

Zeitschrift:	Helvetica Physica Acta
Band:	12 (1939)
Heft:	IV
Artikel:	Über die Anwendung des Filterverfahrens in der objektiven heterochromen Photometrie
Autor:	König, H.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-110942

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: 24.01.2026

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

Über die Anwendung des Filterverfahrens in der objektiven heterochromen Photometrie

von H. König (Bern)

(Mitteilung aus dem Eidg. Amt für Mass und Gewicht)

(3. V. 39.)

Zusammenfassung. Die Arbeit bezweckt:

1. Ein Beobachtungsmaterial und damit einen allgemeinen Eindruck über das praktische Verhalten verschiedener gefilterter und ungefilterter Selen-Sperrschichtzellen gegenüber gelbem und rotem Licht zu übermitteln;
2. an Hand dieses Materials zu zeigen, dass die in der subjektiven Photometrie übliche Verwendung von Filtern zur teilweisen spektralen Angleichung auch bei objektiven Empfängern angezeigt erscheint;
3. zu zeigen, dass unter Benützung passender Filter eine Primärvergleichung von monochromatischem Licht des mittleren Teiles des sichtbaren Spektrums mit Glühlampenlicht mittelst solcher Zellen auf 2% genau möglich ist, und
4. zu zeigen, dass das künstliche Präzisionsauge, bestehend aus Thermosäule und Kombinationsfilter, im mittleren Teil des sichtbaren Spektrums, bezogen auf die spektralphotometrischen Daten, gefilterte Glühlampenstrahlungen sicher auf 1% genau misst.

Einleitung und Problemstellung.

Wenn ein objektiver Empfänger mit der Empfindlichkeitsfunktion $Z(\lambda)$ zwei spektralrelativ gleiche Lichter $E_1(\lambda)$ und $E_2(\lambda)$ ($E_1(\lambda) = \text{konst.} \cdot E_2(\lambda)$) zu vergleichen hat, so ist der Verlauf von $Z(\lambda)$ für die Bewertung des Verhältnisses

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\int E_1(\lambda) Z(\lambda) d\lambda}{\int E_2(\lambda) Z(\lambda) d\lambda} = \frac{E_1(\lambda)}{E_2(\lambda)} = \text{konst.}$$

ohne Einfluss.

Ist die spektrale Ungleichheit relativ gering, wie im Falle von Fig. 1, wo der durch das steilflankige Differenzfilter $\tau_{ab} = \tau_a - \tau_b$ aus der Glühlampenstrahlung $E(\lambda, T)$ ausgesonderte, relativ enge Spektralbereich mit der im selbigen Bereich liegenden monochromatischen Strahlung $e(\lambda_1)$ verglichen werden soll, so fällt offenbar eine gewisse Unkenntnis von $Z(\lambda)$ nicht stark ins Gewicht.

Der Fall, dass man über $Z(\lambda)$ sehr wenig weiß, liegt vor in der subjektiven Photometrie, wo man höchstens mit der Kenntnis des y/b -ratio¹⁾ rechnen kann. Wir haben kürzlich gezeigt²⁾, wie breit der Durchlassbereich und der Spielraum im Schwerpunkt

von τ_{ab} , m. a. W. wie gross der *Grad der spektralen Ungleichheit* zwischen gefilterten und monochromatischem Licht sein darf, damit subjektive Messergebnisse möglich sind, die noch als Präzisionsergebnisse gewertet werden dürfen.

Es liegt nun nahe, anzunehmen, dass für den Fall eines *objektiven* Empfängers eine solche Beschränkung theoretisch ganz unnötig sei, dass also ein „Filterverfahren der objektiven Photometrie“ nicht von Interesse sei. In der Tat kann man, wenn man

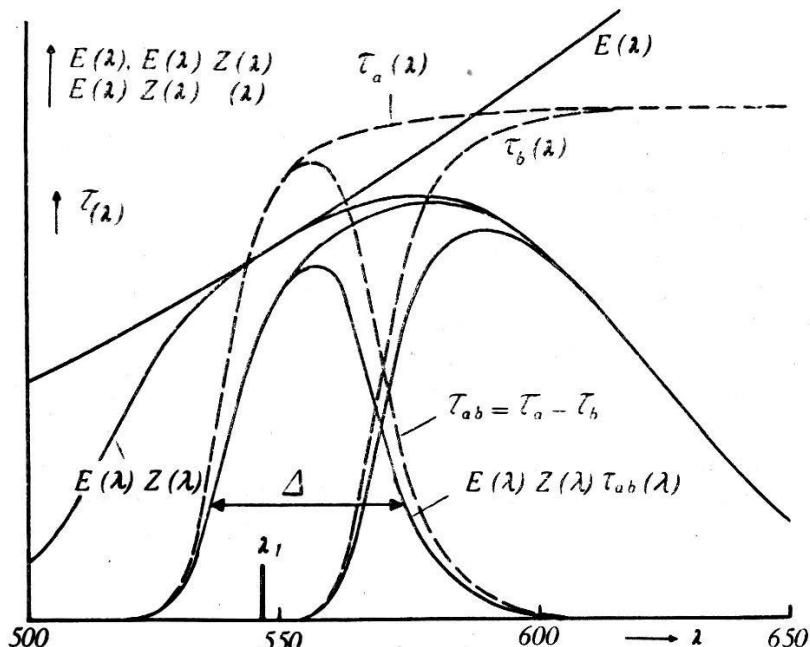


Fig. 1.

Ausfiltern des die Linie λ_1 umgebenden Bereiches Δ aus der Strahlung $E(\lambda)$ mittelst der Empfindlichkeitsfunktion $Z(\lambda)$ und dem (reduziert dargestellten) Differenzfilter $\tau_{ab}(\lambda) = \tau_a(\lambda) - \tau_b(\lambda)$.

das unter den betreffenden Messbedingungen wirksame $Z(\lambda)$ kennt und der Empfänger linear arbeitet, für die zwei Typen von Strahlungen $E(\lambda, T)$ und $e(\lambda_1)$ den Korrekturfaktor

$$f = \frac{e(\lambda_1) V(\lambda_1, \text{int})}{\int E(\lambda, T) V(\lambda, \text{int}) d\lambda} : \frac{e(\lambda_1) Z(\lambda_1)}{\int E(\lambda, T) Z(\lambda) d\lambda}$$

($V(\lambda, \text{int})$ = internationale Hellempfindlichkeit³), wie dies KREFFT⁴ schon getan hat, berechnen, das gemessene Verhältnis

$$\frac{e(\lambda_1) Z(\lambda_1)}{\int E(\lambda, T) Z(\lambda) d\lambda}$$

damit multiplizieren, womit das sog. $V(\lambda, \text{int})$ -getreue Verhältnis gewonnen ist.

