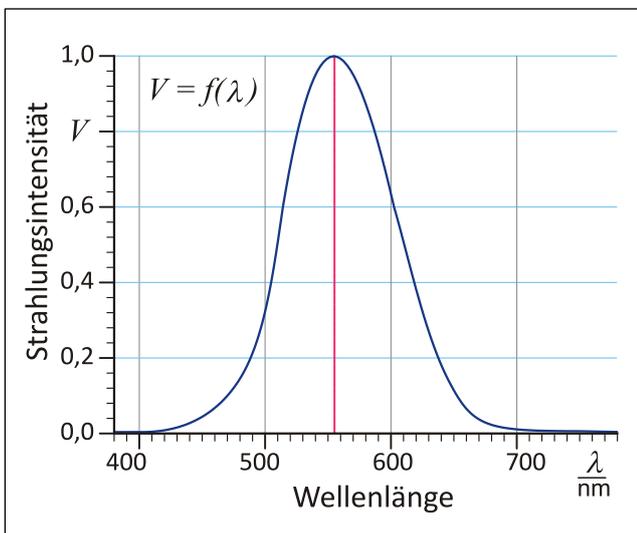


Photometrische Größen und Einheiten werden in diesem Versuch kennengelernt und ihre Abhängigkeit von verschiedenen Parametern bestimmt.

1. Theoretische Grundlagen

1.1 Größen und Einheiten der Strahlungs- und Lichttechnik

Die von einer Lichtquelle ausgehende Strahlung stellt einen Energiestrom dar. Die Strahlungsenergie lässt sich daher in Wattsekunden (Ws), die Strahlungsleistung in Watt (W) messen. Diese energetische Betrachtungsweise ist aber nicht mehr brauchbar, wenn die Strahlung visuell bewertet werden soll. Von zwei nebeneinander befindlichen farbigen Lichtquellen, die beide die Strahlungsleistung 1 W ausstrahlen, empfindet das Auge, wie **Bild 1** zeigt, die gelbgrüne weit heller als die dunkelrote. Es wurden daher eigene photometrische Größen und Einheiten festgelegt.



Spektralfarben:

Violett	(380...400...450)nm
Blau	(450...470...510)nm
Grün	(510...525...560)nm
Gelb	(560...585...600)nm
Orange	(600...620...630)nm
Rot	(630...670...780)nm

Bild 1: Spektraler Hellempfindlichkeitsgrad für Tagessehen und ein 2-Grad-Gesichtsfeld

1.1.1 Strahlungsleistung Φ_e und Lichtstrom Φ_v

Die Strahlungsleistung Φ_e , auch Strahlungsfluss genannt, wird wie jede physikalische Leistung in Watt (W) gemessen.

Für die mit dem Auge bewertete Strahlungsleistung, das ist der Lichtstrom Φ_v , legte der Normenausschuss CGPM im Anschluss an historische Standards folgende Einheit fest: Im Maximum der Augempfindlichkeit, bei der Wellenlänge 555 nm (*grün*) entspricht die Strahlungsleistung 1 W einem Lichtstrom von 683 Lumen (lm). Die Größe $K_m = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ heißt Maximalwert des photometrischen Strahlungsäquivalents für Tagessehen. Bei von 555 nm abweichenden Wellenlängen gilt:

$$\Phi_v = K_m \cdot V(\lambda) \cdot \Phi_e \quad [\Phi_v] = \text{lm} \quad (1)$$

$V(\lambda)$: spektraler Hellempfindlichkeitsgrad nach **Bild 1**

Aus **Bild 1** kann entnommen werden, dass bei einer Wellenlänge von 600 nm (*Orange*) und einer Strahlungsleistung von 1 Watt nach Gleichung $K_m \cdot V(\lambda) \cdot \Phi_e = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1} \cdot 0,63 \cdot 1 \text{ W} = 430 \text{ lm}$ entsprechen. Erstreckt sich Φ_e über einen breiten Wellenlängenbereich, so lässt sich Φ_v nur durch Integration über die Wellenlänge ermitteln.

