Zeitschrift: Helvetica Physica Acta

Band: 15 (1942)

Heft: IV

Artikel: Über die Abhängigkeit der Flimmer-Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges von den Messbedingungen

Autor: Lüthy, Herbert

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-111308

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Über die Abhängigkeit der Flimmer-Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges von den Messbedingungen*)

von **Herbert Lüthy.**

(26. III. 1942.)

Zusammenfassung. Die Neubestimmungen der spektralen Hellempfindlichkeit $V(\lambda)$, welche vor 1939 im Hinblick auf eine evtl. Abänderung des internationalen Mittelwertes $V(\lambda, \text{int})$ unternommen worden waren, liessen eine Reihe von Fragen offen.

Die vorliegende Untersuchung wurde von einem besonders aufgebauten Spektral-Flimmerphotometer durchgeführt. Einige charakteristische Ergebnisse:

Es können Bedingungen angegeben werden, unter denen sich $V(\lambda)$ von $V(\lambda, \text{int})$ zwischen 520 mμ und 650 mμ um weniger als 5% unterscheidet.

Generell bestätigt sich die Verschiebung des Maximums von $V(\lambda)$ von 555 mμ nach 560 mμ.

Durch Übergiessen sowohl des Umfeldes wie des Flimmerfeldes mit zeitlich konstantem Licht wird der Flimmerabgleich verbessert.

Die Abhängigkeit von $V(\lambda)$ vom Vergleichslicht (λ_2) steigt bis zur Grössenordnung 5%, wenn λ_2 im roten oder blauen Ende des Spektrums gewählt wird. Dasselbe gilt von den Abweichungen vom Additionsgesetz.

Die Änderung von $V(\lambda)$ mit der Leuchtdichte ist von derselben in erster Annäherung logarithmisch abhängig.

Wenn man von einem Beobachter den Grad der Abhängigkeit seines $V(\lambda)$ von Leuchtdichte, Flimmerfrequenz, Zusatzbeleuchtung usw. kennen lernen will, so muss man nicht sein Gelb/Blaugrün-Verhältnis, sondern sein Rot/Grün-Verhältnis in Funktion dieser Parameter untersuchen.

Einleitung.

Die auf unsere Netzhaut fallenden Strahlen der Wellenlängen 400 ... 700 mμ lösen in uns die Empfindungen „farbig" und „hell" aus. Die Hellempfindlichkeitsfunktionen $V(\lambda)$ vergleichen die Hellempfindungen, die von verschiedenfarbigen Spektrallichtern gleicher Energie nach verschiedenen Methoden unter verschiedenen Bedingungen erzeugt werden.

Den praktischen lichttechnischen Bedürfnissen entsprechend hat die Internationale Beleuchtungskommission 1924[1]) $V(\lambda, \text{int})$

---

*) Dissertation Basel 1942. Siehe auch die vorläufige Mitteilung H.P.A. **14**, 145, 1941.

*

provisorisch festgesetzt: Siehe Kurve $V(\lambda, \text{int})$ in Fig. 1 und die Zahlenwerte in Tab. 2.

Wir möchten vorausschicken, dass man mit „$V(\lambda)$" nicht den Begriff von etwas vollkommen Präzisierbarem verbinden darf, wie es leider zu oft geschehen ist. So paradox es klingt: $V(\lambda)$ existiert nicht; wir müssen es konstruieren.

Unsere Messungen zur Bestimmung von $V(\lambda)$ erfolgen ausschliesslich nach dem sog. Flimmerverfahren. Dasselbe beruht darauf, dass dem Auge die zu vergleichenden Leuchtdichten auf

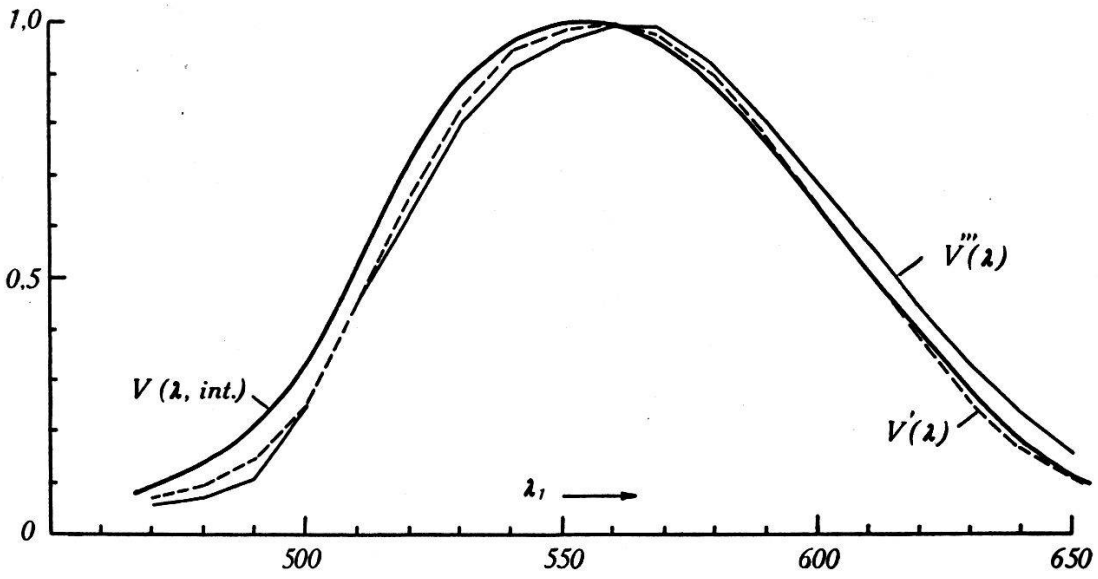

Fig. 1.

Zusammenstellung einiger $V(\lambda)$: Dick ausgezogen: $V(\lambda$, intern.). $V'(\lambda)$: Mittelwert für 19 farbnormale Beobachter, Flimmerleuchtdichte 500 asb, Feldgrösse 1,5°, übergossen mit 100 asb weiss. $V'''(\lambda)$: entsprechend für 35 asb, übergossen mit 35 asb.

derselben Fläche in raschem Wechsel dargeboten werden und dass hierbei das Verschwinden des Farbwechsel-Eindrucks bei niedrigerer Frequenz erfolgt als das Verschwinden des Eindrucks des Helligkeitswechsels. Es gibt also einen schmalen Frequenzbereich, für welchen, im Sinne steigender Frequenz betrachtet, das Auge nicht mehr auf Farbwechsel, aber doch noch auf Helligkeitswechsel („Flimmern") anspricht. Es ist nun stets möglich, durch Veränderung der Stärke der einen Leuchtdichte ein Minimum des Flimmerns und bei leichter Erhöhung der Wechselfrequenz ein Verschwinden des Flimmerns zu erreichen. Diesen Zustand zieht man zur Definition der „Gleichheit" im Sinne des Flimmerverfahrens heran.

Selbst für dieses Verfahren, bei welchem mehr als bei jedem anderen subjektiven Verfahren auf Linearität gerechnet werden

kann, wo also am meisten Hoffnung auf richtig integrierende Bewertung der Strahlung $S(\lambda)$ gemäss dem Ausdruck

$$\int S(\lambda)\, V(\lambda)\, d\lambda \tag{1}$$

besteht — selbst in diesem Falle ist $V(\lambda)$ nach bestgemeinter Festlegung der äusseren Bedingungen (Typus des Flimmerphotometers, Flimmerfrequenz, Leuchtdichte, Zusatzleuchtdichte, Feldgrösse, Jahreszeit, Ernährung, Vorbehandlung des Auges) namentlich an den Enden des Spektrums noch ein bis einige Prozent von den inneren Bedingungen (gesamte Verfassung, momentaner Stand der Übung in der Wahl des Kriteriums „flimmerfrei") des Beobachters abhängig, so dass man besser beim einzelnen Beobachter nur summarisch von den charakteristischen Zügen des $V(\lambda)$-Funktionals spricht. Statistisch lässt sich dann stets aus solchem Ausgangsmaterial durch Mittelbildung eine einfache Funktion konstruieren. Ob man eine solche Funktion dann noch „wahres" oder „wirkliches $V(\lambda)$" nennen will, ist Sache der Übereinkunft.

Die wichtigsten $V(\lambda)$-Bestimmungen sind in der den Berichten der Internationalen Beleuchtungskommission[2]) entnommenen Fig. 2 berücksichtigt, und zwar als Verhältnis

$$f(\lambda) = \frac{V(\lambda)}{V(\lambda, \text{int})} \tag{2}$$

Die durch Vierecke gekennzeichneten Kurven beziehen sich auf das Kleinstufenverfahren, bei welchem der gesamte zu überwindende Farbensprung derart in einige kleinere Sprünge zerlegt wird, dass die Ungleichfarbigkeit der nebeneinanderliegenden Flächen zwar merklich ist, aber ein Urteil „gleichhell" nicht zu stark erschwert wird.

Alle übrigen Kurven beziehen sich auf das Flimmerverfahren. Bei den durch Dreiecke bezeichneten Kurven wird $V(\lambda)$ so *gewählt*, dass die aus diesem $V(\lambda)$ und aus den Durchlässigkeitsfunktionen von Farbfiltern berechneten Durchlässigkeits-Koeffizienten sich mit den entsprechenden flimmerphotometrisch gemessenen Durchlässigkeiten dieser Filter decken.

Die starken Abweichungen der verschiedenen Kurven in Fig. 2 von der horizontalen Geraden zeigen deutlich, dass es sich lohnt, von einem $V(\lambda)$-Problem zu sprechen. Im wesentlichen sind es die Kurven der obersten Gruppe (1 ... 7), die zur Bildung von $V(\lambda, \text{int})$ führten. Die zweite Gruppe (8 ... 11 einschliesslich 12), sowie Untersuchungen von Arndt[3]), Dresler[4]) und Rieck[5]) an den Linien 546, 578 und 589 veranlassten das Deutsche Beleuchtungs-Komitee, die Internationale Beleuchtungskommission auf die Notwendigkeit einer Neubestimmung von $V(\lambda)$ aufmerksam zu machen.

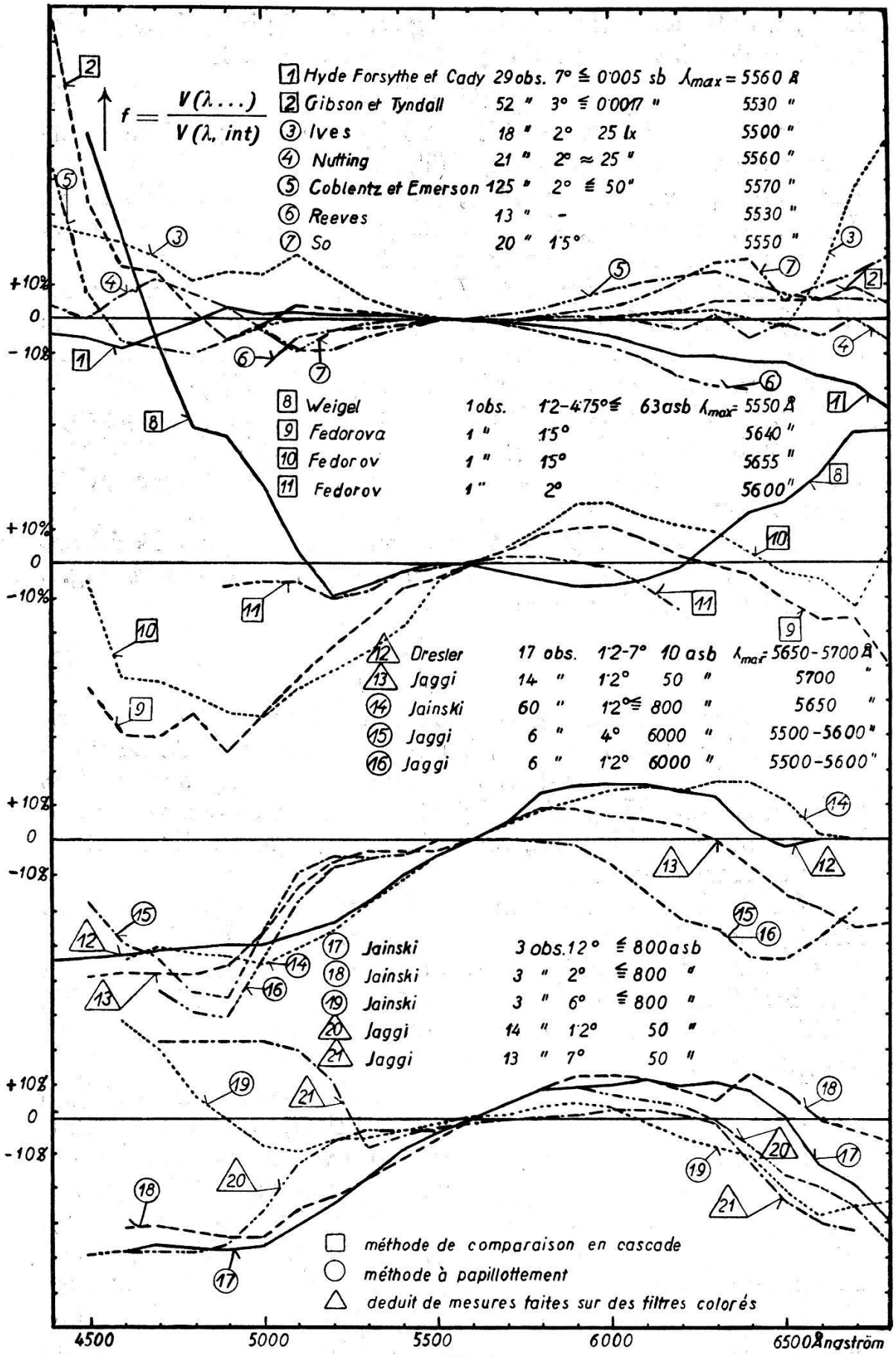

Fig. 2.

