

Zeitschrift: Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri

Herausgeber: Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe

Band: 66 (1988)

Heft: 11

Artikel: Nachweis der elektromagnetischen Wellen vor 100 Jahren

Autor: Severin, Hans

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-876267>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 29.03.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Nachweis der elektromagnetischen Wellen vor 100 Jahren

Hans SEVERIN, Bochum¹

Zusammenfassung. Die Hertz'schen Versuche in den Jahren 1885–1889 sind ein bedeutender Markstein in der Geschichte der Naturwissenschaften, sie erbrachten die unwiderlegbare Bestätigung der bis dahin umstrittenen Maxwell'schen Feldtheorie. In bemerkenswert kurzer Zeit und mit aus heutiger Sicht bescheidenen Hilfsmitteln konnte Hertz zunächst den von Maxwell postulierten Verschiebungsstrom im Dielektrikum und im Luftraum experimentell nachweisen, elektromagnetische Wellen erzeugen und Maxwell's elektromagnetische Theorie des Lichts sichern. Die Tragweite, der Hertz'schen Arbeiten für die Geschichte der Technik war kaum geringer als die Entdeckung Maxwell's, schon wenige Jahre später folgten die drahtlose Telegrafie und mit ihr die Entwicklung der Nachrichtenübertragungstechnik. 1889 gelingt G. Marconi eine drahtlose Verbindung über den Ärmelkanal, 1901 über den Atlantik, 1898 verbessert F. Braun den Funkensender entscheidend durch die Verwendung gekoppelter Kreise und steigert 1901 die Empfangsempfindlichkeit durch die Erfindung des Kristalldetektors. Etwa von 1915 an dominieren in der Sendertechnik für den Nachrichtenverkehr auf Lang- und Längstwellen Maschinen zur Erzeugung ungedämpfter Schwingungen hoher Frequenz, die erst Anfang der 30er Jahre durch die Röhrensender verdrängt wurden. Dieser erste grosse Abschnitt der Nachrichtenübertragungstechnik wird im folgenden beschrieben.

Mise en évidence des ondes électromagnétiques il y a 100 ans

Résumé. Les essais hertiens au cours des années 1885-1889 marquèrent d'une pierre blanche l'histoire des sciences, puisqu'ils apportèrent la preuve irréfutable de la théorie des champs de Maxwell contestée à l'époque. En un temps remarquablement court et avec des moyens que l'on qualifierait aujourd'hui de modestes, Hertz prouva dans un premier temps par voie expérimentale le courant de déplacement dans le diélectrique et dans l'espace postulé par Maxwell, engendra des ondes électromagnétiques et confirma la théorie de Maxwell du caractère électromagnétique de la lumière. La portée des travaux de Hertz pour l'histoire de la technique n'était guère moindre que la découverte de Maxwell; quelques années plus tard succéda la télégraphie sans fil qui donna naissance à la technique des radiocommunications. En 1889, G. Marconi parvint à établir une liaison radioélectrique par-dessus la Manche et en 1901 par-dessus l'Atlantique. En 1898, F. Braun améliora décisivement les émetteurs à étincelles par l'utilisation de circuits couplés et, en 1901, par l'accroissement de la sensibilité de réception à la suite de la découverte du détecteur à cristal de galène. A partir de 1915 environ, les machines produisant des oscillations entretenues de haute fréquence dominèrent dans la technique d'émission sur ondes longues et très longues. En effet, les oscillateurs à haute fréquence à tubes ne supplantèrent ces machines qu'au début des années de 1930. Ce premier volet important de la technique des radiocommunications est décrit ci-après.

100 anni fa: conferma sperimentale dell'esistenza delle onde elettromagnetiche

Riassunto. Gli esperimenti effettuati da Hertz tra il 1885 e il 1889 rappresentano una pietra miliare nella storia delle scienze poiché confermarono in modo irrefutabile la teoria dei campi unitari di Maxwell, considerata fino ad allora da quasi tutti gli scienziati con una certa diffidenza. In brevissimo tempo e con mezzi modesti rispetto a quelli attuali, Hertz poté dapprima provare sperimentalmente lo spostamento della corrente nel dielettrico e nell'aria ipotizzato da Maxwell, quindi generare onde elettromagnetiche e confermare la teoria del campo elettromagnetico di Maxwell. Nella storia della tecnica l'opera di Hertz non fu meno importante delle scoperte di Maxwell; seguì, pochi anni dopo, la telegrafia senza fili e con essa lo sviluppo della tecnica delle radiotrasmissioni. Nel 1889 G. Marconi riuscì a stabilire un collegamento senza fili attraverso il canale della Manica e nel 1901 attraverso l'Atlantico. F. Braun nel 1898 migliorò il trasmettitore a scintilla utilizzando circuiti accoppiati, nel 1901 aumentò la sensibilità di ricezione inventando il rivelatore a cristallo. Dal 1915, nella tecnica di trasmissione su onde lunghe e lunghissime, si utilizzarono macchine che generavano oscillazioni non smorzate di alta frequenza; queste macchine furono sostituite, negli anni '30, dai trasmettitori a valvole. L'autore descrive nel suo articolo questo importante capitolo della tecnica delle radiotrasmissioni.