Tabelle 1 zeigt einen Überblick über Aufnahmeleistung P , den Lichtstrom Φ_v und Lichtausbeute oder optischen Wirkungsgrad $\eta_v = \Phi_v/P$ einiger Lampentypen. Der theoret. Maximalwert $683 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$ wird von keiner Lichtquelle auch nur angenähert erreicht. Dies wäre eine Lampe, die nur bei der Wellenlänge 555 nm emittiert.

Lampentypen	Aufnahmeleistung P / W	Lichtstrom Φ_v / lm	Lichtausbeute $\eta_v / \text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$
Glühlampe 230V	15	120	8
	60	730	12
	100	1380	14
Halogenlampe 12V	50	1400	28
Standardleuchtstofflampe weiß	40	3200	80
	65	5100	78
Dreibandenleuchtstofflampe warmton	36	3450	96
Gasglühlicht	140	200	1,4
Bogenlampe 230V	5000	40000	8
Natriumhochdrucklampe	1065	130000	122
Quecksilberdampf-Hochdrucklampe	1040	57000	55
Metallhalogen-Hochdrucklampe	1050	90000	86

Tabelle 1: Kenndaten einiger Lampentypen

1.1.2 Strahlstärke I_e und Lichtstärke I_v

Eine Lichtquelle sendet ihren Lichtstrom meist nicht gleichmäßig nach allen Richtungen aus. Die Form des Leuchtkörpers, seine Halterung und Fassung, die Ummantelung mit Schirmen und Reflektoren bewirken, dass die Ausstrahlung nach manchen Richtungen stärker, nach anderen schwächer erfolgt. Man hat deshalb für die von der Richtung abhängige Intensität die Größen Strahlstärke und Lichtstärke eingeführt. Zur Festlegung dieser Größen ist die Definition des Raumwinkels notwendig.

Den Raumwinkel kann man als kegelförmigen Ausschnitt aus einer Kugel mit der Lichtquelle Q an der Kegelspitze im Kugelmittelpunkt darstellen (**Bild 2**). Der Kegel kann beliebige eine Gestalt haben. Der Kreiskegel ist daher nur ein Sonderfall. Bei den folgenden Betrachtungen werden die auf die Lichtquelle bezogenen Größen mit dem *Index 1*, die auf die beleuchtete Fläche bezogenen Größen mit dem *Index 2* versehen.

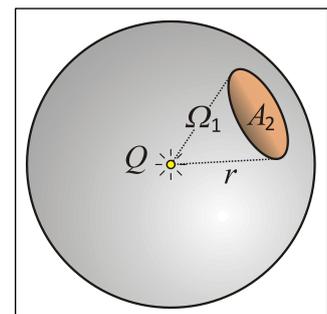


Bild 2: Kegel zur Definition des Raumwinkels

Der Raumwinkel ist definiert durch die Beziehung

$$\Omega_1 = \Omega_0 \cdot \frac{A_2}{r^2} \quad (2)$$

Der Raumwinkel wächst demnach mit der Fläche, welche der Kegel aus der Kugel ausscheidet. Ω_0 ist die Einheit des Raumwinkels $1 \text{ m}^2/1 \text{ m}^2 = 1 \text{ sr}$ (*Steradian*), also ist Ω_0 physikalisch dimensionslos und die Einheit wird oft weggelassen. Der Gesamttraum hat nach obiger Gleichung den Raumwinkel

$$\Omega_0 \cdot \frac{A_2}{r^2} = \frac{4\pi \cdot r^2}{r^2} \cdot \text{sr} = 4\pi \cdot \text{sr}.$$

In der Praxis ist eine beleuchtete ebene Fläche weit häufiger als eine Kugelkalotte. Für ein sehr kleines ebenes Flächenelement dA_2 , dessen Normale gegenüber der optischen Achse um den Winkel ε_2 geneigt ist, liefert **Bild 3** die Beziehung

$$d\Omega_1 = \frac{dA_2^*}{r^2} \cdot \Omega_0 = \frac{dA_2 \cdot \cos \varepsilon_2}{r^2} \cdot \Omega_0 \quad (3)$$

Mit einer Abweichung $< 2\%$ lässt sich diese Formel auch auf endliche Flächen übertragen, deren Abstand von der Quelle größer ist als das Zehnfache der Flächendiagonale.

