

# Drehspiegel-Goniophotometer

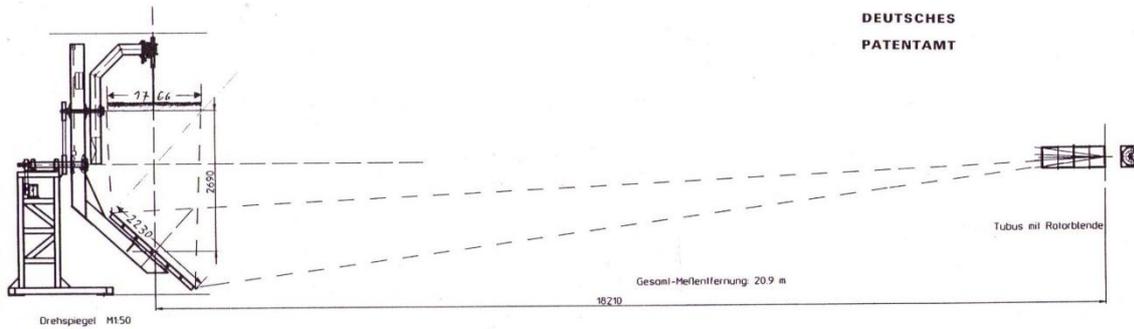
A NEW ECCENTRIC MIRROR GONIOPHOTOMETER  
FOR OPTIMAL ROOM UTILIZATION

GERMAN-PATENT-N<sup>o</sup>: P 38 02 115.3 / 1995  
PATENT-OWNER: PROF. DR.-ING. PETER MARX

BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND

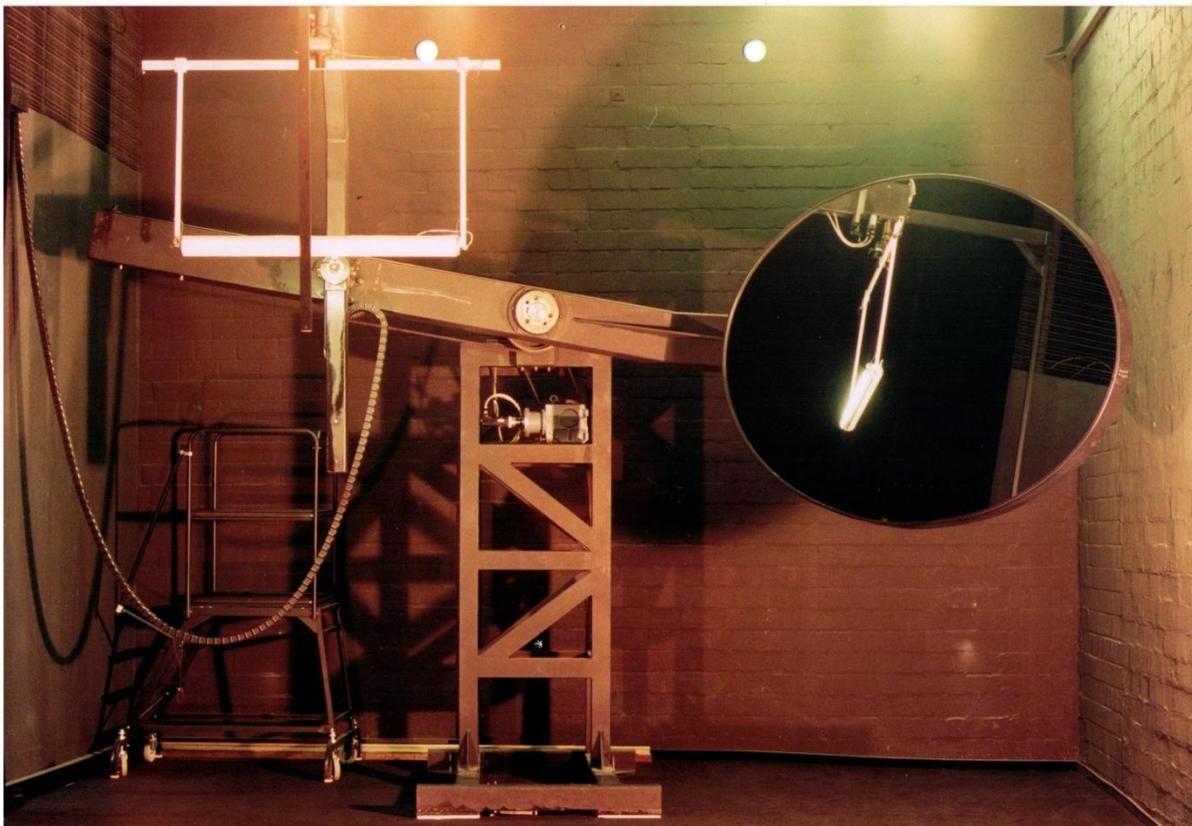


DEUTSCHES  
PATENTAMT



MANUFACTURER:

**MX-ELEKTRONIK**  
Prof. Dr.-Ing. Peter Marx  
Am Kleinen Wannsee 12 J  
D-14109 BERLIN (GERMANY)  
PHONE: 030-8051980 // 030-45042315  
FAX: 030-4504-2284  
TELEX: 1631



SELUX Excenter-Goniophotometer

# Ein modernes computergesteuertes Drehspiegel-System

Peter Marx und Klaus Strung

## 1. Einleitung

Im Mai 1981 wurde bei dem bekannten Leuchten-Hersteller BEGA (Firmengruppe Gantenbrink) ein neues computergesteuertes Drehspiegelsystem in Betrieb genommen.

Mit diesem vollautomatisch arbeitenden Lichtmeßroboter können alle relevanten photometrischen Daten von Außen- und Innenleuchten mit Glühlampen, Niederdruck- und Hochdrucklampen wie zum Beispiel:

- Gesamt- und Zonenlichtströme
- Lichtstärkeverteilungen im C- $\gamma$ -System mit graphischer Darstellung
- Leuchtenwirkungsgrade usw.

rationell und mit hoher Präzision gemessen und gespeichert werden. Die auf Magnetbandkassetten gespeicherten Lichtquellendaten (LVK-Matrix I(C,  $\gamma$ ),  $\Phi_{Lampe}$ ,  $\Phi_{Leuchte}$ ,  $\Phi_{Zone}$  usw.) können unmittelbar nach erfolgter Messung mit dem in das System integrierten leistungsstarken Computer ausgewertet werden.

Moderne Projektierungsprogramme [18] dienen u. a. zur Berechnung von:

- Leuchtenkennzahlen
- horizontalen, vertikalen und zylindrischen Beleuchtungsstärkeverteilungen
- Leuchtdichteverteilungen auf Fahrbahnen
- und zur graphischen Darstellung der Lichtstärke-Beleuchtungsstärke- und Leuchtdichteverteilung

wodurch die Planung von Innen- und Außenbeleuchtungsanlagen schnell und kostengünstig durchgeführt werden kann.

Das vorgestellte Drehspiegelsystem eignet sich weiterhin hervorragend für die Leuchten-Neuentwicklung sowie für Qualitätsprüfungen (Stichproben) von Leuchten aus der laufenden Serienproduktion.

Prof. Dr.-Ing. Peter Marx, Technische Fachhochschule Berlin, Luxemburger Straße 10, 1000 Berlin 65, Lehrgebiet: Elektronische Meßtechnik  
Ing. grad. Klaus Strung, COMPUTER-ELEKTRONIK, Berlin

## 2. Baugruppen des Drehspiegel-Systems

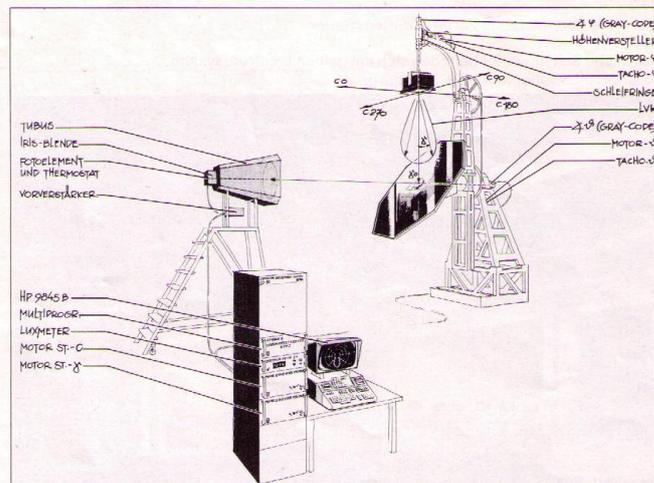
Die schematische Darstellung des Computer-Drehspiegel-Systems CD-80 (vgl. Bild 1) zeigt die wichtigsten Baugruppen:

1. Computer HP 9845 T mit 186 kByte Arbeitsspeicher, Graphik-Bildschirm, Thermodrucker und zwei Magnetbandkassetten mit jeweils 217 kByte. Für die Anwender-Software wird die Programmiersprache BASIC verwendet, die einen einfachen Dialog-Betrieb zwischen dem System und dem Bedienpersonal ermöglicht.
2. Elektronik-Schrank. Dieser enthält die für das System notwendigen elektronischen Komponenten wie: System-Digitalluxmeter mit computergesteuerter Meßbereichswahlautomatik, temperaturstabilisiertes Silizium-Photoelement mit Spezial-Spektralanaleis, Multiprogrammer zur Adaptierung der Prozeß-Signale sowie Motor-Tacho-Servoverstärker zur Drehzahlregelung der Antriebsmaschinen.

