschiedene optische Täuschungen und ihre Erklärung.

Verweilen wir erst noch bei dem Müller-Lyer'schen Paradoxon und den Erklärungen, welche verschiedene Forscher davon gegeben haben.

Nach Müller-Lyer selbst würde die Ursache für eine Anzahl optischer Täuschungen, auch für die nach ihm genannten, in zwei „Trugprincipien“, Contrast und Confluxion gelegen sein. Die Contrasterscheinungen auf manchem Gebiete sind schon lange bekannt, wie Contrast zur Folge von Reizen verschiedener Intensität und verschiedener Qualität, und auch Contrast bei Raumempfindungen. „Wenn nun,“ sagt Müller-Lyer²⁾, „zwei psychophysische Processe, die von benachbarten Reizen ausgelöst werden, sich gegenseitig beeinflussen, so lassen sich bezüglich der Art, auf welche sie diesen Einfluss auf einander ausüben, zwei Möglichkeiten denken: indem sie entweder in der gleichen oder aber in der entgegengesetzten Richtung auf einander wirken können.“ Neben der Möglichkeit für die Erzeugung von Contrast ist also die für die Erzeugung von Confluxion gegeben, und das nach Müller-Lyer genannte Paradoxon wäre einfach ein Beispiel der letzteren.

1) Ueber die reelle Bildverschiebung auf der Netzhaut, welche durch Refraktionsmangel in Verbindung mit der Stelle des Knotenpunktes und der Pupillenfläche erzeugt wird, siehe die Schlussbetrachtungen.

2) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. der Sinnesorgane. Bd. 9 S. 3. Siehe auch 2. Artikel Bd. 10 S. 421—431.

Diese Beweisführung, mag sie auch viel Ansprechendes haben, befriedigt jedoch nicht, weil man ja sowohl für die Erzeugung von Contrast wie für Confluxion noch besondere Erklärungen verlangt. Es gibt einige Contrasterscheinungen, welche thatsächlich auf ganz befriedigende Weise zur Aufklärung gelangt sind, wie z. B. der successive Farbencontrast, der weder für die Young-Helmholtz'sche noch für die Hering'sche Farbentheorie Schwierigkeit darbietet. Viele andere Contrasterscheinungen sind aber noch ganz und gar nicht erklärt, und am wenigsten kann man sich begnügen mit dem Versuche, eine grosse Anzahl optischer Täuschungen einfach dem Contraste und der Confluxion zuzuschreiben, wenn dabei ohne irgendwelche nähere Erläuterung entweder das eine oder das andere Moment in den Vordergrund gerückt wird¹⁾.

Andere Theorien für die Erklärung der optischen Täuschung sind von Auerbach, Brentano, Lipps, Wundt, Delboeuf und Heymans gegeben worden²⁾. Die Auerbach'sche beruht darauf, dass man sich zwischen den Schenkeln der Figur parallel den Vergleichslinien eine Anzahl anderer Linien denkt, welche zur Bestimmung unseres Urtheils über die relative Länge der Vergleichslinien das Ihrige beitragen. Brentano meinte die Erscheinung zu der Ueberschätzung von scharfen Winkeln zurückbringen zu können, aber beide Theorien sind von Lipps und Heymans genügend widerlegt worden³⁾.

Die Theorien von Lipps, Wundt, Delboeuf und Heymans beruhen alle auf dem Einfluss unwillkürlicher, erzwungener Augenbewegungen, oder — falls diese nicht selbst ausgeführt werden — associirter Bewegungsvorstellungen. Sie sind meiner Meinung nach nicht im Stande, auf einfache und genügende Weise die Resultate vieler Messungen zu erklären, welche von Heymans mit Hülfe von

1) Die Worte Müller-Lyer's — a. a. O. Bd. 9 S. 15 —, dass Extensionen, wenn sie parallel laufen, in Confluxion treten, und wenn sie in entgegengesetzter Richtung liegen oder senkrecht zu einander stehen, contrastiren, sind keine Erläuterung, sondern bilden nur den Versuch, die besonderen Umstände anzudeuten, unter welchen das eine Mal Contrast, das andere Mal Confluxion erzeugt wird.

2) Siehe die Literaturangaben in Müller-Lyer a. a. O. Bd. 9 S. 16 und Heymans, Zeitschr. f. Psychol. und Physiol. der Sinnesorgane Bd. 9 S. 221 f.

3) Siehe Heymans a. a. O. S. 236—242.

abgeänderten Müller-Lyer'schen Figuren gemacht worden sind. Anstatt der geraden setzte er Zickzacklinien in die Figur, — nach den Schenkeln zog er in verschiedener Richtung neue Linien — die Schenkel selbst ersetzte er durch gabelförmige Figuren, durch Kreisbogen, durch Strahlenbündel u. s. w. Namentlich die Paradoxa mit den gabelförmigen Figuren und den Kreisbogen, welche ebenso wie die übrigen modificirten Zeichnungen leicht mit der von uns entwickelten Hypothese in Uebereinstimmung gebracht werden können, bieten meines Erachtens den Bewegungstheorien Schwierigkeiten dar. Während wir im letzten Capitel diese Theorien näher erörtern, betrachten wir jetzt einige andere geometrisch-optische

Fig. 3.

Täuschungen, von denen eine grosse Anzahl mit Hülfe der von uns entwickelten Hypothese erläutert werden kann.

Es ist eine bekannte Erscheinung, dass eine spitze Figur kürzer gesehen wird als eine ebenso lange, flach begrenzte. In Fig. 3 A ist die horizontale Seite des Rechteckes $a b$ ebenso lang wie die grosse Diagonale der Raute $a_1 b_1$. Diese letztere scheint aber kürzer zu sein, weil der Schwerpunkt des indirect, also undeutlich wahrgenommenen Endes a_1 eine Strecke weit nach der Mitte der Raute hin verschoben wird, während das Ende a in a bleibt. Dasselbe trifft resp. für b_1 und b zu. In Fig. 3 B findet man diese Ansicht mit Hülfe von Zerstreuungskreisen plastisch vorgestellt: die Täuschung ist hier wieder zur Wirklichkeit geworden.

Eine andere, schon längst bekannte und von hervorragenden

Forschern, Hering, Kundt, Aubert, Lotze, Volkmann, Helmholtz, Wundt, näher untersuchte optische Täuschung¹⁾ ist diejenige, welche erzeugt wird durch die Vergleichung eines auf dem Papier weiss gelassenen Raumes mit einem zweiten gleich grossen Raume, in welchen eine Anzahl von Punkten oder Linien hinein gezeichnet ist.

Hering und Kundt nehmen an, dass vom Auge eine einfache Distanz „nach der Sehne“ geschätzt wird, „die dem Gesichtswinkel der Distanz im Auge zugehört“²⁾. Die rechte Hälfte der Fig. 4 A besteht aus einer Anzahl einfacher Distanzen; sie wird darum nach der Summe der zugehörigen Sehnen geschätzt, welche grösser ist als die einzige Sehne

der linken Figur-
hälfte. Aubert be-
weist jedoch, dass
die nach dieser Hypo-
these berechneten
Unterschiede viel ge-
ringer sind als die
wirklich wahrgenom-
menen. Er schliesst
sich der psychischen
Erklärung Volk-
mann's u. Lotze's
an, „dass eine Sum-
me extensiver Reize
eine intensivere Em-

pfung des Räumlichen hervorbringe, als ein extensiver Reiz, welcher jener Summe gleich ist“³⁾.

Helmholtz vertritt die Ansicht, die Täuschung sei eine Contrasterscheinung: „dass deutlich zu erkennende Unterschiede bei allen Sinneswahrnehmungen grösser erscheinen als undeutlich zu erkennende

Fig. 4.

Hering's Paradoxon.

1) Siehe die Literatur in Aubert, Physiologie der Netzhaut, S. 264 bis 268, Breslau 1865. Weiter noch Helmholtz, Handbuch d. physiol. Optik, 2. Aufl. S. 705; Wundt, Grundzüge der physiol. Psychol. 2. Aufl. Bd. 2 S. 100—104, 1880 und Hering in Hermann's Handbuch der Physiologie Bd. 3 H. 1 S. 554.

2) Aubert a. a. O. S. 265.

3) a. a. O. S. 268.

Unterschiede von gleicher objectiver Grösse. Eine erste Folge davon ist, dass wir eine getheilte Raumgrösse leicht für grösser halten als eine ungetheilte, weil die directe Wahrnehmung der Theile uns deutlicher erkennen lässt, dass die betreffende Grösse so viele und so grosse Theile enthalte, als wenn die Theile nicht erkennbar abgezeichnet sind¹⁾.

Wundt versucht nahezu alle geometrisch-optischen Täuschungen durch die Innervationsempfindung bei den Augenbewegungen zu erklären. Er erwähnt, dass es anstrengender sein muss, eine gerade Linie fixirend zu verfolgen, als dieselbe Distanz mit freiem Blick zu durchheilen. Ist statt der Fixationslinie eine Reihe discreter Fixationspunkte gegeben, so wird die ganze Bewegung gleichsam in

Fig. 5.

eine Anzahl kleiner Bewegungsanstösse getrennt. Und eine solche stossweise Bewegung würde wieder anstrengender sein als die continuirlich fixirende Bewegung des Blicks²⁾.

Die von uns selbst entwickelte Hypothese erklärt die Täuschung unseres Erachtens einfacher. Um nicht in Wiederholungen zu verfallen, weisen wir nur auf Fig. 4 B hin, welche, in Zerstreuungskreisen abgebildet, unsere Ansicht graphisch darstellt.

Die optische Täuschung der Fig. 4 kommt mit vielen anderen Paradoxa überein, von welchen wir in Fig. 5 ein einziges Beispiel geben. Während die Linien bei A ein reines Viereck einschliessen,

1) a. a. O. S. 705.

2) a. a. O. S. 103 u. 104.

erscheint die horizontale Seite grösser als die verticale. In *B* ist die Täuschung wieder zur Wirklichkeit geworden.

Eines der am häufigsten erörterten Paradoxa ist in untenstehender Figur 6 A abgebildet.

Die dünne, schräge Linie, Nebenlinie, welche den dicken, verticalen Streifen, Hauptlinie, schneidet, scheint gebrochen zu sein, während doch die beiden sie zusammensetzenden Theile in Wirklichkeit genau eine Gerade darstellen.

Die Erklärungen, welche die verschiedenen Forscher von dieser Täuschung gegeben haben, kommen mit denjenigen der vorigen Figuren überein: die Sehnentheorie von Hering und Kundt, die Innervationsempfindung bei den Augenbewegungen von Wundt, während Helmholtz seine oben erwähnte Regel in Anwendung bringt, dass eine deutlich abgegrenzte Raumgrösse — hier der spitze Winkel — bei der Vergleichung mit einer weniger deutlich abgegrenzten — hier dem stumpfen Winkel — zu gross erscheint; wir hätten also hier wieder eine Art Contrasterscheinung¹⁾. Durch Contrast im gewöhnlichen Sinne des Wortes kann die Erscheinung jedoch nicht erklärt werden, weil hierdurch, wie Wundt²⁾ richtig bemerkt, kleinere Raumgrössen bei der Vergleichung mit grösseren relativ immer zu klein erscheinen müssten, was gerade das Gegentheil ist von demjenigen, was wir im Poggendorff'schen Paradoxon be-

Fig. 6.

