

(Aus der Universitäts-Augenklinik in Amsterdam.)

Über den Einfluß von Beleuchtung und Kontrast auf die Sehschärfe.

Von

Dr. C. Otto Roelofs und Dr. L. Bierens de Haan

Augenarzt

Augenarzt.

Mit 4 Textabbildungen und 8 Kurven.

Der Einfluß der Beleuchtung auf die Sehschärfe hat schon oft Interesse erregt, was wahrscheinlich darauf zurückzuführen ist, daß dieses Problem nicht nur theoretisch wichtig, sondern auch praktisch von Bedeutung ist. Die Lösung dieses Problems würde uns nämlich besser befähigen, die Anforderungen zu beurteilen, denen eine gute Beleuchtung für die Ausübung verschiedener Berufe entsprechen müßte.

Vielerseits ist versucht worden, eine einfache Verbindung zwischen Sehschärfe und Beleuchtung zu finden. Man hat dabei aber so viele Faktoren zu berücksichtigen, daß das Auffinden dieses Zusammenhangs nicht leicht ist und das Suchen nach einer Lösung meistens ein erfolgloser Versuch blieb.

Schon im Jahre 1754 stellte Tobias Mayer¹⁾ eine Untersuchung der Sehschärfe bei Tageslicht und bei Kunstlicht an, bei welcher bestimmte Gruppen von Linien benutzt wurden. Er gelangt zu der Formel $s = \frac{158''}{\sqrt{h}}$, in der s = Ge-

sichtswinkel (die Sehschärfe bezeichnend) und h = Lichtintensität bedeutet.

1865 führte Aubert²⁾ Untersuchungen mit den Jaegerschen Schriftproben aus. Er verwendete dabei Tageslicht, das durch Diaphragmen von verschiedener Größe in einen dunklen Raum zugelassen wurde.

1876 wurde von Posch³⁾ gefunden, daß die Sehschärfe wächst wie der Logarithmus aus der Lichtintensität; er bemerkt dabei, daß Aubert zu annähernd denselben Resultaten gelangte. Die Versuchsobjekte Poschs bestanden aus parallelen gleich breiten weißen und schwarzen mit Kunstlicht beleuchteten Streifen.

Dagegen kam Manolescu⁴⁾ 1880 zu dem Ergebnis, daß der minimale Gesichtswinkel umgekehrt proportional der Wurzel aus der Lichtintensität ist.

¹⁾ Tobias Mayer, *Experimenta circa visus aciem*. Comm. soc. reg. Goettingen. Tome IV ad annum 1754, S. 97—112.

²⁾ Aubert, *Physiologie der Netzhaut*.

³⁾ A. Posch, *Über Sehschärfe und Beleuchtung*. Arch. f. Augenheilk. **5**, 17. 1876.

⁴⁾ Manolescu, *Annales d'Oculistique* 1880.

Dieses Resultat erinnert an eine Untersuchung Charpentiers¹⁾ (1882), der fand, daß die zum Wahrnehmen kleiner leuchtender Flächen erforderliche Beleuchtung umgekehrt proportional der Größe dieser Flächen ist. Er macht aber einen Unterschied zwischen dieser Lichtempfindlichkeit und dem Getrennt-Wahrnehmen zweier Lichtpunkte, wofür stärkeres Licht nötig sein soll.

1883 publizierte Cohn²⁾ einen Teil seiner Untersuchungen über dieses Problem. Durchschnittlich fand er volle Sehschärfe schon bei einer Beleuchtung von 5,9 Normalkerzen. Unter voller Sehschärfe versteht er einen Ac. vis. = $\frac{6}{6}$. Dies ist jedoch meistens noch nicht das Maximum, welches erreicht werden kann, und gerade die maximale Sehschärfe hätte er berücksichtigen müssen.

1897 erschienen die ausführlichen Untersuchungen Königs³⁾. Er kommt zu dem Schlusse, daß auch das Wahrnehmen von Formen bei zunehmender Beleuchtung zunächst durch die Stäbchen und erst später durch die Zapfen erfolgt. Die Schärfe der Wahrnehmung : S (Sehschärfe) ist für beide Elemente eine lineare Funktion des Logarithmus aus der Beleuchtungsintensität : B des gesehenen Objektes. Die Formel lautet: $S = a (\text{Log. B} - \text{Log. C})$. Der Faktor a ist von der Art des benutzten Lichtes unabhängig, aber für die „Zapfen-Sehschärfe“ ungefähr zehnmal größer als für die „Stäbchen-Sehschärfe“.

In demselben Jahre wurde von Piekema⁴⁾ eine Untersuchung über die Sehschärfe bei verschiedener Beleuchtung angestellt. Hierbei konstatierte er, daß die Sehschärfe bei einer zunehmenden Beleuchtung bis zu 10 Normalkerzen schnell steigt, darauf aber sehr langsam und daß es gleichgültig ist, ob die Beleuchtung 30 oder 50 Kerzen beträgt.

1917 wurde eine neue Untersuchung von Fräulein Hulshoff Pol⁵⁾ veröffentlicht. Diese untersuchte nicht allein bei verschiedener Beleuchtung, sondern auch bei verschiedenem Kontrast. Als Versuchsobjekt wurden Straubsche Optotypen, d. h. geänderte Snellensche Haken benutzt. Bei dieser Untersuchung zeigte sich, daß eine Beleuchtung von 10 M.K. nicht genügt, um eine Sehschärfe = 1 zu erreichen; hierfür waren 37 M.K. erforderlich, während bei Zunahme bis 140 M.K. die Sehschärfe noch steigt auf 1,1. Gleichzeitig fand sie, daß der Einfluß einer über 40 M.K. starken Beleuchtung auf die Sehschärfe bei großem Kontrast zwar sehr gering war, aber bei schwachem Kontrast sehr deutlich zutage trat. Bei derselben Beleuchtung wurde ein geringer Kontrast besser auf einem hellen als auf einem dunklen Felde wahrgenommen.

Fassen wir nun die erhaltenen Resultate und die verschiedenen Ansichten zusammen, dann besteht wohl Einstimmigkeit darüber, daß bei zunehmender Lichtintensität die Sehschärfe steigt. Auch scheint die Annahme gestattet, daß bei einer gewissen Beleuchtung die Sehschärfe ein Maximum erreicht. Diese Beleuchtung wird aber sehr verschieden angegeben (Cohn, Piekema, Hulshoff Pol) und scheint sehr stark von dem Kontrast zwischen den Objekten und dem Felde,

¹⁾ Dr. A. Charpentier, *Nouvelles recherches sur la sensibilité de la rétine*. Arch. d'Ophthalm. 1882, S. 234, 308 u. 487.

²⁾ Cohn, Untersuchungen über die Sehschärfe bei abnehmender Beleuchtung. Arch. f. Augenheilk., **12**, 233.

³⁾ König, Die Abhängigkeit der Sehschärfe von der Beleuchtungsintensität. Sitzungsber. d. Berliner Akad. 1897, S. 559.

⁴⁾ Piekema, Dissertation, Utrecht 1897.

⁵⁾ G. G. J. Hulshoff Pol, Over de verlichting bij fijnen arbeid. Ned. Tijdschr. v. Gen. 1917, 2. Hälfte, S. 1120.

worauf sie gezeichnet sind, abhängig zu sein. Ob unterhalb des genannten Maximums ein einfaches Verhältnis zwischen zunehmender Lichtintensität und zunehmender Sehschärfe besteht, läßt sich nicht mit Sicherheit sagen; die Ansichten hierüber weichen sehr voneinander ab. Während einige ein einfaches Verhältnis überhaupt nicht nachweisen konnten, fanden andere dagegen, daß die Sehschärfe dem Logarithmus der Beleuchtung proportional war und wieder andere erachteten sie der Wurzel aus der Beleuchtung proportional.

Nun wurde bei den verschiedenen Untersuchungen fast stets allein das Minimum separabile bestimmt, während die Schärfe unseres Sehens nicht allein hiervon abhängig ist. Schon von Hering¹⁾ wurden z. B. optisches Auflösungsvermögen und optischer Raumsinn scharf getrennt. Auch wurde bei den Untersuchungen nur sporadisch die Bedeutung verschiedener Kontraste berücksichtigt.

Aus diesen Gründen schien uns eine erneute Untersuchung wünschenswert, bei welcher in erster Linie die verschiedenen Faktoren, welche die Schärfe unseres Sehens bedingen, gesondert untersucht wurden und an zweiter Stelle der Einfluß verschiedener Beleuchtung und verschiedenen Kontrastes auf diese Faktoren verfolgt wurde. Ehe wir aber zu einer Beschreibung dieser Untersuchung und ihrer Resultate übergehen, ist ein kurzes Wort über die verschiedenen Komponenten, welche die Sehschärfe, im weitesten Sinne des Wortes, zusammensetzen, vorauszuschicken.

Die Untersuchung nach der Sehschärfe wird häufig einer Untersuchung nach dem Minimum separabile gleichgestellt. Unter Minimum separabile versteht man seit Giraud-Teulon den kleinsten Winkel, unter welchem zwei Punkte oder feine Linien noch getrennt wahrgenommen werden. Wie oft diese Definition auch in der Literatur vorkommt, hat man sich dennoch nicht immer genau daran gehalten. So hat man bei den bekannten Landoltschen Ringen nicht im geringsten etwas mit einem Getrenntwahrnehmen von Punkten oder feinen Linien zu tun; Landolt glaubte denn auch, die beiden Punkte in der ursprünglichen Definition durch zwei Umrisse ersetzen zu dürfen. Noch weiter geht Koster, wenn er die Untersuchung mit dem Guilleryschen Versuchsobjekt, nämlich das Erkennen eines schwarzen Punktes auf weißem Grunde, einer Untersuchung nach dem Minimum separabile gleichstellt, statt Punkte oder feine Linien sind es Flächen von unbegrenzter Ausdehnung, welche man hier getrennt wahrnehmen will. Daß das Nichtbeachten von Form und Größe der Flächen, welche man getrennt wahrnehmen will, zu einem sehr divergierenden Maße für das Minimum separabile führt, ist schon aus der Untersuchung

¹⁾ E. Hering, Über die Grenzen der Sehschärfe. Verhandl. der Königl. Sächs. Ges. der Wissenschaften 1899.

anderer [Guillery] bekannt und wurde 1917 durch eine Untersuchung von einem von uns¹⁾ nochmals ausführlich erläutert. Das Minimum separabile, als kleinster erkennbarer Zwischenraum zwischen zwei Objekten, ist also keine konstante Größe. Bedenken wir nun, daß auf großer Entfernung die Doppelpunkte als eine graue Fläche erscheinen, in der man bei Näherkommen plötzlich eine Trennung auftreten sieht, dann werden in dem Augenblicke die Empfindungsflächen, welche wir von Punkten und Zwischenraum erhalten, unter den gegebenen Umständen (Kontrast, Beleuchtung, Zustand des Auges) die kleinstmöglichen sein. Diese kleinste Empfindungsfläche nennen wir den Empfindungskreis. Dieser ist unter gleichbleibenden Verhältnissen eine konstante Größe. Wir möchten daher die Untersuchung nach dem Minimum separabile durch eine Untersuchung nach dem Empfindungskreis ersetzen. Denjenigen Empfindungskreis, welchen wir unter den für das Erkennen günstigsten Umständen finden, werden wir den absoluten Empfindungskreis nennen; denjenigen, welchen wir bei weniger günstiger Beleuchtung und schwächeren Kontrasten finden, werden wir den relativen Empfindungskreis nennen. Nehmen wir nun die Untersuchung nicht mit Doppelpunkten, sondern mit feinen Linien vor, dann bemerken wir, daß diese unter einem kleineren Winkel getrennt, wahrgenommen werden als die Doppelpunkte. Auch hierbei werden die Linien und der Zwischenraum, wenn sie gerade noch eben getrennt wahrgenommen werden, in der kleinstmöglichen Empfindungsbreite, bei der bestehenden Beleuchtung und vor dem dargebotenen Kontrast erscheinen. Wir können auch hier eine Trennung vornehmen zwischen absoluter und relativer kleinster Empfindungsbreite. Der Durchmesser des Empfindungskreises und der kleinsten Empfindungsbreite ist nicht gleich, obwohl ein festes Verhältnis sehr wahrscheinlich ist. In der folgenden Untersuchung haben wir die Bestimmung des Minimum separabile durch eine Untersuchung sowohl nach dem Empfindungskreis als nach der kleinsten Empfindungsbreite ersetzt. Aber hiermit halten wir die Untersuchung nach der Sehschärfe nicht beendigt. Von Straub²⁾ wurde die Sehschärfe bezeichnet als: das Vermögen, Richtungsunterschiede mittels des Sehorgans kennenzulernen. Bei dieser Umschreibung, die uns bisher am meisten befriedigt, genügt eine Untersuchung allein nach der kleinsten Empfindungsbreite nicht; wir müssen in erster Linie die kleinsten Richtungsunterschiede bestimmen, die wir unter den günstigsten Umständen noch mit unserm Auge wahrnehmen können.

¹⁾ G. Otto Roelofs, Het minimum separabile en de kleinste gewaarwordingsbreedte. Ned. Tijdschr. v. Gen. 1917, 2. Hälfte, 836.

²⁾ M. Straub, Voorwerpen voor de wetenschappelyke bepaling der gezichtscherpte. Ned. Tijdschr. v. Geneesk. 1914, 2. Hälfte, S. 800.

Akzeptieren wir also die von Straub gegebene Umschreibung, dann zerfällt die Untersuchung nach der Sehschärfe in zwei Teile: 1. die Untersuchung nach dem Empfindungskreis und der kleinsten Empfindungsbreite; 2. die Untersuchung nach dem optischen Raumsinne (besser gesagt: Richtungssinne).

Wenn wir die Untersuchung bei einer sehr guten Beleuchtung und hinreichend starken Kontrasten ausführen, dann genügt das Ermitteln der beiden genannten Größen. Unser Ziel ist aber, die Veränderung dieser Größen bei schlechter Beleuchtung und schwachen Kontrasten kennenzulernen. Die Untersuchung nach Empfindungskreis und Empfindungsbreite beruht auf einem Getrenntsehen von Punkten und Linien. Hierfür ist aber an erster Stelle erforderlich, daß unter diesen minder günstigen Umständen jeder Punkt und jede Linie an sich sichtbar ist; ist es doch nicht möglich, zwei unsichtbare Objekte getrennt zu sehen. Es darf nun als eine bekannte Tatsache gelten, daß bei Verminderung von Beleuchtung und Kontrast ein kleines Fleckchen zuweilen nicht sichtbar ist, eine größere Oberfläche aber wohl. Es ist daher keineswegs ausgeschlossen, daß das Größerwerden der relativen Empfindungskreise und kleinsten Empfindungsbreiten gerade voll und ganz darauf beruht, daß dann bei diesen geringen Lichtintensitäten die Oberfläche der dargebotenen Fleckchen und Streifen soviel größer sein muß, um an sich schon wahrgenommen werden zu können. Wir haben daher der vorgenannten Untersuchung eine andere nach den kleinsten Oberflächen, die bei den verschiedenen Kontrasten und unter den verschiedenen Beleuchtungen noch sichtbar sind, vorhergehen lassen. Unter den günstigsten Umständen würde man dies eine Untersuchung nach dem physiologischen Punkt, dem Minimum perceptibile oder Minimum visibile nennen. Wir werden uns indessen an dem Ausdruck: kleinste wahrnehmbare Oberfläche halten.

Bisher sprachen wir stets von Beleuchtung und Kontrast, als ob hiermit die physischen Reize für unsere Netzhaut bestimmt wären. Dies ist natürlich am allerwenigsten der Fall. Von Fräulein Hulshoff Pol wird daher noch auf das Reflexionsvermögen des Versuchsfeldes hingewiesen. Es würden sich somit drei Größen ergeben, die zu berücksichtigen sind. So verwickelt ist jedoch die Sachlage nicht. Sowohl bei der Untersuchung Frl. Hulshoff Pols als auch bei der unserigen haben wir nämlich nur mit zwei Größen zu tun, und zwar: 1. der Lichtstärke der Gegenstände und 2. der Lichtstärke des Grundes, auf welchem sie gezeichnet sind. Für eine physiologische Erklärung der Erscheinungen scheint es uns erwünscht, namentlich auf den absoluten Wert dieser beiden Größen zu rechnen. Erst später können wir dann verfolgen, auf welche Weise diese Größen in ihrem Verhältnis untereinander die Sehschärfe beeinflussen, während wir uns nicht in

das Geben einer genauen Definition für das Reflexionsvermögen des Versuchsfeldes zu vertiefen brauchen.