1 Einleitung

In den Jahren 1887/88 gelang Heinrich Hertz an der damaligen Technischen Hochschule Karlsruhe der experimentelle Nachweis von elektromagnetischen Wellen, nachdem Maxwell 1864 deren Existenz aus seiner Feldtheorie gefolgert hatte. Heinrich Hertz' Forschungsergebnisse haben nicht nur die Entwicklung von Forschung und Technik entscheidend beeinflusst, sie haben sich auch auf das Leben der ganzen Menschheit in einem damals nicht geahnten Ausmass ausgewirkt. Die Universität Karlsruhe nahm das 100jährige Jubiläum zum Anlass, an den grossen deutschen Physiker durch eine Vortragsreihe «Heinrich Hertz – Werk und Wirkung», durch ein Heinrich-Hertz-Symposium und durch eine Ausstellung «100 Jahre Radiowellen» zu erinnern [1, 2, 3]. Gedenkveranstaltungen und -feiern fanden auch weltweit statt, z. B. während des Internationalen Symposiums der «Microwave Theory and Technique-Society» im Mai dieses Jahres in New York. Hertz' Ar-

beiten liegen in drei Bänden als «Gesammelte Werke» [4] vor, einen Überblick über sein Leben vermittelt eine von seiner Tochter Johanna herausgegebene Zusammenstellung «Erinnerungen, Briefe, Tagebücher» [5].

2 Hochgestecktes Ziel

Nachdem Heinrich Hertz (Fig. 1) Ende 1884, kaum 28jährig, auf den Lehrstuhl für Experimentalphysik in Karlsruhe berufen worden war, beschäftigte er sich dort während seiner vierjährigen Tätigkeit vorwiegend mit Fragen der Elektrodynamik und hatte das hohe Ziel, die Richtigkeit der Maxwell'schen Differentialgleichungen durch das Experiment zu bestätigen. Maxwell hatte das von Ampère entwickelte Durchflutungsgesetz um den Verschiebungsstrom im Dielektrikum [6] ergänzt. Dieser geniale Schritt bedeutete, dass die Entstehung eines zeitlich sich ändernden Magnetfeldes nicht mehr – wie nach bisheriger Auffassung – an das Vorhandensein von Leitungsströmen gebunden ist, sondern dass auch ein sich änderndes elektrisches Feld überall im Raum ein ma-

¹ Herr Dr. Hans Severin war ehemals ordentlicher Professor am Institut für Hoch- und Höchstfrequenztechnik der Ruhr-Universität Bochum.



Fig. 1
Heinrich Hertz 1886

netisches Feld induziert. Da nach dem Induktionsgesetz auch das Umgekehrte gilt, folgte, dass jede Änderung eines elektromagnetischen Feldes sich mit endlicher Geschwindigkeit im freien Raum ausbreiten muss. Die Hinzunahme des Verschiebungsstromes in der ersten Maxwellschen Gleichung führte also zwingend auf die Existenz von «elektrischen Wellen», die es in der bisherigen Theorie nicht gegeben und die niemand bislang wissentlich beobachtet hatte. Für die Ausbreitungsgeschwindigkeit dieser Wellen errechnete Maxwell aus elektrischen Daten den durch Messungen schon bekannten Wert der Lichtgeschwindigkeit und zog daraus die Folgerung, dass Licht ein elektromagnetischer Wellenvorgang sein muss. Allerdings konnte man in seinen Aufzeichnungen nichts darüber finden, wie elektromagnetische Wellen zu erzeugen sind – eine Voraussetzung für die Prüfung der Richtigkeit seiner revolutionierenden Aussagen.

