

5. Elektromagnetische Wellen

5.1 Elektrische und magnetische Felder

In der klassischen Physik beschäftigt man sich mit zwei Arten von physikalischen Größen: mit materiellen Körpern und mit Feldern. Materielle Körper sind uns aus dem Alltag wohl vertraut, wir können sie sehen und anfassen. Ihre Bewegungen werden durch die Gesetze der Mechanik beschrieben. Felder sind etwas schwieriger zu fassen, weil sie nicht direkt sichtbar und fühlbar sind, sondern erst durch ihre Wirkungen erkennbar werden.

Der Feldbegriff lässt sich am einfachsten am Beispiel der Gravitation entwickeln. Das Newtonsche Gravitationsgesetz sagt aus, dass jeder Körper der Masse m_1 jeden anderen Körper der Masse m_2 anzieht. Ein Beispiel hierfür ist die gegenseitige Anziehung von Erde und Sonne. Dabei ergibt sich die Frage, wie diese Kraft vermittelt wird? Es gibt kein Seil oder Gummiband, das die Erde auf ihrer Bahn um die Sonne hält. Die Kraft, welche die Erde zur Sonne zieht, ist unsichtbar und wirkt an jeder Stelle, wohin die Erde kommt. Man beschreibt diesen Sachverhalt in der folgenden Weise: Die Sonne erzeugt an jedem Ort ihrer Umgebung ein Schwerefeld. Wenn die Erde an einem Punkt dieses Schwerefeld spürt, wird sie zu der Sonne hingezogen. Das heißt: Das Feld um die Sonne ist immer da, aber erst ein eingeführter Probekörper bewirkt, dass durch dieses Feld eine Kraft wirksam wird. Das Feld ist also die Möglichkeit für eine Kraft. Erst, wenn ein Masse in das Feld gebracht wird, ergibt sich aus der Möglichkeit eine reale Wirkung.

Weitere Beispiele für Felder sind die elektrischen und magnetischen Felder. In der

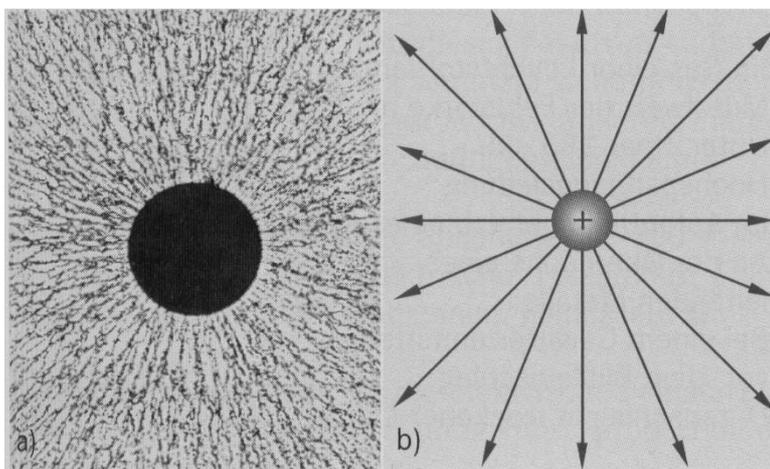


Abb. 5.1: Feldlinien in der Umgebung einer geladenen Kugel, links mit Grieskörnern in Öl sichtbar gemacht, rechts schematisch.

Umgebung einer elektrischen Ladung herrscht ein elektrisches Feld, das auf eine in dieses Feld gebrachte Probeladung eine Kraft ausübt. Ein Magnet ist von einem Magnetfeld umgeben, das auf einen Probemagneten wirkt.

Felder lassen sich gut durch Feldlinien beschreiben, deren Richtung an jedem Ort die Richtung der Kraft auf einen Probekörper angibt und deren Dichte ein Maß für die

Stärke des Feldes ist. (siehe Abb. 5.1) Am einfachsten kann man Magnetfeldlinien sichtbar machen und zwar mit Eisenfeilspänen oder kleinen Probemagneten, die sich entlang der Feldlinien ausrichten.

