Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 37 (1946)

Heft: 2

Artikel: Bemerkungen über das Phänomen des Bewegungsflimmerns und die Definition des Welligkeitsgrades

Autor: Goldmann, H. / König, H. / Mäder, F.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1061080

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. Siehe Rechtliche Hinweise.

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. Voir Informations légales.

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. See Legal notice.

Download PDF: 11.05.2025

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

SCHWEIZERISCHER ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

REDAKTION:
Sekretariat des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Zürich 8, Seefeldstrasse 301

ADMINISTRATION:
Zürich, Stauffacherquai 36 ✦ Telephon 23 77 44
Postcheck-Konto VIII 8481

Nachdruck von Text oder Figuren ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit Quellenangabe gestattet

37. Jahrgang | N° 2 | Samstag, 26. Januar 1946

Bemerkungen über das Phänomen des Bewegungsflimmerns und die Definition des Welligkeitsgrades

Von *H. Goldmann, H. König* und *F. Mäder*
(Mitteilung aus dem Eidg. Amt für Mass und Gewicht)

612.843 53

*Vom sog. Welligkeitsgrad verlangt man, dass er verschiedene Lichtarten in bezug auf ihren Beitrag zum subjektiven Eindruck des Bewegungsflimmerns objektiv zu charakterisieren gestattet. Durch Versuche mit bewegten Papierstreifen wird nachgewiesen, dass die erste Fourier-Komponente der Licht-Zeit-Kurve des welligen Lichtes für die in der Lichttechnik vorkommenden Lichtarten (Glühlampenlicht, Hg, Na, Fluoreszenzlicht, Mischlicht) tatsächlich die für die Berechnung des Welligkeitsgrades massgebende Grösse ist *).*

Le degré d'ondulation doit permettre de caractériser objectivement la contribution de différents genres de lumières à l'impression subjective du papillotage provoqué par le mouvement. Des essais à l'aide de bandes de papier déplacées ont prouvé que la première composante de Fourier de la courbe lumière-temps de la lumière ondulante, parmi les genres de lumières utilisés en éclairagisme (lumière à incandescence, Hg, Na, lumière fluorescente, lumière mixte) est précisément la grandeur déterminante pour le calcul du degré d'ondulation).*

Ein schmaler heller Gegenstand vor dunklem Hintergrund erscheint bei Bewegung und gleichzeitiger Beleuchtung mit welligem Licht mehrfach. Diese Erscheinung des Bewegungsflimmerns ist störend, und es besteht an sich wenig Interesse, sie genau messend zu verfolgen. Gelegentlich wird aber doch davon gesprochen, dass eine Lichtart «punkto Flimmern besser» sei als eine andere. Eine solche Aussage hat nur in dem Masse Sinn, als es möglich ist, zwei verschiedene Licht-Zeit-Kurven als «flimmeräquivalent» zu definieren. Darüber hinaus kann man sich mit Andresen [1] [2] und Bouma [3] die Frage stellen, ob sich aus der Licht-Zeit-Kurve eine Zahl errechnen lasse, welche für zwei Lichtarten gleich ausfällt, wenn bewegte Objekte «gleich stark» flimmern. Im Hinblick darauf, dass wir eigentlich nicht die Störung als solche, sondern eher die Massnahmen zu ihrer Beseitigung messtechnisch erfassen wollen, verschärfen wir die Definition, indem wir sie auf die *Schwelle* des Bewegungsflimmerns allein beziehen:

1. Wir mischen zu einer Art welligen Lichtes W_1 (z. B. Hg-Licht) zeitlich konstantes Licht Z_1 zu, bis das Flimmern gerade verschwindet.

2. Wenn für eine zweite Lichtart W_2 (z. B. Fluoreszenzlicht) mit dem Zusatz von Z_2 das Flimmern ebenfalls gerade verschwindet, so *nennen* wir Lichtart $W_1 + Z_1$ «flimmeräquivalent» Lichtart $W_2 + Z_2$.

3. Es sei $Z_1 = Z_2$. Dann *nennen* wir W_1 flimmeräquivalent W_2, auch wenn wir nicht geprüft haben, ob das Flimmern «gleich stark» ist, denn uns genügt, dass gleiche Mengen Zusatzlicht ($Z_1 = Z_2$) ausreichen, um das Flimmern zu beseitigen.

Die Messungen werden sich, wie später ausführlich dargelegt wird, auf diejenigen Bedingungen der Bewegung eines Papierstreifens beziehen, unter denen das Flimmern am stärksten erscheint, und zwar nicht nur, weil hierbei die Messungen am genauesten ausfallen, sondern weil grundsätzlich der ungünstigste Fall den Betrachtungen zugrunde gelegt werden soll.

Die *Literatur* weist zwei Versuche zur Definition des Welligkeitsgrades auf.

