

Optisches Praktikum, Aufgabe 13:

**Diaprojektion**

**1. Ziel der Aufgabe**

- Einführung in das Thema *Verkettete Strahlengänge*
- Umgang mit lichttechnischen Größen

**2. Grundlagen**

2.1 Strahlengang

Der Strahlengang eines Diaprojektors setzt sich aus zwei miteinander verketteten Strahlengängen zusammen:

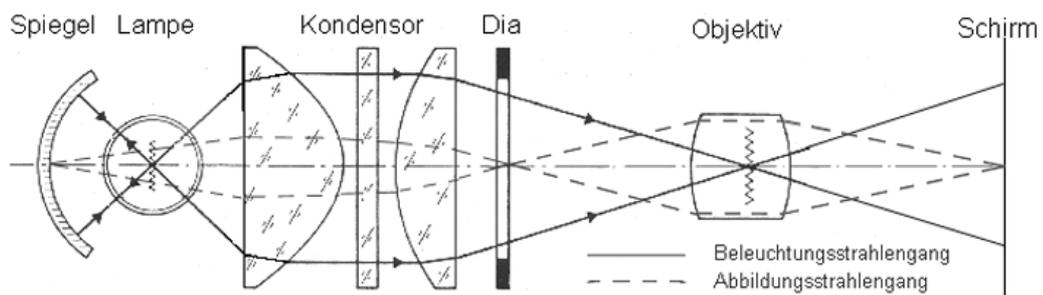


Bild 1: Strahlengänge des Diaprojektors (nach Köhler verkettet)

Der Beleuchtungsstrahlengang hat die gleichmäßige Ausleuchtung des Objekts (Dia) zur Aufgabe.

Der Abbildungsstrahlengang hat die Abbildung des Objekts auf den Schirm zur Aufgabe.

Beide Strahlengänge müssen miteinander verknüpft werden, so daß ein verketteter Strahlengang entsteht. Um die Verknüpfung zu verstehen, müssen die Blenden (Gesichtsfeld- und Aperturblende) und deren Bilder betrachtet werden.

In einem optischen System aus mehreren Linsen und Blenden gibt es unter den Linsen- und Blendenberandungen eine - die sogenannte *Aperturblende* - deren durch alle vorangehenden Linsen im Objektraum entworfenes Bild vom Objekt gesehen unter dem kleinsten Winkel erscheint. Dieses bezeichnet man als die *Eintrittspupille* (EP) des optischen Systems. Ihre Fläche ist für den vom optischen System übertragbaren Lichtstrom entscheidend (vgl. 2.2 und 2.3). Das entsprechende Bild der Aperturblende im Bildraum heißt *Austrittspupille* (AP).

Diejenige körperliche Blende oder Linsenberandung, die begrenzend auf die Hauptstrahlneigung wirkt und damit den Feldwinkel bestimmt, bezeichnet man als *Gesichtsfeldblende*. Das objektseitige Bild dieser Blende nennt man *Eintrittsluke* (EL), das bildseitige *Austrittsluke* (AL).

Bild 1 zeigt die Strahlengänge des Diaprojektors in vereinfachter Form. Der Beleuchtungsstrahlengang ist in der von Köhler angegebenen Weise mit dem Abbildungsstrahlengang verkettet. Bei der Verkettung nach Köhler legt man die Objektebene in die Nähe des Kondensors („Lichtsammlers“), wodurch eine gleichmäßige Ausleuchtung des Dias erreichbar ist und die Abbildung der Lichtquellenstruktur auf den Bildschirm vermieden wird. Zudem wählt man die Abbildung der Lichtquelle durch den Kondensor so, daß das Bild der Lichtquelle im Objektiv liegt. Dabei ist darauf zu achten, daß das Bild der Lichtquelle nicht durch das Objektiv beschnitten wird (Reduktion des Lichtstroms) - somit stellt die Lichtquelle die Aperturblende dar.

Das Dia wird vom Objektiv auf den Schirm abgebildet, dabei wirkt der Rand des Dias als Gesichtsfeldblende.

## 2.2 Meßgrößen des Lichts

Man unterscheidet lichttechnische (fotometrische) und strahlungsphysikalische Größen. Die lichttechnischen Größen gehen aus den strahlungsphysikalischen Größen durch Gewichtung mit der spektralen Hellempfindlichkeitskurve  $V(\lambda)$  des menschlichen Auges hervor, d.h. die lichttechnischen Größen sind auf den visuellen Eindruck bezogen.

