

1. Aufgabenstellung

- 1.1 Ermitteln Sie den optischen Wirkungsgrad einer Halogenlampe und einer Glühlampe.
- 1.2 Prüfen Sie die Gültigkeit des fotometrischen Entfernungsgesetzes.
- 1.3 Bestimmen Sie die Richtungsabhängigkeit der Lichtstärke einer Halogenlampe und einer Glühlampe und überprüfen Sie, inwieweit das LAMBERT'sche Cosinusetz erfüllt ist.
- 1.4 Kalibrieren Sie eine Thermosäule als Beleuchtungsstärke-Messgerät.

2. Theoretische Grundlagen

Stichworte zur Vorbereitung:

Fotometrie, elektromagnetische Strahlung, Raumwinkel, Strahlungsstärke, Strahlungsfluss, Strahlungsdichte, Lichtstrom, Lichtstärke, Beleuchtungsstärke, fotometrisches Entfernungsgesetz, LAMBERT'sches Gesetz, optischer Wirkungsgrad, Fotoelement, Thermosäule, schwarzer Körper

Literatur:

- |                    |  |
|--------------------|--|
| E. Grimsehl        | Lehrbuch der Physik, Bd. 3, Kap. 6 - 9,<br>Teubner Verlag                          |
| W. Walcher         | Praktikum der Physik, Kap. O 4.5,<br>Teubner Verlag 1989                           |
| Bergmann - Schäfer | Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd. 3,<br>Kap. V1, 10 - 13,<br>W. de Gruyter 1973 |

Unter Fotometrie oder Lichtmessung versteht man die Gesamtheit derjenigen Verfahren, die sich mit der quantitativen Untersuchung der Lichtintensität im sichtbaren Spektralbereich befassen. Dabei unterscheidet man zwischen subjektiver und objektiver Fotometrie. Von subjektiver Fotometrie spricht man, wenn die Messungen unmittelbar mit dem Auge ausgeführt werden, während man in der objektiven Fotometrie geeignete elektromagnetische Strahlungsempfänger verwendet.

Vor der Definition der in der Fotometrie verwendeten Messgrößen ist es zweckmäßig, diejenigen Messgrößen einzuführen, die bei der Strahlungsmessung im allgemeinen Sinne Anwendung finden.

Unter Strahlung in diesem allgemeinen Sinne ist die Aussendung elektromagnetischer Energie durch Strahlungsquellen zu verstehen, ohne die Beschränkung auf den sichtbaren Bereich des Spektrums.

Die unabhängig von der spektralen Empfindlichkeit des menschlichen Auges verwendeten energetischen Größen zur Beschreibung elektromagnetischer Strahlung werden als strahlungsphysikalische Größen bezeichnet. Für die messtechnische Erfassung der vom menschlichen Auge wahrgenommenen Strahlung im sichtbaren Wellenbereich (380 nm bis 780 nm) gelten gesonderte, sogenannte lichttechnische oder fotometrische Größen. Sie entsprechen den strahlungsphysikalischen Größen, sind jedoch nicht von den energetischen Parametern der Lichtstrahlung, sondern von ihrem Lichtreiz auf das Auge abgeleitet. Sie sollen im folgenden mit dem Index  $v$  (visuell) gekennzeichnet werden.

## 2.1 Strahlungsphysikalische Größen

Die zentrale Größe der Strahlungsmessung ist der Strahlungsfluss  $\Phi$  (auch Strahlungsleistung genannt). Darunter versteht man die pro Zeiteinheit von einer Strahlungsquelle abgegebene oder von einem Empfänger aufgenommene Strahlungsenergie. Der Strahlungsfluss wird in Watt gemessen. Unter der Voraussetzung einer punktförmigen Strahlungsquelle, die nach allen Richtungen des isotrop angenommenen Raumes in jeder Sekunde die gleiche Strahlung abgibt, läßt sich

eine weitere, nur die Strahlungsquelle charakterisierende Messgröße einführen, die Strahlungsstärke  $I$ , die durch

$$I = \frac{\Phi}{\Omega} \quad (1)$$

definiert ist, wobei  $\Omega = A/r^2$  der Raumwinkel ist, in dem die punktförmige Strahlungsquelle den Strahlungsfluss  $\Phi$  ausstrahlt. Unter dem Raumwinkel  $\Omega$  versteht man das Verhältnis der Fläche  $A$ , die der von der Strahlungsquelle  $Q$  ausgehende Strahlenkegel aus einer Kugelfläche um  $Q$  ausschneidet, und dem Quadrat des Kugelradius  $r$ .