Dies gelang erst gut 20 Jahre später Heinrich Hertz, der in der «Einleitenden Übersicht» zu [4] Bd. II den Anstoss zu seinen Versuchen wie folgt beschreibt: «Im Jahre 1879 hatte die Akademie der Wissenschaften zu Berlin als Preisarbeit die Aufgabe ausgeschrieben, irgendeine Beziehung zwischen den elektrodynamischen Kräften und der dielektrischen Polarisation der Isolatoren experimentell nachzuweisen. . . . Ich überlegte mir die Aufgabe und berechnete den Erfolg, welcher sich etwa unter den günstigsten Verhältnissen erwarten liess, unter der Anwendung der Schwingungen Leydener Flaschen oder der Anwendung offener Induktionsapparate. Das Ergebnis war freilich nicht das gewünschte; es zeigte sich, dass eine unzweifelhafte Wirkung kaum zu hoffen war, vielmehr nur eine solche, welche an der Grenze der Beobachtung lag. Ich verzichtete daher auf die Bearbeitung jener Aufgabe; es ist mir auch nicht bekannt geworden, dass dieselbe eine anderweitige Bearbeitung gefunden hätte. Es blieb aber mein Ehrgeiz, die damals aufgegebene Lösung später dennoch auf irgendeinem

neuen Wege zu finden, zugleich war meine Aufmerksamkeit geschärft für Alles, was mit elektrischen Schwingungen zusammenhing. Es war nicht wohl möglich, dass ich eine neue Form solcher Schwingungen übersehen konnte, falls ein glücklicher Zufall mir eine solche in die Hände spielte.»

3 Glücklicher Zufall

Dieser Zufall trat im Herbst 1886 ein, als Hertz bei der Vorbereitung eines Vorlesungsexperiments überrascht war, «dass es nicht nöthig war grosse Batterien durch die eine Spirale zu entladen, um in der anderen Funken zu erhalten» ([4] Bd. II, S. 2). Die eingehende Untersuchung dieser Beobachtung [7] ergab, dass nicht nur die Entladung Leydener Flaschen, sondern dass «vielmehr unter besonderen geeigneten Umständen die Entladung jedes beliebigen Leiters zu Schwingungen Anlass giebt. Diese Schwingungen können viel kürzer sein als die der Flaschen. . . . Wir haben jetzt Zeichen, für welche der dreissigmillionste Theil der Sekunde nicht mehr kurz ist. Aber dieselben würden uns noch wenig nützen, wenn wir nicht imstande wären, ihre Wirkung bis in die beabsichtigte Entfernung von etwa zehn Metern auch wirklich wahrzunehmen. Es giebt hierfür ein sehr einfaches Mittel. Dorthin, wo wir die Kraft wahrnehmen wollen, bringen wir einen Leiter, etwa einen geraden Draht, welcher durch eine feine Funkenstrecke unterbrochen ist. Die rasch wechselnde Kraft setzt die Electricität des Leiters in Bewegung und lässt einen Funken in demselben auftreten. . . . Zunächst drängt sich uns eine Fülle von Fragen entgegen. Unter welchen Umständen werden unsere Schwingungen am stärksten? Welche Form geben wir am besten dem empfangenden Leiter? Wir können gerade, wir können kreisförmige Drähte, wir können Leiter anderer Form wählen, welche Grösse wählen wir? Schnell zeigt sich, dass dieselbe nicht gleichgültig ist, dass wir nicht jede Schwingung mit demselben Leiter untersuchen können, dass Beziehungen zwischen beiden bestehen, welche an die Resonanzerscheinungen der Akustik erinnern» [8]. Als Sendeantenne benutzte Hertz einen geraden, 2,6 m langen und 2 mm starken Kupferdraht mit kapazitiver Belastung an den Enden durch «Conductoren» (Fig. 2) [7]. Die Erregung eines «Dipols» geschah in seiner Mitte durch die vom Induktorium gespeiste Funkenstrecke. Als Empfangsantenne verwendete Hertz einen quadratischen Rahmen aus 2 mm starkem Kupferdraht von etwa 75 cm Seitenlänge mit einer Funkenstrecke als Indikator zur Anzeige der empfangenen Wellen (Fig. 2). In einer ausgedehnten Versuchsreihe erzielte er durch Änderung der Drahtlänge des Rahmens eine Resonanzüberhöhung der Funkenlänge um etwa den Faktor drei (Fig. 3) [7]. Zum Hertzischen Oszillator kam zur Wahrnehmung der Schwingungen der Hertzische Resonator.