Übersicht über $V(\lambda)$-Bestimmungen, Stand Mitte 1939. Aus Compte-rendu de la Commission Internationale de l'Eclairage (1939, Sitzung in Scheveningen), Report CT 5.

Die in den Jahren 1937/38 von DRESLER[6]), PRESTON[7]), JAGGI[8]), JAINSKI[9]) und FORSYTHE, BARNES und SHRIDER[10]) gemachten Anstrengungen brachten eine weitgehende, aber nicht vollkommene Klärung der Sachlage.

Dem damaligen Stand der Erkenntnis entsprechend fasste die Internationale Beleuchtungskommission im Jahre 1939 u. a. folgende Beschlüsse:

1° Tout résultat de mesure photométrique doit être placé . . . sur la base fondamentale unique définie par la relation

$$B = K_m \cdot \int E(\lambda)\ V(\lambda)\ d\lambda$$

2° Il n'y a pas lieu de changer les facteurs de visibilité relative actuellement en vigueur.

Den allgemein niedrigen Verlauf der neueren Kurven *im Blau* deutet man einstweilen als Feldgrösse-Effekt: Heute braucht man eher kleinere Flimmerfelder, deren Bilder vollständig innerhalb des gelben Fleckes der Netzhaut fallen. Die Diskrepanzen *im Rot* sind im wesentlichen der starken Leuchtdichteabhängigkeit zuzuschreiben.

Diese beiden aus Fig. 2 ersichtlichen charakteristischen Züge, die übrigens seit IVES[11]) andeutungsweise bekannt sind, aber lange Zeit nicht genügend gewürdigt wurden, stellen eigentlich alles dar, was man an dem in Fig. 2 enthaltenen Material wirklich „versteht".

Ausserdem besteht die Vermutung, dass die Form von $V(\lambda)$ sich mit der Jahreszeit ändert[12])[13]) (Vitamin A?), und zwar soll die f-Kurve gegen Rot im Winter mehr ansteigen als im Sommer: Effekt 5% im Verhältnis $V(589)/V(546)$. Es liegen bis jetzt aber nur systematische Messungen an den Linien 546, 578 und 589 vor. Über das jahreszeitliche Verhalten im Rot weiss man so gut wie nichts. Es ist verfrüht, einen grossen Anteil der im Rot noch bestehenden Streuung bereits jetzt dem Saison-Effekt zur Last zu legen. Wir haben in dieser Arbeit darauf geachtet, dass nur Werte miteinander zum Vergleich gelangen, die nicht von diesem Effekt betroffen sein können.

Zusammenfassend über den Stand der $V(\lambda)$-Frage orientieren der Sitzungsbericht der Internationalen Beleuchtungskommission 1939[2]) und die Berichte von DRESLER[14]) und KÖNIG[15]).

Engere Problemstellung.

Vorab einige stets wiederkehrende Bezeichnungen und Abkürzungen:

$V(\lambda, \ldots)$ spektrale Hellempfindlichkeit;

λ_1, λ_2 Wellenlänge, λ_2 Wellenlänge des Vergleichslichtes;

$f(\lambda) = V(\lambda)/V(\lambda, \text{int})$ (sog. f-Darstellung);

B_F Leuchtdichte des Flimmerfeldes (in asb);
B_{U+IZ} Umfeld- und Infeld-Zusatzleuchtdichte;
1 asb (Apostilb) $= \frac{1}{\pi \cdot 10^4}$ Stilb $= \frac{1}{\pi \cdot 10^4} \cdot$ Kerzen/cm^2;
α Flimmerfeldgrösse, bei uns stets $1{,}5^0$.

Der Vergleich unserer Arbeit mit derjenigen von Jaggi, der ersten im Eidg. Amt für Mass und Gewicht ausgeführten $V(\lambda)$-Bestimmung, nimmt hier naturgemäss einen breiten Raum ein, da die beiden Arbeiten in gewissem Sinn ein Ganzes darstellen.

Die verschiedenen Autoren arbeiten meist nur mit *einer* Flimmeranordnung. Solange sogar nur innerhalb der Flimmermethode Unterschiede zwischen den mit Spektrallichtern und Filterlichtern gewonnenen Ergebnissen, sowie Unterschiede im Flimmerphotometer-Typus zur Diskussion stehen und überdies Zweifel an den nicht ganz einfachen Energiemessungen und den Leuchtdichteangaben bei einigen Autoren berechtigt erscheinen, ist es wünschenswert, in demselben Institut mit möglichst denselben Beobachtern auf möglichst viele Arten $V(\lambda)$ zu bestimmen.

Unsere Aufgabe besteht darin, die Abklärung tunlichst so weit zu fördern, dass die Untersuchung eines Beobachters vor seiner Verwendung zu technischen Messungen nur noch einiger Test-Messungen mit gefiltertem Glühlampenlicht bedarf. In erster Linie handelt es sich um folgende Teilaufgaben:

1) *Mittelwert.* Es ist ein weiterer Beitrag zur Frage des Mittelwertes für Spektrallichter bei mittleren Messbedingungen (35 bis 500 asb) zu leisten.

Jaggi hat seinerzeit V (λ) für die schon fast blendend wirkende Leuchtdichte von 6000 asb ($\approx {}^1/_5$ Kerzen je cm^2) für Spektrallichter (mit Glühlampenlicht als Vergleichslicht untersucht. Die Messungen waren mühsam, so dass in vorliegender Arbeit mit maximal 500 asb gearbeitet werden soll. Diese Einsparung gestattet Verwirklichung eines homogeneren Flimmerfeldes und damit eines bessern Flimmerabgleichs, als dies bei Jaggi der Fall war. Unsere Ergebnisse bei 35 asb werden mit den von Jaggi bei ca. derselben Leuchtdichte auf ganz andere Weise, nämlich mit dem Differenz-Filterverfahren mittelst eines Bechstein-Flimmer-Photometers gewonnenen Werten zu vergleichen sein.

2) $V(\lambda_1; \lambda_2)$. Das Standardauge arbeitet gemäss Ausdruck (1) eindeutig und linear, d. h.:

a) Die Form von $V(\lambda)$ ist unabhängig vom Vergleichslicht λ_2.

b) Die einzelnen spektralen Komponenten tragen unabhängig voneinander additiv zum Helligkeitseindruck bei.

Die Abhängigkeit der Funktion $V(\lambda_1; \lambda_2)$ vom Parameter λ_2, mit andern Worten die Abhängigkeit vom Weg in der Farbmannigfaltigkeit ist näher zu untersuchen, weil in dieser Hinsicht die Literatur eine Lücke aufweist und weil festzustellen ist, ob ein von König[20]) vermuteter Zusammenhang zwischen der Grössenordnung der Abweichungen vom Axiom a) und denjenigen vom Axiom b) besteht.

3) $V(\lambda; B_F)$. Es ist eine Besonderheit des Flimmerverfahrens, dass namentlich im Rot $V(\lambda)$ stark von B_F abhängt. Die neueren Messungen beziehen sich alle auf gefiltertes Glühlampenlicht. Die Untersuchung soll hier auf Spektrallicht ausgedehnt werden.

4) $V(\lambda_1; B_{U+IZ})$. Bei Jaggi wird die Annehmlichkeit des Übergiessens von Umfeld und *Infeld* mit konstanter Zusatzleichtdichte B_{U+IZ} hervorgehoben. Da es sich bei dieser $U+IZ$-Beleuchtung um eine Massnahme handelt, die allgemein als Kunstgriff zur Erleichterung des Flimmerabgleichs empfohlen werden kann, ist $V(\lambda)$ in Funktion von B_{U+IZ} für verschiedene B_F zu bestimmen.

Ältere Messungen an *einem* Beobachter liessen vermuten, dass sich durch starke $U+IZ$-Leuchtdichten die Leuchtdichteabhängigkeit von $V(\lambda)$ im Rot beträchtlich reduzieren lasse. Es ist zu untersuchen, ob dieser Vermutung allgemeine Gültigkeit zukommt. Leider wird sich zeigen, dass dies nicht der Fall ist.

Apparatur.

Der Aufgabestellung entsprechend wurde ein Spektral-Flimmerphotometer aufgebaut, das jede Wellenlänge mit jeder andern zu vergleichen gestattet. Um die gewünschte Leuchtdichte von 500 asb zu erhalten, wurde mit wenig zerstreuten Strahlenbündeln gearbeitet. Eine Anordnung bestehend aus Wolframdrahtlampe, Monochromator und Bechstein-Photometer mit Gipsprisma wäre zu lichtschwach. Wir verwenden deshalb einen Aufbau bzw. einen Strahlengang gemäss Fig. 3; die Arbeitsweise geht aus dem Text unter dieser Figur hervor.

Vorfilterung. Durch passende Wahl der Vorfilter (zwischen 450 und 500 mμ 2 mm BG 14, von 510 ... 550mμ 2 mm BG 7, von 550 ... 600 mμ 2 mm BG 14, von 600 mμ an 2 mm RG 6) und der Spaltweiten (reproduzierbar abgelesen an den Zeigern Z) wird in einem Bereich von 470 ... 640 mμ die Leuchtdichte auf $\pm$ 20% konstant gehalten. Zugleich vermeiden die Vorfilter

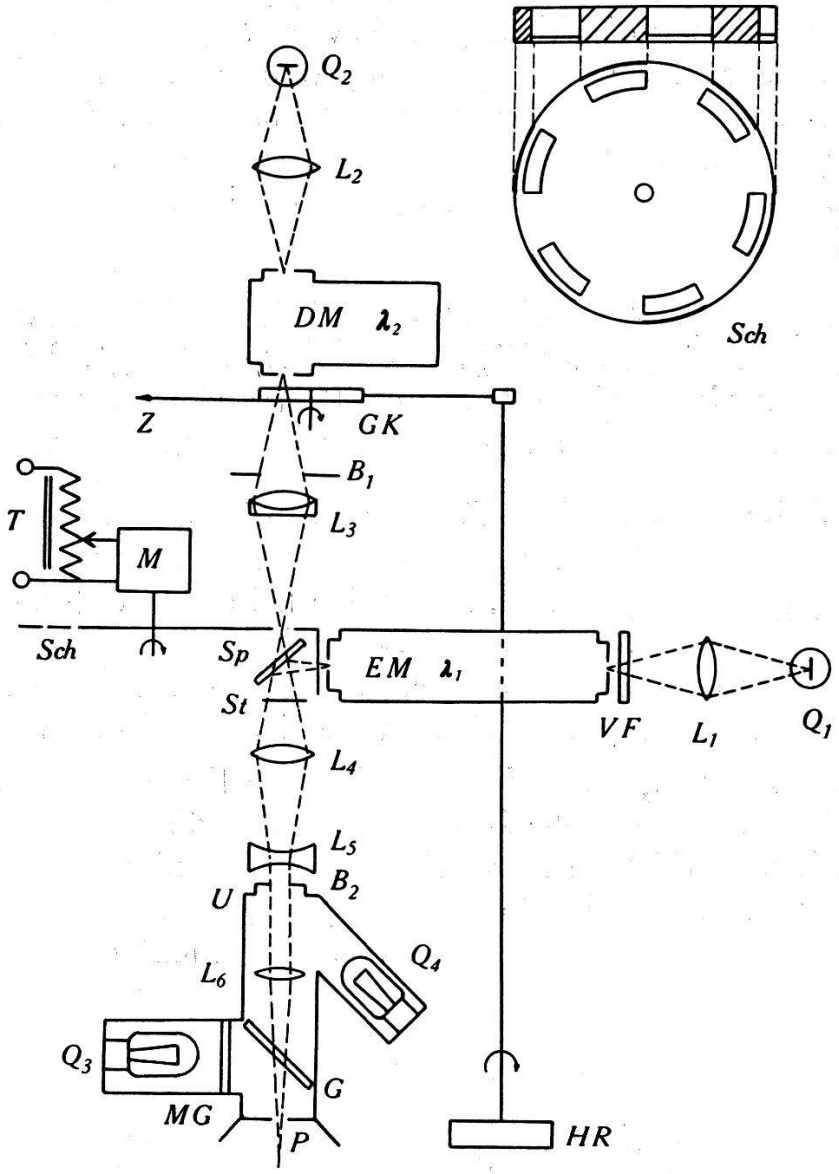

Fig. 3.
Spektralflimmerphotometer.