Andresen [1] [2] befasst sich, auf einer Arbeit von Arndt [4] fussend, nur mit der Lichtzeitkurve

$$a = \bar{a} + a_1 \sin(2\pi nt + \varphi_1) + a_2 \sin(4\pi nt + \varphi_2) + \ldots$$

Unmittelbar massgebend ist diese Funktion nur für den Fall: ruhendes Auge, ruhendes Objekt. Vom Bewegungsflimmern ist bei Andresen nicht die Rede, noch werden Versuche hierüber ausgeführt. Sein Kriterium lautet: Für die Beurteilung, ob eine wechselstrombetriebene Lichtquelle bei bestimmter Frequenz und Beleuchtungsstärke eine flimmerfreie Beleuchtung liefert, ist lediglich das Verhältnis

$$\frac{\text{Amplitude der Grundschwingung } a_1}{\text{Gleichlichtanteil } \bar{a}}$$

massgebend.

Bouma [3] dagegen befasst sich mit dem Fall des bewegten Objektes bei ruhendem Auge (Fixieren) und betrachtet den Kontrast im Bewegungs-Flimmerbild, bzw. das Verhältnis

$$\frac{\text{grösste minus kleinste Leuchtdichte}}{\text{grösste Leuchtdichte im Flimmerbild}}$$

*) Diese Arbeit wurde angeregt durch die Diskussion, die sich im Schweizerischen Beleuchtungskomitee über die Frage des Flimmerns und verwandter Erscheinungen entspann (Bericht erscheint demnächst im Bull. SEV). Wir sind einer Reihe von Herren, ganz besonders J. Paschoud, Ste-Croix, für Anregungen dankbar.

als massgebende Grösse. Er weist darauf hin, dass sich die beiden Kriterien nicht decken. Der experimentelle Beweis, dass das Kontrastkriterium den Fall des Bewegungsflimmerns besser erfassen solle als das Grundwellen-Kriterium von Andresen, wird nicht zu erbringen versucht.

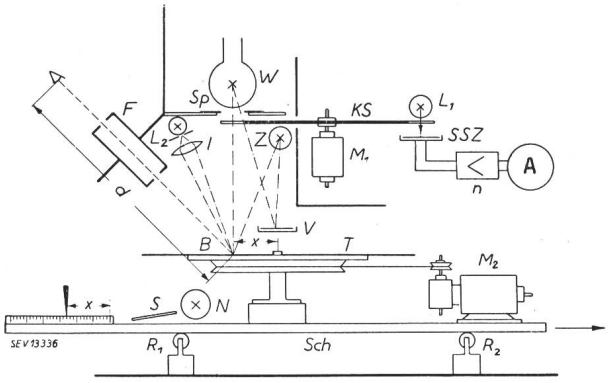

Fig. 1.
Anordnung zur Untersuchung des Bewegungsflimmerns

Arndt[5]) untersucht den dritten möglichen Fall: Wandernder Blick, ruhendes Beobachtungsfeld. Er tut dies aber nur für sinusförmig schwankendes Glühlampenlicht und braucht daher die Frage des Kriteriums nicht anzuschneiden.

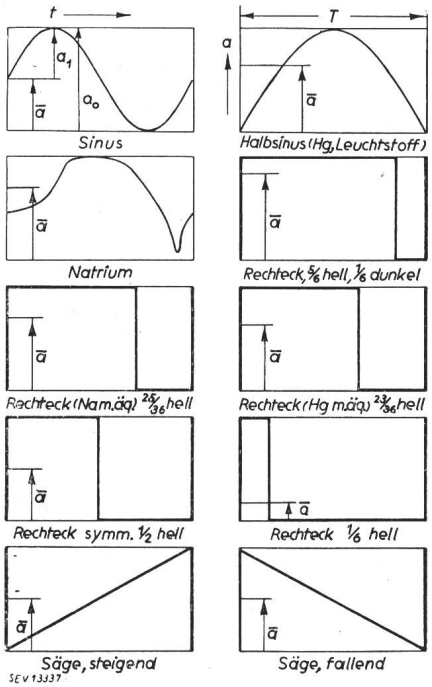

Fig. 2.
Formen der Licht-Zeit-Kurven des Wechsellichtes

Wir stellen uns als Aufgabe die Beantwortung der Frage: Welches der *drei* Kriterien

Grundwellen-Kriterium angewandt auf die Licht-Zeit-Kurve,

Grundwellen-Kriterium angewandt auf die Intensitätsverteilung im Flimmerbild,

Kontrast-Kriterium angewandt auf die Intensitätsverteilung im Flimmerbild

ist für die praktisch vorkommenden Kurvenformen das geeignetste?

Die Frage, ob eines der Kriterien vom *theoretisch-physiologischen* Standpunkt aus das Beste sei, bzw. welche theoretischen Mängel den aufgezählten Kriterien eventuell zur Last gelegt werden könnten, soll *hier* nicht diskutiert werden. Dies wird voraussichtlich von anderer Seite aus geschehen. Wir nehmen die Kriterien wie sie heute vorliegen und fragen uns nur: Welches von ihnen passt am besten zu den Beobachtungsergebnissen, die sich ihrerseits nur auf die hier allein untersuchte Schwellen-Definition des Bewegungsflimmerns beziehen?