Wir sind jetzt bis zur Beschreibung unserer Untersuchung gelangt und werden zunächst eine Übersicht über die Versuchsobjekte, welche wir benutzten, geben und auseinandersetzen, warum wir gerade solche Gegenstände gewählt haben und wie wir glaubten, hiermit unser Ziel erreichen zu können.

Für die Untersuchung nach der kleinsten wahrnehmbaren Oberfläche verwandten wir große runde Flächen, in welchen ein kleines Quadrat angebracht war. Die Quadrate waren schwarz oder weiß; die ersteren waren auf weißen, hell- und dunkelgrauen runden Flächen angebracht, die letzteren auf schwarzen, dunkelgrauen und hellgrauen runden Flächen. Die Quadrate hatten eine Seitenlänge von $\frac{1}{2}$, 1, $1\frac{1}{2}$, 2, 3, $4\frac{1}{2}$, 6, 9, 12, 18, 24 und 30 mm.

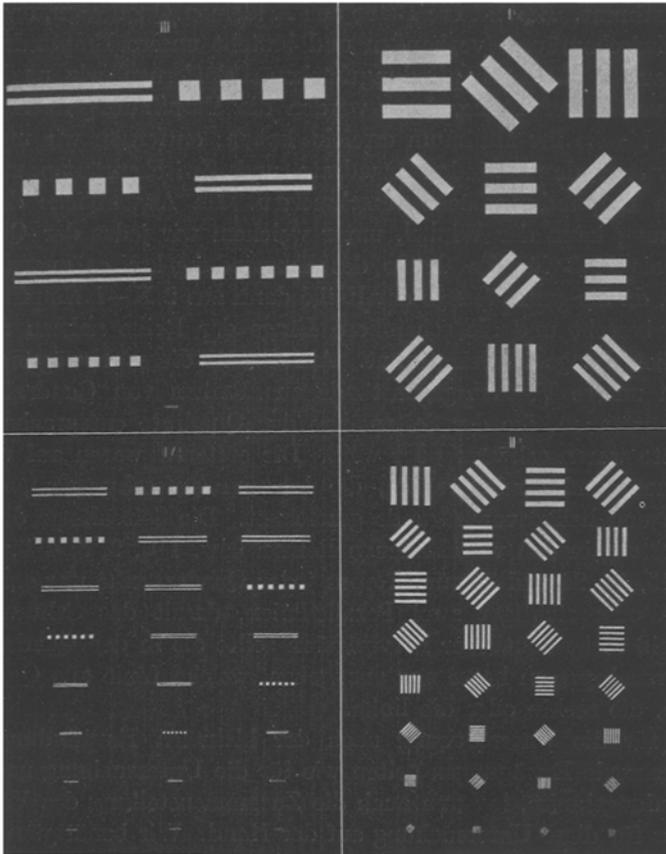
Um sicher zu sein, daß die Fläche wirklich erkannt wurde, und jede Selbsttäuschung auszuschließen, war die Stelle der Quadrate innerhalb der Kreisflächen sehr verschieden gewählt. Die untersuchte Person mußte angeben, wo sie das kleine Quadrat erblickte. Die Erfahrung hat gelehrt, daß diese Maßnahme nicht überflüssig war.

Schwieriger war es, geeignete Versuchsobjekte für die Untersuchung nach dem Empfindungskreis zu finden. Man könnte sich sogar fragen, ob es überhaupt wohl möglich ist, die Größe einer Empfindung zu messen. Wir haben uns zwecks Beantwortung dieser Frage von dem folgenden Gedankengang leiten lassen. Wenn unsere optischen Raumpfindungen sich verhalten wie die Winkel, unter denen die dargebotenen Gegenstände gesehen werden, können wir uns orientieren und könnten wir sagen, daß die dargebotenen Gegenstände und die zugehörigen Empfindungen einander decken oder aber auch, daß die scheinbare Größe mit der wirklichen Größe übereinstimmt. Hierbei wird angenommen, daß sich die Gegenstände in gleicher Entfernung vom Auge befinden. In diesem Falle ist nichts dagegen einzuwenden, diese Raumpfindungen zu symbolisieren durch Flächen von verschiedener Form und Größe, welche wir dann die Empfindungsflächen nennen werden. Verhalten sich nun die Empfindungsflächen wie die dargebotenen Gegenstände, dann liegt es nahe, die Empfindungsflächen an Form und Größe den dargebotenen Gegenständen gleich zu zeichnen. Betrachten wir nun z. B. ein Quadrat und verkleinern wir dasselbe allmählich, dann wird auch die korrespondierende Empfindungsfläche in derselben Weise kleiner werden. Aber hierfür gibt es eine Grenze; es wird ein Augenblick kommen, in welchem die Empfindungsfläche nicht mehr in gleicher Weise kleiner wird; die Empfindungsflächen verhalten sich dann nicht mehr wie die dargebotenen Gegenstände. Die letzteren können wir wohl immer kleiner machen,

die Empfindungsfläche dagegen erreicht ein Minimum, den Empfindungskreis. Denken wir uns nun eine Reihe Quadrate mit ebenso großen Zwischenräumen wie die Seitenlänge der Quadrate. Die Länge dieser Reihe kann hinreichend lang sein, um annehmen zu dürfen, daß die Längenempfindung der ganzen Reihe nahezu mit der wirklichen Länge übereinstimmt. Besteht die Reihe aus X kleinen Quadraten, dann sind $X-1$ Zwischenräume vorhanden und besteht unsere Empfindung der Reihe aus $2 X-1$ Empfindungsflächen. Entfernen wir uns immer weiter von dieser Reihe, dann werden die Empfindungsflächen stets kleiner, bis sie ihr Minimum erreicht haben; entfernen wir uns dann noch weiter, dann werden Quadrate und Zwischenräume zu einer einzigen Empfindungsfläche verschmelzen. Im Augenblicke der Verschmelzung kann der Winkel, unter welchem wir jedes der Quadrate sehen, als Maß für die Größe des Empfindungskreises angenommen werden, da die ganze Menge der Reihe dann aus $2 X-1$ Empfindungskreisen besteht und die scheinbare Länge der Reihe nahezu mit der wirklichen Länge übereinstimmt. Auf Grund dieser Erwägungen bestanden unsere Versuchsgegenstände aus Reihen von Quadraten mit Zwischenräumen, die der Seitenlänge der Quadrate entsprachen. Die Quadrate waren schwarz oder weiß. Die ersteren waren auf weißem, hellgrauem und dunkelgrauem, die letzteren auf schwarzem, dunkelgrauem und hellgrauem Grunde gezeichnet. Die Seitenlänge der Quadrate betrug in den verschiedenen Reihen bzw. $1\frac{1}{2}$, 2, 3, $4\frac{1}{2}$, 6, $7\frac{1}{2}$, 9, 12, 15, 18, 24 und 30 mm. Neben jeder Quadratreihe war eine Linie gezogen oder richtiger zwei Parallellinien, damit das Schwarz oder das Weiß nicht deutlicher hervortreten sollte als in der Quadratreihe. Die Versuchsperson hatte nur anzugeben, welche Linie aus Quadraten bestehe, die rechte oder die linke.

Da für die Untersuchung nach der kleinsten Empfindungsbreite entsprechende Erwägungen gelten wie für die Untersuchung nach dem Empfindungskreise, lag nun auch die Zusammenstellung des Versuchsobjektes für diese Untersuchung auf der Hand. Wir benötigten hierfür eine Reihe paralleler Streifen mit Zwischenräumen von gleicher Breite wie die Streifen. Die letzteren waren ebenfalls schwarz oder weiß, die schwarzen auf weißem, hellgrauem und dunkelgrauem Grunde, die weißen auf schwarzem, dunkelgrauem oder hellgrauem Grunde. Die Breite der Streifen und ihr Abstand untereinander betrug 1, $1\frac{1}{2}$, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15 und 20 mm. Die Streifen waren in verschiedener Richtung angeordnet. Die Versuchsperson mußte nun angeben, in welcher Richtung die Streifen standen. Diese waren immer so gezeichnet, daß jede Reihe ein Quadrat bildete, so daß die Versuchsperson keinen Anknüpfungspunkt hatte, die Richtung der Streifen zu erraten.

Schließlich sind noch die Versuchsgegenstände zu beschreiben, welche wir für die Untersuchung nach dem kleinsten wahrnehmbaren Richtungsunterschied (optischer Raumsinn) benutzten. Wir gebrauchten hierzu Streifen von verschiedener Breite, die an einer oder zwei



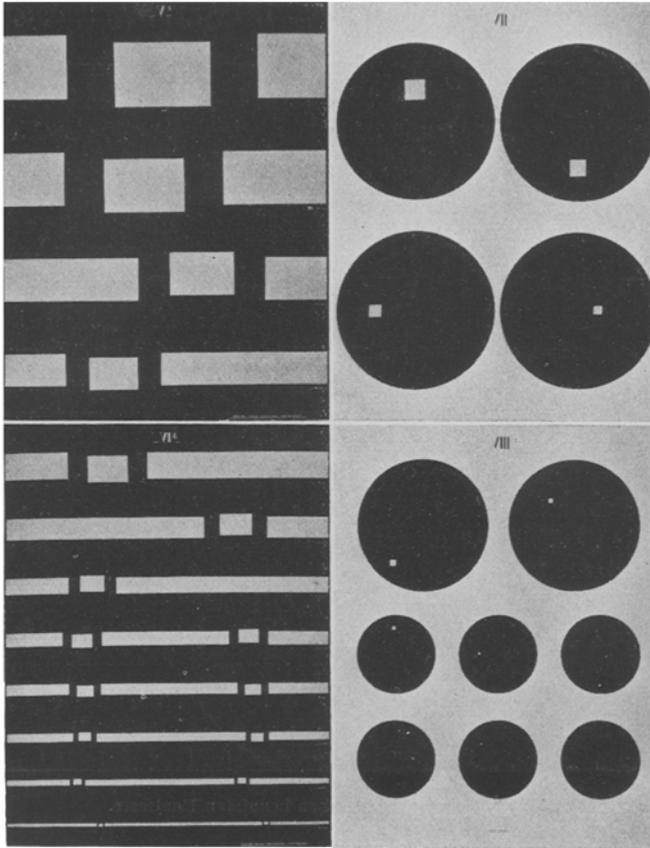
Objekte für die Untersuchung des
Empfindungskreises.

Objekte für die Untersuchung der
kleinsten Empfindungsbreite.

Abb. 1.

Stellen unterbrochen waren, während in dem unterbrochenen Teile ein Stück des Streifens etwas nach oben oder etwas nach unten verschoben war. Dieses Unterbrechen des Streifens bietet den Vorzug, daß die untersuchte Person wußte, wo sie das verlagerte Stück zu suchen hatte und sie also ausschließlich nur zu sagen hatte, ob das lose Stück in der einen oder in der andern Richtung verlagert war. Indessen war hiermit auch ein Nachteil verbunden, wie sich bei der

Untersuchung herausstellte. Bei schwacher Beleuchtung oder geringem Kontrast, wenn nur große Richtungsunterschiede wahrnehmbar sind und also auch die breiteren Streifen benutzt werden müssen, kommen die Stücke, in welche der Streifen verteilt ist, zu weit auseinanderzu-



Objekte für die Untersuchung des kleinsten wahrnehmbaren Richtungsunterschiedes.

Objekte für die Untersuchung der kleinsten wahrnehmbaren Oberfläche.

Abb. 2.

liegen; die gereizten Netzhautteile liegen dann auch zu weit auseinander, wodurch das Resultat der Untersuchung etwas weniger zuverlässig wird. Wählt man eine schmalere Unterbrechung, dann wird diese bei jener ungünstigen Beleuchtung unsichtbar und sie verliert ihre Bedeutung. Wir halten diesen Nachteil aber für so groß, daß wir für eine Wiederholung der Untersuchung andere Versuchsobjekte empfehlen möchten. Und zwar erscheint es uns hierfür erwünschter,

Streifen von verschiedener Breite, deren eine Hälfte in bezug auf die andere mehr oder weniger verschoben ist (also ganz ohne Zwischenraum) zu wählen. Die übrigen von uns benutzten Versuchsobjekte haben uns in jeder Hinsicht befriedigt.

Die Verschiebung der Stücke in unseren letzten Versuchsobjekten nach oben oder nach unten betrug $\frac{1}{2}$, 1, $1\frac{1}{2}$, 2, $2\frac{1}{2}$, 3, 4, 5, 6, 8, 10

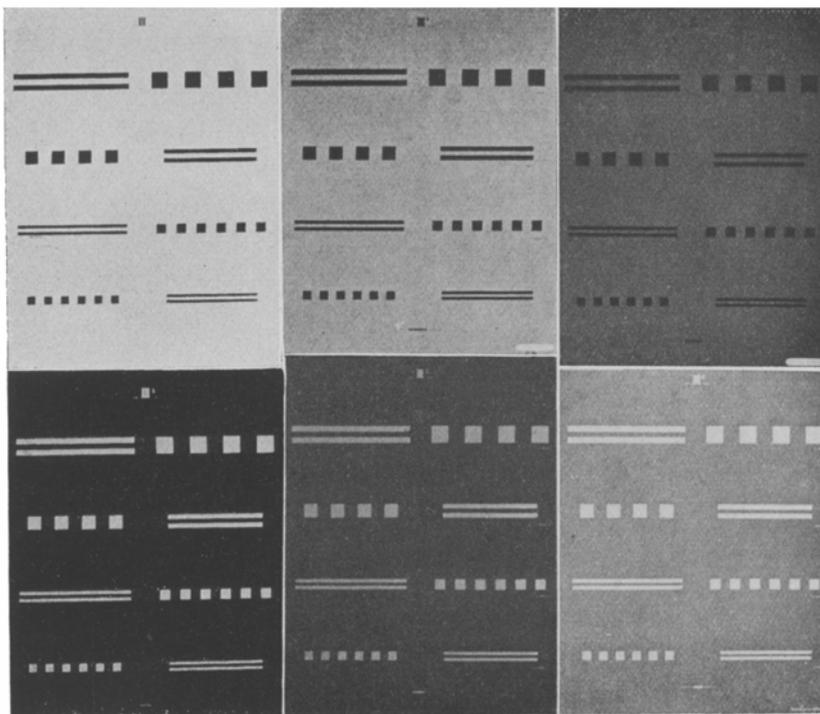


Abb. 3. Die 6 verschiedenen benutzten Kontraste.

und 12 mm. Auch diese Streifen waren schwarz oder weiß, die ersteren auf weißem, hellgrauem und dunkelgrauem, die weißen auf schwarzem, dunkelgrauem und hellgrauem Grunde.

Eine verkleinerte Wiedergabe einiger der benutzten Versuchsobjekte bieten die Abb. 1, 2 und 3.

Nun wir die verschiedenen Versuchsobjekte kennengelernt haben, kann die Beschreibung der Untersuchung kurz sein. Untersucht wurde das linke Auge von B. d. H.; das rechte wurde mit einer kleinen Kappe abgeschlossen. Die Refraktion des linken Auges ist leicht myop, $E + \frac{1}{2}$ D. Die Sehschärfe beträgt 1 mit Fehler.

