

# Über die kleinsten wahrnehmbaren Gesichtswinkel in den verschiedenen Teilen des Spektrums.

Von

Dr. W. UHTHOFF,  
Privatdocent in Berlin.

Über die Grenzen der Wahrnehmbarkeit kleinster Objekte, resp. den kleinsten Gesichtswinkel, unter welchem das normale menschliche Auge noch erkennt, liegen eine Reihe von Untersuchungen früherer Beobachter vor. Wenn wir von der frühern Diskussion der Frage, unter einem wie kleinem Gesichtswinkel 2 Sterne voneinander differenziert werden können (HOOKE, MAEDLER, HUMBOLDT, AUBERT, MAUTHNER u. a.) absehen, da Sterne, wie MAUTHNER sehr richtig betont, aus verschiedenen Gründen sehr ungeeignete Objekte zur Feststellung des kleinsten Gesichtswinkels für das normale Auge sind und gewöhnlich viel zu große Werte liefern, so beginnen auch hier wieder die maßgebenden Experimente mit günstigeren Prüfungsobjekten mit den Untersuchungen von TOBIAS MAYER (*Commentar Soc. reg. Scientiar. Goettingens.* Tom. IV. 1754). Er benutzte schwarze parallele Linien auf weißem Grunde, weiße Quadrate durch ein schwarzes Gitter getrennt, und weiße und schwarze Vierecke im Schachbrettmuster miteinander wechselnd. Hieran schlossen sich die Untersuchungen von HUECK („Über die Grenzen des Sehvermögens“, *Müllers Arch.* 1840) mit schwarzen Punkten auf weißem Grunde, von A. W. VOLKMANN („Sehen“, *Wagners Handwörterbuch der Physiologie*, Bd. III., pag. 329, 1846) mit 2 Spinnwebfäden, von E. H. WEBER („Über den Raumsinn und die Empfindungskreise in der Haut und im Auge“, *Berichte über die Verhandlungen der Königl. Sächs. Gesellsch. der*

*Wissensch. zu Leipzig*, mathemat.-physikal. Klasse, 1852), wo TH. WEBER und mehrere andere Untersuchungen mit parallelen schwarzen Linien mit gleich breiten weissen Zwischenräumen anstellten, von C. BERGMANN („*Anatomisches und Physiologisches über die Netzhaut des Auges*“, *Zeitschr. für rat. Medic. von Henle und Pfeuffer*, 3. Reihe, Bd. II., 1858, pag. 83—108) mit parallelen Linien mit gleichbreiten Zwischenräumen, von HELMHOLTZ („*Physiol. Optik*“, I. Auflage), von HIRSCHMANN (dito), mit feinem Drahtgitter, Drähte und Zwischenräume gleich breit, von AUBERT („*Physiol. Optik*“, *Handb. d. ges. Augenheilk. von Graefe und Saemisch*) für weisse und schwarze Quadrate, von C. DU BOIS-REYMOND („*Scheinheit und kleinster Schwinkel*“, *v. Graefes Arch. XXXII.*, Heft 3. 1886) mit siebförmig, regelmässig durchlöchertem Stanniolblatt von WERTHHEIM („*Über die Zahl der Scheinheiten im mittleren Teile der Netzhaut*“, *v. Graefes Arch. f. Ophthalm.*, XXXIII., Abt. 2). Derselbe benutzte die analoge Untersuchungsvorrichtung wie C. DU BOIS-REYMOND, prüfte auch excentrische Netzhautpartien und ebenso in verschiedenfarbigem, wenn auch nicht spektralem Lichte. Die Resultate dieser Untersuchungen finden sich zum grossen Teil tabellarisch geordnet in der 2. Auflage von *Helmholtz' Physiol. Optik* zusammengestellt und ergeben abgesehen von einigen Versuchsergebnissen doch im ganzen übereinstimmende, wenn auch je nach der individuellen Beschaffenheit des untersuchten normalen Auges, etwas voneinander abweichende Resultate. Auch die Rückschlüsse verschiedener Autoren aus diesen Versuchen auf die Zahl und Grösse der Zapfen im Netzhautcentrum stehen in ziemlichem Einklang mit den anatomischen Untersuchungen über die Grösse der perzipierenden Elemente (KOELLIKER, M. SCHULTZE, H. MÜLLER, WELCKER u. a.) und über die Anzahl derselben in der Netzhautgrube (F. SALZER: *Sitz-Bericht d. K. Akadem. d. Wissensch. in Wien*, LXXXI., 3. Abt. 1880, Januarheft.).