Das Poggendorff'sche Paradoxon.

1) Für eine ausführliche Literaturangabe verweisen wir nach Burmester, Zeitschr. f. Psych. u. Physiol. der Sinnesorgane Bd. 12 S. 355 f. 1896. Von Volkman, Hering (Hermann's Handbuch d. Physiol. Bd. 3 H. 1 S. 580), Guye (Handelingen v. h. 4^e Nederl. Nat. en Geneesk. congres Bl. 236 1893) wird noch die folgende Ansicht näher erörtert. Wir sind im täglichen Leben durch rechtwinkelige Gegenstände umgeben, welche meistens perspectivisch gesehen und auf die Netzhaut mit spitzen oder stumpfen Winkeln projectirt werden. Hierdurch ist die Gewohnheit entstanden, wirklich stumpfe und spitze Winkel entweder gleichfalls für rechte zu halten, oder überhaupt spitze Winkel zu gross, stumpfe zu klein zu schätzen.

2) a. a. O. S. 107—108.

obachten können. Helmholtz führt jedoch noch ein anderes Moment an, das er, insofern es mir bekannt ist, nur zur Erklärung der Poggendorff'schen Figur in Anwendung gebracht hat: die Irradiation. Nach einer ausführlichen Beschreibung der Täuschung und ihrer Veränderungen bei einigen Abänderungen der Figur schliesst er: „Es sind dies nun gerade die Erscheinungen, welche in diesem Falle die Irradiation hervorbringen muss . . . Nahe dem Scheitel der beiden spitzen Winkel treffen die Zerstreuungskreise der beiden schwarzen Linien zusammen und verstärken sich gegenseitig; dadurch rückt das Maximum des Dunkels in dem Netzhautbilde der schmalen Linie dem breiten Streifen näher, und sie erscheint gegen diesen hingelenkt“. ¹⁾

Diese Auseinandersetzung stimmt vollkommen zu unserer Theorie, allein mit diesem Unterschiede, dass, wo Helmholtz auf Irradiation hinweist, wir die Ursache in der geringen peripheren Sehschärfe suchen.

Eine grosse Bedeutung kann der Irradiation nicht beigemessen werden, wie von Wundt ²⁾ bemerkt wird, der den Betrag der optischen Täuschung ungefähr gleich gross findet, wenn die breite verticale Linie durch zwei dünne parallele Grenzlinien ersetzt wird, während auch Helmholtz selbst zugibt, dass bei den grösser gezeichneten Figuren Irradiation kaum der einzige Grund ausmachen kann. Ausserdem müsste unseres Erachtens bei Anwendung von mittelstarkem und namentlich bei schwachem Lichte die Wirkung der Irradiation bedeutend abnehmen.

Unsere Hypothese hat zur Erklärung der Täuschung bei den grossen Figuren mit breiter verticaler Linie keine Schwierigkeit. Ist aber die Sehschärfe in der unmittelbaren Nähe der Netzhautgrube schon so merklich geringer als im Centrum der Fovea selbst, dass dadurch auch die Täuschung bei kleineren Figuren mit dünneren Linien und Streifen erzeugt werden kann? Ich möchte diese Frage bejahend beantworten. Wir können sehr scharf entweder den Scheitel des einen Winkels oder denjenigen des anderen in der Figur fixiren, und es ist schwer anzunehmen, dass wir den nicht fixirten Scheitel ebenso scharf wahrnehmen würden als den fixirten. Auch weisen wir auf eine Untersuchung Wertheim's hin ³⁾, der die indirecte

1) a. a. O. S. 707—708.

2) a. a. O. S. 109. Siehe auch Burmester a. a. O.

3) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorgane Bd. 7 S. 183.

Sehschärfe bis nahe am Netzhautcentrum gemessen und gezeigt hat, dass dieselbe erst äusserst schnell, sodann allmähig langsamer vom

Fig. 7.

Centrum nach der Peripherie hin abnimmt. In der von Wertheim publicirten graphischen Darstellung wird das Centrum als ein einziger Punkt abgebildet, welchem das Maximum der Sehschärfe zuerkannt wird. Zum Schluss bedenke man, dass die Zerstreungskreise im Centrum selbst, welche durch geringe Refractions- und Accommodationsfehler erzeugt werden können, das Ihrige beitragen müssen, die Täuschung hervorzurufen.

Fig. 8.

In einem folgenden Capitel erörtern wir die Grösse der optischen Täuschung auch in den Fällen, wo Veränderungen in der Figur angebracht werden; insbesondere wird dort die Untersuchung Burmester's näher erwähnt werden. Hier wünschen wir nur auf die Figuren 7 und 8 als Modification der Figur 6 hinzuweisen.

Figur 7 bedarf kaum einer näheren Erläuterung. Die beiden verticalen Linien, welche durch eine schräge geschnitten werden, scheinen nicht parallel zu sein. Auf gleiche Weise wie bei Figur 6 erscheinen die spitzen Winkel vergrößert, die stumpfen verkleinert.

Zöllner's Paradoxon.

In der Zöllner'schen Figur 8 werden die verticalen Hauptlinien, welche wieder nicht parallel erscheinen, jede durch eine Anzahl von Nebenlinien geschnitten. Das macht die Erklärung etwas verwickelter. Fixirt man einen willkürlichen Punkt der Figur, so werden die am nächsten stehenden Stücke der verticalen Linien nach unserer Hypothese unparallel erscheinen müssen. Die scheinbaren Neigungen dieser Stücke bestimmen unser Urtheil, dass jede der Hauptlinien in ihrer ganzen Länge nach derselben Richtung abweiche, während unsere falsche Vorstellung durch die weiter stehenden Theile, welche einen zu undeutlichen Eindruck machen, nicht genügend corrigirt wird. Wenn man den Blick über die Figur hin- und hergehen lässt, muss man jedes Mal in der Nähe des Fixationspunktes andere Stücke der Hauptlinien im selben Sinne unparallel sehen, wodurch der Eindruck des Nichtparallelseins bedeutend verstärkt werden muss. Dies geschieht auch wirklich. Die Erscheinung wird schon von Helmholtz¹⁾ erwähnt, der auch bemerkt, dass bei momentaner Beleuchtung die Täuschung entweder ganz schwindet, oder nur noch in schwächerem Reste bestehen bleibt.

Ich habe diese letztere Wahrnehmung insofern erhärten können, dass die Täuschung für mich bei momentaner Beleuchtung auch verringert wird.

Der Einfluss der Blickbewegung kommt namentlich dann stark zum Vorschein, wenn man seiner Fixation mit einer Spitze zur Hülfe kommt, welche man langsam horizontal über die Figur hingleiten lässt²⁾, was Alles mit unserer Hypothese im Einklang ist³⁾.

Weiter ist es leicht verständlich, dass man, um die Täuschung in Stand zu halten, die Nebenlinien nicht zu nahe an einander setzen darf, weil ja die verticalen Stücke, deren scheinbare Richtungsveränderung die scheinbare Drehung der ganzen Linien zur Folge haben muss, zu kurz werden könnten. Wegen derselben Ursache schwindet die Täuschung, wenn die Zeichnungsebene um eine der Verbindungslinie beider Augen parallele Linie genügend rückwärts gedreht wird. Die Nebenlinien bleiben dabei als ziemlich lange Linien auf die Retina projectirt, während die Projectionen der Hauptlinien bedeutend verkürzt werden. Schliesslich nähern sich im Retinabilde

1) a. a. O. S. 710.

2) Siehe Helmholtz S. 712.

3) Siehe auch über den Einfluss der Blickbewegung S. 33 dieser Abhandlung.

die Nebenlinien jeder Verticale einander dermaassen, dass kaum einiger Zwischenraum übrig bleibt, wodurch auch die Ursache für die Täuschung wegfällt.

Von einer Anzahl anderer bekannter geometrisch-optischer Täuschungen, welche mittelst unserer Hypothese erklärt werden können, erwähnen wir nur noch Figur 9.

In Fig. 9 *A* scheint der um das Viereck gezogene Kreis aus vier gesonderten Bogen zu bestehen, welche stärker als die Kreislinie gekrümmt erscheinen, während Fig. 9 *B* unsere Erklärungshypothese wieder graphisch darstellt. Die Schwerpunkte der un-

Fig. 9.

deutlich wahrgenommenen Retinabilder, welche von jeder der vier Ecken gebildet werden, fallen innerhalb der mittleren Kreislinie.

Es fällt nicht schwer, von unserer Hypothese ausgehend, ein neues Paradoxon auszudenken. Man sieht ein Beispiel in Fig. 10.

Die verticalen Linien von Fig. 10 *A* scheinen zu neigen, und Fig. 10 *B* stellt unsere Erklärungshypothese wieder graphisch dar.

Wir schliessen dieses Capitel mit einem optischen Paradoxon, das bis jetzt nur in kleinem Kreise bekannt war, und das zeigt, wie scheinbar rein theoretische Fragen auf unerwartete Weise eine directe praktische Bedeutung erlangen können.

Im Boerhave-Laboratorium zu Leiden ist die Wand des Treppenhauses an der Innenseite mit Ziegeln ausgekleidet. Grosse

und kleine Ziegel wechseln mit einander ab, wie in Fig. 11 abgebildet ist. Die grossen Ziegel sind mit einem schwarzen Rande, die kleinen mit einem weissen Rande versehen, wie Fig. 12 A zeigt.

A

Fig. 10.

B

Obwohl die Ziegel sorgfältig gelegt sind, machen sie den unangenehmen Eindruck, kreuz und quer durch einander zu liegen. Wir weisen

Fig. 11.

auf Fig. 12 B hin, welche unsere Hypothese wieder graphisch darstellt. In B ist die Täuschung von A wieder zur Wirklichkeit geworden.

Um zu untersuchen, ob unsere Theorie zu der Grösse der optischen Täuschung stimmt, werden wir insbesondere einige ausführliche und systematische Messungen zweier Paradoxa näher behandeln, und zwar erstens die

Messungen Heymans' ¹⁾ an der Müller-Lyer'schen Figur, sodann diejenigen Burmester's ²⁾ an der Poggendorff'schen Figur.

Die Grösse der durch das Müller-Lyer'sche Paradoxon verursachten optischen Täuschung.

Weil Heymans' Messungen die Basis untenstehender Berechnung bilden, folgen wir ganz seiner Nomenclatur.

1) a. a. O. Bd. 9 S. 221. Eine zweite Untersuchung von Heymans a. a. O. Bd. 14 S. 101, betreffend die Paradoxa von Loeb und Zöllner wird in dem letzten Capitel erörtert werden.

2) a. a. O.

