

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 37 (1946)
Heft: 4

Artikel: Einiges über die physiologischen Grundlagen der Licht- und Farbenmessung
Autor: Goldmann, H.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1061087>

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: 13.05.2025

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 ♦ Telefon 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° 4

Samstag, 23. Februar 1946

Einiges über die physiologischen Grundlagen der Licht- und Farbenmessung

Vortrag, gehalten an der Beleuchtungstagung des SEV vom 22. November 1945 in Bern,
von H. Goldmann, Bern

612.843.3

Helligkeitsempfindungen und Farbeindrücke werden vom physiologischen Gesichtspunkt aus betrachtet. Der Unterschied zwischen Kolorimetrie und Spektrophotometrie wird in seiner praktischen Bedeutung erläutert.

M. Goldmann envisage, du point de vue physiologique, les impressions de luminosité et de couleur. Il met pratiquement en évidence la différence qui existe entre la colorimétrie et la spectrophotométrie.

In der Technik messen wir zunächst, um immer wieder die gleichen Bedingungen bei der Durchführung einer Arbeit zu gewährleisten, dann aber auch, um dem Käufer eines Objektes oder von Energie zu garantieren, dass er die von ihm gewünschte Ware im gewünschten Umfang und in gewünschter Qualität erhält. Man kann so und so viele Wattstunden Elektrizität, so und so viele Kalorien Wärme und schliesslich auch so und so viel Licht kaufen. Aber während es verhältnismässig einfach ist, Wärme und Elektrizität zu messen, so ergeben sich bei der Messung von Licht oft grosse Schwierigkeiten, die daher kommen, dass es zwar Elektrizität und Wärmeenergie auch ohne den Menschen gibt, während es Licht ohne Auge nicht geben kann; ohne Auge gibt es nur elektromagnetische Wellen aller möglichen Wellenlängen, unter denen das Auge, wie bekannt, bestimmte Wellenlängen, von 400...700 nm¹⁾, sieht; alle andern sind für das Auge unsichtbar, sind kein Licht. Daraus geht schon hervor, dass Messung der Energie eines elektromagnetischen Wellenzuges nichts über den Lichteindruck, den er hervorruft, auszusagen vermag. Und tatsächlich ist es auch so, dass unter den verschiedenartigen, als farbiges Licht sichtbaren Wellenarten die Helligkeit, d. h. die Stärke des subjektiven Eindruckes bei gleichem Energiegehalt sehr verschieden ist. Ich habe mich sehr gewunden ausgedrückt und habe von der Stärke des subjektiven Eindruckes gesprochen. Wir reden im allgemeinen von Helligkeit; versuchen Sie aber einmal zu sagen, ein blaues und ein gelbes Licht seien gleich hell, und Sie werden sofort merken, dass man zwar sagen kann, dass dieses blaue Licht viel heller oder viel dunkler als jenes gelbe sei, dass uns aber das Urteil «gleich hell» in einem solchen Fall sehr schwer fällt, weil wir nicht recht von den hervorstechenden Farbeindrücken loskommen können. Und so zwingt uns dieses Experiment zunächst einmal zu der prak-

tischen Frage: Was wünscht man in der Technik, wenn man sagt, dieses Natriumlicht und dieses Quecksilber-Dampflicht sollen gleich hell sein? Ich glaube, die Antwort ist nicht schwer; man wünscht feine Arbeiten mit jeder der beiden Beleuchtungen gleich gut durchführen zu können; man wünscht sagen zu können: Wenn bisher an diesem Arbeitsplatz mit Glühlampenlicht von dieser und dieser Stärke gearbeitet wurde, wobei die Glühlampe so und so viele Watt Leistung aufnahm, so muss man jetzt diese und diese Na-Dampf-Lampe von dieser und dieser Leistungsaufnahme an ihre Stelle setzen,

