

# 1

## Radiometrische Grundbegriffe

Wie schon James C. Maxwell in den 1870er-Jahren erkannte, handelt es sich bei Licht um eine elektromagnetische Wellenerscheinung, also um die Übertragung von Energie durch oszillierende elektrische und magnetische Felder, die sich wellenartig ausbreiten. Aber nicht nur das sichtbare Licht, sondern auch ultraviolette Strahlung, Radiowellen oder Röntgenstrahlung sind elektromagnetische Wellenerscheinungen.

Die Messung von Strahlung ohne Berücksichtigung ihrer Bewertung durch das Auge wird als Radiometrie bezeichnet. Es kommt hierbei also auf den Energieinhalt an, nicht aber auf die Wellenlänge. Es ist in der Radiometrie völlig unerheblich, dass das Auge auf grünes Licht viel empfindlicher reagiert als

auf rotes oder blaues. Die radiometrischen (strahlungsphysikalischen) Grundgrößen werden in DIN 5031, Blatt 1 [1] beschrieben.

### 1.1 Spektralbereiche optischer Strahlung

Elektromagnetische Wellen können durch ihre Wellenlänge und ihre Frequenz charakterisiert werden. Wellenlänge  $\lambda$  und Frequenz  $\nu$  hängen über die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c_0$  zusammen:

$$c_0 = \lambda \cdot \nu \quad (\text{Gl. 1-1})$$

Der Wert der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum  $c_0$  beträgt 299793 km/s.

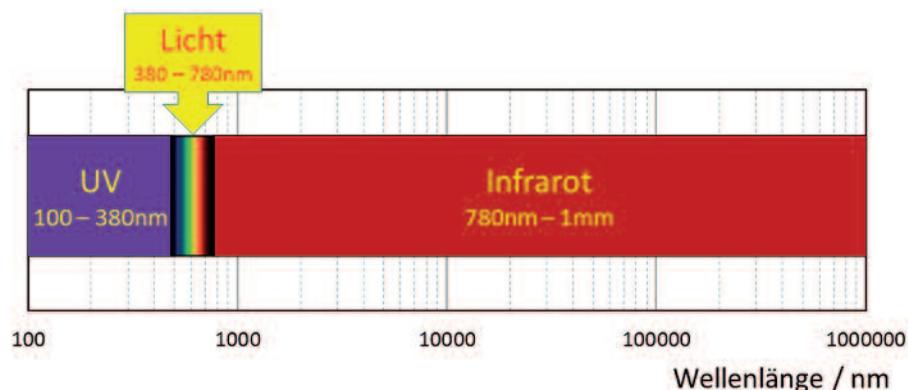


Abbildung 1-1: Das Spektrum der elektromagnetischen Wellen vom fernen Ultraviolett bis zum fernen Infrarot

Tabelle 1-1: Einteilung der optischen Strahlung in Spektralbereiche [2]

Benennung der Strahlung	Kurzzeichen	Spektralbereiche	
		Wellenlänge $\lambda$ nm	Frequenz $\nu$ THz
Ultraviolette Strahlung	UV	100 bis 200 200 bis 280 280 bis 315 315 bis 380	3000 bis 1500 1500 bis 1070 1070 bis 950 950 bis 790
Sichtbare Strahlung. Licht	VIS	380 bis 780	790 bis 385
Infrarote Strahlung	IR	780 bis 1400 1400 bis 3000 3000 bis 50000 50000 bis 1 Mio.	385 bis 215 215 bis 100 100 bis 6 6 bis 0,3

Abbildung 1-1 zeigt das Spektrum der elektromagnetischen Strahlung vom fernen Ultraviolett bis zum fernen Infrarot. Am kurzwelligen Ende schließen sich an den hier dargestellten Bereich dann die Röntgenstrahlen, die Gammastrahlen und die kosmischen Strahlen an. Am langwelligen Ende geht es weiter mit den Millimeterwellen, den Zentimeterwellen, den

Radiowellen (UKW mit Wellenlängen im Meterbereich, KW mit Wellenlängen im Bereich einiger Dutzend Meter, MW mit Wellenlängen von mehreren hundert Metern, LW mit Wellenlängen im Kilometerbereich) bis hin zu den Wellen, die von Hochspannungsleitungen abgestrahlt werden (Wellenlänge 6000 km).