AB und BC , siehe Fig. 13, werden Vergleichslinien genannt, die übrigen Linien die Schenkel der Figur. Die Winkel, welche die Schenkel mit den Vergleichslinien machen, und welche in einer selben Zeichnung alle gleich gross sind, heissen Schenkelwinkel. Bei der Messung der Grösse der optischen Täuschung wird die Zeichnung in zwei Theile getheilt, AB und B_1C , siehe Fig. 13 II, wovon jeder auf einem besonderen Stück Papier. B_1C wird unter

Fig. 12.

AB geschoben, sodass die beiden Vergleichslinien eine Gerade bilden und die Form ABC Fig. 13 I entsteht. Indem man mehr oder weniger anschiebt¹⁾, kann man BC nach Belieben kürzer oder länger machen; BC wird darum die variable, AB die constante Vergleichslinie genannt, welche letztere in der normalen Müller-Lyer'schen Figur 75 mm lang ist. Wenn BC scheinbar ebenso lang gemacht ist wie AB , wird die Grösse der optischen Täuschung durch den wirklichen Unterschied beider Linien gemessen.

In einer Reihe von bei vielen Individuen ausgeführten Messungen untersuchte Heymans erstens, welchen Einfluss die Grösse des

1) Für nähere Einzelheiten siehe man Heymans a. a. O.

Schenkelwinkels auf den Betrag der optischen Täuschung habe. Er wendete dabei 9 Figuren an. Die constante Vergleichslinie war jedes Mal 75 mm lang, die Schenkel 20 mm, während die Schenkelwinkel hinter einander 10° , 20° , 30° , 40° , 50° , 60° , 70° , 80° und 90° betrugen. Das entscheidende Resultat der Messungen lautet, dass die Grösse der optischen Täuschung dem Cosinus des Schenkelwinkels proportional ist.

Dies stimmt vollkommen zu der oben von uns entwickelten Hypothese; diese letztere gibt sogar mehr, weil sie zugleich das Mittel bietet, auch die absoluten Grössen der optischen Täuschungen zu berechnen. Nimmt man an, dass beim Fixiren von *B*, Fig. 1, die 20 mm langen Schenkel der Figur im indirecten Sehfelde nicht mehr von den Vergleichslinien getrennt wahrgenommen werden¹⁾, und dass man die Enden *A* und *C* im Schwerpunkt ihrer Zerstreuungskreise zu sehen meint, so wird *AB* um den Betrag von $\frac{1}{2} \times 20 \cos \alpha$ verkürzt erscheinen müssen; α bezeichnet den Schenkelwinkel. *BC* erscheint um denselben Betrag verlängert, und der Unterschied zwischen *AB* und *BC* wird also $20 \cos \alpha$ mm betragen.

Die folgende Tabelle kann zeigen, inwiefern die von uns berechneten Werthe mit den von Heymans wahrgenommenen übereinstimmen.

Tabelle 1.

Schenkel- winkel (α) in Graden	Grösse der optischen Täuschung in mm		Unterschied zwischen den be- rechneten u. den wahrgenommenen Werthen
	wahr- genommen	berechnet	
10	18,2	19,7	+ 1,5
20	17,4	18,8	+ 1,4
30	17,4	17,3	— 0,1
40	15,2	15,3	+ 0,1
50	14,3	12,9	— 1,4
60	10,8	10,0	— 0,8
70	7,6	6,8	— 0,8
80	3,4	3,5	+ 0,1
90	— 0,2	0	+ 0,2

Die Uebereinstimmung ist derart, dass sie der Theorie eine nicht geringe Stütze verleiht. Mit einer zweiten Messungsreihe bezweckte Heymans, den Einfluss der Schenkellänge auf die Grösse

1) Siehe hierüber das folgende Capitel: „Indirecte Sehschärfe.“

der optischen Täuschung kennen zu lernen. Dabei wendete er eine Anzahl von Müller-Lyer'schen Figuren an, deren Schenkellängen von 2,5 bis 40 mm abwechselten. Die constante Vergleichslinie war jedes Mal 75 mm lang, die Schenkelwinkel betrugen immer 30°. Das Ergebniss findet man in den ersten zwei verticalen Reihen der nachfolgenden Tabelle 2 wiedergegeben.

Tabelle 2.

Schenkel- länge in mm	Grösse der optischen Täuschung in mm		Unterschied zwischen den be- rechneten u. den wahrgenommenen Werthen
	wahr- genommen	berechnet	
2,5	2,7	2,2	— 0,5
5	6,3	4,3	— 2,0
7,5	9,7	6,5	— 3,2
10	12,5	8,65	— 3,85
12,5	12,7	10,8	— 1,9
15	14,1	13,0	— 1,1
17,5	16,3	15,1	— 1,2
20	15,8	17,3	+ 1,5
30	18,2	26,0	
40	15,5	34,5	

Unsere Theorie fordert wieder, dass der absolute Betrag der optischen Täuschung zu berechnen sei. Ist die Schenkellänge a mm, so muss für den Schenkelwinkel 30° die optische Täuschung $a \cos 30^\circ$ betragen. In der dritten Reihe obenstehender Tabelle sind die berechneten Werthe erwähnt, in der vierten die Unterschiede zwischen den wahrgenommenen und den berechneten. Lenken wir erst unsere Aufmerksamkeit auf die Resultate hin, welche sich bei den Figuren mit kurzen Schenkeln — bis zu 20 mm — ergeben haben. Wir sehen, dass die Unterschiede zwischen den wahrgenommenen und den berechneten Werthen, obwohl grösser als in Tabelle 1, doch noch relativ gering genannt werden dürfen, was noch deutlicher in einer graphischen Darstellung hervortritt, siehe Fig. 14 *A* und *B*.

Die berechneten Werthe sind durch eine ausgezogene, die wahrgenommenen durch eine gestrichelte Linie angegeben. Die Grössen der optischen Täuschung in Millimetern sind auf der Ordinatenachse angegeben, während auf der Abscissenachse in Fig. 14 *A* die Schenkelwinkel in Graden, in Fig. 14 *B* die Schenkellängen in Millimetern

abgemessen sind. Es fällt in die Augen, dass die wahrgenommenen Werthe in der Regel grösser sind als die berechneten. Dies muss wahrscheinlich durch den Umstand erklärt werden, dass der Beobachter, während er seinen Blick über der Figur hin und her wandern lässt, auch die Punkte, welche nur während eines sehr kurzen Momentes fixirt werden können, nicht vollkommen scharf unterscheidet. Ist ausserdem sein Blick nicht auf den Mittelpunkt *B* gerichtet, so werden die drei Stellen *A*, *B* und *C* gleichzeitig unscharf wahrgenommen, wodurch, wie nicht näher auseinandergesetzt zu werden braucht, die optische Täuschung noch grösser werden kann.

Eine besondere Besprechung verdienen die Resultate, welche sich mit den langschenkeligen Figuren ergeben haben. Ueberschreitet

Fig. 14.

Graphische Darstellung der wahrgenommenen und der berechneten Grössen der optischen Täuschungen.

die Schenkellänge gewisse Grenzen, so wächst mit weiter zunehmender Schenkellänge der Betrag der optischen Täuschung nicht mehr. Dies wird namentlich deutlich gezeigt durch weitere von Heymans angestellte Messungen, wobei Schenkellängen von 30 bis 70 mm angewendet worden sind. Bei ungefähr 20 oder 30 mm Schenkellänge scheint also die optische Täuschung einen Grenzwert zu erreichen; die Messungen zeigen weiter, dass die Täuschung bei sehr grosser Schenkellänge wieder etwas abnimmt.

In Uebereinstimmung mit unserer Theorie müssen zwei ganz verschiedene Ursachen für das Zustandekommen eines Grenzwertes vorhanden sein. Erstens kann die Grenze durch den Grad der Sehschärfe in der Netzhautperipherie bestimmt werden, denn sobald die Schenkel im indirecten Sehfeld deutlich getrennt von den Vergleichslinien wahrgenommen werden, hört die Ursache für das Entstehen

der optischen Täuschung auf. Neben diesem Grenzwert der ersten Art muss aber ein Grenzwert der zweiten Art bestehen, der durch eine ganz andere Ursache erzeugt wird. Wenn man eine Müller-Lyer'sche Figur betrachtet, deren Schenkelwinkel klein, deren Schenkellängen relativ gross sind, scheint im peripheren Sehfeld ein so grosser Theil der Schenkel mit den Vergleichslinien zu confluiren, dass die hierdurch erzielte optische Täuschung bis zu einem enormen Betrage gesteigert werden würde. Bevor jedoch dieser Betrag erreicht werden kann, machen sich verschiedene einschränkende Momente geltend, unter welchen die Innervationsempfindung der Augenbewegungen wahrscheinlich eine hervorragende Stelle vertritt. Indem man die beobachtete Figur mit den Augen so zu sagen betastet, kann man sich, auch ohne die Hülfe des vollständigen Retinabildes, ein Urtheil über die relative Grösse der einzelnen Theile bilden. Dieses Urtheil kann fehlen, aber wahrscheinlich wird der gemachte Fehler niemals mehr als eine bestimmte Anzahl von Procenten der wirklichen Länge der Vergleichslinien betragen. Dies bestimmt den Grenzwert der zweiten Art. Die optische Täuschung wird bei der Müller-Lyer'schen Figur niemals grösser als 20 bis 25 % der Länge der Vergleichslinie.

Ich hoffe später die Gelegenheit zu benutzen, durch besondere Messungen zu untersuchen, inwiefern wir mittelst unserer Augenbewegungen im Stande sind, die Länge von Linien zu beurtheilen, inwiefern also die Augenbewegungen wirklich für Dasjenige verantwortlich gestellt werden dürfen, was wir von ihnen verlangt haben. Inzwischen wünschen wir darauf hinzuweisen, dass, wo viele andere Forscher in den Augenbewegungen die Ursache für die Entstehung der Täuschung suchen, wir darin eben ein Mittel erblicken, die Täuschung einzuschränken.

Man kann aus den Messungsergebnissen folgern, unter welchen Umständen jede der beiden Arten des Grenzwertes erreicht werden muss. In den Anhängen I und II geben wir eine ausführliche Berechnung dieser Werthe, während wir uns hier mit den Resultaten begnügen, welche leicht und übersichtlich graphisch dargestellt werden können.

In umstehender Fig. 15 bedeutet AB die 75 mm lange, constante Vergleichslinie aus dem Müller-Lyer'schen Paradoxon, dessen Mitte B gerade vor das Gesicht hingestellt und mit beiden Augen fixirt wird. In diesen Umständen wird im indirecten Seh-

felde k noch eben getrennt von AB wahrgenommen. $Ak = 23,86$ mm. Wenn man k mit B durch eine Gerade vereinigt, bekommt man die geometrische Lage aller Punkte, welche im indirecten Felde gleich schwer wie k von der Vergleichslinie unterschieden werden können¹⁾. Hieraus ergibt sich, dass bei einer Müller-Lyer'schen Figur mit einem Schenkelwinkel $= 70^\circ$ der Punkt l , — bei einem Schenkelwinkel $= 50^\circ$ der Punkt m eben noch als ein einzelner Punkt wahrgenommen wird. Bei diesen Schenkelwinkeln wird also, wenn wenigstens die Schenkel lang genug sind, das Maximum der ersten Art erreicht, während die Grösse der optischen Täuschung durch resp. $Al_1 = 8,2$ mm und $Am_1 = 16,0$ mm vorgestellt wird. Der that-

Fig. 15.

