

ELEKTRONISCHE ULBRICHTKUGEL

Marx, P.

MX-ELECTRONIC, Berlin, DEUTSCHLAND

info@mx-electronic.com, www.mx-electronic.com

ABSTRACT

The Electronic integrating sphere with helical scanning of the light source is characterized by the following properties:

Absolute measurement of luminous flux, there is no need for calibrated flux standard lamps.

The measurement of luminous flux is largely independent of the spectral radiation function and the spatial light distribution of the measured light source.

The minimum measurement time for a complete luminous flux integration takes only about 5 minutes.

Keywords: electronic integrating sphere, luminous flux measurement

ZUSAMMENFASSUNG

Die Elektronische Ulbrichtkugel mit Spiral-Abtastung der Lichtquelle zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus:

Absolute Lichtstrommessung, es werden keine Lichtstrom-Normale benötigt

Die Lichtstrommessung ist weitgehend unabhängig von der Strahlungsfunktion und der räumlichen Verteilung der zu messenden Lichtquelle

Die minimale Messzeit für eine Lichtstromintegration bei lückenloser Abtastung beträgt etwa 5 Minuten

Lichtquellen können in beliebig einstellbarer Brennweite gemessen werden, während der Messung wird die Lichtquelle nicht bewegt (dies gilt jedoch nur für das Kardan-System, vgl. Abb.3)

1. MESSUNG DES LICHTSTROMS MIT DER ULBRICHTKUGEL

Mit traditionellen Ulbrichtkugeln sind nur Relativmessungen möglich. Infolge der unvermeidlichen Diskrepanz zwischen den theoretischen Voraussetzungen der klassischen U-Kugel-Messmethode (die Kugel ist vollkommen leer, der Kugelinnenanstrich reflektiert vollkommen diffus und spektral aseptiv) und den realen Verhältnissen, ist eine absolute Lichtstrommessung gemäß Formel (1) nicht möglich.

$$\Phi = 4 \pi r^2 \cdot E_{\text{ind}} \cdot (1-\rho) / \rho \quad (1)$$

r = Kugelradius

ρ = Reflexionsgrad des Anstrichs

E_{ind} = indirekte Beleuchtungsstärke

Es muss daher vor der Lichtstrom-Messung einer Lichtquelle mit unbekanntem Lichtstrom mittels zeitaufwendigen Goniophotometer-Messungen (i.d.R. >30 Minuten) ein geeignetes Lichtstromnormal hergestellt werden, das möglichst dieselbe spektrale und räumliche Verteilung wie die zu messende Lichtquelle aufweist.

Die U-Kugel bietet den Vorteil, dass die Lichtstrommessung relativ schnell in wenigen Minuten durchzuführen ist. Nachteilig ist jedoch die relativ große Mess-Unsicherheit, die nur bei sehr großer Sorgfalt und unter Berücksichtigung sämtlicher Fehlereinflüsse unter 5% herabgedrückt werden kann.

2. MESSUNG DES LICHTSTROM VON LEDS, LED-ENGINES, LED-LEUCHTEN UND SONSTIGEN LICHTQUELLEN NACH DEM PRINZIP DER „ELEKTRONISCHEN ULBRICHT-KUGEL MIT SPIRAL-ABTASTUNG“

Hierbei tastet der photometrische Empfänger mit Cosinus- und $V(\lambda)$ -Anpassung oder alternativ ein geeigneter Arrayspektrometer-Empfänger eine virtuellen Kugeloberfläche, in deren Zentrum sich die zu messende Lichtquelle befindet, auf einer spiralförmigen Bahn kontinuierlich ab (Abb.1).

Vorteile: Absolut-Lichtstrommessung, es werden keine Lichtstromnormale benötigt, hohe Messgenauigkeit durch geringe Winkelschrittweiten $\Delta\varphi$ und $\Delta\vartheta$ und geringe Messzeit (wenige Minuten). Trotz geringer Messzeit ist der numerische Lichtstromintegrationsfehler $< 0,1 \%$.

