

# Ein digitales Meßgerät zur Ermittlung des Lichtstromes aus der Lichtverteilung\*\*

Es wird eine Meßanordnung beschrieben, die eine direkte Messung von Lichtströmen und Teillichtströmen erlaubt. Dabei werden die Lichtquelle (Lampe oder Leuchte) kontinuierlich um eine vertikale Achse und der Empfänger bzw. ein Spiegelsystem gleichzeitig um eine horizontale Achse gedreht. Die Abtastung des Lichtstärkeverteilungskörpers erfolgt so auf einer spiralförmigen Bahn. Die Beleuchtungsstärken auf dem Empfänger werden integriert. Das digitale Anzeigergerät zeigt am Ende der 6,5 Minuten dauernden Messung direkt den Lichtstrom an. Die Bedienung der Anordnung ist einfach. Der Meßfehler beträgt zur Zeit etwa  $\pm 2\%$ ; er läßt sich durch Weiterentwicklung vermindern.

## Grundlage

Der Lichtstrom  $\Phi$  ist die photometrisch bewertete Strahlungsleistung [1].

$$\Phi = K_m \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \Phi_{e\lambda} V(\lambda) d\lambda. \quad (1)$$

Lichtstrommessungen setzen daher eine  $V(\lambda)$ -getreue Bewertung der Strahlung voraus. Definitionsgemäß ergibt sich der Lichtstrom einer Lichtquelle durch Integration der Beleuchtungsstärke  $E$  über eine um die Lichtquelle gedachte geschlossene Hüllfläche  $A$  oder durch Integration der Lichtstärke über den ganzen Raumwinkel  $4\pi$ :

$$\Phi = \int_{(A)} E dA, \quad (2)$$

$$\Phi = \int_{(4\pi)} I d\Omega. \quad (3)$$

Zur Messung des Lichtstromes bestehen zwei Möglichkeiten [2]:

a) Messung des Lichtstromes mit der Ulbrichtschen Kugel. Die Messung ist schnell und einfach durchzuführen. Zu einer genauen Messung muß eine Normlampe mit möglichst gleicher Strahlungsfunktion und etwa gleicher räumlicher Lichtstärkeverteilung verwendet werden.

b) Bestimmung des Lichtstromes aus der Lichtstärke- oder Beleuchtungsstärkeverteilung. Bei Messung der Lichtstärken mit einem an  $V(\lambda)$  angepaßten Empfänger bzw. bei Messung der Beleuchtungsstärken mit einem  $V(\lambda)$ - und  $\cos$ -getreuen Empfänger ist kein Einfluß der Strahlungsfunktion oder der räumlichen Lichtstärkeverteilung der Lichtquelle vorhanden. Die Messung und die sich anschließende Auswertung sind umständlich und zeitraubend, da im Hinblick auf einen geringen Meßfehler eine verhältnismäßig große Anzahl von Meßwerten berücksichtigt werden muß.

Bei allen Lichtstrommessungen ist darauf zu achten, daß der abgestrahlte Lichtstrom bei vielen Lampen und Leuchten von der Umgebungstemperatur, bei den meisten außerdem von der Lage abhängig ist.

## Lichtstromermittlung aus der Lichtverteilung

Über die Grundlagen der Lichtstromermittlung aus der Lichtstärke- oder Beleuchtungsstärkeverteilung ist von *Wiechowski* [3] ausführlich berichtet. Mißt man die Beleuchtungsstärke-