Versuchsanordnung (Fig. 1). Die Apparatur muss gestatten, ein welliges und ein konstantes Licht von leicht messbaren Stärken an eine Beobachtungsstelle fallen zu lassen, an welcher sich ein heller Streifen auf dunklerem Hintergrund mit gut regulierbarer Geschwindigkeit vorbeibewegt.

Zur Erzeugung des welligen Lichtes dient eine an Gleichspannung angeschlossene Philips-Lampe *W* (— 130 V, 20 W Opal). Sie befindet sich vor dem 50 mm langen und 6 mm breiten Spalt *Sp*, unter dem die Kurvenscheibe *KS* rotiert. Gemäss der Spaltlänge sind aus dem Rand der Scheibe 2...8 Perioden der gewünschten Licht-Zeit-Kurve *a* herausgeschnitten. Die leicht auswechselbare Scheibe wird vom Motor M_1 (Spezialausführung Hispano Suiza) angetrieben, welcher, um eine möglichst gute Kon-

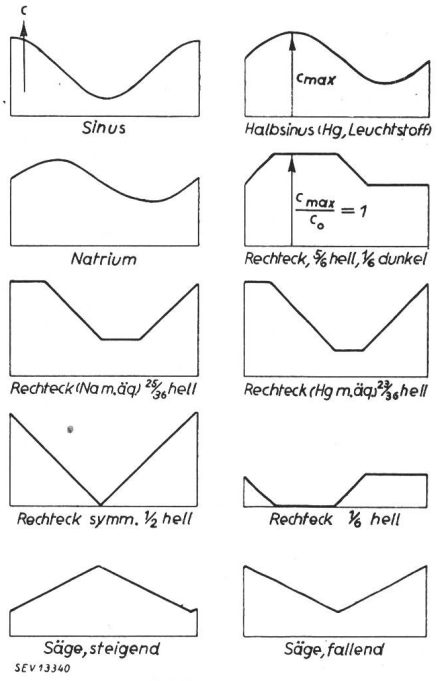

Fig. 5.
Räumliche Intensitätsverteilung im Flimmerbild
c-Funktionen für die in Fig. 2 dargestellten Licht-Zeit-Kurven, berechnet für die Stelle $S = 2s$

stanz der Drehzahl bei grossem Regulierbereich zu erreichen, nach Barkhausen geschaltet ist. Mit Hilfe der Lampe L_1 der Selenzelle *SSZ* und des AEG-Frequenzmessers *n* lässt sich die erforderliche Frequenz des Wechsellichtes rasch einstellen und beständig kontrollieren. Das konstante Zusatzlicht der Lampe *Z* wird mittels eines bequem erreichbaren Regulierwiderstandes eingestellt. Das Licht der beiden Lampen *W* und *Z* fällt sowohl an die Beobach-

tungsstelle B, als auch auf die Selensperrschichtzelle V. Obschon diese sich in einigem Abstand von der Beobachtungsfläche entfernt befindet, ist sie doch so eingestellt, dass das Verhältnis der Beleuchtungsstärken bei B richtig angegeben wird.

Auf dem vom Motor M_2 angetriebenen Rotationsteller T liegt, zentriert auf grauem Hintergrund, ein weisses Papierstreifenkreuz. Eine mit Kreisteilung versehene Scheibe, die Neonglimmlampe N und der Spiegel S erlauben, die Rotationsgeschwindigkeit des Tellers dauernd stroboskopisch zu kontrollieren. Um den Abstand x der Rotationsachse des Tellers vom Beobachtungspunkt, also die Geschwindigkeit des Papierstreifens an der beobachteten Stelle, messbar verändern zu können, sind Rotationsteller und Motor an einem auf den Rollen R_1 und R_2 laufenden Schlitten *Sch* befestigt.

Bei den Messungen hat der Beobachter im allgemeinen, durch das feldbegrenzende Führungsrohr F blickend, die mittels der Lampe L_2 und der Linse l auf dem Teller entworfene Lichtmarke, die Beobachtungsstelle, zu fixieren. Am Führungsrohr befinden sich einige mit weissem Papier überklebte Löcher, die, von aussen schwach beleuchtet, als Marken für extrafoveale Beobachtungen verwendet werden.

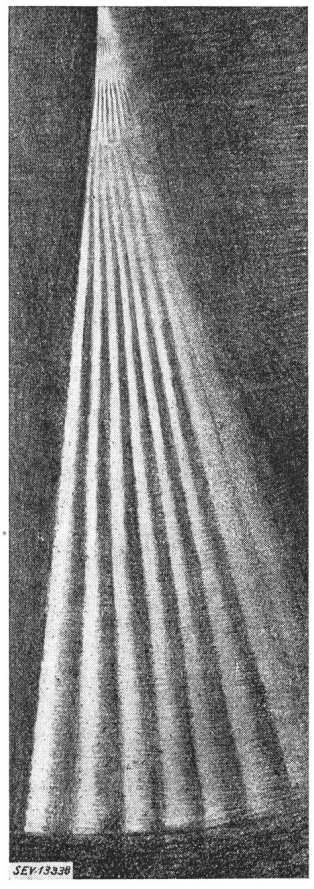

Fig. 3.
Flimmerbild
Versuch der Wiedergabe des subjektiven Eindruckes, den ein bewegter heller Streifen auf dunklem Grunde hervorruft.