Versuch: Darstellung magnetischer Feldlinien

Auf eine Anordnung von Probemagneten, die sich jeweils um eine feste Achse drehen können, wird ein Stabmagnet gelegt. Die Probemagnete richten sich entlang der Feldlinien, die von einem Ende (Pol) zum anderen führen, aus. Bringt man den Nordpol des Stabmagneten über die Anordnung, so ergibt sich ein radiales Feldlinienbild wie in Abb. 5.1. Die Orientierung der magnetischen Feldlinien ist definiert als diejenige Richtung, in die sich der Nordpol eines Probemagneten einstellt.

Die Feldidee stammt aus der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts und geht auf Michael Faraday zurück. Zu jener Zeit studierten er und andere verschiedene elektrische und magnetische Phänomene. Um die dabei erhaltenen experimentellen Ergebnisse möglichst anschaulich und adäquat beschreiben zu können, erwies sich der Feldbegriff als sehr nützlich. Den Schlusspunkt in dieser Entwicklung setzte J.C. Maxwell, der in den nach ihm benannten Gleichungen die Bewegungsgesetze für die elektromagnetischen Felder aufstellte. Mögliche Lösungen dieser Gleichungen sind u.a. elektromagnetische Wellen, die sich mit Lichtgeschwindigkeit in den Raum hinein ausbreiten. Seit der Veröffentlichung der Maxwell-Gleichungen vergingen keine 20 Jahre, bis Heinrich Hertz 1887 solche Wellen in Karlsruhe nachwies.

5.2 Schwingkreis und Hertzscher Dipol

Zur Erzeugung einer Welle ist ein Erreger notwendig. In der Wellenwanne war dies für die Kreiswellen ein sich periodisch auf- und ab bewegendes Stift und für die geradlinigen Wellen ein Stab. Bei Schallwellen erzeugt z.B. eine angeschlagene Stimmgabel die Verdünnungen und Verdichtungen der Luft. In beiden Fällen handelt es sich um mechanische Erreger und mechanische Wellen. Will man nun elektromagnetische Wellen herstellen, muss man einen elektrischen oder magnetischen Er-

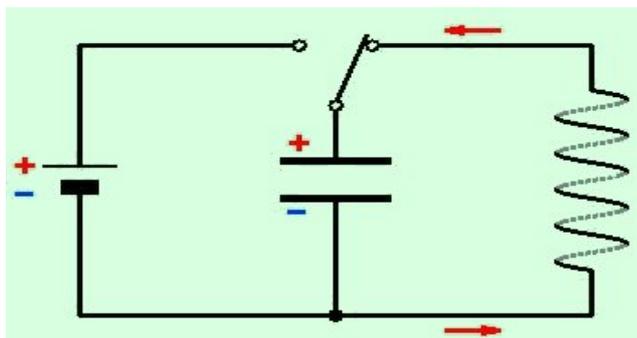


Abb. 5.2: Schematische Darstellung eines elektromagnetischen Schwingkreises aus Spule (rechts) und Kondensator (Mitte) zusammen mit einer Spannungsquelle (links)

reger konstruieren. Im Prinzip könnte dies dadurch geschehen, dass man eine Ladung oder einen Magneten im Raum periodisch hin und herbewegt.

Eine praktikable Methode besteht darin, einen sog. elektromagnetischen Schwingkreis zu benutzen. Dieser besteht aus einem Kondensator und einer Spule, die leitend miteinander verbunden werden können (siehe Abb. 5.2). Man beginnt in der Schalter-

stellung "links". Die beiden Platten des Kondensators werden aufgeladen, die eine positiv, die andere negativ. Zwischen den Platten entsteht damit ein elektrisches Feld, das man im Prinzip mit einer Probeladung nachweisen kann. Legt man den Schalter nach "rechts", dann will die Ladung von den Platten über die Spule abfließen und sich ausgleichen. Was dabei geschieht, soll zunächst einmal experimentell untersucht werden.

