Zeitschrift: Helvetica Physica Acta

Band: 9 (1936)

Heft: VII

Artikel: Eigenschaften einer Selen- Sperrschichtzelle bei dem "ballistischen" Messverfahren

Autor: König, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-110651

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: 09.08.2025

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

Eigenschaften einer Selen-Sperrschichtzelle bei dem „ballistischen" Messverfahren

von **H. König.**

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

(17. VII. 36.)

Zusammenfassung. Es wird eine Messvorschrift angegeben, auf Grund welcher mit Selen-Sperrschichtzellen reproduzierbare, von der Vorgeschichte unabhängige Vergleichsmesswerte erhalten werden können. Die nach dieser Vorschrift erhaltenen Ergebnisse der Prüfung des Proportionalitäts- und Superpositionsgesetzes werden mitgeteilt.

Wenn eine gewisse Uneinigkeit über die Frage der Leistungsfähigkeit der Selen-Sperrschichtzellen (SSZ) und ihrer Eignung zu Präzisionsmesszwecken[1]) besteht, so dürfte dies in erster Linie dem Umstand zuzuschreiben sein, dass fast jeder mit seinen Zellen anders misst[2]). Erst neuerdings ist der Präzisierung der Messvorschrift die gebührende Bedeutung zuerkannt worden[3])[4])[5]), und zwar in dem Sinne, dass der Dauerausschlag (nach ca. 1 oder mehr Minuten Belichtung) empfohlen wird, während wir in den folgenden Zeilen das „ballistische" Messverfahren befürworten werden, weil es nach unseren Erfahrungen das einzige Verfahren ist, welches auch im äussersten sichtbaren Rot, wo der Dauerausschlag nicht befriedigt, gut reproduzierbare Werte liefert. Wohl wird sich herausstellen, dass bei niedrigen Beleuchtungen die „Dauerausschlag"-Charakteristik der Geraden näher kommt als die „ballistische", doch scheint uns dies von sekundärer Bedeutung, weil für den genannten Zweck die *Reproduzierbarkeit* einer Abweichung von einem Gesetz viel wichtiger ist als *Grösse.*

Literatur. Hamaker und Beezhold[6]) haben gezeigt, dass es bei niedrigen Beleuchtungen (0,1 lx) verhältnismässig lange geht, bis der langsam ansteigende Strom den Endwert erreicht hat (Sensibilisierung), während bei hohen Beleuchtungen (100 lx) der Höchstwert rasch erreicht und von einem stetigen, oft nach vielen Minuten noch anhaltenden Absinken gefolgt wird. Dadurch ist auch eine Erklärung für die Beobachtung von Gleason[7]), wonach das Talbotsche Gesetz für SSZ nicht streng gilt, gegeben. Nach den Abweichungen vom Superpositionsgesetz für verschiedene Wellenlängen λ_1 und λ_2, welche mit den Abweichungen vom

Proportionalitätsgesetz Hand in Hand gehen müssen, hat als erster LAPIQUE[8]) bei Kupferoxydulzellen gesucht. Das Proportionalitätsgesetz wird von FERENCZ und URBANEK[3]), KNOLL[4]) und MARCHAL und MARTON[5]) einer Prüfung unterzogen. Letztere[5]) stellen den auch von uns voll anerkannten Grundsatz auf, dass der Zelle tunlichst keine Intensitätssprünge zugemutet werden sollten. SEWIG[9]) betont mit Recht, dass man sich durch die schönen Eigenschaften der SSZ bei mittleren Beleuchtungen nicht zu einer kritiklosen Extrapolation namentlich nach unten hin verleiten lassen sollte.

Dass die Ermüdungserscheinungen und Abweichungen vom Proportionalitätsgesetz vorwiegend für Rot auftreten, scheint eine allgemeine Eigenschaft der SSZ zu sein (vgl. aber auch[5])). Im übrigen jedoch beziehen sich unsere Ausführungen ausschliesslich auf die von uns untersuchte Weston-Zelle Nr. 2271.

Vergleich verschiedener Messvorschriften. Wir haben den Vergleich zweier Beleuchtungen x_1 und x_2 bei $\lambda = 650$ nm durch Ausmessen eines Grauglases der Durchlässigkeit $d_{650} = 38{,}7\%$ auf die 7 in Fig. 1 dargestellten Arten (1), (2), . . . (7) vorgenommen. Die der Berechnung der Durchlässigkeit zugrundegelegten Messpunkte sind durch Kreise gekennzeichnet. Die zeitlichen Vorgänge sind in der Figur der Deutlichkeit halber übertrieben dargestellt.