Strahlengang:

Q_1 Osram-Kleinkinolampe, 8,5 V.
VF Vorfilter
EM Einfach-Monochromator (Winkel-Zeiss)
Q_2 wie Q_1
DM Doppelmonochromator (C. Leiss, Berlin)
GK Graukeil, mit Handrad *HR* drehbar
Z Zeiger, zur Ablesung der Stellung von *GK*
B_1 Blende, erzeugt Bündel gleicher Apertur wie diejenige des λ_1-Bündels
L_3 Linse, erzeugt Spaltbild vor Sp.

Vereinigung:

Sch Flimmerscheibe, lässt abwechslungsweise Strahl λ_1 und λ_2 durch
Sp halbversilberter Spiegel
St Streuer
M Motor
T regelbarer Autotransformator zum Variieren der Flimmerfrequenz
L_4 macht Bündel schwach konvergent
L_5, L_6 erzeugt Spaltbild 3 cm hinter der Austrittspupille
L_6 gestattet scharfe Einstellung auf B_2

Photometerkopf:

Q_3 für $U+IZ$-Beleuchtung
Q_4 reine Umfeldbeleuchtung
MG Mattglas + Tageslicht-Filter
G Glasscheibe zum Übergiessen des ganzen Gesichtsfeldes mit Weiss
U Umfeld (mit MgO innen geweisst)
P Austrittspupille, 5 mm Durchmesser

falsches Licht. Die Monochromasie ist derart, dass die Messergebnisse keiner Korrektur nach der Paschen-Runge-Formel bedürfen.

Energiemessung. Zur Bestimmung der spektralen Hellempfindlichkeit muss das Verhältnis der visuell ermittelten Hellempfindlichkeit und der entsprechenden Strahlungsenergie gebildet werden. Da die Berechnung der Energie aus Energieverteilung der Lampe, Dispersion und spektraler Durchlässigkeit des Monochromators und Selektivität der übrigen Optik manche Fehlerquellen in sich birgt, ist die aus dem Okular austretende Strahlungsenergie direkt gemessen worden. Dies erfolgte mit einer in Ultrarot durch Vorfilter (2 mm BG 19 + 3 mm BG 17) unempfindlich gemachten AEG-Caesium-Vakuumzelle, deren spektrale Empfindlichkeit mit Thermosäule und Zernike-Galvanometer bestimmt wurde und zwar für diejenige Stelle der Kathode, die bei der Energiemessung wirksam war.

Der Photostrom erzeugt einen Spannungsabfall an einem Hochohm-Widerstand von $1{,}3 \cdot 10^{10}$ Ohm. Dieser wurde mit einem Lindemann-Elektrometer (Cambridge) als Nullinstrument nach der Kompensationsmethode gemessen. Die Photoströme (10^{-11} A) waren bei uns etwa 10 mal kleiner als bei der entsprechenden Apparatur von Jaggi[8]). Relative Genauigkeit der Energiemessung: 1 ... 2%.

Schwächungsvorrichtung. Zum photometrischen Abgleich ein runder Zeiss-Graukeil *GK* (siehe Figur 3), der unmittelbar vor dem Austrittsspalt des Doppelmonochromators vom Beobachtungsplatz aus gedreht werden kann. Seine Stellung lässt sich bequem aus einiger Entfernung an einer linear geteilten Skala ablesen. Wir geben einige Zahlenwerte für diesen als Schwächungsmittel sehr geeigneten Keil in Tab. 1 wieder, da sie wegen des gleichmässigen exponentiellen Verlaufes und der Kleinheit der Selektivität allgemeineres Interesse beanspruchen dürften. Die Durchlässigkeit hat als Funktion von λ ein flaches Maximum bei 530 mμ. Die Zahlenwerte sind in der Spektralapparatur selbst mit der oben beschriebenen Energiemesseinrichtung bestimmt worden.

Die Schwächung der gesamten Flimmer-Leuchtdichte einschliesslich der $U + IZ$-Leuchtdichte erfolgt durch Einsetzen von Graufiltern in die Austrittspupille. Zur Erreichung starker Absorptionen wird ein Filter von 40% mittlerer Durchlässigkeit je mm in mehreren mm Schichtdicke verwendet. Die Selektivität des 40%-Filters wird gemessen, für die zusammengesetzten Filter daraus berechnet und tabellarisch festgelegt. Mit 4 solchen Okular-

einsätzen ergeben sich Leuchtdichten von 500, 200, 80, 35 und 15 asb.

Messung der Leuchtdichte. Die starke Abhängigkeit von $V(\lambda)$ von der Leuchtdichte erfordert eine Angabe der wirksamen Leuchtdichte auf 20% genau. Auf der Photometerbank wurde eine Opalglas-Lampe als Leuchtdichtenormal geeicht. Die $U + IZ$-Leuchtdichte wird hieran wie folgt angeschlossen: Das Normal kommt vor

Tabelle 1.

Durchlässigkeit eines Zeiss-Graukeiles.

Winkel φ in °	Durchlässigkeit in % für $\lambda_2 = 485$	530	575	630 mμ
40	13,4	13,5	12,7	11,6
50	15,7	15,8	14,8	13,5
60	18,5	18,7	17,6	16,1
70	21,9	22,3	21,0	19,2
80	25,9	26,4	25,1	23,1
90	30,5	31,0	29,8	27,7
100	35,9	36,6	35,4	33,4
110	42,1	43,0	41,8	39,9
120	49,3	50,2	49,2	47,4
130	57,7	58,5	57,5	56,2
140	66,6	67,2	66,2	65,2
150	76,5	77,2	76,1	75,4
160	89,7	90,1	89,4	88,9

B_2 an Stelle von L_5, ein das Gesichtsfeld halb verdeckender Spiegel an Stelle von G. Durch bekannte Farbfilter vor Q_3 lässt sich jedes Stück des Spektrums ohne grösseren Farbensprung direkt anschliessen. Die Ergebnisse sind noch mit dem Verhältnis der Reflexionskoeffizienten von Glas G und Spiegel zu multiplizieren.

Streuer. Zur Verwischung jeglicher Struktur im Bildfeld ist bei St ein Streuer mit der Eigenschaft, wenig zu absorbieren, kein direktes Licht durchzulassen und trotzdem nur in einem kleinen Winkel zu streuen, in den Strahlengang gebracht. Diesen Anforderungen genügt eine fein mattierte Celluloidfolie, deren Diffusionsvermögen durch kurzes Eintauchen in Aceton herabgesetzt ist. Je nach dem gewünschten Grad der Mattierung wird dieser Prozess mit *frischem* Aceton wiederholt.

Photometerkopf. Es kann sowohl mit $U + IZ$-Beleuchtung als auch mit reiner Umfeldbeleuchtung gearbeitet werden.

Frequenzmessung. Mit der Flimmerscheibe ist ein Kontakt gekoppelt, welcher abwechslungsweise einen Kondensator auflädt und über ein träges Galvanometer wieder entlädt.

Gang einer Messung. Es wurde im taghellen Zimmer gearbeitet. Die Beobachter sind gehalten, bei einer etwas zu hohen Flimmerfrequenz grob die flimmerfreie Stelle zu suchen und nachher durch symmetrisches Einkreisen von links und rechts die Frequenz auf ein Minimum zu bringen, derart, dass gerade noch Flimmerfreiheit herrscht. Um Ungeübte, an einem gewissen Mangel an Entschlusskraft leidende Beobachter zu einem raschen Urteil zu zwingen, wird vom Protokollführer der Graukeil langsam um die mutmassliche Mittellage hin- und hergedreht. Das Durchlaufen des Minimums wird dem Protokollführer durch ein kurzes Zeichen mitgeteilt. Von diesem Kunstgriff muss bei Anwesenheit von Infeld-Zusatz-Beleuchtung selten Gebrauch gemacht werden.

Die Einstellungen geübter Beobachter streuen um weniger als 2%. 5 Ablesungen genügen in diesem Fall, während in den meisten Fällen 10 Ablesungen je Messpunkt gemacht werden.

Gang der Rechnung. Abgleichung bedeutet Gleichheit der Leuchtdichten

$$B(\lambda_1) = B(\lambda_2)$$

oder nach (1), da es sich um praktisch monochromatisches Licht handelt,

$$V(\lambda_1)\, S(\lambda_1)\, \Delta\lambda_1 = V(\lambda_2)\, S(\lambda_2)\, \Delta\lambda_2 .$$

Wir ändern nun λ_1, nicht aber λ_2, und regulieren zum Abgleichen $S(\lambda_2)$ (Graukeil):

$$V(\lambda'_1)\, S(\lambda'_1)\, \Delta\lambda'_1 = V(\lambda_2)\, S'(\lambda_2)\, \Delta\lambda_2 .$$

Es folgt:

$$V(\lambda_1) : V(\lambda'_1) : \ldots = \frac{S(\lambda_2)}{S(\lambda_1)\, \Delta\lambda_1} : \frac{S'(\lambda_2)}{S(\lambda'_1)\, \Delta\lambda'_1} : \ldots$$

In Worten: $V(\lambda_1)$ als Ergebnis einer Messreihe erhält man bis auf einen Normierungsfaktor, indem man aus den Zahlenreihen $S(\lambda_2)$ und $S(\lambda_1)\, \Delta\lambda_1$ die Quotienten bildet. $S(\lambda_2)$ ist proportional der Durchlässigkeit $d(\lambda_2)$ des Graukeiles (vgl. Tab. 1). Die Reihe $S(\lambda_1)\, \Delta\lambda_1$ wurde direkt mit der geeichten Photozelle gemessen. Die Division der Quotientenreihe durch deren Maximalwert gibt $V(\lambda_1)$, und zwar für Vergleichslicht λ_2.

Messungen mit dem Bechstein-Photometer. Zwecks engerm Anschluss an die Arbeit von Jaggi[8]) wurden einige Messungen mit dem Flimmerphotometer nach Bechstein[16]) auf der normalen

Photometerbank an gefiltertem Glühlampenlicht ausgeführt (Lichtquelle: Klein-Kinolampe 8,5 V, Betrieb mit 6,5 V, 2720° Farbtemperatur; Schottfilter Serie OG und RG).

Ergebnisse.

1. *Zur Frage des Mittelwertes.*

Fig. 4 gibt die Ergebnisse in f-Darstellung; für die drei wichtigsten f-Funktionen sind in Tab. 2 die $V(\lambda) = f(\lambda) \cdot V(\lambda, \text{int})$-Werte enthalten.

Kurve 1a: f für 12 farbnormale Männer, $B_F = 500$ asb, $B_{U+IZ} = 100$ asb, $\lambda_2 = 575$ mμ, $\alpha = 1{,}5^0$. Die Hälfte dieser Beobachter war in der Beobachterschar von Jaggi enthalten und stellt das Mittel beidemal gut dar.

Kurve 1b: f für 7 farbnormale Frauen, Bedingungen wie oben. Nur eine hiervon wirkte bei Jaggi mit.

Tabelle 2.