Die Einheit des Raumwinkels ist Steradian ( $\text{sr}$ ). Die Raumwinkeleinheit  $1 \text{ sr}$  liegt vor, wenn die auf einer Kugeloberfläche ausgeschnittene Fläche gleich dem Quadrat des Radius ist. Der Raumwinkel für die Vollkugel beträgt  $\Omega = 4 \pi \text{ sr}$ . Für die Strahlungsstärke ergibt sich die Maßeinheit  $[I] = \text{W}/\text{sr}$ .

Falls die Abstrahlung nicht in alle Raumrichtungen die gleiche ist, errechnet sich die Strahlungsstärke sinngemäß nach

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (2)$$

mit

$$d\Omega = \frac{dA}{r^2} .$$

Ist das von dem Raumwinkel  $d\Omega$  erfasste Flächenelement  $dA$  um den Winkel  $\varphi$  gegen das vom gleichen Raumwinkel  $d\Omega$  auf der Kugelfläche mit dem Radius  $r$  ausgeschnittene Flächenelement geneigt, dann gilt (Abb.1):

$$d\Omega = \frac{dA \cos \varphi}{r^2} \quad (3)$$

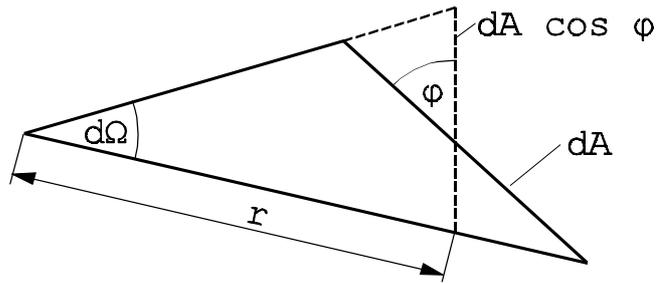


Abb. 1 : Zur Bestimmung der Strahlungsstärke

Im folgenden sollen alle mit der bestrahlten Fläche verbundenen Größen den Index 2 und die mit der abstrahlenden Fläche verbundenen Größen den Index 1 erhalten.

Bei den bisherigen Betrachtungen wurde von einer punktförmigen Strahlungsquelle ausgegangen. In der Praxis spielen jedoch die Abmessungen der Strahlungsquelle eine bedeutende Rolle. Eine Strahlungsgröße, die dem Rechnung trägt, ist die Strahlungsdichte  $L$ , die angibt, wie groß bei einem flächenhaften Strahler die senkrecht pro Flächeneinheit wirksame Strahlungsstärke ist. Die Strahlungsdichte ist definiert als

$$L = \frac{dI}{dA_1 \cos \varphi_1} \quad , \quad (4)$$

wobei  $dA_1$  die strahlende Fläche und  $\varphi_1$  den Winkel zwischen Strahlungsrichtung und Flächennormalen bedeuten.

Aus Gl. (2) folgt

$$dI = \frac{d^2 \Phi}{d\Omega} \quad . \quad (5)$$

Damit ergibt sich für die Strahlungsdichte

$$L = \frac{d^2 \Phi}{dA_1 \cos \varphi_1 d\Omega} \quad . \quad (6)$$

Die Einheit der Strahlungsdichte ist  $[L] = \text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$ .

Als eine auf den Empfänger bezogene Größe wird die sog. Bestrahlungsstärke  $E$  eingeführt. Darunter ist der auf die Flächeneinheit des Empfängers fallende Strahlungsfluss zu verstehen. Für sie gilt

$$E = \frac{d\Phi}{dA_2} \quad (7)$$

Die Einheit der Bestrahlungsstärke ist  $[E] = \text{W m}^{-2}$ .