Versuch: Elektromagnetischer Schwingkreis

Ein Kondensator (mit der Kapazität $C = 40 \mu\text{F}$) wird über eine Spule (mit der Induktivität $L = 630 \text{ Henry}$) "kurzgeschlossen". Mit zwei Messinstrumenten werden die Spannung am Kondensator und die Stromstärke im Kreis gemessen. Dies geschieht mit Hilfe eines Messwertaufnahmesystems mit angeschlossenen Computer, so dass man die gemessenen Werte speichern, darstellen und weiterverarbeiten kann. Der zeitliche Verlauf der Spannung $U_c(t)$ und der Stromstärke $I(t)$ sind in Abb. 5.3 dargestellt. Es ergeben sich zwei gedämpfte sinusförmige Schwingungen, die um $\pi/2$ (das entspricht 90°) gegeneinander verschoben sind. Die Schwingungsdauer beträgt ca. 1 s.

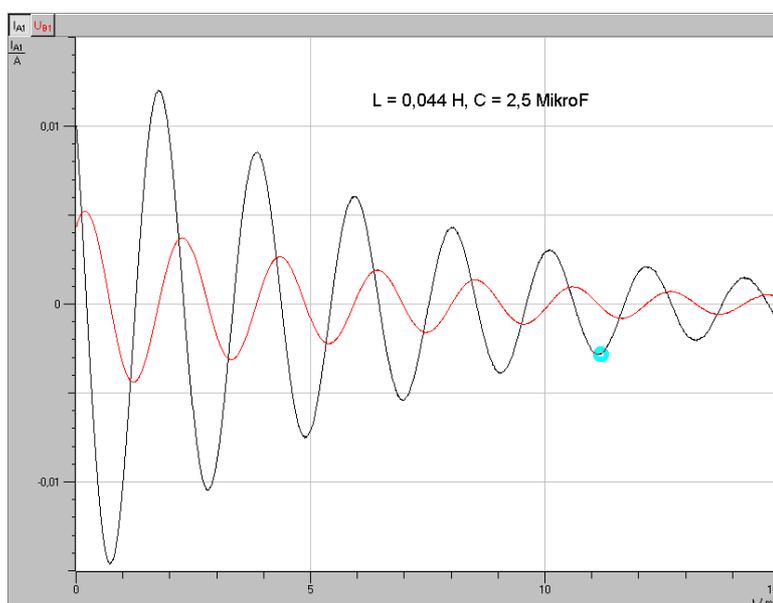


Abb. 5.3: Der im obigen Versuch gemessene zeitliche Verlauf von Stromstärke (Kurve mit großer Amplitude) und Spannung

Wenn der Strom durch die Spule zu fließen versucht, baut sich dort ein Magnetfeld auf, induziert eine Gegenspannung und hemmt damit zunächst den Stromfluss. Für den Ladungstransport zeigt eine Spule also eine gewisse Trägheit ähnlich wie die Masse eines Körpers bei mechanischen Bewegungen. Nach einer gewissen Zeit baut sich das magnetische Feld wieder ab, der Strom fließt weiter in die gleiche Richtung, bis die Kondensatorplatten mit umgekehrter Polarität aufgeladen sind und das elektrische Feld im Kondensator in die entgegengesetzte Richtung zeigt. Dann beginnt "das Spiel" von vorne: Durch Ladungsabfluss vom Kondensator verschwindet das elektrische Feld und baut in der Spule ein magnetisches Feld auf, allerdings wiederum in umgekehrter Richtung. Wenn es keine Reibungsverluste gäbe, würde dieser Vorgang sich dauernd wiederholen. Man beginnt mit einem elektrischen Feld im Kondensator, dieses baut sich ab und mit umgekehrtem Vorzeichen wieder auf, dann wieder ab und mit umgekehrtem Vorzeichen wieder auf, usw. Es entsteht also eine periodische

Schwingung der Spannung bzw. Ladung und der elektrischen Feldstärke des Kondensators und der Stromstärke und der magnetischen Feldstärke der Spule. Die

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

Frequenz f , mit der sich die einzelnen Prozesse wiederholen, ist durch eine einfache Formel gegeben, in der die Kapazität C des Kondensators und die Induktivität L der Spule vorkommen.

