

Die Augenempfindlichkeit im Ultrarot.

Von Fr. Fischer und B. Gudden.¹⁾

Eigene frühere überschlägige Bestimmungen der Augenempfindlichkeit im kurzwelligen Ultrarot werden mitgeteilt und mit genaueren Untersuchungen *Goodeves* verglichen. Übereinstimmung besteht darin, daß auch die Wellenlänge $0,9 \mu$ noch wahrgenommen wird, doch bestehen gewisse Widersprüche im spektralen Verlauf der Empfindlichkeitskurve und im Absolutwert der Schwellenintensität bei den längsten Wellen.

1. Im Schrifttum wird im allgemeinen angegeben, daß sich die Augenempfindlichkeit nach langen Wellen bis etwa $0,8 \mu$ erstreckt. Die Lehr- und Handbücher enthalten zahlenmäßige Angaben über die relative Empfindlichkeit bis $0,77 \mu$. Wir hatten nun vor einigen Jahren für unseren eigenen Gebrauch bei Prüfung von Schwarzglasfiltern Messungen über die Ultrarotempfindlichkeit des menschlichen Auges angestellt; sie wurden nicht veröffentlicht, weil sie uns nicht genügend umfassend erschienen. Inzwischen ist uns eine umfangreiche Untersuchung von *Goodeve*²⁾ bekannt geworden, in der u. a. die Schwellwertenergie bis $0,9 \mu$ ermittelt ist. Unsere eigenen Messungen stimmen mit *Goodeves* darin überein, daß das menschliche Auge auch Wellenlängen von $0,9 \mu$ noch wahrnehmen kann, aber der Verlauf der von uns bestimmten Empfindlichkeitskurve weicht doch stärker von *Goodeves* Kurve ab, als wir nach unserer Fehlerschätzung für zulässig halten. Wir glauben daher, daß die nachträgliche Veröffentlichung unserer überschlägigen Messungen gerechtfertigt erscheint, um eine Überprüfung beider Ergebnisse anzuregen.

2. Meßanordnung.

Vorversuche hatten gezeigt, daß der Farbeindruck sich oberhalb $0,65 \mu$ nicht mehr ändert; daher entfielen die bekannten Schwierigkeiten der heterochromatischen Photometrie. Wir

1) Vorgetragen in der Sitzung vom 12. April 1938.

2) C. F. *Goodeve*, *Proceed. Roy. Soc.* **155**, 664, 1936.

konnten den subjektiven Helligkeitsvergleich in einfacher Weise mit einem Lummer-Brodhuhn-Würfel vornehmen. Das Infeld des Würfels, das dem Auge unter einem Winkel von nicht ganz 2° erschien, wurde von dem zu untersuchenden Licht verschiedener Wellenlänge und regelbarer Intensität erhellt; das Umfeld von dem nach Wellenlänge und Intensität konstanten Vergleichslicht gleichen Farbtons. Um unvermeidliche Intensitätsschwankungen des benutzten Bogenlampenlichtes auszuschalten, stammten Meß- und Vergleichslicht von derselben Lichtquelle. Abb. 1.

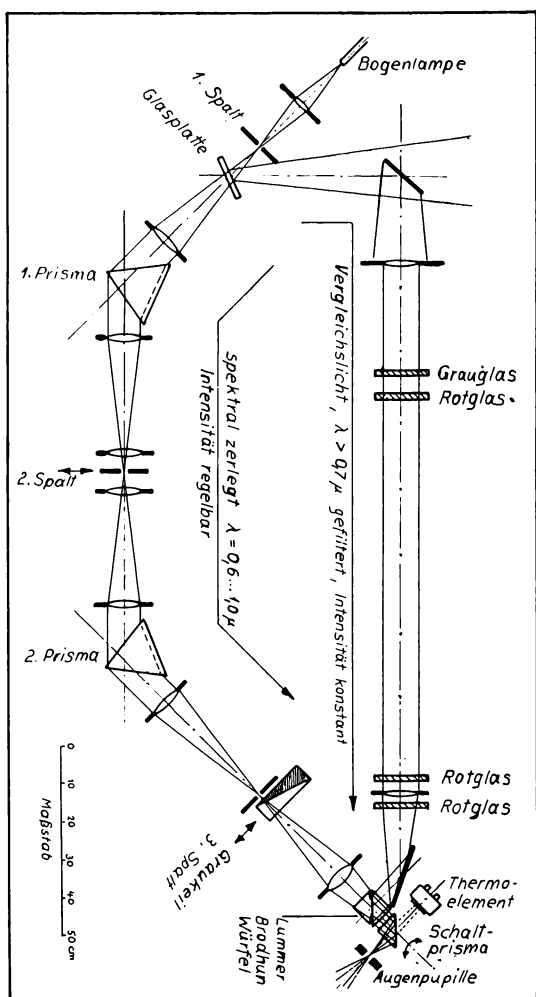


Abb. 1.
Aufbau zur Messung der Augenempfindlichkeit.