Die **Strahlstärke** I_e ist definiert als emittierte Strahlungsleistung pro Raumwinkel:

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega_1} \quad [I_e] = \text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$$

Für die analoge photometrische Größe, die **Lichtstärke** I_v , gilt:

$$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega_1} \quad [I_v] = \text{lm} \cdot \text{sr}^{-1} = \text{cd (Candela)}.$$

Während Φ die gesamte von einer Quelle abgegebene Leistung charakterisiert, informiert I über die Leistung in einem Raumwinkelelement. Bedeckt man die obere Hälfte einer allseitig gleichmäßig strahlenden Kugellampe mit stark absorbierendem schwarzen Lack, so wird die Hälfte des Lichtstroms zurückgehalten, Φ_v sinkt auf den halben Wert. Die Lichtstärke I_v dagegen bleibt in der unteren Hälfte gleich und sinkt in der oberen auf Null. Entsprechend der Definition $I = d\Phi/d\Omega$ sind Strahlstärke und Lichtstärke bei gerichteten Quellen besonders groß. Während eine 60 W-Haushaltglühlampe nach allen Richtungen eine etwa gleiche Lichtstärke von 60 cd besitzt, bringt es das nahezu parallele Lichtbündel eines 5 mW-Helium-Neon-Lasers auf beachtliche $3 \cdot 10^5$ cd.

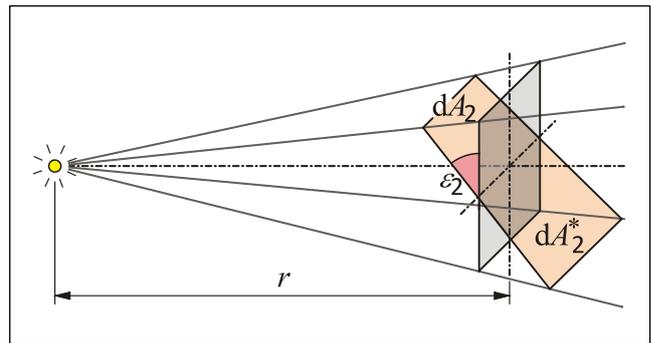


Bild 3: Von einem ebenen Flächenelement erfasster Raumwinkel

In einem nicht absorbierenden Medium ist die Strahlstärke (**Lichtstärke**) unabhängig von der Entfernung von der Strahlungsquelle. Aus der räumlichen Strahlstärkeverteilung (**Lichtstärkeverteilung**) einer Quelle lassen sich mit Gleichung (3) Strahlungsleistung bzw. Lichtstrom berechnen:

$$d\Phi = I \cdot d\Omega = I \cdot \frac{dA_2 \cdot \cos \varepsilon_2}{r^2} \cdot \Omega_0 \quad (4)$$

$$\Phi = \iint_{A_2} \frac{I \cdot \cos \varepsilon_2}{r^2} dA_2 \cdot \Omega_0 \quad (5)$$

1.1.3 Bestrahlungsstärke E_e und Beleuchtungsstärke E_v

Die Bestrahlungsstärke E_e gibt an, wie intensiv eine Fläche A_2 von der Quelle bestrahlt wird. Sie ist wie folgt definiert:

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA_2} \quad [E_e] = \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Die entsprechende photometrische Größe heißt Beleuchtungsstärke E_v :

$$E_v = \frac{d\Phi_v}{dA_2} \quad [E_v] = \text{lm} \cdot \text{m}^{-2} = \text{lx (Lux)}.$$