Eine Verbindung zwischen dem Strahlungsfluss, der von einer Strahlerfläche  $dA_1$  ausgeht und auf eine Empfängerfläche  $dA_2$  auftrifft, wobei diese Flächen den Abstand  $r$  haben, stellt das Grundgesetz der Strahlungsmessung dar Gl. (8).

$$d^2\Phi = L \frac{dA_1 \cos \varphi_1 dA_2 \cos \varphi_2}{r^2} \quad (8)$$

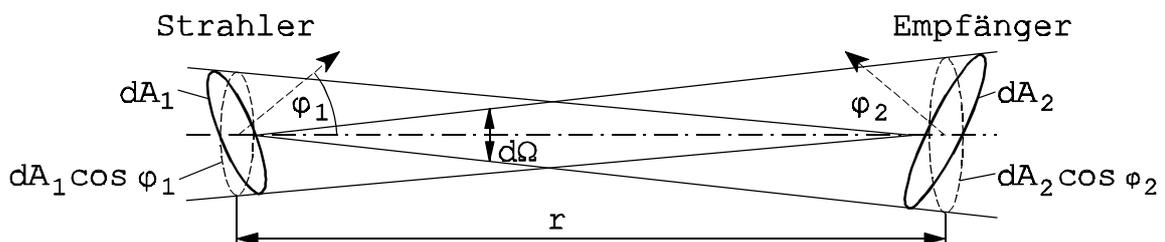


Abb. 2: Zum Grundgesetz der Strahlungsmessung

## 2.2 Lichttechnische Größen

Wie bereits einleitend bemerkt, erfolgt bei fotometrischen Messungen eine der Helligkeitsempfindung des menschlichen Auges angepasste Bewertung des Lichtes. Zwischen der Helligkeitsempfindung des Auges und der Strahlungsleistung besteht zwar Proportionalität, jedoch ist der Proportionalitätsfaktor wellenlängenabhängig. Dieser wellenlängenabhängige Faktor ist von Beobachter zu Beobachter verschieden, ebenso wie das Tages- und Nachtsehen. Auf Grund vieler Messun-

gen wurde für diesen Faktor  $V(\lambda)$  die Wellenlängenabhängigkeit entsprechend der Abb. 3 festgelegt. Die Bewertung der strahlungsphysikalischen Größen mit diesem Faktor führt zu den lichttechnischen Größen. Aus der Abb. 3 ist zu erkennen, dass ein Se-Fotoelement eine dem Lichteindruck des Auges sehr ähnliche Wellenlängenabhängigkeit der Helligkeitsempfindung besitzt.

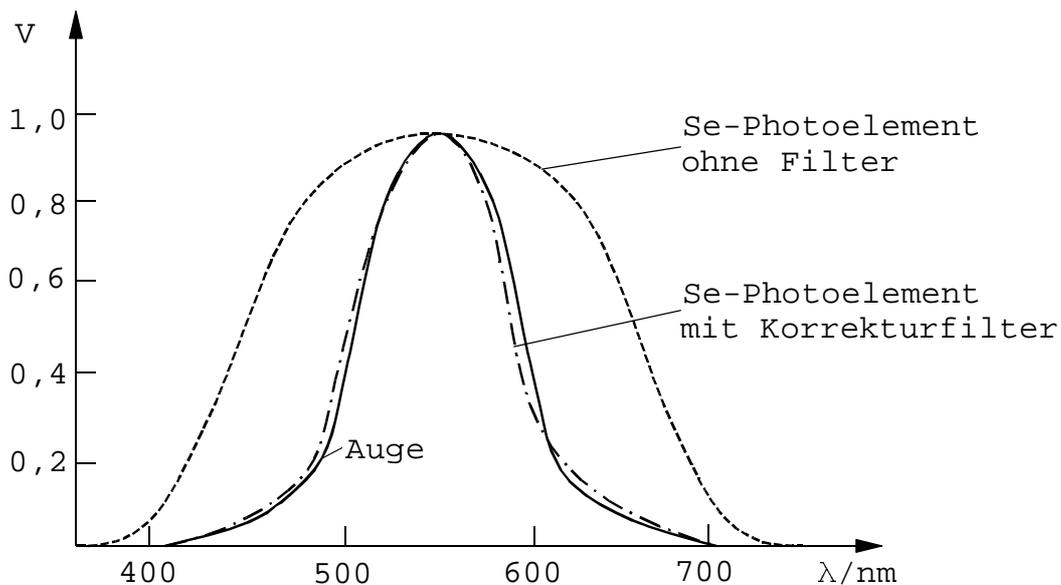


Abb. 3 : Relative spektrale Hellempfindlichkeit  $V_\lambda$  des menschlichen Auges und eines Se-Fotoelementes.