Mit derartigen Erregern und Empfängern für «äusserst schnelle elektrische Schwingungen» konnte Hertz – in Erinnerung an das Thema der Berliner Preisarbeit – beweisen, «dass die elektrischen Vorgänge in den Isolatoren neben sicher nachgewiesenen elektrostatischen Wirkungen auch die entsprechenden elektrodynamischen Wirkungen mit sich führen» [9]. Dazu wurde der Empfänger in der Nähe des Oszillators so angeordnet,

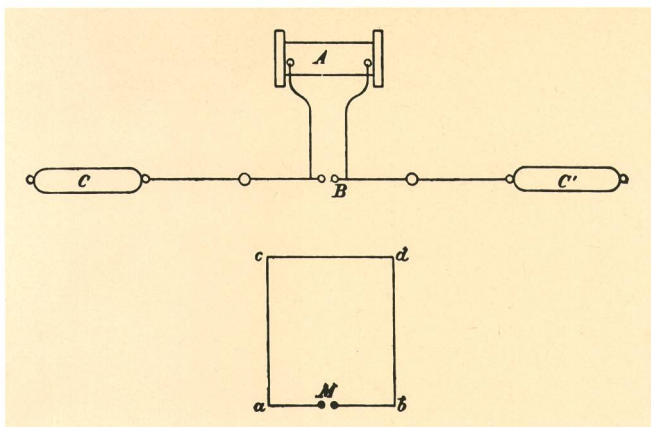


Fig. 2
Von Heinrich Hertz verwendete Sende- und Empfangsantenne [7]

dass er zunächst funkenfrei blieb. «Wird jetzt das Gleichgewicht durch Annäherung von Leitern gestört, so treten wieder Funken auf», und die gleiche Erscheinung wird auch beobachtet, wenn anstelle der Leiter «grössere Massen von Isolatoren genähert werden. Bei der Geschwindigkeit der Schwingungen sind nämlich die in den Isolatoren durch dielektrische Polarisierung verschobenen Electricitätsmengen von derselben Grössenordnung, wie die in den Metallen durch Leitung in Bewegung gesetzten». Die Äquivalenz von Leitungsstrom und Verschiebungsstrom im Dielektrikum nach der ersten Maxwell'schen Gleichung war durch das Experiment als richtig bewiesen, ein grosser Erfolg im damaligen Streit um die Theorie der Elektrodynamik erzielt.

Nachdem ihm der Nachweis des Verschiebungsstroms im Dielektrikum gelungen war, ging Hertz der Frage nach, «ob auch im Luftraum veränderliche elektrische Kräfte mit Polarisierungen von elektrodynamischer Wirksamkeit verknüpft sind. Man hat die Folgerung ziehen können, dass, wenn diese Frage zu bejahen ist, die elektrodynamischen Wirkungen sich mit endlicher Geschwindigkeit ausbreiten müssen» [10]. Während bei den bisherigen Versuchen Erreger und Empfänger verhältnismässig dicht beieinander angeordnet waren, vergrösserte Hertz jetzt ihren Abstand so weit, wie es der Hörsaal seines Instituts zulies, nämlich bis zu 15 Metern. Dabei hat er «Erscheinungen beobachtet, welche eine Reflexion der Inductionswirkung von den Wänden des Gebäudes anzudeuten schienen . . . , Prüfte ich Funken im secundären Leiter in sehr grossen Entfernungen vom primären Leiter, woselbst die Funken schon äusserst schwach waren, so bemerkte ich, dass in den meisten Lagen des secundären Kreises die Funken wieder sehr deutlich zunahmen, wenn ich mich einer festen Wand näherte, um dann in unmittelbarer Nähe derselben fast plötzlich zu verschwinden. Die einfachste Erklärung schien mir diese, anzunehmen, dass die sich wellenförmig ausbreitende Inductionswirkung von den Wänden reflectirt würde, und dass die zurückgeworfenen Wellen die ankommenden in gewissen Entfernungen verstärkten, in anderen schwächten, indem durch die Interferenz beider stehende Wellen im Luftraum sich ausbildeten. Indem ich die Bedingungen mehr und mehr günstig gestaltete, trat die Erscheinung mehr und mehr hervor, und die gegebene Deutung wurde immer wahr-