Zunächst verrichteten wir die Untersuchung bei einer konstanten

Entfernung (von 4 m) zwischen Versuchsobjekt und Versuchsperson. Das Diaphragma des Beleuchtungsapparates wurde langsam aufgedreht, bis die Versuchsperson das Objekt erkennen konnte. Vorher blieb der Raum 20 Min. vollkommen dunkel, damit nicht eine unerwünschte Lichtadaptation die Wahrnehmung beeinträchtigen könne. Immer wurde mit den größten Objekten in jeder Serie angefangen, da diese bei der schwächsten Beleuchtung erkennbar seien. Hierdurch erübrigte es sich, jedesmal wieder 20 Min. im Dunkeln zu verbleiben. Sobald nun bei langsam zunehmender Beleuchtung das Objekt erkannt war, wurde an dem Beleuchtungsapparat die Stärke der Beleuchtung abgelesen.

Zwecks Kontrolle nahmen wir darauf eine zweite Reihe Bestimmungen vor. Nach abermals 20 Min. Dunkeladaptation wurde die größte Entfernung bestimmt, bei welcher bei einer festgesetzten Beleuchtung jedes der Objekte erkannt werden konnte; d. h. die Versuchsperson begann mit 10 m Entfernung und näherte sich dann immer weiter, bis sie das Objekt erkannte.

Da sich herausstellte, daß die Ergebnisse unserer Untersuchung nicht immer dieselben waren, wiederholten wir jede Bestimmung fünfmal, und berechneten hieraus den Durchschnitt. Insgesamt verrichteten wir also auf zwei verschiedene Weisen von vier Objekten in sechs Kontrasten von zwölf verschiedenen Größen je fünf Bestimmungen oder 2880 Wahrnehmungen.

Man sollte erwarten, daß die Resultate der beiden Weisen (konstante Entfernung mit veränderlicher Beleuchtung und konstante Beleuchtung mit veränderlicher Entfernung) einander völlig deckten. Dies war indessen nicht der Fall, was sich auf folgende Weise erklären läßt. Wenn man eine derartige Untersuchung anstellt, bemerkt man schon bald, daß der Übergang zwischen Nichterkennen und Erkennen nichts weniger als plötzlich stattfindet. Erst erkennt man die Versuchsgegenstände mit einem gewissen Grade von Wahrscheinlichkeit; diese Wahrscheinlichkeit wird allmählich immer stärker und geht schließlich in Gewißheit über. Überläßt man nun die Versuchsperson völlig sich selbst, dann wird diese je nach ihrer Eigenart einen kleineren oder größeren Grad von Wahrscheinlichkeit wählen, bei dem sie angibt, das Versuchsobjekt zu erkennen. Dies war der Fall bei einer konstanten Beleuchtung mit veränderlicher Entfernung. Die auf diese Weise erhaltenen Ziffern sind ziemlich regelmäßig, doch lassen sie zugleich erkennen, daß die Versuchsperson für sich selbst einen ziemlich großen Grad von Wahrscheinlichkeit verlangte. Etwas anders ist die Sachlage bei der konstanten Entfernung mit veränderlicher Beleuchtung. Die Beleuchtung wird von einer zweiten Person allmählich verstärkt. Die Geschwindigkeit aber, mit welcher dies geschieht, und die dann

und wann gestellten Fragen waren nicht ohne Einfluß auf den Ausschlag. Die Resultate lehren, daß die Versuchsperson hierdurch häufiger mit einem geringeren Grade von Wahrscheinlichkeit zufrieden war, wodurch die Ziffern auch viel geringere Regelmäßigkeit aufwiesen und an Brauchbarkeit verloren. Daher haben wir denn auch die nach beiden Methoden erhaltenen Resultate stets getrennt gehalten.

A. Untersuchung nach der kleinsten wahrnehmbaren Oberfläche.

Setzen wir für die maximale Lichtmenge, welche unser Leuchtapparat liefern konnte, 10 000, dann können wir die erhaltenen Resultate folgendermaßen in zwei Tabellen wiedergeben.

Erforderliche Beleuchtung für das Erkennen auf 4 m Entfernung,

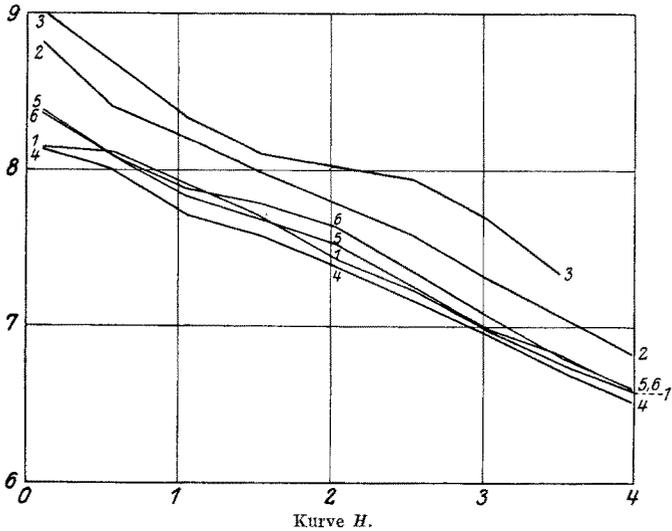
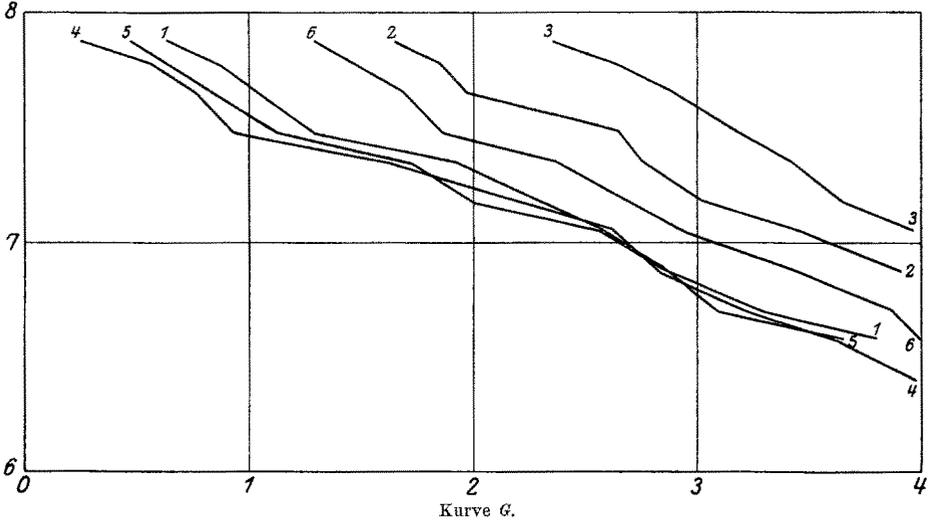
Gesehen unter einem Winkel von	Schwarzweiß G_1	Schwarz-hellgrau G_2	Schwarz-dunkelgrau G_3	Weiß-schwarz G_4	Weiß-dunkelgrau G_5	Weiß-hellgrau G_6
26''	—	—	—	—	—	—
51''	—	—	—	9347,4	—	—
1' 17''	6463,29	—	—	4231,63	4463,22	9686,8
1' 43''	1979,00	—	—	1642,11	1257,3	7474,0
2' 35''	751,45	8126,40	—	675,43	748,53	2758,0
3' 52''	385,96	2905,27	9389,4	421,85	368,4	853,8
5' 10''	210,52	1087,45	4505,3	175,44	103,5	485,4
7' 44''	84,79	576,02	2631,6	42,10	54,10	236,85
10' 19''	19,92	450,29	1515,8	8,6	13,48	73,12
15' 28''	11,27	94,17	792,3	5,73	6,932	48,01
20' 38''	7,24	71,08	435,7	3,67	4,276	29,65
25' 47''	4,28	44,14	225,1	1,76	2,968	19,24

Kleinste wahrnehmbare Oberfläche, gesehen unter einem Winkel von:

Beleuchtung	Schwarzweiß H_1	Schwarz-hellgrau H_2	Schwarz-dunkelgrau H_3	Weiß-schwarz H_4	Weiß-dunkelgrau H_5	Weiß-hellgrau H_6
9474,0	1' 19''	2' 17''	4' 40''	1' 9''	1' 23''	1' 23''
3158,0	2' 1''	3' 58''	7' 30''	1' 49''	2' 17''	2' 13''
1052,6	3' 15''	6' 53''	16' 36''	3' 5''	3' 17''	4'
350,88	5' 44''	12' 54''	29' 28''	4' 55''	6' 4''	7' 38''
109,41	9' 7''	20' 30''	35' 17''	8' 10''	11' 21''	14' 36''
33,96	17' 41''	33'	42' 58''	12' 54''	16' 17''	20' 38''
11,32	27' 40''	54' 12''	1° 13' 39''	17' 25''	23'	25' 51''
3,77	44' 36''	1° 25' 56''	2° 43' 35''	33' 41''	41' 15''	41' 15''
1,26	(47' 57'')	3° 45' 51''	5° 50' 0''	46' 53''	1° 22' 30''	1° 19' 19''

Die erste Tabelle zeigt uns die geringste Menge Licht, die bei zunehmender Beleuchtung erforderlich war, die Quadrate auf 4 m Entfernung zu erkennen, die zweite Tabelle zeigt uns den größten Abstand.

auf welchem bei verschiedenen konstanten Beleuchtungen die Gegenstände erkannt werden konnten. Statt der Größe der Entfernung selbst ist der Winkel aufgezeichnet, unter welchem eine Seite des Quadrates gesehen wurde.



Bei einer Beleuchtung von 9474 Einheiten betrug die Lichtintensität des Weiß 15 M.K., des Hellgrau 4,7 M.K., des Dunkelgrau 1,9 M.K. und des Schwarz etwa 0,75 M.K. (das Schwarz war nicht überall gleich). Um die Übersicht der erhaltenen Resultate zu erleichtern, haben wir sie in Kurven gebracht. Für das Konstruieren der Kurven wurde auf

der Abszisse der Logarithmus der Beleuchtung abgetragen, auf der Ordinate der Logarithmus des Sinus des Winkels, unter welchem das Quadrat gesehen wurde. Die erste Kurvenreihe (G) gibt uns die in Tab. I verzeichneten Resultate, die zweite Kurvenreihe (H) diejenigen der Tab. II wieder.

Bei dem Betrachten dieser Kurven fällt uns sofort auf, daß bei schwacher Beleuchtung die Oberflächen stets größer werden müssen, um erkannt werden zu können oder umgekehrt, daß für das Erkennen kleiner Quadrate immer mehr Licht erforderlich ist. Denken wir uns die vielen unregelmäßigen Winkel und Buchten weg, die zweifelsohne eine Folge der vielen Ungenauigkeiten sind, die bei unserer Untersuchung unterlaufen konnten, dann fällt es auf, daß die erhaltenen Kurven sich dem Verlaufe paralleler gerader Linien sehr nähern. Sind es in der Tat gerade Linien, dann muß zwischen der Beleuchtung und der Größe der kleinsten wahrnehmbaren Oberflächen ein sehr einfaches Verhältnis bestehen und zwar: Beleuchtung $\times \sin.^\alpha = \text{konstant}$. Die Zahl α ist dann das Verhältnis zwischen der horizontalen und der vertikalen Entfernung von zwei Punkten auf einer der Linien.

Wir können nun aus zwei aufeinanderfolgenden Bestimmungen jedesmal α berechnen und aus den erhaltenen Resultaten für jede Linie einen Durchschnitt suchen.

Sollen die Linien gerade sein, dann werden die Resultate um jenen Durchschnitt schwanken. Sollen die Linien parallel sein, dann dürfen die Durchschnitte nicht zu viel divergieren und können wir hieraus wieder einen Durchschnitt suchen. So fanden wir für die Linien G :

für G_1	4,08; 2,38; 1,65; 2,09; 2,26; 5,03; 1,40; 1,54; 2,36; Mittel: 2,53
für G_2	2,55; 3,39; 1,58; 0,86; 3,86; 0,98; 2,14; Mittel: 2,19
für G_3	2,53; 1,33; 1,92; 1,60; 2,08; 2,96; Mittel: 2,07
für G_4	1,92; 3,26; 2,18; 1,17; 3,02; 3,54; 5,52; 1,00; 1,55; 3,30; Mittel: 2,65
für G_5	4,37; 1,27; 1,76; 4,38; 1,61; 4,83; 1,64; 1,68; 1,64; Mittel: 2,58
für G_6	0,89; 2,45; 2,91; 1,95; 1,78; 4,08; 1,04; 1,67; 1,94; Mittel: 2,08
	Durchschnitt: 2,35 .

Ebenfalls fanden wir für die Linien H :

für H_1 :	2,58; 2,30; 1,94; 2,51; 1,98; 2,45; 2,30; (15,13); Mittel: 2,29
für H_2 :	1,99; 1,99; 1,75; 2,52; 2,46; 2,21; 2,39; 1,13; Mittel: 2,05
für H_3 :	2,32; 1,38; 1,91; 6,47; 5,94; 2,04; 1,38; 1,44; Mittel: 2,86
für H_4 :	2,40; 2,08; 2,35; 2,30; 2,56; 3,66; 1,67; 3,31; Mittel: 2,54
für H_5 :	2,19; 3,02; 1,79; 1,86; 3,24; 3,18; 1,88; 1,58; Mittel: 2,34
für H_6 :	2,33; 1,86; 1,70; 1,80; 3,38; 4,87; 2,35; 1,68; Mittel: 2,50
	Durchschnitt: 2,43 .

Kombinieren wir die Resultate von G und H , dann finden wir als Durchschnitt **2,39**. Die Ziffern sind derart angeordnet, daß sich links die aus den Resultaten mit kleineren Quadraten und stärkerer Be-

leuchtung berechneten Zahlen befinden, und rechts die aus den Resultaten mit größeren Quadraten und schwächerer Beleuchtung berechneten Zahlen. Da die Ziffern weder nach rechts noch nach links allmählich höher oder niedriger werden, glaube ich annehmen zu dürfen, daß sie um einen Durchschnitt schwanken und daß wir, falls alle Ungenauigkeiten ausgeschlossen wären, gerade Linien vor uns hätten. Vergleichen wir die Durchschnittswerte, dann weichen diese nicht viel voneinander ab, woraus wir schließen können, daß die geraden Linien parallel laufen sollten. Da einige weniger genaue Bestimmungen großen Einfluß auf den Durchschnitt haben können, vermögen wir auch die Zahl a aus den Resultaten der ersten und letzten Bestimmung in jeder Reihe zu berechnen (bei der Linie H_1 haben wir die letzte Bestimmung nicht mitgerechnet). Wir finden dann für a :

bei G_1 : 2,44	bei H_1 : 2,22
bei G_2 : 2,27	bei H_2 : 1,94
bei G_3 : 1,97	bei H_3 : 2,07
bei G_4 : 2,51	bei H_4 : 2,41
bei G_5 : 2,44	bei H_5 : 2,18
bei G_6 : 2,07	bei H_6 : 2,20
Mittel: 2,28	Mittel: 2,17

Kombinieren wir wieder die Resultate von G und H , dann finden wir als Durchschnitt: 2,22. Das Resultat ist also, daß die Beleuchtung umgekehrt proportional der 2,4. bis 2,2. Potenz des Winkels ist, unter welchem die Seitenlänge der kleinsten wahrnehmbaren Oberfläche gesehen wird oder aber umgekehrt proportional der 1,2. bis 1,1. Potenz der kleinsten wahrnehmbaren Oberfläche. Wir können also sagen, daß, bei gleichbleibendem Kontrast innerhalb gewisser Grenzen, die Größe der kleinsten wahrnehmbaren Oberfläche nahezu umgekehrt proportional der Stärke der Beleuchtung ist.

Dieses Resultat erinnert stark an die Beziehungen zwischen Lichtempfindlichkeit und Flächengröße bei fovealem Sehen, wie diese von Charpentier, Ricco, Loeser u. a. gefunden wurden. Diese stellten nämlich fest, daß beim fovealen Sehen die Lichtempfindlichkeit der Größe des Netzhautbildes proportional ist. Der Umstand, daß allein die Lichtstärke des Objektes verändert wird, während der Grund vollkommen dunkel bleibt, bildet nur einen besondern Fall unseres allgemeinen Satzes.