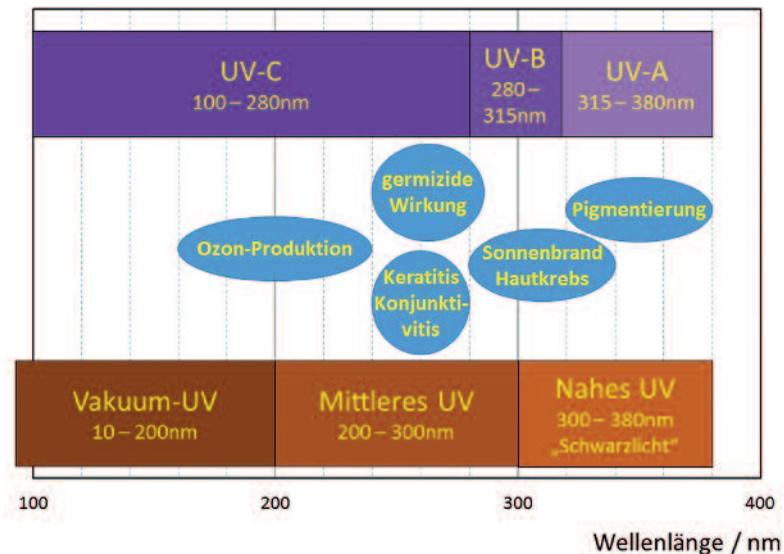


Abbildung 1-2: Gebräuchliche Unterteilung des UV-Bereichs (nach [1]) und Strahlungswirkungen (nach [4])

Nach DIN 5031 wird elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich von 100 nm bis 1 mm als optische Strahlung bezeichnet. Der Bereich der optischen Strahlung ist unterteilt in den Bereich der ultravioletten, sichtbaren und infraroten Strahlung. Die Unterteilungen dieser Bereiche in Unterbereiche, wie sie in Tabelle 1-1 wiedergegeben sind, sind nicht willkürlich, sondern orientieren sich (zumindest näherungsweise) an den Wirkungen der Strahlung.

Die Einteilung des UV-Bereiches wird in Abbildung 1-2 gezeigt. Der UV-Bereich ist in drei Bänder unterteilt:

- UV-A ist die am wenigsten schädliche und am häufigsten anzutreffende Strahlungsart im ultravioletten Bereich, da die Photonen die geringste Energie haben. UV-A-Strahlung wird oft als Schwarzlicht bezeichnet. Es wird benutzt wegen seines geringen Schadpotentials und der Fähigkeit, fluoreszierende Materialien zur Aussendung sichtbaren Lichts anzuregen, also im Dunklen zu leuchten. Die meisten Phototherapie-Lampen und Bräunungsstrahler verwenden UV-A-Lampen.
- UV-B ist die schädlichste Form der UV-Strahlung, da die Photonen genug Energie besitzen, um biologisches Gewebe zu zerstören. UV-B-Strahlung wird normalerweise in der Ozonschicht der Atmosphäre absorbiert. UV-B ist verantwortlich für den Sonnenbrand (Erythem) und verursacht Hautkrebs.
- Die kurzwellige UV-C-Strahlung wird schon in Luftstrecken von einigen hundert Meter Länge vollständig absorbiert. Wenn UV-C-Photonen auf Sauerstoffmoleküle treffen, wird Ozon gebildet. UV-C kommt in Bodennähe nicht in der Natur vor. Die germizide (keimtötende) Strahlung von UV-C-Lampen wird häufig eingesetzt, um Luft und Wasser zu entkeimen.

Der sichtbare Spektralbereich erstreckt sich in einem Wellenlängenbereich von 380 bis 780 nm und wird in den Standardisierungsdokumenten nicht weiter unterteilt. In der technischen Optik ist es üblich, bestimmte Standardwellenlängen durch Buchstaben zu bezeichnen. Diese Wellenlängen sind so gewählt, dass sie sich im Labor auf einfache Weise mit Spektrallampen erzeugen lassen.

Tabelle 1-2: Häufigste Spektrallinien in der technischen Optik [38]

Wellenlänge [nm]	Bezeichnung	Element
365,0	i	Hg
404,7	h	Hg
435,8	g	Hg
480,0	F'	Cd
486,1	F	H
546,1	e	Hg
587,6	d	He
589,3	D	Na
643,8	C'	Cd
656,3	C	H
706,5	r	He
768,2	A'	K

Die Wellenlänge korrespondiert mit der Farbempfindung, wie es in Abbildung 1-3 gezeigt ist.

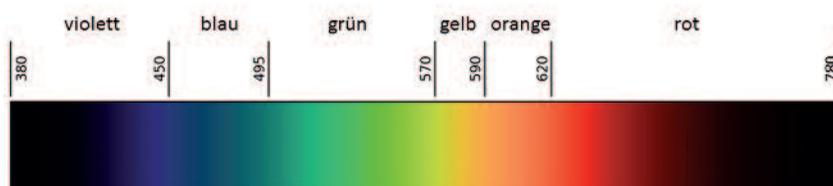


Abbildung 1-3: Spektralbereiche der Farbempfindung

Im infraroten Spektralbereich unterscheidet man drei Teilbereiche:

- Der IR-A-Bereich umfasst die Strahlung der Wellenlängen von 780 nm bis 1,4  $\mu\text{m}$ . Innerhalb dieses Bereiches sind die Augenmedien noch durchlässig, so dass IR-A-Strahlung die Netzhaut erreichen kann. Sie wird aber nicht wahrgenommen.
- Der IR-B-Bereich erstreckt sich von 1,4  $\mu\text{m}$  bis 3  $\mu\text{m}$ . Oberhalb einer Wellenlänge von 3  $\mu\text{m}$  können nur noch spezielle Gläser die Strahlung durchlassen.
- Der IR-C-Bereich umfasst alle längeren Wellenlängen von 3  $\mu\text{m}$  bis herauf zu 1 mm. Er enthält den technisch wichtigen Bereich der Wärmestrahlung und wird zumeist noch weiter aufgegliedert in einen MWIR-Bereich (medium wave infrared) von 3 bis 5  $\mu\text{m}$  und einen LWIR-Bereich (long wave infrared) von 7,5 bis 14  $\mu\text{m}$ . Dabei orientiert man sich an den beiden spektralen Transmissionsfenstern der Atmosphäre von 3 bis 5  $\mu\text{m}$  und 8 bis 14  $\mu\text{m}$ . Im Gegensatz dazu wird die IR-Strahlung im Bereich von 5 bis 8  $\mu\text{m}$  und jenseits von 14  $\mu\text{m}$  durch den Wasserdampf in der Atmosphäre absorbiert.

### 1.2 Strahlungsfluss

Stellen Sie sich einmal einen Autoscheinwerfer vor, der mit einer Halogenlampe bestückt ist. Auf dem Lampensockel steht eingraviert 12 V / 50 W. Das sind die elektrischen Anschlusswerte. Die Frage ist, welcher Bruchteil der elektrischen Eingangsleistung von 50 W als optische Ausgangsleistung abgestrahlt wird. Eine optische Leistung wird in der Radiometrie als Strahlungsfluss bezeichnet. Das Formelzeichen für den Strahlungsfluss ist  $\phi_e$ . Die Maßeinheit bleibt natürlich weiterhin Watt. Der Index „e“ weist darauf hin, dass es sich immer um eine energetische Größe handelt, deren Einheit sich auf das Watt bezieht. Energetische Größen berücksichtigen nicht die Empfindlichkeitskennlinie eines Detektors oder des Auges.

#### Beispiel:

Ein typischer Wert für einen 50 W-Halogen-scheinwerfer ist z.B. ein die Frontscheibe verlassender optischer Strahlungsfluss von 8 W. Der größere

Teil der elektrischen Leistung wird also nicht in Form von nutzbarer optischer Strahlung aus der Scheinwerferöffnung abgestrahlt, sondern wird durch Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung von der Rückseite und den Seitenflächen abgeführt. Die Verlustleistung erwärmt den Scheinwerfer nicht unerheblich.

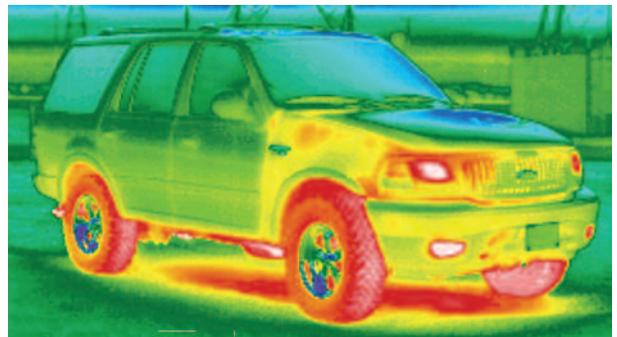


Abbildung 1-4: Der nach vorn gerichtete Strahlungsfluss (optische Ausgangsleistung) eines Autoscheinwerfers ist nur ein Bruchteil der elektrischen Eingangsleistung, der Rest wird zu Wärme umgewandelt, wie dieses Thermogramm zeigt: Die Scheinwerferabschlussgläser und die Umgebung der Scheinwerfer sind heiß [4].

### 1.3 Strahlstärke und Raumwinkel

Wie jeder weiß, strahlt kein Scheinwerfer den Strahlungsfluss gleichmäßig verteilt in alle Richtungen ab. So hat z.B. das asymmetrische Abblendlicht eine deutliche gewünschte Vorzugsrichtung zum rechten Straßenrand, um den Gegenverkehr nicht zu blenden. Abbildung 1-5 zeigt typische Beleuchtungsdiagramme moderner Autoscheinwerfer. Die Angabe des Strahlungsflusses allein reicht also nicht aus, um einen Scheinwerfer zu charakterisieren. Man muss auch noch angeben, welcher Bruchteil des Strahlungsflusses in die einzelnen räumlichen Richtungen ausgestrahlt wird. Diese Angabe wird als Strahlstärke bezeichnet mit dem Formelzeichen  $I_e$ . Die Strahlstärke gibt an, wie viel Strahlungsfluss pro Raumwinkelement  $\Omega$  ausgesandt wird.