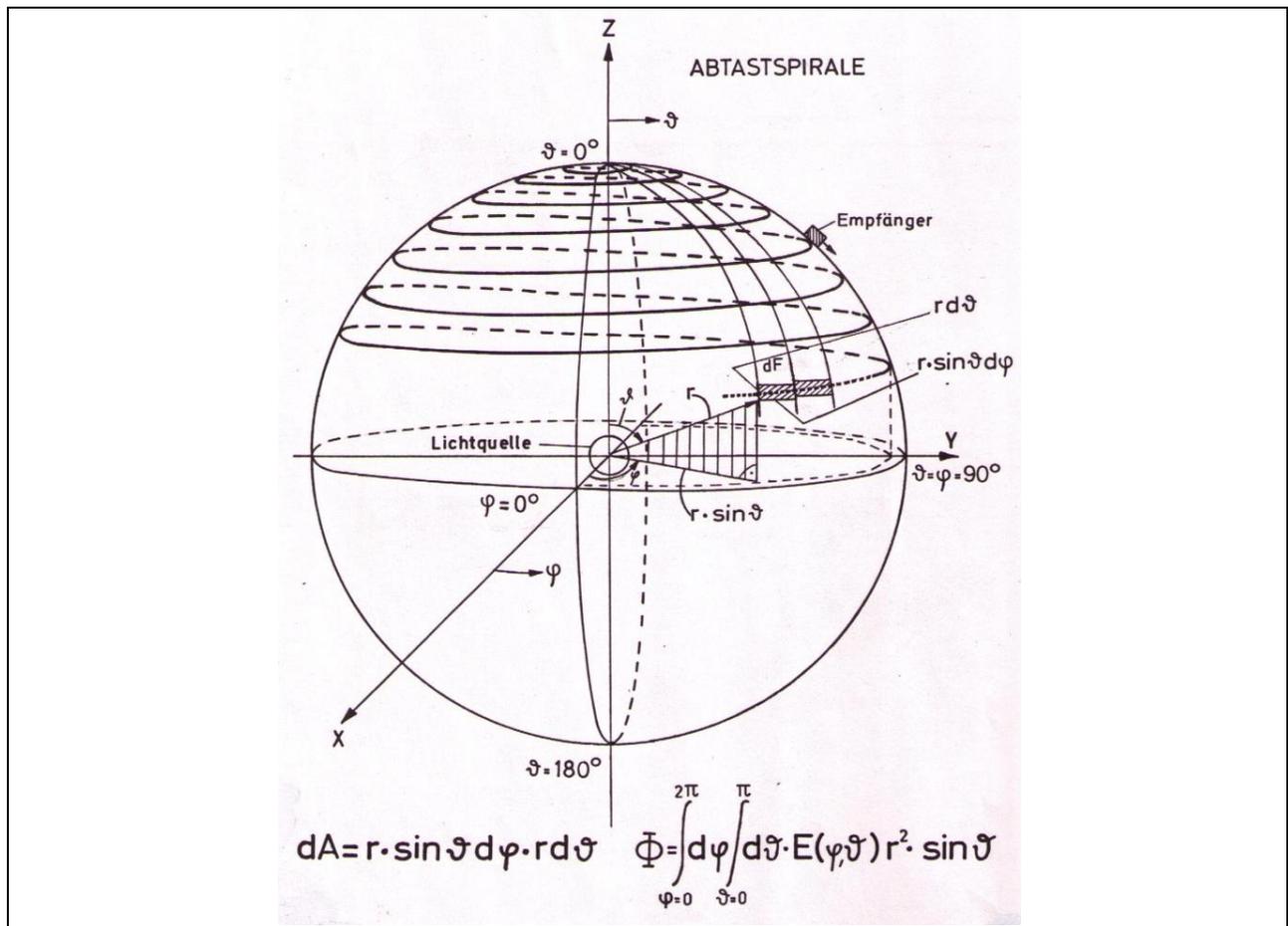


Abb. 1: Elektronische Ulbrichtkugel mit Spiral-Abtastung /1/

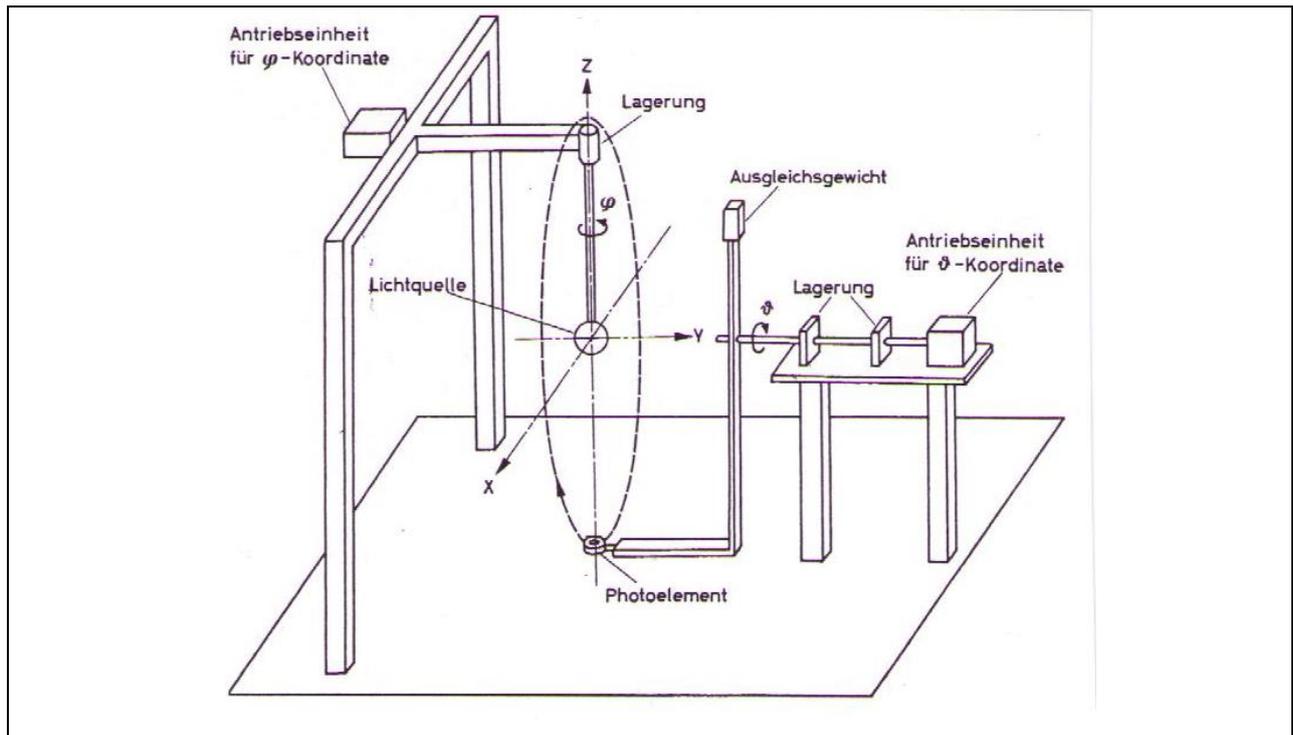


Abb. 2: Einfache Spiral-Abtastmechanik für die Elektronische U-Kugel

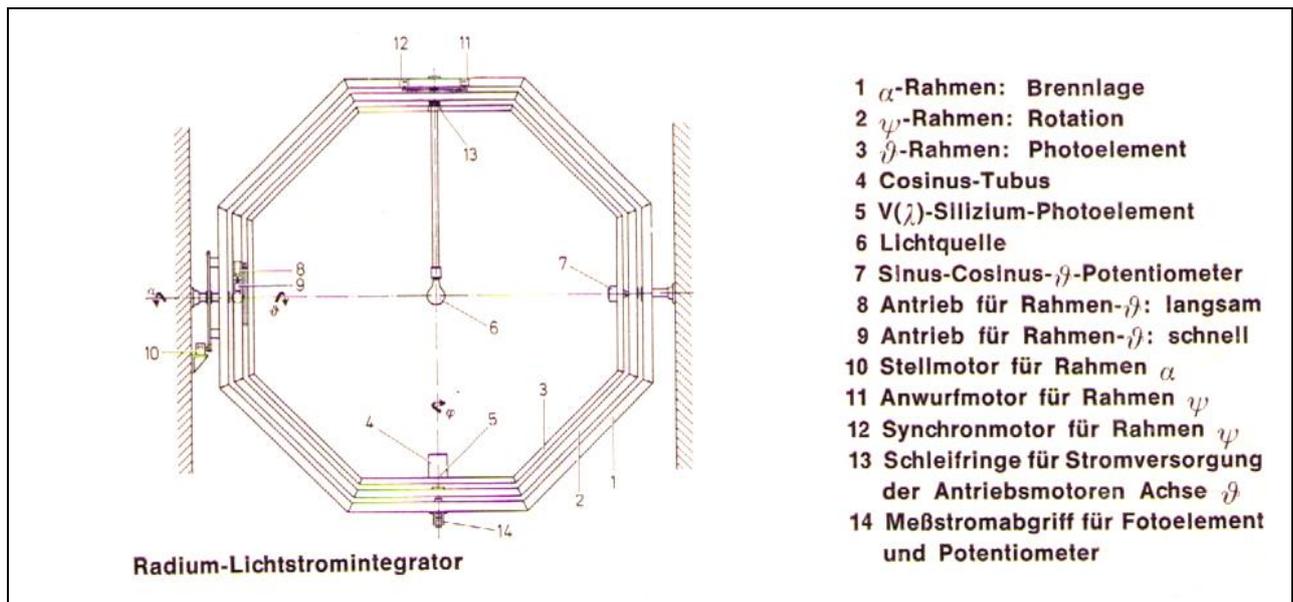


Abb. 3: Kardan-Spiral-Abtastmechanik für die Elektronische U-Kugel /2/
 Vorteil: Messung der Lichtquelle in beliebiger ruhender Brennlage ohne elektrische Schleifringübertragung (Anwendung bei Radium / Osram Wipperfurth und in der PTB)