In der Praxis sieht das Problem anders aus.

Man möchte der Einfachheit halber gern mit Selen-Sperrschichtzellen arbeiten, aber man möchte ausser etwa der Anbringung der Instrumenten-Korrektionen zu keinen Korrekturen und Kunstgriffen Zuflucht nehmen müssen. Man kann nicht immer „ballistisch“ messen⁵⁾, um die Eindeutigkeit der Ergebnisse im Rot heraufzudrücken. Die Proportionalitätsfehler sind bei jeder Zelle anders⁶⁾, und meist kennt man sie nur für weisses Licht. Gewisse Zellen leiden sogar im angenehmen Beleuchtungsbereich von 5 bis 10 lx noch an kriechender Einstellung. Diesem Hamaker-Beehold-Effekt⁷⁾, der sich in einer Nicht-Proportionalität äussern kann, sind die meisten Zellen unter der schwachen, bei der Aufnahme von $Z(\lambda)$ mit dem Monochromator herrschenden Beleuchtung unterworfen. Will man bei letzterem Experiment die Beleuchtung hinauftreiben, so ist dies nur durch Vergrössern der Spalten möglich oder dadurch, dass die Eichstrahlung auf einen Teil der Zelle konzentriert wird; dann aber muss untersucht werden, ob die Zelle spektral homogen, $Z(\lambda)$ also überall relativ gleich sei, was bei vielen Zellen nicht hinreichend der Fall ist. Und nicht zuletzt muss die Eichstrahlung mit der Thermosäule richtig gemessen oder aus der Energieverteilung der Monochromatorlampe und der Dispersion und Absorption des Monochromators richtig abgeleitet werden.

Aber alle diese Sorgen des Präzisions-Photometrikers interessieren den Praktiker nicht. Bei seiner Art der Messung können die schlechten Eigenschaften der Selen-Sperrschichtzellen teilweise zur Auswirkung gelangen. Das $Z(\lambda)$ mag noch so sorgfältig bestimmt worden sein — es braucht für die Bedingungen, unter denen es angewendet wird, nur angenähert zu gelten.

Von dieser *praktischen* Situation ausgehend, können wir zeigen, dass es angezeigt ist, die von der monochromatischen Strahlung weiter entfernten Teile des kontinuierlichen Vergleichsspektrums wegzufiltern und dadurch die Zelle zu entlasten. Darüber hinaus wird sich zeigen, dass dieses Prinzip des Filterverfahrens auch bei der Thermosäule mit Kombinationsfilter sich wohltätig auswirkt.

Wie weit man in der Filterung gehen soll, ist ebenfalls eine nur praktisch beantwortbare Frage. Die Zuverlässigkeit von Messungen mit Filtern, sei es deren Eichung oder Anwendung, sinkt mit der Durchlässigkeit, wodurch der Gewinn durch Verbesserung des Grades der spektralen Gleichheit aufgehoben wird. Das Optimum dürfte bei einer Durchlässigkeit von 30 . . . 70% liegen.

Experimentelle Grundlagen.

Die Untersuchung besteht experimentell aus drei Teilen:

1) Prüfung, ob für eine Anzahl von gefilterten und ungefilterten Selen-Sperrsichtzellen aus der „bekannten“ Empfindlichkeitskurve $Z_r(\lambda)$, $r = 2 \dots 8$ und der „bekannten“ Energieverteilung einer Glühlampe $E(\lambda, 2720^\circ)$ für eine Serie von sechs optimalen Gelb- und Rotgläsern, deren spektrale Durchlässigkeit $\tau_i(\lambda)$ „bekannt“ ist, die berechnete Durchlässigkeit

$$_r\bar{\tau}_i \text{ (ber.)} = \frac{\int E(\lambda, 2720^\circ) Z_r(\lambda) \tau_i(\lambda) d\lambda}{\int E(\lambda, 2720^\circ) Z_r(\lambda) d\lambda} \quad (400 < \lambda < 720 \text{ nm})$$

übereinstimmt mit der direkt gemessenen Durchlässigkeit in %

$$_r\bar{\tau}_i \text{ (gem.)} = \frac{\text{Galv. ausschlag mit Filter}}{\text{Galv. ausschlag ohne Filter}} \cdot 100.$$

2) Prüfung, ob für zwei hinsichtlich ihrer Energie *nicht* bekannte monochromatische Strahlungen ($\lambda = 546$ und 578) die aus den $Z_r(\lambda)$ -Kurven entnommenen Wertreihen $Z_r(546)$ und $Z_r(578)$ mit den entsprechenden gemessenen Ausschlägen $a_r(546)$ bzw. $a_r(578)$ bis auf einen (für jede Reihe gesonderten) Faktor übereinstimmen.

3) Kontrolle, ob das künstliche Präzisionsauge, bestehend aus Thermosäule und Kombinationsfilter⁸⁾, in dieser Untersuchung als Empfänger Nr. 1 betrachtet, die spektralphotometrisch gewonnenen Werte ${}_1\tau_i(\text{ber.})$ bestätigt, also $V(\lambda, \text{int.})$ -getreu misst.

Notwendige Vorarbeiten:

1) Bestimmung der Farbtemperatur der Glühlampe mittelst Thermosäule und Kombinationsfilter⁸⁾, Ergebnis: $2720^\circ \pm 10^\circ$.

2) Bestimmung der spektralen Durchlässigkeit der schon in früheren Arbeiten⁹⁾¹⁰⁾ erwähnten Gelb-Rot-Filterserie von SCHOTT, dargestellt in Fig. 2.

3) Eichung der für die Bestimmung von $Z_r(\lambda)$ notwendigen Strahlung des Monochromators mittelst Thermosäule und Galvanometer Zc (Zernike) unter Vermeidung falschen Lichtes und bei so weiten Spalten ($5 \dots 15 \text{ nm}$), als normalerweise ohne Anbringung der Paschen-Runge-Korrektur noch zulässig erscheint (Zweck: Erzielung einer möglichst grossen Leuchtdichte im mittleren Spektralbereich (ca. 10 lx)).

Empfänger. Das Hauptaugenmerk verdienen die Empfänger Nr. 2 ... 8, lauter Selen-Sperrsichtzellen mit und ohne Filter.