Wir nennen ein solches System einen Schwingkreis. Das elektrische Feld in dem Kondensator sind mehr oder weniger stark auf den Raum zwischen den Platten konzentriert. Macht man die Platten kleiner, quillt das Feld heraus und man kann es auch an anderen Orten des Raumes nachweisen. Bei der Spule entsteht unmittelbar ein magnetisches Feld, das in den Raum hinausreicht. Mit dem Schwingkreis haben wir ein Instrument, mit dem man periodisch veränderliche Felder mit kontrollierbarer Frequenz in der Umgebung dieses Schwingkreises herstellen kann. Wieweit die Felder reichen, hängt von der Bauart des Schwingkreises ab. Wenn man den Kondensator ganz aufbiegt, entsteht eine Antenne, mit der Radiowellen abgestrahlt werden können. Durch Variation der Konstanten C und L für Kondensator und Spule kann man die Frequenz f der Radiostrahlung variieren. Wir wissen bereits, dass das Produkt aus Frequenz f und Wellenlänge λ die Wellengeschwindigkeit c_w , ergibt. Es war eine große Sensation, als man aus Maxwells Gleichungen erkannte, dass diese Geschwindigkeit c_w für elektromagnetische Wellen gleich der Lichtgeschwindigkeit c ist. Dies wurde in einem Experiment nachgeprüft.

Versuch: Messung von Frequenz und Wellenlänge bei Dezimeterwellen

Ein Sender, dessen Frequenz zu 434 MHz gemessen wurde, sendet mit Hilfe einer Antenne elektromagnetische Wellen aus, die gegen eine Metallwand laufen, dort



Abb. 5.4: Schema des experimentellen Aufbaus mit dem Sender links und der Metallwand rechts. Dazwischen der Empfangsdipol mit angeschlossenen Stromstärke-Messinstrument.

reflektiert werden und sich im Bereich vor der Wand mit den einlaufenden Wellen überlagern. Dabei tritt sowohl unmittelbar an der Wand als auch in Abständen von $n \lambda/2$ destruktive Interferenz auf. Mit einem Empfangsdipol, der an ein Vielfachmessinstrument angeschlossen ist, suchten wir die Stellen minimalen Stromflusses und maßen deren Abstand von der Wand. Daraus ergab sich die Wellenlänge $\lambda \approx 70$ cm und für die Wellengeschwindigkeit $c_w = 304000$ km/s.

Damit wurde es plausibel, dass Licht und Radiowellen von gleicher Natur sind und sich nur durch die Wellenlänge unterscheiden. Im Weiteren experimentieren wir mit Mikrowellen, das sind Radiowellen mit einer Wellenlänge im Zentimeterbereich.

5.3 Experimente mit Mikrowellen

Mit Mikrowellen lassen sich fast alle optischen Phänomene relativ einfach demonstrieren. Dies soll an 3 Beispielen gezeigt werden, mit denen die Analogie von Licht- und elektromagnetischen Wellen verdeutlicht werden soll.

Versuch: Reflexion, Brechung und Interferenz

Ein Mikrowellensender wurde bei einer Frequenz von 10 GHz (Gigahertz) betrieben, die Wellen haben also eine Wellenlänge von 3 cm. Durch die trichterförmige Anordnung vor der Antenne werden die Wellen, die mit einer Niederfrequenz von 1 kHz moduliert sind, im wesentlichen in Vorwärtsrichtung gebündelt. Nachgewiesen werden die Mikrowellen mit einer Empfangsantenne, von der die Niederfrequenz über einen Verstärker auf einen Lautsprecher gegeben wird.

Zunächst wurde gezeigt, dass auch für Mikrowellen das aus der Optik bekannte Reflexionsgesetz gilt: Einfallswinkel = Ausfallswinkel.