3. Drehspiegel-Mechanik (Spiegel-Goniophotometer) mit einem 6 mm starken Präzisions-Kristallspiegel mit hinterlegter Silberschicht. Abmessungen: 1900 mm x 2687 mm. Diese moderne Konstruktion ist einseitig gelagert, die Bauhöhe beträgt rd. 6 Meter und das Gewicht liegt bei etwa 1500 kg. Zwei Scheibenläufermotoren mit angeflanschten Tachogeneratoren bewirken den Antrieb des Spiegel-Rotors und der vertikalen Welle mit montierter Lichtquelle. Die Definition der Drehwinkel  $\varphi \triangleq C$  und  $\psi \triangleq \gamma$  erfolgt nach DIN 5032, sie werden mit Absolut-Winkelgebern (13 bit Gray-Code) mit einer Auflösung von 0,1 Grad gemessen (vgl. Bild 2) [1], [14].

Die maximale Meßentfernung von 22 Metern gestattet die Messung exakter Lichtstärken von Leuchten außerhalb der optischen und photometrischen Grenzentfernung. Das Photoelement und der Photostrom-Vorverstärker befinden sich in einem verfahrbaren Photometerwagen mit auf-

Bild 1 Computer-Drehspiegel-System CD 80



gesetztem Tubus zur Eliminierung von Streulicht. Mittels einer ferngesteuerten Irisblende kann der Licht-Empfänger zwecks Abgleich des Verstärker-Nullpunkts abgedunkelt werden. Die optischen und mechanischen Achsen des Drehspiegelsystems wurden mit Hilfe eines He-Ne-Dauerstrich-LASERS justiert.

Über 8 Schleifringe und Doppelbürsten mit erhöhtem Anpreßdruck werden die Lampen von Gleich- und Wechselspannungstabilisatoren mit den erforderlichen Spannungen und Strömen versorgt.

**3. Mathematisch-lichttechnische Zusammenhänge**

Über das photometrische Entfernungsgesetz erhält man die Lichtstärke aus der außerhalb der photometrischen Grenzentfernung gemessenen Beleuchtungsstärke.

$$I = E \cdot r^2 \cdot \frac{1}{\Omega_0} \quad (1)$$

- I Lichtstärke
- E Beleuchtungsstärke auf dem Empfänger (senkrechter Lichteinfall)
- r Abstand zwischen Lichtquellenmittelpunkt ( $\triangleq$  Koordinatenursprung des Spiegel-Goniophotometers) und lichtempfindlichem Empfänger
- $\Omega_0 = 1$  sr Einheitsraumwinkel

Der Lichtstrom von Lampen und Leuchten wird aus der im Spiegel-Goniophotometer gemessenen

**Bild 2**  
Drehspiegel-Mechanik

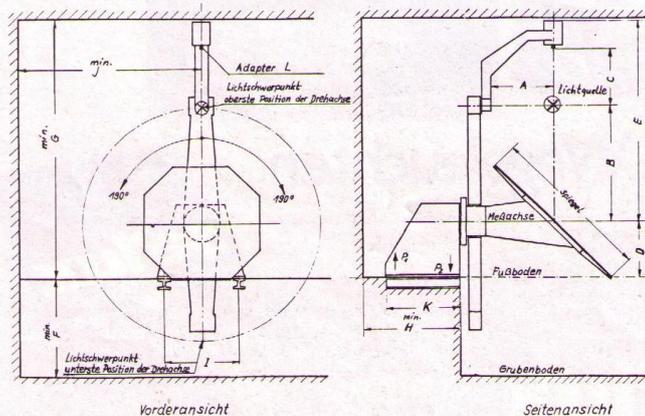
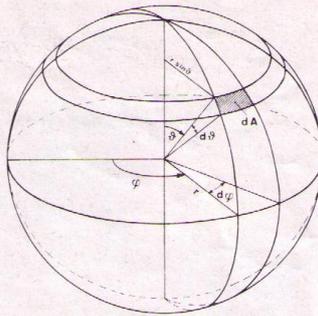


Bild 2. Drehspiegel-Mechanik



**Bild 3**  
Zur Bestimmung des Lichtstroms aus der räumlichen Lichtverteilung

räumlichen Lichtstärkeverteilung berechnet.

$$\Phi = \int_{(\Omega)} I \cdot d\Omega = \int_{(A_2)} E \, dA_2 \quad (2)$$

E Beleuchtungsstärke auf dem Flächenelement  $dA_2$  der die Lichtquelle umgebenden Hüllfläche  $A_2$ , im allgemeinen eine Kugelfläche

Mit Einführung von Kugelkoordinaten  $(r, \varphi, \vartheta)$  erhält man für das Raumwinkel- bzw. Flächenelement (vgl. Bild 3):

$$\begin{aligned} d\Omega &= \sin \vartheta \, d\vartheta \cdot \delta\varphi \\ \text{bzw.} \\ dA_2 &= r \, d\vartheta \cdot r \sin \vartheta \, \delta\varphi \end{aligned} \quad (3)$$

Bei einem Spiegel-Goniophotometer wird außerhalb der photometrischen

Grenzentfernung gemessen, es gilt dann

$$I(\varphi, \vartheta) = E(\varphi, \vartheta) \cdot r^2 \cdot \frac{1}{\Omega_0} \quad (4)$$

Gleichungen (3) und (4) in Formel (2) eingesetzt liefert die Vorschrift zur Bestimmung des Lichtstroms von beliebigen Lichtquellen (Lampen und Leuchten):

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

Bei realen Lichtquellen ist das Lichtstromintegral nach Gl. (5) i. a. nicht geschlossen lösbar, da  $I(\varphi, \vartheta)$  bzw.  $E(\varphi, \vartheta)$  keine analytischen Funktionen sind. Es werden daher numerische Verfahren zur Integration herangezogen, wobei entweder der Lichtstrom als Summe der Teillichtströme aller Kugelzonen

$$\Phi = \sum_{m=1}^k E(\vartheta_m) \cdot \Delta A_m \quad (6)$$

$k = 4 \dots 360$

oder als Summe der Teillichtströme aller Raumwinkelzonen ( $\vartheta_m =$  Elevationswinkel)

$$\Phi = \sum_{m=1}^k I(\vartheta_m) \cdot \Delta\Omega_m \quad (7)$$

$k = 4 \dots 360$

näherungsweise mit für die Praxis ausreichender Genauigkeit unter Verwendung geeigneter Computer berechnet wird.

Der Teillichtstrom einer Raumwinkelzone (sog. Zonenlichtstrom) ergibt sich durch Multiplikation des Raumwinkels dieser Kugelzone mit der mittleren Lichtstärke in dieser Zone. Sind  $\vartheta_1$  und  $\vartheta_2$  die ebenen Winkel gegen die Rotationsachse, welche die Raumwinkelzonen begrenzen, so ist der Raumwinkel für die Zone m

$$\begin{aligned} \Delta\Omega_m &= 2\pi \cdot (\cos \vartheta_1 - \cos \vartheta_2) = 4\pi \cdot \sin \frac{\Delta\vartheta}{2} \\ &\cdot \sin \frac{\Delta\vartheta}{2} \end{aligned} \quad (8)$$

Bei hinreichender Unterteilung, z. B.  $\Delta\vartheta = \vartheta_2 - \vartheta_1 = 0,5 \dots 45$  Grad genügt es, als mittlere Lichtstärke der Zone die bei dem Mittelwert

$$\vartheta_m = \frac{\vartheta_1 + \vartheta_2}{2} \quad (9)$$

der ebenen Winkel gemessenen Lichtstärken  $I(\vartheta_m)$  zu nehmen (vgl. Rechteckregel – Verf. d. num. Integration).

Im allgemeinen ist die Lichtstärke auch vom Azimutwinkel abhängig

$$I = I(\varphi, \vartheta_m) \quad (10)$$

Daher wird zunächst durch Messung der Lichtstärken in einer genügenden Anzahl von Meridianebenen  $\Delta\varphi = 0,5 \dots 90$  Grad die mittlere Lichtstärke bestimmt.

$$I(\vartheta_m) = \frac{\sum_{i=1}^n I(\varphi_i, \vartheta_m)}{n} \quad (11)$$

$n = 4 \dots 720$

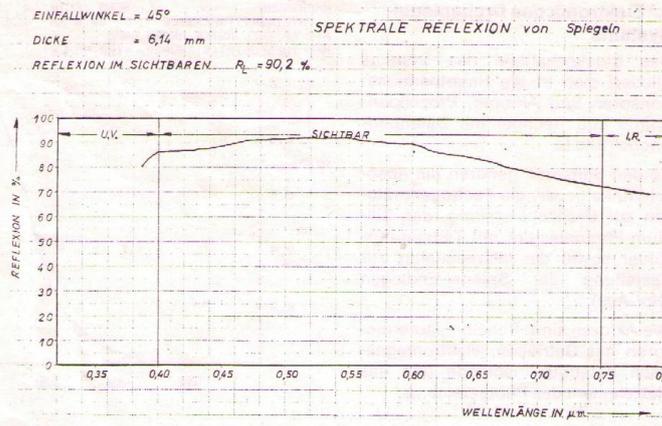
Die großen Zahlenwerte von  $k$  und  $n$  kommen nur bei sehr spitzen Lichtstärkeverteilungen, wie z. B. sehr eng bündelnden Strahlern und Scheinwerfern zur Anwendung.

Mit den Formeln (7), (8) und (11) erhält man die Näherungsgleichung für den Lichtstrom (Formel 12, siehe unten).

Für diese Gleichung wurde in der Programmiersprache BASIC ein geeigneter Algorithmus formuliert.

#### 4. Spektrale Empfindlichkeit des Photoelements

Der Anwender des Drehspiegelsystems forderte die korrekte Messung von Lichtstärken und Lichtströmen von Lichtquellen mit unterschiedlichen spektralen Strahlungsverteilungen. Auf eine Ulbricht-Kugel sollte



**Bild 4**  
Spektrale Reflexion eines mit Silber hinterlegten Spiegels für Lichteinfallswinkel  $\varepsilon = 45$  Grad

von vornherein verzichtet werden, auch Lichtstrom-Normallampen sollten für die photometrische Kalibrierung entbehrlich sein.