$$I_e = \frac{\Phi_e}{\Omega} \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{sr}} \right] \quad (\text{Gl. 1-2})$$

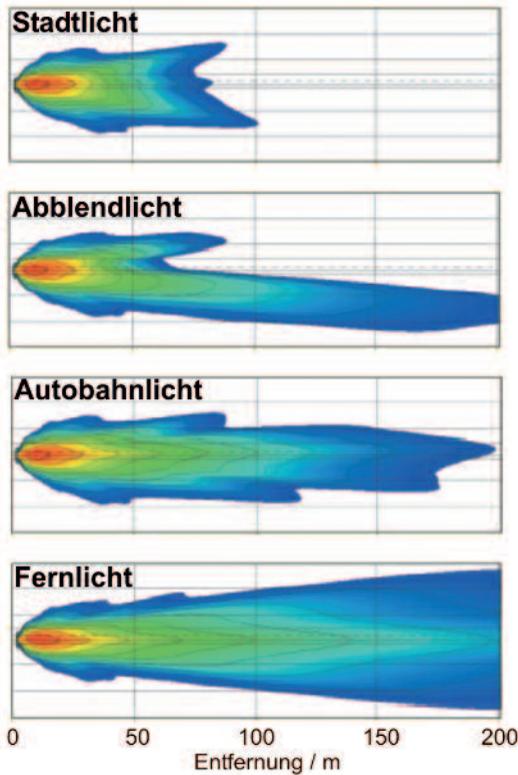


Abbildung 1-5: Fahrzeuglicht wird nicht gleichmäßig in den Raum abgestrahlt – die Strahlstärke ist stark richtungsabhängig [5].

### Aber was ist ein Raumwinkel?

Der Raumwinkel  $\Omega$  ist ein Maß für die Größe eines räumlichen Bezirks (in den z.B. Licht emittiert wird). Genau wie ein ebener Winkel wird er von einem Ursprungspunkt aus gemessen, wie in Abbildung 1-6 gezeigt. Der Raumwinkel ist definiert als das Verhältnis der Fläche  $A$  auf der Oberfläche einer Kugel und dem Quadrat des Kugelradius. Die Maßeinheit für den Raumwinkel ist Steradian, abgekürzt sr.

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad \left[ \frac{\text{m}^2}{\text{m}^2} = \text{sr} \right] \quad (\text{Gl. 1-3})$$

### Beispiel:

Wenn man z.B. eine Kugel mit dem Radius 1 m um die Strahlungsquelle wählt, dann hat ein Strahlungskegel, der aus der Kugel eine Fläche von  $0,3 \text{ m}^2$  „herausstanzt“ gerade einen Raumwinkel von  $0,3 \text{ sr}$ .

Weiteres Beispiel: Die Augenpupille eines dunkeladaptierten Beobachters hat einen Durchmesser von max. 7 mm. Die Fläche der Augenpupille beträgt somit  $\pi(3,5)^2 \text{ mm}^2 \approx 38,5 \text{ mm}^2$ . Von einem in 10 m Entfernung aufgestellten Strahler aus gesehen nimmt die Augenpupille einen Raumwinkel von  $38,5 \text{ mm}^2 / (10000 \text{ mm})^2 \text{ sr} = 3,85 \times 10^{-7} \text{ sr}$  ein, wenn der Betrachter direkt in Richtung des Strahlers blickt.

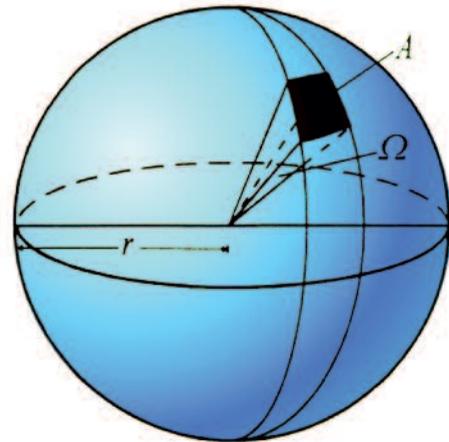


Abbildung 1-6: Zur Definition des Raumwinkels [6]