2.1 MATHEMATISCHE ABLEITUNG FÜR DIE ELEKTRONISCHE ULBRICHTKUGEL MIT SPIRAL-ABTASTUNG

Für den Lichtstrom gilt die einfache Näherung ($\Delta \varphi, \Delta \vartheta$ im Bogenmaß)

$$\Phi \approx r^2 \Delta \varphi \Delta \vartheta \sum_{i=1}^{M-1} E(\varphi_i, \vartheta_i) \sin \vartheta_i \quad (2)$$

Zahl der Spiralwindungen $z = \frac{180^\circ}{\Delta \vartheta}$ (3)

Zahl der abgetasteten Messwerte auf der Spiralbahn $M = \frac{z \cdot 360^\circ}{\Delta \varphi}$ (4)

Inkrementierter Messwinkel: $\vartheta_i = \frac{i \cdot 180^\circ}{M}$ (5)

Der Lichtstrom wird nach Formel (2) bestimmt, indem fortlaufend die Beleuchtungsstärke E_i in Abhängigkeit vom Azimut (φ) und der Elevation (ϑ) gemessen und jeweils mit den zugehörigen $\sin \vartheta_i$ – Wert multipliziert wird. Die Produkte werden aufsummiert und mit dem konstanten Faktor ($r^2 \Delta \varphi \Delta \vartheta$) bewertet.