Aus diesen Gründen mußte der  $V(\lambda)$ -Angleich des Empfängers unter Berücksichtigung des spektralen Reflexionsgrades des Spiegels vorgenommen werden. Bild 4 zeigt den Verlauf der spektralen Reflexion für einen mit Silber hinterlegten Floatglas-Kristallspiegel bei einem Lichteinfallswinkel von 45 Grad [19].

Für Spiegel-Goniophotometer mit einem oder mehreren Spiegeln wurde deshalb vom Autor (M.) für den Spektralangleich des Empfängers folgende Beziehung eingeführt:

Angleichbedingung nach Marx:

$$V(\lambda) = K \cdot s(\lambda)_{rel} \cdot \tau(\lambda) \cdot \prod_{i=1}^n Q_i(\lambda, \varepsilon_i) \quad (13)$$

$K$  wellenlängenunabhängige Kalibrierkonstante

$s(\lambda)_{rel}$  relative spektrale Empfindlichkeit des Strahlungsempfängers (z. B. Si-Photoelement)

$\tau(\lambda)$  spektraler Transmissionsgrad der Filterkombination mit Streuscheibe

$Q_i(\lambda, \varepsilon_i)$  spektraler Reflexionsgrad des  $i$ -ten Spiegels mit dem Lichteinfallswinkel  $\varepsilon_i$  gegen die Spiegelnormale

Der mittels Formel (13) erzielte sehr gute  $V(\lambda)$ -Angleich ist aus Bild 5 zu ersehen. Leider ist bei vielen in der Literatur beschriebenen Spiegel-Goniophotometern diese wichtige photometrische Forderung bislang noch nicht beachtet worden, wodurch sich u.U. deutliche Meßfehler ergeben können [2], [3], [4], [5].

Nur bei Erfüllung der Angleichbedingung nach Gl. [13] gibt der Strahlungsempfänger einen Photostrom ab, der proportional zur Lichtstärke der zu messenden Lichtquelle ist:

$$I_{ph} \sim I \sim \int_{380nm}^{780nm} S_\lambda \cdot s(\lambda)_{rel} \cdot \tau(\lambda) \cdot \prod_{i=1}^n Q_i(\lambda, \varepsilon_i) d\lambda \quad (14)$$

$S_\lambda(\lambda)$  relative spektrale Strahlungsverteilung.

$$\Phi \approx 2\pi \cdot \sum_{m=1}^k \left[ \cos\left(\vartheta_m - \frac{\Delta\vartheta}{2}\right) - \cos\left(\vartheta_m + \frac{\Delta\vartheta}{2}\right) \right] \cdot \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n I(\varphi_i, \vartheta_m) = 4\pi \cdot \sin\frac{\Delta\vartheta}{2} \cdot \sum_{m=1}^k \sin\vartheta_m \cdot \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n I(\varphi_i, \vartheta_m) =$$

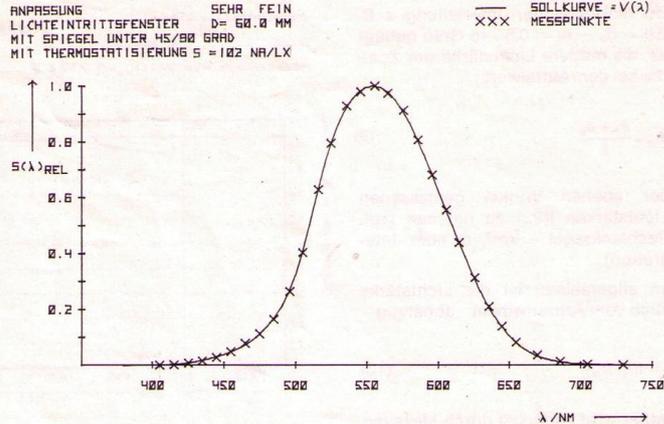
$$= 4\pi r^2 \cdot \sin\frac{\Delta\vartheta}{2} \sum_{m=1}^k \sin\vartheta_m \cdot \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n E(\varphi_i, \vartheta_m) \cdot \frac{1}{\Omega_o} \quad (12)$$

### 5. Elektronik des Drehspiegel-Systems

Das Blockschaltbild des Systems gliedert sich in die Hauptbereiche: Sensoren und Aktoren, Prozeßperipherie und Rechner mit Datenperipherie (Bild 6).

Zu den Sensoren gehören die Absolut-Winkelgeber, die Tachogeneratoren zur Drehzahlregelung, das Silizium-Photoelement mit Temperaturfühler sowie die Mikroschalter zur Feststellung der Spiegel-Endlagen (Not-Aus).

Die Aktoren sind: Scheibenläufermotoren mit Getrieben, elektromagnetisch betätigte Irisblende und das Heizelement des Photoelements.



Die Prozeßperipherie umfaßt folgende elektronische Funktionsmodule:

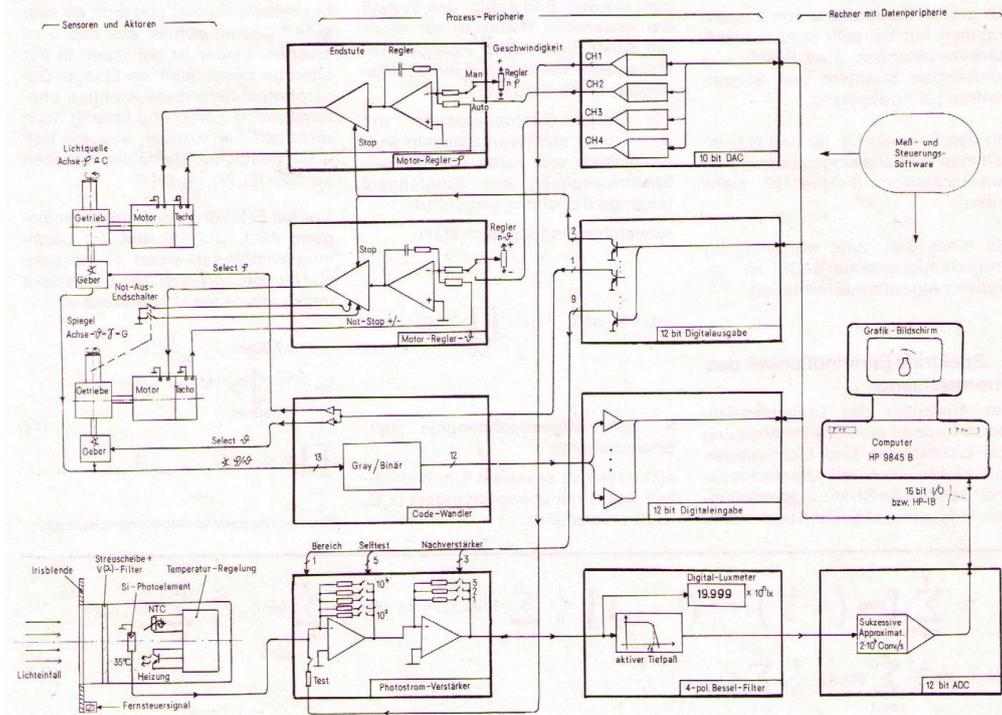
- Photostrom-Choppervverstärker mit automatischer Steuerung der Meßbereiche durch den Rechner.
- Nachgeschaltetes 4poliges aktives Besselfilter mit steilem Abfall des Amplituden-Frequenzgangs bei

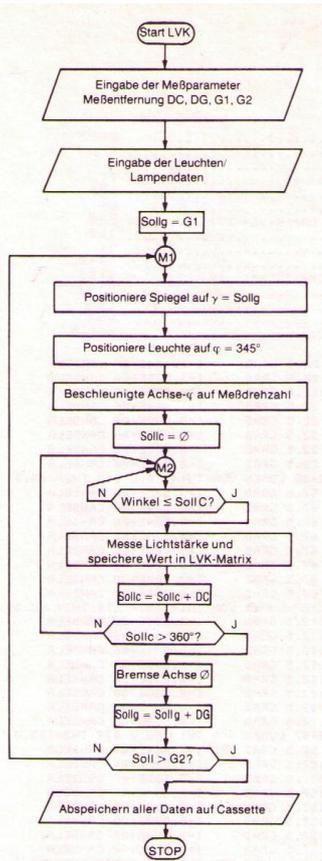
**Bild 5** Relative spektrale Empfindlichkeit des V(λ)-51-Photoelements

der gewählten Grenzfrequenz von  $f_g < 50$  Hz. Beim Besselfilter ist die Gruppenlaufzeit über einen großen Frequenzbereich konstant, d. h. die Phasenverschiebung ist in diesem Frequenzbereich propor-

tional zur Frequenz. Das führt zu einem optimalen Rechteckübertragungsverhalten. Die Sprungantwort (z. B. hoher Gradient bei einer LVK) zeigt kein Überschwingen. Bei der Messung von welligem

**Bild 6** Blockschaltbild der Meß- und Steuerelektronik des Computer-Drehspiegel-Systems CD-80





**Bild 7**  
Flußdiagramm für die Messung der Lichtstärkeverteilung

Licht von Entladungslampen muß der zeitlich lineare Mittelwert gemäß dem Talbot-Plateauschen Gesetz bewertet werden. Neben der Grundschiwingung des modulierten Lichts von 100 Hz (bei 50 Hz Netzfrequenz) muß auch die 50 Hz Netzstörspannung wirksam unterdrückt werden. Speziell Besselfilter sind deshalb für dynamische Lichtmessungen aufgrund ihrer Fähigkeit, einen sog. »running average« zu bilden, in schnellen automatischen Lichtmeß-Systemen bestens geeignet und dürften den bisher meist verwendeten integrierenden Verfahren wie z.B. Dual-Slope-Prinzip oder Spannungs-Frequenz-Wandler überlegen sein [5], [6].

