

# 2

## Strahlung

### 2.1 Einleitung

Untersuchungen über Strahlungsprozesse wie sichtbares Licht oder Wärmestrahlung lösten die Entwicklung der Quantenphysik aus. Tatsächlich aber ist die Frage nach der Natur des Lichts viel älter und hat schon in früheren Zeiten zu großen Kontroversen geführt. Daher lohnt hier in kurzer Blick zurück: Wie hat sich die physikalische Vorstellung vom Licht im Laufe der Geschichte gewandelt?

Im nächsten Schritt wird es theoretischer. Wir springen in die zweite Hälfte des 19. Jahrhunderts, als James Clerk Maxwell die Theorien von Elektrizität, Magnetismus und Optik auf der Grundlage seiner berühmten vier Gleichungen vereinheitlichte. Im Lichte dieser Erkenntnis stellt sich das Licht als eine Welle im elektromagnetischen Feld dar, deren Erzeugung und Ausbreitung als sog. Dipolstrahlung wir kurz streifen werden.

Der entscheidende Punkt auf dem Weg zur Quantenphysik war die Erforschung der Wärmestrahlung – also von elektromagnetischen Wellen, die ein Körper allein aufgrund der in ihm enthaltenen Wärme abgibt. Max Planck versuchte Ungereimtheiten im kirchhoffschen Strahlungsgesetz der Wärmestrahlung zu beseitigen. Dies gelang ihm mit dem planckschen Strahlungsgesetz, in dem bereits wichtige Grundlagen der Quantentheorie enthalten sind. Nachdem damit der erste Schritt in die Quantenwelt bereits getan ist, werden wir uns kurz der Wellenoptik zuwenden, als Vorbereitung auf die später diskutierte Wellenmechanik.

Das Licht spielte auch eine ganz besondere Rolle bei der Entwicklung der Speziellen Relativitätstheorie Albert Einsteins. Ein kleiner Exkurs in diese neben der Quantenphysik zweite große Neuerung in der Physik des frühen 20. Jahrhunderts schließt daher dieses Kapitel ab.

## 2.2 Die Natur des Lichts

Was ist Licht? Bereits im Altertum haben sich Forscher und Philosophen mit dieser Frage beschäftigt. Im Barock war es unter anderem Isaac Newton (1643–1727), der in seinem wichtigen Werk „Opticks“ die Grundlagen für die moderne wissenschaftliche Optik schuf. Seiner Ansicht nach bestand Licht aus winzigen Partikeln – sog. Korpuskeln, mit deren Bewegungen er die Ausbreitung des Lichts erklärte. Christiaan Huygens (1629–1695), ein Zeitgenosse Newtons, hielt dagegen das Licht für eine Welle. Nach seiner Theorie sendet eine Lichtquelle kugelförmige Fronten von Lichtwellen aus. Erst im 19. Jahrhundert setzte sich seine Ansicht gegen Newtons Bild durch, unter anderem aufgrund der Entdeckung von Interferenzerscheinungen an überlagerten Lichtwellen. Hierauf werden wir im Abschnitt über die Wellenoptik näher eingehen.

James Clerk Maxwell (1831–1879) brachte schließlich die klassische Wellentheorie des Lichts zum Abschluss. Aus seinen berühmten Grundgleichungen des Elektromagnetismus, den Maxwell-Gleichungen, folgt nämlich direkt, dass sich in elektromagnetischen Feldern Wellen mit der Geschwindigkeit – und allen weiteren Eigenschaften – des Lichts ausbreiten können. Sie schwingen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung (sind „transversal“), können gebeugt und gebrochen werden usw. Wegen ihrer großen Bedeutung für die gesamte Physik werde ich im nächsten Abschnitt auf die Maxwell-Gleichungen etwas ausführlicher eingehen. Ich verzichte dabei auf die mathematischen Formeln, da sie eine gewisse Einarbeitung erfordern und für das Weitere nicht entscheidend sind.

## 2.3 Maxwellsche Gleichungen

Maxwells Gleichungen behandeln die Beziehungen zwischen elektrischen Ladungen und elektrischen sowie magnetischen Feldern. Die erste Gleichung besagt, dass elektrische Ladungen elektrische Felder erzeugen: Von jeder elektrischen Ladung gehen Feldlinien entweder aus oder sie münden in ihr (je nach Vorzeichen der Ladung).