In Anschluß nun an meine früheren Untersuchungen über das Verhalten der Sehschärfe bei verschiedenen Beleuchtungsintensitäten und den verschiedenen Wellenlängen im Spektrum (*v. Graefes Arch. f. Ophthalm.*, XXXII. pag. 171 u. XXXVI., Heft 1) trat an mich noch die Aufgabe heran, mit möglichster Schärfe den kleinsten Gesichtswinkel in den verschiedenen Teilen des Spektrums zu bestimmen und diese Werte unter-

einander zu vergleichen, Versuche, die bis dahin im reinen spektralen monochromatischen Lichte noch nicht ausgeführt worden waren. Die Prüfung mit den früher benutzten SNELLENschen Haken schien für diesen speciellen Zweck nicht ganz auszureichen. Nach Vorschlag von Prof. KOENIG, der mich auch bei diesen Versuchen in gütigster Weise unterstützte, wurde von dem Mechaniker NOEHDEN im physikalischen Institut ein ganz feines Drahtgitter angefertigt, in welchem die einzelnen feinen Drähte genau um ihre Dicke auseinander standen. Es wurde dies in der Weise erreicht, daß 2 ganz gleich starke Drähte nebeneinander aufgewickelt wurden, worauf dann später der eine wieder abgerollt ward. Die Messung mit der Teilmaschine, welche Prof. KOENIG ausführte, ergab für den einzelnen Draht und Zwischenraum ein Durchschnittsmaß von 0,0463 mm und von der Mittellinie eines Drahtes bis zur Mittellinie des anderen gerechnet, also eine Entfernung von 0,0926 mm. Die Versuchsanordnung war im übrigen eine analoge wie die in meiner letzten Arbeit (*v. Graefes Arch. f. Ophthalm.* XXXVI., pag. 37) abgebildete. Vermittelt eines großen mit zimmtsäurem Äthyläther gefüllten Prismas und Linsen von entsprechender Größe wurde ein Spektrum von etwas mehr als 20 cm Länge erzeugt. In der Ebene dieses Spektrums befand sich ein verschiebbarer Metallschirm mit einer ungefähr 3 mm im Durchmesser enthaltenden Öffnung. Dem durch die Öffnung hindurch blickenden Beobachter erschien dann die Prismenfläche in derjenigen Spektralfarbe leuchtend, welche dem auf die Öffnung fallenden Spektralteil entsprach. Auf einer Schnurbahn konnte zwischen Auge und Prisma das oben beschriebene Gitter entfernt und genähert werden. So war es also möglich, in einem rein monochromatisch spektral erleuchteten größeren Felde den kleinsten Gesichtswinkel für die Stäbe und Zwischenräume des Gitters aufzufinden. Im ganzen wurden bei 7 verschiedenen Wellenlängen des Spektrums auf diese Weise die größtmöglichen Sehschärfen festgestellt sowohl für das Auge von Prof. KOENIG als für mein eigenes, natürlich mit jedesmaliger genauer Korrektion des Auges. Die Helligkeit wurde so gewählt, daß bei einer weitem Steigerung derselben keine Verminderung des kleinsten wahrnehmbaren Gesichtswinkels eintrat, wovon wir uns jedesmal durch den direkten Versuch überzeugten. Um diese Intensität zu erzeugen, mußte für die Wellenlängen

670, 535, 505, 430, 470  $\mu\mu$  Zirkonlicht, für 605 und 575  $\mu\mu$  konnte jedoch Gaslicht verwendet werden.