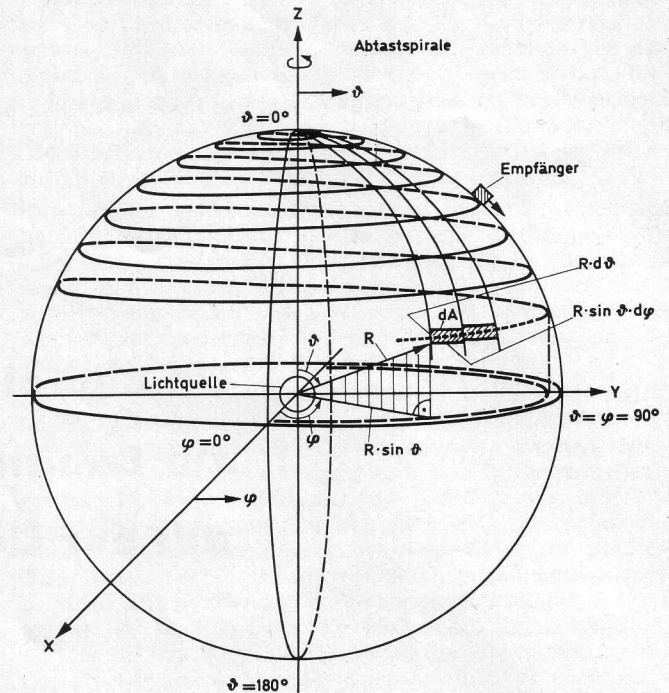


Bild 1. Prinzip der automatischen Lichtstromintegration

verteilung auf einer um die Lichtquelle gedachten Kugeloberfläche (Kugelradius  $R$ ), so ergibt sich mit (Bild 1):

$$dA = R^2 \sin \vartheta d\vartheta d\varphi, \quad (4)$$

$$\Phi = R^2 \int_{(\vartheta=0)}^{(\pi)} \int_{(\varphi=0)}^{(2\pi)} E(\vartheta, \varphi) \sin \vartheta d\vartheta d\varphi = R^2 \int_{(\vartheta=0)}^{(2\pi)} \int_{(\varphi=0)}^{(\pi)} E(\vartheta, \varphi) \sin \vartheta d\vartheta d\varphi. \quad (5)$$

Der Mittelpunkt der Kugel muß nicht mit dem Lichtquellenmittelpunkt zusammenfallen. Es genügt eine  $V(\lambda)$ - und  $\cos$ -getreue Bewertung der Beleuchtungsstärke.

Entsprechend gilt für die Bestimmung aus der Lichtstärkeverteilung

$$\Phi = \int_{(\varphi=0)}^{(2\pi)} \int_{(\vartheta=0)}^{(\pi)} I \sin \vartheta d\vartheta d\varphi. \quad (6)$$

Bei dieser Messung muß jenseits der photometrischen Grenzentfernung gemessen werden, die abhängig ist vom zugelassenen Fehler, von der größten Ausdehnung der Lichtquelle, von der größten Ausdehnung des Empfängers, von der räumlichen Empfindlichkeitsverteilung des Empfängers, von der Lichtstärkeverteilung der Lichtquelle.

Nach einem Vorschlag von *Frederiksen* [4] kann die Lichtstärke auch durch Messung innerhalb der photometrischen Grenzentfernung bestimmt werden, wenn sie unter Verwendung einer größeren Anzahl von Empfängern auf eine Leuchtdichtemessung zurückgeführt wird.

$$I = \int_{(A_1)} L dA_1 \cos \varepsilon_1. \quad (7)$$

Statt einer größeren Anzahl von Empfängern können auch entsprechend viele Lichtleiter, die mit einem einzigen Empfänger gekoppelt sind, verwendet werden.

\* Professor Dr.-Ing. J. Krochmann, Dipl.-Ing. P. Marx, Institut für Lichttechnik der Technischen Universität Berlin

\*\* Mitteilung aus dem Institut für Lichttechnik der Technischen Universität Berlin, Direktor: o. Professor Dr.-Ing. H.-J. Helwig

Bei Aufnahme der Lichtstärkeverteilung bestehen die folgenden Möglichkeiten:

1. Die Lichtquelle steht fest:

1.1. Der Empfänger wird sowohl um eine vertikale als auch um eine horizontale Achse um die Lichtquelle herum gedreht. Die Drehung wird jeweils entweder schrittweise oder kontinuierlich durchgeführt.

1.2. Es werden Lichtleiter auf einem Halbkreis angeordnet, die insgesamt mit einem einzigen Empfänger gekoppelt sind. Der Halbkreis mit den Lichtleitern wird um die Lichtquelle herum gedreht [5].

1.3. An Stelle der Lichtleiter werden mehrere Empfänger auf einem Halbkreis angeordnet, der um die Lichtquelle herum gedreht wird.

2. Die Lichtquelle wird um eine vertikale Achse gedreht:

2.1. Die Lichtquelle wird schrittweise gedreht.

2.1.1. Der Empfänger wird um eine horizontale Achse gedreht, entweder schrittweise oder kontinuierlich.

2.1.2. Ein Spiegelsystem wird um die Lichtquelle gedreht, dadurch kann der Empfänger fest stehen bleiben. Die Messung kann bei schrittweiser oder kontinuierlicher Drehung erfolgen.