Zwar fanden wir für a fast immer einen Wert, der etwas größer war als 2. Die Erklärung hierfür scheint uns nicht schwer. An erster Stelle wird bei der stärkeren Beleuchtung die Pupille allmählich etwas enger, wodurch die Lichtintensität des Netzhautbildes der Lichtintensität des Versuchsobjektes mit Grund nicht ganz proportional bleibt. An zweiter Stelle wird, wenn der Grund nicht völlig schwarz ist, bei zu-

nehmender Beleuchtung die Dunkeladaptation, d. h. die Lichtempfindlichkeit der Netzhaut, allmählich etwas abnehmen.

Infolge dieser beiden Veränderungen ist für eine X mal kleinere Oberfläche nicht X mal mehr Licht nötig, sondern wird dies noch etwas stärker sein müssen.

In Verbindung mit den Resultaten, welche Ricco, Loeser u. a. erhielten, und des weitern mit unsern Ergebnissen und Erwägungen, glauben wir also, auf folgende Regel schließen zu dürfen: Bei fovealem Sehen mit gleichbleibendem Kontrast und unverändertem Zustande des Auges wird die kleinste wahrnehmbare Oberfläche umgekehrt proportional der Stärke der Beleuchtung sein.

Indem wir uns auf die Resultate unserer Untersuchung stützten, haben wir versucht, diese Regel noch mehr zu verallgemeinern. Wir haben hierbei erwogen, daß die Beleuchtung nur indirekt etwas mit unseren Wahrnehmungen zu machen hat. Direkt haben wir mit der Lichtstärke des Gegenstandes und der Lichtstärke des Grundes zu tun. Was der Beleuchtung proportional ist, ist auch dem Unterschiede in Lichtstärke zwischen Gegenstand und Grund proportional. Es lag nun nahe, zu verfolgen, ob für ungleiche Kontraste die Regel gültig bleiben würde, wenn nur der Ausdruck Beleuchtung durch Unterschied in Lichtstärke zwischen Gegenstand und Grund ersetzt wurde.

Zu diesem Zwecke haben wir den durchschnittlichen senkrechten Abstand zwischen den Linien G_1 usw. bis G_6 und H_1 usw. bis H_6 berechnet. Hieraus können wir weiter berechnen, wie sich unter derselben Beleuchtung die kleinsten wahrnehmbaren Oberflächen bei den verschiedenen Kontrasten verhalten. In der folgenden Tabelle sind die Resultate dieser Berechnungen verzeichnet, während daneben das Verhältnis der Unterschiede in Lichtstärke zwischen Gegenstand und Grund der verwendeten Kontraste gestellt wurde. Bei diesen Berechnungen ist kein Gebrauch gemacht von den kleinsten wahrnehmbaren Oberflächen bei der Beleuchtung von 1,26 (Tabelle H unten), da wir die Bestimmungen bei dieser äußerst schwachen Beleuchtung für allzu ungenau hielten (u. a. kein rein foveales Sehen).

Betrachten wir die aus den Linien G erhaltenen Ziffern, dann erweisen sich diese als zu unregelmäßig, um sich eine Ansicht bilden zu können. Ganz anders ist es aber um die aus den Linien H berechneten Ziffern bestellt. Diese sind derart unerwartet günstig, geben eine so deutliche und bejahende Antwort auf die Frage, die wir uns gestellt hatten, daß wir hier nicht an einen Zufall denken können und also schließen dürfen, daß bei fovealem Sehen und unverändertem Adaptationszustand die kleinste wahrnehmbare Oberfläche dem Unterschiede in Lichtstärke zwischen dieser Oberfläche und der Umgebung umgekehrt proportional ist. Der Einfluß der Adaptation ergibt sich

Verglichene Kontraste	Verhältnis der kleinsten wahrnehmbaren Oberflächen	Verhältnis der Unterschiede in Lichtstärke	Verglichene Kontraste	Verhältnis der kleinsten wahrnehmbaren Oberflächen	Verhältnis der Unterschiede in Lichtstärke
$G_1 : G_2$	1 : 6,7	3,62	$H_1 : H_2$	1 : 4,01	3,62
$G_1 : G_3$	1 : 25,0	12,7	$H_1 : H_3$	1 : 13,35	12,7
$G_1 : G_4$	1 : 0,68	1,00	$H_1 : H_4$	1 : 0,68	1,00
$G_1 : G_5$	1 : 0,73	1,09	$H_1 : H_5$	1 : 1,04	1,09
$G_1 : G_6$	1 : 2,65	1,38	$H_1 : H_6$	1 : 1,32	1,38
$G_2 : G_3$	1 : 3,73	3,50	$H_2 : H_3$	1 : 3,33	3,50
$G_2 : G_4$	1 : 0,10	0,29	$H_2 : H_4$	1 : 0,17	0,29
$G_2 : G_5$	1 : 0,11	0,30	$H_2 : H_5$	1 : 0,26	0,30
$G_2 : G_6$	1 : 0,39	0,38	$H_2 : H_6$	1 : 0,33	0,38
$G_3 : G_4$	1 : 0,03	0,08	$H_3 : H_4$	1 : 0,05	0,08
$G_3 : G_5$	1 : 0,03	0,09	$H_3 : H_5$	1 : 0,08	0,09
$G_3 : G_6$	1 : 0,11	0,11	$H_3 : H_6$	1 : 0,10	0,11
$G_4 : G_5$	1 : 1,07	1,09	$H_4 : H_5$	1 : 1,53	1,09
$G_4 : G_6$	1 : 3,89	1,38	$H_4 : H_6$	1 : 1,94	1,38
$G_5 : G_6$	1 : 3,64	1,27	$H_5 : H_6$	1 : 1,27	1,27

aus den niedrigen Werten für die kleinste wahrnehmbare Oberfläche bei G_4 und H_4 im Vergleich zu G_1 und H_1 . Bei G_4 und H_4 war die Umgebung schwarz; die Dunkeladaptation blieb also erhalten und die Lichtempfindlichkeit war größer als bei der Untersuchung mit G_1 und H_1 . Bei sehr schwacher Beleuchtung und bei sehr starker Beleuchtung wird die genannte Regel natürlich nicht mehr gelten. Bei sehr schwacher Beleuchtung kann der Unterschied zwischen Oberfläche und Umgebung so gering sein, daß derselbe niemals wahrgenommen werden kann, wenn man auch die Oberfläche noch so groß macht, während dann obendrein von fovealem Sehen nicht mehr gesprochen werden kann. Bei sehr starker Beleuchtung kann der Stoffwechselprozeß in den Netzhautelementen überall maximal geworden sein, so daß auch dann das Wahrnehmen eines Unterschiedes ausgeschlossen ist. Die Regel kann nur innerhalb gewisser Grenzen gültig sein.

Anfangs scheint es etwas sonderbar, daß ein Reiz, der nur ein oder vereinzelte Zapfen trifft, nicht wahrgenommen wird, aber wohl wahrgenommen werden kann, wenn derselbe mehr Zapfen trifft. Der Kontrast zu den umgebenden Zapfen ist doch in beiden Fällen derselbe. Wir fühlten das Bedürfnis, uns eine Vorstellung von diesen Verhältnissen zu bilden und glaubten, dies auf die folgende Weise erreichen zu können.

In nachstehendem Schema ist ein Gebiet von 16 Zapfen gezeichnet. Die Größe des Stoffwechsels in diesen Zapfen, welche durch das Licht veranlaßt wird, können wir uns in vertikaler Richtung über jedem der Zapfen angeben denken. Blickt das Auge nun nach einem gleichmäßig erleuchteten Felde, dann müssen wir uns nicht denken, daß

der Stoffwechsel in allen Zapfen dauernd auf einem Niveau ist und bleibt, wie z. B. die gestrichelte Linie *a* angeben würde. Viel wahrscheinlicher ist es, daß dieser Stoffwechsel fortwährend schwankt und sich bald oberhalb *a* bewegt, bald wieder unter derselben liegt. Wir würden uns denken können, daß er zwischen *b* und *c* schwankt (Zapfen 1). Reizen wir nun einen der Zapfen, z. B. Zapfen 2, etwas stärker, dann braucht dies noch nicht direkt wahrgenommen zu werden. Es läßt sich denken, daß erst dann ein Unterschied wahrgenommen wird, wenn der Stoffwechsel sich wenigstens die Hälfte der Zeit oberhalb des Niveaus *c*

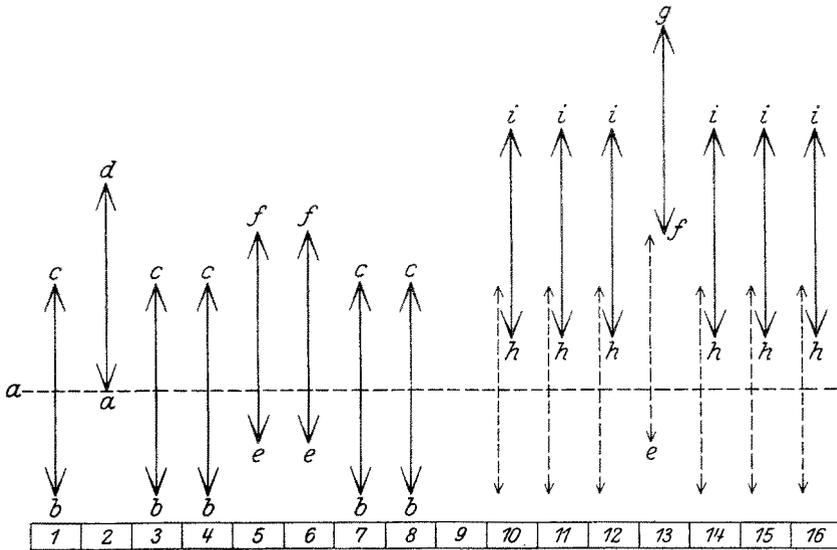


Abb. 4.

befindet und z. B. zwischen *a* und *d* schwankt. Werden nun 2 Zapfen gereizt, z. B. 5 und 6, dann wird schon eine Wahrnehmung erfolgen, wenn sich nur im Gebiete der Zapfen 5 und 6 der Stoffwechsel die Hälfte der Zeit über das Niveau *c* erhebt. Der Stoffwechsel kann dann schwanken zwischen *e* und *f*. Für jeden der Zapfen 5 und 6 wird der Stoffwechsel nur $\frac{1}{4}$ der Zeit oberhalb des Niveaus *c* kommen, aber in dem Gebiete von 5 und 6 wird derselbe ungefähr die Hälfte der Zeit über Niveau *c* kommen. Denken wir uns nun weiter Zapfen 13 mit einem zwischen *e* und *f* schwankenden Stoffwechsel, während der Stoffwechsel der umgebenden Zapfen zwischen *b* und *c* schwankt, dann wird dieser Unterschied nicht wahrgenommen werden. Verdoppeln wir nun die Beleuchtung, so daß auch der Stoffwechsel doppelt so stark wird, dann wird dieser für Zapfen 13 zwischen *f* und *g* schwanken. Aber auch die umgebenden Zapfen (10, 11, 12, 14, 15, 16) werden

doppelt so stark beleuchtet; der Stoffwechsel wird auch verdoppelt und schwankt zwischen *h* und *i*. Der Unterschied zwischen dem Stoffwechsel des Zapfens 13 und Umgebung ist ebenfalls doppelt so groß geworden, so daß dieser jetzt wohl wahrgenommen werden kann.

Wir sind uns dessen bewußt, daß an der hier gegebenen Vorstellung wohl noch etwas hapert und daß man den Wert derartiger Vorstellungen nicht überschätzen darf. Sie bieten jedoch den Vorteil, daß man die Tatsachen leichter übersieht und sich einigermaßen verständlich machen kann.

B. Untersuchung nach dem Empfindungskreis.

Ebenso wie in der vorhergehenden Untersuchung ist für die maximale Lichtmenge unseres Beleuchtungsapparates 10.000 gesetzt. Die Resultate geben wir in den beiden nachstehenden Tabellen wieder.

Erforderliche Beleuchtung für den relativen Empfindungskreis auf 4 m Entfernung:

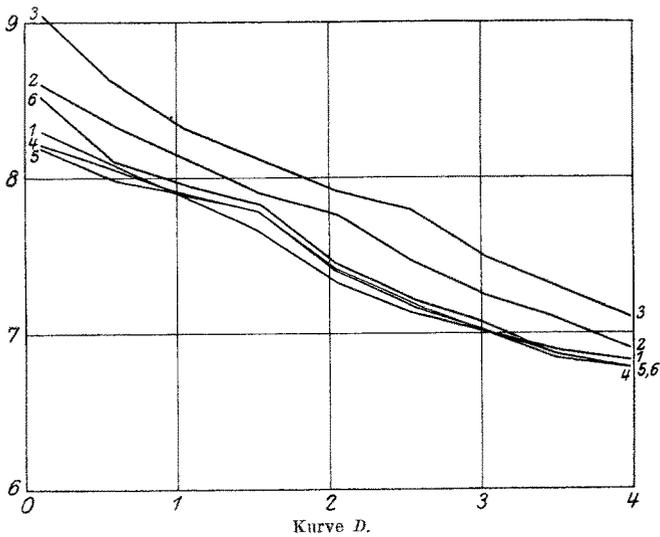
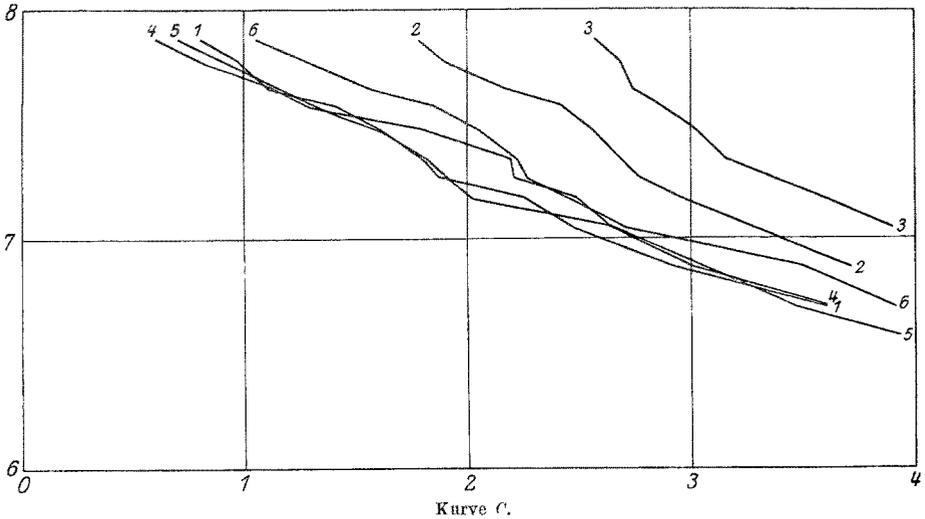
Gesehen unter einem Winkel von	Schwarzweiß C_1	Schwarz-hellgrau C_2	Schwarz-dunkelgrau C_3	Weiß-schwarz C_4	Weiß-dunkelgrau C_5	Weiß-hellgrau C_6
1' 17"	—	—	—	—	8442	—
1' 43"	3974	—	—	4063,2	2842,1	8168,4
2' 35"	836,3	5079	—	1005,8	1113,4	3137
3' 52"	289,5	1894,5	7874	444,4	444,4	500
5' 10"	178,4	912,3	4063,2	309,9	106,1	286,55
6' 27"	73,57	593,6	2316	160,8	79	184,1
7' 44"	63,4	485,4	1452,6	155,0	63,84	166,66
10' 19"	41,2	359,5	1046,7	64,3	40,74	111,1
12' 54"	26,3	269,0	751,5	19,6	21,08	70,63
15' 28"	13	152,0	549,7	13,43	14,69	36,45
20' 38"	9,4	79,0	479,2	6,287	7,95	18,41
25' 47"	6,3	59,9	371,4	3,97	4,98	11,02

Relativer Empfindungskreis, gesehen unter einem Winkel von:

Beleuchtung	Schwarzweiß D_1	Schwarz-hellgrau D_2	Schwarz-dunkelgrau D_3	Weiß-schwarz D_4	Weiß-dunkelgrau D_5	Weiß-hellgrau D_6
9474	2' 17"	2' 50"	4' 24"	1' 59"	2' 6"	2' 4"
3158	2' 42"	4' 17"	6' 53"	2' 32"	2' 25"	2' 33"
1052,6	3' 36"	6' 3"	10' 55"	3' 34"	3' 39"	4' 3"
350,88	4' 44"	10' 8"	21' 9"	5' 21"	5' 10"	5' 39"
109,41	7' 21"	19' 51"	28' 20"	9' 4"	8' 50"	9' 57"
33,96	15' 34"	27' 30"	45' 50"	20' 38"	20' 38"	23' 34"
11,32	25' 56"	45' 11"	1° 11' 13"	26' 27"	27' 13"	30' 38"
3,77	41' 15"	1° 16' 24"	2° 20' 10"	38' 22"	33'	44' 36"
1,26	1° 8' 46"	2° 18' 17"	6° 25' 38"	55' 45"	52' 33"	1° 55' 39"

Die erste Tabelle gibt uns die geringste Menge Licht, die bei zunehmender Beleuchtung erforderlich war, die Quadratlinie auf 4 m

Abstand als solche zu erkennen; die zweite Tabelle zeigt uns den kleinsten Winkel, unter welchem die Quadrate als solche bei einer konstanten Beleuchtung erkannt werden konnten. Die verzeichneten Winkel sind die Winkel, unter welchen der Durchschnitt (die Seiten-



länge) jedes Quadrates gesehen wurde, welcher Durchschnitt nach unserer Auseinandersetzung dem Durchschnitte der relativen Empfindungskreise entsprechen soll.