Als nächstes wurde Mikrowellenstrahlung auf ein Kunststoffprisma geschickt und auf Grund des Unterschieds in der optischen Dichte beim Ein- und Austritt zweimal gebrochen, so dass die Mikrowellen deutlich abgelenkt nachgewiesen werden konnten.

Als letztes wurde die Beugung und Interferenz am Doppelspalt durchgeführt: Die Mikrowellen werden auf eine Anordnung aus zwei 3 cm breiten Spaltöffnungen geschickt,

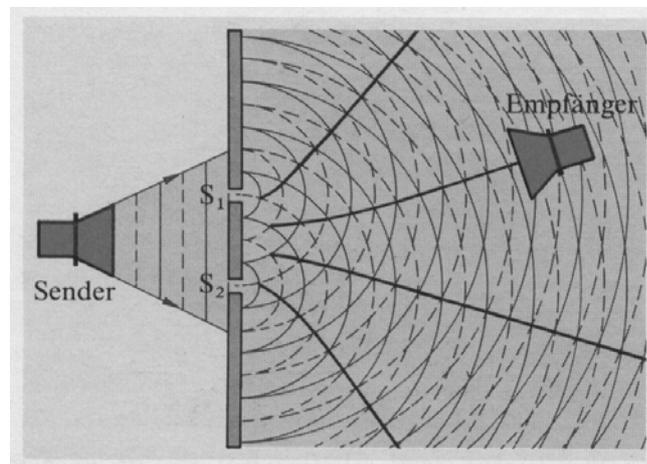


Abb. 5.5: Doppelspaltexperiment mit Mikrowellen. Schwarz eingezeichnet sind die "Straßen" destruktiver Interferenz

deren Mitten einen Abstand von ca. $9\text{ cm} = 3\lambda$ haben. Bewegt man hinter diesem Hindernis den Empfänger auf einem Viertel- bzw. Halbkreis um die Mitte des Doppelspalts, so hörte man abwechselnd Lautstärkemaxima und -minima, wodurch sich die Stellen konstruktiver und destruktiver Interferenz bemerkbar machten. Hinter den beiden Öffnungen breiten sich also - ebenso wie wir es bei den Wasserwellen gesehen haben - zwei Elementarwellen aus, die miteinander interferieren. Dies kann eindrucksvoll dadurch bestätigt werden, dass man an einer Stelle destruktiver Interferenz einen der beiden Spalte schließt. Obwohl dann insgesamt weniger Intensität auf die Rückseite des Hindernisses gelangt, hört man nun einen deutlichen Ton.

5.4 Radiostrahlung aus dem Weltall

Auch wenn die Atmosphäre um die Erde durchsichtig erscheint, dass man glauben könnte, man könne "alles" im Weltall sehen, so täuscht der naive Eindruck. Es gibt nämlich nur zwei "Fenster" im Spektrum der elektromagnetischen Strahlung, für die unsere Atmosphäre durchsichtig ist. Es ist ein Glück für das Leben auf dieser Erde, dass eines der Fenster im Bereich des sichtbaren Lichtes liegt. Das andere Fenster liegt im Radiobereich bei Wellenlängen $1 \text{ mm} < \lambda < 10 \text{ m}$. Gibt es in diesem Bereich überhaupt Strahlung aus dem Weltall?