Mit der Definition $I = d\Phi/d\Omega_1$ und der Gleichung (3) lassen sich die Beziehungen für die Bestrahlungs- und Beleuchtungsstärke in das **photometrische Entfernungsgesetz** umformen:

$$E_{e,v} = \frac{d\Phi_{e,v}}{dA_2} = \frac{I_{e,v} \cdot d\Omega_1}{dA_2} = \frac{I_{e,v} \cdot \cos \varepsilon_2 \cdot dA_2 \cdot \Omega_0}{dA_2 \cdot r^2} = \frac{I_{e,v}}{r^2} \cdot \cos \varepsilon_2 \cdot \Omega_0 \quad (6)$$

Da der Lichtstrom I unabhängig von der Entfernung r zwischen Quelle und beleuchteter Fläche ist, nimmt E bei einer punktförmigen Quelle mit dem Quadrat der Entfernung ab.

1.1.4 Strahldichte L_e und Leuchtdichte L_v

Die in bestimmte Richtung ausgesandte Strahlstärke einer Quelle oder einer bestrahlten Fläche setzt sich aus allen Beiträgen zusammen, die von den strahlenden Flächenelementen ausgehen. Die einzelnen Flächenelemente strahlen im Allgemeinen nicht gleichmäßig, sondern mit verschiedenen **Strahldichten**.

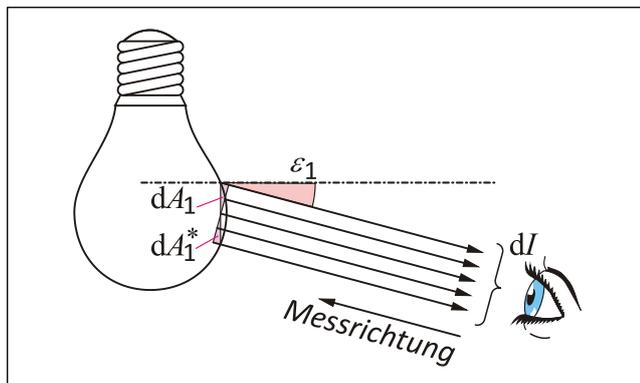


Bild 4: Strahldichte und Leuchtdichte eines Flächenelements

Der Quotient aus dem Strahlstärkebeitrag dI_e eines Flächenelementes dA_1 und seiner Projektionsfläche $dA_1^* = dA_1 \cdot \cos \varepsilon_1$ in Beobachtungsrichtung (**Bild 4**) ist dafür ein Maß.

$$L_e = \frac{dI_e}{dA_1 \cdot \cos \varepsilon_1} \quad [L_e] = \text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$$

Die entsprechende photometrische Größe heißt **Leuchtdichte L_v** :

$$L_v = \frac{dI_v}{dA_1 \cdot \cos \varepsilon_1} \quad [L_{ev}] = \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$$

Strahldichte und Leuchtdichte hängen normalerweise von der Messrichtung ab. Eine Ausnahme macht der „**Lambertstrahler**“.

Bei ihm gilt die Beziehung $I = I_0 \cdot \cos \varepsilon_1$, wobei I_0 die Strahlstärke (**Lichtstärke**) auf der optischen Achse senkrecht zur strahlenden Fläche ist. Beim Lambertstrahler wird

$$L = \frac{dI}{dA_1 \cdot \cos \varepsilon_1} = \frac{dI}{dA_1} = \text{konst.}$$

Strahldichte und Leuchtdichte sind unabhängig von der Beobachtungsrichtung:

$$I = I_0 \cdot \cos \varepsilon_1 \quad L(\varepsilon_1) = \text{konst.} \quad (7)$$

Lambertstrahler werden gut durch eine von hinten beleuchtete Mattscheibe oder eine gleichmäßig bestrahlte matte Oberfläche realisiert. Für eine nichtselbstleuchtende, matte Fläche mit dem Reflexionsgrad ρ gilt bei Bestrahlung (**Beleuchtung**) mit E nach Lambert:

$$L = \frac{\rho \cdot E}{\pi \cdot \Omega_0} \quad (8)$$

Lichtquellen	Leuchtdichte/cd·m ⁻²
Nachthimmel	10 ⁻⁷
Graue Wolken	0,1
Blauer Himmel	0,3
Weißer Wolken	1
Vollmond	0,25
Sonne	150.000
Glimmlampe	0,02 ... 0,1
Leuchtstofflampe	0,3 ... 0,7
Glühfaden im Klarglaskolben	300 ... 3.000
Glühlampe mit mattiertem Kolben	3...30
Bogenlampenkrater	18.000
Quecksilber-Höchstdrucklampen	60.000