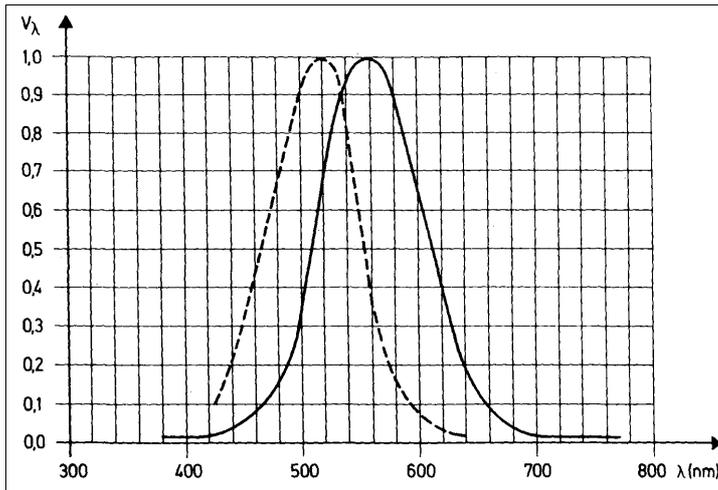


Bild 2: Die international festgelegte relative spektrale Hellempfindlichkeitskurve für das Tagessehen (durchgezogene Kurve) und für das Dämmerungssehen (gestrichelte Kurve) [ DIN 5031 Teil 3]

Zur Betrachtung der Diaprojektion werden daher die lichttechnischen Größen verwendet.

Vier lichttechnische Größen sind dabei von Bedeutung:

Größe	Formelzeichen	Einheit
Lichtstrom	$f$	$lm = cd \cdot sr$
Beleuchtungsstärke (Lichtstrom pro Flächeneinheit)	$E$	$lx = cd \cdot sr / m^2$
Lichtstärke (Lichtstrom pro Raumwinkel)	$I$	$cd$
Leuchtdichte (Lichtstrom pro Raumwinkel und Flächeneinheit)	$L$	$cd / m^2$

Sowie die geometrischen Größen:

Größe	Formelzeichen	Einheit
Fläche des Strahlers	$A_1$	$m^2$
Fläche des Empfängers	$A_2$	$m^2$
Abstand Strahler - Empfänger	$r$	$m$

Die Leuchtdichte beschreibt den visuellen Eindruck einer flächenhaften Lichtquelle. Definiert ist die Leuchtdichte über die Strahlung des schwarzen Körpers bei der Temperatur des erstarrten Platins bei 2045 K mit einer Leuchtdichte von 60 cd/m<sup>2</sup>.

Für die Beleuchtungsstärke, die Lichtstärke und die Leuchtdichte gelten nach DIN 5031, Teil 3 im Falle einer isotropen Lichtquelle die vereinfachten Beziehungen:

$$E = \frac{\Phi}{A}, I = \frac{\Phi}{\Omega} \text{ und } L = \frac{\Phi}{A\Omega}.$$

### 2.3 Das Fotometrische Grundgesetz

Das Fotometrische Grundgesetz gibt den Zusammenhang zwischen der Geometrie strahlender Flächen und ihrem wechselseitigen Strahlungsaustausch an.