Graphische Darstellung der beiden Arten des Grenzwertes.

sächlich gemessene Betrag weicht nur wenig von diesen Werthen ab: Al_1 beträgt nach den Wahrnehmungen Heymans' 8,6, nach eigenen Wahrnehmungen 9,5 mm; Am_1 nach Heymans' Wahrnehmungen 14,3 mm.

An_1 gibt das Maximum der zweiten Art wieder, wofür wir 18 mm angenommen haben²⁾. Zieht man n_1n senkrecht zu AB , so sieht man unmittelbar aus der Zeichnung, dass dieses Maximum der zweiten Art sich geltend machen muss für alle diejenigen Müller-Lyer'schen Figuren, deren Schenkel eine genügende Länge haben und deren Schenkelwinkel ungefähr 45° oder kleiner sind. Nur bei

1) Dies ist zwar nur annähernd richtig — siehe das folgende Capitel —, aber die Abweichungen sind zwischen gewissen Grenzen relativ gering, so dass die Vorstellung, welche die Figur gibt, für unseren Zweck genügend exact geachtet werden darf.

2) Vgl. die Tabelle 1 S. 16.

Schenkelwinkeln, welche grösser als 45° sind, kann ein Grenzwert der ersten Art hervortreten.

Indirecte Sehschärfe.

Stimmt die indirecte Sehschärfe zu den gefundenen Grenzwerten?

Bevor wir absolute Werthe des Visus behandeln, untersuchen wir erst, auf welche Weise dieser im indirecten Sehfelde bei wachsender Entfernung vom Fixationspunkte abnimmt. Beschränkt man die Messungen auf einen Theil des Sehfeldes, der sich weder zu nahe am Fixationspunkte, noch bei der äussersten Peripherie befindet, so darf man annehmen, dass der Visus umgekehrt proportional dem Winkel zwischen Gesichtslinie und Beobachtungsrichtung abnimmt. Dies wird unzweideutig durch mehrere von Aubert¹⁾ angestellte Untersuchungen gezeigt, der das Verhältniss zwischen dem Raumwinkel und dem Zahlenwinkel, $\frac{R}{Z}$, für eine bestimmte Zahlengrösse auf verschiedenen Stellen des Sehfeldes nahezu constant fand. Der Raumwinkel R ist der doppelte Winkel zwischen der Gesichtslinie und der Beobachtungsrichtung, während der Zahlenwinkel Z der Gesichtswinkel ist, unter welchem die grössten Dimensionen der noch eben richtig erkennbaren Buchstaben oder Zahlen gesehen werden.

Bei einem geübten Auge scheint diese Proportionalität zwar verloren zu gehen, aber die Abweichungen sind gering. In den ersten zwei Reihen untenstehender Tabelle sind einige Messungen Wertheim's²⁾ erwähnt, der nach langer Uebung seine eigenen Augen untersuchte. Die Sehschärfe ist durch ihr Verhältniss zum centralen Visus wiedergegeben, und dieser letztere ist gleich 1 angenommen. In der dritten Reihe (s. S. 22) ist die berechnete Sehschärfe erwähnt.

Bei der Berechnung sind wir ausgegangen vom wahrgenommenen Visus auf 10° Entfernung vom Fixationspunkte, und haben wir angenommen, dass der Visus im indirecten Felde umgekehrt proportional dem Winkel zwischen der Gesichtslinie und der Beobachtungs-

1) a. a. O. S. 239.

2) a. a. O. S. 182, Reihe 1 und 3 der Tabelle.

richtung zunehmen. Die Tabelle zeigt, dass innerhalb der gewählten Grenzen die Annahme als nahezu richtig betrachtet werden darf.

Tabelle 3.

Entfernung vom Fixa- tionspunkte	Visus im medialen Sehfelde	
	gemessen	berechnet
5°	0,333	0,4
10°	0,2	0,2
15°	0,143	0,133
20°	0,1	0,1
25°	0,074	0,08

Wenn wirklich Proportionalität vorhanden ist, muss man erwarten, dass eine Müller-Lyer'sche Figur, in sehr verschiedenen Entfernungen betrachtet, immer eine gleich grosse optische Täuschung verursache. Um diese Erwartung näher zu prüfen, stellte ich eine Versuchsreihe mit drei Figuren an. Die constanten Vergleichslinien hatten die normale Länge, 75 mm. In der ersten Figur, x , war der Schenkelwinkel 30°, die Schenkellänge 9 mm; in der zweiten, y , der Schenkelwinkel 20°, die Schenkellänge 25 mm, und in der dritten, z , der Schenkelwinkel 70°, die Schenkellänge 50 mm. Diese Figuren wurden 11 Personen vorgelegt, und zwar, um den Einfluss der vorhergehenden Messung auf die folgende so gering wie möglich zu machen, in zwei Versuchsserien, wovon die zweite einen Tag oder einen halben Tag nach der ersten ausgeführt wurde. Während in der ersten Serie jede Wahrnehmung in kurzer Entfernung — 25 bis 40 cm — einer Wahrnehmung in 3 m Entfernung folgte, war die Reihenfolge in der zweiten Serie umgekehrt. Jede Figur wurde also von jeder Person zweimal in kleinerer und zweimal in grösserer Entfernung wahrgenommen. Die Ergebnisse findet man in der untenstehenden Tabelle vereinigt. Der wahrscheinliche Fehler des mittleren Werthes wurde nach der Formel $w = 0,845 \times \frac{S_1}{n\sqrt{n-1}}$ berechnet, worin S_1 die Summe der positiv genommenen Abweichungen des Mittelwerthes, und n die Anzahl von Untersuchungen, in unserem Fall 22, bedeutet.

Tabelle 4.

Einfluss der Entfernung einer Müller-Lyer'schen Figur auf die Grösse der optischen Täuschung.

	Mittelwerth der optischen Täuschung in mm		Wahrscheinlicher Fehler des Mittelwerthes in mm	
	in kleiner Entfernung	in grosser Entfernung	in kleiner Entfernung	in grosser Entfernung
Figur x	7,99	7,08	0,62	0,75
Figur y	15,39	14,47	1,31	1,04
Figur z	9,75	9,22	0,85	0,85

Wir sehen deutlich aus der Tabelle, dass die Entfernung einer Müller-Lyer'schen Figur keinen oder so gut wie keinen Einfluss auf die Grösse der optischen Täuschung ausübt, dass also die oben ausgesprochene Erwartung bestätigt wird¹⁾. Die kurzen Schenkel der Fig. *x* werden im peripheren Sehfeld über ihre ganze Länge undeutlich von den Vergleichslinien getrennt gesehen. Rückt man die Figur dem Beobachter näher, so werden die Enden in grösserer Entfernung vom Netzhautcentrum abgebildet, wo die Sehschärfe sehr gering ist. Wird die Figur in grosser Entfernung gehalten, so werden die Enden näher am Netzhautcentrum abgebildet, wo die Sehschärfe grösser ist. Aber die Grösse des Netzhautbildes ist hier der Sehschärfe umgekehrt proportional, so dass die Deutlichkeit, womit die Figur indirect wahrgenommen wird, keine Veränderung erleidet. Damit muss also auch die Grösse der optischen Täuschung unverändert bleiben.

In Fig. *y* erreicht die Grösse der optischen Täuschung einen Grenzwert der zweiten Art, der wahrscheinlich durch die Innervationsempfindung der Augenbewegungen bestimmt wird. Ist Letzteres thatsächlich der Fall, so wird durch die Messungsergebnisse gezeigt, dass man beim Schätzen eines Abstandes durch Augenbewegungen immer einen gleich grossen relativen Fehler macht oder m. a. W. einen Fehler, der proportional dem zu schätzenden Abstände zu- und abnimmt.

1) Vgl. eine derartige Tabelle in Heymans a. a. O. S. 253. Dieser wendete einige Müller-Lyer'schen Figuren von verschiedener Grösse an, welche von jedem Wahrnehmer in gleicher, übrigens von ihm selbst zu bestimmender Entfernung von den Augen gehalten wurden.

In Fig. z sind die Schenkel von solcher Länge und ist der Winkel von solcher Grösse, dass hier der Betrag der optischen Täuschung einen Grenzwert der ersten Art erreicht, der, wie wir oben gezeigt haben, durch den Grad der Sehschärfe beim indirecten Sehen bestimmt wird.

Die mit Fig. z erhaltenen Ergebnisse veranlassen uns, den absoluten Betrag der optischen Täuschung direct mit der absoluten Sehschärfe in der Netzhautperipherie zu vergleichen. Während wir in den Anhängen ausführlich die Berechnungsmethode beschreiben werden, erörtern wir an dieser Stelle nur das Resultat. Als Maassstab für die indirecte Sehschärfe wird der Winkel angenommen, unter welchem zwei Punkte noch eben getrennt wahrgenommen werden können, und zwar in einer Entfernung $= 13^{\circ} 11'$ vom Fixationspunkte. Die folgende Tabelle gibt eine Uebersicht der verschiedenen in diesem Maassstabe ausgedrückten indirecten Sehschärfen: 1. wie dieselben aus den Grössen der optischen Täuschung gefolgert, und 2. wie sie aus den directen Messungsergebnissen einer Anzahl von Forschern berechnet werden können.

Tabelle 5.

Visus im directen Sehfelde in $13^{\circ} 11'$ Entfernung vom Fixationspunkte. Der Visus ist im Gesichtswinkel ausgedrückt, unter welchem zwei Punkte noch getrennt wahrgenommen werden können.

Aus der Grösse der optischen Täuschung nach eigenen Messungen				
berechnet (Müller-Lyer'sche Figur, Schenkelwinkel 70°) . .				$4^{\circ} 50'$
Aus der Grösse der optischen Täuschung nach Messungen von Hey-				
mans berechnet (Müller-Lyer'sche Figur, Schenkelwinkel 70°)				$4^{\circ} 21'$
(" " " " " 50°)				$3^{\circ} 17'$
Nach directen Messungen von Aubert				$1^{\circ} 48'$
"	"	"	Volkman	$6^{\circ} 12'$
"	"	"	Hueck	$0^{\circ} 14'$
"	"	"	Schadow	$\begin{cases} 0^{\circ} 11' \\ 0^{\circ} 44' \end{cases}$
"	"	"	Königshofer	$\begin{cases} 1^{\circ} 50' \\ 3^{\circ} 40' \end{cases}$
"	"	"	Dor	$1^{\circ} 6'$
"	"	"	Dobrowolsky und Gaine . . .	$\begin{cases} 0^{\circ} 50' \\ 2^{\circ} 55' \end{cases}$
"	"	"	Wertheim	$0^{\circ} 20'$

Die durch Klammern verbundenen Zahlen zeigen die Ergebnisse, welche nach den Wahrnehmungen bei mehreren Individuen von ein und demselben Forscher angegeben sind.