2.2 RECHENBEISPIEL FÜR EIN ELEKTRONISCHES U-KUGELS-SYSTEM MIT $r = R = 1m$ UND 5° - ABTASTUNG FÜR φ UND ϑ

Winkelintervalle $\Delta \varphi = \Delta \vartheta = 5^\circ \triangleq 0,087266$ (im Bogenmaß) (6)

Zahl der Spiralwindungen $z = 36$ (7)

Messwertanzahl $M = \frac{z \cdot 360^\circ}{\Delta \varphi} = 2592$ Messwerte (8)

inkrementierter Meßwinkel: $\vartheta_i = \frac{i \cdot 180^\circ}{M} = i \cdot 0,06944^\circ$ (9)

Damit erhält man die sehr einfache Formel zur Lichtstrombestimmung:

$$\Phi \approx (1m)^2 \Delta \varphi \cdot \Delta \vartheta \sum_{i=1}^{2591} E_i \sin \vartheta_i \quad (10)$$

mit $\Delta \varphi \cdot \Delta \vartheta = 5^\circ \cdot 5^\circ \triangleq 0,007615$ (im Bogenmaß)

folgt die Formel für die elektronische U-Kugel mit Spiralabtastung

$$\Phi[lm] \approx 0,007615 [m^2] \sum_{i=1}^{2591} E_i[lx] \cdot \sin \vartheta_i \quad (11)$$

2.3 ZALENBEISPIEL

Der Lichtstrom eines idealen Kugelstrahlers mit der Lichtstärke 1 cd beträgt exakt

$$\Phi = \int_{4\pi sr} I(\vartheta, \varphi) d\omega \quad (12)$$

$$\Phi = I \cdot 4\pi = 1 \text{ cd} \cdot 4\pi = 12,5664 \text{ lm} \quad (13)$$

Die numerische Berechnung – mittels MATLAB - mit der Spiralphotometer-Formel (11) liefert mit $E=1 \text{ lx}$ und $r=1\text{m}$:

Programm: $S=0$; for $i = 1 : 2591$;
 $S = S + \sin(i \cdot (\pi / 180)) \cdot 0.06944$ end; $S = 1650,2$
mit $\Delta \varphi \cdot \Delta \vartheta = 0,007615$ (Bogenmaß) folgt

$$\Phi \approx 1650.2 \cdot 0,007615 = 12,5663 \text{ lm} \quad (14)$$

Der relative Lichtstrom-Integrationsfehler F_Φ der Spiralabtastung ist extrem gering!

$$F_\Phi = \frac{12,5663 - 12,5664}{12,5664} = -0,0008 \%$$

3. RECHNERGEFÜHRTE MESS-ELEKTRONIK

Die mit einem Impulsgeber (Takt i) abgetasteten Beleuchtungsstärken werden mittels Operationsverstärker in proportionale Spannungen transformiert, anschließend mit einem Analog-Digitalwandler in den PC eingelesen und mit den inkrementierten $\sin \vartheta_i$ -Werten multipliziert. Die Produkte werden aufsummiert und mit dem konstanten Faktor $(r^2 \Delta \varphi \Delta \vartheta)$ bewertet.

Wenn z.B. 10 Abtastwerte E_i pro Sekunde gemessen werden, benötigt man $2592/10 = 259,2$ Sekunden = 4,32 Minuten für eine vollständige Absolut-Lichtstromintegration! Bei dieser Abtastfrequenz liegen 100 ms zwischen zwei Abtastungen, d.h. es bleibt dazwischen noch genügend Zeit für eine automatische Bereichsumschaltung, womit die Genauigkeit der Messung noch erheblich gesteigert werden kann.