Kurvenformen: Fig. 2 zeigt die zehn Licht-Zeit-Kurven $a = f(t)$ (ohne die konstante Zusatzamplitude) mit dem Mittelwert $\bar{a}$; den Wert für die Grundwelle a_1 entnimmt man aus Tab. II, Zeile 2. Die angenäherte Darstellung des reinen Quecksilberlichtes und des Fluoreszenzlichtes durch Sinus-Halbwellen wird sich später durch die Ergebnisse rechtfertigen. Die Natrium-Kurve wurde dem Bericht der Fachgruppe «Flimmern» des Schweiz. Beleuchtungskomitees [6]) entnommen. In Fig. 2 will die Bezeichnung (Na m. äq.) nur sagen, dass diese Kurve dem Natriumlicht hinsichtlich des Mittelwertes $\bar{a}$ (nicht hinsichtlich des Flimmerns!) äquivalent sei. Die zwei Sägekurven wurden gewählt, weil Unterschiede zwischen Empfindungs-Anstieg und -Ausklingen hier am stärksten zum Ausdruck kommen sollten. Wir fanden aber nichts Erwähnenswertes.

Das Flimmerbild und seine Intensitätsverteilung. Fig. 3 ist ein Versuch, den subjektiven Eindruck des bewegten Papierstreifens festzuhalten, wie er sich für die symmetrische Rechteckkurve, welche die grössten Kontraste liefert, etwa darbietet. Die Messanordnung bietet den grossen Vorteil, die Gesamtheit der Erscheinungen in Funktion der Geschwindigkeit mit einem Blick zu übersehen. (Bei den Hauptmessungen wurde natürlich mit kleinem Beobachtungsfeld, ca. 3°, gearbeitet.)

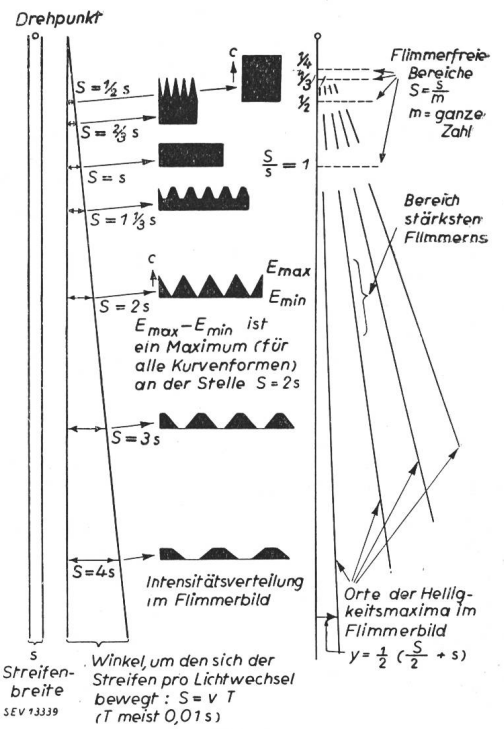

Fig. 4.
Theorie des Flimmerbildes eines weissen Streifens auf schwarzem Grund, der um einen seiner Punkte gedreht wird
Die berechneten Intensitätsverteilungen c beziehen sich auf den Fall der symmetrischen Rechteckkurve

Zunächst fällt das Auftreten flimmerfreier Zonen an den Stellen auf, wo der Vorschub des Streifens pro Lichtperiode gerade ein ganzzahliger Bruchteil der Streifenbreite ist. Fig. 4 enthält abgekürzt die ganze Theorie für den Fall des vollkommen schwarzen Grundes, wo also nur das vom Streifen zurückgeworfene Licht zu berücksichtigen ist. Die Theorie bestätigt die Existenz flimmerfreier Zonen, und zwar unabhängig von der Kurvenform a. Fig. 4 zeigt auch die berechnete räumliche Intensitätsverteilung c für einige Stellen des Flimmerbildes. Man sieht, dass die Funktion c an der Stelle $S = 2s$, d. h. Streifenabstand (Vorschub) gleich der doppelten Streifenbreite, am stärksten schwankt. Es lässt sich mathematisch beweisen, dass diese Beziehung für alle Funktionen a gilt. Auch bei Zumischung von konstantem Licht ist daher allgemein die Zone $S = 2s$ die Zone maximalen Kontrastes. Wir werden später sehen, dass vielleicht nicht der Kontrast das Wesentliche ist. Es hat deshalb jeder Beobachter die Stelle, wo beim Zumischen das Flimmern zuletzt verschwindet, neu gesucht. Sie lag aber stets als flaches Optimum zwischen $S = 1{,}5$ und $2{,}5$ s. Es ist daher erlaubt, sich

in der Berechnung der c-Funktionen auf die Stelle $S = 2s$ zu beschränken.