Die Bezeichnung „ballistisch" bedarf einer Erläuterung: Ähnlich wie bei der Messung von Ladungen mit dem ballistischen Galvanometer wird der Höchstwert abgelesen. Das Spiegelgalvanometer ist hierbei so gedämpft, dass es beim Einschalten der Beleuchtung (weisses, oder auch farbiges, aber nicht rotes Licht) ½ bis 1% über den Dauerausschlag hinausschwingt. Unmittelbar nach der Ablesung wird wieder verdunkelt und der Nullpunkt kontrolliert.

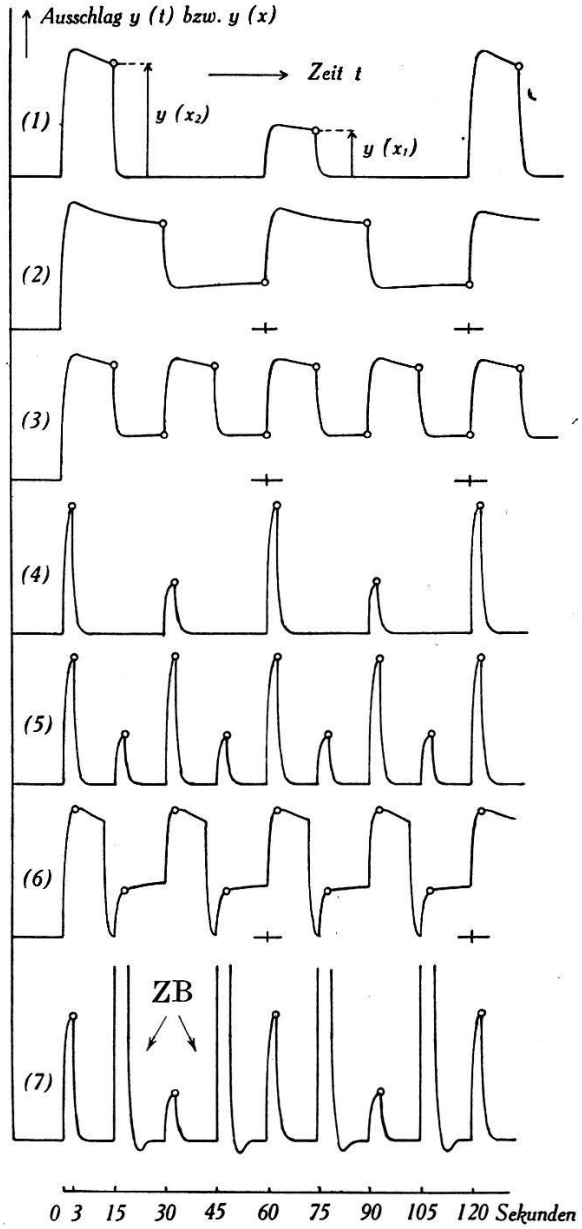
Kritik. Bei Messungen nach Vorschrift (1) und (6) fällt die Zeitmessung ziemlich stark ins Gewicht. (6) ist ausserdem ermüdend. (2) und (3) haben den Nachteil, dass man über das Wandern des Nullpunkts nichts weiss. Letzteres ist bei weissem Licht gewöhnlich störender als das Absinken des Stromes bei Dauerbelichtung. Der Unterschied im gemessenen d-Wert zwischen (2) und (3) ist grösser als zwischen (4) und (5). Die Zeitmessung fällt daher beim ballistischen Verfahren weniger ins Gewicht als bei dem Dauerausschlags-Verfahren. Bei der praktischen Anwendung wird man so vorgehen, dass ein Galvanometer von etwas längerer halber Schwingungsdauer (5—7 s) als oben (3 s) gewählt und die

Dunkelpause gleich der Belichtungsdauer gemacht, d. h. die Dunkelpause ebenfalls durch das Galvanometer dosiert wird.

Für das ballistische Verfahren gilt:

1) es erspart jegliche besondere Zeitmessung,
2) es beansprucht die geringste Zeit pro Einzelmessung, und
3) es zwingt von sich aus zu einer fleissigen Kontrolle des Nullpunkts.