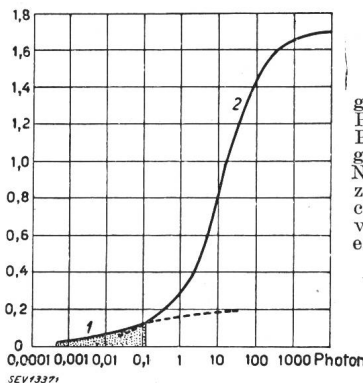


Fig. 1.
Sehschärfe in Funktion der Netzhautbeleuchtung, gemessen in physiologischen Photon. Ein physiologisches Photon ist die (in den USA gebräuchliche) Einheit der Netzhautbeleuchtung, die erzeugt wird, wenn eine Fläche von einer Leuchtdichte von rund 3 Apostilb durch eine Pupille von 1 mm² Öffnung betrachtet wird.
1 Stäbchensehen
2 Zapfensehen

um gleich gut zu sehen; denn die Sehschärfe und das Unterscheidungsvermögen für feine Unterschiede sind von der Beleuchtungsstärke abhängig (Fig. 1). Man sollte also, wenn man verschiedenfarbige Lichtquellen braucht, untersuchen, welche Intensität verschiedenfarbiger Lichter gleicher Sehschärfe und Unterschiedsempfindlichkeit des Auges entspricht. Dies zu untersuchen ist sehr mühselig. Dabei stellt sich aber heraus, dass man *sehr angenähert* die gleiche Beziehung zwischen Intensität und Wellenlänge erhält, wie wenn man untersucht, welche Intensität verschiedenfarbiger Lichter gleich hell erscheint. Auch das ist, wie ich sagte, nicht leicht durchzuführen. Man bedient sich am liebsten einer indirekten Bestimmungsmethode, bei der man zwei

¹⁾ 1 nm (Nanometer) = 10⁻⁹ m = 1 mμ (Millimikro oder Millimikron). Red.

Lichter verschiedener Farbe in der Weise miteinander vergleicht, dass man sie sehr rasch hintereinander abwechselnd dem Auge darbietet, flimmernd wie man sagt, und nachsieht, wie intensiv man das zu untersuchende Licht nehmen muss, damit es, abwechselnd mit dem konstanten Vergleichslicht dargeboten, am wenigsten flimmert (Flimmerphotometrie). Alle die verschiedenen Methoden der Helligkeitsmessung ergeben etwas voneinander abweichende Resultate. Aber man ist übereingekommen, die Resultate der Flimmerphotometrie als die international richtigen auch für den

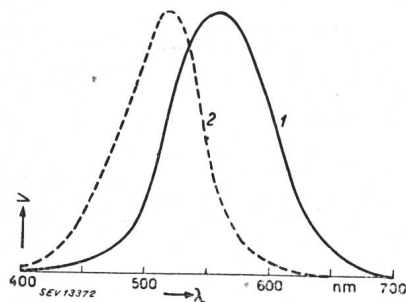


Fig. 2.
 V_{λ} -Kurven
1 bei Helladaptation
2 bei Dunkeladaptation ($E < 0,1$ lx)

Fall heranzuziehen, den man wirklich braucht, nämlich zur Bestimmung gleicher *Arbeitsbequemlichkeit*. Auf diese Weise bekommt man die bekannte V_{λ} -Kurve (Fig. 2), welche anzeigt, wie hell Licht verschiedener Wellenlängen, aber gleicher Energie, erscheint. Die V_{λ} -Kurve 1 gilt aber nur für Augen in einem bestimmten Zustande, bei sogenannter Helladaptation. Bei herabgesetzter Beleuchtung, unter 0,1 Lux (Dunkeladaptation), gilt eine ganz andere V_{λ} -Kurve, nämlich Kurve 2, die ihr Helligkeitsmaximum nicht bei 560, sondern bei 500 nm hat. Man sieht also, dass in Fällen, wo ganz schwache Beleuchtung nötig ist, ein blaugrünes Licht bessere Dienste tut als ein gelbes Licht.

Während die Schwierigkeiten, welche aus dem Subjektiven des Sinneseindrucks erwachsen, bei der Messung der Helligkeit verschiedenfarbiger Lichter vor allem dem Messtechniker Kopfzerbrechen machen, werden sie in die Praxis hinausgetragen, wenn man nicht mehr Photometrie (Helligkeitsmessungen) treibt, sondern wenn sich kolorimetrische Probleme (Farbenprobleme) stellen. Denn während wir vorhin gesehen haben, dass die verschiedenen elektromagnetischen Wellenlängen sehr verschiedenen *hellen* Empfindungen hervorrufen und nur nebenbei davon sprachen, dass sie auch verschieden *farbige* Eindrücke erwecken, so wird jetzt die Sache noch viel komplizierter dadurch, dass ein und derselbe subjektive Farbeindruck durch sehr verschieden zusammengesetzte Wellenzüge hervorgerufen werden kann. Wir können einer bestimmten Farbe nicht ansehen, ob sie z. B. durch eine bestimmte spektrale Wellenlänge hervorgerufen wird oder aus der Mischung von Wellenzügen sehr verschiedener Wellenlängen. Für die Erzeugung des Eindrucks «gelb» genügt eine einzige Wellenlänge, z. B. die des Na-Lichtes; denselben Eindruck erhalten wir, wenn wir Licht der roten Lithiumlinie zugleich mit dem Licht der grünen Quecksilber- oder Thalliumlinie auf das Auge einwirken lassen, oder schliesslich durch eine Lichtermischung, die