λ	$V(\lambda,\text{int})$	$V'(\lambda)$	$V''(\lambda)$	$V'''(\lambda)$	λ	$V(\lambda,\text{int})$	$V'(\lambda)$	$V''(\lambda)$	$V'''(\lambda)$
470	0,091	0,077	0,072	(0,083)	560	0,995	1,000	1,000	1,000
480	0,139	0,103	0,103	0,111	570	0,952	0,974	0,970	0,989
490	0,208	0,149	0,154	0,158	580	0,870	0,902	0,895	0,921
500	0,323	0,252	0,262	0,254	590	0,757	0,782	0,773	0,805
510	0,503	0,439	0,456	0,440	600	0,631	0,651	0,641	0,678
520	0,710	0,665	0,685	0,660	610	0,503	0,506	0,498	0,541
530	0,862	0,849	0,864	0,828	620	0,381	0,370	0,365	0,405
540	0,954	0,940	0,950	0,923	630	0,265	0,259	0,254	0,289
550	0,995	0,992	0,997	0,977	640	0,175	0,172	0,167	0,195
555	1,000	1,000	1,002	0,995	650	0,107	0,105	0,101	(0,121)

Wahrscheinliche Mittelwerte von $V(\lambda)$ für 19 normale Beobachter, und zwar:

$V'(\lambda)$: $\alpha = 1{,}5^0$, $B = 500$ asb, $B_{U+IZ} = 100$ asb
$V''(\lambda)$: $\alpha = 1{,}5^0$, $B = 500$ asb, $B_{U+IZ} = 500$ asb
$V'''(\lambda)$: $\alpha = 1{,}5^0$, $B = 35$ asb, $B_{U+IZ} = 7$ asb

Kurve 1: f': Mittel aus 1a und 1b. Hieraus folgt $V'(\lambda) = f'(\lambda) \cdot V(\lambda, \text{int})$ in Tab. 2 und Fig. 1. Das Ergebnis berechtigt füglich zur Behauptung:

Es können Bedingungen angegeben werden, unter denen sich $V(\lambda)$ von $V(\lambda, \text{int})$ zwischen 520 mμ und 650 mμ um weniger als 5% unterscheidet.

Dies mag dazu beitragen, das Bedürfnis nach einer Änderung von $V(\lambda, \text{int})$ um ein Weiteres herabzumindern. Die Abweichung von über 20 % im Blau bestätigt sich allerdings erneut.

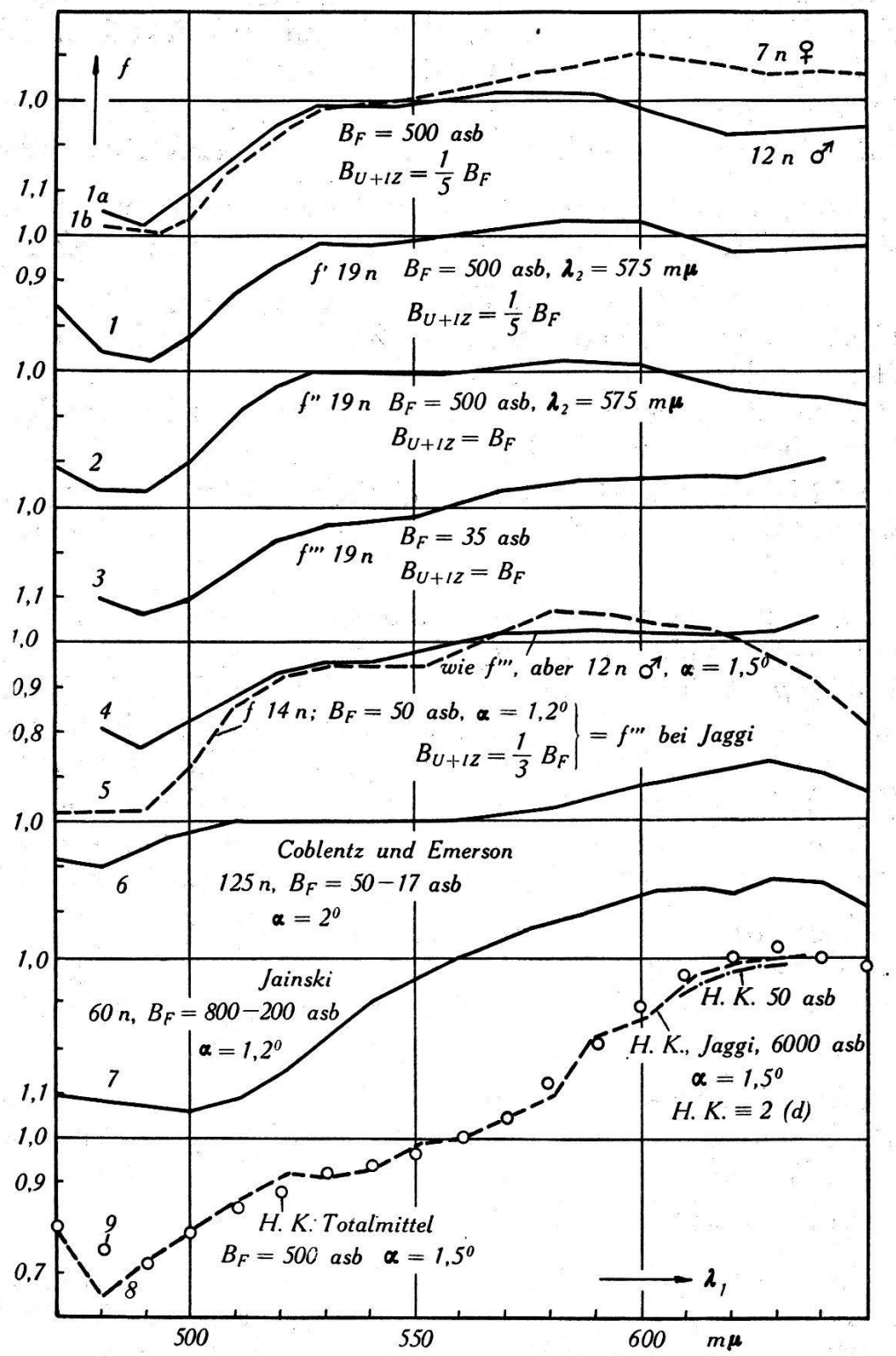

Fig. 4.
Zusammenstellung einiger f-Funktionen. Erläuterungen im Text.

Kurve 2: f''_1 Ergibt sich aus f' durch Erhöhung von B_{U+IZ} auf 500 asb ($= B_F$); führt zu $V'' = f''$. $V(\lambda, \text{int})$ in Tab. 1.

Kurve 3: $f''\,'$: Ergibt sich aus f' durch Erniedrigung von B_F auf 35 asb. Ob bei dieser niedrigen Leuchtdichte $B_{U+IZ} = B_F$ oder z. B. $= 1/5\ B_F$ genommen wird, ist gleichgültig; Effekt 1%. Hieraus $V''' = f''' \cdot V(\lambda, \text{int})$ in Tab. 1 und Fig. 1.

Dem gleichmässigen Anstieg von f''' mit steigender Wellenlänge entspricht eine Verschiebung des Maximums nach etwa 560 mμ.

Kurve 4: Entsteht wie 3, aber unter Zugrundelegung von 1a statt 1. Diese Kurve eignet sich am besten zum Vergleich mit

Kurve 5: In der Arbeit JAGGI[8]), Fig. 6, mit f''' bezeichnet, bezieht sich auf $B_F = 50$ asb, $\alpha = 1{,}2^0$. Ihre Werte im mittleren Teil des Spektrums waren aus Messungen an einer Reihe von Gelb- und Rot-Filtern unter stärkster Heranziehung des Superpositionsprinzips berechnet worden!

Es ist bemerkenswert, dass die auf einem solchen Umweg gewonnenen Werte 5 von JAGGI *sich mit unseren direkt gemessenen Werten 4 so gut decken.*

Über die Abweichungen oberhalb 630 mμ siehe später. Unsere Kurve verläuft glatter als diejenige von JAGGI; die Einbuchtung bei 540 mμ ist aber noch andeutungsweise vorhanden. Der glattere Verlauf würde zur Folge haben, dass es theoretisch leichter wäre, unseren Durchschnittsbeobachter mittelst Korrekturgläsern[15]) auf $V(\lambda, \text{int})$-getreue Angaben zu korrigieren als denjenigen JAGGI's.

Das den Kurven 4 und 5 zugrunde liegende Material stammt im wesentlichen aus den Monaten März und April (1938 bzw. 1941).

Kurve 6: Nach COBLENTZ und EMERSON[17]), 125 Beobachter, $\alpha = 2^0$, $B_F = 50$—17 asb, identisch mit Kurve 5 der Fig. 2; wir geben dieselbe hier gesondert wieder wegen Ihrer Ähnlichkeit mit unserer Kurve 3.

Kurve 7: JAINSKI, 60 normale Beobachter, $B_F = 800$—200 asb, $1{,}2^0$; sie wäre mit unserer Kurve 1 zu vergleichen, deckt sich aber nicht mit ihr.

Kurven 8 und 9 beziehen sich auf einen Deuteranomalen (H. K.).

Kurve 8: im Jahre 1938 von JAGGI bei $B_F = 6000$ asb, α ca. $1{,}5^0$ aufgenommen; im Rot ist durch das gestrichelte, mit „50 asb, JAGGI" bezeichnete Kurvenstück zum Ausdruck gebracht, dass dieser Deuteranomale praktisch keine Leuchtdichte-Abhängigkeit aufweist. Dass sich

Kurve 9, von uns für $B_F = 500$ asb bestimmt, mit Kurve 8 so weitgehend deckt, darf sowohl als Zeichen der Stabilität des Deuteranomalen als auch als Teilbeweis für die Übereinstimmung der Energiemessungen in beiden Arbeiten angesehen werden.

2. $V(\lambda_1)$ *in Abhängigkeit vom Vergleichslicht* λ_2.

Es gibt verschiedene Arten von Abweichungen von der Eindeutigkeit. Die eine ist dadurch charakterisiert, dass zwei Lichter, die einem dritten gleich sind, unter sich nicht gleich sind. Wir betrachten hier Versuche, die sich auf mindestens vier Lichter beziehen, indem die Änderung von $V(\lambda_1, \lambda_2)/V(\lambda_1, \text{int})$ in Abhängigkeit von λ_2 untersucht wird. Beide Arten von Versuchen sind einer Änderung des Weges in der Farbmannigfaltigkeit gleichwertig.

Fig. 5 zeigt eine Auswahl von Ergebnissen in f-Darstellung. Um die Figur nicht mit Kurvenzügen zu überladen, sind nur die Messpunkte der $f(\lambda_1, \lambda_2)$-Funktionen für $\lambda_2 = 485$ und 640 mμ durch Kurven verbunden worden, diejenigen für $\lambda_2 = 530$ und 575 mμ nicht.

Kurvengruppe Ch. B.: Ein farbnormaler Beobachter, Mittel zweier Gruppen von Messreihen.

Kurvengruppe H. K.: Einfache Gruppe von Messreihen eines Deuteranomalen, keine Wiederholung „unwahrscheinlicher" Punkte.

Die entsprechenden Messungen für weitere drei Farbtüchtige streuen wenig mehr als diejenigen des Beobachters Ch. B. Bei dem Deuteranomalen ist die Streuung, bezogen auf gleiche Anzahl Messungen, geringer als bei Ch. B. Es lässt sich also feststellen, *dass der Deuteranomale geringere Abhängigkeit seines $V(\lambda_1)$ von λ_2 aufweist als der Durchschnitts-Farbtüchtige.*

Um Fig. 5 richtig einschätzen zu können, muss man folgendes beachten: Die Aufnahme einer vollständigen Gruppe von Messreihen, bestehend aus vier $V(\lambda_1)$-Aufnahmen von 20 zu 20 mμ, dauert mindestens 1½ Stunden. Zu solchen Messungen sind die Beobachter gewöhnlich nur vormittags zu gebrauchen. Die nie ganz zu beseitigende Inhomogenität des Flimmerfeldes ist für die verschiedenen λ_2 etwas verschieden. Kriteriumsänderungen sind bei diesen Eindeutigkeits-Prüfungen weniger zu vermeiden als z. B. bei den Linearitäts-Prüfungen (s. Ergebnisse 3: Abhängigkeit von B_F), wo man immer auf den Kontrollpunkt $\lambda_1 = \lambda_2$ zurückgreifen kann. Die

Kurvengruppen Ch. B. I und Ch. B. II sind zu verschiedenen Zeiten, bei verschiedener Disposition des Beobachters, aber unter

gleichen Vorsichtsmassnahmen bestimmt worden. Eine solche Umkehrung der Reihenfolge der Kurven ist uns allerdings nur dieses eine Mal begegnet; sie zeigt, welche Schwierigkeiten sich der Ermittlung feinerer Effekte entgegenstellen *können*.