Wir haben auch diese Data in einer graphischen Darstellung wiedergegeben. Auf der Abszisse ist der Logarithmus der Beleuchtung, auf

der Ordinate der Logarithmus des Sinus des Winkels, unter welchem jedes Quadrat gesehen wurde, abgetragen.

Die erste Linienreihe (*C*) zeigt uns die Resultate aus der ersten Tabelle, die zweite Linienreihe (*D*) diejenigen aus der zweiten Tabelle.

Es ist klar, daß der relative Empfindungskreis bei schlechter Beleuchtung größer, bei stärkerer Beleuchtung kleiner wird. Auch hier fällt uns auf, daß die Linien, abgesehen von vielen Unregelmäßigkeiten, in ihrem Verlaufe an gerade, parallel verlaufende Linien erinnern. In diesem Falle ist Beleuchtung $\times \sin. a$ wiederum konstant. Die Zahl *a* ist dann das Verhältnis zwischen der wagerechten und der senkrechten Entfernung zweier Punkte auf einer und derselben Linie. Wir können dieses Verhältnis (Zahl *a*) von Bestimmung zu Bestimmung berechnen. Hierbei erhielten wir die folgenden Ziffern.

Für die Linien *C* fanden wir:

für C_1	(3,81); (2,63); 1,67; 3,99; 0,82; 1,50; 2,01; 3,88; 1,13; 1,80; Mittel: 2,10
für C_2	(2,45); 2,52; 1,94; 1,11; 1,04; 1,30; 3,15; 2,27; 1,24; Mittel: 1,82
für C_3	2,28; 2,53; 2,57; 1,14; 1,48; 1,72; 0,48; 1,14; Mittel: 1,67
für C_4	(3,41); (2,03); 1,24; 2,96; 0,20; 3,05; 5,32; 2,08; 2,63; 2,06; Mittel: 2,44
für C_5 (3,74); (2,29); (2,28); 4,94; 1,33; 1,18; 1,56; 2,95; 1,99; 2,13; 2,10; Mittel: 2,27	
für C_6	(2,34); 4,55); 1,92; 1,99; 0,55; 1,41; 2,03; 3,65; 2,37; 2,30; Mittel: 2,03
	Durchschnitt: 2,06

Für die Linien *D* fanden wir:

für D_1	(6,55); (3,82); 4,01; 2,65; 1,56; 2,15; 2,37; 2,14; Mittel: 2,48
für D_2	(2,66); 3,18; 2,13; 1,73; 3,59; 2,21; 2,09; 1,85; Mittel: 2,40
für D_3	2,45; 2,38; 1,66; 3,99; 2,43; 2,49; 1,62; (1,08); Mittel: 2,43
für D_4	(4,49); (3,21); 2,71; 2,21; 1,42; 4,43; 2,96; 2,93; Mittel: 2,78
für D_5	(7,82); (2,66); 3,16; 2,17; 1,38; 3,97; 5,71; 2,32; Mittel: 3,12
für D_6	(5,23); (2,37); 3,30; 2,06; 1,36; 4,19; 2,93; 1,15; Mittel: 2,50
	Durchschnitt: 2,62

Kombinieren wir die aus den Linien *C* und *D* berechneten Resultate, dann ist der Durchschnitt 2,34. Die Anordnung der Ziffern ist derart, daß mehr nach links die aus den kleineren Winkeln bei stärkerer Beleuchtung berechneten Ziffern, mehr nach rechts die aus den größeren Winkeln bei schwächerer Beleuchtung berechneten Ziffern stehen. Die Ziffern schwanken um einen Durchschnitt; doch fällt uns auf, daß für einige Linien die am weitesten nach links gestellten Ziffern sehr hoch sind. Auch bei der Betrachtung der entsprechenden Linien bemerken wir, daß ganz nach rechts eine Neigung zum horizontalen Verlaufe auftritt. Sie scheinen sich daselbst einer Grenze zu nähern. Für die Erklärung dieser verminderten Senkung kommen namentlich drei Faktoren in Betracht. An erster Stelle wird bei der zunehmenden Beleuchtung die Pupille etwas enger werden, wodurch die Lichtmenge, welche die Netzhaut erreicht, nicht mehr völlig der Beleuchtung proportional ist. An zweiter Stelle wird die Dunkeladaptation geringer

werden; die Netzhaut wird minder empfindlich und es ist also relativ etwas mehr Licht erforderlich. An dritter Stelle nähert sich der Empfindungskreis einer Grenze. Der absolute Empfindungskreis kann niemals kleiner werden als das zu der Seheinheit, dem Netzhautzapfen, gehörende Gebiet. Bei der allergünstigsten Beleuchtung fand Roelofs für sein rechtes Auge als Durchschnitt des Empfindungskreises: 50". Aber schon ehe dieses Minimum erreicht ist, bemerkt man, daß sich der Empfindungskreis einer Grenze nähert. Beim Berechnen der Durchschnittswerte haben wir diejenigen Werte ausfallen lassen, welche von kleineren Winkeln als 3' und größeren Winkeln als 3° berechnet waren. Da einige ungenaue Bestimmungen den Durchschnitt stark beeinflussen können, haben wir die Zahl a auch noch für zwei möglichst weit auseinanderliegende Punkte berechnet (doch immer von Winkeln zwischen 3' und 3°). Auf diese Resultate haben kleine Ungenauigkeiten bei der Bestimmung weniger Einfluß. Wir fanden dann:

für C_1 : $a = 2,02$	für D_1 : $a = 2,28$
für C_2 : $a = 1,82$	für D_2 : $a = 2,25$
für C_3 : $a = 1,61$	für D_3 : $a = 2,26$
für C_4 : $a = 2,49$	für D_4 : $a = 2,45$
für C_5 : $a = 2,37$	für D_5 : $a = 2,52$
für C_6 : $a = 2,01$	für D_6 : $a = 2,01$
Durchschnitt: 2,05	Durchschnitt: 2,29

Kombinieren wir wieder die Resultate von C und D , dann finden wir als Durchschnitt: 2,17. Das Resultat ist also, daß die Beleuchtung umgekehrt proportional ist der 2,34. bis 2,17. Potenz des Durchschnittes des Empfindungskreises oder aber der 1,17. bis 1,08. Potenz des Empfindungskreises selbst. Solange also der Kontrast gleichbleibt, ist der relative Empfindungskreis annähernd umgekehrt proportional der Stärke der Beleuchtung. Diese Regel ist natürlich beschränkt. Die Beleuchtung kann so gering sein, der Kontrast so schwach, daß ein Erkennen nicht mehr möglich ist; auch können die Empfindungskreise so groß werden, daß von fovealem Sehen nicht mehr gesprochen werden darf. Ebenfalls bei starker Beleuchtung und scharfen Kontrasten nähert sich der Empfindungskreis einer Grenze, da derselbe niemals kleiner werden kann als das zu einem Netzhautzapfen gehörende Gebiet.

Daß wir die Zahl a im allgemeinen etwas größer fanden als die 2, läßt sich durch zwei Momente erklären, und zwar 1. durch die engere Pupille bei stärkerer Beleuchtung, 2. durch den ungleichen Adaptationszustand.

Es ist die Frage, ob wir auch jetzt diese Regel mehr verallgemeinern können, indem wir sie folgendermaßen formulieren: Der relative

Empfindungskreis ist umgekehrt proportional dem Unterschiede zwischen den Lichtstärken von Gegenstand und Grund.

Zur Beantwortung dieser Frage haben wir den durchschnittlichen senkrechten Abstand zwischen den Linien C_1 bis C_6 und zwischen den Linien D_1 bis D_6 berechnet. Hieraus können wir leicht ableiten, wie sich bei gleicher Beleuchtung die Größen der relativen Empfindungskreise verhalten. Neben die erhaltenen Resultate haben wir die Verhältnisse der Unterschiede in Lichtstärke zwischen Gegenstand und Grund nach den verschiedenen Kontrasten gestellt. Bei diesen Berechnungen haben die Empfindungskreise, die kleiner als $3'$ und größer als 3° waren, keine Berücksichtigung gefunden.

Verglichene Kontraste	Verhältnis der Empfindungskreise	Verhältnis der Unterschiede in Lichtstärke	Verglichene Kontraste	Verhältnis der Empfindungskreise	Verhältnis der Unterschiede in Lichtstärke
$C_1 : C_2$	1 : 7,74	3,62	$D_1 : D_2$	1 : 3,84	3,62
$C_1 : C_3$	1 : 31,9	12,7	$D_1 : D_3$	1 : 11,14	12,7
$C_1 : C_4$	1 : 1,23	1,00	$D_1 : D_4$	1 : 1,11	1,00
$C_1 : C_5$	1 : 0,93	1,09	$D_1 : D_5$	1 : 1,04	1,09
$C_1 : C_6$	1 : 2,15	1,38	$D_1 : D_6$	1 : 1,65	1,38
$C_2 : C_3$	1 : 4,12	3,50	$D_2 : D_3$	1 : 2,90	3,50
$C_2 : C_4$	1 : 0,16	0,29	$D_2 : D_4$	1 : 0,29	0,29
$C_2 : C_5$	1 : 0,12	0,30	$D_2 : D_5$	1 : 0,27	0,30
$C_2 : C_6$	1 : 0,28	0,38	$D_2 : D_6$	1 : 0,43	0,38
$C_3 : C_4$	1 : 0,04	0,08	$D_3 : D_4$	1 : 0,10	0,08
$C_3 : C_5$	1 : 0,03	0,09	$D_3 : D_5$	1 : 0,09	0,09
$C_3 : C_6$	1 : 0,07	0,11	$D_3 : D_6$	1 : 0,15	0,11
$C_4 : C_5$	1 : 0,76	1,09	$D_4 : D_5$	1 : 0,93	1,09
$C_4 : C_6$	1 : 1,75	1,38	$D_4 : D_6$	1 : 1,48	1,38
$C_5 : C_6$	1 : 2,30	1,27	$D_5 : D_6$	1 : 1,59	1,27

Ebenso wie bei der kleinsten wahrnehmbaren Oberfläche sehen wir auch hier, daß die ersten, aus den Linien C berechneten Zahlen uns wenig oder gar keine Stütze für unsere Annahme bieten. Die aus den Linien D berechneten Zahlen entsprechen jedoch so vollkommen unserer Annahme, daß auch hier nicht ausschließlich an Zufall gedacht werden kann und wir also annehmen dürfen, daß innerhalb gewisser Grenzen der relative Empfindungskreis umgekehrt proportional dem Unterschied in Lichtstärke zwischen Gegenstand und Umgebung ist.

Finden wir nun, daß für den Zusammenhang zwischen Beleuchtung und relativem Empfindungskreis dieselben Regeln gelten wie für den Zusammenhang zwischen Beleuchtung und kleinster wahrnehmbarer Oberfläche, dann liegt es nahe, zu untersuchen, ob nicht das Zunehmen der Empfindungskreise völlig von dem Zunehmen der kleinsten wahrnehmbaren Oberfläche abhängig ist. In diesem Falle werden die Linien G und C und die Linien H und D ungefähr zusammenfallen. Wir haben

schon gesehen, daß die Neigung dieser Linien annähernd gleich ist und können also nunmehr für die Linien G und C verfolgen, wie sich die Beleuchtungen für eine gleiche Größe der kleinsten wahrnehmbaren Oberfläche und des Empfindungskreises verhalten müssen und für die Linien H und D , wie sich die Durchschnitte der kleinsten wahrnehmbaren Oberfläche und des Empfindungskreises bei gleicher Beleuchtung verhalten. Bei diesen Berechnungen sind wiederum Winkel, die kleiner als $3'$ und größer als 3° sind, nicht beachtet worden.

Wir fanden auf diese Weise das Folgende:

Verglichene Linien	Verhältnis der Beleuchtung	Verglichene Linien	Verhältnis der Durchschnitte
$G_1 : C_1$	0,90	$H_1 : D_1$	1,10
$G_2 : C_2$	1,02	$H_2 : D_2$	1,12
$G_3 : C_3$	1,16	$H_3 : D_3$	1,17
$G_4 : C_4$	0,42	$H_4 : D_4$	0,80
$G_5 : C_5$	0,62	$H_5 : D_5$	1,08
$G_6 : C_6$	1,39	$H_6 : D_6$	0,99
$G : C$ im Mittel	0,92	$H : D$ im Mittel	1,04

Die gefundenen Ziffern sind teils kleiner, teils größer als 1. Auch hier zeigt sich wieder, daß die Linien G und C viel weniger gute und regelmäßige Resultate ergeben, als sie Linien H und D . Die kleinste wahrnehmbare Oberfläche kann in Wirklichkeit niemals größer sein als der Empfindungskreis; denn es ist doch ausgeschlossen, daß man zwei Dinge getrennt sehen sollte, die man einzeln nicht sehen könnte. Die Ziffern über 1 können also nicht richtig sein. Dies beweist, daß die Resultate unserer Untersuchung nicht vollkommen genau sind, sondern um einen Durchschnitt schwanken. Dieser Durchschnitt ist ungefähr 1, so daß wir schließen dürfen, daß das Größerwerden des relativen Empfindungskreises bei geringerer Beleuchtung und schwächerem Kontrast von dem Größerwerden der kleinsten wahrnehmbaren Oberfläche abhängig ist. Gleichzeitig können wir hieraus schließen, daß unter minder günstiger Beleuchtung und bei schwächeren Kontrasten die scheinbare Größe der kleinsten wahrnehmbaren Oberfläche mit der wirklichen Größe übereinstimmt. Dies trifft nicht mehr zu bei guter Beleuchtung und scharfen Kontrasten; in diesem Falle ist die scheinbare Größe der kleinsten wahrnehmbaren Oberfläche größer als die wirkliche Größe, da sich der Empfindungskreis eher einer Grenze nähert.

C. Untersuchung nach der kleinsten Empfindungsbreite.

Die Resultate dieser Untersuchung können wir ebenfalls in zwei Tabellen wiedergeben.