Tabelle 2: Ausgewählte Leuchtdichten

In der optischen Praxis kommen alle Formen der Winkelverteilung der Strahldichte (*Leuchtdichte*) von der Kugelverteilung einer frei hängenden Glühlampe bis zur schlanken Keule einer Leuchtdiode mit Kugellinse vor. Die häufigste Charakteristik ist jedoch die des Lambertstrahlers. Aus diesem Grund wird, wenn nicht anders angegeben, immer der Lambertstrahler vorausgesetzt.

Die **Tabelle 2** informiert über Leuchtdichten typischer selbst- bzw. fremdbeleuchteter Lichtquellen.

1.2 Abhängigkeit Temperatur - Lichtstärke

Die Abhängigkeit der Lichtstärke von der Temperatur der Glühlampe lässt sich innerhalb gewisser Grenzen durch den Potenzzusammenhang

$$I_v = \text{konst.} \cdot T^x \quad (9)$$

beschreiben. Nach dem Stefan-Boltzmann Gesetz für den sogenannten „schwarzen“ Strahler

$$P_S = \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4} \quad \text{Stefan-Boltzmann-Konstante}$$

ist die ausgestrahlte Gesamtleistung proportional zur 4. Potenz der absoluten Temperatur T und proportional zur Abstrahlfläche A . Da im Dauerbetrieb Gleichgewicht zwischen zugeführter und ausgestrahlter Leistung besteht, gilt also

$$T = \text{konst.} \cdot P^{1/4} \quad (10)$$

und man erhält

$$I_v = \text{konst.} \cdot P^{1/4} \quad \text{bzw.} \quad \log I_v - \log I_{v,0} = \frac{x}{4} (\log P - \log P_0), \quad (11)$$

wobei $I_{v,0}$ und P_0 zusammengehörige Messwerte bei einer beliebig gewählten Temperatur T_0 sind.

1.3 Messverfahren

Für photometrische Messungen, d. h. für die Bewertung der Strahlung entsprechend ihrem Lichteindruck auf das Auge, können subjektive und objektive Verfahren eingesetzt werden.

Bei dem Verfahren der objektiven Photometrie wird das Auge durch einen lichtelektrischen Empfänger (*Luxmeter*) ersetzt, der die gleiche spektrale Empfindlichkeit $V(\lambda)$ wie das Auge hat (**Bild 1**). $V(\lambda)$ ist an einer Vielzahl von Versuchspersonen gemessen worden. Durch Vorschalten geeigneter Filter kann man photoelektrische Empfänger herstellen, deren spektrale Empfindlichkeit mit der des Auges weitgehend übereinstimmt. Ein derartiger Empfänger kann direkt in Einheiten der Beleuchtungsstärke geeicht und für die Lichtstärkebestimmung beliebiger spektraler Zusammensetzung benutzt werden.

2. Versuch

2.1 Vorbetrachtung

Aufgabe: Erläutern Sie, welcher Zusammenhang zwischen Beleuchtungsstärke E_v und Lichtstärke I_v besteht?

2.2 Versuchsdurchführung

2.2.1 Verwendete Geräte

Optische Bank, 8 unterschiedliche Glühlampen, Stelltransformator, Leistungsmessgerät, Luxmeter (Messgerät für Beleuchtungsstärke), Spektrometer Spectra-1 (Messgerät für Lichtspektren)

2.2.2 Versuchshinweise

Aufgabe 1: Untersuchung der Lichtstärke I_v zweier Glühlampen in Abhängigkeit von der zugeführten elektrischen Leistung P

- Untersuchen Sie zwei unterschiedliche Glühlampen (60W, 100W – *Matt oder Klar*).
- Wählen Sie einen Abstand $r=(20 \dots 30)\text{cm}$ zwischen Glühwendel und Sensor des Luxmeters aus.
- Achten Sie darauf, dass Glühwendel und Sensor sich auf der optischen Achse befinden.
- Führen Sie die elektrische Leistung über einen Stelltrafo zu und messen Sie die Leistung P mit dem Leistungsmesser sowie Beleuchtungsstärke E_v mit dem Luxmeter.
- Benutzen Sie eine **Schrittweite von 10 W**. Beachten Sie den **Endwert** der Glühlampe.