Die Resultate waren folgende (unter Annahme der Netzhautknotenpunkt-Distanz = 14,85 mm):

**KOENIG:**

Wellenlänge	Entfern. d. Untersuch. v. Gitter	Gesichtswinkel für 1 Draht	Netzhautbildgröße v. 1 Draht	Netzhautbildg. v. 1 Draht u. 1 Zwischenraum
670 $\mu\mu$	300,6 mm	31,7 "	0,0023 mm	0,0046 mm
605 "	285,0 "	33,5 "	0,0024 "	0,0048 "
575 "	285,8 "	33,4 "	0,0024 "	0,0048 "
535 "	293,8 "	32,6 "	0,0023 "	0,0046 "
505 "	290,4 "	32,8 "	0,0023 "	0,0046 "
470 "	293,4 "	32,5 "	0,0023 "	0,0046 "
430 "	285,8 "	33,4 "	0,0024 "	0,0048 "

**UHTHOFF:**

670 $\mu\mu$	337,6 mm	28,2 "	0,0022 mm	0,0044 mm
605 "	358,6 "	26,6 "	0,0019 "	0,0038 "
575 "	358,8 "	26,6 "	0,0019 "	0,0038 "
535 "	340,8 "	28,8 "	0,0020 "	0,0040 "
505 "	342,8 "	27,8 "	0,0020 "	0,0040 "
470 "	343,0 "	27,8 "	0,0020 "	0,0040 "
430 "	337,4 "	28,3 "	0,0020 "	0,0040 "

Der Durchschnittswert des kleinsten Gesichtswinkels resp. des kleinsten Netzhautbildes von 1 Draht oder 1 Zwischenraum beträgt somit:

**KOENIG:**

kleinst. Gesichtsw. = 32,8 " = kleinst. Netzhb. = 0,00234 mm

**UHTHOFF:**

kleinst. " = 27,6 " = " " = 0,002 "

Aus den obigen Tabellen ergibt sich zunächst, daß der kleinste Gesichtswinkel resp. die größte erreichbare Sehschärfe in den verschiedenen Teilen des Spektrum im wesentlichen dieselbe ist, sobald es nur gelingt, ein hinreichend helles spektrales monochromatisches Feld herzustellen. Nur die Zahlen bei Wellenlänge 605 und 575  $\mu\mu$  weichen sowohl bei KOENIG als bei mir etwas von den übrigen ab, und zwar sind sie bei KOENIG etwas kleiner, bei mir etwas größer als die andern. Es erklärt sich diese kleine Abweichung der Resultate wohl daraus, daß sie an einem andern Tage gewonnen wurden. Im übrigen also bestätigen auch diese Gitterversuche meine früher mit den SNELLENSCHEN Haken im spektralen Licht ge-

wonnenen Ergebnisse über die Höhe der erreichbaren Sehschärfe in den verschiedenen Teilen des Spektrums. Ich erinnere hier auch an die Angaben WERTHHEIMS (l. c.), der ebenfalls einzelne Versuche über die größtmögliche Sehschärfe im farbigen Licht (farbige Gläser) angestellt hat und kurz anführt, daß im roten und grünen Licht die Sehschärfe im wesentlichen dieselbe sei, wie für gemischtes Licht; für Blau dies nachzuweisen, war ihm jedoch nicht möglich, da ihm kein geeignetes homogenes Glas zur Verfügung stand.