Beiläufig, als Kontrolle, wird als Empfänger Nr. 1 das obgenannte künstliche Präzisionsauge⁸⁾ mit betrachtet.

Besondere Bemerkungen:

Nr. 1: Es wird $Z_1(\lambda) = V(\lambda, \text{int})$ gewählt; wir legen also der Rechnung (Werte Nr. 1, ber., in Tab. 1) nicht die wahre, a. a. O.⁸⁾ gegebene Empfindlichkeitskurve, sondern die damit fast gleiche internationale $V(\lambda, \text{int})$ -Kurve zugrunde.

Nr. 2: $Z_2(\lambda)$: Zelle von B. LANGE, ohne Filter. In Tab. 1ff. sind unter Nr. 2, ber., jeweils drei Werte unter einander angegeben; beim obersten und mittleren Wert handelt es sich um zwei mehrere Wochen auseinanderliegende, in gleicher Anordnung (Mitte der Zelle bestrahlt) gemachte Aufnahmen von $Z_2(\lambda)$; der unterste Wert bezieht sich auf homogene, aber nur halb so grosse Belichtung der ganzen Zelle.

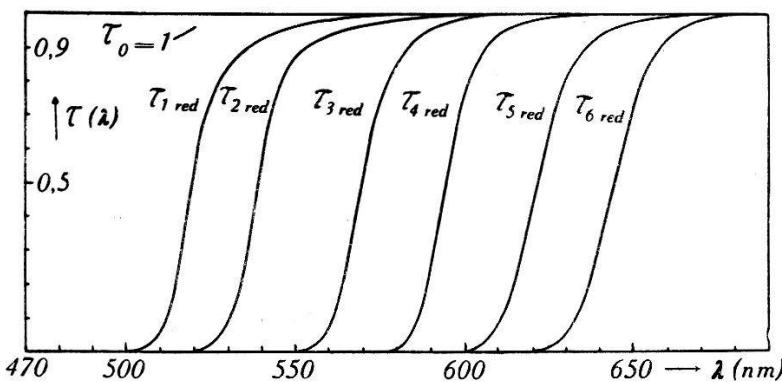


Fig. 2.

Gelb-Rot-Filterserie von SCHOTT; reduzierte spektrale Durchlässigkeiten $\tau_{i \text{ red}}(\lambda)$ (ohne Reflexionsverlust).

Nr. 3: $Z_3(\lambda)$: Zelle Typ S 41 von TUNGSRAM, ohne Filter, fast homogen beleuchtet.

Nr. 4: $Z_4(\lambda)$: Zelle von WESTON, Fabr.-Nr. 2271, ohne Filter, Eigenschaften siehe⁵⁾. $Z_4(\lambda)$ ist für alle Stellen der Zelle nahezu gleich; der Rechnung zugrunde gelegt sind die Messwerte für die mittlere Partie von 1 cm Durchmesser.

Nr. 5: $Z_5(\lambda)$: Photronelement nach DRESLER. Da diese Zelle nicht homogen mit Filtern bedeckt ist, muss sie von der Eichstrahlung möglichst umspült werden, was auf Kosten der Stärke der Beleuchtung geht.

Nr. 6: $Z_6(\lambda)$: Viscorzelle von WESTON, homogen mit Filter bedeckt. Da diese Zelle bei Beleuchtungen von 10 lx noch Trägheitserscheinungen zeigt, wurde die Monochromatorstrahlung auf die zentrale Hälfte konzentriert.

Nr. 7: $Z_7(\lambda)$: Die als Nr. 3 erwähnte Zelle S 41, gefiltert mit 1 mm BG 14 + 1 mm OG 4.

Nr. 8: $Z_8(\lambda)$: Die als Nr. 4 erwähnte Zelle 2271, gefiltert mit 1 mm BG 18 + 1 mm OG 3b.

Bestrahlte Fläche bei Nr. 7 und 8: Zentrale Partie von 1 cm Durchmesser. Die bei diesen beiden Zellen benutzten Filter haben in erster Linie die Aufgabe, den für den Hauptanteil der Ermüdungserscheinungen verantwortlichen roten Teil zurücktreten zu lassen (Filter BG 14 bzw. BG 18). Um die dadurch bedingte Verschiebung des Schwerpunkts der Zellenempfindlichkeit gegen Blau rückgängig zu machen, ist auch die Blauempfindlichkeit geschwächt worden (Filter OG 4 bzw. OG 3b). Auf Angleichung an $V(\lambda, \text{int})$ ist hier nicht geachtet worden.

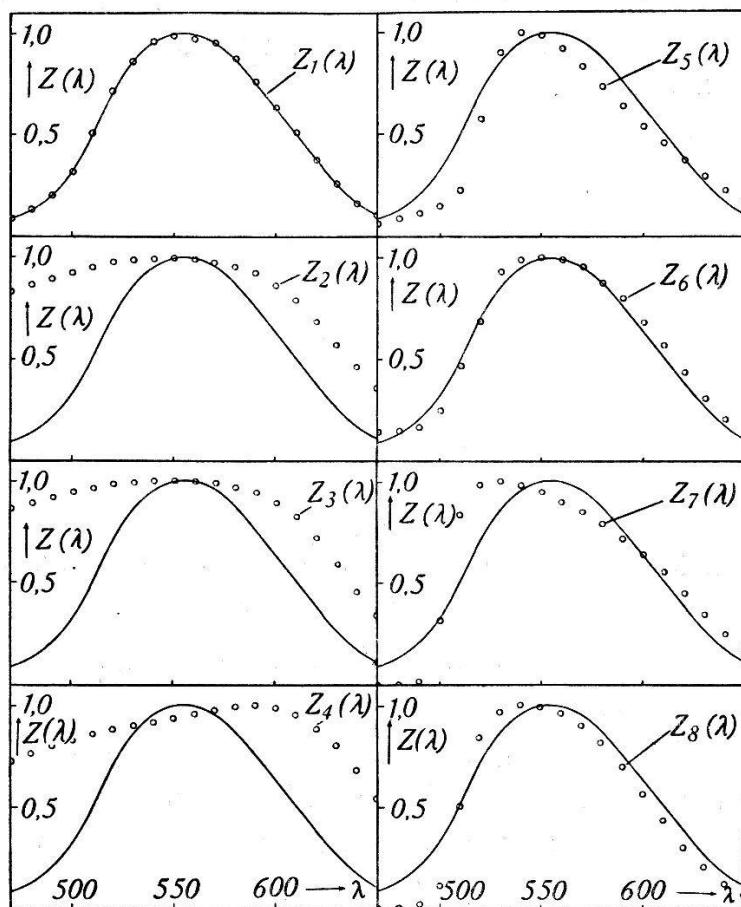


Fig. 3.