scheinlicher» [11]. Um der einen Stirnwand des Hörsaals «noch mehr den Charakter einer leitenden Fläche zu ertheilen, wurde an derselben ein Zinkblech von 4 m Höhe und 2 m Breite befestigt. . . . Gegenüber der Mitte dieser Wand in 13 m Abstand von derselben, also in 2 m Abstand von der Gegenwand, wurde der primäre Leiter (d. i. der Hertz'sche Oszillator, der Verf.) aufgestellt». Der von der Wand zum Erreger hin verschiebbare Empfänger zeigte durch sein Funkenspiel deutliche Knoten und Bäuche des Interferenzfeldes, aus deren Abstand sich eine Wellenlänge von zirka 9 m ergab [11]. Durch Multiplikation mit der berechneten Schwingungsdauer fand Hertz eine Ausbreitungsgeschwindigkeit, «welche der des Lichtes verwandt ist». Die Existenz elektromagnetischer Wellen war erwiesen, die Vorhersage Maxwells glänzend bestätigt.

Hertz' Freude über diese Ergebnisse kommt zum Ausdruck in einem Brief seiner Frau Elisabeth vom 9. November 1887 an seine Eltern ([5], S. 180): «Heins hat sein Manuskript Samstag an Helmholtz' abgeschickt und darauf schon Dienstag als Antwort eine Karte von ihm erhalten, die nur folgende Worte enthält: «Manuskript

¹ Hermann von Helmholtz, Professor für Experimentalphysik in Berlin und Lehrer von Heinrich Hertz während dessen Studium und Assistententätigkeit in Berlin (1878–1883)

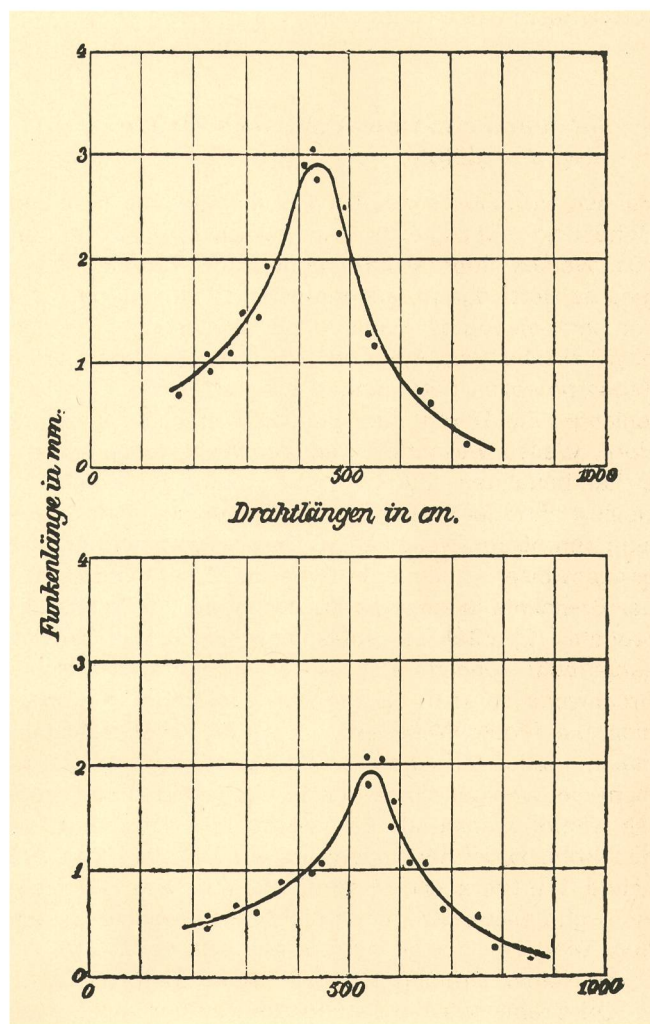


Fig. 3
Resonanzkurven der von Heinrich Hertz verwendeten Empfangsantennen [7]