Wenn ich mich den Ausführungen von v. HELMHOLTZ anschliesse und nicht den Abstand 2 Drähte resp. die Dicke 1 Drahtes als kleinstes Objekt rechne, sondern die Breite eines Drahtes und eines Zwischenraumes zusammen genommen, so beträgt für KOENIG der kleinste Gesichtswinkel 65,6 Sekunden, die dazu gehörige Netzhautbildgröße 0,00468 mm, und für mein eigenes Auge Gesichtswinkel = 55,2 Sekunden und dazu gehörige Netzhautbildgröße = 0,004 mm. Hierbei ist zu bemerken, daß bei Prof. KOENIG mit einer Myopie von 10 D die Netzhautknotenpunktdistanz wohl ziemlich sicher größer als der in Rechnung gezogene Wert ist. Wir können daraus nach v. HELMHOLTZ den Schluß ziehen, daß der Durchmesser der percipierenden Elemente in der Netzhautgrube jedenfalls nicht kleiner als 0,00234 mm und nicht größer als 0,00468 mm für KOENIG ist, und für mich zwischen 0,002 mm und 0,004 mm liegt; denn der kleinste erkennbare Abstand zwischen den einander zugekehrten Rändern zweier Drähte beträgt = 0,00234 mm (KOENIG) und 0,002 mm (UHTHOFF); würde der Durchmesser eines percipierenden Elementes noch kleiner sein, so müßte auch ein noch kleinerer Abstand von einem normalen Auge erkannt werden, da wir annehmen können, daß jedenfalls nicht mehr als 1 percipierendes Element von dem Bilde eines Stäbchens gedeckt zu sein braucht, um denselben als schwarzen Zwischenraum empfinden zu lassen. Auf der andern Seite aber liegt auf der Hand, daß der Durchmesser des percipierenden Elementes größer sein kann, als das kleinste Netzhautbild eines einzelnen Drahtes; denn, selbst wenn die Oberfläche des percipierenden Elementes noch aus dem dunklen Bilde eines Drahtes in die benachbarten hellen Bilder der angrenzenden Zwischenräume hineinragt, so wird doch noch eine Empfindung einer lichtleeren Lücke ausgelöst werden, so lange das be-

treffende Element weniger Licht als seine Nachbarn erhält; erst wenn es ebenso viel Licht von den Bildern der angrenzenden hellen Zwischenräume erhält wie die Nachbarn, muß die Unterscheidung des Objektes als Gitter aufhören. Darum führte v. HELMHOLTZ das Bild von der Mittellinie eines Drahtes resp. eines Zwischenraumes bis zur Mittellinie des benachbarten als das kleinste Netzhautbild ein und rechnete auch in seiner aufgestellten Tabelle in diesem Sinne die Resultate früherer Untersucher um. Es ergibt sich also in ziemlicher Übereinstimmung mit frühern Untersuchern, daß ungefähr ein Gesichtswinkel von 1 Minute der kleinste war, unter welchem noch erkannt wurde, in den verschiedenen Teilen des Spektrums bei KOENIG etwas größer, 65,6 Sekunden, bei mir etwas kleiner, 55,2 Sekunden. — Daß die von VOLKMANN für den Raumsinn gewonnenen Werte so niedrig ausfielen (Gesichtswinkel 147,5''), liegt wohl zum Teil, wie schon E. H. WEBER in seiner Abhandlung hervorhebt, daran, „daß die Spinnwebfäden verhältnismäßig zu ihrer eignen Dicke weitläufig lagen, denn unter diesen Umständen sind wohl die Zwischenräume groß genug, um sie aus größerer Entfernung als die hier angewendete noch wahrzunehmen, aber die Fäden sind zu dünn, um sie in einer solchen Entfernung zu sehen.“ Übrigens erzielte ein zweiter Untersucher mit denselben Spinnwebfäden VOLKMANNs einen erheblich kleineren Gesichtswinkel (80,4''). Auf die von VOLKMANN besonders betonten Irradiationserscheinungen bei Anwendung von Gittern und Liniensystemen ist bei unsern Untersuchungen, ebenso wie auch von den meisten andern Untersuchern keine besondere Rücksicht genommen. Im übrigen glaube ich, daß unsere Versuchsanordnung für die Auffindung des kleinsten Gesichtswinkels in den verschiedenen Teilen des Spektrums eine zweckmäßige war, und daß dadurch auch möglichst die von AUBERT so mit Recht hervorgehobenen Übelstände bei derartigen Versuchen vermieden waren.

---