Man erkennt die gute Anpassung der Empfindlichkeit des Selen-Photoelementes an die des Auges nach Korrektur durch einen Filter.

Die lichttechnische Grundgröße ist die Lichtstärke  $I_v$ . Sie entspricht der strahlungsphysikalischen Strahlungsstärke. Für sie wurde die SI-Einheit Candela (cd) eingeführt, die folgendermaßen definiert ist: Candela ist die in einer Richtung abgegebene Lichtstärke einer Lichtquelle, die eine monochromatische Strahlung der Frequenz  $540 \cdot 10^{12}$  Hz aussendet und deren Strahlungsstärke in dieser Richtung  $1/683$  Watt/sr beträgt.

Der Lichtstrom  $\Phi_v$  entspricht dem vom Auge wahrgenommenen Strahlungsfluss.

Eine punktförmige Lichtquelle der Lichtstärke  $I_v$  sendet in den Raumwinkel  $d\Omega$  den Lichtstrom  $d\Phi_v = I_v d\Omega$  aus. Der Lichtstrom wird in der Einheit  $[\Phi_v]$   $\text{cd}\cdot\text{sr}$  angegeben. Dafür wird die Bezeichnung Lumen ( $\ell\text{m}$ ) eingeführt:  $1 \ell\text{m} = 1 \text{cd}\cdot\text{sr}$ . Fällt der Lichtstrom  $d\Phi_v$  auf das Flächenelement  $dA_2$ , so erzeugt er die Beleuchtungsstärke

$$E_v = \frac{d\Phi_v}{dA_2} \quad . \quad (9)$$

Die dazugehörige Einheit Lumen/m<sup>2</sup> wird Lux ( $\ell\text{x}$ ) genannt,  $1 \ell\text{x} = 1 \ell\text{m}/\text{m}^2$ .

Die der Strahlungsdichte analoge Leuchtdichte  $L_v$  gibt die Lichtstärke an, die von einer flächenhaften Lichtquelle senkrecht pro Flächeneinheit abgegeben wird. Analog zu Gl. (4) gilt

$$L_v = \frac{dI_v}{dA_1 \cos \varphi_1} \quad . \quad (10)$$

Als optischen Wirkungsgrad  $\eta$  einer Glühlampe bezeichnet man das Verhältnis der Lichtstärke  $I_v$  zur aufgenommenen elektrischen Leistung  $N$  :

$$\eta = \frac{I_v}{N} \left[ \frac{\text{cd}}{\text{Watt}} \right] \quad . \quad (11)$$

## 2.3 Einige fotometrische Gesetzmäßigkeiten

### 2.3.1 Fotometrisches Entfernungsgesetz

Eine in der Fotometrie oft benutzte Beziehung zwischen der Beleuchtungsstärke  $E_v$  und der Lichtstärke  $I_v$  ergibt sich durch Umformung der Gl. (9) mit Hilfe der Gln. (2) und (3). Man erhält das sog. fotometrische Entfernungsgesetz

$$E_v = \frac{I_v \cos \varphi_2}{r^2} \quad , \quad (12)$$

das die Abhängigkeit der Beleuchtungsstärke von dem Abstand  $r$  zwischen Lichtquelle und beleuchteter Fläche zum Ausdruck bringt. Es gilt exakt nur für punktförmige Lichtquellen, kann aber näherungsweise auch für ausgedehnte

Lichtquellen verwendet werden. Die Nützlichkeit dieser Beziehung für fotometrische Messungen ergibt sich daraus, dass das menschliche Auge nicht in der Lage ist, Helligkeitswerte zu speichern bzw. Absolutwerte zu bestimmen und demzufolge nur Helligkeitsvergleiche vornehmen kann.