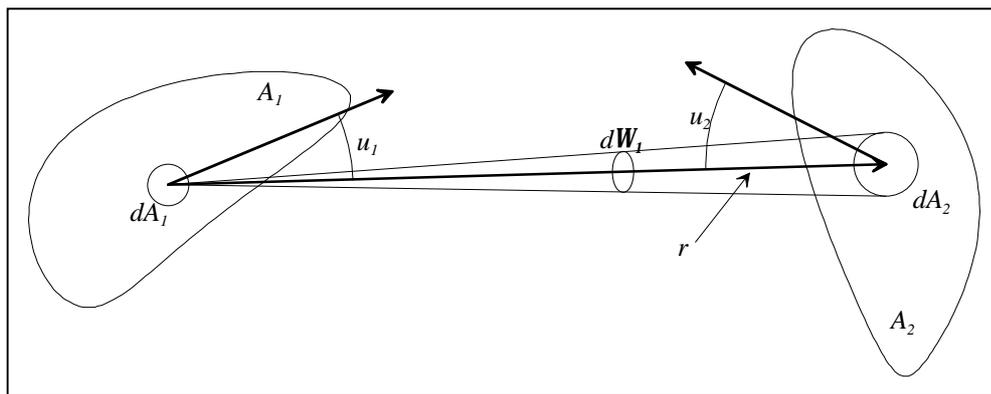


Bild 3: Zur Erläuterung des Fotometrischen Grundgesetzes

Der von A<sub>1</sub> (Strahler) nach A<sub>2</sub> (Empfänger) übertragene Lichtstrom (vgl. Vorlesung) ist wie folgt zu berechnen:

$$\Phi = \int \int_{A_1 \Omega_1} L dA_1 \cos u_1 d\Omega_1$$

Für den Fall, daß L weder von A<sub>1</sub> noch von Ω<sub>1</sub> abhängt (Lambert-Strahler, L=const.) und die Flächen einander parallel gegenüberstehen (cos u<sub>1</sub> = cos u<sub>2</sub> = 1) gilt:

$$\Phi = L \int \int_{A_1 \Omega_1} dA_1 d\Omega_1 = L \cdot A_1 \cdot \Omega_1$$

Berücksichtigt man die Beziehungen zwischen den Raumwinkeln und den Flächen

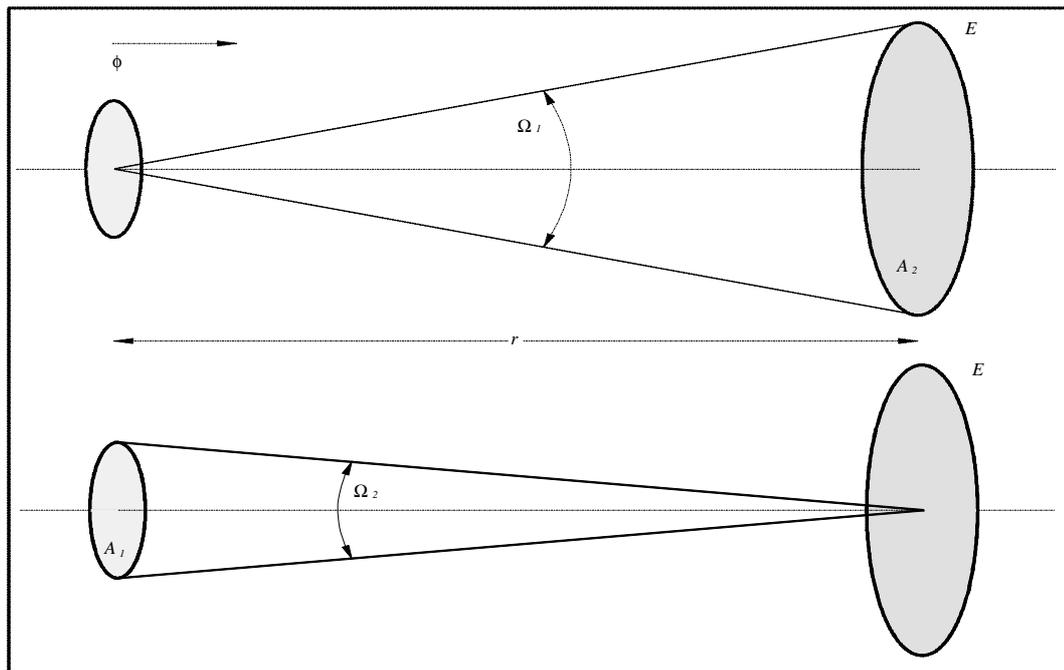


Bild 4: Zur Erläuterung des Raumwinkels

$$\Omega_1 = \frac{A_2}{r^2} \quad \text{und} \quad \Omega_2 = \frac{A_1}{r^2}$$

folgen verschiedene Lesarten des Fotometrischen Grundgesetzes:

$$\Phi = L \cdot A_1 \cdot \Omega_1 = L \cdot \frac{A_1 A_2}{r^2} = L \cdot A_2 \cdot \Omega_2 \quad (*)$$

Insbesondere wird der Ausdruck  $\Lambda = \frac{n^2 A_1 A_2}{r^2}$  als Lichtleitwert eines optischen

Systems bezeichnet (in Luft  $n=1$ ), wenn  $A_1$  die Fläche der Eintritts- bzw. Austrittsluke  $A_L$  und  $A_2$  die Fläche der zugehörigen Pupille  $A_P$  ist.