Erste Maxwell-Gleichung: Elektrische Ladungen sind die Quellen des elektrischen Feldes.

Die zweite Gleichung behandelt die Quellen von Magnetfeldern. Die einfache Aussage lautet: Es gibt keine! Genauer gesagt: Es gibt keine einzelnen, iso-

lierten magnetischen Nord- oder Südpole. Vielmehr sind alle magnetischen Feldlinien in sich geschlossen. Bei einem Stabmagneten schließen sich die Feldlinien zwischen Nord- und Südpol im Inneren des Magneten.

Zweite Maxwell-Gleichung: Das magnetische Feld hat keine isolierten Quellen oder „Ladungen“.

Bei den ersten beiden Gleichungen hat die Zeit keine Rolle gespielt. Die dritte und vierte Maxwell-Gleichung behandeln dagegen den Fall, dass sich elektrisches und/oder magnetisches Feld zeitlich ändern, daher nennt man Maxwells Theorie auch die „Elektrodynamik“. Die dritte Maxwell-Gleichung betrifft ein veränderliches magnetisches Feld. Die Aussage ist dann die, dass jede Magnetfeldänderung ein elektrisches Feld und, damit gleichbedeutend, eine elektrische Spannung induziert. Deren Feldlinien sind kreisförmig oder, allgemeiner, verlaufen in geschlossenen Kurven; man spricht auch von einem Wirbelfeld. Eine elektrische Ladung bewegt sich in solch einem Feld auf einer geschlossenen Bahn „im Kreis“ – dies ist die Grundidee des Elektromotors!

Dritte Maxwell-Gleichung (Induktionsgesetz): Ein veränderliches Magnetfeld induziert ein elektrisches Wirbelfeld, das man als elektrische Spannung messen kann.

Die letzte Maxwell-Gleichung ist die komplizierteste: Bei ihr geht es um zeitlich veränderliche elektrische Felder. Dabei muss man nämlich zwei Fälle unterscheiden: Wenn sich elektrische Ladungen bewegen (etwa in einem Stromkabel, daher heißt dieser Fall „Leitungsstrom“), bewegen sich auch die von ihnen erzeugten elektrischen Felder, was natürlich eine zeitliche Veränderung des Feldes an einem gegebenen Ort bedeutet. Es kann aber auch sein, dass sich das elektrische Feld selbst ändert, hier spricht man von einem „Verschiebungsstrom“. Die Aussage der vierten Maxwell-Gleichung ist nun, dass in beiden Fällen ein magnetisches Wirbelfeld entsteht.

Vierte Maxwell-Gleichung: Zeitlich veränderliche elektrische Felder induzieren magnetische Wirbelfelder, sowohl bei Leitungs- als auch bei Verschiebungsströmen.

**Ergebnis** Elektrische und magnetische Felder sind untrennbar verbunden, Veränderungen des einen erzeugen jeweils das andere – man spricht daher meist einfach vom „elektromagnetischen Feld“.

## 2.4 Elektromagnetische Wellen

Eine fundamentale Konsequenz aus Maxwells Gleichungen ist die Tatsache, dass elektromagnetische Felder sich wellenförmig in den Raum ausbreiten können, und zwar mit der Lichtgeschwindigkeit  $c$ . Wie dies physikalisch vor sich geht, werde ich gleich an einem einfachen Beispiel erläutern.

Viele Beobachtungen und Gesetze von mechanischen Schwingungen und Wellen gelten auch für elektromagnetische Wellen. Letztere können sich allerdings sowohl entlang von Leitungen als auch in Luft oder sogar im „leeren“ Raum, d. h. im Vakuum, ausbreiten. Letzteres ist bekanntlich bei Schallwellen nicht möglich. Im Koaxialkabel zwischen Antenne und Fernsehempfänger breitet sich die elektromagnetische Energie beispielsweise als leitungsgebundene Welle aus. Licht im Weltall ist das bekannteste Beispiel für die Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen im Vakuum. All dies gilt genauso für unsichtbare elektromagnetische Frequenzbereiche, wie etwa Radiowellen oder Röntgenstrahlen. Die mathematische Beschreibung der elektromagnetischen Wellen geschieht für alle Frequenzen über sog. Differenzialgleichungen zweiter Ordnung, die sich (mit etwas mathematischer Übung) direkt aus den Maxwell-Gleichungen ableiten lassen. Darauf soll jedoch an dieser Stelle verzichtet werden.