Blickt der Betrachter nicht direkt in Richtung des Strahlers, sondern um den Winkel  $\vartheta_D$  am Strahler vorbei, so erscheint die empfangende Fläche  $A_D$  (beim Auge die Pupille) um den Faktor  $\cos \vartheta_D$  verkleinert zu sein, wenn man sie von der Quelle aus betrachtet. Die zunächst kreisrunde Augenpupille sieht aus dieser Richtung elliptisch aus, also kleiner. Das Gleiche passiert natürlich bei einem optoelektronischen Detektor, dessen Flächennormale  $n_D$  zur Verbindungsachse zur Quelle um einen Winkel  $\vartheta_D$  geneigt ist. Der Raumwinkel, den der geneigte Detektor zur Quelle

aufspannt, ist also geringer als bei einem direkt auf die Quelle gerichteten Detektor. Es ergibt sich die folgende Beziehung:

$$\Omega = \frac{A_D \cos \vartheta_D}{r^2} \cdot sr \quad (\text{Gl. 1-4})$$

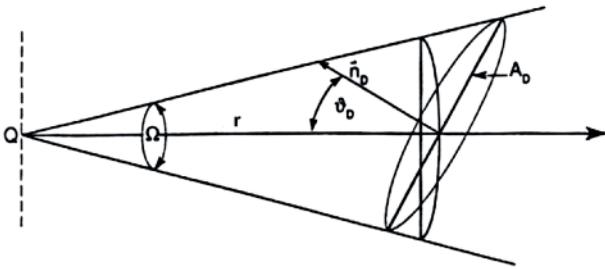


Abbildung 1-7: Der Raumwinkel eines gegenüber der Verbindungsachse zur Quelle geneigten Detektors [7]

Man erkennt, dass mit größer werdendem Richtungsfehler  $\vartheta_D$  der nutzbare Raumwinkel  $\Omega$  fällt. Außerdem gilt hier ein quadratisches Abstandsgesetz, wie aus Abbildung 1-8 hervorgeht.

Nun ist die Definition der Strahlstärke klar: Für jedes einzelne Raumwinkelement gibt sie an, wie viel Strahlungsfluss in diesen Bezirk abgestrahlt wird. Die Einheit ist somit W/sr.

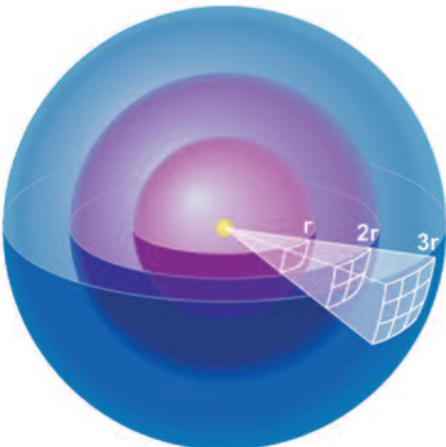


Abbildung 1 8: Quadratisches Abstandsgesetz [8]

## 1.4 Strahldichte

Nun kommt es noch zusätzlich darauf an, wie groß die strahlende Fläche ist, denn ein kleinerer Scheinwerfer erscheint dem Betrachter deutlich heller als ein größerer, wenn die Strahlstärken beider Scheinwerfer in Richtung des Betrachters gleich sind. Ein Linsenscheinwerfer eines Autos mit kleiner Öffnungsfläche blendet im Rückspiegel viel stärker als ein großflächiger Spiegelscheinwerfer. Die radiometrische Größe, die die Strahlstärke in Relation zur Größe der strahlenden Fläche beschreibt, ist die Strahldichte. Das Formelzeichen ist  $L_e$ . Betrachtet man die Strahlungsquelle aus einer bestimmten Richtung, so erscheint sie umso heller, je kleiner die strahlende Fläche im Verhältnis zur Strahlstärke in der Beobachtungsrichtung ist. Bei gegebener Strahlstärke  $I_e$  in Richtung des Empfängers definiert man somit die Strahldichte  $L_e$  als Quotient aus der Strahlstärke und der in Beobachtungsrichtung projizierten Fläche  $A_Q$ :

$$L_e = \frac{I_e}{A_Q \cos \vartheta_Q} \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{sr}} \right] \quad (\text{Gl. 1-5})$$

Durch den Kosinus-Term im Nenner wird berücksichtigt, dass eine schräg betrachtete Fläche kleiner zu sein scheint als beim Blick senkrecht auf die Fläche. Unter einem Winkel von  $60^\circ$  erscheint die Fläche nur noch halb so groß zu sein, denn der Kosinus von  $60^\circ$  ist 0,5.

Damit haben wir die drei wesentlichen Größen zur Beschreibung der Abstrahlung einer Quelle kennen gelernt: Strahlungsfluss, Strahlstärke und Strahldichte.