Teure Winkelgeber für φ und ϑ sowie Positionier-Antriebe sind nicht erforderlich, da preiswerte Gleichstrommotoren mit Drehzahlregelung verwendet werden und die Messwert-Triggerung mittels eines einfachen elektronischen Taktgebers erfolgen kann. Alternativ können auch sehr kostengünstige Netz- Synchronmotoren eingesetzt werden.

4. TECHNISCHE ERLÄUTERUNG ZUR WAHL GEEIGNETER ABTAST-WINKEL-INTERVALLE

Um eine hinreichend genaue Lichtstromintegration durchführen zu können, ist ein geeignetes Messraster unter Berücksichtigung der Geometrie des Lichtverteilungskörpers der zu messenden Lichtquelle zu wählen.

Zur Abschätzung des Messfehlers, der u.U. durch ein zu grob gewähltes Messraster verursacht werden kann, wurde für einen horizontal ausgerichteten Lambertstrahler gemäß Abb. 4 mit analytisch berechenbarer Lichtverteilung, die nicht rotationssymmetrisch zur z-Achse ist, der Lichtstrom durch geschlossene Lösung des Lichtstromintegrals exakt bestimmt und anschließend für diesen Strahler die Lichtströme durch numerische Integration bei spiralförmiger Abtastung für verschiedene Messraster (5° , 10° , 20°) ermittelt.

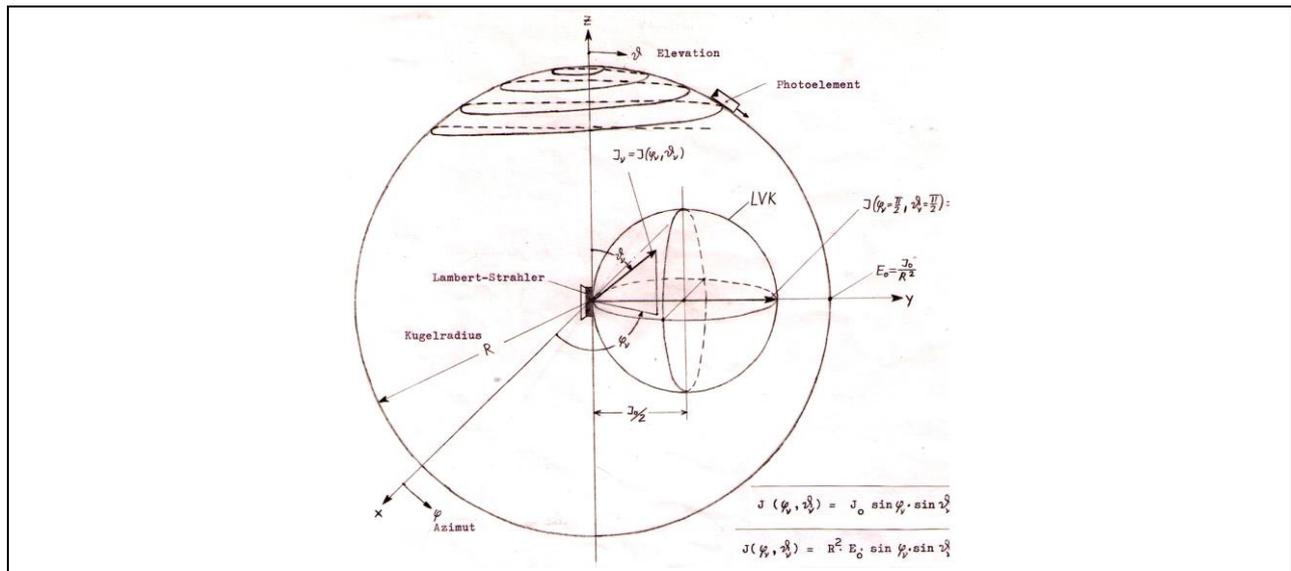


Abb. 4: Skizze zur numerischen Integration eines horizontal angeordneten Lambert-Strahlers mit spiralförmiger Abtastung

Um das Lichtstromintegral für den dargestellten Strahler lösen zu können, muß zunächst die Lichtstärke als Funktion der Elevation und des Azimuts abgeleitet werden.