Ballistisch wird die Zelle weniger beansprucht als bei Dauerausschlag. Die zeitlichen Vorgänge dauern wohl in beiden Fällen gleich lang, ihre Amplitude ist jedoch der zeitlich geringeren



$y(x_1)/y(x_2)$
Grenzwert in %

39.0 Daueraussschlag 15 *s* mit Dunkelpausen

38.7 Daueraussschlag 30 *s* ohne Dunkelpausen

38.4 Daueraussschlag 15 *s* ohne Dunkelpausen

38.7 Ballistischer Ausschlag mit Dunkelpausen, 30 *s*

38.6 Ballistischer Ausschlag mit Dunkelpausen, 15 *s*

38.0 Ballistischer Ausschlag ohne Dunkelpausen, 15 *s*, mit Kontrolle des Nullpunkts

38.5 Ballistischer Ausschlag, 30 *s*, mit starker Zwischenbeleuchtung ZB

Fig. 1.
Galvanometer-Ausschlag in Funktion der Zeit für verschiedene Messvorschriften bei rotem Licht ($\lambda = 650$ nm, $x_2 = 5$ lx äquival.). Die zeitlichen Vorgänge in der Zelle sind übertrieben gezeichnet.

Beanspruchung wegen im ballistischen Fall kleiner, ihre Wirkung daher *relativ* kleiner. Wenn die zeitlichen Vorgänge eine einheitliche Zeitkonstante besässen, so könnte man behaupten, dass die Zeitdauer bis zum Einspielen auf einen Grenzwert des Verhältnisses $y(x_1)/y(x_2)$ bis auf $1^0/_{00}$ des Grenzwertes umgekehrt proportional der Dauer der zeitlichen Belastung sei, sofern die Belichtungsdauer im Verhältnis zur Dunkelpause klein ist. Nun haben zwar die zeitlichen Vorgänge, wie besondere Messungen zeigen, Zeitkonstanten von Bruchteilen einer Sekunde bis zu Minuten, aber in Bezug auf die letzteren gilt qualitativ die obige Überlegung. Daher hat die geringere Beanspruchung beim ballistisch Messen ein relativ rascheres Einspielen auf den Grenzwert des Verhältnisses $y(x_1)/y(x_2)$, d. h. ein *rasches Auslöschen der Vorgeschichte* zur Folge. Beispiel:

ohne	mit	ohne	mit	ohne	mit	Grauglas ($\lambda = 650$ nm)
140,3	54,4	140,0	54,2	139,9	54,2	
Verhältnis: 38,8%		38,7%		38,7%		

Die Zelle wird für jedes Verhältnis gewissermassen neu formiert.

Wenn bei nicht-rotem Licht eine Wiederholung unnötig erscheint, wenn also jede Beleuchtung nur einmal gemessen werden soll, so ist unter allen Umständen zuerst die stärkere und dann erst die schwächere zu messen.

Die Wirkung einer Belichtung auf den zu einer anderen Belichtung gehörenden Ausschlag ist offenbar umso geringer, je mehr die beiden Belichtungen durch normalisierte Zwischenbelichtungen voneinander getrennt sind. Der Umstand, dass gemäss (7), Fig. 1 mit 10-facher Zwischenbelichtung (ZB) gegenüber (4) und (5) nur $\frac{1}{2}$% Unterschied im Verhältnis herauskommt, zeigt erneut, wie *empfehlenswert* es ist, als *Ausschlagsverhältnis einer SSZ den ballistisch gemessenen Wert zu definieren.* Die Schwingungsdauer des Galvanometers geht in die Definition des ballistischen Ausschlages ein; sie ist daher anzugeben, ebenso die Dauer der Dunkelpause. Doch kommt es bei letzterer auf ein paar Sekunden mehr oder weniger nicht an.

Es sei noch bemerkt, dass alle unsere Ausführungen sich auf Betrieb der Zellen *ohne Vorspannung* beziehen. Mit Vorspannung kann man lokal die Charakteristik gerade richten. Ein universeller Fortschritt scheint sich jedoch nicht erzielen zu lassen.

Integrabilitätsbedingung. Durch Unterteilung einer Ausgangsbeleuchtung x auf einen Bruchteil x/n (n beliebige Zahl > 1) und Messung der zugehörigen $y(x/n)$ erhält man die Charakteristik $y(x/n)$.