alle Wellenlängen mit Ausnahme von blauem Licht der Wellenlänge 475...480 nm enthält (Fig. 3). Ebenso, und dies ist für unsere Betrachtung noch wichtiger, können wir weisses Licht auf sehr verschiedene Art und Weise erhalten: Einmal durch eine bestimmte Mischung von zwei bestimmten Wellenlängen, sogenannter komplementärer Lichter, z. B. 570 gelb plus 470 blau, 670 rot plus 490 blaugrün, 560 grüngelb plus 420 violett. Wir können den Eindruck «weiss» aber auch erhalten durch eine bestimmte Mischung von drei Lichtern, z. B. violett, grün und rot, und schliesslich durch noch

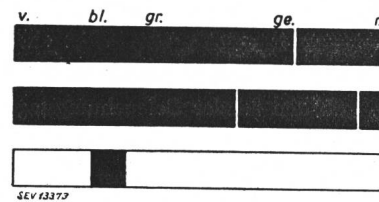


Fig. 3.
Drei «gelbe» Lichter
verschiedener spektraler
Zusammensetzung

mehr Lichter bis zur Mischung sämtlicher sichtbarer Wellenlängen im gleichen Verhältnis, wie sie im Tageslicht vorkommen. Alle Lichtquellen, die solche Lichtarten aussenden, erscheinen weiss, wobei ich unter Lichtquellen auch lichtreflektierende Flächen (Papiere) verstehe (Fig. 4).

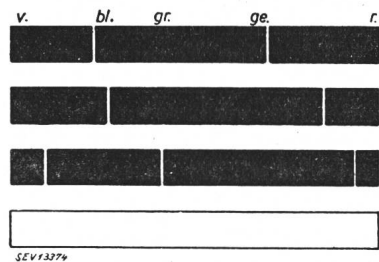


Fig. 4.
Vier «weisse» Lichter
verschiedener spektraler
Zusammensetzung

Da physikalisch nur die Verteilung von Energie auf die verschiedenen Wellenlängen des Spektrums gegeben ist, muss man eine Messmethodik entwickeln, um aus der spektrophotometrischen Durchmessung die Farbe einer Lichtquelle oder eines Körpers ermitteln oder auch ohne spektrophotometrische Ausmessungen die Farbe zahlenmässig darstellen zu können. Das ist der Aufgabenkreis der Kolorimetrie. Man wählt drei Spektrallichter aus, die, in einem bestimmten Verhältnis gemischt, weiss erscheinen und durch die man, wenn man sie in verschiedenen Mischungsverhältnissen verwendet, alle möglichen Farbtöne und ihre Uebergänge zu weiss (ihre «Sättigungsstufen») erzeugen kann, also am besten ein Rot, ein Grün und ein Violett oder Blau. Symbolisiert man die Farbe dieser drei Standardlichter durch die Ecken eines Dreiecks (Fig. 5), so liegen auf seinen Seiten alle Farbübergänge, die aus der Mischung von zwei Standardlichtern hervorgehen. Stellt man sich vor, dass die *Menge* jedes Standardlichtes ein Gewicht sei, so ist der Ort der Mischung der Schwerpunkt der an den beiden Enden der Dreiecksseite angehängten Gewichte. Der Punkt liegt also um so näher an einer Ecke, je mehr man verhältnismässig von dem Licht zur Mischung hat nehmen müssen, das diese Ecke symbolisiert. Jeder Punkt der Fläche des Dreiecks ist

der Repräsentant einer Farbe, welche durch Mischung aller drei Standardlichter erhalten wird, und zwar wieder nach der Schwerpunktüberlegung. Der Weisspunkt liegt im Schwerpunkt des Dreiecks, d. h. an jenem Punkt, den man erhält, wenn man an allen drei Ecken gleiche Gewichte anhängt. Man kann auch Diagramme zeichnen, aus denen man ablesen kann, wieviel man von den Standardlichtern zusammenmischen muss, um jede Spektralfarbe zu erhalten (Fig. 6).