Es gilt:

Kugelgleichung
$$x^2 + (y - J_0/2)^2 + z^2 = (J_0/2)^2 \quad (144)$$

Geradengleichung im Raum
$$x^2 + y^2 + z^2 = J(\varphi, \vartheta)^2 \quad (145)$$

Gl.(145) eingesetzt in Gl.(144) liefert

$$J(\varphi, \vartheta)^2 - y J_0 = 0 \quad (146)$$

mit
$$y = J(\varphi, \vartheta) \sin \varphi \cdot \sin \vartheta \quad (147)$$

erhält man die Lösungen der quadratischen Gleichung Gl.(146)

$$J_1(\varphi, \vartheta) = J_0 \sin \varphi \cdot \sin \vartheta \quad (148)$$

$$J_2(\varphi, \vartheta) = 0 \quad (149)$$

bzw. allgemein
$$J(\varphi, \vartheta) = J_0 \sin \varphi \cdot \sin \vartheta \quad (150)$$

Bei Messung außerhalb der photometrischen Grenzentfernung folgt

$$J(\varphi, \vartheta) = R^2 E_0 \sin \varphi \cdot \sin \vartheta \quad (151)$$

Gl.(151) eingesetzt in das bekannte Lichtstromintegral

$$\Phi = \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\vartheta=0}^{\pi} J(\varphi, \vartheta) \cdot \sin \vartheta \, d\varphi \, d\vartheta \quad (152)$$

liefert

$$\Phi = R^2 E_0 \int_{\varphi=0}^{\pi} \int_{\vartheta=0}^{\pi} \sin \varphi \cdot \sin^2 \vartheta \cdot d\varphi \, d\vartheta = R^2 E_0 \pi \quad (153)$$

Abb. 5: Exakte Berechnung des Lichtstroms für den Lambertstrahler nach Abb. 4 (Gleichung 153)

$$\Phi_{Sp} = R^2 \Delta\varphi \Delta\vartheta \sum_{\nu=1}^{M-1} E(\varphi_\nu, \vartheta_\nu) \sin \vartheta_\nu = R^2 \Delta\varphi \Delta\vartheta \sum_{\nu=1}^{M-1} E_\nu \cdot \sin \vartheta_\nu \quad (154)$$

mit

$$E(\varphi_\nu, \vartheta_\nu) = E_0 \sin \varphi_\nu \cdot \sin \vartheta_\nu$$

$$n = \frac{\pi}{\Delta\vartheta} \quad \hat{=} \text{Zahl der Spiralwindungen}$$

$$M = \frac{\pi \cdot 2\pi}{\Delta\varphi} \quad \hat{=} \text{Zahl der Meßpunkte auf der Spiralbahn}$$

$$\varphi_\nu = \nu \cdot \Delta\varphi = \nu \cdot \frac{2\pi \cdot n}{M}$$

$$\vartheta_\nu = \nu \cdot \frac{\pi}{M}$$

folgt

$$\Phi_{Sp} = R^2 \cdot E_0 \Delta\varphi \Delta\vartheta \sum_{\nu=1}^{M-1} \sin\left(\nu \frac{2\pi \cdot n}{M}\right) \sin^2\left(\nu \frac{\pi}{M}\right) \quad (155)$$

Abb. 6: Summendarstellung (Gl. 155) für den Lichtstrom (Approximation) nach dem Abtastspiralprinzip

Für die 5°-Abtastung gilt:

$$\Delta\varphi = \Delta\vartheta = 5^\circ = 0,087266 ; \quad \varphi_\nu = \nu \cdot \frac{2\pi \cdot 36}{2592} = \nu \cdot \frac{\pi}{36}$$

$$n = \frac{180^\circ}{5^\circ} = 36, \quad M = \frac{36 \cdot 2 \cdot 180^\circ}{5^\circ} = 2592 ; \quad \vartheta_\nu = \nu \cdot \frac{\pi}{2592}$$