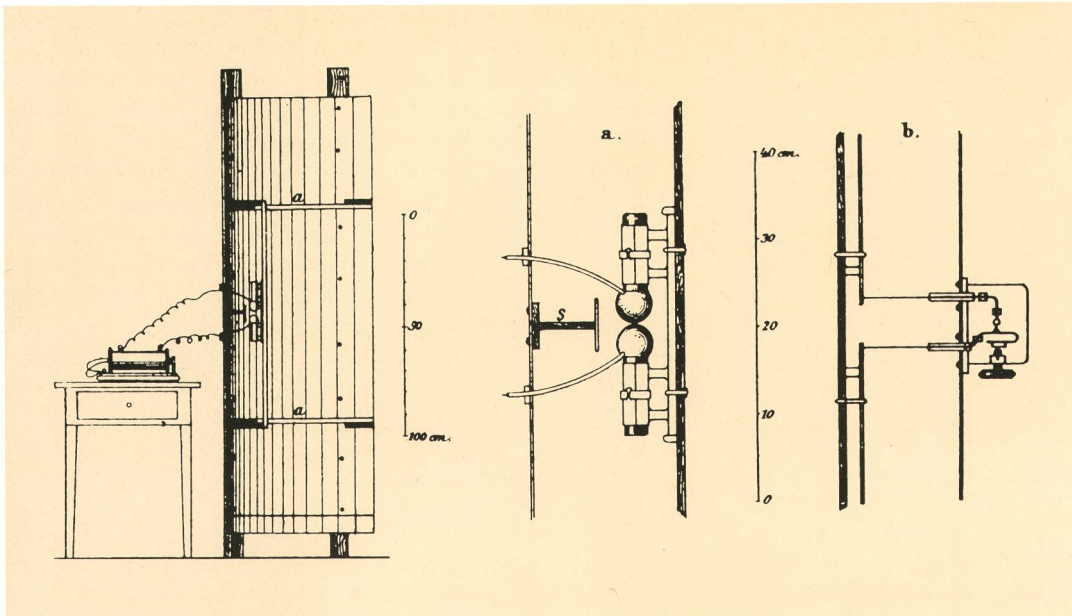


Fig. 4
Heinrich Hertz' Hohlspiegelantenne zur Bündelung elektromagnetischer Wellen [12]

erhalten. Bravo! Werde es Donnerstag überreichen zum Druck. H.v.Htz.) Das hat uns natürlich grosse Freude gemacht; aber ausserdem hat Heins Montag schon neue Versuche begonnen. . . Er schüttelt die schönen Sachen gegenwärtig nur so aus dem Ärmel! Das macht ihn natürlich sehr vergnügt und mich auch, wenn er mir mit strahlendem Gesicht davon erzählt.»

4 Licht und elektromagnetische Wellen sind das gleiche

Bei den anschliessenden Untersuchungen, die wohl den Höhepunkt und zugleich einen gewissen Abschluss seines Werkes über elektromagnetische Wellen bilden, ging es Hertz darum, experimentell zu zeigen, dass die von ihm erzeugten Wellen und Lichtwellen derselbe physikalische Vorgang sind – lediglich mit dem viele Zehnerpotenzen betragenden Unterschied in der Wellenlänge. Zur Durchführung dieser Versuche benötigte Hertz Wellen wesentlich kürzerer Wellenlänge als die bisher benutzten. Durch die Verwendung beträchtlich kleinerer Erreger gelang ihm die Erzeugung einer Strahlung von 60 cm Wellenlänge. Deren Bündelung konnte er nachweisen, indem er Erreger- und Empfänger dipol in der Brennlänge je eines parabolischen Hohlzylinders anordnete [12]. «Soll der Hohlspiegel (Fig. 4) die Fernwirkung recht concentrieren, so ist es vorteilhaft, seine Brennweite so klein als möglich zu wählen. Soll aber nicht die directe Welle die Wirkung der reflectierten sogleich wieder aufheben, so darf die Brennweite auch nicht viel weniger als ein Viertel Wellenlänge betragen. Ich wählte deshalb als Brennweite $12\frac{1}{2}$ cm und stellte den Hohlspiegel her, indem ich ein Zinkblech von 2 m Länge, 2 m Breite und $\frac{1}{2}$ mm Dicke über einem Holzgestell von genauer Krümmung in die gewünschte Gestalt bog. Die Höhe des Spiegels ergab sich so zu 2 m, die Breite seiner Öffnung zu 1,2 m, seine Tiefe zu 0,7 m. . . Die Drähte, welche die Entladung zuführten, liess ich den Spiegel durchsetzen; das Inductorium und die Elemente befanden sich demnach hinter dem Spiegel und störten nicht». Ganz analog war die Empfangsseite auf-

gebaut, wobei wiederum die beiden vom Empfangsdipol «zur Funkenstrecke führenden Drähte auf dem kürzesten Weg die Wandung des Spiegels isolirt durchsetzen. Die Funkenstrecke befand sich alsdann unmittelbar hinter dem Spiegel, und der Beobachter konnte sie einstellen und betrachten, ohne den Lauf der Wellen zu stören. . . Die grösste Entfernung, bis zu welcher ich unter Benutzung einer Thüröffnung den Strahl verfolgte, betrug 16 m» (Fig. 4) [12]. Heinrich Hertz hat mit dieser Anordnung zur Untersuchung von Ausbreitungsvorgängen – ohne es ahnen zu können – das Modell einer Richtfunkstrecke vorgestellt.