Von besonderem Interesse ist nun, zu wissen, ob für eine andere Ausgangsbeleuchtung x' eine Kurve von anderer Form als $y(x/n)$ herauskommt, oder, was dasselbe ist, ob das Ergebnis des Sprunges $x \rightarrow x/n_1 n_2$ vom Weg abhängt. *Unabhängigkeit* vom Weg würde für die Aufteilung des Sprunges $x \rightarrow x/n_1 n_2$ in die zwei Sprünge $x \rightarrow x/n_1$ und $x/n_1 \rightarrow x/n_1 n_2$ bedeuten:

$$\underset{\text{Ausgangsbel. } x}{\frac{y\left(\frac{x}{n_1}\right)}{y(x)}} \cdot \underset{\text{Ausgangsbel. } x/n_1}{\frac{y\left(\frac{x}{n_1 n_2}\right)}{y\left(\frac{x}{n_1}\right)}} = \underset{\text{Ausgangsbel. } x}{\frac{y\left(\frac{x}{n_1 n_2}\right)}{y(x)}}$$

oder, wenn der Proportionalitätsfehler $\Delta\,(1/n, x)$ des Sprunges $x \rightarrow x/n$, den wir durch

$$\Delta\left(\frac{1}{n}, x\right) = \frac{n\, y\left(\frac{x}{n}\right) - y(x)}{y(x)} \tag{I}$$

definieren wollen, klein ist gegen 1:

$$\Delta\left(\frac{1}{n_1}, x\right) + \Delta\left(\frac{1}{n_2}, \frac{x}{n_1}\right) = \Delta\left(\frac{1}{n_1 n_2}, x\right). \tag{II}$$

Versuche in einem Gebiet grosser Fehler ($\lambda = 700$ nm, x ca. $^1/_{50}$ der optimalen Beleuchtung) zeigen, dass die Abweichungen von Integrabilitätsbedingung (II) als Grösse 2. Ordnung betrachtet werden dürfen ($\frac{1}{2}$% bei Einzelfehlern von 3%, 3% und 6%). Es ist demnach in erster Näherung erlaubt, die bei verschiedenen Beleuchtungen gemessenen Fehler durch Integration zusammenzusetzen und von *der* ballistischen Charakteristik einer SSZ bei einer bestimmten Wellenlänge zu sprechen.

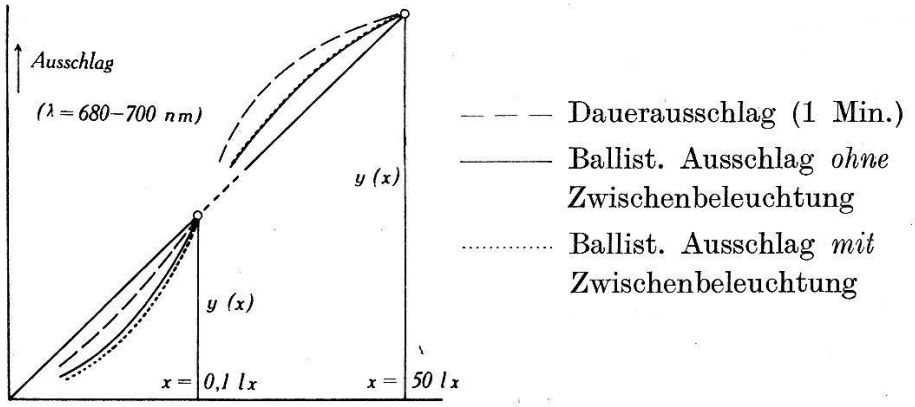


Fig. 2.
Charakteristische Züge der Abweichungen vom Proportionalitätsgesetz bei verschiedenen Messvorschriften, bei niedrigen und höheren Beleuchtungen (rot).

Charakteristik der SSZ für verschiedene Messvorschriften. In Fig. 2 sind für Dauerausschlag (ca. 1 Minute) und ballistischen

Ausschlag mit und ohne Zwischenbeleuchtung schematisch übertrieben die Abweichungen von der Geraden dargestellt. Man bemerkt die Krümmung der Kurven nach Art einer Anodenstrom-Gitterspannungs-Charakteristik einer Elektronenröhre. Die Wendezone liegt für Zelle 2271 etwa bei 5 lx*) (siehe auch Fig. 3a). Die Zwischenbeleuchtung ist nicht von grossem Einfluss, worauf oben bereits hingewiesen wurde. Bei niedriger Beleuchtung sind die ballistischen Fehler grösser als die Dauerausschlag-Fehler.