## 1.5 Lambertscher Strahler

Im Allgemeinen muss die Richtungsabhängigkeit der Strahlstärke  $I_e$  experimentell bestimmt werden. In zwei praktisch relevanten Fällen geht es aber auch einfacher: Handelt es sich um eine diffus strahlende Fläche oder um eine diffus reflektierende Fläche, so ist die Strahlstärke proportional zum Kosinus des Winkels  $\vartheta_Q$ . Die Strahldichte ist dann unabhängig von der Betrachtungsrichtung. Eine in dieser Weise strahlende

Fläche wird als Lambertscher Strahler bezeichnet. Ein Lambertscher Strahler sieht aus allen Richtungen gleich hell aus, wie z.B. ein Blatt Papier. Abbildung 1-9 zeigt eine solche Lambertsche Fläche. Im linken Teil (a) der Abbildung ist die Richtungsabhängigkeit der Strahlstärke gezeigt. Sie fällt bei 60° auf die Hälfte. Jeder Punkt der Fläche strahlt also nur halb so viel ab wie in die 0°-Richtung. Im rechten Teil (b) der Abbildung erkennt man, dass die Strahldichte bei 0° und bei 60° den gleichen Wert aufweist. Die Ursache hierfür ist, dass man bei schrägem Blick (60° zur Flächennormalen) auf die Fläche im gleichen Raumwinkelbereich doppelt so viel Punkte erfasst, so dass in Summe wieder der gleiche Strahlungsfluss am Empfänger ankommt.

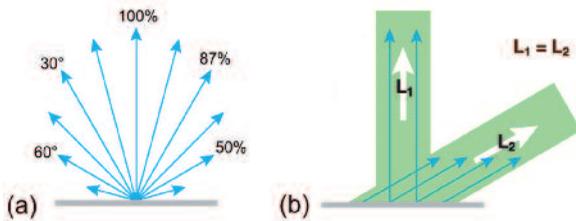


Abbildung 1-9: Verhältnisse beim Lambertschen Strahler [in Anlehnung an 9]: (a): Die Strahlstärke nimmt mit steigendem Winkel ab. Bei 60° ist sie nur noch halb so groß. b): Die Strahldichte bleibt für alle Winkel konstant. Bei 60° werden doppelt so viele Punkte erfasst, jeder Punkt strahlt aber nur halb so viel ab wie bei 0°.

## 1.6 Bestrahlungsstärke und Bestrahlung

Betrachten wir nun einmal die Situation auf der Empfängerseite: Teilt man den auftreffenden Strahlungsfluss durch die Detektorfläche  $A_D$ , so erhält man die Bestrahlungsstärke  $E_e$ . Der Winkel  $\vartheta_D$  gibt die Verkippung des Detektors an.

$$E_e = \frac{\Phi_e}{A_D} = I_e(\Omega) \frac{\cos \vartheta_D}{r^2} \cdot sr \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (\text{Gl. 1-6})$$

Hierbei wurde vereinfachend angenommen, dass sich die Strahlstärke innerhalb des Raumwinkels des Detektors nicht ändert. Das ist in der Praxis der

Normalfall, wenn man nicht zu nah an die Quelle herangeht.

### Beispiel:

Die Strahlstärke einer LED in der Fernbedienung beträgt 100 mW/sr in der senkrechten Abstrahlrichtung. Im Abstand von 3 m befindet sich senkrecht vor der Fernbedienung der Detektor im Fuß des Fernsehgerätes.

Wie groß ist die Bestrahlungsstärke auf der Detektorfläche?

Wie groß ist die Strahlungsleistung auf der Detektorfläche, wenn sie eine Fläche von 1 mm<sup>2</sup> hat?

### Ergebnis:

Die Bestrahlungsstärke beträgt 11 mW/m<sup>2</sup>. Die Strahlungsleistung beträgt auf der kleinen Empfängerfläche von 1 mm<sup>2</sup> nur 11 nW (ein Nanowatt ist nur ein Milliardstel Watt).

Betrachtet man einen ausgedehnten Strahler, so ergibt sich der zusätzliche Effekt, dass die effektiv wirksame Strahlerfläche vom Winkel  $\vartheta_Q$  zwischen der Flächennormale  $\vec{n}_Q$  des Strahlers und der Richtung zum Empfänger abhängt, wie in Abbildung 1-10 dargestellt.



Abbildung 1-10: Geometrische Verhältnisse bei flächenhaften Strahlern [7]

Wenn man die gesamte auftreffende Energie pro Flächeneinheit bestimmen möchte, so muss man die Bestrahlungsstärke mit der Einwirkzeit multiplizieren. Das Ergebnis wird als Bestrahlung bezeichnet. Das Formelzeichen ist  $H_e$ , die Einheit lautet J/m<sup>2</sup>.

### 1.7 Photometrisches Grundgesetz

Nimmt man die geometrischen Effekte der Strahlungsquelle und des Empfängers zusammen, so erhält man für den gesamten von einem Detektor aufgenommenen Strahlungsfluss  $\phi_{eD}$  das photometrische Grundgesetz:

$$\phi_{eD} = L_e \frac{A_Q A_D \cos \vartheta_Q \cos \vartheta_D}{r^2} \cdot sr \quad [W] \quad (\text{Gl. 1-7})$$

Hierbei ist die Voraussetzung, dass zwischen Strahlungsquelle und Empfänger keine Absorption auftritt und dass der Abstand zwischen Quelle und Empfänger erheblich größer ist als die Abmessungen von Quelle und Empfänger.