Auf solche Weise ist es möglich, jede Spektralfarbe und ihre Uebergänge zu weiss durch je eine

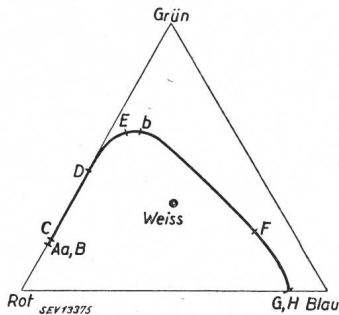


Fig. 5.
Farbdreieck

Masszahl der drei Standardlichter auszudrücken. Durch diese drei Zahlen wird die *Farbe* und die *Sättigung* jedes Lichtes definiert, ohne es spektroskopisch ausmessen zu müssen. Ist das Spektrophotogramm eines Lichtes gegeben, so kann man — allerdings mit recht mühsamen Rechenmethoden — seinen Farbort im Farbdreieck bestimmen.

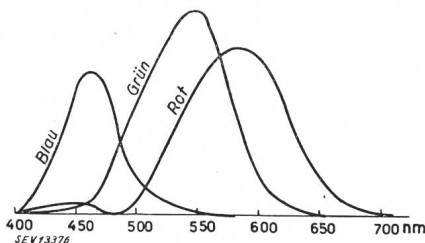


Fig. 6.
Beispiel eines
Farbdigramms

Dies alles ist noch relativ einfach. Ueberraschungen sind dabei nicht zu erwarten, wenn farbige Objekte mit konstant zusammengesetzten Lichtquellen beleuchtet werden. Aber man kann ungeahnte Ueberraschungen erleben, wenn die Praxis Verhältnisse schafft, in denen ein farbiges Objekt nacheinander durch spektral ganz verschieden zusammengesetzte Lichtquellen beleuchtet wird.

Wie man weiss, zeigen Gasentladungslampen ein diskontinuierliches Spektrum. Man kann mit Gasentladungslampen weisses Licht erzeugen. Licht, das so weiss wie Tageslicht aussieht und recht gut Tageslicht ersetzen kann, wenn man von ihm nicht allzuviel verlangt, nämlich nur, dass es z. B. in einer Maschinenfabrik den Eindruck der Weissheit des Tageslichtes hervorruft. Sie werden aber sofort verstehen, warum für die Beurteilung feinsten Farbnuancen von Kleidern oder Krawatten Lampen mit diskontinuierlichem Spektrum unbrauchbar sind. Nehmen wir an, wir hätten im Extremfall eine Lampe, deren Licht aus drei Spektrallinien bestehe, sagen wir 410 violett, 510 grün und 650 rot. Mit diesen drei Lichtern lässt sich weisses Licht erzeugen. Wir

hätten nun vor uns einen Farbstoff, der bei wirklichem Tageslicht gelb aussieht, und zwar deshalb, weil er ein Band von 460...480 nm (blau) absorbiert und alles übrige reflektiert (Fig. 7). Wie wird dieser Farbstreifen in dem weissen Licht aus den drei Spektrallinien aussehen? Es absorbiert weder 410 noch 510 noch 650. Die Zusammensetzung der Mischung des reflektierten Lichtes ist also dieselbe wie die des auffallenden Lichtes, und deswegen wird der bei Tageslicht leuchtend gelb aussehende Stoff im weissen Lichte aus den drei Spektrallinien weiss erscheinen, also in falscher Farbe. Das

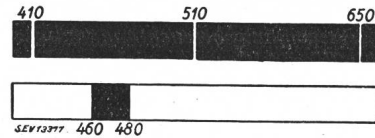


Fig. 7.
Gelber Farbstoff, dessen spektrale Absorption das untere Diagramm zeigt, sieht bei Beleuchtung mit «weissem» Licht aus den drei oben angegebenen Spektrallinien weiss statt gelb aus