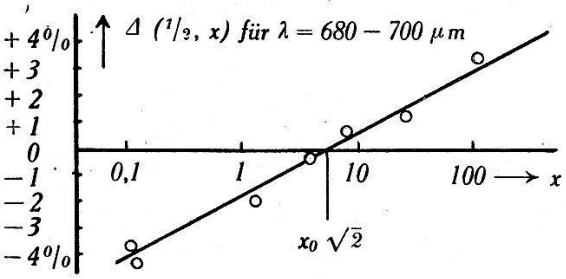


Fig. 3a. $\Delta\,(\frac{1}{2}, x)$ linear von $\ln x$ abhängig.

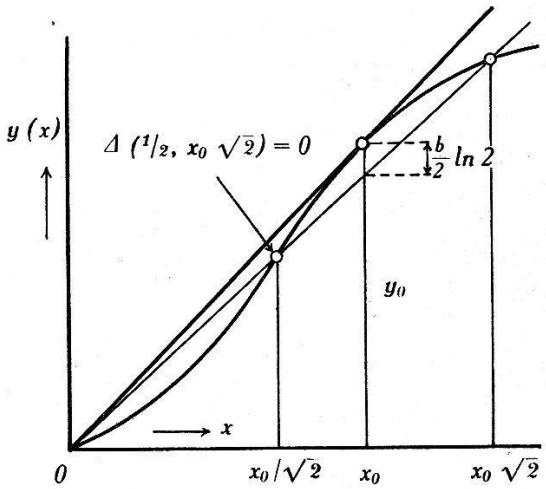


Fig. 3b. Geometrische Bedeutung der Konstanten x_0 und b.

Gleichung der ballistischen Charakteristik. $\Delta\,(1/2, x)$ wurde nach dem voraussetzungsfreien Additionsverfahren[10]) für $\lambda =$ 680—700 nm zwischen 0,1 und 100 $l\,x$ gemessen und zwar als

$$\Delta\,(\tfrac{1}{2},\, x_1 + x_2) = \frac{y(x_1) + y(x_2)}{y(x_1 + x_2)} - 1\,,$$

wobei x_1 möglichst $= x_2$ gewählt wurde. Nach Fig. 3a hängt $\Delta\,(\frac{1}{2}, x)$ linear von $\ln x$ ab. Dieser Bedingung genügt das Integral

$$y/y_0 = x/x_0\,(1 - b/2\,(\ln x/x_0)^2)\,. \qquad \text{(III)}$$

In der Tat lässt sich hieraus für die allgemeine Schwächung in 1. Näherung die Differenzengleichung

$$\Delta\left(\frac{1}{n},\, x\right) = b \ln n \left(\ln x/x_0 - \frac{\ln n}{2}\right) \qquad \text{(IV)}$$

*) Für unsichtbares Licht mag eine Angabe der Intensität in Lux (lx) etwas befremden, doch ist es bequem, abgekürzt damit auszudrücken, dass die gleiche Anzahl lx Glühlampenlicht (2360°) gerade den betreffenden Zellenstrom verursachen würde. Es handelt sich also einfach um ein Strom-Mass. Grössenordnungsmässig darf bei allen SSZ mit 3.10^{-8} A/cm² lx gerechnet werden.

und speziell für die Halbierung ($n = 2$)

$$\Delta\left(\tfrac{1}{2}, x\right) = b \ln 2 \left(\ln x/x_0 - \frac{\ln 2}{2}\right)$$

folgern. Die Konstante b misst die Grösse, x_0 die Lage der Abweichung, wie aus Fig. 3b hervorgeht. Man kann (IV) die Gestalt geben:

$$\Delta\left(1/n, x\right) = \Delta\left(\tfrac{1}{2}, x\right) \cdot M + \Delta\left(\tfrac{1}{2}, x/2\right) \cdot N, \qquad \text{(V)}$$

worin

$$M = \frac{\ln n}{\ln 2}\left(1 - \frac{\ln n/2}{2 \ln 2}\right), \quad N = \frac{\ln n}{\ln 2} \cdot \frac{\ln n/2}{2 \ln 2}.$$

M und N lassen sich ein für alle Mal tabellarisch festlegen[10]). (V) stellt demnach die Interpolationsformel für die Berechnung eines beliebigen Sprunges $x \rightarrow x/n$ dar, wenn die Fehler der Sprünge $x \rightarrow x/2$ und $x/2 \rightarrow x/4$ bekannt sind.