Am meisten muss wohl auffallen, dass die Resultate so sehr von einander abweichen. Volkman n gibt mit $6^{\circ} 12'$ einen 30 bis 40 Mal geringeren Visus an als Schadow, der in einem Fall einen Visus = $11'$ findet. Die Messung der indirecten Sehschärfe ist keine leichte Sache. Abgesehen von der Schwierigkeit, welche im genauen Fixiren gelegen ist und bei bleibender Beleuchtung für ein geübtes Auge sehr hoch geschätzt werden muss, hat man auch noch mit einer Anzahl von über die ganze Retina verbreiteten blinden Flecken zu kämpfen, von denen einige constant, andere nur zeitweise vorhanden sind ¹⁾. Schon sehr bald kann sich der Einfluss der Ermüdung geltend machen. Fixirt man die Mitte einer Müller-Lyer'schen Figur während 5 bis 20 Secunden, so kann man beobachten, dass die indirect wahrgenommenen Enden der Figur beim Fixiren plötzlich aus dem Gesichtsfelde verschwinden, um nachher wieder für kurze Zeit mehr oder weniger deutlich zum Vorschein zu treten.

Die Ergebnisse sind ausser von den gewöhnlichen Einflüssen, wie Lichtstärke, bleibende oder momentane Beleuchtung, Anwendung von Buchstabeproben oder Drahtgittern u. s. w., noch in hohem Maasse abhängig von der Uebung des zu untersuchenden Auges. „Der Einfluss der Uebung,“ sagen Dobrowolsky und Gaine ²⁾, „kommt zuweilen schon nach dem ersten Versuch zum Vorschein.“ Weiter muss noch erwähnt werden, dass Aubert die räthselhafte Erscheinung wahrnahm und wiederholt bestätigt fand, dass bei constantem Gesichtswinkel kleine nahe Zahlen leichter erkannt werden als grosse ferne ³⁾. Dobrowolsky und Gaine fanden, dass das indirect wahrgenommene Object leichter erkannt wird, wenn man es bewegt als wenn man es in Ruhe lässt ⁴⁾. Alle diese Momente zusammen müssen dazu beigetragen haben, die Resultate so sehr von einander abweichen zu lassen.

Der aus der Grösse der optischen Täuschung berechnete Visus,

1) Siehe Helmholtz a. a. O. S. 263.

2) Pflüger's Arch. Bd. 12 S. 420.

3) a. a. O. S. 240 und 248.

4) a. a. O. S. 420.

durch Gesichtswinkel vorgestellt, welche von $4^{\circ} 58'$ bis zu $3^{\circ} 17'$ abwechseln, stimmt am besten zu den Messungsergebnissen

Volkman's,	$6^{\circ} 12'$,
Königshofer's,	$3^{\circ} 40'$,
Dobrowolsky's und Gaine's	$2^{\circ} 55'$.

Doch müssen wir zugeben, dass durch die enormen Unterschiede, welche die directen Messungen der Sehschärfe in der Netzhautperipherie ergeben haben, die feste Grundlage für unsere Theorie, welche ja in einem constanten, sicheren Ergebniss gelegen sein könnte, wegfällt. Wir können nur feststellen, dass die Messungsergebnisse der indirecten Sehschärfe nicht mit unserer Theorie im Widerspruch sind. Dass der Visus in der Netzhautperipherie bei verschiedenen Personen sehr abwechselt und bei ein und derselben Person in so besonders hohem Maasse von Uebung abhängig ist, stimmt insofern zu den Messungsergebnissen der Grösse der optischen Täuschung, dass auch hier die Abweichungen zwischen den Messungsergebnissen ein und derselben Person¹⁾ viel geringer sind als die Unterschiede, welche in den Resultaten bei verschiedenen Individuen vorkommen, und dass unter dem Einfluss der Uebung die Grösse der optischen Täuschung leicht bis auf einen kleinen Bruchtheil des ursprünglichen Werthes sinken kann²⁾.

Einige Forscher haben gefunden, dass die Sehschärfe im verticalen Meridian in gleicher Entfernung vom Netzhautcentrum geringer ist als im horizontalen. Ist hiernit in Uebereinstimmung auch die Grösse der optischen Täuschung verschieden, je nachdem man bei der Messung die Vergleichslinien der Müller-Lyer'schen Figur in den einen oder den andern Meridian rückt?

Dieselben oben schon beschriebenen Figuren, x , y und z , wurden denselben 11 Personen vorgelegt, und die Messungen wurden wieder in zwei Reihen ausgeführt. Während in der ersten Reihe nach jeder Wahrnehmung mit der constanten Vergleichslinie nach links eine Wahrnehmung mit dieser Linie nach oben folgte, wurde in der

1) Ist die Reihe von Messungen klein, so darf angenommen werden, dass die Uebung während der Messung nur wenig zunimmt.

2) Vielleicht könnte man beim Prüfen der Theorie einen Schritt weiter gehen, wenn man bei einer grossen Anzahl von Personen die indirecte Sehschärfe nach ein und derselben Methode misst, und dann untersucht, wie gross die optische Täuschung ist, welche bei jeder dieser Personen durch eine Reihe von verschiedenen Figuren erzeugt wird.

zweiten Reihe die constante Vergleichslinie erst nach unten, dann nach rechts gehalten. Die Ergebnisse findet man in der untenstehenden Tabelle vereinigt, worin die wahrscheinlichen Fehler wieder auf die oben schon erwähnte Weise berechnet sind.

Tabelle 6.

Einfluss der Richtung, worin eine Müller-Lyer'sche Figur beobachtet wird, auf die Grösse der durch sie verursachten optischen Täuschung.

	Mittelwerth der optischen Täuschung in mm		Wahrscheinlicher Fehler des Mittelwerthes in mm	
	Vergleichs- linien horizontal	Vergleichs- linien vertical	Vergleichs- linien horizontal	Vergleichs- linien vertical
Figur x	6,43	8,02	0,62	0,65
Figur y	13,81	15,84	1,06	0,94
Figur z	10,22	8,19	0,77	0,88

Es zeigt sich, dass die Grössenunterschiede der optischen Täuschung bei horizontaler und verticaler Lage der Figuren zu gering sind, um daraus einen zuverlässigen Schluss zu ziehen. Weil die Unterschiede der Sehschärfe im verticalen und horizontalen Meridian ebenso wenig gross genannt werden können, erscheint es uns auch hier wieder am besten, uns zu begnügen mit der Bemerkung, dass die Messungsergebnisse nicht mit unserer Theorie im Widerspruch sind.

Die Grösse der durch die Poggendorff'sche Figur verursachten Täuschung.

Nach der genauen Untersuchung¹⁾ Burmester's wird die scheinbare Verschiebung v der beiden Theile der Nebenlinie in der Poggendorff'schen Figur durch die Formel

$$v = k u \cotg w$$

ausgedrückt, worin k eine Constante, u die Dicke der Hauptlinie und w den Winkel bedeutet, unter welchem die Hauptlinie durch die Nebenlinie geschnitten wird. Ich habe versucht, diese Formel direct aus meiner Hypothese herzuleiten, was mir jedoch nicht gelungen ist. Zwar kann leicht gezeigt werden, dass es zu der Hypothese stimmt, dass die Verschiebung v sowohl mit u wie mit $\cotg w$ zu-

1) a. a. O.

nimmt; aber die Proportionalität nach der Formel Burmester's ist damit nicht bewiesen, und weil die Messungen des Letzteren an Genauigkeit nichts zu wünschen übrig lassen, thut sich hier für unsere Hypothese eine nicht zu verkennende Schwierigkeit auf.

Fig. 16.

Diese ist jedoch nicht unüberwindlich. Die geringe indirecte Sehschärfe würde aller Wahrscheinlichkeit nach zu viel grösseren scheinbaren Verschiebungen v Anlass geben, wenn nicht kräftige Momente wirksam wären, wodurch die Grösse der optischen Täuschung innerhalb relativ enger Grenzen gehalten wird. Diese Momente — vielleicht die Augenbewegungen — machen sich bei der Poggendorff'schen Figur schon für kleine Grössen von v stark

geltend und können darum sehr bedeutend zur Bestimmung ihres Werthes beitragen. Das ist aus den Erscheinungen ersichtlich, welche hervortreten, wenn man die Poggendorff'sche Figur in der

Fig. 17.

Paradoxon von Delboeuf.

Zeichnungsebene um die Gesichtslinie dreht. Stellt man die Nebenlinie vertical, wie in Fig. 16 B, so wird die scheinbare Verschiebung, welche in 16 A sehr deutlich ist, ganz oder so gut wie ganz verschwinden. Wir können mittelst unserer Augenbewegungen die Richtung der

Verticale so scharf beurtheilen, dass dieselben Ursachen, welche bei einer anderen Richtung der Nebenlinie eine bedeutende scheinbare Verschiebung v erzeugen, jetzt dazu nicht oder so gut wie nicht mehr im Stande sind.

Es braucht uns jetzt auch nicht mehr zu verwundern, dass die Täuschung in der Poggendorff'schen Figur durch die Abänderung

von Delboeuf, siehe Fig. 17, vergrössert wird ¹⁾). Lenkt man seine Aufmerksamkeit nur auf die indirecte Sehschärfe als die Ursache für die Entstehung der optischen Täuschung, ohne die Momente zu berücksichtigen, wodurch die Grösse der Täuschung eingeschränkt wird, so sollte man in der Delboeuf'schen Figur eine geringere Täuschung erwarten als in der ursprünglichen Poggendorff'schen: die scheinbare Verschiebung des einen Schneidepunktes müsste durch eine ebenso grosse Verschiebung des andern compensirt werden, während nur die Richtungsveränderung der kurzen Schnittlinie für das Zustandekommen der Täuschung verantwortlich gemacht werden darf. Weil jedoch die zwei Schenkel einen Winkel mit einander machen, wird das beschränkende Moment, das sich in der ursprünglichen Poggendorff'schen Figur so stark geltend macht, dermaassen abgeschwächt, dass die Grösse der optischen Täuschung doch noch zunimmt.

Durch unsere Hypothese haben wir noch eine Erscheinung kennen gelernt, welche hier mit einem Worte erwähnt werden mag. Bewegt man den Blick über die Delboeuf'sche Figur von einem Schneidepunkte zum andern wiederholt hin und wieder, so scheint die Spitze der langen Schnittlinie sich jedesmal zu verschieben. Sie steht höher, wenn man sie selbst fixirt, und niedriger, sobald der Blick wieder auf die Spitze der kurzen Schnittlinie gerichtet ist, so dass die Täuschung abwechselnd verstärkt und abgeschwächt erscheint ²⁾). Die Erklärung liegt in der mehr oder weniger unscharfen Wahrnehmung der Spitze der kurzen Schnittlinie, deren scheinbare Richtungsveränderung ja die einzige Ursache der Täuschung darstellt. Bei der unveränderten Poggendorff'schen Figur kann man etwas Derartiges nicht beobachten, weil hier die unscharfe Wahrnehmung jeder der beiden Spitzen den gleichen Effect hat.