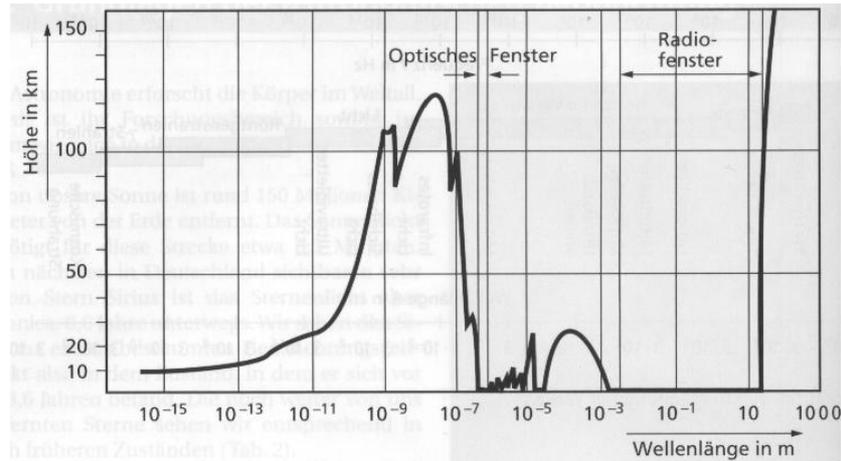


Abb. 5.6: Absorption elektromagnetischer Strahlung verschiedener Wellenlängen durch die Erdatmosphäre. Die Kurve gibt diejenige Höhe an, bei der die einfallende Strahlung auf 10 % ihrer ursprünglichen Intensität abgefallen ist.

Nachdem während des 2. Weltkriegs die Radartechnik entwickelt worden war, richtete man die Antennen auch auf den Himmel und fand ein weites Spektrum von Radiostrahlung, das von einzelnen punktförmigen Objekten oder von größeren Himmelsbereichen herrührt. Das Spektrum besteht sowohl aus diskreten Linien als auch aus kontinuierlichen Anteilen. Als Beispiel für ein Teleskop, das im Radiobereich eingesetzt wird, zeigen wir das Radioteleskop des MPI in Effelsberg in der Eifel, das einen Durchmesser von 100 m hat und in alle Richtungen gedreht werden kann (siehe Abb. 5.7).

Als Beispiel für elektromagnetische Strahlung, die im Radiobereich liegt, sei die $\lambda = 21$ cm Linie genannt, die von neutralen Wasserstoffatomen ausgesandt wird. Es handelt sich um einen Hyperfein-Übergang zwischen Zuständen mit anti-paralleler und paralleler Stellung von Kern- und Elektronenspin. Im Weltall gibt es im interstellaren Bereich große Gebiete, die aus atomarem Wasserstoff bestehen und die 21 cm Linie aussenden und damit "sichtbar" werden.

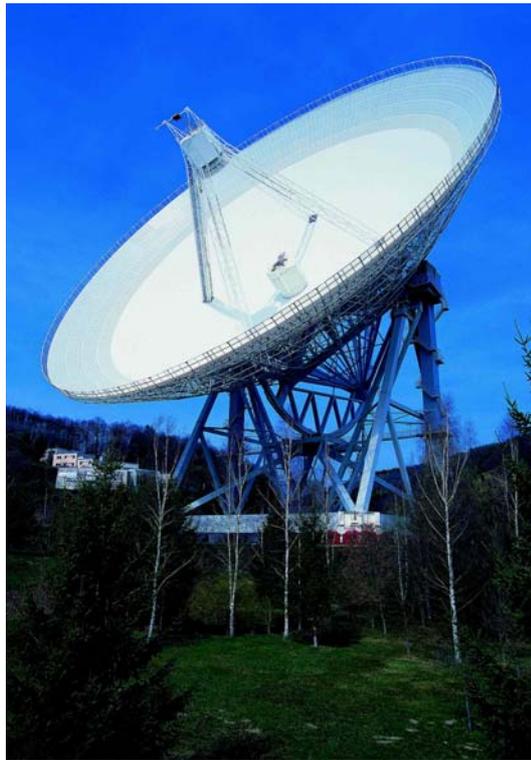


Abb. 5.7: Das 100 m Radioteleskop in Effelsberg in der Eifel

5.5 Biographie: Heinrich Hertz (1857 – 1894)

Hertz stammte aus einer wohlhabenden Familie des Hamburger Großbürgertums. Der Vater, zunächst Anwalt, dann Richter und schließlich Mitglied des Hamburger Senats, war jüdischer Abstammung, doch die Familie war getauft und strebte nach völliger Assimilation. Juden war im Kaiserreich die damals höchste soziale Rangstufe des Offiziers praktisch verschlossen, so dass sie oft mit der begehrten Stellung des Universitätsprofessors ihre soziale Stellung aufzuwerten versuchten.