Frequenz und Wellenlänge von elektromagnetischen Wellen umfassen ein Spektrum, das sich über viele Größenordnungen erstreckt (Tab. 2.1).

Die Geschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen im Vakuum ergibt sich aus den Maxwell-Gleichungen und beträgt exakt

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 299792458 \frac{\text{m}}{\text{s}}. \quad (2.1)$$

Licht ist die bekannteste Form dieser Wellen, daher heißt diese Geschwindigkeit „Lichtgeschwindigkeit“. Die Größen  $\epsilon_0$  und  $\mu_0$  sind die elektrische bzw. magnetische Feldkonstante im Vakuum – ein weiterer Hinweis auf die Herleitung dieser Beziehung aus den Maxwell-Gleichungen.

Im Folgenden sehen Sie, wie elektromagnetische Wellen in einem einfachen elektrischen System erzeugt werden. Es handelt dabei um eine sog. Dipolstrahlung. Dieses System besteht nur aus einer Induktivität  $L$  (für Nicht-Elek-

**Tab. 2.1** Das elektromagnetische Spektrum. Die Angaben sind jeweils gerundet, die Abgrenzung zwischen Röntgen- und Gammastrahlung ist nicht eindeutig definiert

Bereich	Differenzierung	Frequenz [Hz]	Wellenlänge [m]
Niederfrequenz		$10\text{--}10^4$	$10^5\text{--}10^7$
Radiowellen	LW	$10^5$	$10^3\text{--}10^4$
	MW	$10^6$	$10^2\text{--}10^3$
	KW	$10^7$	$10\text{--}10^2$
	UKW	$10^8$	$1\text{--}10$
Mikrowellen		$10^9\text{--}10^{12}$	$10^{-3}\text{--}1$
Infrarote Strahlung		$10^{12}\text{--}10^{14}$	$10^{-6}\text{--}10^{-3}$
Sichtbares Licht		$10^{15}$	$10^{-7}\text{--}10^{-6}$
Ultraviolette Strahlung		$10^{15}\text{--}10^{16}$	$10^{-8}\text{--}10^{-7}$
Röntgenstrahlung		$10^{17}\text{--}10^{20}$	$10^{-12}\text{--}10^{-8}$
Gammastrahlung ( $\gamma$ -Strahlung)		$10^{19}\text{--}10^{24}$	$10^{-15}\text{--}10^{-11}$

trotechniker: einer Spule) und einer Kapazität  $C$  (einem Kondensator), die zu einem geschlossenen Schwingkreis zusammengeschaltet werden (Abb. 2.1).

Die Eigenfrequenz  $f_0$  dieses Schwingkreises, also die Frequenz, mit der ohne äußere Störung Strom und Spannung im Kreis periodisch variieren, berechnet sich zu

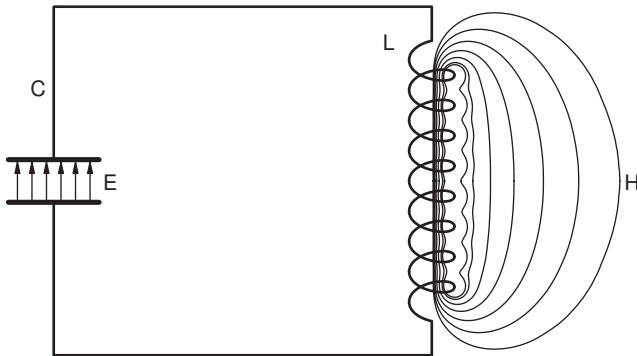
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

(2.2)