Wird die Lampe in  $k$  Schritten um den Betrag  $\Delta\varphi = \frac{\pi}{k}$  um die vertikale Achse von  $\varphi = 0$  bis  $\pi$  gedreht, so ergibt sich der Lichtstrom bei kontinuierlicher Drehung des Empfängers zu

$$\Phi = R^2 \frac{\pi}{k} \sum_{n=1}^k \left( \int_0^{2\pi} E(\vartheta, \varphi) \sin \vartheta \, d\vartheta \right)_{n=\text{const}} \quad (8)$$

2.2. Die Lichtquelle wird kontinuierlich gedreht.

2.2.1. Empfänger oder Spiegelsystem werden schrittweise um eine horizontale Achse gedreht [6] [7]. Wird der Empfänger in  $i$  gleichabständigen (gleiche Winkel) Schritten um die Lichtquelle gedreht, so ergibt sich der Lichtstrom zu

$$\Phi = R^2 \frac{\pi}{i} \sum_{m=1}^i \left( \sin \vartheta_m \int_0^{2\pi} E(\vartheta, \varphi) \, d\varphi \right)_{m=\text{const}} \quad (9)$$

Das Verfahren entspricht dem in 1.2. und 1.3. beschriebenen, nur werden die Beleuchtungsstärken nacheinander und nicht gleichzeitig abgetastet.

2.2.2. Empfänger oder Spiegelsystem werden kontinuierlich um eine horizontale Achse gedreht [8].

3. Die Lichtquelle wird sowohl um eine vertikale als auch um eine horizontale Achse gedreht, der Empfänger steht fest [9]. Dabei ist darauf zu achten, daß sich bei temperatur- und lageabhängigen Lichtquellen der Lichtstrom bei der Drehung um eine horizontale Achse ändert. Der Einfluß dieser Änderung wird dadurch eliminiert, daß die Beleuchtungsstärke auf einem besonderen Empfänger, der in geringem Abstand von der Leuchte starr mit ihr verbunden ist, konstant gehalten wird. Der Empfänger arbeitet auf einem Regelkreis, der die Lampenstromstärke so regelt, daß die Beleuchtungsstärke auf dem Empfänger konstant bleibt. Eine derartige Anordnung wurde auf Vorschlag von Schüler von Graszynski entwickelt [10].

Die unter 2 beschriebene Möglichkeit (Drehung der Lichtquelle um eine vertikale Achse und Drehung des Empfängers um eine horizontale Achse oder Verwendung eines Spiegelsystems) wird wegen des einfacheren Aufbaues gegenüber 1 und der höheren Genauigkeit gegenüber 3 am häufigsten verwendet. Dabei ist es möglich, Lichtstärkeverteilungen in Vertikal- oder Horizontalebene direkt aufzuzeichnen, einzelne Werte zu drucken und in Raumwinkelzonen mit  $\Delta\varphi = \text{const}$  oder  $\Delta\vartheta = \text{const}$  zu integrieren [11] [12].

### Verwendetes Meßprinzip

Bei dem von uns verwendeten Meßprinzip werden sowohl Lichtquelle als auch Empfänger bzw. Spiegelsystem kontinuierlich gedreht. Dabei bewegt sich der Empfänger auf einer Spirale um die Lichtquelle (Bild 1). Bei konstanten Winkel-

geschwindigkeiten der Lichtquelle  $\omega_L$  und des Empfängers  $\omega_E$  ergibt sich

$$d\varphi = \omega_L dt, \quad (10)$$

$$d\vartheta = \omega_E dt, \quad (11)$$

$$\Delta\vartheta = \omega_E \Delta t, \quad (11a)$$

$$\sin \vartheta = \sin(\omega_E \cdot t). \quad (12)$$

Setzt man

$$K = R^2 \cdot \omega_L \cdot \omega_E \cdot \Delta t, \quad (13)$$

so ergibt sich für diese Anordnung der Lichtstrom zu

$$\Phi = k \int_{t_1}^{t_2} E(t) \cdot \sin(\omega_E \cdot t) dt, \quad (14)$$

$t_1$  für  $\vartheta = 0$ ,  $t_2$  für  $\vartheta = \pi$ .

Die Lichtstrombestimmung wird damit auf die Integration der mit  $\sin \vartheta$  bewerteten und von  $\varphi$  und  $\vartheta$  abhängigen Beleuchtungsstärke zurückgeführt. Ist der Abstand zwischen Lichtquelle und Empfänger größer als die photometrische Grenzdrehung und ist der Schnittpunkt der Drehachsen von Lichtquelle und Empfänger bzw. Spiegelsystem identisch mit dem Mittelpunkt der Lampen [11], so kann aus den Beleuchtungsstärken auf die Lichtstärken umgerechnet werden.