Es sei hier auf die schönen Untersuchungen von Högger [7]) hingewiesen, der den Flimmereinsatz in Abhängigkeit von der Winkelgeschwindigkeit des Objektes im Gesichtsfeld untersucht. Högger arbeitete offenbar — in unserer Terminologie — bei $S < 2s$, was die Gefahr des Kriteriumwechsels in sich schliesst, da in diesem Gebiet flimmernde und nicht flimmernde Zonen abwechseln. Dieser Umstand erschwert leider die Auswertung seiner Ergebnisse im Hinblick auf den Vergleich der verschiedenen Definitionen für den Welligkeitsgrad.

Fig. 5 zeigt diese Intensitätsverteilungen an der Stelle $S = 2s$, die durch Integration der a-Funktionen über eine Halbperiode $T/2$ (die Zeit, in der der Streifen einen festen Ort überstreicht) gewonnen wurden. Man erkennt: Die in der Technik allein wichtigen Kurven (Sinus, Halbsinus und Natrium) und dementsprechend die Flimmerbilder sehen nahezu gleich aus. Ferner: Einzig die Kurve mit kurzen Lichtspitzen (Rechteck 1/6 hell) führt zu klaren dunklen Lücken. Und: Der Unterschied zwischen den 2 Sägekurven geht durch die Integration verloren.

Abhängigkeit von Sehweite d, Geschwindigkeit v und Streifenbreite s. Alle Messungen bei veränderlichem d, v, und s lassen sich auf solche bei $d =$ 25 cm und z. B. $s = 1$ mm reduzieren, wenn man an der Stelle $S = 2s$ und bei fester Lichtfrequenz $n = 1/T$ arbeitet. *Beweis:* Es ist $S = vT = 2s$, d. h. $s/v = T/2 =$ konstant. Dies bedeutet: Je breiter der Streifen, desto schneller muss er sich bewegen. Die Zeit, während der ein Raumpunkt durch das Vorbeihuschen des Streifens aufgehellt wird, bleibt dieselbe, nämlich $T/2$, und damit auch das Verhältnis zwischen dem Beitrag des Streifens und dem Beitrag des Grundes. Das Flimmerbild wird also nur auseinandergezogen. Bei entsprechender Vergrösserung der Sehweite sind die Verhältnisse wieder *identisch.* Eine Abhängigkeit von der Sehweite allein konnte nun nicht festgestellt werden, was man versteht, weil S nicht so klein war, dass die Frage der Sehschärfe angeschnitten wurde. Folglich brauchen wir uns auch nicht mehr mit der Abhängigkeit von s und v zu befassen.

Abhängigkeit vom Reemissionsvermögen des Streifens und des Grundes. Bouma wählt für die Zeit, während welcher das Auge die Eindrücke integriert, die maximale Integrationszeit im Betrage von $\tau = 0{,}05$ s. Unsere Messungen mit verschieden dunklem Grund lassen sich besser durch $\tau = 0{,}035$ s darstellen und auf vollständig schwarzen Grund reduzieren.

Beweis: Wir denken uns die Leuchtdichte des Flimmerbildes physikalisch in drei Komponenten zerlegt: 1) einen reinen Wechselanteil (man stosse sich nicht daran, dass darin positive und negative Amplituden vorkommen, denn er tritt nie allein auf), der dem Flimmerbild sein eigentliches Gepräge verleiht, 2) einen räumlichen Mittelwert, der dadurch entsteht, dass eine konstante Beleuchtung vom Betrag $E_w + E_z = E$ den bewegten Streifen mit dem Reemissionsvermögen ϱ_s (auf vollkommen schwarzem Grund gedacht) trifft, und 3) einen Beitrag, herrührend vom Grund, wenn dessen Reemissionsvermögen ϱ_g von Null verschieden ist. Eigentlich sollten wir alle diese Beiträge in lm/cm² ausdrücken, weil die Leuchtdichte während einer gewissen Zeit τ, der Integrationszeit, wirkt. Aber τ ist in dieser Untersuchung von allen Grössen die problematischste. Da wir uns schliesslich nur für *Verhältnisse* interessieren, ist es praktischer, sich in Beleuchtungsstärken (E) auszudrücken. Massgebend für den Beitrag 1), der in den später angeführten Formeln im Zähler erscheint, ist der Streifen allein. Für die Beleuchtung des Grundes ist der Mittelwert E allein massgebend, und zwar, verglichen mit dem Streifen, mit dem Gewicht g. Für die mittlere Leuchtdichte des Flimmerbildes [Beitrag 2) und 3)] wird demnach als entsprechende Beleuchtungsstärke $\overline{E}\,(1 + g)$ zu setzen sein. g ist zunächst proportional ϱ_g/ϱ_s. Ferner wirkt der Grund während der Integrationszeit τ, der Streifen an der hier allein betrachteten Stelle $S = 2s$ während der Bedeckungszeit $T/2$. Der Grund wirkt also $2\,\tau/T$ mal länger als der Streifen. g ist demnach $\frac{2\,\tau}{T} \cdot \frac{\varrho_g}{\varrho_s}$. Bei den der Tabelle I zugrunde liegenden Messungen war $n = 100$ Hz, $T = 0{,}01$ s, $T/2 = 0{,}005$ s, $\varrho_s = 85$ %, die Kurvenform symmetrisch rechteckig. Je stärker der Grund reflektierte, desto weniger Zusatzlicht (E_z) war nötig. Das Wechsellicht war stets dasselbe; die Kriterien sollten zu konstanten Werten führen, denn man sah immer dasselbe Flimmerbild; folglich ist g so zu wählen, dass $\overline{E}\,(1 + g)$ konstant ausfällt. Für die dunkleren Gründe ($\varrho_g \leq 14$ %) ist dies möglich, wenn man $g = 7\,\varrho_g/\varrho_s$ wählt, also τ den nicht unvernünftigen Wert 0,035 s zuschreibt. Damit ist, wie behauptet, die Abhängigkeit von der Unterlage angenähert erfasst.