Empfindlichkeitskurven $Z_r(\lambda)$ der benutzten Empfänger. Ausgezogene Kurven: $V(\lambda, \text{int.})$.

Die Empfindlichkeitskurven von $Z_r(\lambda)$ sind in Fig. 3 wiedergegeben.

Die Durchführung der Messungen erfolgte nach dem Substitutionsprinzip: Die Zellen wurden der Reihe nach möglichst an dieselbe Stelle im Strahlengang gebracht, und die Konstanz der Lichtquellen wurde mit einer in den Strahlengang schiebbaren

Zelle kontrolliert. Die Glühlampe (Abstand 60 cm) konnte auf einem Verschiebereiter vor die Hg-Lampe (Abstand 80 cm) in den Strahlengang geschoben werden. Beleuchtung: $\leq 50 \text{ lx}$.

Dem Sinne der Untersuchung entsprechend sind die in Tab. 1, Nr. 2...8, gem., wiedergegebenen Zahlen direkte Ablesungen am (elektrisch fehlerlosen) Lichtmarkeninstrument, und zwar beim gefilterten Glühlampenlicht Einzelmessungen oder Mittel aus zwei Einzelmessungen, bei den Quecksilberlinien, mit Rücksicht auf die Schwankungen von 1...2%, max. 5% der Hg-Lampe, Mittel aus mehreren Messungen. Untereinanderstehende gemessene Zahlen, die zu demselben Empfänger gehören, entsprechen Messreihen, die an verschiedenen Tagen ausgeführt wurden. Nirgends wurde eine „schlechte“ Messreihe durch eine „bessere“ ersetzt.

Die Messergebnisse werden in Tabellenform gegeben, weil der Messtechniker aus den Zahlen mehr herauslesen kann als aus der graphischen Darstellung.

Lichtquellen: Glühlampe: Osram 8,5 V, betrieben mit 6,5 V, an Batterie von 1200 Ah. Quecksilberlampe: Osram Hg Q 300, Klarglas, über elektromagnetischem Stabilisator am Netz liegend. Aussonderung der Linien 546 und 578 mittelst Zeiss-Filter A und B.

Ergebnisse.

Tabelle 1: Gibt die gemessenen und berechneten $\bar{\tau}_i$ -Werte wieder.

Zunächst Empfänger Nr. 1. Aus verschiedenen Gründen wären wir berechtigt, die spektralphotometrischen Werte (ber.) als etwas zu niedrig, die gemessenen Werte als wegen Reflexion etwas zu hoch anzunehmen, so dass die Differenz bei $_{1}\bar{\tau}_3$ 1%, bei $_{1}\bar{\tau}_4$ $1\frac{1}{2}\%$ und bei $_{1}\bar{\tau}_5$ 2% nicht übersteigt. Für die Diskussion der Ergebnisse der Empfänger 2—8 ist der genaue Wert von $_{1}\bar{\tau}_i$ minder wichtig. Hauptsache ist, dass behauptet werden darf, dass dieses künstliche Präzisionsauge die hochdurchlässigen Filter auf $\frac{1}{2}\%$, diejenigen mit einem $\bar{\tau}$ von 20...50% auf 1% sicher auszumessen gestattet.

Was die Empfänger Nr. 2—8 anbelangt, so überlassen wir es dem Photometriker, zu beurteilen, ob er über die teilweise gute Übereinstimmung zwischen den auf so verschiedene Arten gewonnenen Ergebnissen erfreut oder wegen gewisser Diskrepanzen enttäuscht sein will. Besonders gross ist die Abweichung bei Nr. 2, Rotfilter τ_6 . Als Ursache dürfen wir ansehen: Die Nichtberücksichtigung der Ultrarotempfindlichkeit, die Summations-

wirkung (Ungültigkeit des Superpositionsgegesetzes)⁵⁾, und vielleicht auch ein gewisser Mangel an Vorsicht in der Wahl der Spaltbreite im Rot.

Tabelle 1.

Vergleich der Durchlässigkeiten einer Gelb-Rot-Filterserie; berechnet: aus spektralphotometrischen Daten, gemessen: mittelst verschiedener Selen-Sperrsichtzellen mit und ohne Filter (Nr. 1: ber.: $V(\lambda, \text{int.})$ -getreu berechnet; gemessen: mit Thermosäule und Kombinationsfilter gemessen).

Filter	F41 $r\bar{\tau}_1$		F42 $r\bar{\tau}_2$		F43 $r\bar{\tau}_3$		F44 $r\bar{\tau}_4$		F45 $r\bar{\tau}_5$		F8 $r\bar{\tau}_6$	
	Empf.	ber.	gem.	ber.	gem.	ber.	gem.	ber.	gem.	ber.	gem.	ber.
Nr. 1	80,7	81,0	70,0	70,3	46,8	47,4	27,0	27,6	11,3	11,7	4,1	4,2
$r = 2$	70,7	71,2	63,1	61,0	48,7	51,1	34,8	38,7	20,2	24,8	10,6	15,2
	70,6	71,2	62,9	63,9	48,6	51,2	34,7	38,6	20,1	24,7	10,5	15,3
	72,1		64,7		50,8		36,7		21,3		11,0	
3	70,3	69,4	62,6	62,0	48,3	47,9	34,3	34,7	19,2	19,7	9,3	9,7
4	74,4	74,0	67,9	67,0	55,3	54,6	41,8	41,6	25,7	25,3	13,4	13,3
		73,8		67,0		54,5		41,6		25,9		13,8
						54,5		41,2		25,2		13,2
5	83,9	83,2	72,8	71,1	49,7	46,6	31,9	29,0	17,0	14,1	8,4	6,2
		83,0		71,0		46,5		29,1		14,3		6,6
6	81,4	83,0	70,5	72,2	48,4	50,0	29,1	30,3	12,6	12,6	4,7	4,2
	82,2			71,3		48,8		29,3		11,9		4,0
7	80,9	81,9	69,2	69,9	48,8	49,6	31,7	32,7	16,0	16,2	7,4	7,0
	81,3			69,8		49,7		32,9		16,5		7,5
8	82,6	83,3	69,5	69,7	44,2	43,8	23,9	23,7	9,0	8,1	3,2	2,1
		83,5		69,7		43,7		23,2		8,4		2,4
		82,8		68,9		43,1		22,9		8,0		2,0

Einen schärferen Einblick bietet *Tabelle 2*, in welcher die Differenzen

$$r\bar{\tau}_{ik} = r\bar{\tau}_i - r\bar{\tau}_k,$$

welche Messungen in den von den τ_{ik} ausgesonderten Spektralbereichen entsprechen, bzw.