Aufgabe 2: Untersuchung der Beleuchtungsstärken E_v der beiden Glühlampen in Abhängigkeit von der Entfernung zwischen Glühwendel und Sonde des Luxmeters

- Stellen Sie die elektrische Leistung entsprechend der verwendeten Glühlampe ein.
- Variieren Sie den Abstand zwischen Glühwendel (*Lampe*) und Sensor (*Luxmeter*). Beginnen Sie beim Abstand $r=1\text{ m}$ in **10 cm-Schrittweiten** bis $r=10\text{ cm}$. Messen Sie die Beleuchtungsstärke E_v mit dem Luxmeter. Der letzten Wert erfolgt beim Abstand $r=5\text{ cm}$. Beachten Sie, dass die Messzeit so kurz wie möglich zu halten ist (*Erwärmung des Sensors*).

Aufgabe 3: Nehmen Sie mit dem Luxmeter folgende Richtungsstrahlcharakteristiken

- a) von drei unterschiedlichen Glühlampen (*frei wählbar*) und
- b) einer Glühlampe (*Krypton*), die durch eine mattweiße Fläche strahlt, auf.

Aufgabe 3a: Messung ohne Schirm

- Positionieren Sie die Sonde (*Luxmeter*) von der Glühwendel (*andere Fassung*) im Abstand von $r=20\text{ cm}$.
- Nehmen Sie die Messwerte der Richtungsstrahlcharakteristik für drei freiwählbare Glühlampen in Drehrichtung von -90° bis $+90^\circ$ in **10°-Schritten** auf und messen Sie Beleuchtungsstärke E_v .

Aufgabe 3b: Messung mit Schirm

- Montieren Sie auf die Drehachse den durchscheinenden Schirm.
- Verwenden Sie für die Messung die **100 W Krypton-Glühlampe** und positionieren Sie diese in einem Abstand von **ca. 5 cm** vor dem Schirm.

- Die Position der Sonde des Luxmeters bleibt gleich (wie **Aufgabe 3a**).
- Nehmen Sie die Messwerte der Richtungsstrahlcharakteristik analog zur **Aufgabe 3a** in Drehrichtung von -90° bis $+90^\circ$ in 10° -**Schritten** auf und messen Sie Beleuchtungsstärke E_v .

Aufgabe 4: Bestimmung der Lichtspektren dreier Glühlampen (60W matt-Glühlampe, Sparlampe, LED-Lampe)

- Positionieren Sie die Messsonde des Spektrometers (*Spectra-1*) einen Abstand von **ca. 10 cm** von der Glühwendel der Lampe.
- Starten Sie mit Hilfe des Notebooks das Messprogramm (*Spectrometer*).
- Nehmen Sie nach einander die Spektren der drei vorgegebenen Glühlampen auf und drucken Sie diese aus. (**Hinweise zur Handhabung finden Sie am Versuchsplatz!**)

2.3 Versuchsauswertung

Aufgabe 1: Untersuchung der Lichtstärke I_v zweier Glühlampen in Abhängigkeit von der zugeführten elektrischen Leistung P

- Berechnen Sie aus der Beleuchtungsstärke E_v die Lichtstärke I_v .
- Stellen Sie auf doppelt-logarithmischem Papier die berechnete Lichtstärke I_v als Funktion der elektrischen Leistung ($I_v = f(P)$) graphisch dar.
- Ermitteln Sie aus diesem Diagramm unter Verwendung der linearen Regression und der Gl. (11) den Temperaturexponenten x .
- Bestimmen Sie die Messabweichungen an Hand festzulegender Fehlerbalken, wobei die Einstellgenauigkeit des Stelltrafos berücksichtigt werden soll.
- Berechnen Sie aus den Fehlerbalken die Messunsicherheit für den Temperaturexponenten.
- Interpretieren Sie das Ergebnis.