Mit diesen Zahlenwerten erhält man die endgültige Formel zur numerischen Lichtstromermittlung des Lambert-Strahlers bei spiralförmiger Abtastung im 5°-Raster.

$$\Phi_{Sp5^\circ} = R^2 \cdot E_0 \Delta\varphi \Delta\vartheta \sum_{\nu=1}^{2591} \underbrace{C}_{\frac{1}{D}} \sin\left(\nu \cdot \frac{\pi}{36}\right) \cdot \sin^2\left(\nu \cdot \frac{\pi}{2592}\right) \quad (156)$$

es gilt: C = 1, wenn D ≥ 0
C = 0, wenn D ≤ 0

Die Formel (156) wurde von MARX-REHBEIN /90/ in FORTRAN IV programmiert und mit einem Digitalrechner - System Siemens 4004 - ausgewertet.

Man erhält

$$\Phi_{Sp5^\circ} = R^2 \cdot E_0 \cdot 7,6154 \cdot 10^3 \cdot 412,19 = R^2 \cdot E_0 \cdot 3,1391$$

Der Lichtstromfehler beträgt dann

$$f_{\Phi5^\circ} = \frac{\Phi_{Sp5^\circ} - \Phi}{\Phi} \cdot 100 \quad (\%) \quad (157)$$

$$f_{\Phi5^\circ} = \frac{R^2 \cdot E_0 \cdot 3,1391 - R^2 \cdot E_0 \cdot \pi}{R^2 \cdot E_0 \cdot \pi} \cdot 100 \quad (\%) = -0,08 \%$$

Abb. 7: Für die 5°-Abtastung ergibt sich ein sehr geringer Lichtstromintegrationsfehler von -0,08 %

$$\Phi_{Sp10^\circ} = R^2 \cdot E_0 \Delta \psi \Delta \gamma \sum_{\nu=1}^{647} \underbrace{C \cdot \sin\left(\nu \cdot \frac{\pi}{18}\right)}_D \cdot \sin^2\left(\nu \cdot \frac{\pi}{648}\right) \quad (158)$$

$C = 1, \text{ wenn } D \geq 0$
 $C = 0, \text{ wenn } D \leq 0$

$$\Phi_{Sp10^\circ} = R^2 \cdot E_0 \cdot 3,1336$$

Für den Lichtstromfehler ergibt sich damit

$$f \Phi_{10^\circ} = -0,26 \%$$

20°-Abtastung:

$$\Phi_{Sp20^\circ} = R^2 \cdot E_0 \Delta \psi \Delta \gamma \sum_{\nu=1}^{161} \underbrace{C \cdot \sin\left(\nu \cdot \frac{\pi}{9}\right)}_D \cdot \sin^2\left(\nu \cdot \frac{\pi}{162}\right) \quad (159)$$

$C = 1, \text{ wenn } D \geq 0$
 $C = 0, \text{ wenn } D \leq 0$

$$\Phi_{Sp20^\circ} = R^2 \cdot E_0 \cdot 121,85 \cdot 10^{-3} \cdot 25,521 = R^2 \cdot E_0 \cdot 3,1096$$

bzw.

$$f \Phi_{20^\circ} = -1,02 \%$$

Abb. 8: Für die 10°-Abtastung (647 Messwerte) erhält man -0,26% und selbst bei einer 20°-Abtastung mit nur 161 Messwerten liegt der Fehler noch bei 1%

LITERATUR

/1/ MARX, P., Spiralphotometer. *Deutsches Patent Nr. 1928815*

/2/ GALASCHIK, H., MARX, P., Kardan-Goniophotometer. *Deutsches Patent Nr. 2226253*