Durch den Hohlspiegel werden «die Wellen zusammengehalten und treten als kräftig dahin eilender Strahl aus. Wir können ihn durch Drehung des Spiegels in verschiedene Richtungen senden, wir können durch Aufsuchung des Weges, welchen er nimmt, seine geradlinige Ausbreitung erweisen» [8]. «Stellt man in die gerade Verbindungslinie der Spiegel senkrecht zur Richtung des Strahles einen Schirm von Zinkblech von 2 m Höhe und 1 m Breite, so verlöschen die secundären Funken vollständig. . . Isolatoren halten den Strahl nicht auf, durch eine Holzwand oder eine hölzerne Thür geht er hindurch. . . Dreht man die optische Achse des gebenden Spiegels nach rechts oder links um etwa 10° aus der richtigen Lage, so werden die secundären Funken schwach, bei einer Drehung um etwa 150° verlöschen sie» [12].

«Dass unser Strahl durch Transversalschwingungen gebildet wird und geradlinig polarisirt im Sinne der Optik ist, daran haben wir freilich schon nach der Art, in welcher wir ihn erzeugen, keinen Zweifel. Wir können die Thatsache aber auch durch den Versuch erweisen. Drehen wir unseren empfangenden Spiegel um den Strahl als Achse, bis seine Brennlänge und somit auch der secundäre Leiter in die horizontale Lage gelangt, so verschwinden die secundären Funken mehr und mehr, und wir erhalten bei gekreuzter Lage der beiden Brennlängen keine Funken, selbst wenn wir die Spiegel auf geringe Entfernung zusammenrücken. . . Ich liess nun einen achteckigen Hohlrahmen von 2 m Höhe und 2 m Breite

herstellen und denselben mit Kupferdrähten von 1 mm Dicke bespannen, alle Drähte waren einander parallel und jeder stand von seinem Nachbarn um 3 cm ab. Wurden jetzt die beiden Spiegel mit parallelen Brennlinien aufgestellt und der Drahtschirm senkrecht zum Strahl so in denselben eingeschoben, dass die Richtung der Drähte die Richtung der Brennlinien senkrecht kreuzte, so beeinträchtigte der Schirm die sekundären Funken so gut wie gar nicht. Wurde aber der Schirm dem Strahl in solcher Weise entgegengestellt, dass seine Drähte den Brennlinien parallel waren, so fing er den Strahl vollständig ab» [12].

Zur Bestätigung des Reflexionsgesetzes stellte Hertz «die beiden Hohlspiegel so nebeneinander, dass ihre Öffnungen nach derselben Seite blicken, und dass ihre Achsen auf einen etwa 3 m vor ihnen liegenden Punkt convergierten. Die Funkenstrecke des empfangenen Spiegels blieb selbstredend dunkel. Nunmehr stellte ich eine ebene verticale Wand aus dünnem Zinkblech von 2 m Höhe und 2 m Breite im Kreuzungspunkt der Achsen so auf, dass sie senkrecht auf der Mittellinie der Achsen stand. Ich erhielt einen lebhaften Funkenstrom, herrührend von dem von der Wand reflectirten Strahle. Der Funkenstrom erlosch, sobald die Wand um eine verticale Achse um etwa 15° nach der einen oder anderen Seite aus der richtigen Lage herausgedreht wurde» [12]. «Wir können den reflectirten Strahl verfolgen und uns überzeugen, dass die Gesetze der Reflexion die der Reflexion des Lichtes sind» [8].

«Um zu versuchen, ob eine Brechung des Strahles beim Übertritt aus Luft in ein anderes isolierendes Medium nachzuweisen wäre, liess ich ein grösseres Prisma aus sogenannten Hartpech, einer asphaltartigen Masse, herstellen. Die Grundfläche war ein gleichschenkliges Dreieck von 1,2 m Schenkellänge und einem brechenden Winkel von nahezu 30°. Die Höhe des ganzen Prismas, dessen brechende Kante vertical gestellt wurde, betrug 1,5 m. Da das Prisma aber ungefähr 12 Centner wog und als Ganzes zu schwer beweglich gewesen wäre, so war es aus drei übereinander gestellten Theilen von je 0,5 m Höhe zusammengesetzt» [12]: Der aus dem beobachteten Ablenkungswinkel der Wellen berechnete Brechungsindex 1,69 entsprach weitgehend dem nach der Maxwellschen Theorie aus der Dielektrizitätskonstanten des Materials sich ergebenden Wert.