Das Meßlicht wurde mit Doppelmonochromator ausgesondert; bei der verwendeten Spaltbreite von 0,2 mm umfaßte der jeweils ausgesonderte Wellenlängenbereich rund 20 μ .

Völlige Freiheit von allem falschen Licht folgte u. a. daraus, daß das beleuchtete Infeld beim Übergang zu immer längeren Wellen völlig dunkel wurde, ohne daß die rote Farbe vorher in grau umschlug. Nach unbefriedigenden Vorversuchen mit Netzblenden und geschwärzten photographischen Platten schwächten wir das Meßlicht mit einem Keil aus Tuschelösung; zwei Hohlprismen von 30° Prismenwinkel und 10 cm Seitenlänge wurden zu einer planen Platte zusammengestellt; das eine enthielt reines Wasser, das andere eine solche Tuschelösung, daß die Durchlässigkeit bei seitlicher Verschiebung um 3 mm jeweils auf den zehnten Teil sank. Die Schwächung war im benutzten Bereich wellenlängenunabhängig; die oberhalb 0,80 μ allmählich einsetzende Wasserabsorption störte bis 0,9 μ noch nicht. Der Keil wurde mit einem Thermoelement täglich neu geeicht; dieser Tuschekeil gestattete die benötigten Intensitätsschwächungen im Verhältnis 1 : 10⁴.

Das Licht des Meßzweiges konnte durch Umklappen eines totalreflektierenden Prismas statt in das Auge auf ein Strahlungsthermoelement geleitet und dadurch die Intensität in Watt gemessen werden.

Das Vergleichslicht wurde erst hinter dem Eintrittsspalt des Doppelmonochromators abgezweigt, um auch räumliche Schwankungen des Lichtbogens unschädlich zu machen; seine Farbe wurde der des Meßlichtes dadurch angeglichen, daß mit einem Rot-Filter Schott RG 8 (2 mm) die Wellenlängen unter 0,7 μ beseitigt wurden. Die Helligkeit war im allgemeinen so gewählt, daß das vom Vergleichslicht erhellte Umfeld nach einem Aufenthalt von einigen Minuten im dunklen Zimmer gut erkannt wurde. Um einen etwaigen Einfluß der absoluten Helligkeit zu erkennen, wurden auch mit hellerem und dunklerem Umfeld Beobachtungsreihen angestellt. Das Beobachtungszimmer selbst war bei diesen Messungen verdunkelt, doch konnte das ausgeruhte Auge die Umgebung noch wahrnehmen.

3. Die Beobachtungen wurden von sechs männlichen Personen im Alter von 24 bis 43 Jahren an sechs aufeinanderfolgenden Tagen durchgeführt. Die Schwankung der Einstellung war

zwischen verschiedenen Personen nicht merklich größer als bei ein und derselben Person in verschiedenen Beobachtungsreihen. Auch eine Veränderung der Anpassungszeit machte sich von 2 bis 30 Minuten gegenüber den stets vorhandenen Einstellungsschwankungen (Intensitätsverhältnis 1 : 2 bis 1 : 3, entsprechend 1 bis 1,5 mm Keilverschiebung) nicht bemerkbar. In Abb. 2 sind die Streubereiche für die einzelnen Wellenlängen eingetragen; angesichts der beträchtlichen Streuung wurde von einer Umrechnung auf unendlich schmalen Spalt abgesehen, da sie das Ergebnis nicht nennenswert geändert hatte.

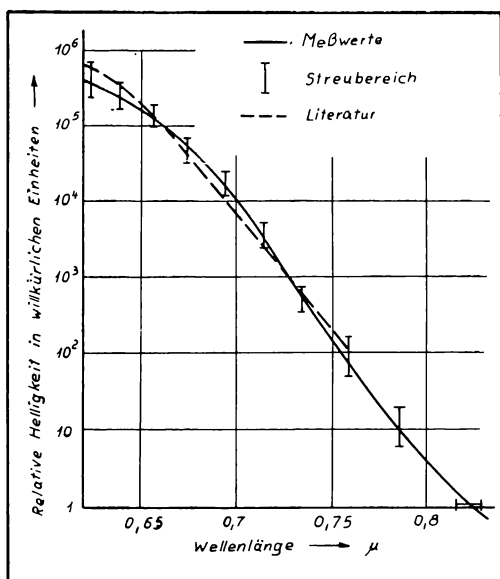


Abb. 2. Ergebnisse der Vergleichsmessungen.