- Digitalluxmeter mit Anzeigebereich  $E = 19.999 \times 10^3 \text{ lx}$ ;  $n = 0 \dots 4$  [7]

- schneller Analog-Digital-Umsetzer (Prinzip: sukzessive Approximation, Umsetzrate: 20 000 12-bit-Daten pro Sekunde) über Sample/Hold-Verstärker gepuffert
- 12-bit-Digitaleingabe zum Einlesen der Winkelinformationen, 12-bit-Digitalausgabe zur Steuerung der Meßbereichswahl, zur Winkelgeber-Selektierung und für Auslösung des Motor-Stops
- 10-bit-Digital-Analog-Umsetzer für folgende Funktionen: Simulation eines idealen Kugelstrahlers für einfachen Lichtstrom- und Lichtstärketest ohne Lichtstärke-Normallampe sowie Drehzahlsteuerung der beiden Antriebssysteme
- Code-Umsetzer zur Transformation des Gray-Codes in den rechner-kompatiblen Dual-Code
- zwei Motor-Regler für die Koordinaten  $\varphi$  und  $\theta$  incl. Servo-Leistungsverstärker

**6. Meß- und Steuerungssoftware**

Die in BASIC für den Rechner HP 9845 geschriebene Software kann man hierarchisch untergliedern in:

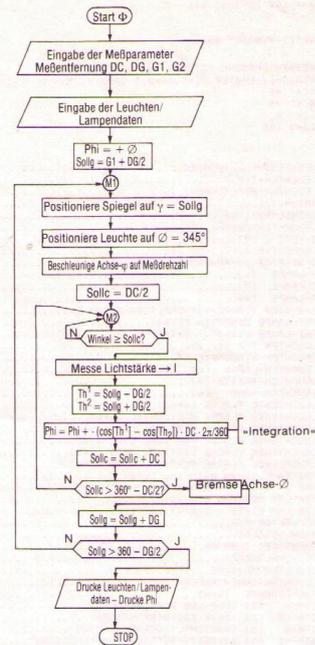
Ebene 1: Subroutinen für die Steuerung des Multiprogrammers für Digital-Ein/Ausgabe und Analog-Ein/Ausgabe. («physische» Steuerung, unterste Ebene)

Ebene 2: Subroutinen für die logische Steuerung des Prozesses wie »Motor ein«, »Lese Meßwert«, »Wähle Meßbereich«. («logische» Steuerung)

Ebene 3: Subroutinen für Positionierung und konstante Bewegung des Drehspiegels mit Start/Stop-Rampen und sonstige Hilfsprogramme.

Ebene 4: Durch Kommandos aufgerufene Benutzerprogramme mit Parameterabfrage für: Meßwerterausgabe, Meßwertausgabe (drucken, plotten), Positionieren, Systemtests und Serviceprogramme, die mit entsprechender Programmsteuerung auf diese Subroutinen zurückgreifen. Bei der Parametereingabe erfolgt eine Plausibilitätsprüfung mit entsprechendem Fehlerhinweis (Bild 7, Bild 8).

**Meßprogramme:** Die bei der LVK-Messung anfallenden Meßwerte werden in einer Matrix mit 73x73 Elementen abgelegt ( $\Delta C \triangleq DC = 5 \text{ Grad}$ ,  $\Delta \gamma \triangleq DG = 2.5 \text{ Grad}$ ) und mit den übrigen photometrischen und elektrischen Daten auf der Magnetbandkassette für spätere Auswertung abgespeichert. Mittels wählbarer Grenzwinkel  $\gamma_1 \triangleq G1$  und  $\gamma_2 \triangleq G2$



**Bild 8**  
Flußdiagramm für die Lichtstrommessung

kann je nach Leuchtentyp der Meßraumwinkel eingeschränkt werden, wodurch die Gesamt-Meßzeit erheblich reduziert wird. Das Meßrastr DC/DG ist frei wählbar im Bereich 0,5...90 Grad. Mit einer Meßrate von ca. 120 Meßwerten pro Minute wird eine sehr kurze Meßzeit  $T_{\text{Meß}} \geq 10$  Minuten erreicht.

Bei der Lichtstrommessung können neben dem Gesamtlichtstrom auch Zonenlichtströme ermittelt werden (Bild 9, Bild 10).

Die Lichtstärkeverteilung in einer beliebigen Ebene wird mit den Programmen für Plotten von C/G-Ebenen gemessen, gedruckt und in Polarkoordinaten dargestellt (Bild 11).

Beim Lauf sämtlicher Meßprogramme werden kontinuierlich die Lichtstärke I und die Winkel C und  $\gamma$  auf dem Bildschirm für Kontrollzwecke angezeigt.

**Positionieren:** Die Positionierprogramme dienen dem Anfahren beliebiger Winkelkoordinaten für Test- und Montagezwecke. Ein beliebiger Lichtstärkerwert mit Winkelkoordinaten kann mit dem »Status«-Kommando erhalten werden.

```

*** LVK-MESSUNG ***
DATEI-NUMMER? 00001
MESSENTFERNUNG (3.50) [m] ? 31.62
STANDARD-RASTER DC=5,DG=2.5 GRAD (J/N)? N
DC=? 45
DG=? 45
CI=? 0
G2=? 180

MESSPROTOKOLL-NUMMER.....00014
LEUCHTEN-TYP.....SPIEGEL
LEUCHTEN-BEZEICHNUNG.....L1/16
DATUM.....14/03/81
SACHBEARBEITER.....STRUNG
LABOR-TEMPERATUR [Celsius].....25
U-NETZ [V].....220
LAMPENTYP.....B12
U-BETRIEB (SPANNUNG AN LAMPE+VG) [V].....220
U-LAMPE [V].....210
I-LAMPE [A].....14.4
P-LAMPE [W].....2570
P-SYSTEM (LAMPE+VORSCHALTGERÄT) [W].....2789
PHI-LAMPE GEMESSEN [klm].....100000
PHI-LAMPE LISTE [klm].....110000
LEUCHTEN-TYP (1..3).....1
LEUCHTEN-SYMMETRIE (0..4).....1
LEUCHTEN-LÄNGE [m].....1.6
LEUCHTEN-BREITE [m]......5
LEUCHTEN-HÖHE [m]......5
LEUCHTENDE FLÄCHE [mm].....74
LEUCHTENDE FLÄCHE HORIZONTAL [mm].....2.4
LEUCHTENDE FLÄCHE VERTIKAL C0 [mm].....1.0
LEUCHTENDE FLÄCHE VERTIKAL C90 [mm]......5
LEUCHTENDE FLÄCHE VERTIKAL C180 [mm]......9
LEUCHTENDE FLÄCHE VERTIKAL C270 [mm]......9
PHI IM OBEREN HALBRAUM [klm].....11
PHI IM UNTEREN HALBRAUM [klm].....17
ETA-LAM MESSUNG [lm/W].....70
ETA-LAM LISTE [lm/W].....80
REFLEKTOR-TYP.....KLASS
ANSCHLUSSART.....KEINES
SONSTIGES ZUBEHÖR.....V16-001
VORSCHALTGERÄT.....V51
LEUCHTEN-NEIGUNG.....15
LEUCHTEN-INKENTEMPERATUR.....47
PHI-LEUCHE [klm].....87
ETA-L [X] (OPT-LEU-WIRKUNGSGRAD).....88
ETA-LB [X] (BETRIEB-WIRKUNGSGRAD).....76
ETA-V [X] (VORSCHALT-GERÄTE-FAKTOR).....76
ETA-AB [X] (ARBEITS-BETRIEBS-WIRKUNGSGRAD).....80
BEMERKUNG-1.....SIMULIERT
BEMERKUNG-2.....TEST
BEMERKUNG-3.....KEINE

G C= 0.0 45.0 90.0 135.0 180.0 225.0
0.0 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
45.0 0.000E+00 4.999E+06 7.070E+06 4.999E+06 0.000E+00 0.000E+00
90.0 0.000E+00 7.070E+06 9.999E+06 7.070E+06 0.000E+00 0.000E+00
135.0 0.000E+00 4.999E+06 7.070E+06 4.999E+06 0.000E+00 0.000E+00
180.0 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00

G C= 270.0 315.0 360.0
0.0 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
45.0 0.000E+00 0.000E+00 7.070E-05
90.0 0.000E+00 0.000E+00 9.999E-05
135.0 0.000E+00 0.000E+00 7.070E-05
180.0 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00

*** LICHTSTROM-MESSUNG ***
MESSENTFERNUNG=12.00m
DC= 10.0
DG= 15.0
CI= 0.0
G2=180.0

MESSPROTOKOLL-NUMMER.....00112
DATUM.....18/03/81
SACHBEARBEITER.....
LABOR-TEMPERATUR [Celsius].....25
U-NETZ [V].....220
LAMPENTYP.....L1
U-BETRIEB (SPANNUNG AN LAMPE+VG) [V].....220
U-LAMPE [V].....180
I-LAMPE [A].....13.45
P-LAMPE [W].....2455
P-SYSTEM (LAMPE+VORSCHALTGERÄT) [W].....1456
PHI-LAMPE-LISTE [klm].....2345
ETA-LAMPE-LISTE [lm/W].....566
VORSCHALTGERÄTE-TYP.....V51
BEMERKUNG.....KEINE

C= 22.5 GRAD G= 22.5 GRAD I=1.464E+06 CANDELA
C= 67.5 GRAD G= 22.5 GRAD I=3.535E+06 CANDELA
C=112.5 GRAD G= 22.5 GRAD I=3.535E+06 CANDELA
C=157.5 GRAD G= 22.5 GRAD I=1.464E+06 CANDELA
C=202.5 GRAD G= 22.5 GRAD I=0.000E+00 CANDELA
C=247.5 GRAD G= 22.5 GRAD I=0.000E+00 CANDELA
C=292.5 GRAD G= 22.5 GRAD I=0.000E+00 CANDELA
C=337.5 GRAD G= 22.5 GRAD I=0.000E+00 CANDELA
ZONENLICHTSTROM=2.300E+06 LUMEN VON TH1= 0.0 BIS TH2= 45.0
C= 22.5 GRAD G= 67.5 GRAD I=3.535E+06 CANDELA
C= 67.5 GRAD G= 67.5 GRAD I=8.534E+06 CANDELA
C=112.5 GRAD G= 67.5 GRAD I=8.534E+06 CANDELA
C=157.5 GRAD G= 67.5 GRAD I=3.535E+06 CANDELA
C=202.5 GRAD G= 67.5 GRAD I=0.000E+00 CANDELA
C=247.5 GRAD G= 67.5 GRAD I=0.000E+00 CANDELA
C=292.5 GRAD G= 67.5 GRAD I=0.000E+00 CANDELA
C=337.5 GRAD G= 67.5 GRAD I=0.000E+00 CANDELA
ZONENLICHTSTROM=1.341E+07 LUMEN VON TH1= 45.0 BIS TH2= 90.0
C= 22.5 GRAD G=112.5 GRAD I=3.535E+06 CANDELA
C= 67.5 GRAD G=112.5 GRAD I=8.534E+06 CANDELA
C=112.5 GRAD G=112.5 GRAD I=8.534E+06 CANDELA
C=157.5 GRAD G=112.5 GRAD I=3.535E+06 CANDELA
C=202.5 GRAD G=112.5 GRAD I=0.000E+00 CANDELA
C=247.5 GRAD G=112.5 GRAD I=0.000E+00 CANDELA
C=292.5 GRAD G=112.5 GRAD I=0.000E+00 CANDELA
C=337.5 GRAD G=112.5 GRAD I=0.000E+00 CANDELA
ZONENLICHTSTROM=1.341E+07 LUMEN VON TH1= 90.0 BIS TH2=135.0
C= 22.5 GRAD G=157.5 GRAD I=1.464E+06 CANDELA
C= 67.5 GRAD G=157.5 GRAD I=3.535E+06 CANDELA
C=112.5 GRAD G=157.5 GRAD I=3.535E+06 CANDELA
C=157.5 GRAD G=157.5 GRAD I=1.464E+06 CANDELA
C=202.5 GRAD G=157.5 GRAD I=0.000E+00 CANDELA
C=247.5 GRAD G=157.5 GRAD I=0.000E+00 CANDELA
C=292.5 GRAD G=157.5 GRAD I=0.000E+00 CANDELA
C=337.5 GRAD G=157.5 GRAD I=0.000E+00 CANDELA
ZONENLICHTSTROM=2.300E+06 LUMEN VON TH1=135.0 BIS TH2=180.0

PHI IM UNTEREN HALBRAUM = 1.571E+07 LUMEN
PHI IM OBEREN HALBRAUM = 1.571E+07 LUMEN
GESAMT-LICHTSTROM = 3.141E+07 LUMEN
    
```