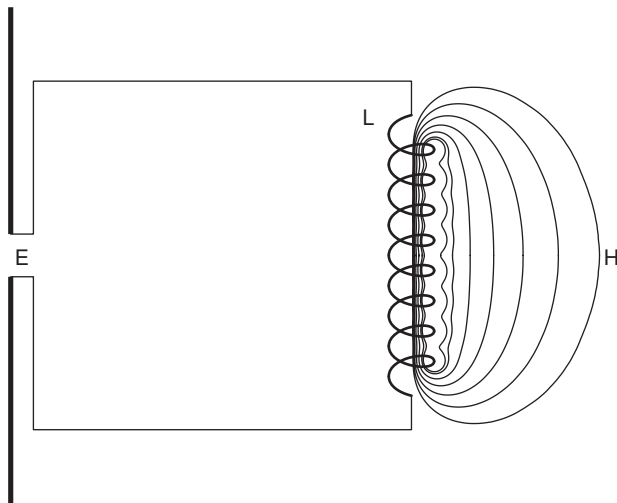
Eine Antenne für elektromagnetische Wellen ist im Prinzip nichts anders als solch ein Schwingkreis. Wenn die Eigenfrequenz des Schwingkreises mit der Schwingungsfrequenz einer einlaufenden Welle übereinstimmt, kommt es zur Resonanz und der Schwingkreis reagiert besonders stark auf das ankommende Signal.

Wie verläuft nun das Aussenden einer elektromagnetischen Welle im Einzelnen? Betrachten wir dazu einen offenen Schwingkreis (Abb. 2.2). Wir ersetzen zuerst die klassischen Kondensatorplatten durch zwei nach oben bzw. unten geklappte und damit senkrecht übereinander angeordnete Metallstäbe. Mit der Zeit wandern die Feldlinien immer weiter in den Raum hinein. Die Frequenz der sich so ausbreitenden Welle entspricht der Frequenz, mit welcher die Ladungen im Schwingkreis hin- und herschwingen. Bei sehr hohen Frequenzen erfolgt die gegenseitige Erzeugung von elektrischen und magnetischen Feldern schließlich nur noch im Raum außerhalb der Dipolstäbe.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Ausstrahlung dieses Feldes als elektromagnetische Welle während einer Schwingungsperiode.

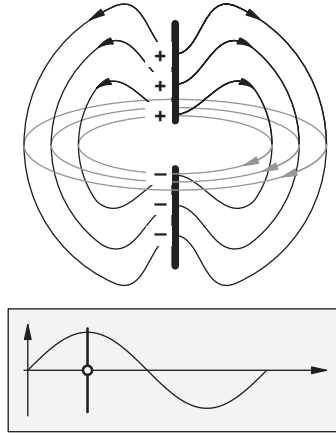


**Abb. 2.1** Geschlossener Schwingkreis. Dargestellt ist ein geschlossener Stromkreis, mit einem Kondensator mit Kapazität  $C$  und den zugehörigen elektrischen Feldlinien auf der linken Seite, *rechts* eine Spule mit der Induktivität  $L$ , in der bei Stromfluss ein Magnetfeld  $H$  induziert wird. (Osterhage (2012))

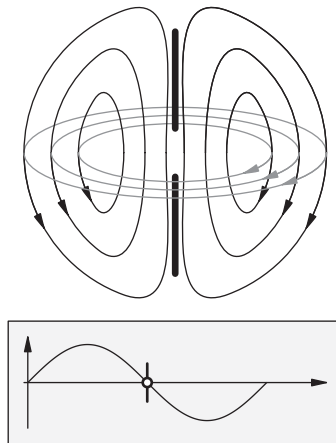


**Abb. 2.2** Schwingfähiger Dipol. Der Aufbau ähnelt dem in Abb. 2.1, allerdings sind die Kondensatorplatten jetzt jeweils um  $90^\circ$  in die Vertikale, d. h. nach oben bzw. unten gedreht.  $E$  ist die elektrische,  $H$  die magnetische Feldstärke,  $L$  die Induktivität der Spule. (Osterhage (2012))

**Erste Viertelperiode** In Abb. 2.3 wandern die negativen Ladungen in den Stäben nach oben (die positiven entsprechend nach unten). Es entsteht ein elektrischer Dipol, mit dem positiven Pol unten und dem negativen Pol oben. Gleichzeitig bedeutet dieser Leitungsstrom eine Ladungsverschiebung, die zur Ausbildung eines elektrischen Feldes führt. Um die anwachsenden elektrischen Feldlinien herum werden kreisförmige magnetische Feldlinien induziert.