Die Augenempfindlichkeit nimmt demnach von 0,65 μ aufwärts ziemlich gleichmäßig auf je ein Zehntel für 30 mμ ab. Bei der gewählten Stärke des Vergleichslichtes konnte die Augenempfindlichkeit bis 0,82 μ, d. h. um rund 2 Zehnerpotenzen über die damals bekannten Angaben hinunter verfolgt werden; die absolute Intensität, die hierbei auf das Auge auffiel, betrug für 0,82 μ 10⁻⁷ Watt.

Weiter ermittelten wir, für welche Intensitäten bei schwarzem Umfeld — also ausgeschaltetem Vergleichslicht — das In-

feld völlig verschwindet. Die Meßpunkte ordneten sich auf einer zur bisherigen parallelen Kurve bei rund 10mal kleineren Intensitätswerten. Das allein beleuchtete Infeld verschwand also dem Auge, wenn die das Auge erreichende Intensität bei $0,82 \mu$ unter 10^{-8} Watt sank. Das Netzhautbild hatte dabei eine Ausdehnung von etwa $0,37 \text{ mm}^2$.

Noch wesentlich weiter herab kamen wir bei stärkerer Vereinigung der Lichtintensität auf der Netzhaut. Wir betrachteten dazu den Austrittsspalt des Monochromators ohne jede Optik aus 29 cm Entfernung und regelten die Intensität jeweils wieder zur Wahrnehmbarkeitsgrenze herab. Diese Beobachtungen wurden im völlig dunklen Raum angestellt. Die Größe der Augenpupille betrug nach viertelstündigem Aufenthalt im Dunkeln bei einem derartigen Versuch $6,7 \text{ mm } \theta$ (Blitzlichtaufnahme). Nunmehr betrug die Schwellenintensität $4 \cdot 10^{-10}$ Watt bei $0,82 \mu$. Das Netzhautbild berechnet sich dabei zu $0,015 \text{ mm}^2$ ($0,024 \times 0,64$), die Fläche ist also rund 24mal kleiner; dies entspricht bemerkenswert gut der 25mal kleiner gefundenen Schwellenintensität und läßt den Schluß zu, daß wir uns trotz der rechteckigen Gestalt des Bildes noch im Gebiet konstanter Schwellenintensität je mm^2 befinden. Nach G o o d e v e ist (für $\lambda = 740 \text{ mm}$) gerade bei einer quadratischen Fläche von $0,015 \text{ mm}^2$ die Grenze erreicht, bei deren Unterschreitung die auf die Flächeneinheit bezogene Schwellenintensität zu wachsen beginnt; bei einer rechteckigen, wie der unsrigen, sollte dagegen schon eine Abweichung bis zu einigen 100% auftreten. Diese stärkere Vereinigung des Lichtes auf der Netzhaut ermöglichte ein weiteres Vordringen zu längeren Wellen. Mit der verfügbaren Intensität gelangten beide Beobachter übereinstimmend bis $0,90 \mu$. Die Schwellenintensitäten nahmen von $0,82$ — $0,90 \mu$ in etwa gleicher Weise zu (je $30 \text{ m}\mu$ rund auf das Zehnfache), wie das zwischen $0,65$ und $0,82 \mu$ beobachtet war (Abb. 3). Die auf das Auge fallende Intensität betrug hierbei $4 \cdot 10^{-7}$ Watt bei $0,90 \mu$.

Umgerechnet auf 1 mm^2 — das scheint nach dem Befund bei $0,82 \mu$ noch statthaft zu sein — ergibt das eine Schwellenintensität bei $0,90 \mu$ von $2,7 \cdot 10^{-5}$ Watt/ mm^2 . Es läßt sich nicht abschätzen, um wieviel bei noch stärkerer Vereinigung des Lichtes — Reizung einer noch geringeren Zahl von Zapfen — die Schwellenintensität unter den Wert von $4 \cdot 10^{-7}$ Watt bei

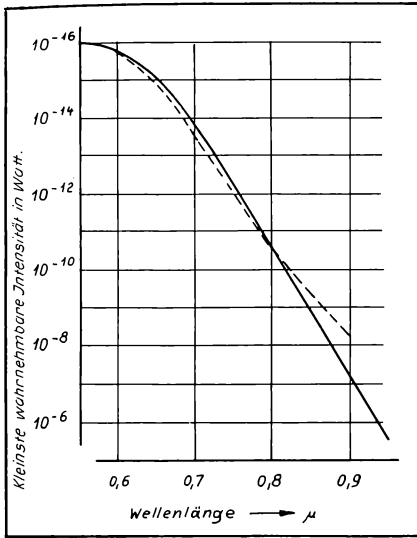


Abb. 3. Absolute Augenempfindlichkeit.