Das photometrische Grundgesetz ist insbesondere nützlich, wenn man die Bestrahlungsstärken, die in verschiedenen Abständen von einer Quelle gemessen werden können, ineinander umrechnen möchte. Wenn  $E_1$  die Bestrahlungsstärke im Abstand  $r_1$  von einer Punktquelle und  $E_2$  die Bestrahlungsstärke im Abstand  $r_2$  ist, dann gilt:

$$E_1 r_1^2 = E_2 r_2^2 \quad (\text{Gl. 1-8})$$

**Beispiel:**

Wie groß muss die Strahldichte einer gleichmäßig strahlenden ebenen Fläche  $A_Q = 10 \text{ cm}^2$  sein, wenn sie auf einer Detektorfläche von  $1 \text{ cm}^2$  eine Strahlungsleistung von  $1 \text{ nW}$  erzeugen soll? Der Abstand zwischen der Lampe und dem Detektor beträgt  $1 \text{ m}$ . Die Detektorfläche ist um  $45^\circ$  zur Ausbreitungsrichtung der Strahlung gekippt. Die strahlende Fläche ist nicht gekippt.

**Lösung:**

Das photometrische Grundgesetz wird nach der Strahldichte umgestellt und die bekannten Größen werden in die neue Gleichung für  $L_e$  eingesetzt.

$$L_e = \phi_{eD} \frac{r^2}{A_Q A_D \cos \vartheta_Q \cos \vartheta_D \cdot sr} = 1 \text{ mW} \frac{1 \text{ m}^2}{10 \text{ cm}^2 \cdot 1 \text{ cm}^2 \cdot 1 \cdot \cos 45^\circ \cdot sr} = 1,4 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2 \cdot sr}$$

Die gesuchte Strahldichte von  $1,4 \text{ W/cm}^2\text{sr}$  entspricht etwa der einer dunkelrot glühenden Keramikfläche.

Dies wird in Abbildung 1-11 anhand eines Beispiels dargestellt.

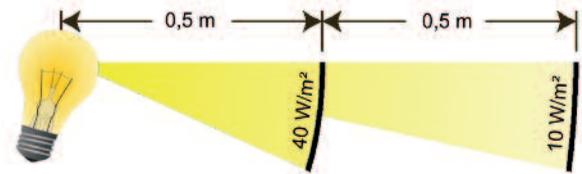


Abbildung 1-11: Photometrisches Grundgesetz am Beispiel einer Abstandsverdopplung

Das photometrische Grundgesetz gilt nur exakt, wenn die Strahlungsquelle punktförmig ist. Für ausgedehnte Strahler gilt es nur näherungsweise. Wenn der Abstand  $r$  der Quelle zum Empfänger mindestens 10 Mal größer ist als die größte Ausdehnung  $l$  der Quelle, dann ist der Fehler bei der Berechnung mit dem photometrischen Grundgesetz kleiner als 1%. Für kleiner werdende Abstände wird die Bestrahlungsstärke gegenüber den nach dem photometrischen Grundgesetz zu erwartenden Werten mehr und mehr reduziert, um schließlich ab etwa einem Abstand, der in der Größenordnung der Quellenabmessung liegt, einen konstanten Wert anzunehmen. Abbildung 1-12 verdeutlicht diesen Sachverhalt (hier wurde ein kosinusförmiges räumliches Empfindlichkeitsprofil des Detektors vorausgesetzt).