Bei der von uns aufgebauten Anlage ohne Spiegelapparat, die sich in der Zwischenzeit auch im praktischen Betrieb bei einer Leuchtenfirma bewährt hat, wird die Lichtquelle in 8,67 Sekunden einmal um ihre vertikale Achse gedreht. Bei jeder Drehung der Lichtquelle um  $360^\circ$  dreht sich der Empfänger um  $\vartheta = 4^\circ$  weiter. Es sind daher 45 Umdrehungen der Lichtquelle nötig, um die gesamte Kugeloberfläche abzutasten. Das entspricht einer Meßzeit von 6,5 Minuten. Die  $4^\circ$ -Abtastung

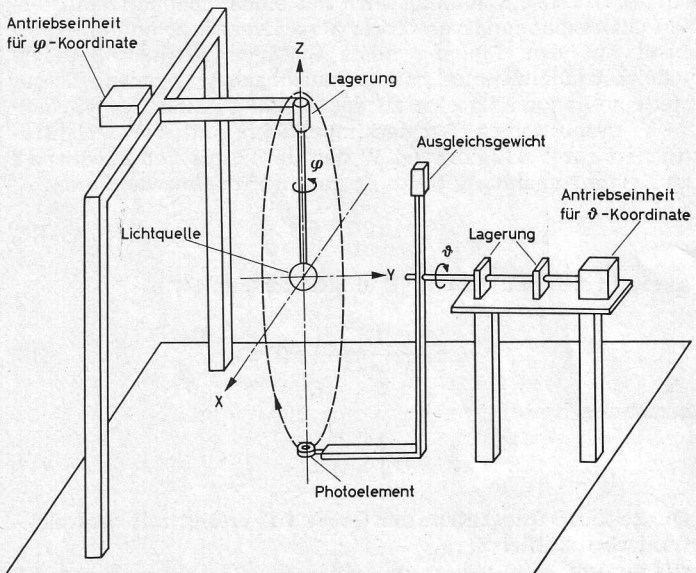


Bild 2. Mechanischer Aufbau des Lichtstrommeßgerätes

ist auch bei spitzen Lichtstärkeverteilungskörpern ausreichend genau. Im Extremfall kann aber die Drehung in  $\vartheta$ -Richtung langsamer erfolgen, so daß bei entsprechend längerer Meßzeit eine noch höhere Genauigkeit erreicht wird. Für den Antrieb der Lichtquelle und des Empfängerdrehrarms werden Synchronmotoren verwendet. Bild 2 zeigt den mechanischen Aufbau des Lichtstrommeßgerätes.

### Elektronischer Aufbau

Es wurde ein relativ aufwendiges, dafür aber genaues Verfahren zur zeitlichen Integration der veränderlichen Größe  $E(t) \sin(\omega_E \cdot t)$  gemäß Gleichung (14) angewandt. Die analoge Meßgröße Beleuchtungsstärke wird zunächst in eine proportionale Spannung umgewandelt. Ein Spannungsfrequenzwandler setzt diese Spannung in eine zu ihr streng proportionale Impulsfolge um. Die Impulse werden während des durch die Drehung des Schwenkarmes mit dem Empfänger von  $\vartheta = 0$  bis  $\vartheta = \pi$  definierten Zeitintervalls mit einem elektronischen Zähler gezählt. Die Summe entspricht dem Integral der Meßgröße.

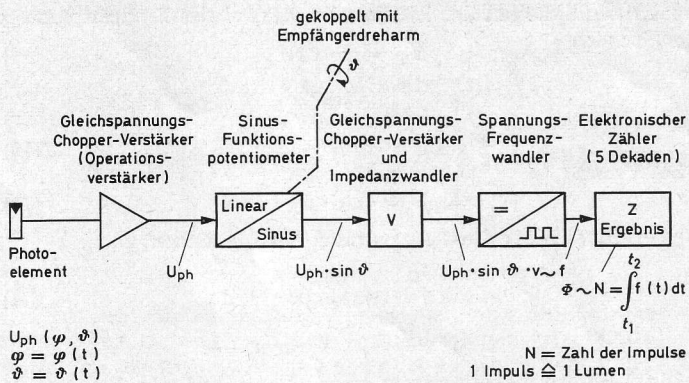


Bild 3. Blockschaltbild zum Lichtstrommeßgerät

In Bild 3 ist die Meßanordnung als Blockschaltbild dargestellt. Als Empfänger wird ein gut an  $V(\lambda)$  angepaßtes Photoelement [z. B. das  $V(\lambda)$ -Element der Firma Osram], das zweckmäßig auf einem Operationsverstärker arbeitet, verwendet (angenähert Kurzschlußbetrieb). Damit ergibt sich bis zu hohen Beleuchtungsstärken ein linearer Zusammenhang zwischen der Ausgangsspannung  $U_{ph}$  des Operationsverstärkers und der Beleuchtungsstärke  $E$ . Die Empfindlichkeit  $s$  der Kombination