Bei senkrechtem Einfall des Lichtes ( $\varphi_2 = 0$ ) gilt

$$E_v = \frac{I_v}{r^2} \quad . \quad (13)$$

Für das Verhältnis der Beleuchtungsstärken  $E_{v1}$  und  $E_{v2}$  zweier in den Abständen  $r_1$  und  $r_2$  von der Lichtquelle befindlichen Flächen ergibt sich damit

$$\frac{E_{v1}}{E_{v2}} = \frac{I_v}{r_1^2} : \frac{I_v}{r_2^2} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \quad . \quad (14)$$

Die Beleuchtungsstärke, die eine Lichtquelle bei senkrechtem Einfall der Strahlen auf zwei verschieden weit entfernten Flächen hervorruft, verhalten sich also umgekehrt wie die Quadrate der Abstände von der punktförmigen Lichtquelle.

Um die Lichtstärke zweier Lichtquellen miteinander vergleichen zu können, wählt man die Abstände beider Lichtquellen von der beleuchteten Fläche so, dass von beiden die gleiche Beleuchtungsstärke  $E_{v1} = E_{v2}$  hervorgerufen wird (Gleichheitsverfahren). Mit Hilfe der Gl. (13) wird daraus

$$\frac{I_{v1}}{r_1^2} = \frac{I_{v2}}{r_2^2} \quad \text{bzw.} \quad \frac{I_{v1}}{I_{v2}} = \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^2 \quad . \quad (15)$$

Damit läßt sich bei bekannter Lichtstärke  $I_{v2}$  z. B. einer Normallichtquelle, die Lichtstärke  $I_{v1}$  einer unbekanntenen Lichtquelle ermitteln. Neben dem Gleichheitsverfahren wird in der Fotometrie das Ausschlagsverfahren verwendet.

Bei diesem werden die beiden zu vergleichenden Lichtquellen nacheinander im gleichen Abstand vom Empfänger aufgestellt. Aus Gl. (13) ergibt sich dann

$$I_{v1} = I_{v2} \frac{E_1}{E_2} \quad . \quad (16)$$

### 2.3.2 LAMBERT'sches Cosinusgesetz

Die Leuchtdichte ist abhängig von den Eigenschaften des Strahlers, z. B. von dem Werkstoff, der Oberflächenbeschaffenheit oder dessen Temperatur. Für eine Vielzahl von Strahlern gilt in guter Näherung, dass die Leuchtdichte  $L_v$  unter verschiedenen Abstrahlwinkeln  $\varphi_1$  konstant ist. Strahlungsquellen mit einer derartigen Eigenschaft werden LAMBERT-Strahler genannt. Für sie gilt das LAMBERT'sche Cosinusgesetz

$$I(\varphi_1) = I(0) \cos \varphi_1 .$$

Aus der Tatsache, dass Sonne und Mond über die ganze gekrümmte Oberfläche gleichmäßig hell leuchten, folgt, dass auch diese Körper LAMBERT'sche Strahler sind.

## 3. Versuchsdurchführung

### 3.1 Ermittlung des optischen Wirkungsgrades einer Glühlampe

Mit Hilfe eines Regeltransformators wird die Lampenspannung einer 6V-Halogenlampe zwischen 1 und 6 V in Schritten von 0,5 V eingestellt und der dazugehörige Strom  $i$  gemessen. Beachten Sie beim Einschalten der Spannungsquelle, dass die Ausgangsspannung des Stelltransformators auf Null steht.

Für jede der sich daraus ergebenden elektrischen Leistungen  $N$  wird die Beleuchtungsstärke  $E_v$  nach der objektiven Methode durch ein mit dem Beleuchtungsstärke-Messgerät verbundenen Selen-Fotoelement gemessen und mit Hilfe der Gl. (13) die Lichtstärke  $I_v$ , sowie nach Gl. (11) der optische Wirkungsgrad berechnet. Stellen Sie den optischen Wirkungsgrad der Glühlampe als Funktion der elektrischen Leistung grafisch dar. Bei der Messung ist darauf zu achten, dass die Empfängerfläche des Selen-Fotoelements senkrecht zur vorrangigen Ausbreitungsrichtung des Lichtes liegt ( $\varphi_2=0$ ) und die gesamte lichtempfindliche Fläche vollständig ausgeleuchtet wird. Außerdem sollen sich Empfängerfläche und die Halogenlampe in gleicher Höhe befinden. Dies läßt sich am maximalen Ausschlag des Beleuchtungsstärke-Messgerätes nachweisen. Das Fotoelement wird an die

Vielfachbuchse des Beleuchtungsstärke-Messgerätes angeschlossen.