1) Vgl. Burmester a. a. O. S. 379 f.

2) Der Versuch kann leicht gemacht werden, aber man muss darauf achten, dass man nur urtheilt, wenn jedes Mal der Blick auf einem der Schneidepunkte ruht, — nicht während der kurzen Zeit selbst, dass er sich vom einen nach dem anderen Schneidepunkte hin- oder zurückbewegt. Denn im letzteren Fall macht sich ausserdem noch ein anderer Einfluss geltend: die Punkte im Raume scheinen in einer der Bewegungsrichtung der Blicklinie entgegengesetzten Richtung bewegt zu werden.

Schlussbetrachtungen.

Wir sind weit davon entfernt, zu behaupten, dass alle geometrisch-optischen Täuschungen nur durch die geringe Sehschärfe in der Netzhautperipherie erklärt werden müssten. Im Gegentheil halten wir uns davon überzeugt, dass noch eine Anzahl anderer Momente bei der falschen Beurtheilung von Richtung und Abstand eine Rolle spielen.

Unter den Täuschungen, welche durch unsere Hypothese nicht erklärbar oder — für einige der hier unten zu erwähnenden Paradoxon vorsichtiger ausgedrückt — noch nicht erklärt sind, nennen wir an erster Stelle solche, welche wahrscheinlich

Fig. 18.

Paradoxon
von Loeb.

unter andere Rubriken gebracht werden müssen, wie z. B. die scheinbare Form des Himmelsgewölbes, die scheinbare Grösse von Sonne und Mond auf verschiedener Höhe über dem Horizonte u. s. w. Aber weiter müssen eine Anzahl von durch unsere Hypothese nicht erklärten Paradoxa genannt werden, welche mit den in dieser Abhandlung erörterten eine grosse Uebereinstimmung zeigen. Es ist z. B. eine bekannte Erscheinung, dass verticale Linien grösser geschätzt werden als horizontale¹⁾, und dass man einen horizontalen Abstand ungleich halbirt, wenn er mit einem Auge gemessen wird²⁾. Weiter erwähnen wir das Paradoxon von Loeb³⁾, das wie folgt umschrieben werden kann. Wenn man bei fixirtem Kopfe zwei bewegliche, schmale Pappdeckel-

streifen *a* und *b*, siehe Fig. 18, in gewisser Entfernung von einander parallel zur Medianebene und den einen scheinbar in die Verlängerung des andern legt, wird man die Einstellung ungenau finden, sobald ein dritter paralleler Streifen, *c*, in die Nähe von *b* gelegt wird. Wird *c* rechts von *b* hingestellt, so erscheint *b* nach links verschoben, während *b* sich scheinbar nach der entgegengesetzten Richtung bewegt, wenn *c* links von *b* hingelegt wird. Loeb erklärt die Erscheinung durch den folgenden Satz: „Zwei Punkte oder Linien mit verschiedenen Raumwerthen, die gleichzeitig der Aufmerksamkeit unterliegen, beeinflussen sich so, als ob sie sich gegenseitig abstiessen, wodurch ihr scheinbarer Abstand vergrössert wird.“

1) Vgl. Wundt a. a. O. S. 108.

2) Vgl. Wundt a. a. O. S. 108.

3) Pflüger's Arch. Bd. 60 S. 509. 1895.

Von Wundt ist die Aufmerksamkeit auf ein anderes Paradoxon gelenkt, das eine Abänderung der Poggendorff'schen Figur darstellt:

Zwei schräge in der Verlängerung von einander gelegene und durch einen offenen Zwischenraum getrennte Linien scheinen gegenseitig verschoben zu sein, siehe Fig. 19.

Wir wünschen bezüglich der obengenannten Paradoxa zwei Bemerkungen zu machen. Erstens, dass die Grösse der optischen Täuschung bei denselben nur sehr gering ist. Burmester¹⁾ fand die Täuschung im letztgenannten Wundt'schen Paradoxon im entgegengesetzten Sinne wie Wundt selbst, und sagt: „Die Täuschung bei der Streckenfigur ist gering, und die Schwankungen in der Beurtheilung sind ziemlich gross“²⁾.

Heymans³⁾ findet die Messung der Grösse der Loeb'schen Täuschung mittelst ungeübter Augen schwer ausführbar. Er zieht es vor, die Messungen nur mit Hilfe einer einzigen, sehr geübten Beobachterin zu verrichten. Und dann zeigt sich auch hier, dass die Grösse der Täuschung z. B. in Vergleichung mit dem Müller-Lyer'schen Paradoxon sehr gering ist. Bei den Messungen der Loeb'schen Figur wurde ein grosses Brett von 82×55 cm angewendet, auf welchem 55 cm lange, 1 cm breite Kupferreifen verschiebbar angebracht waren. Das Maximum der optischen Täuschung betrug 2,7 mm, während die durch eine Müller-Lyer'sche Figur von derartigen Dimensionen erzeugte Täuschung mehr als das Zwanzigfache betragen würde⁴⁾.

Fig. 19.

1) a. a. O. S. 358 u. 359.

2) a. a. O. S. 390.

3) a. a. O. Bd. 14 S. 129 f.

4) Die Berechnung ist auf folgende Weise zu Stande gekommen. Weil die halbe Breite des Brettes 41 cm beträgt, werden wir nicht allzu sehr irre gehen, wenn wir die zu vergleichenden Abstände — welche von Heymans nicht besonders erwähnt werden —, als mindestens 20, vielleicht besser als 30 cm annehmen. Wir müssen uns nun abfragen, wie gross die optische Täuschung einer Müller-Lyer'schen Figur ist, bei welcher ebenso grosse Abstände mit einander verglichen werden müssen. Aus Messungen von Heymans (a. a. O. S. 253) sowohl wie von uns selbst (S. 23) hat sich gezeigt, dass die Grösse der optischen Täuschung proportional der Länge der

Indessen muss anerkannt werden, dass, sind die Beträge auch klein, hierdurch die Sicherheit der Täuschung und die regelmässige Veränderung bei wechselndem Abstände der Nebenlinien nicht beeinträchtigt wird. Die von Heymans veröffentlichten Messungsergebnisse lassen an Deutlichkeit und Entschiedenheit wenig zu wünschen übrig, und wir haben nur darum darauf hingewiesen, dass die Beträge klein sind, um zu beweisen, dass man ohne Schwierigkeit annehmen darf, dass die Ursache für die optische Täuschung eine andere ist. Für die Messungen Heymans' bezüglich der Zöllner'schen Figur¹⁾ gilt dasselbe wie für diejenigen bezüglich der Loeb'schen.

Zweitens wünschen wir bezüglich der in diesem Capitel erörterten Täuschungen zu bemerken, dass der Einfluss des indirecten Sehens auf ihre Entstehung noch nicht a priori ausgeschlossen zu werden braucht. Wir haben oben schon aus einander gesetzt, dass die undeutliche Wahrnehmung in der Peripherie des Gesichtsfeldes ausser durch die mangelhafte Function der Netzhaut auch noch durch das Entstehen thatsächlicher Zerstreuungskreise verursacht wird. Wir projectiren jedes Netzhautbild nach Aussen in der Richtung der Linie, durch welche es mit dem Knotenpunkte des Auges verbunden wird. Weil die Mitte der Pupille nicht mit dem Knotenpunkte zusammenfällt, müssen wir überhaupt das Bild eines Lichtpunktes nur dann richtig nach Aussen projectiren, wenn es scharf auf der Netzhaut abgezeichnet ist. Sobald die Abbildung in einem Zerstreuungskreis stattfindet, wird unsere Projection nach Aussen falsch. Nur für einen Fall muss eine Ausnahme gemacht werden, und zwar wenn der Lichtpunkt sich auf der Linie befindet, welche die Mitte der Pupille mit dem Knotenpunkte verbindet²⁾. Beim indirecten Sehen müssen wir also Rechnung tragen mit reellen Verschiebungen der Zerstreuungsfiguren auf der Netzhaut. Diese können

constanten Vergleichslinie zunimmt. Bei einer Vergleichslinie = 75 mm, Schenkeln = 20 mm und Schenkelwinkeln = 10° war die Täuschung im Mittel = 18,2 mm, vgl. Tabelle 1 S. 16. Bei einer constanten Vergleichslinie = 20 oder 30 cm würde sie also resp. 52 oder 78 mm betragen.

1) a. a. O. Bd. 14.

2) Für eine nähere Auseinandersetzung verweisen wir auf zwei frühere Abhandlungen. v. Graefe's Arch. f. Ophthalm. Bd. 31 H. 3 S. 211, 1885 und Pflüger's Arch. Bd. 62 S. 166, 1895. Weiter mag auch Schapring er erwähnt werden: Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. der Sinnesorgane Bd. 5 S. 385.

bei vielen geometrisch-optischen Täuschungen eine Rolle spielen, und wo die Grösse der Täuschung gering ist, scheint es uns eine nothwendige Forderung, bevor man zur Behandlung verschiedener, mehr oder weniger complicirter Theorien übergeht, in jedem besonderen Falle den Einfluss der Bildverschiebung auf der Netzhaut zu untersuchen.

Wir erörtern jetzt noch kurz die Augenbewegungen, welche den Grund für die bedeutendsten Theorien zur Erklärung geometrisch-optischer Täuschungen gebildet haben¹⁾. Dabei müssen wir zwischen zwei verschiedenen Effecten der Augenbewegungen einen scharfen Unterschied machen. Erstens können wir unsere Aufmerksamkeit auf die Bewegung der Lichtbilder auf der Netzhaut lenken, wobei es gleichgültig ist, ob eine wirkliche Augenbewegung stattfindet. Das Auge kann sich hinsichtlich eines stillstehenden Objectes oder, was auf dasselbe hinauskommt, das Object kann sich hinsichtlich des stillstehenden Auges bewegen. Während einer Verschiebung der Lichtbilder auf der Netzhaut können, wie Helmholtz²⁾ zeigte, sehr eigenthümliche Täuschungen entstehen oder auch schon vorhandene Täuschungen bedeutend vergrössert werden.

Aber zweitens müssen wir die hoch entwickelte Innervationsempfindung in Rechnung bringen. Hierin wird bei der wirklichen Ausführung einer Augenbewegung in der Regel ein richtiger Maassstab für die Beurtheilung von Richtung und Abstand gelegen sein. Allein unter sehr bestimmten Umständen könnte dieselbe Innervationsempfindung uns irreleiten. Auf diesem Grunde bauen Wundt, Lipps, Delboeuf und Heymans die Erklärung einer Anzahl von geometrisch-optischen Täuschungen auf, während sie dabei jedoch die Theorie auf verschiedene Weise in Einzelheiten ausarbeiten.