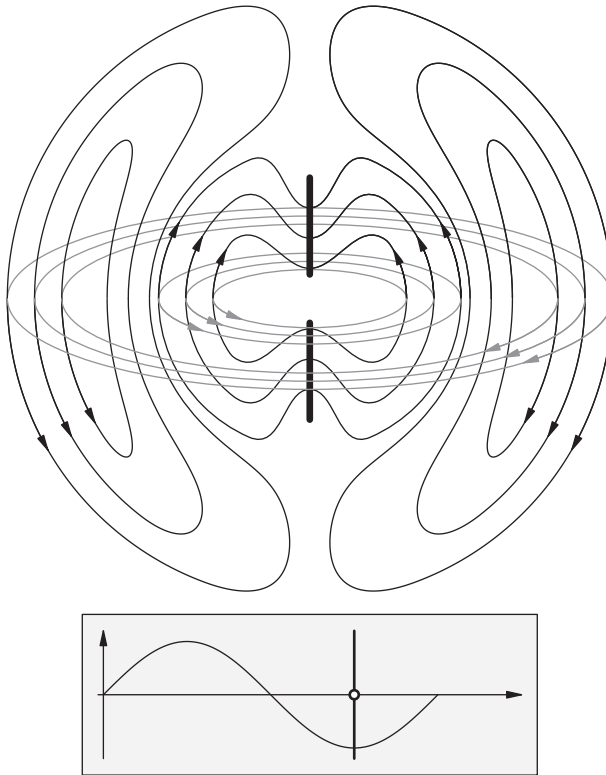
**Abb. 2.3** Dipol: Erstes Viertel. In der Mitte dieser und der folgenden drei Abbildungen befindet sich der elektrische Dipol. (aus Osterhage (2012))



**Abb. 2.4** Dipol: zweites Viertel

**Zweite Viertelperiode** Nach einer halben Schwingungsperiode sind die Ladungen wieder „zurückgeschwungen“, gleichmäßig verteilt und erzeugen somit im Moment kein elektrisches Feld. Die zuvor erzeugten Feldlinien schnüren sich ab und breiten sich wegen der endlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen als geschlossene Kurven weiter aus (Abb. 2.4). Die zuvor erzeugten Feldlinien haben sich bereits ein Stück weiter nach außen bewegt.

**Dritte Viertelperiode** Nach der ersten Halbperiode beginnt die Aufladung des Dipols von vorn, allerdings wandern nun die negativen Ladungen nach unten, die positiven nach oben (Abb. 2.5). Das Feldlinienbild in der Nähe der Stäbe entspricht dem aus Abb. 2.3, jetzt aber mit jeweils umgekehrter



**Abb. 2.5** Dipol: drittes Viertel

Feldrichtung. Weiter außen entfernen sich die entgegengesetzt gepolten elektrischen und magnetischen Linien aus der ersten Halbperiode unterdessen immer weiter von der Anordnung.

**Volle Periode** Nach dem Durchlaufen einer vollen Periode haben sich je eine volle Schwingung des elektrischen und des magnetischen Feldes in den Raum hinein ausgebreitet, und der Zyklus kann von vorne beginnen (Abb. 2.6).

### Ergebnis

1. Elektromagnetische Wellen breiten sich von einer einfachen Dipolquelle in den Raum aus – in sehr großer Entfernung von der Quelle erfolgt die Ausbreitung gleichförmig-geradlinig.
2. Die Schwingungsrichtung von elektrischem und magnetischem Anteil einer Funkwelle wird durch die Richtung des Sendedipols bestimmt. Ein Empfängerdipol muss entsprechend orientiert sein, um optimal zu funktionieren.