Memoiren, Briefe und Tagebücher belegen, wie kultiviert, aktiv und nobel die Familie Hertz lebte. So ist Heinrichs Leben von frühester Kindheit an zu verfolgen. Er war sowohl von seinen geistigen wie auch seinen handwerklichen Fähigkeiten eine Art Wunderkind. Er besuchte elitäre Schulen, war dort stets der Beste, lernte viele Sprachen, u.a. Arabisch, rezitierte Homer auf Griechisch und Dante auf Italienisch. Dennoch war er kein Streber, er liebte die Natur und war gern in den Bergen.

An der Universität studierte er zunächst Maschinenbau, wechselte aber bald zur Physik.



1878 ging Hertz von München nach Berlin, wo Helmholtz sofort die Begabung des jungen Mannes erkannte und ihm einen Forschungsauftrag auf dem Gebiet der Elektrizitätslehre gab. Bereits 1880 war Hertz Helmholtz' Assistent. Hertz wissenschaftliche Leistungen beruhten auf der Verbindung von ungewöhnlicher analytischer Fähigkeit und einer außerordentlichen experimentellen Begabung.

Der wichtigste Abschnitt seiner Arbeit begann, als er 1886 Professor an der Technischen Hochschule in Karlsruhe wurde. Schon vorher hatte er theoretische Überlegungen zur Maxwellschen Theorie angestellt, aus denen hervorging, dass es elektromagnetische Wellen geben müsse. Er versuchte nun, sehr hochfrequente elektromagnetische Schwingungen zu erzeugen, was ihm 7 Jahre nach Maxwells Tod im Oktober 1886 gelang. Mit einem von Funken angeregten Schwingkreis konnte er in einem 2. Schwingkreis sog. "Nebenfunkn" nachweisen. Mit diesen Geräten wiederholte Hertz viele grundlegende Optikexperimente und konnte zeigen, dass sich seine Wellen mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Die Ergebnisse seiner Experimente waren ein schlüssiger Beweis für die Maxwellsche Theorie. Ob Hertz auch die Anwendbarkeit seiner Forschungen erkannt hat, ist umstritten.

Neben den elektromagnetischen Wellen beobachtete Hertz eine andere Erscheinung. Die Funkenbildung in seinen Schwingkreisen verstärkte sich, wenn er sie mit UV-Licht bestrahlte. Er hatte den Photoeffekt gesehen, dessen Tragweite für die weitere Entwicklung der Physik jedoch nicht erkannt und auch nicht mehr miterlebt.

Hertz wurde, nachdem seine Experimente an vielen Laboratorien wiederholt und ergänzt worden waren, weltberühmt, so dass sich der preußische Staat einen solch genialen Wissenschaftler nicht entgehen lassen wollte. Er erhielt einen Ruf nach Berlin und einen nach Bonn, den er annahm. Dort wurde er Nachfolger von Clausius und zog auch in dessen Haus ein. Durch den Umzug kam es zu Verzögerungen in der experimentellen Arbeit, so dass sich Hertz wieder mehr theoretischen Arbeiten widmete. Er veröffentlichte seine gesammelten Abhandlungen zur Elektrizitätslehre, die für viele Leute, denen Maxwells Originalarbeiten zu schwierig waren, zu einem Standardwerk der Elektrodynamik wurden. Er bemühte sich ferner um ein anderes fundamentales Problem, das der Elektrodynamik bewegter Körper, das aber erst von Einstein gelöst werden konnte.

Als alle Aussichten für Hertz und seine Familie günstig schienen, schlug das Schicksal zu. Eine tückische Krankheit – ein Knochenleiden – befiel seinen Schädel. Seit etwa 1892 litt er unter starken Schmerzen und starb am 1.1.1894 im Alter von nur 34 Jahren. Sein Lehrer und Mentor Helmholtz, der ihn nur um einige Monate überlebte, meinte: In klassischer Zeit hätte man gesagt, er sei dem Neid der Götter geopfert worden.