Inwiefern ihre Vorstellungen richtig sind, kann mittelst der Momentanbeleuchtung, wobei Augenbewegungen ausgeschlossen sind, untersucht werden. Momentanbeleuchtungen von optischen Paradoxa sind mehrere Male ausgeführt worden. Schon Helmholtz³⁾ erwähnt, dass hierbei die Täuschung der Poggendorff'schen Figur

1) Ueber Contrast als eine Erscheinung, welche selbst noch Erklärung braucht, siehe S. 5.

2) a. a. O. S. 712.

3) a. a. O. S. 710.

unverändert bleibt. Später hat ein Referent in den klinischen Monatsblättern diesen Versuch mit ungefähr dem gleichen Erfolg wiederholt¹⁾. Auch wir haben Momentanbeleuchtung angewendet, und bei einer grossen Anzahl von Figuren gefunden, dass die optische Täuschung in ungefähr demselben Maasse bestehen bleibt, wie wenn die Beleuchtung bleibend ist²⁾. Aber gegen derartige Wahrnehmungen führt Heymans³⁾ an, dass die thatsächliche Ausführung der Bewegung keine nothwendige Forderung für die Erzeugung der Täuschung ist; die Bewegungsvorstellung würde dazu schon genügen.

Allein Messungen werden die grössere oder geringere Bedeutung dieser Behauptung in's Licht stellen können. Diese sind mit den Figuren *x*, *y* und *z*, vgl. S. 22, ausgeführt worden. Die Versuche wurden wieder in zwei Serien vertheilt, welche längere Zeit nach einander gemacht wurden. In der ersten Serie folgte jedes Mal und bei jeder Figur die Messung mit bleibender Beleuchtung derjenigen mit Momentanbeleuchtung, während die Reihenfolge in der zweiten

Tabelle 7.
Einfluss der Augenbewegungen.

	Mittelwerth der optischen Täuschung in mm bei		Wahrscheinlicher Fehler des Mittelwerthes in mm bei	
	momentaner Beleuchtung	bleibender Beleuchtung	momentaner Beleuchtung	bleibender Beleuchtung
Figur x	7,47	8,17	0,76	0,58
Figur y	15,35	14,48	1,22	0,99
Figur z	11,16	8,74	0,77	0,57

1) Jahrg. 34 S. 174, 1896.

2) Die Momentanbeleuchtung der Zöllner'schen Figur verringert die optische Täuschung, vgl. S. 12.

3) a. a. O. Bd. 14 S. 114. Heymans glaubt für seine Annahme eine Stütze zu finden in der folgenden Erscheinung: Fixirt man längere Zeit sich bewegende Objecte und richtet dann plötzlich seinen Blick auf einen stillstehenden Punkt, so scheint der letztere ebenfalls in Bewegung zu sein. Man muss sich dabei aber abfragen, ob bei dem Versuche, den stillstehenden Punkt zu fixiren, die Augen in Ruhe bleiben. Hat man sich bewegende Objecte fixirt, so werden die Augenmuskeln wahrscheinlich wohl auf besondere Weise functionirt haben und leicht noch während kurzer Zeit eine Nachwirkung erfahren. Dass dem thatsächlich so ist, findet man ausführlich in Wundt a. a. O. S. 110 und 111 beschrieben.

Serie umgekehrt war. Die Vergleichslinien waren horizontal gestellt und die Constante immer links vom Beobachter. Das Ergebniss findet man in vorstehender Tabelle 7 wiedergegeben.

Die Momentanbeleuchtung wurde erzielt mittelst einer Projectionslaterne mit Bogenlampe. Hiermit wurde ein rundes Feld beleuchtet, das für die ganze Schiebervorrichtung mit der Müller-Lyer'schen Figur gerade gross genug war. Ein photographisches Objectiv mit schneller Momentschliessung wurde alle zwei Secunden momentan geöffnet. Die Oeffnungsdauer ist zwar nicht besonders gemessen, darf aber auf $\frac{1}{50}$ oder $\frac{1}{100}$ Secunde geschätzt werden und ist sicher so kurz, dass der Einfluss einer Augenbewegung, welche während der Beleuchtung noch ausgeführt werden könnte, ganz vernachlässigt werden darf. Solange das Objectiv geschlossen bleibt, ist das Zimmer so dunkel, dass der Beobachter, welcher sich in ungefähr 1 m Entfernung von der Schiebervorrichtung befindet, nicht die geringste Spur der Figur sehen kann, wogegen die Beleuchtung während des Oeffnens des Objectivs sehr stark ist und die Erzeugung von deutlichen Nachbildern veranlasst.

Ein Assistent verschiebt nach Angabe des Beobachters die variable Vergleichslinie so lange, bis die beiden Vergleichslinien für den letzteren keinen Längenunterschied mehr aufweisen. Um ausser der Beleuchtungsdauer alle übrigen Umstände so viel wie möglich einander gleich zu machen, wurden die Messungen mit bleibender Beleuchtung ganz auf dieselbe Weise und mit derselben Bogenlampe ausgeführt.

Eine Bewegung der Blicklinie längs den Schenkeln und den Vergleichslinien der Figur, wie dieselbe von den verschiedenen Forschern bezweckt ist, dürfen wir beim Versuch mit Momentanbeleuchtung als ausgeschlossen betrachten. Hier könnte nur die Bewegungsvorstellung erregt werden, und mag man auch behaupten, dass die Bewegungsvorstellung einen Effect gleicher Qualität erzeugen kann, wie die Ausführung der Bewegung selbst, so ist es doch sehr schwer, anzunehmen, dass die Wirkung auch quantitativ gleich sei. Tabelle 7 gibt an, dass die optischen Täuschungen bei momentaner und bei bleibender Beleuchtung ungefähr gleich gross sind. Bei Figur x ist der Betrag bei Momentanbeleuchtung geringer, bei den Figuren y und z dagegen grösser, aber diese Unterschiede sind zu klein, um einen sicheren Schluss zu gestatten: die zufälligen Fehler sind relativ gross, und der grösste Unterschied — bei Figur z —

beträgt nur 2,4 mm. Man vergleiche auch die Ergebnisse der Tabellen 4 und 6 mit der zweiten Reihe der Tabelle 7.

Wir haben oben nachdrücklich behauptet, dass während einer Momentanbeleuchtung von $\frac{1}{50}$ oder $\frac{1}{100}$ Secunde so gut wie keine Augenbewegungen stattfinden konnten. Muss aber den Bewegungen, welche zwischen zwei Momentanbeleuchtungen ausgeführt werden, also während das Zimmer dunkel ist und die Figur nur in Nachbildern gesehen wird, keine Bedeutung beigemessen werden? Hierdurch wird man das durch die vorhergehende Momentanbeleuchtung verursachte Nachbild messen an der bei der folgenden Momentanbeleuchtung zum Vorschein tretenden Figur, und beim Messen und Vergleichen kommt auch wieder die Innervationsempfindung der Augenbewegungen zum Bewusstsein. Jetzt kann dieselbe jedoch nur allein wirken im oben von uns erwähnten Sinne. Sie kann dem Beobachter bei seinen Längebeurtheilungen nur helfen, statt, wie von vielen Forschern angenommen wird, gerade die Ursache für die Entstehung der optischen Täuschung darzustellen. Sie würde also hier wieder dazu beitragen, das Maximum der zweiten Art zu bestimmen¹⁾.

Es wird wohl schwer sein, zu beweisen, dass die verschiedenen Erklärungsprincipien, welche wir in unserer Abhandlung erwähnten, und welche beinahe ohne Ausnahme etwas Annehmliches bieten, richtig sind oder nicht. Man darf sich jedoch fragen, inwiefern die in den Vordergrund gerückten Momente genügen, den vollen Betrag der optischen Täuschungen zu erzeugen, oder in welchem Maasse sie dazu beitragen. Und dann dürfte die von uns entwickelte Hypothese, wie es scheint, nicht ohne Wichtigkeit sein. Sie ist nicht weniger einfach, deutlich und zulässig als die anderen Hypothesen und Theorien.

1) Das Moment, welches wir zur Erklärung der geometrisch-optischen Täuschungen hervorgehoben haben, beruht auf den Netzhautqualitäten, welche man Localzeichen, Ort- oder Raumsinn nennt. Bei der Beurtheilung von Abstand und Grösse überhaupt macht sich ausser diesem Raumsinn der Netzhaut noch ein anderes Moment geltend: die Innervationsempfindung der Augenbewegungen, der Bewegungssinn. Es kommt mir im Gegensatze zu einigen hochgeschätzten Autoren unrichtig vor, den Unterschied zwischen beiden nur scheinbar zu nennen.

Anhang I.

Berechnung der peripheren Sehschärfe aus der Grösse der optischen Täuschung.

Wir wenden bei diesen Berechnungen die Messungsergebnisse an, welche wir mittelst Fig. 2 erhalten haben. Dieselbe ist hier in Fig. 20 abgebildet.

AB , die constante Vergleichslinie, ist 75 mm lang, die Schenkelwinkel betragen 70° , die Schenkellängen 50 mm. Die Grösse der

Fig. 20.

optischen Täuschung ist nach Tabelle 4 im Mittel $\frac{9,75 + 9,22}{2} = 9,48$ mm.

Nehmen wir an, dass B fixirt wird, und dass p und q noch eben von einander getrennt wahrgenommen werden. Weiter sei a die Mitte des undeutlich wahrgenommenen Endes bei A , und c die Mitte des undeutlich wahrgenommenen Endes bei C . Bc ist Ba gleich gemacht, also $AB - BC = 9,48$ mm.

$$Aa = Cc = \frac{9,48}{2} = 4,74 \text{ mm und}$$

$$aB = Bc = 75 - 4,74 = 70,26 \text{ mm.}$$

$$pq = Ap \text{ tg } qAp = 9,48 \text{ tg } 70^\circ = 26,05 \text{ mm.}$$

Wenn die lineare Zeichnung sich in einer Entfernung $= 300$ mm vom Augenpunkte O (Fig. 21) befindet¹⁾, werden die Punkte a und c

1) In der Regel wird mit beiden Augen zusammen wahrgenommen. Unter dem Augenpunkte O verstehen wir dann die Mitte zwischen den Augen.

in Richtungen gesehen, welche mit der Gesichtslinie OB einen bestimmten Winkel α bilden, und zwar

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{aB}{OB} = \frac{70,26}{300}, \alpha = 13^\circ 11'.$$

O befindet sich p etwas näher als s . Wir machen jedoch einen ganz zu vernachlässigenden Fehler, wenn wir anstatt vom Op und Os den Mittelwerth $Oa = Oc$ stellen,

$$Oa = \frac{OB}{\cos \alpha}.$$

Sei g der Winkel, unter welchem pq vom Augenpunkte O aus gesehen wird, dann ist

$$\operatorname{tg} g = \frac{pq \cos \alpha}{OB}, \text{ und } g = 4^\circ 50'.$$

Aus der Grösse der optischen Täuschung lässt sich also berechnen, dass auf einer $13^\circ 11'$ vom Fixationspunkte entfernten Stelle im Sehfelde zwei Punkte noch eben getrennt gesehen werden können, wenn sie unter einem Gesichtswinkel $g = 4^\circ 50'$ erscheinen.