Abhängigkeit des mittleren reflektierten Lichtes vom Reemissionsvermögen des Grundes

Tabelle I.

ϱ_g %	$g = 7\,\varrho_g/\varrho_s$	$\overline{E}$ (gemessen) Lux	$\overline{E}\,(1+g)$ Lux
4,5	0,37	158	216
7,3	0,60	139	223
14	1,15	102	220
32	2,63	75	272

Die *Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke* $\overline{E}$, untersucht zwischen 20 und 500 lx, war nicht bei jedem Beobachter eindeutig zu erfassen. Sie lässt sich deuten als eine Abnahme von τ um ca. 10 % bei Verdoppelung von $\overline{E}$. Dies deckt sich mit der Tatsache, dass die kritische Frequenz des statischen Flimmerns mit steigernder Beleuchtungsstärke entsprechend steigt (Ferry-Porter).

Die *Abhängigkeit von der Flimmerfrequenz* ist sehr kompliziert; z. B.: Bei $\varrho_g = 4{,}5$ % unter sonst gleichen Bedingungen, aber stets unter Wahrung der Beziehung $S = 2s$, durchläuft die Menge des nötigen Zusatzlichtes E_z mit steigender Frequenz ein flaches Maximum bei $n = 100...120$ Hz. Bei Erniedrigung von n erscheint das Bild nicht mehr gleichzeitig an allen Stellen des Beobachtungsausschnittes, sondern es eilt durch denselben. Gleichzeitig sinkt die Zahl der Bildstreifen und ebenso g. Der Punkt verschwindenden Flimmerns ist immer schwieriger zu finden. Angesichts dessen haben wir uns bei den Hauptmessungen auf $n = 100$ beschränkt, um so mehr als die Frequenz der Netze meistens 50 Hz beträgt.

Die Kriterien. Das dem Wert a_0 (Maximum für alle a-Funktionen) entsprechende Maximum der Wechselbeleuchtung sei E_0. Die übrigen im folgenden vorkommenden Grössen wurden bereits erklärt.

Wie vorgesehen, bilden wir drei Welligkeitsgrade

Im Sinne des Grundwellenkriteriums von Andresen (a-Funktionen):

$$w_A = \frac{\frac{a_1}{a_0} E_0}{\bar{E}(1+g)} ; \qquad (\bar{E} = \bar{E}_w + E_z) ;$$

Dieselbe Ueberlegung angewendet auf das räumliche Flimmerbild (c-Funktionen):

$$w'_A = \frac{\frac{c_1}{c_0} E_0}{\bar{E}(1+g)} ;$$

Kontrastkriterium im Sinne von Bouma:

$$w_B = \frac{\frac{c_{max} - c_{min}}{c_0} E_0}{\frac{c_{max}}{c_0} E_0 + E_z + g\bar{E}} .$$

Zusammenhang zwischen den Grundwellenkriterien. Die Werte c entstehen durch Integration von a über eine Halbperiode. Hieraus folgt mathematisch, unabhängig von der Kurvenform, für die Mittelwerte:

$$\frac{\bar{a}}{a_0} = \frac{\bar{c}}{c_0}$$

und für die Grundwellen

$$\frac{a_1}{a_0} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{c_1}{c_0} = 1{,}57 \frac{c_1}{c_0} .$$

Wenn also zwei verschiedene Lichtarten in der Licht-Zeit-Kurve gleichen relativen Grundwellengehalt aufweisen, so weisen die entsprechenden räumlichen Intensitätsverteilungen des Bewegungs-Flimmerbildes um $\pi/2$ kleinere, *unter sich gleiche* relative Grundwellenanteile auf. Die beiden Grundwellenkriterien laufen parallel; es ist stets

$$w_A = \frac{\pi}{2} \cdot w'_A$$

Dies ist der mathematische Grund, weshalb das Kriterium von Andresen für das Bewegungsflimmern überhaupt einen Sinn haben kann.

Ergebnisse der Hauptmessungen (Abhängigkeit von der Kurvenform) (Tabelle II). Diese Messungen beziehen sich auf $T = 0{,}01$ s, $n = 100$ Hz, $\varrho_g = 7{,}3$ %, $g = 0{,}6$ und $E_0 = 88$ Lux; Fixierung, Lichtfarbe stets diejenige des Glühlampenlichtes. Hierzu sei bemerkt, dass bei extrafovealer Beobachtung stets weniger zugemischtes Licht notwendig war. Die Werte $\bar{E}$ der Tab. II sind also in dieser Hinsicht Maximalwerte. Ferner: Wir glauben nicht, dass die Tatsache, dass echte Hg- und Na-Flimmerbilder andersfarbig aussehen als unsere imitierten Bilder, die Ergebnisse wesentlich beeinflussen würden, konnten aber diese Vermutung mit unserer Anordnung nicht kontrollieren.