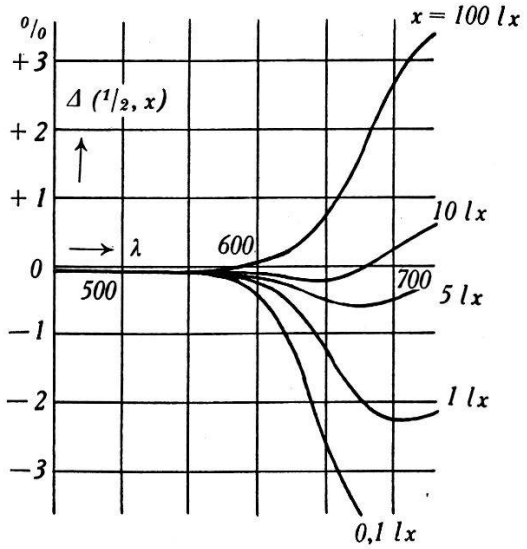


Fig. 4.
$\Delta\left(\tfrac{1}{2}, x\right)$ in Funktion von λ.

Spektrale Verteilung der Proportionalitätsfehler $\Delta\left(\tfrac{1}{2}, x\right)$. Fig. 4 zeigt, dass $\Delta\left(\tfrac{1}{2}, x\right)$ im Blau und Grün (im Gegensatz zu den Ergebnissen von Marchal und Marton[5])) sehr klein ($1\,^0/_{00}$) ist. Von $\lambda = 600$ an nehmen die Felder stark zu. Für äquivalente Beleuchtungen von 5...10 lx, d. h. also für einen Zellenstrom von $1\tfrac{1}{2} \cdot \ldots\ 2\tfrac{1}{2} \cdot 10^{-7}$ A/cm² ist für *alle* λ leidliche Proportionalität gewährleistet. In diesem Gebiet ist die Zelle sogar für spektral-photometrische Zwecke im Rot brauchbar[10]). Man entnimmt zu diesem Zweck der Fig. 4 $\Delta\left(\tfrac{1}{2}, 10\text{ lx}\right)$ und $\Delta\left(\tfrac{1}{2}, 5\text{ lx}\right)$ für die gewünschte Wellenlänge und berechnet $\Delta\left(1/n, 10\text{ lx}\right)$ nach (V) (siehe[10])).

Spektrale Verteilung der Superpositionsfehler. Es liegt nahe, nunmehr $\Delta\,(\frac{1}{2}, x_1 + x_2)$ für den Fall, dass die zwei Beleuchtungen von ungleicher Wellenlänge sind, zu betrachten. Noch interessanter ist es, weil eine allfällige Ungleichwertigkeit der zwei Strahlungen in Erscheinung treten kann,

$$\Delta\,(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{y\,(x_1(\lambda_1)) + y\,(x_2(\lambda_2))}{y\,(x_1(y_1) + x_2(\lambda_2))} - 1 \text{ für } x_1(\lambda_1) \text{ ca. } 10\, x_2(\lambda_2)$$

zu untersuchen. Zur Durchführung wurde einer konstanten Vorbelastung $x_1(\lambda_1)$ von ca. 100 Teilstrichen Ausschlag ballistisch eine Strahlung $x_2\,(\lambda_2)$ von ca. 10 Teilstrichen überlagert. Die