Tabelle 2a, in welcher die in Tab. 2 berechneten Quotienten

$$rq_{ik} = \frac{r\bar{\tau}_{ik} (\text{gemessen})}{r\bar{\tau}_{ik} (\text{berechnet})} \quad \left(rq_6 = \frac{r\bar{\tau}_6 (\text{gem.})}{r\bar{\tau}_6 (\text{ber.})} \right)$$

wiedergegeben sind. (Eine Umrechnung der Ergebnisse zur Aus-

schaltung des Einflusses der Reflexion wurde nicht vorgenommen, so dass in Tab. 2 die $\bar{\tau}_{01}$ -Werte um ca. 8% vermindert werden müssten, wenn τ_{01} die Verhältnisse im Blau rein darstellen soll.)

Tabelle 2.

Aus Tab. 1 abgeleitete Durchlässigkeitswerte für die Differenzfilter τ_{ik} .

Filter Empf.	$r\bar{\tau}_{01}$		$r\bar{\tau}_{12}$		$r\bar{\tau}_{23}$		$r\bar{\tau}_{34}$		$r\bar{\tau}_{45}$		$r\bar{\tau}_{56}$		$r\bar{\tau}_6$	
	ber.	gem.	ber.	gem.										
Nr. 1	19,3	19,0	10,7	10,7	23,2	22,9	19,8	19,8	15,7	15,9	7,2	7,5	4,1	4,2
$r = 2$	29,3	28,8	7,6	7,2	14,4	12,9	13,9	12,4	14,6	13,9	9,6	9,6	10,6	15,2
	29,4	28,8	7,7	7,3	14,3	12,7	13,9	12,6	14,6	13,9	9,6	9,4	10,5	15,3
	27,9		7,4		13,9		14,1		15,4		10,3		11,0	
3	29,7	30,6	7,7	7,4	14,3	14,1	14,0	13,2	15,1	15,0	9,9	10,0	9,3	9,7
4	25,6	26,0	6,5	7,0	12,6	12,4	13,5	13,0	16,1	16,3	12,3	12,0	13,4	13,3
		26,2		6,8		12,5		12,9		15,7		12,1		13,8
								13,3		16,0		12,0		13,2
5	16,1	16,8	11,1	12,1	23,1	24,5	17,8	17,6	14,9	14,9	8,6	7,9	8,4	6,2
		17,0		12,0		24,5		17,4		14,8		7,7		6,6
6	18,6	17,0	10,9	10,8	22,1	22,2	19,3	19,7	16,5	17,7	7,9	8,4	4,7	4,2
		17,8		10,9		22,5		19,5		17,4		7,9		4,0
7	19,1	18,1	11,7	14,0	20,4	20,3	17,1	16,9	15,7	16,5	8,6	9,2	7,4	7,0
		18,7		11,5		20,1		16,8		16,4		9,0		7,5
8	17,4	16,7	13,1	13,6	25,3	25,9	20,3	20,1	14,9	15,6	5,8	6,0	3,2	2,1
		16,5		13,8		26,0		20,5		14,8		6,0		2,4
		17,2		13,9		25,8		20,2		14,9		6,0		2,0

Bei der Betrachtung der Zahlen darf man nicht vergessen, dass es sich um Teilstriche an einem Lichtmarkeninstrument handelt.

Aus Tab. 2a lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

Nr. 1: Die Übereinstimmung von durchschnittlich 1...2% in der Bewertung der Differenzfilter, die den farbigsten Lichtern entsprechen, die man überhaupt herstellen kann, ist befriedigend.

Nr. 2...8: Allgemein: Die maximalen Abweichungen sind im Rot grösser als im Blau.

Nr. 2: Beträchtliche systematische Abweichungen, hauptsächlich bedingt durch unrichtige Erfassung der Ultrarotempfindlichkeit und durch die hohe Ultrarot-Emission der Glühlampe.

Nr. 5: Die Abweichungen sind im mittleren Teil des Spektrums wider Erwarten gross. Hier ist zu bedenken, dass diese Zelle als einzige nicht homogen mit Filtern bedeckt ist. Der

Monochromator (Winkel-Zeiss) hat feste Brennweiten; die Intensitätsverteilung im austretenden Bündel ist nur unbedeutend von der Wellenlänge abhängig. Immerhin könnte dieser Umstand mit schuldig sein an den grossen Abweichungen.

Tabelle 2a.

Quotienten aus gemessenen und berechneten Durchlässigkeitswerten der Tab. 2. Die Abweichungen zwischen den zwei Verfahren drücken sich in Abweichungen der nachstehenden Zahlen von 1 aus.

	r^q_{01}	r^q_{12}	r^q_{23}	r^q_{34}	r^q_{45}	r^q_{56}	r^q_6
$r = 1$,985	1,000	,987	1,000	1,013	1,040	1,025
2	,980	,946	,889	,899	,952	,990	1,440
	,980	,933	,895	,899	,952	,990	1,460
	1,035	,973	,921	,887	,901	,922	1,390
3	1,030	,960	,986	,943	,993	1,010	1,040
4	1,015	1,077	,984	,963	1,012	,975	,990
	1,023	1,046	,992	,956	,975	,984	1,030
				,985	,994	,975	,990
5	1,037	1,090	1,060	,989	1,000	,919	,740
	1,049	1,081	1,060	,978	,993	,895	,790
6	,922	,990	1,005	1,021	1,073	1,063	,890
	,964	1,000	1,018	1,010	1,055	1,000	,850
7	,949	1,026	,995	,988	1,051	1,070	,950
	,979	,982	,985	,982	1,045	1,046	1,010
8	,961	1,038	1,024	,990	1,047	1,034	,660
	,950	1,056	1,028	1,010	,993	1,034	,750
	,988	1,064	1,020	,995	1,000		

Im grossen ganzen muss man sich bei den etwas heiklen Differenzmessungen in schmalen Bereichen bei Verwendung von Selen-Sperrsichtzellen auf einige Prozent Fehler gefasst machen. Wir werden uns daher dem Übergang zu breiteren Durchlassbereichen zu.