Messergebnisse und Vergleich der Kriterien
Zeile 17 beweist die Brauchbarkeit des Welligkeitsgrades w_A

Tabelle II

1	Grösse	Sinus	Halbsinus (Hg, Leuchtstärke)	Natrium	Rechteck 5/6 hell	Rechteck (Na m. äq.) 25/36 hell	Rechteck (Hg m. äq.) 23/86 hell	Rechteck symm. 1/2 hell	Rechteck 1/6 hell	Säge steigend	Säge fallend
2	a_1/a_0	0,500	$0{,}420\left(\frac{4}{3\pi}\right)$	0,352	0,318	0,513	0,578	$0{,}637\left(\frac{2}{\pi}\right)$	0,318	$0{,}318\left(\frac{1}{\pi}\right)$	0,318
3	c_1/c_0	0,318	0,270	0,222	0,203	0,330	0,368	0,406	0,203	0,203	0,203
4	$\frac{c_{max}}{c_0}$	0,816	0,900	0,924	1,000	1,000	1,000	1,000	0,334	0,736	0,736
5	$\frac{c_{min}}{c_0}$	0,182	0,370	0,464	0,666	0,390	0,278	0,000	0,000	0,264	0,264
6	$(c_{max}-c_{min})\cdot\frac{1}{c_0}$	0,634	0,530	0,460	0,334	0,610	0,722	1	0,334	0,472	0,472
7	$\begin{cases} M \\ K \end{cases}$	133,3 142,1	121,2 121,2	100,5 101	90 94		134 137,8	141 147		88,6 89,4	87,2 88,0
8	$^1/_2(M+K)$	137,7	121,2	100,8	92	122	135,9	144	104	89	87,6
9	$\bar{E}$ (Lux)	276	242,4	201,6	184	244	271,8	288	208	178	175,2
10	E_z	232	184	141	111	183	214	244	194	134	131
11	$g\bar{E}$	166	146	121	110	146	163	173	125	107	105
12	$w_{B\ unkorr.}$	0,118	0,114	0,118	0,094	0,128	0,136	0,174	0,085	0,135	0,138
13	w_B	0,114	0,111	0,118	0,095	0,125	0,132	0,165	0,085	0,137	0,140
14	w_A	0,096	0,095	0,095	0,095	0,113	0,113	0,116	0,084	0,098	0,100
15	w'_A	0,062	0,061	0,061	0,061	0,072	0,072	0,074	0,053	0,063	0,064

Zu Zeile 7: Messergebnisse zweier Beobachter. Beleuchtung, bei welcher das Flimmern verschwindet. Zahlen = Mittel aus 5 Einzelmessungen. Beobachterwechsel nach jeder 5er-Reihe. Helladaptation nach jeder Einzelmessung. Solche Ergebnisse wurden nur bei höchster Konzentration vormittags erreicht.
Zu Zeile 8: Mittelwert.
Zu Zeile 9: Werte von Zeile 8 in Lux.
Zu Zeile 12: Erhalten durch Anwendung der Formel für w_B; diese Werte beziehen sich aber gemäss Zeile 9 auf verschiedene $\bar{E}$.
Zu Zeile 13: Werte der Zeile 14 auf gleiche Beleuchtungsstärke 200 Lux reduziert. (Vgl. S. 28, 2. Spalte, 2. Alinea: *Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke* $\bar{E}$).

Zu Zeile 14 und 15: Hier sind ohne weiteres die auf 200 Lux bezogenen Werte der beiden anderen Welligkeitsgrade angegeben.

Kritik. Keiner der Welligkeitsgrade ist vollkommen von der Kurvenform unabhängig. Die Kleinheit der w-Werte bei der Kurve «Rechteck 1/6 hell» (Lichtspitzen) besagt, dass wir auf diese (in der Praxis *nicht* vorkommende Kurvenform) empfindlicher reagieren (mehr Zusatzlicht benötigen), als nach irgend einem der Kriterien zu erwarten wäre.

Immerhin hängen die Werte w_A bzw. w'_A weniger von der Kurvenform ab als die Werte w_B. *Die unter sich gleichwertigen Grundwellenkriterien sind also besser.*

Für die in der Praxis allein vorkommenden Kurvenformen (Zeilen 1, 2 und 3) sind, wie die Konstanz der Schwellenwerte für w_A bzw. w'_A zeigt, die *Grundwellenkriterien sogar sehr gut.*

Auf kleinere Unterschiede in den Kurvenformen lassen sich die Grundwellenkriterien jedenfalls gut anwenden.