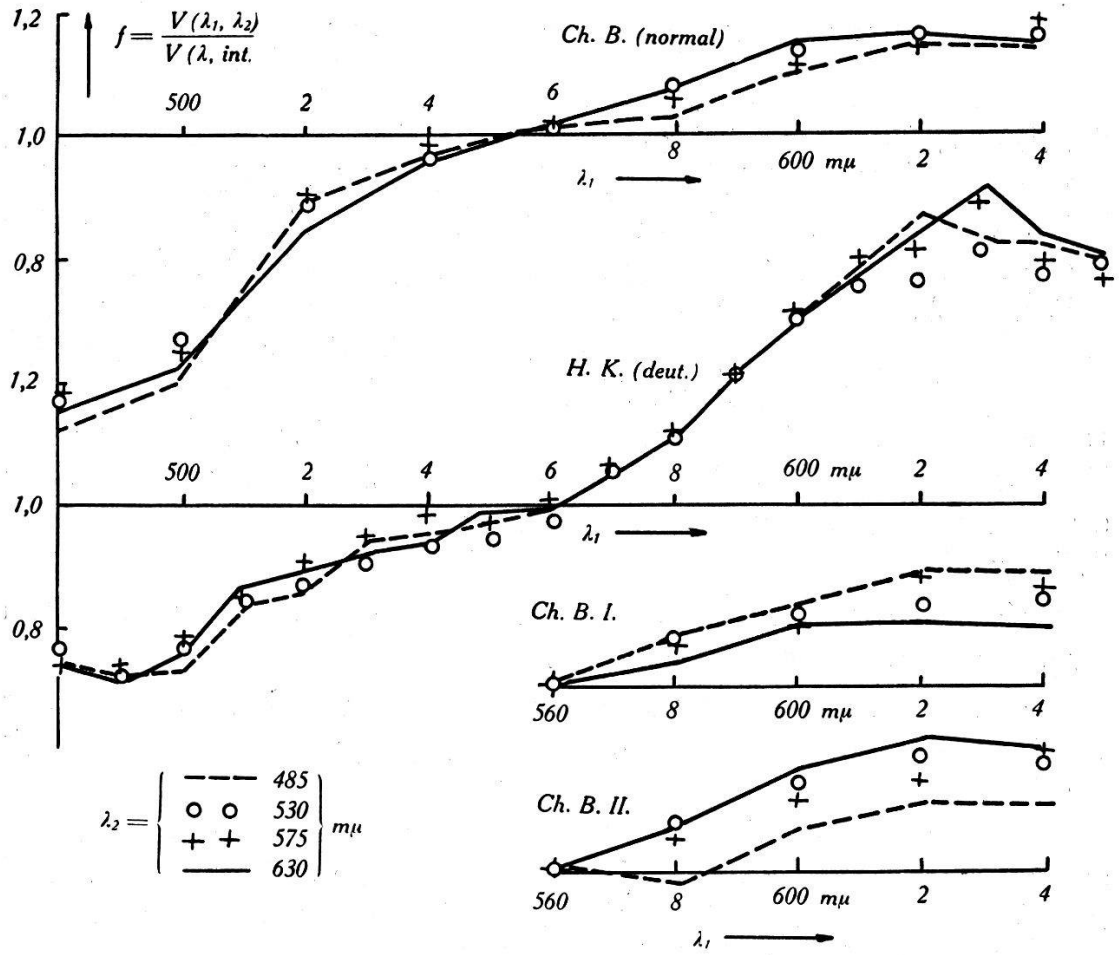

Fig. 5.

Abhängigkeit der Hellempfindlichkeit vom Vergleichslicht. Die Gruppen Ch. B. I, Ch. B. II und H. K. stellen die Ergebnisse von Einzelmessreihen dar.

Die Prüfungen auf Abhängigkeit vom Vergleichslicht scheinen bei stark gefärbten Vergleichslichtern Nicht-Eindeutigkeiten von 10% aufzudecken; sie reduzieren sich aber durch Häufung der Messungen auf grössenordnungsmässig 3% im mittleren Teil des Spektrums und auf grössenordnungsmässig 5%, wenn eine der Komponenten dem roten oder blauen Ende des Spektrums entnommen ist.

Sämtliche Angaben der Fig. 5 beziehen sich auf Leuchtdichten um 35 asb.

Für einen farbnormalen Beobachter (H. L.) ist die Abhängigkeit $V(\lambda_1 : \lambda_2, B_F)$, d. h. die Streuung von $V(\lambda_1)$ bei Änderung von λ_1 in Abhängigkeit der Leuchtdichte zwischen 15 und 500 asb unter-

sucht worden. Abgesehen von einer leichten Zunahme der Streuung gegen hohe Leuchtdichten hin, die mit der ermüdenden Wirkung starker und roter Lichter auf diesen Beobachter Hand in Hand geht, kann die Streuung in erster Näherung als unabhängig von der Leuchtdichte bezeichnet werden.

Für diesen Farbtüchtigen gewinnen also Angaben wie „3% bzw. 5% Nicht-Eindeutigkeit" den Charakter der Beschreibung einer wirklichen (leuchtdichte-unabhängigen) Eigenschaft *des Auges.*

Es erhebt sich die Frage, ob sich über das Vorzeichen dieser restlichen Abweichungen, von denen man kaum sicher sagen kann, dass sie systematischer, bei äusserster Präzisierung der Messvorschrift reproduzierbarer Natur seien, Regeln angeben lassen.

Jaggi[8]) kommt zur Erkenntnis, dass im Fall stark farbiger Lichter die Messbedingungen kaum so gewählt werden können, dass Abweichungen von der Grössenordnung 2% von der Additivitäts- und Eindeutigkeitsforderung vermieden werden. Für einen genau untersuchten Fall (Filtermessungen, Bechstein-Photometer) findet er 2%. „Das Vorzeichen ist derart, dass man *in diesem speziellen Fall* sagen kann: Eine Leuchtdichte wird durch eine ungefähr gleichfarbige Vergleichs-Leuchtdichte in ihrer Wirkung herabgedrückt. Es ist wie wenn eine konstante gleichfarbige U + IZ-Beleuchtung wirken würde." Jaggi benutzte bei diesem Versuch die Schott-Filter 1 mm BG 7 und 2 mm OG 3 vor der Vergleichslampe. Bei uns ist die Variation des Vergleichslichtes grösser, die Erweiterung des Fehlerbereichs von 2% auf 3 . . . 5% daher ganz natürlich.

Bei Jaggi's Versuch dürfte angesichts der Nachgiebigkeit von $V(\lambda)$ im Rot hauptsächlich das Rot-Filter 2 mm RG 5 ($\lambda_{eff} \approx 650$ mμ) für den Effekt entscheidend gewesen sein.

Das Mittel von 4 Farbtüchtigen zeigt bei uns ebenfalls niedrigen Verlauf der f-Kurve für $\lambda_2 = 640$ gegen das äusserste Rot hin. Rot wird also durch Rot „herabgedrückt". Im übrigen lassen sich aber aus unserm Beobachtungsmaterial in andern Gebieten des Spektrums ebenso viele Verstösse gegen diese Regel wie Bestätigungen derselben herauslesen.

3. *$V(\lambda)$ in Funktion der Flimmerleuchtdichte B_F.*

Das Flimmerverfahren zeichnet sich, wie eingangs erwähnt wurde, leider durch das Vorhandensein einer gerade im praktisch wichtigen Bereich von 20 . . . 100 asb foveal wirksamen *Zunahme* von $V(\lambda)$ im *Rot* bei *Abnahme* der Leuchtdichte aus.

*

Nun bezeichnet man die *Zunahme* der *Blau*empfindlichkeit mit *abnehmender* Leuchtdichte unterhalb 10 asb wegen des Mitwirkens der in der Fovea centralis spärlichen, ausserhalb reichlich vorhandenen Stäbchen nach ihrem Entdecker den Purkinje-Effekt.

Vom rein phänomenologischen Standpunkt aus ist es verständlich, dass sich seit IVES für den erstgenannten Effekt wegen seiner Gegenläufigkeit gegenüber dem Purkinje-Effekt der Name „inverser Purkinje-Effekt" eingebürgert hat. Morphologisch haben die beiden Phänomene wohl nichts miteinander zu tun. Dies ist der Grund, weshalb wir den Namen „inverser Purkinje-Effekt" vermeiden und stets die schwerfälligere Bezeichnung „Leuchtdichte-Abhängigkeit" benutzen.

ROSENBERG[18]) hat mit einem Flimmerphotometer nach BECHSTEIN durch Vergleich von grünem mit gelblichem Filterlicht unterhalb $B_F = 14$ asb festgestellt, dass jedenfalls oberhalb 14 asb foveal kein Purkinje-Phänomen mehr vorhanden sei. Wir erwähnen dies, weil JAINSKI[9]), ausser JAGGI der einzige Autor, der neuerdings das ganze $V(\lambda)$ mit Spektrallichtern aufgenommen hat, irrtümlicherweise aus ROSENBERG's Ergebnis den Schluss zieht, dass jedenfalls zwischen 200 und 800 asb wegen des Fehlens des Purkinje-Effektes auf den genauen Wert der Leuchtdichte nicht geachtet zu werden brauche. Diese Schlussweise ist aber nicht statthaft.

DZIOBEK und REEB[19]) haben den „inversen Purkinje-Effekt" bei Natrium- und Neon-Licht bezogen auf Wolfram-Vakuum-Licht flimmer-photometrisch unterhalb 60 asb nachgewiesen.

JAGGI hat eben wegen der grossen Bedeutung der Leuchtdichte $V(\lambda)$ bei 6000 asb aufgenommen, um einmal die praktische Grenze gegen das Gebiet der Blendung hin festzulegen. Von ihm und DRESLER[14]) liegen ferner Messungen im Bereich von 5 . . . 200 asb an Farbgläsern vor, die eine starke Leuchtdichte-Abhängigkeit im Rot gegen 200 asb hin und einen schwachen gegenläufigen Einfluss im Blau und Grün erkennen lassen.

Der allgemeine Verlauf der Leuchtdichte-Abhängigkeit für den Sprung von $B_F = 35$ auf 500 asb, wie er sich aus unseren Messungen ergibt, wurde bereits in Fig. 1 (Kurven V' und V''') und Fig. 4 ((Kurven f' und f''') zum Ausdruck gebracht. Die Umrechnungsfunktion

$$\frac{V'}{V'''} = \frac{V(\lambda_1;\ \lambda_2,\ B_F = 500,\ B_{U+IZ} = {}^1/_5\, B_F)}{V(\lambda_1;\ \lambda_2,\ B_F = 35,\ B_{U+IZ} = B_F)} = \frac{f'}{f'''}$$

$$= \frac{f(\lambda_1;\ \lambda_2,\ B_F = 500,\ B_{U+IZ} = {}^1/_5\, B_F)}{f(\lambda_1;\ \lambda_2,\ B_F = 35,\ B_{U+IZ} = B_F)}$$

gilt es, hier näher zu begründen.

Um die Übersicht zu erleichtern, seien die verschiedenen Parameterübergänge schematisch dargestellt:

$$\begin{array}{ccc}
V', f' \begin{cases} B_F = 500 \text{ asb} \\ B_{U+IZ} = {}^1/_5\, B_F = 100 \end{cases} & \xrightarrow{B} & V'', f'' \begin{cases} B_F = 500 \text{ asb} \\ B_{U+IZ} = B_F = 500 \end{cases} \\
A \uparrow & & \uparrow D \\
V_o, f_o \begin{cases} B_F = 35 \text{ asb} \\ B_{U+IZ} = {}^1/_5\, B_F = 7 \end{cases} & \xrightarrow[C]{} & V''', f''' \begin{cases} B_F = 35 \text{ asb} \\ B_{U+IZ} = B_F = 35 \end{cases}
\end{array}$$

Hierin ist als neues Paar von Bezeichnungen nur f_0 und $V_o = f_o \cdot V(\lambda, \text{int})$ eingeführt worden. Betrachtet man A, B ... nicht nur als formale Bezeichnungen für die Übergänge, bei denen nur ein Parameter verändert wird, sondern als Funktionen

$$A = \frac{V'}{V_o} = \frac{f'}{f_o}, \quad B = \frac{V''}{V'} = \frac{f''}{f'}, \ldots,$$

so gilt:

$$A(\lambda_1) \cdot B(\lambda_1) = C(\lambda_1) \cdot D(\lambda_1)$$

Nun die Entstehung von A in Fig. 6. Zunächst ist festzustellen, ob eine nennenswerte Abhängigkeit von λ_2 berücksichtigt werden muss.