Tabelle 3: Die Zahlen $r\bar{\tau}_i$ von Tab. 2 sind in folgender Weise kombiniert worden:

$$\begin{aligned} r\bar{\tau}_{34} &= r\bar{\tau}_3 = r\bar{\tau}_4 \quad (\text{aus Tab. 2 übertragen}), \\ r\bar{\tau}_{25} &= r\bar{\tau}_2 - r\bar{\tau}_5, \quad r\bar{\tau}_{16} = r\bar{\tau}_1 - r\bar{\tau}_6 \end{aligned}$$

und

$$r\bar{\tau}_{13} = r\bar{\tau}_1 - r\bar{\tau}_3.$$

Die erstgenannten Differenzfilter liegen, wie Fig. 4 zeigt, ungefähr symmetrisch zur Linie 578, die letztgenannte ungefähr symmetrisch zu 546.

Tabelle 3.

Vergleich des spektralphotometrischen Verfahrens mit der direkten Messung für Differenzfilter verschieden breiten Durchlassbereiches.

	$r\bar{\tau}_{34}$		$r\bar{\tau}_{25}$		$r\bar{\tau}_{16}$		$r\bar{\tau}_{13}$		rq_{34}	rq_{25}	rq_{16}	rq_{13}
	ber.	gem.	ber.	gem.	ber.	gem.	ber.	gem.				
$r = 1$	19,8	19,8	58,7	58,6	76,6	76,8	39,9	39,6	1,000	,998	1,002	,991
2	13,9	12,4	42,9	39,2	60,1	56,0	22,0	20,1	,899	,914	,932	,914
	13,9	12,6	42,8	39,2	60,1	56,9	22,0	20,0	,899	,916	,932	,914
	14,1		43,4		61,1		21,3		,887	,903	,916	,945
3	14,0	13,2	43,5	42,3	61,1	59,7	22,1	21,5	,943	,972	,977	,975
4	13,5	13,0	42,2	41,7	61,0	60,7	19,1	19,4	,963	,988	,995	1,016
		12,9		41,7		60,6		19,2	,956	,988	,993	1,005
		13,3							,985			
5	17,8	17,6	55,8	57,0	75,5	77,0	34,2	36,6	,989	1,021	1,020	1,074
		17,4		56,8		76,4		36,5	,978	1,018	1,012	1,071
6	19,3	19,7	57,9	59,6	76,7	78,8	33,0	33,0	1,021	1,029	1,027	1,003
		19,5		59,4		78,2		33,4	1,010	1,026	1,019	1,016
7	14,1	16,9	53,2	53,7	73,5	74,9	32,1	32,3	,988	1,009	1,019	1,010
		16,8		53,3		73,8		31,6	,982	1,002	1,002	,988
8	20,3	20,1	60,5	61,6	79,4	81,2	38,4	39,5	,990	1,018	1,022	1,029
		20,5		61,3		81,1		39,8	1,010	1,013	1,021	1,037
		20,2		60,9		80,8		39,7	,995			

Nr. 1: Die Quotienten ${}_1q_{25}$, ${}_1q_{16}$ und ${}_1q_{13}$ sind nahezu = 1; eine mässige Begrenzung scheint also beim *künstlichen Präzisions-*

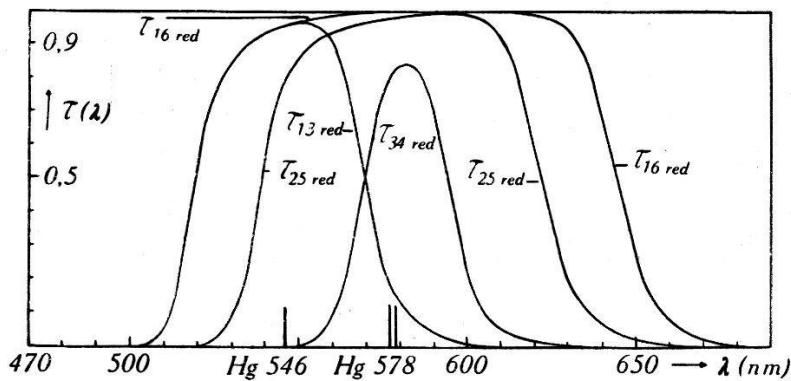


Fig. 4.

Differenzfilter $\tau_{ik} \text{red}$ zur objektiven Messung der Hg-Linien 546 und 578 nach dem Filterverfahren.

auge sich wohltätig auszuwirken, und man darf füglich behaupten, dass im mittleren Teil des Spektrums liegende, nicht zu enge Bereiche desselben sicher auf 1% genau bewertet werden.

Nr. 2 . . . 8: Aus den Abweichungen dürfen wir nicht voreilig Schlüsse ziehen, denn die Zahlen beziehen sich auf Filterdurchlässigkeiten, d. h. auf das Verhältnis eines Teils des Spektrums zum Ganzen, während wir ja, dem Sinn des Filterverfahrens entsprechend, darauf ausgehen, im gleichen spektralen Bezirk zwei verschiedenen zusammengesetzte Strahlungen zu vergleichen. Hierzu müssen die Verhältnisse $r_{34} \dots$ mit den entsprechenden Verhältnissen $q_r(578) \dots$ für monochromatisches Licht verglichen werden.

Tabellen 4 und 5: Bevor wir dieselben erläutern, sei nochmals erwähnt, dass die Strahlungen $e(546)$ und $e(578)$ nicht absolut (mit der Thermosäule) gemessen worden sind. Die experimentellen Verhältnisse (Abstände, Graugläser) sind so gewählt worden, dass die $q_r(546)$, $q_r(578)$ und alle hieraus abgeleiteten Größen im Mittel ungefähr = 1 werden. Die Abweichungen dieser Zahlen von 1 sind nicht interessant, nur die Unterschiede dieser Zahlen innerhalb einer Kolonne.

Tabelle 4.

Vergleich des spektralphotometrischen Verfahrens mit der direkten Messung für die Hg-Linien 546 und 578.