**Bild 9**  
Lichtstärketabelle

**Testbefehle:** Für einen Systemtest stehen eine Reihe von Spezialbefehlen zur Verfügung, um eine rasche Fehlerdiagnose zu ermöglichen und die Reparatur-Stillstandszeiten somit erheblich zu reduzieren.

Nach dem Einschalten des Computer-Drehspiegelsystems kann mit dem Kommando CA (Kalibriertest) bei abgedunkeltem Photoelement ein konstanter, über DAC programmierbarer Teststrom (simulierter Photostrom) in den Vorverstärker eingespieist werden und der hierdurch bekannte Lichtstrom des simulierten idealen »Kugelstrahlers« integriert werden. Ist die Abweichung bei dieser Test-Integration größer als 0,5%, erfolgt eine Fehlermeldung.

**Bild 10**  
Lichtstromtabelle

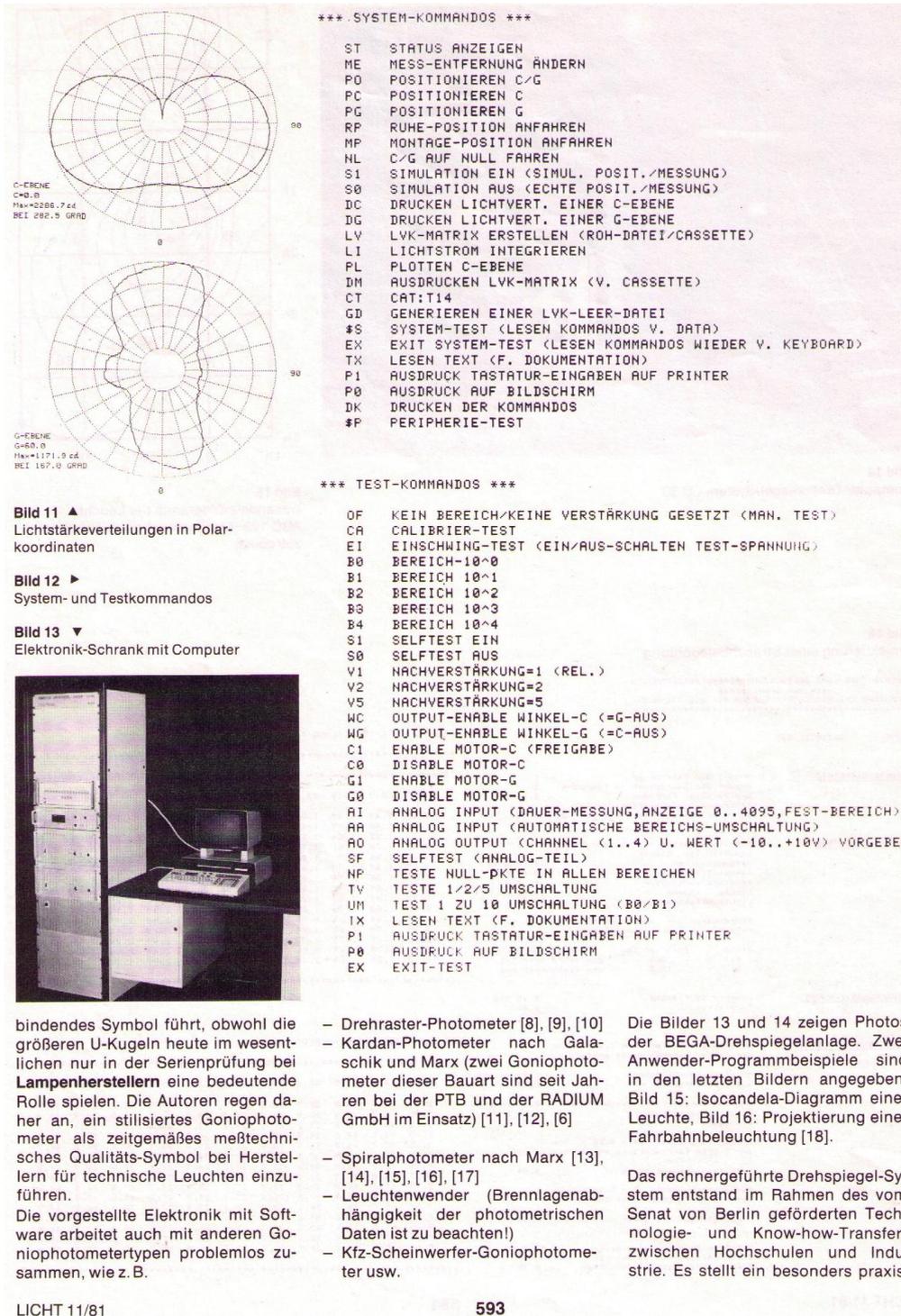
Die gesamte Meß- und Steuerungssoftware hat mit Subroutinen einen Umfang von 1200 Programmzeilen (Anweisungen, Befehle, Operatoren und Funktionen) (Bild 12).

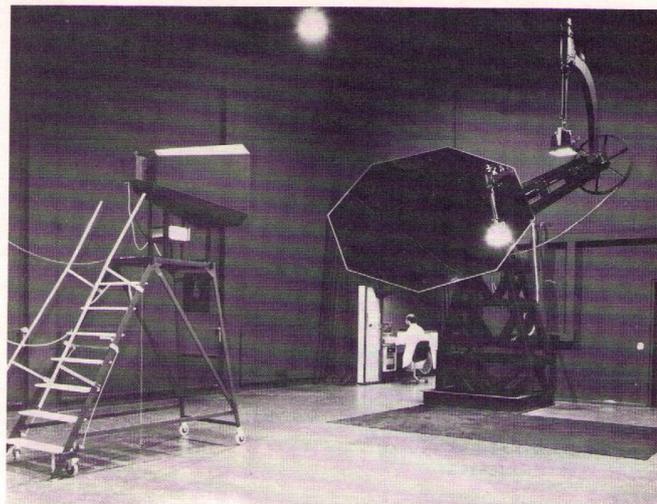
**7. Zusammenfassung**

Das beschriebene Drehspiegelsystem ermöglicht die Messung aller wichtigen photometrischen Daten von Lampen und Leuchten. Der Leuchtenhersteller benötigt keine weiteren Photometer wie z.B. Ulbricht-Kugel oder Leuchtenwender etc.. Eine Meßfehleranalyse, die systematische und zufällige (stochastische) Fehler berücksichtigte, ergab folgende Meßunsicherheiten:

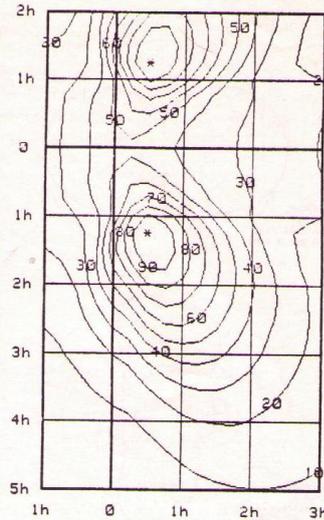
Lichtstärkemessung:  $\approx \pm 0,5\%$   
Lichtstrommessung:  $\approx \pm 1\%$   
Hinzu kommt die Unsicherheit der Realisierung der Basisseinheit Candela durch den Primärstandard  $\approx \pm 0,5\%$ . Der Reproduzierbarkeitsfehler beträgt etwa  $\pm 0,2\%$ .