Erforderliche Beleuchtung für die Empfindungsbreite auf 4 m Abstand:

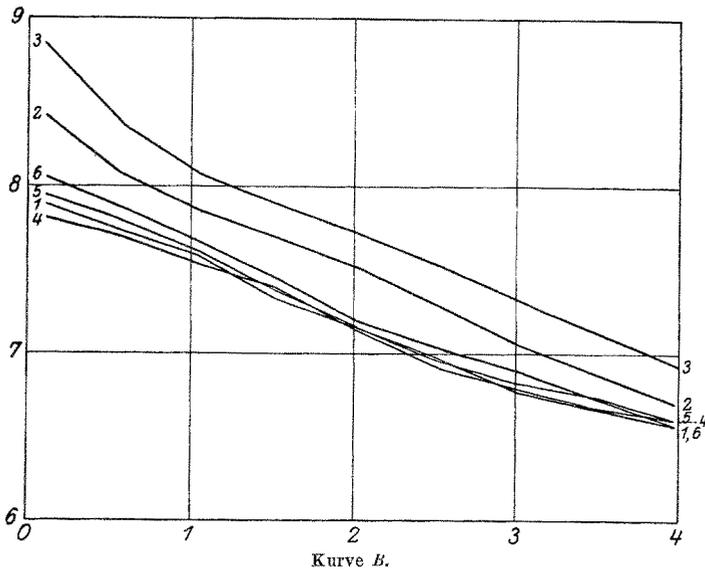
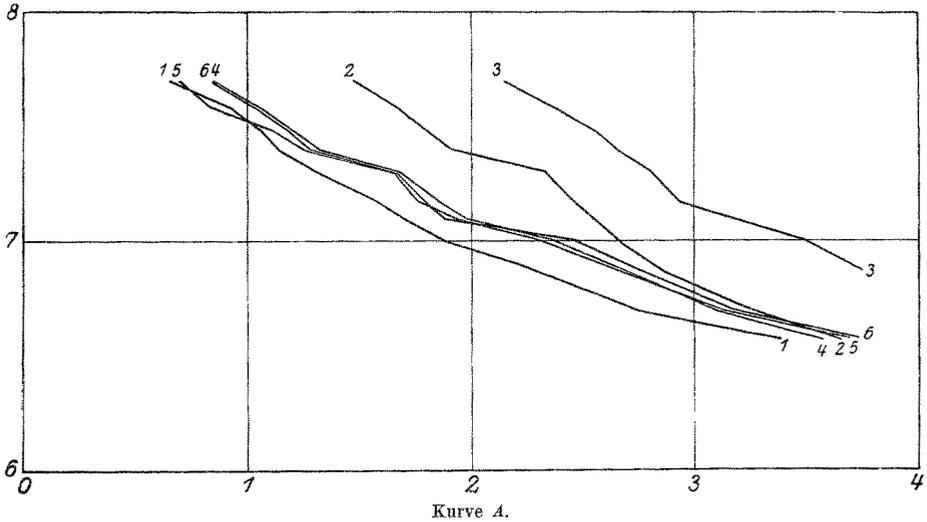
Gesehen unter einem Winkel von	Schwarzweiß A_1	Schwarz-hellgrau A_2	Schwarz-dunkelgrau A_3	Weiß-schwarz A_4	Weiß-dunkelgrau A_5	Weiß-hellgrau A_6
52''	—	—	—	—	—	—
1' 17''	2421	4419,11	—	3684,25	4800,00	5431,62
1' 43''	552,64	1801,83	—	1228,06	1286,53	1464,30
2' 35''	192,99	710,53	5579,00	479,22	458,48	552,04
3' 27''	77,13	461,99	3179,00	233,31	201,17	290,06
4' 18''	50,93	353,8	1537,00	93,72	83,98	75,83
5' 10''	38,03	286,56	859,64	70,85	58,63	62,02
6' 53''	20,02	213,45	637,43	47,99	45,96	46,18
8' 35''	13,78	82,40	456,13	21,08	17,76	19,21
10' 19''	11,77	64,97	362,57	16,40	13,23	15,49
12' 54''	8,45	47,99	242,69	11,52	7,093	11,17
17' 11''	4,48	29,65	137,43	6,99	4,98	6,79

Empfindungsbreite, gesehen unter einem Winkel von:

Beleuchtung	Schwarzweiß B_1	Schwarz-hellgrau B_2	Schwarz-dunkelgrau B_3	Weiß-schwarz B_4	Weiß-dunkelgrau B_5	Weiß-hellgrau B_6
9474	1' 16''	1' 43''	2' 56''	1' 23''	1' 24''	1' 16''
3158	1' 35''	2' 35''	4' 35''	1' 38''	1' 55''	1' 55''
1052,6	2'	3' 48''	7' 5''	2' 5''	2' 15''	2' 41''
350,88	3' 9''	6' 33''	11' 27''	2' 45''	3' 8''	3' 37''
109,41	4' 44''	10' 55''	17' 38''	4' 36''	4' 43''	5' 17''
33,96	7' 8''	16' 51''	26' 27''	8' 20''	8' 5''	9' 29''
11,32	12' 54''	24' 16''	39' 52''	11' 38''	13' 45''	15' 43''
3,77	18' 25''	40' 26''	1° 19' 23''	16' 54''	21' 29''	25' 9''
1,26	26' 58''	1° 31' 55''	4° 5' 8''	22' 11''	30' 34''	39' 17''

Die erste Tabelle gibt die geringste Beleuchtung an, welche erforderlich ist, um die Linien auf 4 m Entfernung getrennt zu sehen: die zweite Tabelle zeigt uns die kleinste Empfindungsbreite bei verschiedenen Beleuchtungen. Auch von diesen Data sind zwei graphische Darstellungen entworfen. Auf der Abszisse ist wieder der Logarithmus der Beleuchtung und auf der Ordinate der Logarithmus des Sinus des Winkels, der die kleinste Empfindungsbreite wiedergibt, abgetragen. Die erste Reihe Linien (A) gibt die in der ersten Tabelle verzeichneten Resultate wieder, die zweite Reihe Linien (B) die in der zweiten Tabelle registrierten Ergebnisse.

Bei schlechter Beleuchtung nimmt die relative kleinste Empfindungsbreite allmählich zu. Wir bekommen auch hier den Eindruck, daß diese Linien größtenteils gerade Linien sein müssen, so daß wir wiederum hätten: Beleuchtung $\times \sin.^\alpha = \text{konstant}$. Die Zahl α , das Verhältnis zwischen dem wagerechten und dem senkrechten Abstände zweier Punkte auf einer und derselben Linie, haben wir auch



jetzt von Bestimmung zu Bestimmung berechnet. Wir fanden die folgenden Ziffern.

Für die Linien A:

für A_1 (5,08); 2,57; 3,17; 1,88; 1,59; 2,23; 1,69; 0,86; 1,48; 2,21; Mittel: 1,96
 für A_2 (3,08); 2,28; 1,49; 1,21; 1,15; 1,00; 4,31; 1,29; 1,36; 1,68; Mittel: 1,75
 für A_3 (3,78); 1,94; 3,30; 3,16; 1,04; 1,52; 1,25; 1,80; 1,98; Mittel: 2,00
 für A_4 (4,53); 2,30; 2,49; 4,14; 1,52; 1,36; 3,73; 1,36; 1,58; 1,74; Mittel: 2,25
 für A_5 (4,53); 2,52; 2,85; 3,97; 1,96; 0,85; 4,31; 1,60; 2,79; 1,23; Mittel: 2,45
 für A_6 (4,51); 2,39; 2,22; 6,09; 1,09; 1,03; 3,97; 1,17; 1,46; 1,74; Mittel: 2,35

Durchschnitt: 2,13

Für die Linien *B*:

für B_1	(4,92);	4,70;	2,42;	2,86;	2,85;	1,85;	3,09;	2,87;	Mittel: 2,95
für B_2	2,69;	2,85;	2,02;	2,28;	2,70;	3,01;	2,15;	(1,33);	Mittel: 2,53
für B_3	2,46;	2,52;	2,29;	2,70;	2,93;	2,64;	1,60;	(0,97);	Mittel: 2,45
für B_4	(6,61);	4,51;	3,96;	2,27;	1,97;	3,29;	2,94;	4,03;	Mittel: 3,28
für B_5	(3,50);	6,85;	3,32;	2,85;	2,17;	2,07;	2,46;	3,11;	Mittel: 3,26
für B_6	(2,65);	3,27;	3,68;	3,07;	2,00;	2,17;	2,34;	2,66;	Mittel: 2,74
Durchschnitt: 2,87									

Kombinieren wir die aus den Linien *A* und *B* berechneten Resultate, dann ist der Durchschnitt 2,50. Obwohl die Ziffern es wahrscheinlich machen, daß die Linien, abgesehen von verschiedenen Unregelmäßigkeiten, in der Tat einen geraden Verlauf haben müssen, bemerken wir doch, daß sowohl bei den kleineren als bei den größeren Winkeln die relative kleinste Empfindungsbreite sich einer Grenze zu nähern scheint. Die Zahlen, welche aus kleineren Winkeln als $1,5'$ und größeren als $1,5^\circ$ erhalten wurden, haben wir daher für das Berechnen der Durchschnitte nicht herangezogen.

Um dem großen Einfluß einiger ungenauer Bestimmungen auf den Durchschnitt zu entgehen, haben wir die Zahl *a* auch noch für zwei möglichst weit auseinanderliegende Punkte berechnet (doch stets von Winkeln, die größer als $1'30''$ und kleiner als $1^\circ 30'$ waren). Wir fanden dann:

für A_1 : $a = 2,09$	für B_1 : $a = 2,76$
für A_2 : $a = 1,78$	für B_2 : $a = 2,48$
für A_3 : $a = 1,95$	für B_3 : $a = 2,37$
für A_4 : $a = 2,24$	für B_4 : $a = 3,00$
für A_5 : $a = 2,41$	für B_5 : $a = 2,83$
für A_6 : $a = 2,33$	für B_6 : $a = 2,59$
im Mittel $a = 2,13$	im Mittel $a = 2,67$

Kombinieren wir die Resultate aus den Linien *A* und *B*, dann beträgt der Durchschnitt 2,40.

Das Resultat ist also, daß die Beleuchtung bei unverändertem Kontrast umgekehrt proportional der 2,40. bis 2,50. Potenz der kleinsten Empfindungsbreite ist. Hierbei ist zu bemerken, daß sowohl bei starker Beleuchtung und scharfen Kontrasten als bei geringer Beleuchtung und schwachen Kontrasten sich die relativen kleinsten Empfindungsbreiten einer Grenze nähern.

Der Wert für *a* ist hier etwas höher gefunden als bei der kleinsten wahrnehmbaren Oberfläche (2,22 bis 2,39) und bei dem Empfindungskreis (2,17 bis 2,34). Der Unterschied ist aber so gering, daß wir glauben, daß auch die relative kleinste Empfindungsbreite derselben Regel folgt und daß bei gleichbleibendem Kontrast die Beleuchtung in Wirklichkeit umgekehrt proportional der 2. Potenz der relativen kleinsten Empfindungsbreite ist. Veränderung in Pupillenweite und ungleiche

Adaptation infolge der verschiedenen Beleuchtung neben dem Nähern zu einem Grenzwerte möchten wir für den Umstand verantwortlich machen, daß wir den Wert a etwas höher fanden als 2.

Diese Regel würde noch an Wahrscheinlichkeit gewinnen, wenn sich auch hier herausstellte, daß bei gleicher Beleuchtung für die verschiedenen Kontraste der Satz gälte, daß der Unterschied in Lichtstärke zwischen den Streifen und dem Grund umgekehrt proportional der 2 Potenz der dabei gefundenen relativen kleinsten Empfindungsbreite wäre. Wir können zu diesem Zweck den durchschnittlichen senkrechten Abstand zwischen den Linien A_1 bis A_6 und zwischen den Linien B_1 bis B_6 berechnen. Hieraus läßt sich direkt ableiten, wie sich bei gleicher Beleuchtung die kleinsten Empfindungsbreiten (und deren Quadrate) verhalten. Bei diesen Berechnungen sind die kleinsten Empfindungsbreiten unter $1' 30''$ und über $1^\circ 30'$ unberücksichtigt geblieben.

Verglichene Kontraste	Verhältnis der Quadrate der kleinsten Empfindungsbreiten	Verhältnis der Unterschiede in Lichtstärke	Verglichene Kontraste	Verhältnis der Quadrate der kleinsten Empfindungsbreiten	Verhältnis der Unterschiede in Lichtstärke
$A_1 : A_2$	1 : 5,62	3,62	$B_1 : B_2$	1 : 4,46	3,62
$A_1 : A_3$	1 : 24,8	12,7	$B_1 : B_3$	1 : 13,38	12,7
$A_1 : A_4$	1 : 1,80	1,00	$B_1 : B_4$	1 : 0,94	1,00
$A_1 : A_5$	1 : 1,49	1,09	$B_1 : B_5$	1 : 1,16	1,09
$A_1 : A_6$	1 : 1,76	1,38	$B_1 : B_6$	1 : 1,56	1,38
$A_2 : A_3$	1 : 4,41	3,50	$B_2 : B_3$	1 : 3,00	3,50
$A_2 : A_4$	1 : 0,32	0,29	$B_2 : B_4$	1 : 0,21	0,29
$A_2 : A_5$	1 : 0,27	0,30	$B_2 : B_5$	1 : 0,26	0,30
$A_2 : A_6$	1 : 0,31	0,38	$B_2 : B_6$	1 : 0,35	0,38
$A_3 : A_4$	1 : 0,07	0,08	$B_3 : B_4$	1 : 0,07	0,08
$A_3 : A_5$	1 : 0,06	0,09	$B_3 : B_5$	1 : 0,09	0,09
$A_3 : A_6$	1 : 0,07	0,11	$B_3 : B_6$	1 : 0,12	0,11
$A_4 : A_5$	1 : 0,83	1,09	$B_4 : B_5$	1 : 1,24	1,09
$A_4 : A_6$	1 : 0,98	1,38	$B_4 : B_6$	1 : 1,67	1,38
$A_5 : A_6$	1 : 1,18	1,27	$B_5 : B_6$	1 : 1,35	1,27

Ohne Zweifel dürfen wir aus diesen Zahlen folgern, daß die Quadrate der relativen kleinsten Empfindungsbreiten umgekehrt proportional den Unterschieden in Lichtstärke zwischen Gegenstand und Grund sind. Nicht nur sprechen hierfür die bei den Linien B , sondern auch die bei den Linien A gefundenen Zahlen. Nur ist die durch die Linie A_1 wiedergegebene kleinste Empfindungsbreite etwas zu klein und die durch die Linie A_4 wiedergegebene etwas zu groß.

Die Resultate der Untersuchung nach der relativen kleinsten Empfindungsbreite erinnern also stark an die Resultate der Untersuchung nach dem relativen Empfindungskreis, so daß wahrscheinlich ein bestimmtes Verhältnis zwischen diesen beiden Größen bestehen wird,

wenn Kontrast und Beleuchtung dieselben sind. Wir können zu diesem Zwecke die Linien B_1 bis B_6 mit den Linien D_1 bis D_6 vergleichen. Berechnen wir hieraus das durchschnittliche Verhältnis zwischen kleinster Empfindungsbreite und Durchschnitt des Empfindungskreises, dann finden wir:

- für B_1 und D_1 1 : 1,90
- für B_2 und D_2 1 : 1,68
- für B_3 und D_3 1 : 1,65
- für B_4 und D_4 1 : 1,98
- für B_5 und D_5 1 : 1,71
- für B_6 und D_6 1 : 1,84
- durchschnittlich für B und D 1 : 1,80

Die Untersuchung nach der relativen kleinsten Empfindungsbreite hat uns also gelehrt:

1. daß die relative kleinste Empfindungsbreite innerhalb weiter Grenzen umgekehrt proportional der Wurzel aus dem Unterschiede in Lichtstärke zwischen Gegenstand und Grund ist;
2. daß die relative kleinste Empfindungsbreite etwa 1,8 mal kleiner ist als der Durchschnitt des relativen Empfindungskreises unter gleichen Umständen.

Eine Erklärung für diese Tatsachen können wir noch nicht geben. Wollen wir uns nicht in allerlei Mutmaßungen vertiefen, dann wird diese Untersuchung noch durch eine neue ausgedehnte Untersuchung ergänzt werden müssen.

D. Untersuchung nach dem kleinsten wahrnehmbaren Richtungsunterschied.

Auch von dieser Untersuchung werden wir die Resultate in zwei Tabellen wiedergeben:

Erforderliche Beleuchtung für den kleinsten wahrnehmbaren Richtungsunterschied auf 4 m Entfernung.