Kurvengruppe H. L. I zeigt: Für den farbtüchtigen Beobachter H. L. ist der allgemeine Verlauf der Leuchtdichte-Abhängigkeit von der Farbe des Vergleichslichtes in erster Näherung unabhängig.

Es hat also einen Sinn, hieraus

Kurve H. L. II: Mittelwert der Kurvengruppe H. L. I und weiterer diesbezüglicher Messungen, zu bilden.

Entsprechende Messungen an 6 Farbtüchtigen und leichte Ausgleichung führen zu

Kurve $A = V'/V_o$. Man erkennt:

Die Leuchtdichte-Abhängigkeit ist ein Maximum für das Verhältnis äusserstes Rot/Grün, und zwar rund 20% Abnahme für eine Zunahme von $B_F = 35$ *auf 500 asb.*

Dies sowie der Umstand, dass die unten besprochenen Kurven B und D ungefähr denselben Verlauf zeigen, erlaubt, für die photometrische Praxis folgende Regel aufzustellen:

Wenn man von einem Beobachter den Grad der Beeinflussbarkeit seines $V(\lambda)$ *durch Art der Apparatur (Flimmerfrequenz), Leuchtdichte, Zusatzleuchtdichte usw. kennen lernen will, so sollte man nicht sein Gelb/Blaugrün-Verhältnis (Y/B-ratio), sondern sein Rot/Grün-Verhältnis in Funktion dieser Parameter untersuchen.*

Die neuerdings viel untersuchten Verhältnisse $V(578)/V(546)$ und $V(589)\,V(546)$ sind nach unseren Ergebnssien ebenfalls ein geeigneter Indikator für das Verhalten von Beobachtern.

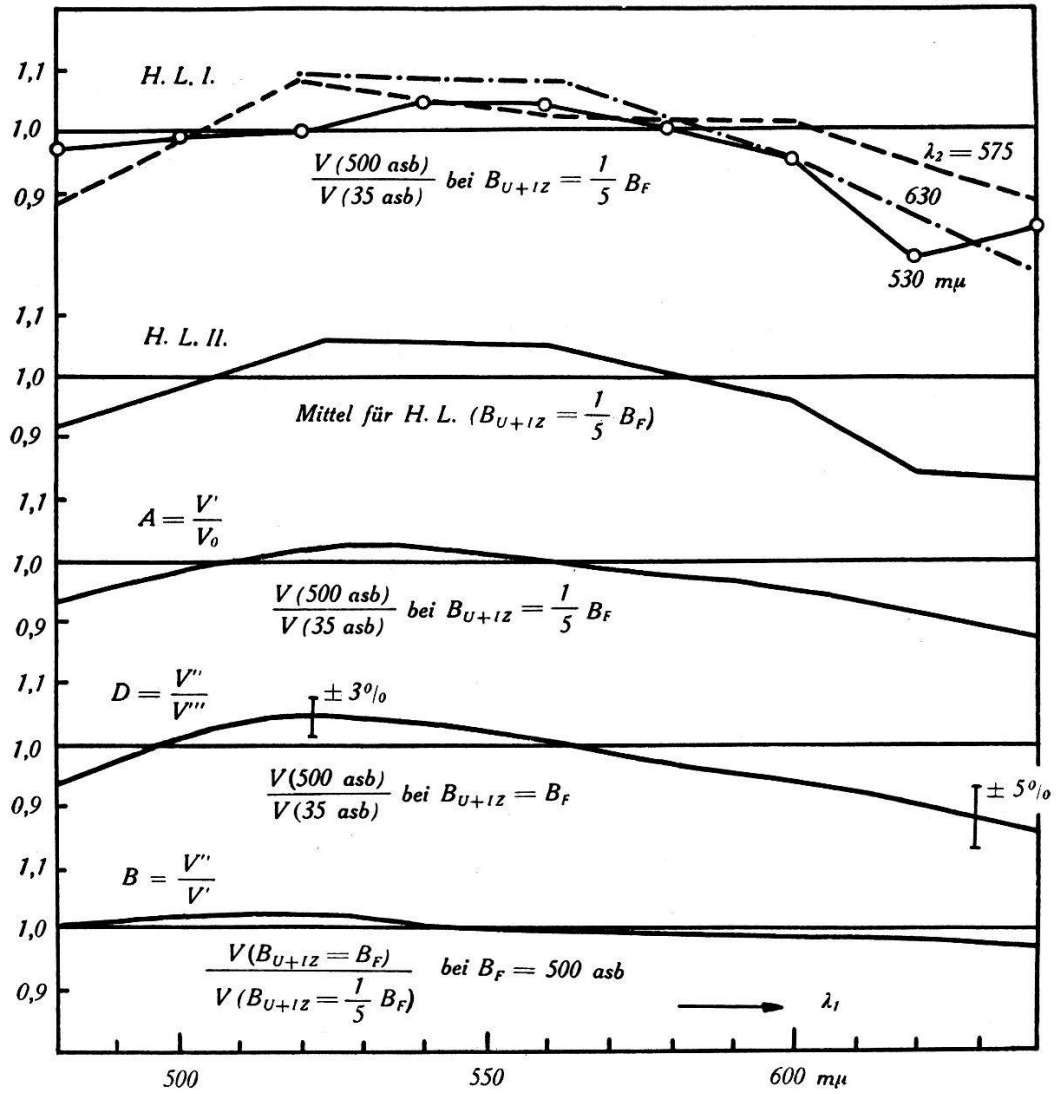

Fig. 6.

$V(\lambda_1)$ in Funktion von λ_2, B_F und B_{U+IZ}. Die Kurven A, D, B sind ausgeglichen worden; siehe den erläuternden Text.

Kurve $D = V''/V'''$: Entspricht A, ist aber für dieselben Beobachter bei $B_{U+IZ} = B_F$ aufgenommen worden. Die Abhängigkeit von B_F ist also durch Vergrösserung der U + IZ-Beleuchtung verstärkt worden. Hierauf und auf Kurve D wird im nächsten Abschnitt näher eingegangen.

$B/D = V'''/V'$ und $B = V''/V'$ sind die beiden Umrechnungsfunktionen, die in Fig. 4 zur Bestimmung von f' und f''' zur Anwendung gelangten. Zahlenmässig ergeben sie sich aus Tab. 1.

Bis jetzt war stets nur von der Grösse der Leuchtdichte-Abhängigkeit für den Sprung 35 → 500 asb die Rede. Fig. 7 zeigt

nun für 3 Farbtüchtige den näheren Verlauf in Funktion von B_F für Rot und Grün (bezogen auf $\lambda_2 = 575$ mμ) und für verschiedene $U + IZ$-Leuchtdichten. Man sieht:

Farbnormale weisen im Rot alle starke Verminderung der Hellempfindlichkeit auf; im Grün ist der Einfluss bedeutend geringer und für verschiedene Beobachter von wechselndem Vorzeichen.

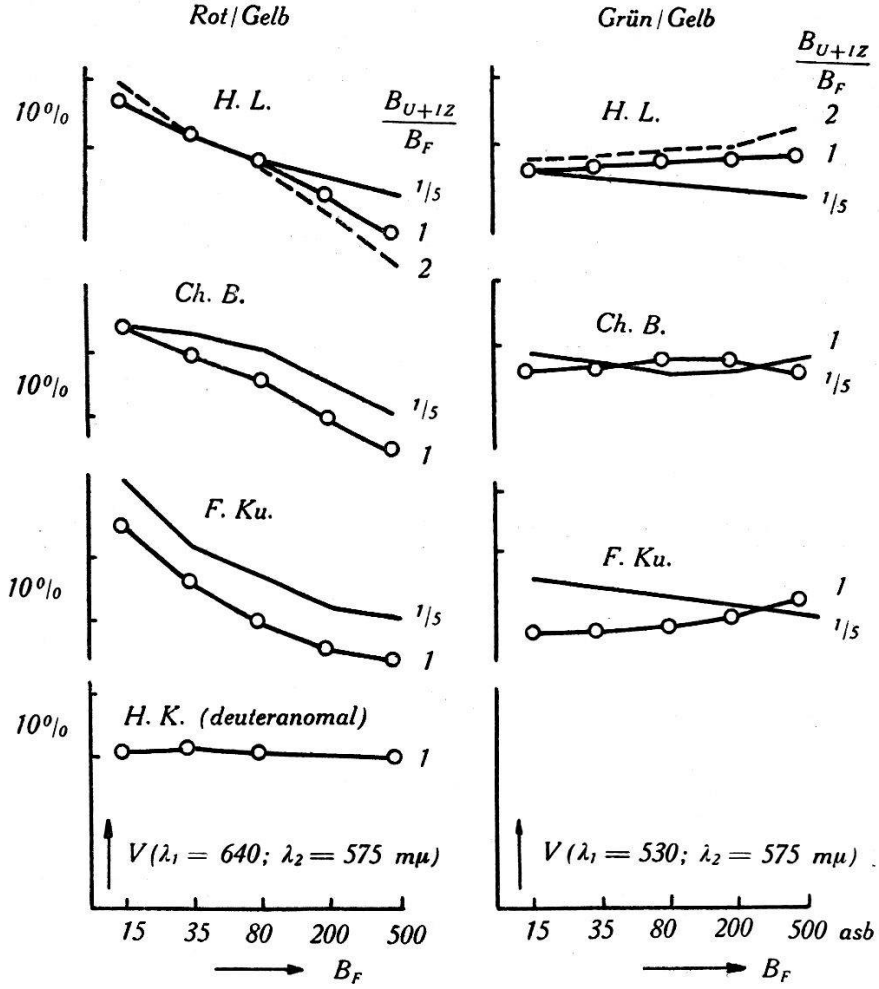

Fig. 7.

$V(\lambda_1)$ in Funktion von B_F und B_{U+IZ} für Rot und Grün, bezogen auf Gelb. Grössere Beeinflussung im Rot, vorwiegend Verstärkung der Leuchtdichteabhängigkeit durch $U+IZ$-Beleuchtung im Rot. Ordinaten in beliebigem relativen Masstab.

Jaggi[8]) hat bereits auf die photometrische Sonderstellung eines Deuteranomalen hingewiesen. Die Unempfindlichkeit seines $V(\lambda)$ gegenüber starken Änderungen von B_F geht erneut aus Fig. 7 hervor und stützt damit die aus Fig. 4, Kurven 8 und 9, gezogenen Folgerungen. Hieraus und aus weiteren, in Fig. 7 nicht enthaltenen Ergebnissen folgt:

Ein Deuteranomaler weist keine Leuchtdichte-Abhängigkeit auf; für die farbnormale Schwester dieses Deuteranomalen, einen Protanomalen und einen Protanopen gilt wahrscheinlich dasselbe.

Ein Blick auf den allgemeinen Verlauf und das Abszissenmass zeigt:

Im Durchschnitt verläuft im Rot die Leuchtdichte-Abhängigkeit zwischen 30 und 500 asb annähernd proportional dem Logarithmus der Leuchtdichte.

Hieraus und aus einer früheren Feststellung über die Grösse des Effektes folgt:

Die Leuchtdichte-Abhängigkeit des Verhältnisses Rot/Grün beträgt zwischen 35 und 500 asb je Sprung 1:2 ca. 5%, unabhängig von der Leuchtdichte, stellt also eine eigentliche Eigenschaft *des Auges dar.*

Es sei noch auf einen Widerspruch zwischen Fig. 6, Kurvengruppe H. L. II, Kurve $\lambda_2 = 575$ mμ, und Fig. 7, Kurvengruppe H. L., $\lambda_1 = 530$, $\lambda_2 = 575$, $B_{U+IZ}/B_F = 1/5$, hingewiesen. Aus der erstgenannten Kurve entnimmt man für V(500 asb)/V(35 asb) = ca. 1,05 bei $\lambda_1 = 530$ mμ, aus der zweitgenannten geht für dasselbe Verhältnis bei denselben Bedingungen 0,97 hervor. Im ersten Fall ist bei konstantem λ_2, B_F und B_{U+IZ} λ_1 variiert worden, wobei sich der Beobachter auf andere Farben umstellen musste; im zweiten Fall wurde stets bei derselben Farbe gearbeitet. Solche Vorzeichenwechsel kann man manchmal reproduzieren, manchmal gelingt es nicht. Aus dem sehr ausgedehnten Beobachtungsmaterial lässt sich schliessen, dass in diesem Fall die Kurvengruppe H. L. rechts in Fig. 7 abnormal ist und ein Anstieg aller drei Kurven mit steigendem B_F dem allgemeinen Verhalten des Beobachters besser entsprochen hätte.