	$a_r(578)$		$a_r(546)$		$q_r(578)$	$q_r(546)$	$\frac{q_r(578)}{q_r(546)}$	$\frac{rq_{25}}{rq_{13}}$
	ber.	gem.	ber.	gem.				
$r = 2$	25,5	22,8	25,0	22,5	892	900	992	1000
	25,4		24,9		896	904	992	1002
	25,7		24,2		885	928	955	945
3	35,8	25,8	25,1	24,9	1000	992	1008	998
4	24,0	24,7	21,4	22,1	1029	1032	997	972 983
5	34,5	34,2	42,9	44,4	992	1034	958	950 950
6	37,0	36,9	38,9	37,7	997	970	1027	1026 1010
7	32,5	33,3	37,1	37,0	1024	993	1031	999 1014
8	40,0	41,5	45,5	46,2	1037	1015	1022	989

Tabelle 4 gibt die Ergebnisse der Relativmessungen mit Hg-Linien; die $q_r(\dots)$ entsprechen denjenigen von Tab. 2a:

$$q_r(578) = \frac{a_r(578, \text{ gemessen})}{a_r(578, \text{ berechnet})}, \quad q_r(546) = \dots$$

Zu Kolonne $q_r(578)/q_r(546)$: Nr. 5 fällt ziemlich stark aus der Reihe; bei diesem Empfänger führt also die Ableitung des Intensitätsverhältnisses $e(578)/e(546)$ aus der Empfindlichkeitskurve $Z_5(\lambda)$, verglichen mit dem direkt gemessenen Verhältnis, zu etwas anderem als für die übrigen Zellen. Dasselbe gilt für die Messungen mit kontinuierlichen Spektralbereichen: Kolonne $r_{q_{25}}/r_{q_{13}}$. Warum wir gerade diesen Quotienten zum Vergleich heranziehen, wird aus Tab. 5 hervorgehen.

Die letzten beiden Kolonnen in Tab. 4 streuen weniger als die Kolonnen $q_r(\lambda_s)$ und $r_{q_{ik}}$, weil der geometrische Fehleranteil, welcher durch die nicht vollkommene Durchführung des Substitutionsgedankens bei der Auswechslung der Zellen bedingt ist, bei den Verhältnissen zweier q wegfällt. In diesen beiden Kolonnen ist gewissermassen der heterochrome Fehleranteil beim Vergleich auseinanderliegender Spektralbereiche isoliert.

Tabelle 5: Uns interessieren mehr die ineinanderliegenden Bereiche: (578) mit (34), (25) (16); (546) mit (13). Der Vollständigkeit halber ist die Beziehung auf das *ganze* Spektrum (entsprechend dem Index 0: $r_{q_0} = 1$ (nach Definition!)) mit in diese Tabelle aufgenommen worden. Unten an jeder Kolonne ist jeweils die Unsicherheit durch Angabe einer Fehlerkategorie zu charakterisieren versucht.

Wir erkennen aus den ersten vier Kolonnen von Tab. 5: Man wähle das Filter nicht zu schmal, *aber auch nicht zu breit* (kein Filter!). Die kohärentesten Ergebnisse erhält man für τ_{25} und für τ_{16} . Dies entspricht einer Filterdurchlässigkeit von 50 ... 70 %. Desgleichen liegen für τ_{13} (Durchlässigkeit 40 %) die Verhältnisse im allgemeinen etwas besser als für den Fall $\tau_0 (= 1$, kein Filter).

Wir hoffen, richtig verstanden zu werden: Mathematisch beweisen lässt sich hier nichts, wie auch die Ausnahmen von der Regel in Tab. 5 zeigen; es kann sich nur darum handeln, *plausibel zu machen, dass eine leichte Filterung im hier untersuchten Falle einer objektiven Photometrierung mit Selen-Sperrschichtzellen empfehlenswert erscheint*.

Die zweitletzte Kolonne besagt: Durch die gemäss der Definition von Q :

$$Q = \frac{q_r(578)}{q_r(546)} : \frac{rq_{25}}{rq_{13}}$$

vorgenommene Bildung eines *Doppelverhältnisses* fallen sowohl die geometrischen, wie ein Teil der spezifisch heterochromen Fehler weg. Die restliche Streuung lässt den Schluss zu, dass wahrscheinlich bei keiner Einzelmessung ein grober Messfehler unterlaufen ist.

Tabelle 5.

Vergleich der Ergebnisse beider Verfahren für Bereiche, die die betrachteten Linien ungefähr symmetrisch umschließen. In der letzten Kolonne ist durch runde Prozent-Angaben die Kategorie der Zuverlässigkeit angegeben. Erklärung von Q und Q' im Text.

	$\frac{q_r(578)}{rq_{34}}$	$\frac{q_r(578)}{rq_{25}}$	$\frac{q_r(578)}{rq_{16}}$	$\frac{q_r(578)}{rq_0}$	$\frac{q_r(546)}{rq_{13}}$	$\frac{q_r(546)}{rq_0}$	Q_r	Q'_r
$r = 2$	993	976	956	892	986	900	992	906
	997	978	960	896	990	904	990	906
	998	980	966	885	983	928	1010	902
3	1057	1028	1023	1000	1018	992	1010	982
4	1069	1041	1034	1029	1016	1032	1025	1013
	1076	1041	1036		1027		1014	1002
	1045							
5	1003	971	978	992	960	1034	1008	1032
	1014	974	980		963		1008	1029
6	976	968	970	997	967	975	1001	1030
	987	971	978		954		1017	1043
7	1036	1015	1005	1024	983	993	1032	1041
	1042	1022	1022		1005		1017	1019
8	1047	1019	1015	1037	986	1015	1032	1051
	1027	1024	1016		978			
%	5	3	3	> 3	3	> 3	2	> 3

Die letzte Kolonne für Q' :

$$Q' = \frac{q_r(578)}{q_r(546)} : \frac{rq_{25}}{rq_0} \quad (rq_0 = 1)$$

zeigt nochmals, dass die Ersetzung des Bereiches (25) durch das ganze Spektrum (Index 0) die Streuung erhöht.

Da, wie wir sahen, die spezifisch geometrischen Fehler, mit denen die Kolonnen $q_r(578)/_r q_{25}$ und $q_r(546)/_r q_{13}$ noch belastet sind, gut 1% betragen, so dürfen wir behaupten, dass man ohne besondere Vorsichtsmassregeln jederzeit so arbeiten kann, dass für den *spezifisch heterochromen Fehler beim Vergleich einer Linie mit einem diese Linie einschliessenden, nicht zu schmalen Bereich* (Durchlässigkeit für Glühlampenlicht um 50% herum) *wohl nicht mehr als 2% übrigbleibt.*

Wir glauben daher, dass man das *Filterverfahren, objektiv durchgeführt mit Selen-Sperrsichtzellen, unter Berücksichtigung des Korrektionsfaktors, wie er sich aus der Farbtemperatur der Normallampe, der Durchlässigkeitsskurve des Filters, der Lage der Spektrallinie und aus der anderweitig bestimmten $Z(\lambda)$ -Kurve berechnen lässt, noch zu den primären Präzisionsverfahren rechnen kann.*

An die mit Thermosäule und Kombinationsfilter erreichbare Genauigkeit (Kategorie 1%) reicht dieses Verfahren nicht heran.