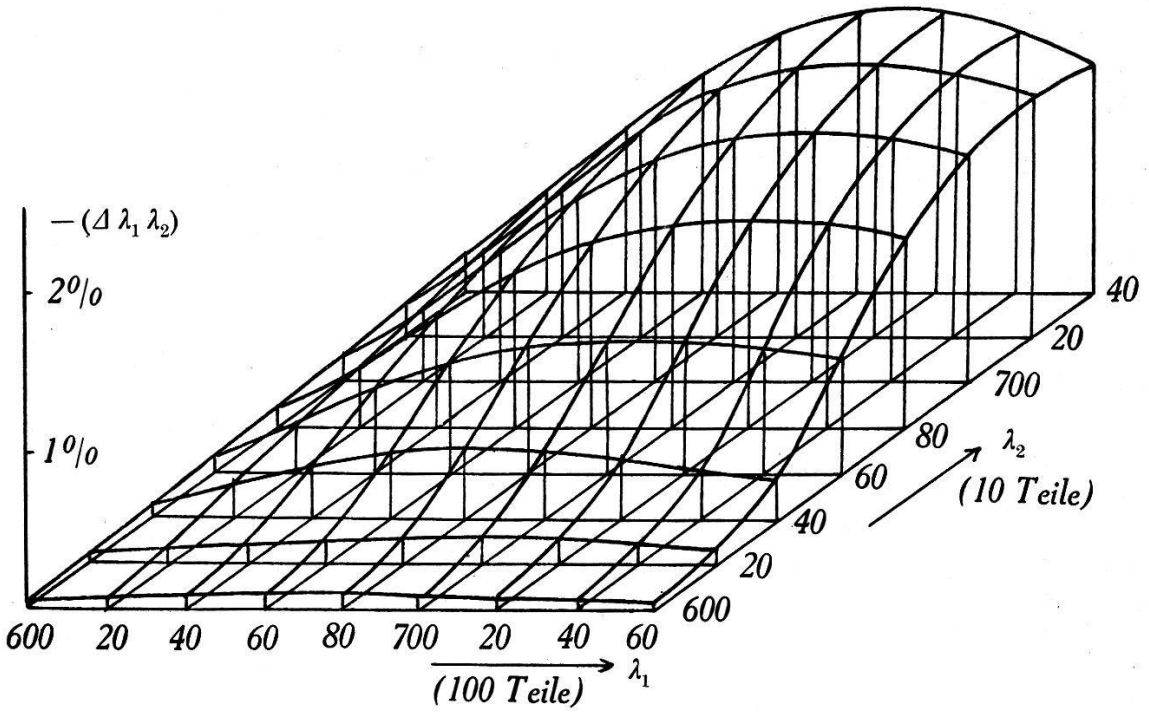


Fig. 5.
Abweichungen vom Superpositionsgesetz.

Beleuchtung war äquivalent ca. 0,1 lx. Die Ergebnisse sind in Fig. 5 als $-\Delta\,(\lambda_1, \lambda_2)$ eingetragen. Für λ_1 oder $\lambda_2 < 600$ nm ist $\Delta\,(\lambda_1, \lambda_2) < 1\,^0/_{00}$. $\Delta\,(\lambda_1, \lambda_2)$ ist keine symmetrische Funktion: 100 Teile, 660 nm + 10 Teile, 740 nm gibt eine grössere Abweichung als 100 Teile, 740 nm + 10 Teile, 660 nm. Wiederum erkennt man die Anhäufung der Fehler im Rot.

Aus vorliegender Untersuchung fliessen für die Messtechnik folgende Erkenntnisse[1]):

1) Das ballistische Messverfahren ist zweckmässig, weil es leicht genaue, eindeutige Werte liefert.

2) Grössere Intensitätssprünge sind zu vermeiden.

3) In allen Fällen, wo die Anpassung an eine gegebene Empfindlichkeitskurve (Hellempfindlichkeitskurve der Photometrie, Farbempfindlichkeitskurven der Dreifarbenlehre) nicht notwendig ist, empfiehlt es sich, die Rotempfindlichkeit der Zelle durch Vorschalten von geeigneten Filtern tunlichst abzuschwächen.

Die Kunst ist nun, die photometrischen Methoden diesen Forderungen anzupassen. Dass dies weitgehend möglich ist, zeigen die Berichte[10]) und [11]).

Literatur.

[1]) König, Helv. Phys. Acta VIII, 505, 1935.
[2]) Sewig, Phys. Zeitschrift **35**, 564, 1934.
[3]) Ferencz und Urbanek, Revue d'Optique **14**, 317, 1935.
[4]) Knoll, Das Licht **5**, 167, 1935.
[5]) Marchal und Marton, Revue d'Optique **15**, Januar 1936; auch Comptes Rendus du 2me Congrès National des Sciences, Bruxelles 1935.
[6]) Hamaker und Beezhold, Physica **1**, 119, 1933.
[7]) Gleason, Phys. Review (2) **45**, 745, 1934.
[8]) Lapique, C. R. Paris **196**, 1301, 1933.
[9]) Sewig, Objektive Photometrie, S. 37, Berlin, J. Springer 1935.
[10]) Buchmüller und König, erscheint demnächst.
[11]) König, Helv. Phys. Acta VIII, 211, 1935.