Fig. 21.

Dieselbe Berechnung kann auf einige Wahrnehmungen von Heymans angewendet werden. Dieser maass die Grösse der optischen Täuschung, welche durch eine Müller-Lyer'sche Figur erzeugt wird, deren Schenkelwinkel $= 70^\circ$ und deren Schenkellänge von 10 bis 90 mm wechselte. Die constante Vergleichslinie war 75 mm lang. Als Maass für die Grösse der optischen Täuschung nehmen wir

8,59 mm, d. i. der Mittelwerth aus 8 Messungsreihen bei Figuren, deren Schenkellängen 30 mm und grösser waren¹⁾. Hieraus lässt sich auf ganz dieselbe Weise wie aus meinen eigenen Wahrnehmungen der Grenzwert für den Gesichtswinkel G_1 berechnen:

$$G_1 = 4^\circ 22' 45''.$$

Dabei ist jedoch der Winkel, welchen die Gesichtslinie mit der Beobachtungsrichtung macht, $\alpha_1 = 13^\circ 15' 45''$. Reducirt für einen Winkel $\alpha = 13^\circ 11'$, wird

$$g_1 = G_1 \frac{\alpha}{\alpha_1} = 4^\circ 21'.$$

1) a. a. O. S. 229 Tabelle 4 und S. 230 Tabelle 6.

Anhang III.

Umarbeitung der directen Messungen der peripheren Sehschärfe.

Um die Vergleichung zwischen den directen Messungsergebnissen verschiedener Forscher unter einander und zugleich mit den oben von uns berechneten Werthen zu ermöglichen, müssen wir die literarischen Angaben einigermaassen umarbeiten.

Erstens müssen wir den verschiedenen angewendeten Methoden Rechnung tragen, hauptsächlich:

- 1) dem Gebrauche von Buchstabenproben oder Figuren von Snellen;
- 2) der Anwendung eines Drahtgitters oder von nahe an einander gerückten Linien oder Flächen, worin der regelmässige Wechsel von Weiss und Schwarz noch eben als solcher erkannt werden muss.

Es treten verschiedene Schwierigkeiten hervor, wenn man die Ergebnisse dieser Methoden direct mit einander zu vergleichen wünscht.

Bei der Anwendung der Buchstabenproben spielt das Errathen nach den schlecht wahrgenommenen Buchstaben eine grosse Rolle, und von den Gittern hat Wertheim¹⁾ gezeigt, dass die Messung der Sehschärfe verschieden ausfällt, je nach der Grösse des angewendeten Gitters. Weiter sind dünne schwarze Linien, welche durch einen breiten Zwischenraum von einander getrennt sind, schwerer zu erkennen als Linien, welche ebenso breit sind wie die Zwischenräume, wie ich durch eine absichtlich angestellte Untersuchung mittelst drei verschiedener Gitter zeigen konnte.

Gitter I bestand aus 6 parallelen, 0,2 mm breiten, 15 mm langen schwarzen Linien auf weissem Papier, während der Abstand zwischen zwei Linien zusammen mit einer Liniendicke 3 mm betrug. Die Gitter II und III waren nahezu ebenso gross wie I und bestanden aus einer gleichen Anzahl von Linien. Die Liniendicke betrug jedoch bei Gitter II 0,5, bei Gitter III 1,5 mm. Der Abstand zwischen zwei Linien zusammen mit einer Liniendicke betrug immer 3 mm. Bei Gitter III war der Raum zwischen den Linien ebenso gross wie die Liniendicke. Die Messungsergebnisse sind in folgender Tabelle 8 zusammengestellt.

1) a. a. O. S. 181.

Die Refractionsanomalien, der untersuchten Personen, worunter auch der Astigmatismus, wurden vorher corrigirt. Indessen kann die Correction niemals vollkommen ausgeführt werden, so dass geringe Grade von Astigmatismus bestehen bleiben und also auf unsere Resultate Einfluss ausüben müssen. In der 2. Reihe der Tabelle sind die Entfernungen erwähnt, in welchen dieselben Personen unter gleichen Umständen Snellen's Buchstabenproben ($D = 6$ m) erkannten. Die Verhältnisse der Entfernungen des Gitters I und der Buchstaben sind in der letzten Reihe angegeben. Der Mittelwerth dieser Verhältnisse ist 1,497. Bei normalem Visus würden die Buchstaben auf 6 m erkannt werden, also Gitter I im Mittel auf 4 m, was ein paar um 3 mm von einander entfernte Linien unter einem Gesichtswinkel von $2' 34,5''$ erscheinen lässt. Der Bequemlichkeit wegen kann dieser Werth zu 2,5' abgerundet werden, d. i. gerade die Hälfte des Winkels, unter welchem bei Visus = 1 die Buchstaben erkannt werden können.

Tabelle 8.

Namen des Be- obachters	Entfernung, in welcher die Buchstaben- proben $D=6$ erkannt werden, in m (A)	Entfernung, in welcher das Gitter I erkannt wird, in m (B)	Entfernung, in welcher das Gitter II erkannt wird, in m	Entfernung, in welcher das Gitter III erkannt wird, in m	Verhältniss der Werthe der Reihen 2 und 3, $\frac{A}{B}$
v. d. W.	8,6	6,5	7,6	8,0	1,322
W.-E.	6,8	5,5	6,25	6,5	1,236
v. H.	9,8	6,25	7,25	8,0	1,57
Bl.	9,5	5,1	6,0	7,0	1,86

Wir haben besonders den Gesichtswinkel für den Linienabstand des Gitters I bei Visus = 1 berechnet, weil von den drei angewendeten Gittern dieses sicher in Bezug auf das Verhältniss der Liniendicke zu den Zwischenräumen am besten mit einer linearen Zeichnung auf Papier, wie z. B. einer Müller-Lyer'schen Figur, verglichen werden kann. Ausgehend von den oben beschriebenen Ergebnissen und der früher schon näher erwähnten Beziehung zwischen der peripheren Sehschärfe und der Entfernung vom Fixationspunkte haben wir beim Umarbeiten der Messungsergebnisse der verschiedenen Forscher die nachfolgenden Regeln beobachtet:

- 1) Wenn directe Angabe geschieht vom Gesichtswinkel, unter welchem beim indirecten Sehen zwei Punkte noch getrennt wahrgenommen werden können, wird diese Angabe als Basis für die Berechnung angenommen.
- 2) Geschieht die Angabe im Winkel, unter welchem Buchstaben erkannt werden, so wird angenommen, dass zwei Punkte noch getrennt gesehen werden, wenn sie unter dem halben Winkel erscheinen.
- 3) Wenn die Angabe nicht geschieht für $13^{\circ} 11'$ Entfernung vom Fixationspunkte, so wird die nächste Entfernung, für welche die Wahrnehmung erwähnt ist, zur Basis genommen. Hiernach wird die Sehschärfe für eine Entfernung $= 13^{\circ} 11'$ berechnet, indem man annimmt, dass der Visus zunimmt umgekehrt proportional der Vergrößerung des Abstandes vom Fixationspunkte.
- 4) Wenn die periphere Sehschärfe in Bruchtheilen der centralen ausgedrückt wird, wird für diese letztere Visus $= 1$ angenommen, d. h. zwei Punkte oder Linien einer gewöhnlichen linearen Zeichnung auf Papier werden noch eben getrennt wahrgenommen, wenn sie unter einem Gesichtswinkel von $2' 30''$ gesehen werden.

In den folgenden Formeln nennen wir $\alpha = 13^{\circ} 11'$ die Entfernung vom Fixationspunkte, für welche die indirecte Sehschärfe v berechnet werden muss, α_1 die Entfernung vom Fixationspunkte, für welche die Sehschärfe v_1 gemessen ist. g ist der Winkel, unter welchem zwei Punkte oder Linien, G der Winkel, unter welchem Buchstaben oder Zahlen in einer Entfernung α vom Fixationspunkte noch eben erkannt werden können, während g_1 und G_1 dieselbe Beziehung zu α_1 haben wie g und G zu α .

$$g_1 = \frac{1}{2} G_1 \text{ und } g = \frac{1}{2} G = g_1 \times \frac{\alpha}{\alpha_1}.$$

Aubert a. a. O. S. 239, Tabelle 37, Bogen 1:

$$\alpha_1 = \frac{27^{\circ} 2'}{2}, G_1 = 3^{\circ} 42',$$

$$\text{also } g = 1^{\circ} 48'.$$

Volkman, vgl. Aubert a. a. O. S. 237:

$$\alpha_1 = 8^\circ, g_1 = 3^\circ 46',$$

$$\text{also } g = 6^\circ 12'.$$

Hueck, vgl. Aubert a. a. O. S. 237:

$$\alpha_1 = 14^\circ, g_1 = 14' 55'',$$

$$\text{also } g = 14' 2'',$$

Dobrowolsky und Gaine a. a. O. S. 416:

$$\text{I für } \alpha = 13^\circ 11' \text{ ist } v = \pm \frac{1}{20}, \text{ also } g = 0^\circ 50',$$

$$\text{II für } \alpha = 13^\circ 11' \text{ ist } v = \pm \frac{1}{70}, \text{ also } g = 2^\circ 55'.$$

Schadow, Pflüger's Arch., Bd. 19 S. 456:

$$\text{für } \alpha_1 = 15^\circ \text{ wechselt } v_1 \text{ zwischen } \frac{1}{5} \text{ und } \frac{1}{20},$$

$$\text{also } g_1 \quad , \quad 0^\circ 12' 30'' \text{ und } 0^\circ 50',$$

$$\text{und } g \quad , \quad 0^\circ 11' \quad , \quad 0^\circ 44'.$$

Königshofer, vgl. Schadow a. a. O. S. 451:

$$\text{für } \alpha_1 = 15^\circ \text{ wechselt } v_1 \text{ zwischen } \frac{1}{50} \text{ und } \frac{1}{100},$$

$$\text{also } g_1 \quad , \quad 2^\circ 5' \text{ und } 4^\circ 10',$$

$$\text{und } g \quad , \quad 1^\circ 50' \quad , \quad 3^\circ 40'.$$

Dor, vgl. Schadow a. a. O. S. 451:

$$\text{für } \alpha_1 = 15^\circ \text{ ist } v_1 = \frac{1}{30},$$

$$\text{also } g_1 = 1^\circ 15' \text{ und } g = 1^\circ 6'.$$

Wertheim a. a. O. S. 182:

$$\text{für } \alpha_1 = 15^\circ \text{ ist } v_1 \text{ medial } 0,143$$

$$\text{oben } 0,095$$

$$\text{unten } 0,093$$

$$\text{im Mittel } 0,11,$$

$$\text{also } g_1 = 0^\circ 22' 44'' \text{ und } g = 0^\circ 20'.$$