Photoelement - Operationsverstärker beträgt  $s = \frac{U_{ph}}{E}$ . Die

Ausgangsspannung  $U_{ph}$  des Operationsverstärkers wird mittels eines Funktionspotentiometers sinusförmig bewertet. Der Ausgang dieses Sinuspotentiometers liefert das Produkt  $U_{ph} \cdot \sin(\omega_E t)$ . Diese Spannung wird mit einem chopperstabilisierten Gleichspannungsverstärker  $V$  nachverstärkt und anschließend auf den Eingang eines Spannungsfrequenzwandlers (Gleichstrommeßmotor mit Impulsabgabe) gegeben. Dieser stellt ausgangseitig eine zu der Eingangsgröße  $U_{ph} \cdot \sin(\omega_E t) \cdot V$  proportionale Rechteckimpulsfolge mit der Folgefrequenz  $f$  zur Verfügung. Ist  $W$  das Verhältnis von Frequenz  $f$  zu Eingangsspannung  $U$  des Spannungsfrequenzwandlers:

$$W = \frac{f}{U}, \quad (15)$$

so ergibt sich mit  $U_{ph} = s \cdot E$  und Gleichung (14):

$$\Phi = k \frac{1}{W \cdot s \cdot V} \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt \quad (16)$$

beziehungsweise

$$\Phi = C \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt. \quad (17)$$

Die zeitliche Integration der Größe  $f(t)$  erfolgt mit dem elektronischen Zähler  $Z$ .

Die in Bild 3 gezeigte Meßkette setzt sich aus einem analogen und einem digitalen Teil zusammen. Sie stellt also eine spezielle hybride Rechenschaltung für das Lichtstromintegral dar. Die Kalibrierung des Gerätes wurde mit Lichtstromnormalen durchgeführt, der Verstärkungsgrad  $V$  so gewählt, daß der Lichtstrom direkt ohne irgendwelche Umrechnungen in Lumen angezeigt wird. Für die Reproduzierbarkeit ergab sich ein Fehler von  $\pm 0,8\%$ . Der Meßfehler liegt bei etwa  $\pm 2\%$ .

### Messung von Teillichtströmen [13]

Bei der Projektierung von Beleuchtungsanlagen interessiert derjenige Lichtstromanteil, der auf bestimmte beleuchtete Flächen aufgestrahlt wird. Bislang werden diese Teillichtströme durch raumwinkelgerechte Integration über den Lichtstärkeverteilungskörper gewonnen. Bei Straßenleuchten wird danach der Beleuchtungswirkungsgrad  $\eta_B$  als Funktion des Verhältnisses von Straßenbreite  $b$  zur Lichtpunkthöhe  $h$  angegeben. Das zeitraubende Verfahren zur Ermittlung der Teillichtströme kann durch eine direkte Messung ersetzt werden. Man hat zu unterscheiden zwischen Teillichtströmen, die vertikale und solchen, die horizontale Flächen treffen. Für die Messung des eine horizontale Fläche treffenden Teillichtstro-

mes muß die Leuchte einmalig um  $90^\circ$  um eine horizontale Achse gedreht werden. Die durch die neue Brennlage bedingte Änderung des Gesamtlichtstromes läßt sich durch eine zweite Lichtstrommessung in dieser von der Gebrauchslage abweichenden Stellung ermitteln. Zum Beispiel fällt auf eine zu beleuchtende Straße ein Lichtstromanteil, dessen zugeordneter Raumwinkel durch zwei Ebenen gebildet wird, die die Straßenbegrenzungen tangieren und sich im Mittelpunkt der Lichtquelle schneiden. Der Raumwinkel, innerhalb dessen die Beleuchtungsstärke oder Lichtstärke zu bewerten ist, erhält dadurch die Gestalt einer Apfelsinenscheibe. Der Schnittwinkel der beiden Ebenen ist  $\Delta\varphi$ , wenn die Leuchte richtig gedreht ist. Der Lichtstrom darf daher nur im Winkelbereich  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$  integriert werden. Da hierbei außerhalb der photometrischen Grenzentrfernung gemessen werden muß, ist bei größeren Leuchten die Verwendung eines Drehspiegelgerätes erforderlich, und die Lichtquelle muß in der Mitte der gedachten Kugel angebracht sein. Der Integration des Teillichtstromes liegt folgendes Funktionsprinzip zugrunde:

Ein mit der  $\varphi$ -Koordinate synchron laufender Impulsgeber liefert pro Umdrehung der Lichtquelle 360 Impulse, d. h., jeder Impuls entspricht einem Winkelgrad. Die Impulse laufen in einen dreistelligen elektronischen Vorwählzähler mit zwei beliebig zwischen den Werten  $0 \dots 360$  einstellbaren Vorwählern. Nach jeder vollständigen Umdrehung setzt ein Löschimpuls den Zähler auf Null.

Angenommen, es interessiert bei einer Leuchte der zwischen den Winkeln  $\varphi_1 = 110^\circ$  und  $\varphi_2 = 235^\circ$  abgestrahlte Lichtstrom. An den beiden digitalen Vorwählern werden manuell die Ziffern 110 und 235 eingestellt. Die Integration beginnt bei  $\varphi = 0^\circ$ ,  $\theta = 0^\circ$ . Hat sich die Leuchte von  $\varphi = 0^\circ$  bis  $\varphi_1 = 110^\circ$  gedreht, sind 110 Impulse im Zähler aufsummiert. Das erste Vorwähllogik liefert bei dieser Ziffer nun ein Signal, das mittels einer Torstufe den fünfstelligen Integrationszähler  $Z$  öffnet. Entsprechend gibt die zweite Vorwähllogik bei Erreichen des Winkels  $\varphi_2 = 235^\circ$  ein zweites Signal ab, das das Tor des Zählers  $Z$  schließt. Bei jeder der 45 Umdrehungen der Leuchte wiederholt sich der Vorgang, d. h., es wird nur der gewünschte Teillichtstrom gemessen. Eine analoge Steuereinrichtung für den Winkel  $\theta$  würde weitere Möglichkeiten eröffnen. Für Teillichtströme auf beliebig geformten Flächen sind die Integrationsgrenzen allgemein von  $\theta$  und  $\varphi$  abhängig.

### Literatur

- [1] DIN 5031 Blatt 3: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik; Größen, Bezeichnungen und Einheiten; Lichttechnische Größen und Einheiten
- [2] DIN 5032 Blatt 1: Lichtmessung; Photometrische Meßverfahren
- [3] Wiechowski, W.: Messung des Lichtstromes. I. Grundsätzliches. Ermittlung des Lichtstromes aus der Lichtverteilung. ATM V 424-3 Lieferung 317 (1962)
- [4] Frederiksen, E.: Unidirectional-sensitive photometer. Light and Lighting 60 (1967), S. 46-48
- [5] Fleischer, J.: Über ein neues Verfahren zur schnellen Messung des Lichtstromes (wird veröffentlicht)
- [6] Adrian, W.: Ein Verfahren zur schnellen Bestimmung des Lichtstromes aus der Lichtstärkeverteilung. LICHTTECHNIK 18 (1966) Nr. 4, S. 41 A-43 A
- [7] Förste, D.: Verbesserung eines Verfahrens zur Messung von Lichtströmen. PTB-Mitteilungen 75 (1967), S. 481-482
- [8] Marx, P.: Direkte Messung von  $b/h$ -Kurven. Studienarbeit am Institut für Lichttechnik der TU Berlin (1964)
- [9] Pahl, A., und Baumgarten, K. G.: Gerät zum automatischen Messen und Aufzeichnen von Lichtverteilungskurven. LICHTTECHNIK 11 (1959) Nr. 6, S. 334-335
- [10] Graszynski, K.: Aufbau eines Regelkreises an einer Normallampe. Diplomarbeit am Institut für Lichttechnik der TU Berlin (1968)
- [11] Pracejus, W. G.: A lumen integrator for semi-automatic distribution photometers. Illum. Engng. 49 (1954) Nr. 12, S. 589-590
- [12] DIN 5032 Blatt 4: Lichtmessung; Messungen an Leuchten
- [13] Marx, P.: Messung von Teillichtströmen. Diplomarbeit am Institut für Lichttechnik der TU Berlin (1966)