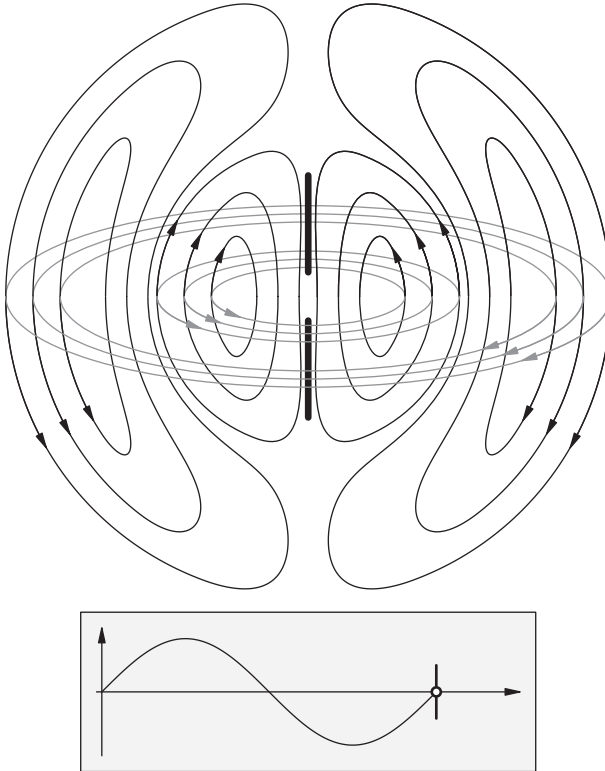


Abb. 2.6 Dipol: volle Periode

## 2.5 Strahlungsgesetze

### 2.5.1 Wärmestrahlung

Körper neigen dazu, ein thermisches Gleichgewicht anzunehmen – vom Körper mit der höheren Temperatur wird Wärme an den kälteren übertragen, bis beide die gleiche Temperatur aufweisen. Der Wärmetransport kann dabei auf drei Arten geschehen: durch direkten Kontakt (Hand an der Heizung!), durch Konvektion in Flüssigkeiten oder Gasen (sprudelnd kochendes Wasser erhitzt die Kartoffeln effektiver als die trockene Herdplatte) oder aber durch Emission und Absorption von elektromagnetischer Strahlung (Wärmestrahlung). Tatsächlich sendet jeder Körper permanent eine solche Strahlung aus, deren Frequenz- bzw. Wellenlängenspektrum in charakteristischer Weise von seiner Temperatur abhängt. Je wärmer der Körper ist, desto kürzere Wellenlängen bzw. höhere Frequenzen werden bevorzugt emittiert. (Sie können sich übrigens den Zusammenhang von Frequenz und Wellenlänge wie bei einem

schwingenden Seil vorstellen: Wenn Sie es langsam schwingen, entsteht eine weite Welle mit großer Wellenlänge, schwingen Sie hingegen mit hoher Frequenz, liegen die Wellenberge nahe beieinander und die Wellenlänge ist klein.)

Bei Temperaturen zwischen etwa  $-270\text{ °C}$  und  $+3000\text{ °C}$  liegt das Maximum der Wärmestrahlung im infraroten Spektralbereich, weswegen „Wärmestrahlung“ und „Infrarot“ oft synonym gebraucht werden – das ist aber nicht richtig, denn das sichtbare Sonnenlicht ist ebenfalls eine Wärmestrahlung, die aber von der rund  $6000\text{ °C}$  heißen Sonnenoberfläche ausgesandt wird! Der Wärmeaustausch durch Strahlung erfolgt bei einem Körper, der wärmer als seine Umgebung ist, durch (Netto-)Emission von Wärmestrahlung, ist er kälter als die Umgebung, durch Absorption.

### 2.5.2 Strahlungsphysikalische Größen

Strahlung lässt sich auf verschiedene Arten in Gleichungen fassen. Im Folgenden gebe ich Ihnen eine kurze Übersicht über strahlungsphysikalische Größen, die Ihnen begegnen könnten. Wir beginnen mit der **Strahlungsleistung**  $\Phi_e$ :

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt} \quad \left[ \frac{\text{J}}{\text{s}} = \text{W} \right]. \quad (2.3)$$

Hier steht  $Q_e$  für die Strahlungsenergie. Die Strahlungsleistung  $\Phi_e$  ist also die Änderung der Strahlungsenergie  $Q_e$  mit der Zeit.

Normalerweise strahlt ein Körper seine Energie in den umgebenden Raum gleichmäßig in alle Richtungen ab. Zwischen der **Strahlstärke** oder **Intensität**  $I_e$ , der Strahlungsleistung und dem Raumwinkel  $\Omega$  besteht die folgende Beziehung (siehe Abb. 2.7):

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega} \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{sr}} \right]. \quad (2.4)$$

Der Raumwinkel  $\Omega$  wird in der Einheit Steradian (sr) gemessen, er berechnet sich aus dem Flächenausschnitt  $A$  der Oberfläche und dem zugehörigen Radius  $R$  einer gedachten Kugel um den strahlenden Körper wie folgt (Abb. 2.7):

$$\Omega = \frac{A}{R^2}. \quad (2.5)$$

Studium Generale Quantenphysik  
Ein Rundflug von der Unschärferelation bis zu  
Schrödingers Katze  
Osterhage, W.W.  
2014, VII, 196 S. 50 Abb., Hardcover  
ISBN: 978-3-642-41742-9