Sinngemäss sollte man vom Kriterium w'_A allein sprechen, da man nur die c-Kurve, nicht die a-Kurve beim Bewegungsflimmern «zu sehen bekommt». Als Schwellenwert für verschwindendes Bewegungsflimmern sei für schmale, weisse, diffus reflektierende bewegte Objekte auf dunklem Grund der Wert

$$w'_A = 0{,}06$$

festgehalten. Da man eher die a- als die c-Funktion kennt, wird man w'_A berechnen als $w_A/1{,}57$.

Wir merken uns besonders:

a) Zwei Kurvenformen sind punkto Bewegungsflimmern äquivalent, wenn für sie die relativen Anteile der Grundwelle in den Zeitkurven der *Lichtquellen* gleich sind.

b) *Wieviel* konstantes Zusatzlicht es zur Unterschreitung der Schwelle $w'_A = 0{,}06$ im Fall diffus reflektierender weisser Streifen braucht, hängt nicht nur von der Lichtquelle, sondern auch vom Kontrast zwischen bewegtem Objekt und Grund ab.

Beispiel: Vergleich einer Leuchtstoffröhrenlampe mit einer Glühlampe. Es handle sich um eine Fluoreszenzlampe mit Lichtschwankungszahl (= tiefster dividiert durch höchsten a-Wert) = 0,5. Fourieranalyse ergebe $a_1/a_0 = 0{,}21/0{,}83 = 0{,}25$. Die Glühlampe weise eine Lichtschwankungszahl von 0,6, also einen Mittelwert 0,8, eine Grundwelle $a_1 = 0{,}2$, also $a_1/a_0 = 0{,}25$ auf. Folglich sind diese beiden Lichtquellen äquivalent.

Zum Schluss zwei Bemerkungen, um falschen Auslegungen unserer Ausführungen vorzubeugen.

1. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen gestatten *nicht*, für beliebige gegebene Arbeitsverhältnisse den eben noch zulässigen Welligkeitsgrad zu nennen. Wir haben nur mit weissen diffus reflektierenden Streifen auf dunklerem homogenem Grund bei Licht der Zusammensetzung des Glühlampenlichtes gearbeitet, weil wir mit Fäden und glänzenden Drähten weniger scharf definierte Kriterien fanden und die erhoffte Beziehung in der Streuung unterzugehen drohte. Wir mussten uns beschränken, um messen zu können. Der Mann in der Praxis hat es aber meistens nicht mit diffus reflektierenden schmalen Objekten und kleinem Gesichtsfeld zu tun. Die Zahl 0,06 gilt im allgemeinen Fall wohl nicht ohne weiteres. Wir können nur sagen: Wenn ein Vorversuch oder eine an anderen Anlagen gewonnene Erfahrung zeigt, dass eine bestimmte Lichtart (evtl. mit Zumischung von konstantem Licht) befriedigt, dann lässt sich angeben, ob und wieviel konstantes Licht zugemischt werden muss, damit eine andere Lichtart ebenfalls befriedigt.

Dies als Einschränkung im Bestreben, nicht mehr auszusagen, als wir bewiesen haben. Anderseits ist diese Einschränkung nicht dahin auszulegen, dass man über die Verhältnisse bei glänzenden bewegten Objekten zum vornherein *nichts* aussagen könne. Einem Welligkeitsgrad $w'_A = 0{,}06$ entspricht z. B. das Licht von 220-V-100-W-Glühlampen. Uns ist bis jetzt kein Fall bekannt geworden, in welchem bei dieser Lichtart über Bewegungsflimmern geklagt worden wäre.

2. Eben weil die Verhältnisse beim praktischen Sehen komplexer sind als bei unseren unter normalisierten Bedingungen vorgenommenen Messungen, wäre es verfehlt, wenn sich ein Fabrikant dazu verleiten liesse, eine bestimmte Lichtart als besser anzupreisen im Vergleich zu einer andern, weil die seinige einen Welligkeitsgrad von z. B. 0,23 erreicht, während bei einer andern 0,25 festgestellt wird. Mehr als eine *summarische* Orientierung gibt der Welligkeitsgrad nicht, und es sind daher nur grössere Unterschiede wirklich von lichttechnischer Bedeutung.

Beide Vorbehalte sind nichts anderes als der Ausdruck der Tatsache, dass wir an der Grenze dessen angelangt sind, was man mit einer Zahl noch erfassen und ausdrücken kann.

Literatur

1) Andresen, Das Licht Bd. 7 (1937), S. 235.
2) Andresen, Das Licht Bd. 8 (1938), S. 42.
3) Bouma, Philips Techn. Rundschau Bd. 6 (1941), S. 303.
4) Arndt, Kinotechnik Bd. 17 (1935), S. 219.
5) Arndt, Das Licht Bd. 3 (1933), S. 23.
6) Bericht der Fachgruppe Flimmern des Schweiz. Beleuchtungskomitees, erscheint demnächst im Bull. SEV.
7) Högger, Bull. SEV 1944, Nr. 4, S. 90.

Adressen der Autoren:
Prof. Dr. *H. Goldmann*, Direktor der Universitätsaugenklinik, Bern;
Prof. Dr. *H. König*, Vizedirektor des Eidg. Amtes für Mass und Gewicht, Bern;
Dr. *F. Mäder*, Physiker, Meisenweg 14, Bern.