Der Lichtleitwert ist eine Invariante des Systems.

Es gilt

$$\Phi = L \cdot \Lambda$$

Der Lichtleitwert ist ein Maß für den von einem optischen Gerät übertragbaren Lichtstrom.

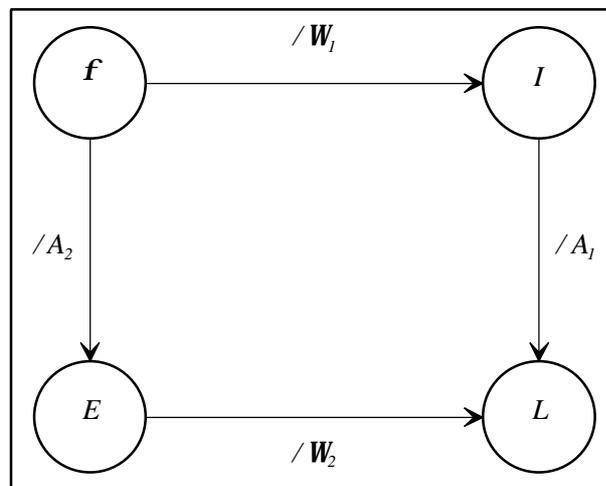
Löst man (\*) nach L auf, ergibt sich

$$L = \frac{\Phi}{A_1 \Omega_1} = \frac{I}{A_2}$$

bzw.

$$L = \frac{\Phi}{A_2 \Omega_2} = \frac{E}{\Omega_2}$$

Die nachfolgende Skizze verdeutlicht diese Zusammenhänge zwischen den Lichttechnischen Größen:



Ein weiterer Sonderfall ist der eines Punktstrahlers ( $A_1 \rightarrow 0$ ), der axial ( $\cos u_2 = 1$ ) im Abstand  $r$  vor einer Fläche  $A_2$  angeordnet ist.

$$\Phi = \int_{A_1 \Omega_1} \int \frac{d^2 \Phi \cdot r^2}{dA_2 \cos u_2} d\Omega_1 = \int_{A_1 \Omega_1} E d\Phi r^2 d\Omega_1$$

$$\Phi = E \cdot r^2 \cdot \Omega_1 \quad \text{bzw.}$$

$$E = \frac{\Phi}{\Omega_1 r^2}$$

Fotometrisches Entfernungsgesetz

### 3. Aufgaben

#### 3.1 Vorbereitung

Benennen der Blenden und Einzeichnen von deren Bildern in die Strahlengang-skizze des Diaprojektors.

#### 3.2 Aufbau des Diaprojektors

Aufbau des verketteten Strahlenganges nach Köhler

- Das Lampenbild muß in das Projektionsobjektiv abgebildet werden. Eine kleine Lochblende in der Diabühne ist dabei hilfreich. (Warum?)  
Vor Einbau des Objektivs sollte die Fläche des Lampenbildes gemessen werden, durch Abbildung auf ein Blatt Papier an Stelle des Objektivs.

- Justierung der Hohlspiegels und der Verschiebeschlitten im Lampengehäuse für eine gleichmäßige Ausleuchtung. (Die Wendel und ihr Spiegelbild bilden ein Quadrat)
- Abbildung der Lochblende auf den Schirm.

Hinweis:

Zur Justierung ist die Projektionslampe am besten an 3V anzuschließen, damit das Gehäuse nicht so schnell heiß wird. Für die Messungen hingegen ist die Lampe mit 12 V zu betreiben.

### 3.3 Überprüfung des Fotometrischen Entfernungsgesetzes

Dazu wird die Beleuchtungsstärke in 10 verschiedenen Entfernungen gemessen, ab ca. 50 cm Entfernung vom Objektiv, in Schritten von je 10 cm. Es ist darauf zu achten, daß der Fotoempfänger immer vollständig ausgeleuchtet ist.