4. *$V(\lambda)$ in Funktion der Umfeld- und Infeld-Zusatzleuchtdichte B_{U+IZ}.*

Die $U + IZ$-Beleuchtung wirkt physiologisch und psychologisch anders auf den Beobachter als die reine Umfeldbeleuchtung.

Theoretisch kann die Umfeld-Beleuchtung nur durch Wechselwirkung zwischen den Netzhautstellen und als Faktor im Prozess des Ausruhens wirken. Die $U + IZ$-Beleuchtung wirkt ausserdem dadurch, dass der Flimmerabgleich zweier Lichter durch denjenigen zweier weniger gesättigter Lichter höherer Leuchtdichte ersetzt wird. Es ist verständlich, dass zahlenmässig der Einfluss der reinen

Umfeldbeleuchtung wesentlich kleiner ist als derjenige der $U + IZ$-Beleuchtung; wir haben auch kein Vorzeichen eines Effektes festlegen können.

Praktisch unterscheidet sich die reine Umfeldbeleuchtung dadurch, dass die Struktur der Flimmerfeld-Blende sichtbar ist, während bei der $U + IZ$-Beleuchtung das Flimmerfeld wie eine fahle Scheibe durch einen absolut strukturlosen Nebel leuchtet.

Die $U + IZ$-Beleuchtung wird von allen Beobachtern als angenehm empfunden und darf allgemein als Massnahme zur Erleichterung des Abgleiches empfohlen werden.

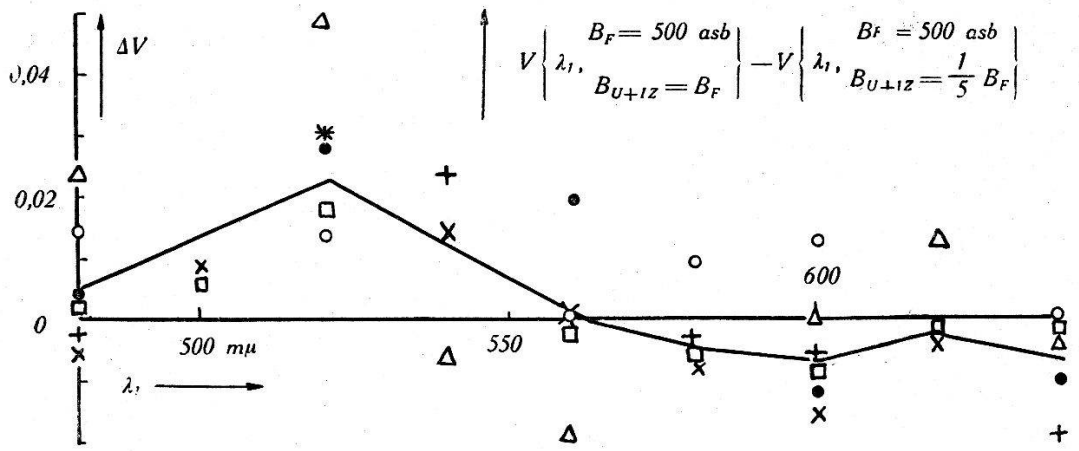

Fig. 8.

Einfluss von B_{U+IZ} bei $B_F = 500$ asb in ΔV-Darstellung. Die ausgezogene Kurve, welche ungefähr den Mittelwert darstellen soll, dividiert durch $V(\lambda$, int.), gibt Kurve B in Fig. 6.

Der Durchschnittsbeobachter bevorzugt bei $B_F = 35$ asb ein $B_{U+IZ} \approx B_F$, bei $B_{U+IZ} = 500$ asb ein $B_{U+IZ} \approx \frac{1}{2} B_F$. Geübte Beobachter streuen bei $B_{U+IZ} = 1 \ldots 2 \cdot B_F$ nicht mehr als bei $B_{U+IZ} \approx \frac{1}{2} B_F$, jedenfalls aber weniger als bei $B_{U+IZ} = 0$.

Den spektralen Verlauf des Einflusses von B_{U+IZ} zeigt Fig. 8: Nur mit einiger Mühe lässt sich aus den Messungen von 4 Farbnormalen ein Mittelwert herauslesen. Die ausgezogene Kurve dividiert durch $V(\lambda, \text{int})$ gibt Kurve B in Fig. 6. An die bedingte Gültigkeit dieser Funktion soll durch die in Fig. 6 vermerkten Unsicherheiten von 3% bzw. 5% erinnert werden.

Die Funktion C, das Analogon zu B für $B_F = 35$ asb, ist in Fig. 6 nicht enthalten, weil sie von 1 für alle λ um weniger als $\pm 1\%$ abweicht und innerhalb dieser Grenzen unsicher ist.

Während wir für die Abhängigkeit der Hellempfindlichkeit von λ_2 und B_F einen gewissen prozentualen, von der Leuchtdichte unabhängigen Wert (5% bzw. 3%) feststellen konnten, gilt für

die erheblich kompliziertere Abhängigkeit von B_{U+IZ} durchschnittlich nicht dasselbe: Kurve B in Fig. 6 weicht wesentlich mehr von der Einheit ab als C.

Diese Zunahme des relativen $U + IZ$-Einflusses mit der Leuchtdichte lässt es zweckmässig erscheinen, nicht mit höheren Leuchtdichten als $B_F \approx 200$ asb zu arbeiten.

Es mag sein, dass diese Zunahme einzig eine Nebenerscheinung zu dem Umstand ist, dass bei $B_F = 500$ asb die farbnormalen Beobachter über zu viel Licht klagen und leichter ermüden.

Da die allgemeine Form von A und B ausgenommen im Blaugrün gleich ist, bedeutet das Zuschalten von B_{U+IZ} fast im ganzen Spektrum für den Durchschnittsbeobachter *in dieser Apparatur* eine *Vergrösserung* der Leuchtdichteabhängigkeit.

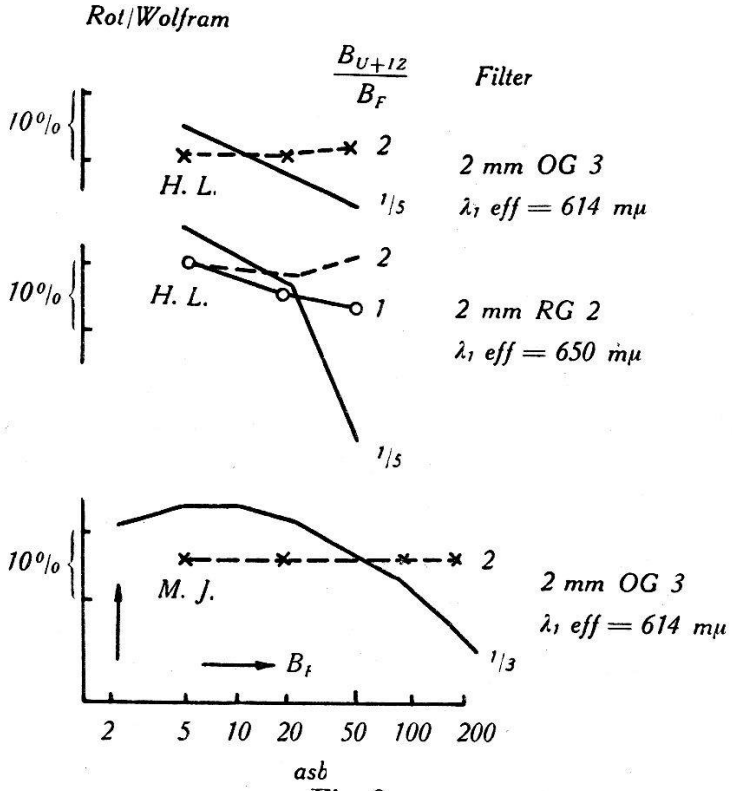

Fig. 9.

Verringerung der Leuchtdichte-Abhängigkeit im Rot durch $U + IZ$-Beleuchtung für 2 farbtüchtige Beobachter. Filterlicht, Bechstein-Flimmerphotometer.

Von besonderem Interesse ist nun die Feststellung, dass beim Bechstein-Flimmerphotometer, wie der Vergleich von Fig. 7 und 9 zeigt, für $B_{U+IZ} = 1/5$ oder $1/3$ B_F im Rot dieselbe Abhängigkeit von B_F, aber eine ganz andere Abhängigkeit von B_{U+IZ} herauskommt! Besonders eindrücklich sind die in Fig. 9 dargestellten unveröffentlichten Messungen von Jaggi, die eine restlose Beseitigung des Ganges mit B_F durch $B_{U+IZ} = 2\ B_F$ zeigen.

Die Diskrepanz gegenüber den mit unserer Apparatur gewonnenen Ergebnissen ist zu gross, als dass man den Umstand, dass es sich in einem Fall um Filterlicht, im andern Fall um Spektrallicht handelt, dafür verantwortlich machen könnte. Es liegt näher, einen Zusammenhang mit dem Übergang von einem Photometer-*Typ* auf den andern, im besondern mit der damit verbundenen Frequenzänderung zu vermuten.

Hier sei einstweilen nur festgehalten:

*Die Beeinflussbarkeit der Leuchtdichteabhängigkeit im Rot bei 50 asb durch die $U + IZ$-Beleuchtung hängt stark von der Art des Flimmerphotometers ab (Art des Farbwechsels, Frequenz). Im besonderen wird die Leuchtdichte-*Abhängigkeit *($\partial V(\lambda_1, B_F)/\partial B_F$) bei hartem Farbwechsel und hoher Frequenz* wenig *im Sinne einer* Verstärkung, *bei weichem Wechsel und niedriger Frequenz* deutlich *im Sinne einer* Beseitigung *der Abhängigkeit beeinflusst.*

In diesem Sinne verdient das Bechstein-Photometer wegen der Möglichkeit einer teilweisen Bekämpfung der Leuchtdichte-Abhängigkeit den Vorzug.

Durch diese Feststellungen wird alles, was über die B_{U+IZ}-Beleuchtung *allgemein* gesagt wird, mehr oder weniger problematisch. Man untersuche deshalb einen Beobachter mit

derjenigen Apparatur, an der man ihn nachher praktisch photometrieren lassen will, unter möglichst gleichen Messbedingungen bei Eichung und Anwendung.

Vergleichende Betrachtungen.

Über den Einfluss der Frequenz und die Art des Flimmerns. Beim Bechstein-Photometer nimmt der Farbwechsel mindestens 20% der Zeit in Anspruch; der Übergang kann als weich bezeichnet werden. Bei unserer Apparatur mit hartem Übergang beträgt er 1 . . . 2%. Beim Bechstein-Photometer beträgt die Flimmerfrequenz durchschnittlich 5, bei uns 15 vollständige Wechsel je Sekunde.

Dass es sich bei den im vorangehenden Abschnitt dargelegten Erscheinungen nicht *nur* um eine Frequenzangelegenheit handelt, geht daraus hervor, dass man nach Änderung von B_F bei absichtlich konstant gehaltener Frequenz ebenfalls eine Änderung von $V(\lambda)$ nachweisen kann.

Dass die Frequenz mitspielt, kann man durch folgende Versuchsreihe plausibel machen: Man zwingt sich, das eine Mal mit zu hoher Frequenz, also breiter flimmerfreier Zone und Bestimmung des Flimmereinsatzes zu beiden Seiten, das andere Mal

mit zu niedriger Frequenz, also mit verwaschenem Minimum zu arbeiten. Der Erniedrigung der Frequenz um 30%, die sich so erzwingen lässt, entspricht für $\lambda_2 = 575$, $\lambda_1 = 640$ mμ für den Farbtüchtigen H. L., welcher Tendenz zu verhältnismässig raschem Flimmern zeigte, ca. 5% Abnahme bei asb, ca. 10% Abnahme von $V(\lambda)$ bei 500 asb. Für den Deuteranomalen betragen die entsprechenden Werte ca. 2% bzw. 4%.