Das Beleuchtungsstärke-Messgerät sowie das Selen-Fotoelement bewerten das Licht nach der spektralen Empfindlichkeitskurve des helladaptierten Auges. Die Lichtauffangfläche des Selen-Fotoelementes hat einen Durchmesser von 40 mm. Der Umschalter am Gehäuse des Selen-Fotoelementes dient der Zuordnung des Fotoelementes zu dem jeweiligen Messbereich des Wechselskalen-Messinstrumentes.

3.2 Wiederholen Sie die unter 3.1 ausgeführten Messungen mit einer 6V-Glühlampe. Vergleichen und bewerten Sie die Ergebnisse.

3.3 Messen Sie die Abhängigkeit der durch eine Halogenlampe erzeugten Beleuchtungsstärke von der Entfernung  $r$  zwischen Lichtquelle und lichtelektrischem Empfänger (Fotoelement), und stellen Sie die gewonnene Abhängigkeit auf doppeltlogarithmischem Koordinatenpapier grafisch dar. Vergleichen Sie die erhaltene Kurve mit der theoretischen zu erwartenden.

3.4 Zur Bestimmung der Lichtstärke verwenden wir als Lichtquelle eine von der Rückseite mit einer Halogenlampe beleuchteten Mattglasscheibe, die sich in einer senkrecht zur Winkelskala gedachten Ebene durch deren Mittelpunkt befindet. Diese Winkelskala läßt sich relativ zu dem auf einer festen optischen Bank befindlichen Fotoelement als Empfänger drehen. Der Winkel  $\varphi$  zwischen der Strahlungsrichtung und der Normalen der beleuchteten Mattglasscheibe wird zwischen  $0^\circ$  und  $90^\circ$  in Schritten von  $5^\circ$  verändert. Die Beleuchtungsstärke wird als Funktion des Winkels  $\varphi$  gemessen und auf Polarkoordinatenpapier aufgetragen. Bewerten Sie aus dieser Darstellung inwieweit die benutzte Lichtquelle einem LAMBERT-Strahler entspricht. Wiederholen Sie diese Messungen, indem Sie an Stelle der Halogenlampe eine 6V-Glühlampe verwenden. Vergleichen Sie die Messergebnisse und beurteilen Sie, welche der beiden Lichtquellen dem LAMBERT-Strahler am nächsten kommt.

5.5 Kalibrieren Sie eine Thermosäule für die Messung der Beleuchtungsstärke. Bei der verwendeten Thermosäule befinden sich in einem Metallgehäuse hinter einer geschwärzten Scheibe die Messlötstellen von 16 in Reihe geschalteten Thermoelementen. Die in die Thermosäule einfallende Strahlung trifft zum Teil nach Ablenkung durch einen polierten Metalltrichter auf die geschwärzte Scheibe, die in direktem Wärmekontakt mit den Messlötstellen steht. Die Vergleichsmessstelle befindet sich auf der Temperatur des Gehäuses, d. h. auf Raumtemperatur. Wegen der Wärmekapazität der geschwärzten Scheibe stellt sich Wärmegleichgewicht erst nach einigen Sekunden ein. Die Thermospannung wird mit Hilfe eines Messgerätes MV 40 gemessen. Die Kalibrierkurve einer Thermosäule gibt die Abhängigkeit der Thermospannung von der Beleuchtungsstärke wieder. Die Variation der Beleuchtungsstärke wird durch Verändern des Abstandes der Thermosäule von der Lichtquelle (6V-Halogenlampe) erreicht. Die für die verschiedenen Abstände gemessenen Thermospannungen werden mit Hilfe der aus der Aufgabe 3.3. erhaltenen Kurve den entsprechenden Beleuchtungsstärken zugeordnet.

#### 4. Kontrollfragen

- 4.1 Welche Gestalt hat die auf Polarkoordinatenpapier dargestellte Lichtverteilungskurve eines idealen LAMBERT-Strahlers?
- 4.2 Beschreiben Sie Aufbau und Wirkungsweise eines Fotoelementes.
- 4.3 Beschreiben Sie Aufbau und Wirkprinzip verschiedener in der visuellen Photometrie eingesetzten Photometer.
- 4.4 Wie könnte man verfahren, um die Beleuchtungsstärke zu berechnen, die eine sehr lange Leuchtstoffröhre im Abstand  $x$  erzeugt?