Aufgabe 2: Untersuchung der Beleuchtungsstärken E_v der beiden Glühlampen in Abhängigkeit von der Entfernung zwischen Glühwendel und Sonde des Luxmeters

- Stellen Sie auf doppelt-logarithmischem Papier die Beleuchtungsstärke E_v als Funktion des Abstandes r ($E_v = f(r)$) graphisch dar.
- Zeichnen Sie die Regressionsgraden ein und ermitteln Sie den Exponenten.
- Berechnen Sie aus der Beleuchtungsstärke E_v die Lichtstärke I_v .
- Bestimmen Sie die Mittelwerte der Lichtstärke I_v für beide Glühlampen sowie die Messabweichungen aus den Summen der systematischen und zufälligen Fehler.

Aufgabe 3: Nehmen Sie mit dem Luxmeter folgende Richtungsstrahlcharakteristiken

a) Messung ohne Schirm

- Berechnen Sie aus der gemessene Beleuchtungsstärke E_v die Lichtstärke I_v und stellen Sie die Funktion $I_v = f(\varepsilon)$ für alle drei Glühlampen in einem Polarkoordinatenpapier graphisch dar.
- Schätzen Sie die Messunsicherheit ab.
- Vergleichen Sie die Kurven. Was schlussfolgern Sie daraus?

b) Messung mit Schirm

- Berechnen Sie aus der gemessenen Beleuchtungsstärke E_v die Lichtstärke I_v und stellen Sie die Funktion $I_v = f(\varepsilon)$ mit in das Polarkoordinatenpapier aus **Aufgabe 3a** graphisch dar.
- Schätzen Sie die Messunsicherheit ab.
- Zur Bestätigung des Lambert'schen Gesetzes stellen Sie die Messergebnisse in einem Diagramm als Funktion $I_v = f(\cos \varepsilon)$ graphisch dar (ε eingestellter Beobachtungswinkel).
- Zu welchem Ergebnis kommen Sie?

Aufgabe 4: Bestimmung der Lichtspektren dreier Glühlampen (60W matt-Glühlampe, Sparlampe, LED-Lampe)

- Vergleichen und diskutieren Sie die Ergebnisse der 3 ausgedruckten Spektren.

3. Ergänzung**3.1 Vertiefende Fragen**

Was ist in der Photometrie ein subjektives Messverfahren? Skizzieren Sie Ihre aus der Literatur entnommenen Ergebnisse.

3.2 Zusammenhang Photometrie - Strahlungsphysik

Photometrische				Strahlungsphysikalische	
Größe	Einheit	Symbol	Formel	Einheit	Größe
Lichtmenge	lm·s	Q		W·s	Strahlungsenergie
Lichtstrom	lm	Φ	$\frac{dQ}{dt}$	W	Strahlungsfluss
Lichtstärke	cd = lm·sr ⁻¹	I	$\frac{d\Phi}{d\Omega_S}$	W·sr ⁻¹	Strahlstärke
Spezifische Lichtausstrahlung	lm·m ⁻²	M	$\frac{d\Phi}{dA_S}$	W·m ⁻²	Spezifische Ausstrahlung
Leuchtdichte	lm·m ⁻²	L	$\frac{dI}{dA_S \cdot \cos \alpha}$	W·m ⁻² ·sr ⁻¹	Strahldichte
Beleuchtungsstärke	lx = lm·m ⁻²	E	$\frac{d\Phi}{dA_E}$	W·m ⁻²	Bestrahlungsstärke
Belichtung	lx·s	H	$\int E \cdot dt$	W·s·m ⁻²	Bestrahlung

Quelle: Prof. D. Ertelt (FH-Oldenburg)