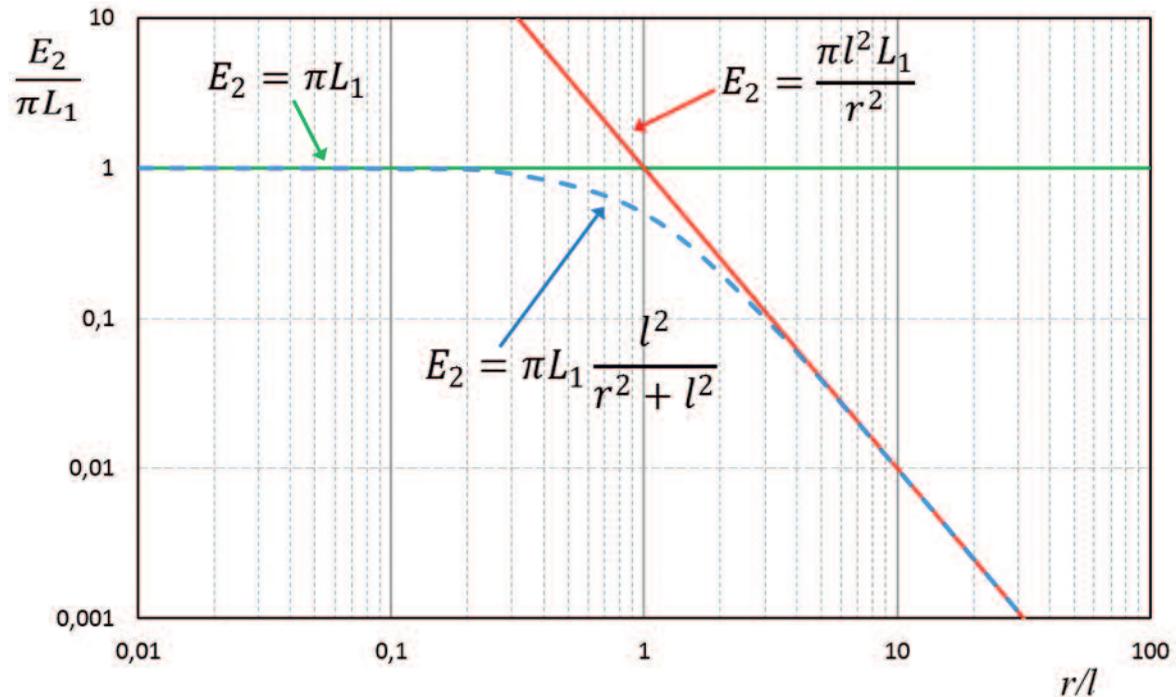


Abbildung 1-12: Abstandsgesetz bei nicht-punktförmigen Quellen [in Anlehnung an 9]

### 1.8 Spektrale Größen der Strahlungsmesstechnik (Index $\lambda$ )

Die Größen Strahlungsfluss, Strahlstärke, Strahldichte, Bestrahlungsstärke und Bestrahlung beinhalten keine Aussage über die spektrale Zusammensetzung der Strahlung. Man gibt deshalb oftmals zusätzlich die Ableitungen dieser Größen nach der Wellenlänge an. So ist z.B. der spektrale Strahlungsfluss  $\phi_{e\lambda}$  definiert als

$$\phi_{e\lambda} = \frac{d\phi_e}{d\lambda} \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{nm}} \right] \quad (\text{Gl. 1-9})$$

Die Maßeinheit ist W/nm oder W/ $\mu\text{m}$ . Analog definiert man die spektrale Strahlstärke, die spektrale Strahldichte usw. Diese spektralen Größen sind also die Ableitung der Grundgröße nach der Wellenlänge. Wenn sich die Größe innerhalb eines Wellenlängenintervalls  $\Delta\lambda$  nur wenig ändert, kann man statt der Ableitung den Differenzenquotienten bilden:

$$\phi_{e\lambda} = \frac{\Delta\phi_e}{\Delta\lambda} \quad (\text{Gl. 1-10})$$

Die spektralen Größen haben (trotz der vielleicht abschreckenden Definition) eine recht anschauliche Bedeutung: So gibt die spektrale Bestrahlungsstärke z.B. an, wie viel Bestrahlungsstärke in einem Wellenlängenbereich vorliegt.

### 1.9 Zusammenfassung

Tabelle 1-3 gibt einen Überblick über die wichtigsten strahlungsphysikalischen Größen, die in DIN 5031, Blatt 1 definiert sind. Hierbei ist eine vereinfachte Darstellung angegeben, die bei gleichmäßig emittierenden Strahlern und gleichmäßig empfindlichen Empfängerflächen genutzt werden kann. Bei der Bestrahlung  $H_e$  soll die Bestrahlungsstärke zeitlich konstant sein.

Tabelle 1-3: Strahlungsphysikalische Größen:

Definition	Vereinfachte Gleichung	Strahlungsphysikalische Größen	
		Bezeichnung	SI-Einheit
Energie	$Q_e$	Strahlungsenergie Strahlungsmenge	Ws
Energie je Zeiteinheit	$\Phi_e = \frac{Q_e}{t}$	Strahlungsleistung Strahlungsfluss	W
<b>Senderseitige Größen</b>			
ausgesandte Leistung je Raumwinkel	$I_e = \frac{\Phi_e}{\Omega_1}$	Strahlstärke	$\frac{W}{sr}$
ausgesandte Leistung je Raumwinkel und projizierter Flächeneinheit	$L = \frac{I_e}{A_1 \cdot \cos \varepsilon_1}$ $= \frac{\Phi_e}{\Omega_1 \cdot A_1 \cdot \cos \varepsilon_1}$	Strahldichte	$\frac{W}{m^2 sr}$
<b>Empfängerseitige Größen</b>			
einfallende Leistung je Flächeneinheit	$E_e = \frac{\Phi_e}{A_2}$	Bestrahlungsstärke	$\frac{W}{m^2}$
Produkt aus Bestrahlungsstärke und	$H_e = E_e \cdot t$	Bestrahlung	$\frac{Ws}{m^2}$

$A_1$  Fläche des Strahlers bzw. Senders,  $A_2$ : Fläche des Empfängers