Ausgezogene Kurve: extrapolierte eigene Werte;
gestrichelte Kurve: Messungen von Goodeve.

0,9 μ gesenkt werden könnte. Überdies scheint nichts darüber bekannt zu sein, ob die optischen Eigenschaften des Auges eine derart punktförmige Abbildung bei diesen langen Wellen überhaupt noch ermöglichen.

4. Vergleich unserer Ergebnisse mit denen von Goodeve.

Übereinstimmend stellen beide Untersuchungen fest, daß das menschliche Auge im Zapfensehen bei hinreichender Intensität bis zu Wellenlängen von 0,9 μ vordringen kann. Für Wellenlängen oberhalb 0,7 μ ist das Zapfensehen dem Stäbchensehen überlegen. Der Farbeindruck ändert sich zwischen 0,7 und 0,9 μ nicht mehr.

Übereinstimmung besteht auch hinsichtlich der Größenordnung der Schwellenintensitäten und der etwa exponentieller Zunahme mit wachsender Wellenlänge, aber quantitativ bestehen doch beachtliche Unterschiede. Nicht allzuviel Gewicht legen wir auf den Umstand, daß unser Schwellenwert bei 0,90 μ 25mal höher liegt als bei Goodeve. Ein Faktor 2 kann dadurch

erklärt werden, daß G o o d e v e bei einem Irisdurchmesser von 2 mm, wir dagegen von 6,7 mm beobachtet haben; G o o d e v e hat nämlich für sein Auge festgestellt, daß die Wirksamkeit des in die Pupille fallenden Lichtes für Mittelpunktsabstände über 1 mm rasch abfällt. Die verbleibende Zehnerpotenz mag in die beiderseitigen Fehlergrenzen fallen. Bei kürzeren Wellen nähern sich die Werte der beiden Arbeiten befriedigend. Wichtiger erscheint uns, daß die Abhängigkeit von der Wellenlänge verschieden ist. G o o d e v e kommt zum Ergebnis, daß die Logarithmen der Schwellenwerte eine lineare Funktion der F r e q u e n z sind, während sich bei uns diese Logarithmen besser als lineare Funktion der W e l l e n l ä n g e darstellen lassen. Anders ausgedrückt, wir finden einen rascheren Abfall der Augenempfindlichkeit mit der Wellenlänge als G o o d e v e. Vor allem diese Frage erscheint uns einer Nachprüfung wert zu sein.

Von vornherein wird man zwar der umfangreichen Untersuchung G o o d e v e s größere Zuverlässigkeit zubilligen als unseren mehr überschlägigen Messungen; nur in einer Hinsicht haben wir gewisse Bedenken: die von G o o d e v e verwendeten Schwächungsfilter aus geschwärzten photographischen Platten, zumal wenn sie zu mehreren hintereinander verwendet sein sollten, sind nach unseren Erfahrungen wesentlich unzuverlässiger als unser Keil mit Tuschelösung. Hier könnte in der sonst so gediegenen Untersuchung G o o d e v e s eine Fehlerquelle liegen, die die Abweichungen von unseren Meßergebnissen erklären kann.

**Nachtrag zur Abhandlung Dr. Fischer und B. Gudden:
Die Augenempfindlichkeit im Ultrarot, S. 378.**

Auf Seite 384 wolle angefügt werden:

Nach freundlicher Mitteilung von Herrn Dr. Leo der Physikalisch-technischen Reichsanstalt sprechen auch dort in-
zwischen angestellte Messungen dafür, daß die Augenempfind-
lichkeitskurve im Ultraroten rascher fällt als nach den Messungen
von Goodeve und — mindestens oberhalb $0,9 \mu$ — auch noch
rascher als wir aus unseren Beobachtungen bei $0,9 \mu$ in Abb. 3
extrapoliert haben.

Den benutzten Doppelmonochromator nebst Zubehör verdanken
wir der Helmholtz-Gesellschaft zur Förderung der physikalisch-
technischen Forschung.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Sitzungsberichte der Physikalisch-Medizinischen Sozietät zu Erlangen](#)

Jahr/Year: 1938

Band/Volume: [70](#)

Autor(en)/Author(s): Gudden Bernhard, Fischer Fr.

Artikel/Article: [Die Augenempfindlichkeit im Ultrarot. 378-384](#)