Ulbricht-Kugeln und Leuchtenwender sind für **Leuchtenmessungen** weniger geeignet infolge höherer Meßunsicherheiten durch die bekannten z.T. erheblichen Kugelfehler und Brennlagenabhängigkeit von Lichtstärke und Lichtstrom bei Leuchtenwendern. In diesem Zusammenhang sollte erwähnt werden, daß der sog. Arbeitskreis lichttechnischer Spezialfabriken (ALS) noch immer eine Ulbricht-Kugel als gemeinsames ver-





**Bild 14**  
Computer-Drehspiegel-System CD 80



**Bild 15**  
Isocandela-Diagramm der Leuchte  
ABC 123 (Maximalwert der Lichtwerte(\*):  
359 cd/k1)

**Bild 16**  
Projektion einer Straßenbeleuchtung

LEUCHTDICHTE- UND BELEUCHTUNGSSTÄRKEBERECHNUNGEN  
NACH DEM ERWEITERTEN  
STANDARD LEUCHTDICHTE-PROGRAMM DER CIE (TC-4.6)

PROJEKT BEISPIEL 637

**STRASSENGEOMETRIE**

Anzahl der Fahrbahnen 1  
Anzahl der Fahrspuren je Fahrbahn 3  
Breite einer Fahrspur 3,50 m  
Fahrbahnbelag charakterisiert durch Standard-R-Tabelle Nr.3  $Q_0 = 0,08$

**LEUCHTENGEOMETRIE**

Die Installation besteht aus 2 Leuchtenreihen(n)  
Leuchten Typ CIELVK  
Neigungswinkel 10,00 Grad  
Lampentypscheinwert 33,00 klv  
Veränderungsfaktor 0,80  
Lichtpunkthöhe 10,00 m  
Lichtpunktabstand 35,00 m  
Koordinaten der Leuchtenreihen(n) relativ zur linken Fahrbahnkante  
Reihe Position (m) Co-Ebene zeigt  
1 0,5 zum Beobachter hin  
2 10,0 vom Beobachter weg

**BLENDUNGSBERECHNUNG**

Leuchtende Fläche 0,15 m<sup>2</sup>  
Farbfaktor 0,68

**LICHTTECHNISCHE DATEN**

Beobachterposition R = 7,88 m von der linken Fahrbahnkante entfernt  
Mittlere Leuchtdichte Gleichmässigkeit 2,09 cd/m<sup>2</sup> 0,68  
Requivalente Schleierleuchtdichte 0,21 cd/m<sup>2</sup>  
Schwellenwerterhöhung 6,28 %  
Blendzahl G 7,3  
Beobachterposition R = 0,75 m von der linken Fahrbahnkante entfernt  
Längsgleichmässigkeit 0,64  
Beobachterposition R = 5,25 m von der linken Fahrbahnkante entfernt  
Längsgleichmässigkeit 0,59  
Mittlere Beleuchtungsstärke 32,9 lx  
Gleichmässigkeit G1=Em/Eh 0,57  
Gleichmässigkeit G2=Em/Ehx 0,39

**LEUCHTDICHTE-VERTEILUNG (cd/m<sup>2</sup>)**

Beobachterposition R = 7,88 m von der linken Fahrbahnkante entfernt

x/y	60.0	63.5	67.0	70.5	74.0	77.5	81.0	84.5	88.0	91.5
0.35	1.49	1.35	1.25	1.34	1.61	1.87	1.91	1.77	1.75	1.65
1.05	1.58	1.49	1.43	1.59	1.93	2.23	2.32	1.99	1.93	1.79
1.75	1.67	1.64	1.62	1.85	2.23	2.59	2.67	2.23	2.08	1.90
2.45	1.78	1.81	1.78	2.03	2.43	2.71	2.68	2.44	2.18	2.00
3.15	1.86	1.92	1.86	2.12	2.49	2.72	2.63	2.53	2.23	2.08
3.85	1.87	1.95	1.87	2.12	2.43	2.68	2.97	2.59	2.30	2.11
4.55	1.86	1.94	1.85	2.08	2.38	2.63	3.03	2.65	2.34	2.09
5.25	1.84	1.91	1.82	2.01	2.34	2.62	3.02	2.65	2.35	2.07
5.95	1.82	1.89	1.77	1.97	2.30	2.57	2.97	2.61	2.33	2.06
6.65	1.80	1.86	1.75	1.94	2.25	2.54	2.89	2.54	2.27	2.05
7.35	1.81	1.84	1.74	1.95	2.28	2.54	2.93	2.44	2.18	2.03
8.05	1.80	1.80	1.74	1.96	2.32	2.59	2.79	2.41	2.16	1.99
8.75	1.77	1.75	1.72	1.92	2.28	2.54	2.69	2.28	2.11	1.94
9.45	1.78	1.64	1.61	1.78	2.11	2.38	2.44	2.08	2.08	1.87
10.15	1.55	1.49	1.44	1.58	1.97	2.10	2.08	1.86	1.87	1.72

**BELEUCHTUNGSSTÄRKE-VERTEILUNG (lx)**

x/y	60.0	63.5	67.0	70.5	74.0	77.5	81.0	84.5	88.0	91.5
0.35	40.6	36.8	28.5	22.2	19.7	18.8	19.7	22.2	28.5	36.8
1.05	42.7	39.4	38.9	24.2	21.7	20.3	21.7	24.2	30.9	39.4
1.75	44.3	41.4	33.1	26.3	23.6	21.7	23.6	26.3	33.1	41.4
2.45	45.5	43.2	34.9	28.4	25.1	22.8	25.1	28.4	34.9	43.2
3.15	46.7	44.7	36.1	30.0	26.1	23.4	26.1	30.0	36.2	44.7
3.85	47.4	45.9	37.9	31.6	27.0	24.0	27.0	31.6	37.9	45.9
4.55	47.8	46.8	38.9	32.8	27.7	24.4	27.7	32.8	38.9	46.8
5.25	48.0	46.9	39.3	33.2	28.0	24.8	28.0	33.2	39.3	46.9
5.95	47.8	46.8	38.9	32.8	27.7	24.4	27.7	32.8	38.9	46.8
6.65	47.4	45.9	37.9	31.6	27.0	24.0	27.0	31.6	37.9	45.9
7.35	46.7	44.7	36.1	30.0	26.1	23.4	26.1	30.0	36.2	44.7
8.05	45.5	43.2	34.9	28.4	25.1	22.8	25.1	28.4	34.9	43.2
8.75	44.3	41.4	33.1	26.3	23.6	21.7	23.6	26.3	33.1	41.4
9.45	42.7	39.4	38.9	24.2	21.7	20.3	21.7	24.2	30.9	39.4
10.15	40.6	36.8	28.5	22.2	19.7	18.8	19.7	22.2	28.5	36.8

Prof. Dr.-Ing. Peter Marx

Außergewöhnliche Anwendung von Robotern:

## Lichtmeßanlage für die lichttechnische Industrie

Wachsende Anforderungen bei der Humanisierung der Arbeitswelt und steigende Energiekosten erfordern hochwertigere und wirtschaftlichere Beleuchtungssysteme für Verkehrswege, Arbeitsstätten und Wohnbereiche. Optimale Lichtmeßmethoden sind eine Voraussetzung, um bereits bei der Entwicklung neuer Lichtquellen die geforderten lichttechnischen Eigenschaften im Photometrielabor nachzuvollziehen. Im

Rahmen des vom Senat Berlin intitierten Technologietransfers zwischen Hochschulen und Industrie [1] entstand eine vollautomatische computergesteuerte Lichtmeßanlage – vermutlich die modernste der Welt. Ihr Kernstück – der Lichtmeßroboter – ist kein „Industrieroboter“ im eigentlichen Sinne, doch die Spezialanwendung als „Lichtmeßknecht“ ist faszinierend genug, um an dieser Stelle vorgestellt zu werden.

### Einige lichttechnische Zusammenhänge

Nach DIN 5032 [2] wird der Lichtstärkeverteilungskörper (LVK) einer Leuchte meist in sogenannten C-Ebenen gemessen (Bild 1). Bei den häufig auftretenden unsymmetrischen Lichtstärkeverteilungen müssen bis zu 72 C-Halbebenen ( $\Delta C = 5^\circ$ ) und innerhalb einer Halbebene bis zu 73 Lichtstärken ( $\Delta \gamma = 2,5^\circ$ ) erfaßt werden. Man erhält demzufolge eine Lichtstärkematrix  $I(C, \gamma)$  mit  $72 \times 73 = 5256$  Meßwerten.

Die Lichtstärkeverteilung ergibt sich aus dem photometrischen Entfernungsgesetz:

$$I = E \cdot r^2 \cdot \frac{1}{\Omega_0}$$

( $I$  = Lichtstärke in Candela (cd),  $E$  = Beleuchtungsstärke auf dem Empfänger (senkrechter Lichteinfall) in Lux (lx),  $r$  = Abstand zwischen Lichtquellenmittelpunkt ( $\cong$  Koordinatensprung des Spiegel-Goniophotometers) und lichtempfindlichem Empfänger,  $\Omega_0$  = Einheitsraumwinkel in Steradian (sr). Der Lichtstrom von Lampen und Leuchten (Einheit: Lumen (lm)) folgt allgemein aus einem Doppelintegral. Bei realen Lichtquellen ist es im allgemeinen nicht geschlossen lösbar, da der enthaltene Ausdruck  $E(\varphi, \theta)$  keine analytische Funktion ist. Daher dienen numerische Verfahren zur Integration. Sie führen auf eine Näherungsgleichung, für die in BASIC ein geeigneter Algorithmus formuliert wurde. Weitere Einzelheiten sind in [3] enthalten. Die Kenntnis der Lichtstärkeverteilungs-Matrix  $I(C, \gamma)$  und des Lichtstromes ermöglicht das Ermitteln der Wirkungsgrade von

Lampen und Leuchten und umfangreiche Projektionsberechnungen für moderne Beleuchtungsanlagen [4, 5].