Gesehen unter einem Winkel von	Schwarzweiß E_1	Schwarz-hellgrau E_2	Schwarz-dunkelgrau E_3	Weiß-schwarz E_4	Weiß-dunkelgrau E_5	Weiß-hellgrau E_6
26''	3663,17	—	—	6000,00	6042,14	5873,7
51''	418,13	2947,43	—	859,66	763,15	871,34
1' 17''	233,92	1248,54	8063,20	371,34	456,12	479,52
1' 43''	143,27	978,4	6000,00	233,92	304,09	342,11
2' 9''	69,27	508,8	3276,36	88,74	83,98	201,75
2' 35''	52,74	409,35	2079,00	68,82	64,51	88,06
3' 26''	40,97	295,42	1395,00	45,50	43,92	53,41
4' 18''	31,69	216,37	1209,20	39,62	35,77	46,41
5' 10''	16,60	100,00	736,83	18,91	22,65	43,45
6' 53''	12,12	62,48	555,55	10,66	12,58	17,05
8' 35''	10,06	45,05	422,97	8,20	9,56	14,64
10' 19''	7,39	29,89	251,46	5,53	6,44	9,46

Kleinster wahrnehmbarer Richtungsunterschied, gesehen unter einem Winkel von:

Beleuchtung	Schwarzweiß F_1	Schwarzhellgrau F_2	Schwarzdunkelgrau F_3	Weißschwarz F_4	Weißdunkelgrau F_5	Weißhellgrau F_6
9474	31''	41''	57''	29''	—	33''
3158	37''	51''	1' 31''	37''	48''	37''
1052,6	54''	1' 14''	2' 50''	40''	1' 26''	1' 2''
350,88	1' 16''	2' 30''	5' 34''	1' 4''	2'	1' 32''
109,41	2' 22''	5' 17''	11' 28''	2' 15''	2' 40''	2' 55''
33,96	6' 8''	10' 7''	15' 52''	6' 45''	6' 2''	7' 1''
11,32	9' 8''	11' 38''	20' 20''	8' 44''	8' 44''	13' 47''
3,77	14' 19''	15' 17''	41' 15''	22' 55''	12' 44''	22' 11''
1,26	33'	27' 30''	1° 39' 37''	35' 52''	16' 30''	50' 18''

Die erste Tabelle lehrt uns die geringste Beleuchtung kennen, die erforderlich ist, um einen bestimmten Richtungsunterschied bei den verschiedenen Kontrasten sehen zu können; die zweite Tabelle lehrt uns die kleinsten wahrnehmbaren Richtungsunterschiede für die verschiedenen Kontraste bei bestimmten Beleuchtungen kennen. Von diesen Resultaten sind zwei graphische Darstellungen entworfen. Die erste Reihe Linien (E) ist aus den Zahlen der ersten, die zweite Linienreihe (F) aus den Zahlen der zweiten Tabelle konstruiert. Auf der Abszisse ist der Logarithmus der Beleuchtung, auf der Ordinate der Logarithmus des Sinus des Winkels, unter welchem die Richtungsunterschiede gesehen wurden, abgetragen.

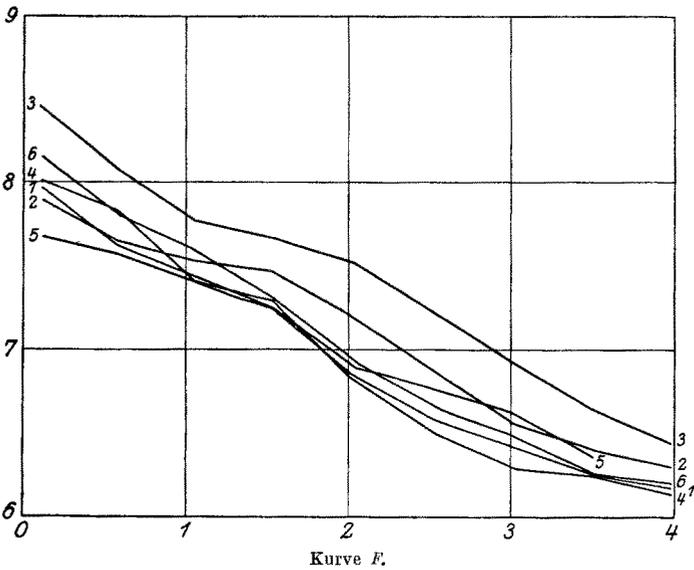
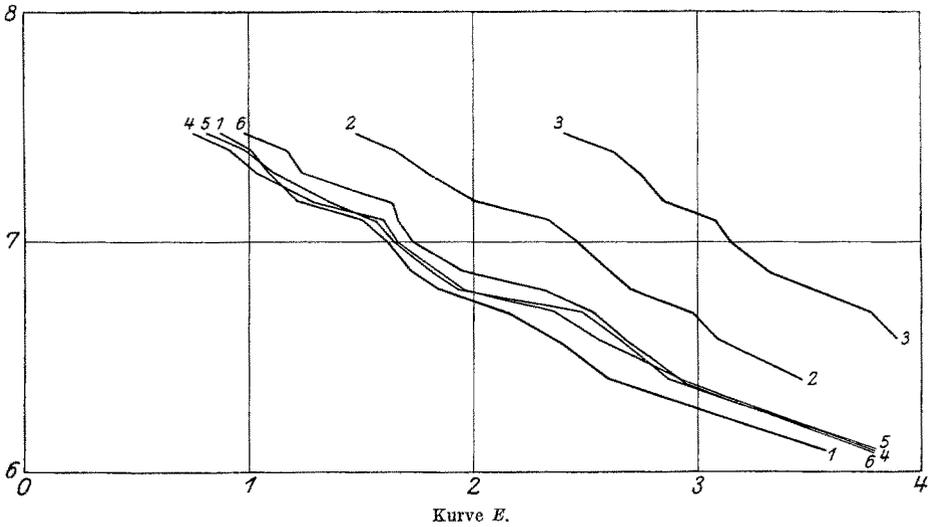
Wir sehen hieraus, daß bei stärkerer Beleuchtung und schärferen Kontrasten immer kleinere Richtungsunterschiede wahrgenommen werden können. Wir vermögen auch jetzt von Bestimmung zu Bestimmung zu verfolgen, wie sich die horizontale Verschiebung zu der vertikalen Verschiebung (Zahl a) verhält. Schwankt diese Zahl um einen Durchschnitt, dann hätten wir auch hier mit geraden Linien zu tun, bei denen die unregelmäßigen Winkel nur auf ungenauen Wahrnehmungen oder Fehlern in der Untersuchung beruhen.

Die Berechnungen ergaben die folgenden Resultate:

Für die Linien E :

für E_1 3,22; 1,41; 1,69; 3,23; 1,48; 0,89; 1,14; 3,52; 1,10; 0,84; 1,68; Mittel: 1,84
 für E_2 2,09; 0,84; 2,91; 1,18; 1,15; 1,38; 4,20; 1,64; 1,48; 2,23; Mittel: 1,91
 für E_3 1,02; 2,69; 2,48; 1,40; 0,64; 2,70; 0,90; 1,24; 2,83; Mittel: 1,78
 für E_4 2,88; 2,04; 1,59; 4,31; 1,38; 1,45; 0,61; 4,03; 2,00; 1,19; 2,14; Mittel: 2,15
 für E_5 3,07; 1,25; 1,39; 5,72; 1,44; 1,35; 0,91; 2,49; 2,05; 1,24; 2,15; Mittel: 2,10
 für E_6 2,83; 1,45; 1,16; 2,35; 4,51; 1,76; 0,62; 0,36; 3,26; 0,69; 2,37; Mittel: 1,94

Durchschnitt: 1,95



Für die Linien F :

für F_1 (6,21);	2,91;	3,21;	1,86;	1,23;	2,76;	2,45;	1,31;	Mittel: 2,25
für F_2 (5,03);	2,95;	1,55;	1,56;	1,80;	(7,87);	4,03;	1,87;	Mittel: 2,29
für F_3 2,35;	1,76;	1,63;	1,61;	3,60;	4,43;	1,55;	1,24;	Mittel: 2,27
für F_4 (4,51);	(14,09);	2,34;	1,56;	1,06;	4,26;	1,14;	2,45;	Mittel: 2,14
für F_5	1,88;	3,30;	4,05;	1,43;	2,97;	2,92;	4,23;	Mittel: 2,97
für F_6 (9,60);	2,13;	2,78;	1,81;	1,33;	1,63;	2,31;	1,34;	Mittel: 1,90

Durchschnitt: 2,30

Kombinieren wir die Ergebnisse der Linien E und F , dann ist der Durchschnitt 2,12. Die aus den Linien E erhaltenen Ziffern weichen ziemlich viel voneinander ab; indessen kann man nicht sagen, daß sie nach links oder rechts eine deutliche Neigung zeigen, höher oder niedriger zu werden. Wahrscheinlich müssen wir die Unregelmäßigkeiten einer Ungenauigkeit der Untersuchung zuschreiben. Daß die Untersuchungsmethode und die Wahl der Versuchsgegenstände besonders hier zu Ungenauigkeiten Anlaß geben können, haben wir schon bei der Beschreibung der benutzten Versuchsgegenstände bemerkt.

Die aus den Linien F erhaltenen Ziffern weichen im allgemeinen weniger voneinander ab. Zwar finden wir hier einige Ziffern, die anormal hoch sind (wir haben diese zwischen Klammern gestellt und für die Berechnung der Durchschnitte unberücksichtigt gelassen); aber wir bemerken, daß diese höheren Ziffern fast alle ganz links liegen, d. h. aus den kleineren Winkeln berechnet sind, so daß wir uns hier offenbar einer Grenze nähern. Diese Grenze liegt bei Bierens de Haan ziemlich hoch, was vielleicht eine Folge seiner leichten Myopie ist. Bei einer darauf bezüglichen Untersuchung konnte Roelofs bei sehr guter Beleuchtung und starkem Kontrast noch einen Richtungsunterschied von $6''$ wahrnehmen¹⁾. Ungeachtet aller Unregelmäßigkeiten und Ungenauigkeiten weichen doch die Durchschnittswerte nicht so stark voneinander ab und nähern sie sich wieder der Zahl 2. Wir können auch von diesen Linien die Zahl a berechnen, indem wir das Verhältnis zwischen horizontalem und vertikalem Abstand zweier auf einer und derselben Linie liegenden Punkte, welche möglichst weit auseinanderliegen, benutzen. Um dem Einfluß eines Grenzwertes zu entgehen, haben wir hierbei Winkel von weniger als $45''$ unberücksichtigt gelassen. Wir fanden dann:

für E_1 $a = 1,62$	für F_1 $a = 1,87$
für E_2 $a = 1,84$	für F_2 $a = 2,25$
für E_3 $a = 1,66$	für F_3 $a = 1,92$
für E_4 $a = 2,02$	für F_4 $a = 1,60$
für E_5 $a = 1,91$	für F_5 $a = 2,59$
für E_6 $a = 1,81$	für F_6 $a = 1,73$
im Mittel $a = 1,81$	im Mittel $a = 1,99$

Obwohl die Ziffern längst nicht so günstig stimmen wie bei den vorigen Untersuchungen, glauben wir doch wohl, folgern zu dürfen, daß bei einem und demselben Kontrast das Quadrat des kleinsten wahrnehmbaren Richtungsunterschiedes umgekehrt proportional der Beleuchtung ist.

Auch hier werden wir verfolgen, ob diese Regel einer Erweiterung

¹⁾ C. Otto Roelofs, De kleinste met het gezichtorgaan waarneembare richtingsverschillen. Ned. Tijdschr. v. Geneesk. 1918, 1e Heft, S. 1616.

fähig ist; so daß wir sagen können, daß das Quadrat des kleinsten wahrnehmbaren Richtungsunterschiedes umgekehrt proportional dem Unterschiede in Lichtstärke zwischen Gegenstand und Grund ist. Wir können zu diesem Zwecke den durchschnittlichen senkrechten Abstand zwischen den Linien E_1 bis E_6 und zwischen den Linien F_1 bis F_6 berechnen. Hieraus läßt sich folgern, wie sich bei gleicher Beleuchtung, aber ungleichen Kontrasten die kleinsten wahrnehmbaren Richtungsunterschiede verhalten.

Wir erhielten hierbei die folgenden Resultate:

Ver- glichene Kontraste	Verhältnis der Quadrate des klein- sten wahrnehmba- ren Richtungs- unterschiedes	Verhältnis der Unterschiede in Lichtstärke	Ver- glichene Kontraste	Verhältnis der Quadrate des klein- sten wahrnehmba- ren Richtungs- unterschiedes	Verhältnis der Unterschiede in Lichtstärke
$E_1 : E_2$	1 : 6,35	3,62	$F_1 : F_2$	1 : 1,96	3,62
$E_1 : E_3$	1 : 43,83	12,7	$F_1 : F_3$	1 : 8,50	12,7
$E_1 : E_4$	1 : 1,24	1,00	$F_1 : F_4$	1 : 1	1,00
$E_1 : E_5$	1 : 1,32	1,09	$F_1 : F_5$	1 : 1,11	1,09
$E_1 : E_6$	1 : 1,81	1,38	$F_1 : F_6$	1 : 1,56	1,38
$E_2 : E_3$	1 : 6,90	3,50	$F_2 : F_3$	1 : 4,34	3,50
$E_2 : E_4$	1 : 0,20	0,29	$F_2 : F_4$	1 : 0,51	0,29
$E_2 : E_5$	1 : 0,21	0,30	$F_2 : F_5$	1 : 0,57	0,30
$E_2 : E_6$	1 : 0,29	0,38	$F_2 : F_6$	1 : 0,80	0,38
$E_3 : E_4$	1 : 0,03	0,08	$F_3 : F_4$	1 : 0,12	0,08
$E_3 : E_5$	1 : 0,03	0,09	$F_3 : F_5$	1 : 0,13	0,09
$E_3 : E_6$	1 : 0,04	0,11	$F_3 : F_6$	1 : 0,18	0,11
$E_4 : E_5$	1 : 1,07	1,09	$F_4 : F_5$	1 : 1,11	1,09
$E_4 : E_6$	1 : 1,47	1,38	$F_4 : F_6$	1 : 1,56	1,38
$E_5 : E_6$	1 : 1,37	1,27	$F_5 : F_6$	1 : 1,41	1,27

Obwohl einige Ziffern durchaus nicht mit unserer Annahme im Einklange stehen, zeigen die meisten dieser Ziffern diese Übereinstimmung doch in ziemlich befriedigendem Maße. Achten wir außerdem darauf, daß es unter den Linien E namentlich die Linie E_3 und unter den Linien F ausschließlich die Linie F_2 ist, durch welche die weniger passenden Ziffern entstanden sind, dann wird die genannte Annahme wohl sehr wahrscheinlich.

In vielen Hinsichten stimmen diese Resultate also wieder mit denjenigen überein, welche bei unserer Untersuchung nach der kleinsten wahrnehmbaren Oberfläche, nach dem Empfindungskreise und nach der kleinsten Empfindungsbreite gefunden wurden. Es muß also ein bestimmtes Verhältnis zwischen diesen Größen bestehen, solange sie sich wenigstens nicht einer Grenze nähern. Wir haben daher aus den Linien H_1 bis H_6 und F_1 bis F_6 das durchschnittliche Verhältnis zwischen dem Durchschnitte der kleinsten wahrnehmbaren Oberfläche und dem kleinsten wahrnehmbaren Richtungsunterschiede berechnet, in dem

Falle, daß Kontrast und Beleuchtung gleich sind. Wir fanden dabei das Folgende:

für H_1 :	F_1	3,02
für H_2 :	F_2	4,75
für H_3 :	F_3	4,09
für H_4 :	F_4	2,51
für H_5 :	F_5	3,15
für H_6 :	F_6	2,89
durchschnittlich H :	F	3,40

Auch diese Werte weichen noch recht voneinander ab. Wir glauben, daß durch die weniger zweckmäßigen Versuchsobjekte der Winkel für den kleinsten wahrnehmbaren Richtungsunterschied oft zu groß geworden ist, und erachten es aus diesem Grunde wahrscheinlich, daß die Zahl 3,40 etwas zu klein ist.