**Achtung:** Es muß die Lochblende auf das Objektiv gesetzt werden! (Warum?)

Ausfüllen folgender Tabelle:

$r$ [cm]	$E$ [lx]	$r^2$ [cm <sup>2</sup> ]	$1/r^2$ [1/cm <sup>2</sup> ]	$E \cdot r^2$ [lx cm <sup>2</sup> ]
50				
60				
70				
80				
90				
100				
110				
120				
130				
140				
150				

3.4 Erneute Messung der Beleuchtungsstärke für 150, 300 und 400 cm Entfernung, jedoch bei voller Objektivöffnung. Es ist darauf zu achten, daß der Fotoempfänger immer vollständig ausgeleuchtet ist.

Ausfüllen folgender Tabelle:

$r$ [cm]	$E$ [lx]	$r^2$ [cm <sup>2</sup> ]	$1/r^2$ [1/cm <sup>2</sup> ]	$E \cdot r^2$ [lx cm <sup>2</sup> ]
150				
300				
400				

3.5 Messung der Leuchtdichte des Lampenbildes mit Hilfe des Leuchtdichtevorsatzes (graues Rohr) für den Beleuchtungsstärkemesser (Lux-Meter). Der Leuchtdichtevorsatz bestimmt als Distanzstück zusammen mit der Detektorfläche den Raumwinkel so, daß der Beleuchtungsstärkemesser als Leuchtdichtemesser verwendet werden kann.

Der Vollausschlag des Lux-Meters im Meßbereich  $6000 \text{ lx}$  entspricht dabei einer Leuchtdichte von  $3000 \text{ cd/cm}^2$ .

Für die Messung muß wiederum die Lochblende auf das Objektiv gesetzt werden.

### 3.6 Berechnungen

- Berechnung der Tabelle aus Teil 3.3.

Zeichnen des Diagramms (auf Millimeterpapier) für

$$E = f\left(\frac{1}{r^2}\right)$$

- Aus der Beleuchtungsstärke für  $r = 150 \text{ cm}$  ist die Leuchtdichte des Lampenbildes zu berechnen. Das Ergebnis bitte mit dem gemessenen Wert vergleichen und den Unterschied deuten.
- Das Verhältnis der beiden Meßwerte der Beleuchtungsstärke bei  $150 \text{ cm}$  läßt auf die effektive Lampenfläche schließen. Diese ist mit der anfangs gemessenen zu vergleichen.
- Berechnung der Tabelle aus Teil 3.4.

Zeichnen des Diagramms (auf Millimeterpapier) für

$$E = f\left(\frac{1}{r^2}\right)$$

- Was läßt sich aus dem Vergleich der Diagramme Teil 3.3 und 3.4 ableiten?

---

### 3.7 Zusätzliche Aufgaben

- Wozu dient der Hohlspiegel im Beleuchtungsstrahlengang?
- Es ist der Lichtleitwert der Anordnung zu bestimmen. In welchem Raum kann das erfolgen?
- Ein Diaprojektor mit  $f_{\text{Objektiv}}=150$  mm,  $f_{\text{Kondensor}}=50$  mm,  $d_{\text{Lichtquelle}}=10$  mm bildet ein 24 X 36 mm großes Dia auf einen 3 m entfernten Schirm ab. Welche Blendenzahl sollte das Objektiv haben?
- Wäre es sinnvoll, im Versuch ein Projektionsobjektiv größerer Öffnung zu wählen?
- Wie berechnet sich die Länge des Leuchtdichtevorsatzes aus der Detektorfläche und den Angaben in 3.5?

---

### Literatur

1. J. Flügge: **Leitfaden der geometrischen Optik und des Optikrechnens**  
Vanderhoek & Ruprecht, Göttingen 1956, Abschnitt 1.3
2. O. Reeb: **Grundlagen der Photometrie**  
G. Braun Verlag, Karlsruhe 1962
3. H. Slevogt: **Technische Optik**  
Sammlung Göschen, Bd. 9002  
Walter de Gruyter, Berlin 1974, § 38
4. DIN 1301: **Teil 1 (Einheiten)**  
Beuth, Berlin 1985
5. DIN 5031: **Teil 3 (Größen, Formelzeichen und Einheiten der Lichttechnik) und Teil 8 (Strahlungsphysikalische Begriffe und Konstanten)**  
Beuth, Berlin 1982