Lichtmeßroboter der Zukunft? Diese im Rahmen eines Technologietransfers zwischen Hochschule und Industrie erstellte vollautomatische Lichtmeßanlage ist vermutlich die modernste der Welt  
(Foto: Fränkische Leuchten)



## Mechanik und Elektronik der Lichtmeßanlage

Bild 2 zeigt den prinzipiellen Aufbau der Lichtmeßanlage. Rechts ist die Drehspiegel-Mechanik des Lichtmeßroboters zu sehen, die mit einem Präzisions-Kristallspiegel in den Abmessungen 1900 mm × 2687 mm ausgerüstet ist. Die einseitig gelagerte Konstruktion hat eine Bauhöhe von ca. 6,5 m, das Gewicht beträgt etwa 2000 kg. Die Definition der Drehwinkel  $C$  und  $\gamma$  erfolgt nach DIN 5032, wobei die Winkel mit Hilfe von Absolutwinkelgebern bei einer Auflösung von  $0,1^\circ$  gemessen werden. Die optischen Achsen des Drehspiegelsystems sind mit Hilfe eines He-Ne-Justierlasers eingestellt.

An einer Laufschiene befindet sich ein fahrbarer Photometerwagen. Er enthält ein thermostatisiertes Si-Fotoelement mit Spezialespektrangleich gemäß der relativen spektralen Hellempfindlichkeit des Normalbeobachters und eine ferngesteuerte Irisblende.

Zum Berechnen und Auswerten dient ein Computer HP 9845 B mit 187 KByte Arbeitsspeicher, Grafikbildschirm, Thermodrucker und zwei Magnetbandkassetten mit jeweils 217 KByte. Für die Anwender-Software wird BASIC verwendet, das einen einfachen interaktiven Dialogbetrieb zwischen dem System und dem Bedienpersonal ermöglicht.

Ein Elektronikschrank schließlich enthält die notwendigen Komponenten: Digital-Luxmeter mit computerge-

steuerter Meßbereichswahl, Multiprogrammer zum Adaptieren der Prozeßsignale, Motor-Tacho-Servoverstärker zur Drehzahlregelung der Antriebsmaschinen, Digital-Wattmeter zum Messen der Lampenleistung, Zweikanaloszilloskop, DC-Konstanter für die Stromversorgung der Lichtstärke-Normallampe Wi 41 sowie ein Multimeter zur echten Effektivwertmessung der nicht-sinusförmigen Spannungen und Ströme von Entladungslampen.

In den Laborräumen beträgt die maximale Meßentfernung 18 m; somit können alle Leuchten bis 1800 mm gemessen werden. Von einem separaten Beobachterraum lassen sich dank hochwertig entspiegelter Glasscheiben der Drehspiegelbereich und die Meßstrecke während der Messung ständig überwachen. Um den Forderungen nach DIN 5032 gerecht zu werden, wurde eine Klimaanlage eingebaut, die eine konstante Raumtemperatur gewährleistet.

## Technische Einzelheiten

Die Blockschaltung der Lichtmeßanlage mit den Funktionsgruppen Sensoren und Aktoren, Prozeßperipherie sowie Rechner mit Datenperipherie zeigt Bild 3. Zu den Sensoren gehören die Absolutwinkelgeber, die Tachogeneratoren zur Drehzahlregelung, das Si-Fotoelement mit Temperaturfühler sowie die Mikroschalter

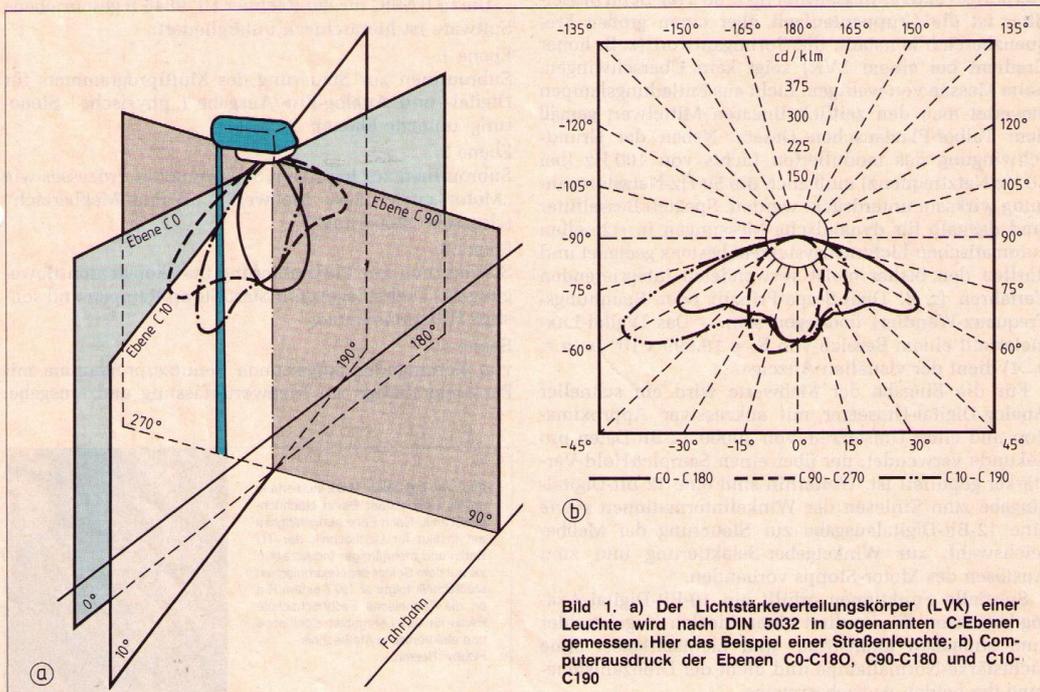
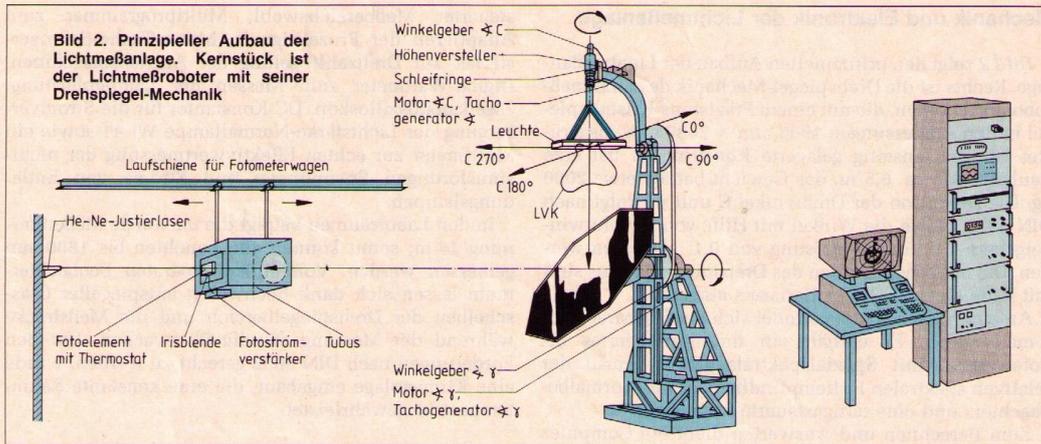


Bild 1. a) Der Lichtstärkeverteilungskörper (LVK) einer Leuchte wird nach DIN 5032 in sogenannten C-Ebenen gemessen. Hier das Beispiel einer Straßenleuchte; b) Computerausdruck der Ebenen C0-C180, C90-C180 und C10-C190

# Roboter Automatisierung



zum Feststellen der Spiegel-Endlagen (Not-Aus). Die Aktoren sind: Scheibenläufermotoren mit Getrieben, die elektromagnetisch betätigte Irisblende und das Heizelement des Fotoelements.

Zur Prozeßperipherie gehört ein Fotostrom-Chopperverstärker mit automatischer Steuerung der Meßbereiche von seiten des Rechners und ein nachgeschaltetes vierpoliges aktives Besselfilter ( $f_g < 50$  Hz). Beim Besselfilter ist die Gruppenlaufzeit über einen großen Frequenzbereich konstant, die Sprungantwort (z. B. hoher Gradient bei einem LVK) zeigt kein Überschwingen. Beim Messen von welligem Licht aus Entladungslampen bewertet man den zeitlich linearen Mittelwert gemäß dem Talbot-Plateauschen Gesetz. Neben der Grundschwingung des modulierten Lichts von 100 Hz (bei 50 Hz Netzfrequenz) muß auch die 50-Hz-Netzstörspannung wirksam unterdrückt werden. Speziell Besselfilter sind deshalb für dynamische Messungen in schnellen automatischen Lichtmeßsystemen bestens geeignet und dürften den bisher meist verwendeten integrierenden Verfahren (z. B. Dual-Slope-Prinzip oder Spannungsfrequenz-Wandler) überlegen sein. – Das Digital-Luxmeter mit einem Bereich von  $E = 19,999 \times 10^n$  lx ( $n = 0..4$ ) dient der visuellen Anzeige.