Ergänzende Bemerkungen.

1) In diesem Institut wird die Bestimmung z. B. des Korrektionsfaktors eines Sperrsichtelementes für Na-Licht (bezogen auf Glühlampenlicht) nicht als Primärproblem (Berechnung aus $Z(\lambda)$), sondern als sekundäre Eichung behandelt: Das Verhältnis der Intensitäten der Na- und Glühlampe wird mittelst künstlichem Präzisionsauge (oben Nr. 1) bestimmt und hierauf festgestellt, wie die Zelle an derselben Stelle des Strahlenganges diesen Sprung in der Energieverteilung beurteilt.

2) Es wurde aus Gründen experimenteller Bequemlichkeit mit den Hg-Hauptlinien gearbeitet. Die Schlussfolgerungen dürften aber ohne weiteres auf den Fall des Na-Lichtes übertragbar sein. Sie führen also zur Empfehlung einer Filterung z. B. mit τ_{26} oder τ_{35} , mit dem einzigen Unterschied, dass dieselbe gegenüber derjenigen für subjektive Photometrie empfohlenen (siehe a. a. O²): $\bar{\tau} \approx 25\%$ um so schwächer sein darf ($\bar{\tau} \approx 30 \dots 70\%$), als die Kenntnis vom wahren, unter den Anwendungsbedingungen wirksamen $Z(\lambda)$ es gestattet.

3) Da die vorliegende Notiz der Abklärung einer grundsätzlichen Frage dienen soll, sind nur einzelne Spektrallinien der Betrachtung unterzogen worden. Die Übertragung auf den praktischen Fall eines Hg-Lichtes, sofern im wesentlichen nur die drei Linien 435, 546 und 578 betrachtet zu werden brauchen, kann folgendermassen erfolgen: Als „Einengungsfilter“ oder „spek-

trale Angleichungsfilter“, wie wir sie im Gegensatz zu den „Farb-Angleichungsfiltern“ nennen können, dienen die Zeiss-Hg-Filter A, B und C, welche die drei Linien hinlänglich genau aussondern. Für die einzelnen Linien gelten die oben angestellten Überlegungen hinsichtlich der erreichbaren Genauigkeit. Die Intensität ist dann die Summe der drei Teilintensitäten.

4) Bei dieser Untersuchung möchte es angenehm sein, die τ_i verschieden mit einander kombinieren zu können, wie dies in Tab. 3 geschehen ist, weil zwischen den verschiedenen Kombinationen die durch die Definition $\tau_{ik} = \tau_i - \tau_k$ vorbestimmten Zusammenhänge bestehen, während die mit einheitlichen, unabhängigen Monochromatfiltern gewonnenen Werte unter sich ohne Beziehung wären.

In der Praxis genügt aber für eine feste Spektrallinie ein bestimmtes Differenzfilter. In *diesem* Fall wäre ein einheitliches Filter, welches die oft ungenaue Bildung von Differenzen erübrigt, von Vorteil. Das Mehrfilter-Verfahren, im besonderen Fall hier das Differenzfilter-Verfahren, soll im Falle *einer* Spektrallinie dem Ein-Filter-Verfahren nur dann vorgezogen werden, wenn es an einem beidseitig steilflankigen Filter mangelt. Im Falle *mehrerer* Spektrallinien kann, wie hier ohne Beweis bemerkt sei, das Differenzfilter gegenüber dem einheitlichen Filter grundsätzliche Vorteile aufweisen.

5) Vergegenwärtigen wir uns zum Schluss nochmals Sinn und Zweck des Filter-Verfahrens:

In der subjektiven Photometrie mit direktem Vergleich lassen die unmittelbaren Schwierigkeiten in der Festsetzung des Kriteriums „gleichhell“ den Wunsch nach Gleichfarbigkeit rege werden.

Mit dem Flimmerverfahren sind diese empfindungsmässigen Schwierigkeiten behoben; trotzdem strebt man nach Gleichheit der Farbe, um den Empfänger $Z(\lambda)$ (das Auge) zu entlasten.

Eine nähere Prüfung zeigt, dass Gleichheit der Farbe wohl weitgehend notwendig, aber keinesfalls hinreichend ist und dass man vielmehr auch nach Gleichheit der spektralen Energieverteilung streben muss.

Und — nicht aus denselben äusseren Gründen, aber auch um $Z(\lambda)$ zu entlasten, ist nun auch für gewisse Fälle in der objektiven Photometrie spektrale Gleichheit anzustreben, auch wenn man $Z(\lambda)$ zu kennen glaubt.

Diese Entwicklung zeigt deutlich die zentrale Bedeutung des Filter-Verfahrens in der *gesamten* heterochromen Photometrie, was letzten Endes davon herröhrt, dass die Filterkurve vorläufig das

haltbarste und einer Bestimmung am leichtesten zugängliche Grundelement der heterochromen Photometrie einschliesslich der Kolorimetrie darstellt.

Literatur.

- ¹⁾ GIBSON, Journal of the Opt. Soc. of America **9**, Nr. 2, August 1924.
- ²⁾ KÖNIG, Helv. Phys. Acta **12**, 229 (1939).
- ³⁾ COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE, Compte-rendu, Genève 1924 (Cambridge 1926), S. 67.
- ⁴⁾ KREFFT, Das Licht **2**, 203 (1932).
- ⁵⁾ KÖNIG, Helv. Phys. Acta **9**, 602 (1936).
- ⁶⁾ BUCHMÜLLER und KÖNIG, Bull. des Schweiz. El. techn. Vereins **28**, 89 (1937).
- ⁷⁾ HAMAKER und BEEZHOULD, Physica **1**, 119 (1933).
- ⁸⁾ KÖNIG, Helv. Phys. Acta **10**, 165 (1937).
- ⁹⁾ KÖNIG, Helv. Phys. Acta **11**, 432 (1938).
- ¹⁰⁾ JÄGGER, Helv. Phys. Acta **12**, 77 (1939).