was ich hier für einen Extremfall gezeigt habe, gilt weniger krass für alle jene weissen oder tageslichtgleichen Lampen, welche ein Licht erzeugen, dessen physikalische Zusammensetzung nicht identisch ist mit der physikalischen Zusammensetzung des Tageslichtes, die aber trotzdem, als Lichtquellen betrachtet, vollkommen gleich weiss sind wie Tageslicht und ein weisses Papier gleich erscheinen lassen wie bei Tageslicht. Aus diesem Beispiel möchte ich nur die Regel ableiten, dass bei der Beurteilung von farbigen Lichtquellen immer die zwei Seiten des Problems zu berücksichtigen sind: Wünscht man bloss eine Lichtquelle, die wenig gefärbte Objekte wie bei Beleuchtung mit Tageslicht erscheinen lässt, oder wünscht man eine Lichtquelle, die auch die feinsten Farbnuancen wie bei Tageslicht zeigen soll; im ersten Fall genügt ein Licht, das wie Tageslicht aussieht, im zweiten Fall nur ein Licht, das physikalisch identisch dem Tageslicht ist. Die gleiche Schwierigkeit kann sich auch folgendermassen wiederum einstellen. Es werde ein Papier mit einem Farbstoff gefärbt, und dieser Farbstoff werde als Farbe kolorimetrisch mit Standardlichtern ausgemessen. Man kann damit sofort feststellen, welche Farbstoffe z. B. auf ein Papier aufgestrichen und mit Tageslicht beleuchtet gleich aussehen, ohne dass man sie direkt vergleichen muss. Aber man kann nicht sagen, ob diese Farben bei Beleuchtung mit einem anderen Licht auch gleich aussehen. Darüber kann nur ihre spektrometrische Ausmessung Aufschluss geben. Die spektrometrische Messung hinwiederum gestattet nicht, *auf den ersten Blick* die Farbe eines Pigmentes genau anzugeben. Sie sehen also, Spektrophotometrie kann zwar Kolorimetrie ersetzen; sie gestattet die Ausrechnung einer Farbe, wenn auch nach sehr mühseligen Methoden, Kolorimetrie kann aber niemals Spektrophotometrie ersetzen. Beide geben auf gewisse Fragen direkt Auskunft. Fragt man am falschen Ort, so bekommt man eine unbefriedigende Auskunft. Sie müssen daher immer wissen, wann Sie in einem bestimmten Fall Kolorimetrie und wann Sie Spektralphotometrie von einem Messinstitut verlangen müssen. Wenn Objekte

unter einer Lichtquelle von konstanter spektraler Zusammensetzung bestimmte Farben haben sollen, dann kann man Farben benützen, die bei diesem Lichte kolorimetrisch gleich sind. Sollen zwei verschiedene Farbstoffe unter verschiedensten, spektral verschieden zusammengesetzten Lichtquellen gleich

aussehen, dann müssen sie spektrophotometrisch gleich sein, was meist praktisch bedeutet, dass man den gleichen Farbstoff benützen muss.

Adresse des Autors:

Prof. Dr. H. Goldmann, Direktor der Universitätsaugenklinik, Bern.

Bericht über neuere Arbeiten des Schweizerischen Beleuchtungskomitees

Vortrag, gehalten an der Beleuchtungstagung des SEV vom 22. November 1945 in Bern,
von H. König, Bern

061.2 : 628.9.(494)

Aus den Arbeiten des Schweizerischen Beleuchtungskomitees werden zwei besonders aktuelle Probleme hervorgehoben, nämlich die Kleinspannungsbeleuchtung und die Lichtschwankungen bei mit Wechselstrom betriebenen Lichtquellen mit besonderer Berücksichtigung der Gasentladungslampen.

M. König met en évidence, parmi les travaux du Comité suisse de l'éclairage, deux problèmes dont il a été souvent question ces derniers temps: l'éclairage à tension réduite et le papillotage des sources lumineuses alimentées par courant alternatif, en considérant notamment les lampes à décharge gazeuse.

Es ist nicht der Zweck dieses Kurzreferates, eine Uebersicht über die allgemeine Tätigkeit des Schweizerischen Beleuchtungskomitees (SBK) zu geben; zum Teil orientierte hierüber der Tagesvorsitzende in seiner Einleitung¹⁾. Hier will ich nur kurz über die Ergebnisse der Bearbeitung zweier Spezialprobleme berichten und die Auffassung des SBK hierüber bekanntgeben. Es handelt sich um die

vergleichende Beurteilung des Prinzips der Kleinspannungsbeleuchtung

und den

Versuch einer Abklärung von Natur und Grad der Störerscheinungen infolge Lichtschwankungen bei wechselstrombetriebenen Lichtquellen.