Theoretisch lässt sich vermuten, dass unsere Apparatur die Unterschiede im Empfindungsanstieg bei den verschiedenen Farben anders herausarbeitet als das Bechstein-Photometer.

Man könnte glauben, dass der Gedanke an die Frequenz alle ungeklärten Abweichungen unter einen gemeinsamen Gesichtspunkt zu bringen gestatte. In der Tat:

a) Jaggi's Kontrolle auf Eindeutigkeit führt zum Resultat: „Rot erniedrigt Rot"; damit läuft Hand in Hand: Erniedrigung der Frequenz wegen Gleichfarbigkeit.

b) Kurven 4 und 5 in Fig. 4: Jaggi's Kurve 5 liegt ab 640 mμ tiefer als unsere Kurve 4; bei Jaggi ist die Frequenz wesentlich kleiner als bei uns.

c) Erniedrigung von $V(\lambda)$ im Rot ist durch bewusste Frequenzverkleinerung zu erzielen, und

d) Bei Erhöhung von B_{U+IZ}, die im Rot zu einer Erniedrigung von $V(\lambda)$ führt, reduzieren normale Beobachter meistens ein wenig die Frequenz (Grössenordnung 10%).

Soweit stimmt alles zusammen, aber: Mit dem Bechstein-Photometer erhält man nach Fig. 9 oberhalb 50 asb eine Erhöhung von $V(\lambda)$ bei Vergrösserung von B_{U+IZ}, trotzdem damit eine leichte Frequenzerniedrigung verbunden *sein kann.*

Man erkennt, dass für die im Rot nach Abzug des durch Leuchtdichte-Abhängigkeit erklärbaren Teiles noch bleibenden Diskrepanzen in den $V(\lambda)$-Bestimmungen die Art des Flimmerns wohl ebenso sehr von Belang sein kann wie Jahreszeit und Ernährung. Eine definitive Abklärung erfordert die Möglichkeit des Veränderns der Flimmergüte. In unserer Apparatur liess sich dieser Gedanke leider nicht gut verwirklichen. Zur Lösung dieser Fragen ist der Bau eines Photometers mit Filterlicht, Netzanschluss und variabler Flimmergüte geplant.

Es sei nebenbei erwähnt, dass die Beobachter Ch. B. (normal) und H. K. (deuteranomal) im Mai 1941 für ein dunkles Rotglas (2 mm RG 2) innerhalb 4% dieselbe Durchlässigkeit mit dem Bechstein-Photometer fanden wie im Mai 1938.

Über die individuellen Unterschiede in der Grösse der Flimmerfrequenz und der Grösse von Effekten. Jeder Beobachter hat wieder seine besondere Eigenart. Aber wir glauben doch, andeutungsweise einen Zusammenhang insofern bemerkt zu haben, als Beobachter, welche mit hoher Flimmerfrequenz glauben arbeiten zu müssen, durchschnittlich grössere Effekte (Abhängigkeit von λ_2, B_F . . .) zeigen als Beobachter, die unter denselben Bedingungen langsamer flimmern. Der Deuteranomale H. K. arbeitet mit Frequenzen, die 10 . . . 20% unter dem Durchschnitt liegen.

Grundsätzliches über die Forderungen „helladaptiert" und „ausgeruht", die den Zustand des Auges determinieren sollen. Im Zusammenhang mit Fig. 7 wurde bewusst die ganze Entstehung der ausgeglichenen Kurve A erläutert, um keinen falschen Eindruck über den quantitativen Wert dieser Darstellung feinerer Effekte aufkommen zu lassen. Noch deutlicher mag Fig. 9 die Schwierigkeiten des Herausschälens von sinnvollen Mittelwerten zum Ausdruck bringen. Diese Schwierigkeiten sowie die in Ergebnisse 2) erwähnte Umkehrung der Reihenfolge von Kurven und der in Ergebnisse 3) hervorgehobene Widerspruch zwischen zwei vollwertigen unabhängigen Messreihen veranlassen uns zu einer grundsätzlichen Bemerkung über den zweckmässig einzuhaltenden Messmodus.

Helladaption auf z. B. 1000 asb und nachheriges Messen bei einigen 10 . . . 100 asb eignet sich nicht gut zur Ermittlung feinerer Effekte. Wir arbeiteten im hellen Zimmer; nur bei den Messungen mit $B_F = 15$ asb musste das Licht im Raum leicht gedämpft werden. Immerhin war Helladaption einigermassen gewährleistet.

Weniger einfach liegt der Fall bei der Frage des Ausruhens. Dass man beim Kolorimetrieren oder beim Photometrieren nach der Methode des direkten Vergleichs nach kurzem Blick auf das Feld sofort, d. h. möglichst schon nach einer Sekunde das Auge auf einem neutralen Feld ausruhen lässt, um Umstimmung zu vermeiden, ist durchaus in Ordnung. Das Flimmerverfahren hat nun den Vorteil, dem Auge nur den mittleren Farbeindruck zu zeigen, und wenn eine schädliche Umstimmung eintritt, so kann es sich nur um eine Differenzwirkung handeln. Es ist bekannt, dass man in dieser Hinsicht beim Flimmerverfahren nicht ängstlich zu sein braucht. Jaggi hat bei seinen Versuchen über Eindeutigkeit reproduzierbare Unterschiede von 2% je nach der Reihenfolge der Ausmessungen der Filter festgestellt. Bei diesen Versuchen wurde fast dauernd das Flimmerfeld fixiert; das Umfeld wurde nur gelegentlich rasch angeschaut. Diese Stabilität

unseres Auges gestattet also in der Praxis zwischen der Forderung des Ausruhenlassens nach jeder Einstellung und dem Bedürfnis nach rascher Arbeit relativ leicht einen mittleren Weg zu finden, der darin besteht, dass man rasch hintereinander einige Einstellungen, die gewöhnlich sehr wenig streuen, ausgeführt und dieses Vorgehen 2- oder 3mal wiederholt.

Etwas kritischer wird nun die Sachlage, wenn es sich darum handelt, zur Untersuchung eines bestimmten, wenige Prozente ausmachenden Effektes nach einem zeitlich knapp bemessenen Programm unter möglichster Beseitigung aller Faktoren, die die Streuung vermehren könnten, zu arbeiten. Dann leidet das Ausruhen etwas darunter. Ruht der Beobachter aber konsequent aus, so streut er zum Teil wegen Kriteriumswechsel, zum Teil weil das Ausruhen auch eine Ablenkung bedeutet, derart, dass der gesuchte Effekt unter der Streuung zu verschwinden droht.

Sind solche erzwungene Effekte als Eigenschaft des Auges anzuerkennen oder als nicht reell abzulehnen? *Beides* lässt sich begründen; weder das eine noch das andere ist allein richtig. Es gibt eben eine abgestufte Reihe von Realitätsgraden, bei denen die Methode mehr und mehr auf das Ergebnis bestimmend einwirkt. Aber es ist bekanntlich kein spezifisches Merkmal nichtphysikalischer Messergebnisse, sondern eine allgemeine Folge der Art unseres Erkennens, dass das Resultat den Stempel der Messmethode trägt. Nur kann im Gebiete der Physiologie die messtechnisch bedingte Komponente der zu bestimmenden „Eigenschaften" bereits beträchtlich sein.

Über die Leuchtdichte-Abhängigkeit einer Farbgleichung. Im Interesse des Anschlusses an andere Arbeiten wurde Wert darauf gelegt, im Gebiet stärkster Beeinflussbarkeit von $V(\lambda)$ eine Farbgleichung zu untersuchen. Im Doppelmonochromator (Fig. 3) wurde vor den Spalt S_4 eine Opalglaslampe mit Rotfilter 2 mm OG 3 eingebracht; λ_1 wurde gleich der effektiven Wellenlänge dieses Filters = 620 mμ gewählt.

Für den Farbnormalen H. L. wirkt das rote Filterlicht bei $B_F = 500$ asb, $B_{U+IZ} = {}^1/_5\, B_F$, bezogen auf das farbgleiche Spektralrot, ca. 3% mehr als bei 35 asb, $B_{U+IZ} = {}^1/_5\, B_F$. Bei $B_{U+IZ} = B_F$ für den normalen und unter allen Bedingungen für den Deuteranomalen ergibt sich weniger als 2%.

Die Grösse 3% ist verständlich, da es sich um einen Effekt höherer Ordnung, nämlich um die Auswirkung der *Krümmung* der Kurve B (Fig. 6) handelt.

Zusammenfassende Bemerkung über die allgemeine Grössenordnung der Abweichungen von der linear-eindeutigen Struktur. KÖNIG[20]) hat versucht, durch Modellbetrachtungen plausibel zu machen, dass die Abweichungen von der Eindeutigkeit mit den Abweichungen von der Linearität innerlich verwandt sind, wobei die ersteren Tendenz haben, praktisch weniger in Erscheinung zu treten. Da die Abhängigkeit von der Leuchtdichte eine spezifische Nichtlinearität darstellt, kann man theoretisch vermuten, dass

Abhängigkeit des $V(\lambda)$ von $\lambda_2 <$	Abhängigkeit des $V(\lambda)$ von B_F je Sprung 1 : 2

In der Tat konnten wir bei Farbtüchtigen oben in beiden Versuchsgruppen die charakteristischen Fehlerkategorien von 5% für die Enden und 3% für die Mitte des Spektrums feststellen.

Für den Deuteranomalen sind in beiden Fällen engere Grenzen nachgewiesen.

Praktisch bedeutet dies, dass man sich bei der orientierenden Prüfung von Beobachtern wahrscheinlich auf die experimentell wesentlich einfachere Versuchsgruppe der spezifischen Additivitätsprüfungen (insbesondere die Abhängigkeit von B_F, ev. noch von B_{U+IZ}) wird beschränken dürfen.

Die vorliegende Arbeit wurde in den Jahren 1940/41 unter der Leitung von Prof. Dr. H. KÖNIG im Eidg. Amt für Mass und Gewicht in Bern ausgeführt.

Mein herzlicher Dank gebührt: Herrn Direktor BUCHMÜLLER für die Aufnahme in sein Institut, Herrn Prof. KÖNIG für seine Anregungen und stets fördernde Hilfsbereitschaft, sowie allen Beobachtern für ihre Ausdauer und Sorgfalt, mit denen sie die oft ermüdenden Messungen ausgeführt haben.

Eidg. Amt für Mass und Gewicht, Bern,

Literatur.

[1]) Commission Internationale de l'Eclairage, Compte-rendu Genève 1924 (Cambridge 1926), S. 67.

[2]) Commission Internationale de l'Eclairage, Compte-rendu Scheveningen 1939, Report 5. Erscheint demnächst.

[3]) ARNDT, Das Licht **6**, 75 (1936).

[4]) DRESLER, Das Licht **7**, 81 (1937).

[5]) RIECK, Das Licht **7**, 215 (1937).

[6]) Dresler, Das Licht **7**, 203 (1937).
[7]) Preston, Proc. Phys. Soc. **50**, 398 (1938).
[8]) Jaggi, Helv. Phys. Acta **12**, 77 (1939).
[9]) Jainski, Diss. T. H. Berlin, Union Deutsche Verlagsgesellschaft Berlin 1938; Auszug: Das Licht **8**, 245 (1938).
[10]) Forsythe, Barnes und Shrider, Journ. Opt. Soc. Amer. **28**, 241 (1938).
[11]) Ives, Phil. Mag. **24**, 149, 352, 744, 845, 853 (1912).
[12]) Preston, Proc. Phys. Soc. **51**, 757 (1939).
[13]) Dresler, Das Licht **10**, 79 (1940).
[14]) Dresler, Die Naturwissenschaften **29**, 225 (1941).
[15]) König, Bulletin des Schweiz. El.-tech. Vereins **30**, 729 (1939).
[16]) Bechstein, Zeitschr. f. Instrumentenkunde **25**, 45 (1905).
[17]) Coblentz u. Emerson, Bur. of Stand. J. of Research **14**, 167 (1917).
[18]) Rosenberg, Zeitschr. f. Sinnesphysiologie **59**, 103 (1928).
[19]) Dziobek und Reeb, Physikal. Zeitschr. **35**, 545 (1934).
[20]) König, Helv. Phys. Acta **15**, 85, 1942.