Für die Eingabe der Meßwerte wird ein schneller Analog-Digital-Umsetzer mit sukzessiver Approximation und einer Umsetzrate von 20000 12-Bit-Daten pro Sekunde verwendet, der über einen Sample&Hold-Verstärker gepuffert ist. Weiterhin sind eine 12-Bit-Digital-eingabe zum Einlesen der Winkelinformationen sowie eine 12-Bit-Digitalausgabe zur Steuerung der Meßbereichswahl, zur Winkelgeber-Selektierung und zum Auslösen des Motor-Stopps vorhanden.

Spezielle Funktionen erfüllt ein 10-Bit-Digital-Analog-Umsetzer: Er simuliert einen idealen Kugelstrahler zum einfachen Lichtstrom- und Lichtstärketest ohne Lichtstärke-Normallampe und dient der Drehzahlsteuerung der beiden Antriebssysteme.

Ein Code-Umsetzer schließlich transformiert den Gray-Code in den rechnerkompatiblen Dual-Code, und zwei Motorregler sind für die Koordinaten C und  $\gamma$  zuständig.

## Meß- und Steuerungssoftware

Die in BASIC für der Rechner HP 9845 B geschriebene Software ist hierarchisch untergliedert:

Ebene 1:

Subroutinen zur Steuerung des Multiprogrammers für Digital- und Analog-Ein-/Ausgabe („physische“ Steuerung, unterste Ebene);

Ebene 2:

Subroutinen zur logischen Steuerung des Prozesses wie „Motor ein“, „Lese Meßwert“, „Wähle Meßbereich“ („logische Steuerung“);

Ebene 3:

Subroutinen zur Positionierung und konstanten Bewegung des Drehspiegels mit Start/Stop-Rampen und sonstige Hilfsprogramme;

Ebene 4:

von Kommandos aufgerufene Benutzerprogramme mit Parameterabfrage zur Meßwerterfassung und -ausgabe,

**Prof. Dr.-Ing. Peter Marx** studierte in seiner Heimatstadt Berlin Nachrichtentechnik. Nach Forschungstätigkeit am Institut für Lichttechnik der TU Berlin und mehrjähriger Industriepraxis auf dem Sektor der elektronischen Meßtechnik folgte er 1977 einem Ruf an die Technische Fachhochschule Berlin für das Lehrgebiet elektrische und elektronische Meßtechnik.  
 Hobby: Reisen



# Automatisierung **Roboter**

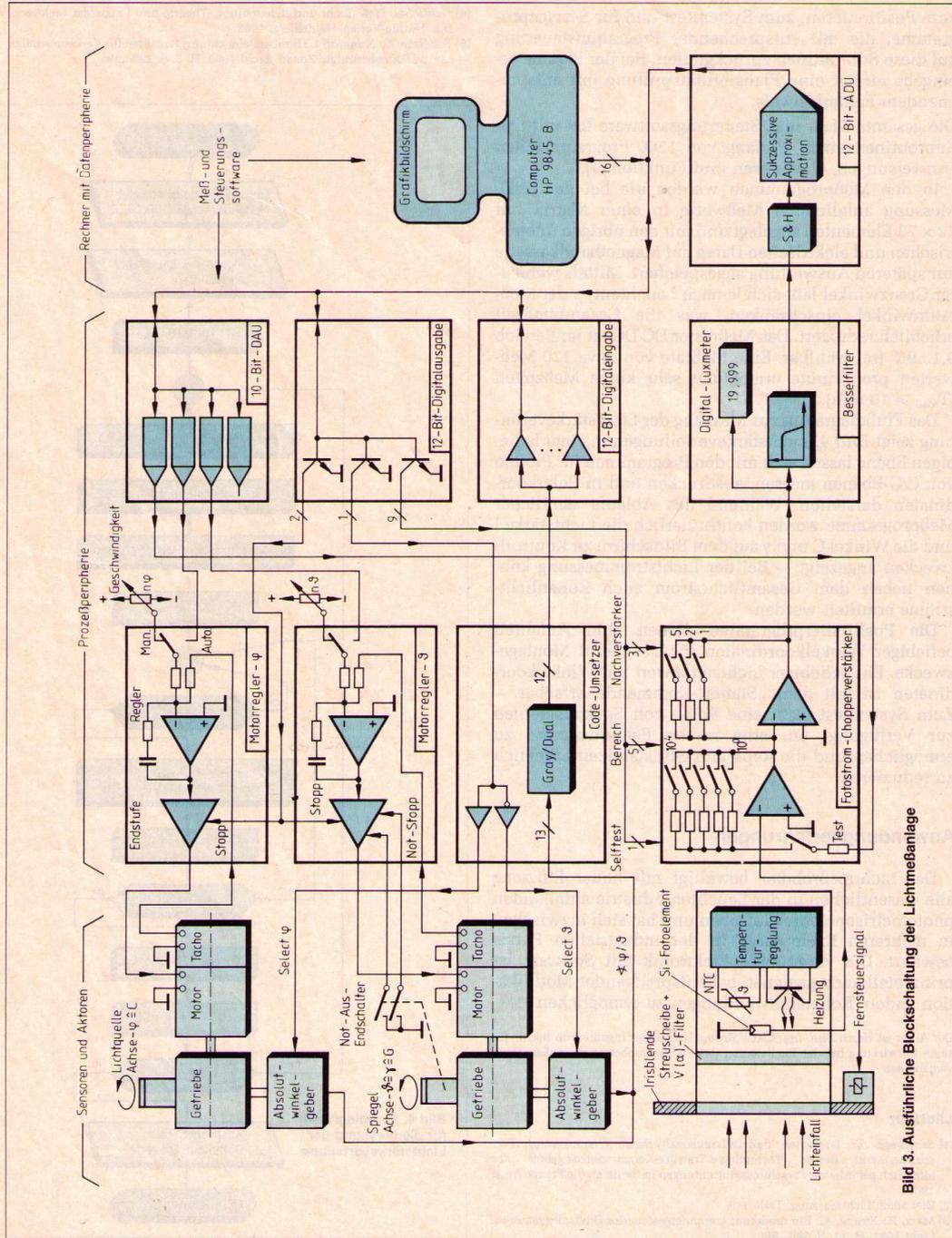


Bild 3. Ausführliche Blockschaltung der Lichtmeßanlage

## Roboter Automatisierung

zum Positionieren, zum Systemtest und für Serviceprogramme, die mit entsprechender Programmsteuerung auf diese Subroutinen zurückgreifen. Bei der Parameter-eingabe erfolgt eine Plausibilitätsprüfung mit entsprechendem Fehlerhinweis.

Die gesamte Meß- und Steuerungssoftware hat mit den Subroutinen einen Umfang von 1200 Programmzeilen (Anweisungen, Operatoren und Funktionen).

In den Meßprogrammen werden die bei der LVK-Messung anfallenden Meßwerte in einer Matrix mit  $72 \times 73$  Elementen abgelegt und mit den übrigen fotometrischen und elektrischen Daten auf Magnetbandkassette zur späteren Auswertung abgespeichert. Mittels wählbarer Grenzwinkel läßt sich je nach Leuchtentyp der Meßraumwinkel einschränken, was die Gesamtmeßzeit erheblich reduziert. Das Meßraster DC/DG ist im Bereich  $0,1 \dots 90^\circ$  frei wählbar. Eine Meßrate von etwa 120 Meßwerten pro Minute ermöglicht sehr kurze Meßzeiten ( $T_{\text{Meß}} \geq 10 \text{ min}$ ).

Das Flußdiagramm zur Messung der Lichtstärkeverteilung zeigt Bild 4. Lichtstärkeverteilungen in einer beliebigen Ebene lassen sich mit den Programmen für Plotten von C/G-Ebenen messen, ausdrucken und in Polarkoordinaten darstellen. Während des Ablaufs sämtlicher Meßprogramme werden kontinuierlich die Lichtstärke I und die Winkel C und  $\gamma$  auf dem Bildschirm zu Kontrollzwecken angezeigt. – Bei der Lichtstrommessung können neben dem Gesamtlichtstrom auch Zonenlichtströme ermittelt werden.

Die Positionierprogramme dienen zum Anfahren beliebiger Winkelkoordinaten für Test- und Montagezwecke. Ein beliebiger Lichtstärkewert mit Winkelkoordinaten ist mit dem „Status“-Kommando erfassbar. – Zum Systemtest steht eine Reihe von Spezialbefehlen zur Verfügung, um eine rasche Fehlerdiagnose zu ermöglichen und die Reparatur-Stillstandzeit erheblich zu reduzieren.

### Anwendungserfahrungen

Der Lichtmeßroboter bewältigt mit hoher Effizienz alle wesentlichen in der Leuchtenindustrie anfallenden photometrischen Meßaufgaben und hat sich inzwischen in mehreren Exemplaren in der industriellen Praxis bewährt. Die vorgestellte Elektronik mit Software ist prinzipiell auch geeignet, bei entsprechender Modifikation andere Roboteranwendungen zu ermöglichen [1].

Der Autor ist Herrn *Dipl.-Ing. Klaus Strung*, Beratender Ingenieur in Berlin, für seine Mitwirkung bei der Realisierung des Lichtmeßroboters zu großem Dank verpflichtet.

### Literatur

- [1] *Senatoren für Wirtschaft und Wissenschaft Berlin (Herausgeber):* Forschungsmarkt Berlin. Technologie-Transfer-Kooperationsangebote der öffentlich geförderten Forschungseinrichtungen in Berlin an die Praxis, April 1983.
- [2] DIN 5032: Lichtmessung, Teile 1..4.
- [3] *Marx, P.; Strung, K.:* Ein modernes computergesteuertes Drehspiegelsystem. Licht 1981, H. 11, S. 586...595.

[4] *Hentschel, H.-J.:* Licht und Beleuchtung: Theorie und Praxis der Lichttechnik. Hüthig-Verlag, Heidelberg, 1982.

[5] *Schelzke, E.; Schmidt, K.:* Straßenbeleuchtung, Leuchten für Verkehrsstraßen und verkehrsberuhigte Zonen. Licht 1983, H. 5, S. 290...295.