Kleinspannungsbeleuchtung

Es sei kurz daran erinnert, was man unter Kleinspannungsbeleuchtung versteht, und welche Eigenschaften sie aufweist.

Ein dickerer Wolframfaden hält bei gleicher Lebensdauer eine höhere Temperatur aus und sendet hierbei pro Watt Heizleistung eine grössere Anzahl Lumen (Lichtstromeinheiten) aus; das Licht ist im Vergleich zum Glühlampenlicht bei höherer Spannung etwas weisslicher. Bei gleicher Leistung erfordert der dickere Draht grösseren Strom, aber dafür kleinere Spannung. Daher der Name.

Es gibt im wesentlichen zwei Systeme:

Das *Transformator-System*, bei welchem mehrere Lampen gemeinsam oder jede für sich an einen Transformator von beispielsweise 220/24 V angeschlossen werden, und

das *Serie-System*, bei welchem z. B. neun 24-V-Lampen in Serie an 220 V gehängt werden. In diesem System muss bei Ausfall einer Lampe eine Nebenlampe aufleuchten oder ein Relais für Ueberbrückung der Lücke im Stromkreis sorgen.

Es liegt nahe, die Kleinspannungs-Beleuchtung mit gewöhnlicher Beleuchtung durch Glühlampen bei der üblichen Spannung zu vergleichen. Zur Veranschaulichung diene ein Beispiel, dessen Zahlen nur ihrer Grössenordnung nach beachtet sein sollen: 100-W-Lampen von 24 V verglichen mit 220-V-Lampen gleicher Leistung; primärer Gewinn an Licht-

ausbeute, je nach dem Lampentyp, den man zum Vergleich heranzieht, 25...35 %; hievon sind abziehen beim Serie-System rund 1 % Verlust in den Zusatzgeräten und beim Transformator-System 10 % oder mehr Transformatorverluste.

Den Besitzer einer Anlage interessiert neben den Kosten für Anschaffung und Unterhalt der Wirkungsgrad der *gesamten* Anlage, d. h. nach Abzug *aller* Verluste; diese können den primären Gewinn kompensieren, sodass unter Umständen der Betrieb keinen wirtschaftlichen Vorteil bringt.

Der Farbunterschied zwischen Kleinspannungslicht und gewöhnlichem Licht ist viel kleiner als der Farbunterschied zwischen diesem und Weiss, sodass die Farbwiedergabe bei Kleinspannung nur wenig besser ist. Die Sehschärfe ist bei Glühlampenlicht unabhängig von der Lichtfarbe. Ich glaube, es ist ein guter Grundsatz:

Man spreche nicht zu viel von der höheren Wirtschaftlichkeit und der etwas besseren Farbwiedergabe der Kleinspannungsbeleuchtung, denn wenn z. B. die Farbwiedergabe bei einer Anlage der springende Punkt ist, dann ist eine Leuchtröhre mit ihrem wunschgemäss getönten weissen Licht überlegen.

Hinsichtlich des Leitungsquerschnittes bringt die Kleinspannungs-Beleuchtung Nachteile.

Es ist selbstverständlich, dass man die Frage: Kleinspannungslicht oder Fluoreszenzlicht? nicht mit der Frage: Arbeitsplatz-Beleuchtung oder Allgemein-Beleuchtung? vermengen soll. Ganz allgemein ist, bei Ersatz einer Beleuchtungsanlage durch eine neue, bei der Beurteilung der neuen zu beachten, dass die neue Beleuchtungsstärke *gewöhnlich höher* ist; mit dem Urteil, die neue Beleuchtung sei «besser» als die frühere, wird der Fachmann daher meistens nicht viel anfangen können, weil er vermuten muss, dass nicht die Qualität, sondern die *Quantität* des neuen Lichtes das Urteil verursacht hat. Ein Vergleich hat nur Wert, wenn er sich auf *vergleichbare* Bedingungen bezieht.

Die Zweckmässigkeit der Anwendung des Kleinspannungs-Prinzips muss an Hand einer die verschiedenen Beleuchtungsarten vergleichenden Anschaffungs-, Unterhalts- und Betriebskosten-Berechnung *von Fall zu Fall* geprüft werden. Dann werden

¹⁾ Erscheint später im Bulletin.