Betrachten wir die kleinste wahrnehmbare Oberfläche, den Empfindungskreis, die kleinste Empfindungsbreite und den kleinsten wahrnehmbaren Richtungsunterschied als die Faktoren, aus welchen sich die Sehschärfe zusammensetzt, dann kommen wir beim Überblicken unserer Resultate zu dem Schlusse, daß alle diese Faktoren umgekehrt proportional der Wurzel aus der Beleuchtung sind. Hieraus folgt, daß die Sehschärfe selbst direkt proportional der Wurzel aus der Beleuchtung ist. Mit großer Wahrscheinlichkeit scheinen wir diese Regel auch bei Anwendung ungleicher Kontraste anwenden zu können, indem wir sie folgendermaßen formulieren: Die Sehschärfe ist direkt proportional der Wurzel aus dem Unterschiede in Lichtstärke zwischen Gegenstand und Grund; oder in einer Formel ausgedrückt: $S = K \sqrt{\pm(O-G)}$, in welcher Formel S = Sehschärfe, O = die Lichtstärke des Objektes, G = die Lichtstärke des Grundes und K = Konstante, bedeutet.

Daß diese Regel für verschiedene Kontraste gilt, hat uns gewiß befremdet und kann nur innerhalb beschränkter Grenzen richtig sein. Doch erinnert dieses Resultat etwas an dasjenige, welches Petró und Johansson¹⁾ erhielten, welche bei ihrer Untersuchung fanden, daß das Unterscheidungsvermögen für farblose Helligkeiten innerhalb weiter Grenzen konstant ist, wenn nur die Adaptation an die betr. Helligkeit lange genug gedauert hat. Der Umstand, daß bei größeren Lichtintensitäten ein geringerer Kontrast dieselbe Sehschärfe ergibt wie bei schwächeren Lichtintensitäten ein größerer, muß vielleicht dem Einfluß des Simultankontrastes zugeschrieben werden, der sich bei größeren Helligkeiten stärker geltend macht.

Bedingung für die Richtigkeit der genannten Regel ist, daß der Zustand des Auges unverändert bleibe, d. h. die Pupillenweite und der Adaptationszustand dürfen sich nicht ändern; wahrscheinlich ist die

¹⁾ Skandinav. Arch. f. Physiol **15**, 35.

gleiche Pupillenweite wohl die hauptsächlichste Bedingung. Auch gilt die Regel nicht mehr, wenn sich die verschiedenen Faktoren einem Grenzwerte nähern.

Wir haben hierbei daran zu denken, daß bei zunehmender Beleuchtung der Empfindungskreis und die kleinste Empfindungsbreite sich eher einer Grenze nähern als die kleinste wahrnehmbare Oberfläche und der kleinste wahrnehmbare Richtungsunterschied. Bei physiologischer Untersuchung nach der Sehschärfe wird man daher gut tun, keine Versuchsgegenstände zu wählen, welche alle diese Faktoren in sich vereinigen.

Ehe eine dieser Grenzen erreicht wird, besteht ein bestimmtes Verhältnis zwischen diesen verschiedenen Faktoren. Annäherungsweise fanden wir das Verhältnis dieser Größen ungefähr wie folgt: Empfindungskreis = kleinste wahrnehmbare Oberfläche; Durchschnitt des Empfindungskreises = etwa 2 (1,8) mal kleinste Empfindungsbreite; Durchschnitt der kleinsten wahrnehmbaren Oberfläche = etwa 4 (3,4 +) mal kleinster wahrnehmbarer Richtungsunterschied. Das Verhältnis zwischen Empfindungskreis und kleinster Empfindungsbreite bleibt auch beim Nähern einer Grenze ziemlich gut erhalten. Wahrscheinlich gibt uns dieser Umstand eine Erklärung der Tatsache, daß einige emmetrope Personen bei guter Beleuchtung eine Sehschärfe 2 haben, wenn wir die Snellenschen (Straubschen) Buchstaben benutzen. Diese Buchstaben nämlich sind mehr auf einer Untersuchung nach der kleinsten Empfindungsbreite als auf einer Untersuchung nach dem Empfindungskreis basiert. Diese letztere Größe korrespondiert mit dem Netzhautzapfen, den Snellen beim Angeben der Sehschärfe vor Augen hatte.

Der Nachteil der mitgeteilten Resultate ist zweifelsohne, daß ihnen die Untersuchung nur eines Auges einer einzigen Person zugrunde liegt. Indessen erfordert eine solche Untersuchung so viel Zeit und Geduld, daß man nicht leicht dazu kommt, sie noch einmal zu wiederholen. Dies möge zugleich als Entschuldigung gelten für den Umstand, daß wir die Untersuchung nach dem kleinsten wahrnehmbaren Richtungsunterschied nicht wiederholt haben, wenn sich auch herausstellte, daß das Versuchsobjekt weiterer Verbesserung fähig war.

Glücklicherweise war eine Untersuchung über Sehschärfe und Beleuchtung auch schon von andern ausgeführt und publiziert worden. An erster Stelle denken wir hierbei an die Untersuchung unserer Landgenossen P i e k e m a und L a a n, die uns darum so besonders willkommen ist, weil es ihnen nicht gelungen war, irgendeine Verbindung zwischen Sehschärfe und Beleuchtung zu finden, wodurch natürlich der Gedanke an irgendwelchen Einfluß durch Voreingenommenheit gleichzeitig ausgeschlossen ist. In nachstehender Tabelle haben wir nebeneinander-

gestellt: in der ersten Reihe die Beleuchtung, in der zweiten Reihe die Sehschärfe Piekemas bei dieser Beleuchtung, in der dritten Reihe das Verhältnis zwischen der Sehschärfe Piekemas und der Wurzel aus der Beleuchtung, in der vierten Reihe die Sehschärfe Laans und in der fünften Reihe das Verhältnis zwischen der Sehschärfe Laans und der Wurzel aus der Beleuchtung.

Beleuchtung in Normal- kerzen	Sehschärfe Piekemas	Verhältnis zwischen Sehschärfe P's und $\sqrt{\text{Beleuchtung}}$	Sehschärfe Laans	Verhältnis zwischen Sehschärfe L's und $\sqrt{\text{Beleuchtung}}$
0,040	0,22	1,10	0,37	1,85
0,046	0,24	1,12	0,39	1,82
0,052	0,24	1,05	0,44	1,93
0,059	0,27	1,11	0,46	1,89
0,079	0,29	1,03	0,55	1,96
0,092	0,345	1,14	0,61	2,01
0,104	0,35	1,09	0,64	1,98
0,117	0,39	1,14	0,70	2,05
0,133	0,40	1,10	0,71	1,95
0,160	0,43	1,08	0,75	1,88
0,180	0,46	1,08	0,78	1,84
0,21	0,51	1,11	0,82	1,79
0,25	0,51	1,02	0,85	1,70
0,30	0,53	0,97	0,92	1,68
0,37	0,54	0,89	0,97	1,59
0,47	0,61	0,89	1,05	1,53
0,61	0,65	0,83	1,17	1,50
0,83	0,69	0,76	1,22	1,34
1,20	0,77	0,70	1,40	1,28
1,88	0,81	0,59	1,43	1,04
3,33	0,87	0,48	1,6	0,88
7,5	0,96	0,35	1,8	0,68
30	1,15	0,21	2	0,37

Diese Übersicht lehrt uns, daß, solange die Beleuchtung schwächer ist als 0,25 Normalkerzen, das Verhältnis zwischen der Sehschärfe und der Wurzel aus der Beleuchtung in der Tat um einen Durchschnitt schwankt. Dieser Durchschnitt beträgt für Piekema 1,09 und für Laan 1,90. Es ist wohl merkwürdig, daß sich diese Konstanten für Piekema und Laan verhalten, wie die maximale Sehschärfe, welche von jedem von ihnen erreicht wurde.

Wird die Lichtstärke größer als 0,25 Normalkerzen, dann wird das Verhältnis allmählich kleiner. Worin liegt die Ursache hierfür?

In erster Linie ist es möglich, daß die von uns gefundene Regel für diese stärkere Beleuchtung nicht mehr gilt. Aber andererseits denken wir auch an die drei Faktoren, die schon wiederholt von uns als die Ursache eines andern Verhältnisses bei stärkerer Beleuchtung

angegeben sind, nämlich 1. Verengung der Pupille, 2. veränderter Adaptationszustand, 3. die Annäherung an einen Grenzwert.

Gerne machen wir daher Gebrauch von einer zweiten Reihe Untersuchungen Piekemas, wo er neben der Beleuchtung die Sehschärfe mit unbewaffnetem Auge und die Sehschärfe beim Sehen durch eine kleine Öffnung, wodurch der Einfluß einer Pupillenveränderung ausgeschlossen ist, angibt. In der folgenden Tabelle finden wir dann wieder in der ersten Reihe die Beleuchtung in Normalkerzen, in der zweiten Reihe die Sehschärfe mit bloßem Auge, in der dritten das Verhältnis zwischen dieser Sehschärfe und der Wurzel aus der Beleuchtung, in der vierten die Sehschärfe bei Sehen durch das Diaphragma, und in der fünften das Verhältnis dieser letzteren Sehschärfe zu der Wurzel aus der Beleuchtung.

Beleuchtung in Normalkerzen	Sehschärfe ohne Diaphragma	Verhältnis zwischen Sehschärfe und $\sqrt{\text{Beleuchtung}}$	Sehschärfe mit Diaphragma	Verhältnis zwischen Sehschärfe und $\sqrt{\text{Beleuchtung}}$
0,000061	0,004	0,51	—	—
0,000122	0,014	1,27	—	—
0,000244	0,02	1,28	0,006	0,38
0,000488	0,026	1,18	0,004	0,18
0,000977	0,039	1,25	0,014	0,45
0,00195	0,056	1,27	0,028	0,63
0,0039	0,078	1,25	0,040	0,64
0,0078	0,093	1,05	0,045	0,51
0,0156	0,116	0,93	0,064	0,51
0,0313	0,185	1,05	0,082	0,46
0,0625	0,258	1,03	0,096	0,38
0,125	0,35	0,99	0,187	0,53
0,250	0,50	1,00	0,25	0,50
0,5	0,69	0,98	0,48	0,68
1	0,82	0,82	0,62	0,62
2	1,13	0,80	0,83	0,59

Aus dieser Tabelle geht hervor, daß das Verhältnis zwischen der Sehschärfe ohne Diaphragma und der Wurzel aus der Beleuchtung bei stärkerer Beleuchtung wieder allmählich sinkt. Aber zugleich zeigt sich, daß das Verhältnis zwischen der Sehschärfe mit Diaphragma und der Wurzel aus der Sehschärfe nicht sinkt, sondern um einen Durchschnitt schwanken bleibt. Zwar finden sich hier einige weniger günstige Ziffern, aber diese können sehr wohl durch Benutzung des Diaphragmas entstanden sein.

Durch das Resultat dieser Untersuchung kommen wir schon sehr stark unter den Eindruck, daß das Sinken des Verhältnisses bei stärkerer Beleuchtung besonders durch das Engerwerden der Pupille verursacht wird. Man könnte hiergegen anführen, daß bei Anwendung des Diaphragmas die Grenze der Sehschärfe nicht erreicht wurde. Letzteres

ist richtig; aber doch wird eine Sehschärfe von 0,83 erzielt, und hierbei war ohne Diaphragma schon deutlich ein Sinken des Verhältnisses zwischen Sehschärfe und Wurzel aus der Beleuchtung merkbar.

Ein anderer Untersucher, der sich mit diesen Problemen beschäftigt hat, ist König. Er gelangte zu der Formel $S = a (\text{Log } B - \text{Log } C)$. Das a in dieser Formel soll eine konstante Zahl sein, doch verschieden für das Sehen mit den Stäbchen und das Sehen mit den Zapfen. Für das Sehen mit den Stäbchen soll diese Zahl $a = 0,0414$ sein und für das Sehen mit den Zapfen 0,434. Aus zwei Bestimmungen können wir durch Elimination von $\text{Log } C$ a berechnen. In nachstehender Tabelle habe ich einige Ziffern von König übernommen. In der ersten Reihe findet man die Nummer seiner Bestimmung; hieraus geht hervor, daß ich sehr regelmäßig jedesmal vier Bestimmungen überschlagen habe. Weiter als Nummer 81 bin ich nicht gegangen, weil hierbei schon eine Sehschärfe = 1 erreicht war. In der zweiten Reihe steht die Beleuchtung in von König benutzten Einheiten (Hefner-Lampe auf 1 m Abstand) ausgedrückt, in der dritten Reihe die Sehschärfe, in der vierten das Verhältnis zwischen Sehschärfe und der Wurzel aus der Beleuchtung und in der fünften die Konstante a aus der Formel Königs, jedesmal aus zwei der verzeichneten Bestimmungen berechnet.

Nr.	Beleuchtung	Sehschärfe	Verhältnis zwischen Sehschärfe und $\sqrt{\text{Beleuchtung}}$	a
1	0,00036	0,031	1,63	
6	0,00087	0,055	1,86	0,0626
11	0,0034	0,062	1,06	0,0118
16	0,0091	0,096	1,01	0,0795
21	0,032	0,123	0,69	0,0494
26	0,068	0,154	0,59	0,095
31	0,15	0,205	0,53	0,148
36	0,20	0,231	0,52	0,208
41	0,24	0,269	0,55	0,48
46	0,36	0,338	0,56	0,39
51	0,44	0,400	0,60	0,71
56	0,88	0,558	0,59	0,52
61	1,03	0,558	0,55	0,00
66	1,38	0,577	0,49	0,149
71	2,28	0,923	0,61	0,159
76	6,06	0,846	0,34	0,181
81	13,6	1,000	0,27	0,44

Betrachten wir die Ziffern aus der vierten Reihe, dann sehen wir, daß diese recht befriedigend um einen Durchschnitt schwanken. Nur sind die obersten Ziffern zu hoch und die untersten etwas zu niedrig. Wie wir uns diese Abweichung erklären, haben wir schon mehrmals auseinandergesetzt. Betrachten wir danach die Ziffern in der fünften

Reihe, dann kostet es uns Mühe, anzunehmen, daß wir hier mit einer Konstanten oder, wie König glaubt, mit zwei Konstanten (eine für die schlechte Beleuchtung, Stäbchen-Sehschärfe, und eine für die bessere Beleuchtung, Zapfen-Sehschärfe) zu tun zu haben. Vielmehr bemerken wir, daß die berechnete Zahl a mit großen Schwankungen erst allmählich zunimmt und darauf zu sinken beginnt; ein größeres Gebiet, in welchem diese Zahl annähernd konstant bleibt, können wir hierin nicht sehen. Gewiß kann eine graphische Darstellung unserm Gedankengange eine Richtung anweisen; aber hieraus ein Gesetz abzuleiten, ohne die Zahlen einzeln einmal etwas genauer zu betrachten scheint uns ein gefährliches Unterfangen. Ebenso wenig können wir in den Resultaten Königs eine Stütze für die Duplizitätstheorie finden. Auch in dieser Hinsicht hat u. E. die Weise, in welcher die Kurven konstruiert sind, irreführend gewirkt. Wir sind uns vollkommen bewußt, daß auch unsere Bestimmungen längst nicht immer befriedigende Resultate ergaben, die Untersuchung ist eben außerordentlich subtil, infolge des Umstandes, daß viele Faktoren einen störenden Einfluß ausüben können.

Vorläufig sind wir aber der Meinung, daß der von uns gefundene Zusammenhang zwischen Sehschärfe und Beleuchtung besser als irgend-eine andere Hypothese mit den nicht allein von uns, sondern auch von andern erhaltenen Resultaten im Einklange steht. Hiermit haben wir also die Resultate Manolescus bestätigt. Dieser fand, daß das Produkt der Entfernung vom Licht mit der größten Entfernung, auf welcher seine Kreise und Linien erkannt wurden, eine konstante Größe bildeten, was besagen will, daß der minimale Gesichtswinkel umgekehrt proportional der Wurzel aus der Beleuchtung ist oder aber die Sehschärfe direkt proportional der Wurzel aus der Beleuchtung.