Das Ziel war erreicht, die von Maxwell postulierten elektromagnetischen Wellen waren experimentell verwirklicht, die Richtigkeit der Maxwellschen Gleichungen bewiesen, die Fernwirkungstheorie widerlegt und schliesslich auch Maxwells elektromagnetische Theorie des Lichtes experimentell gesichert. Hertz hat dazu selbst gesagt: «Alle diese Versuche sind im Grunde sehr einfach, aber sie führen die wichtigsten Folgerungen mit sich. Sie sind vernichtend für jede Theorie, welche die elektrischen Kräfte als zeitlos den Raum überspringend ansieht. Sie bedeuten einen glänzenden Sieg der Theorie Maxwells» [8]. Und an anderer Stelle: «Wir haben die von uns untersuchten Gebilde als Strahlen elektrischer Kraft eingeführt. Nachträglich dürfen wir dieselben vielleicht auch als Lichtstrahlen von sehr grosser Wellenlänge bezeichnen. Mir wenigstens erschienen die be-

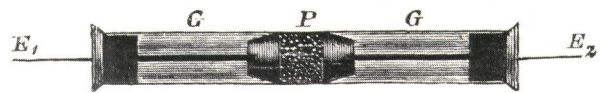


Fig. 5
Kohärer (oder «Fritter») nach Branly [14]
E₁, E₂ Elektroden G Glasröhre P Metallspäne

P Metallspäne

schriebenen Versuche in hohem Grade geeignet, Zweifel an der Identität von Licht, strahlender Wärme und elektrodynamischer Wellenbewegung zu beseitigen» [12]. So ganz einfach waren die Versuche allerdings nicht, wie man Hertz' Beschreibung seines durch eine «feine Funkenstrecke» unterbrochenen Empfängers entnimmt: «Die Funken sind mikroskopisch kurz, kaum ein hundertstel Millimeter lang; ihre Dauer beträgt noch nicht den millionsten Theil einer Sekunde. Es erscheint unmöglich, fast widersinnig, dass sie sollten sichtbar sein, aber im völlig dunklen Zimmer für das geschonte Auge sind sie sichtbar. An diesem dünnen Faden hängt das Gelingen unseres Unternehmens» [8]. Es grenzt für uns an ein Wunder, wie Hertz mit den aus heutiger Sicht doch recht bescheidenen Hilfsmitteln in erstaunlich kurzer Zeit diese ungeheuren Erfolge erzielen konnte.

5 Der Weg zur drahtlosen Telegrafie ist geöffnet

Heinrich Hertz, dem es darum ging, die Maxwellschen Postulate experimentell zu bestätigen und damit den Streit um die Grundgleichungen der Elektrodynamik zu beenden, hat mit seinen Versuchen die Grundlagen für die drahtlose Telegrafie geschaffen, sich selbst aber mit diesem Aspekt der technischen Anwendbarkeit seiner Ergebnisse nicht beschäftigt. Bevor es dazu kommen konnte, musste ein wesentlich empfindlicherer Empfänger für elektromagnetische Wellen gefunden werden, als es der Hertzsche Resonator mit Funkenstrecke war. Der entscheidende Schritt in diese Richtung gelang 1890 dem französischen Physiker E. Branly [13] mit seinem «Kohärer» (Fig. 5). Dessen wesentliches Element ist ein Konglomerat von lockerem Metallfeilicht zwischen zwei leitenden Kolben (Elektroden) in einem Glasröhrchen. Wegen des schlechten Kontakts der einzelnen Metallteilchen besteht zwischen den Zuleitungen ein sehr hoher Widerstand, so dass beim Anschluss an eine Batterie zunächst praktisch kein Strom fliesst. Treffen elektromagnetische Wellen auf das Röhrchen, dann werden benachbarte Metallteilchen durch feine Funken zwischen ihnen miteinander leicht verschweisst, durch die so entstehende leitende Brücke sinkt der Widerstand des Kohärenten beträchtlich ab, und der Stromkreis ist geschlossen. Über ein in ihn eingefügtes Relais zeigt eine elektrische Klingel oder ein Morseschreiber das Auftreffen der Wellen an. Um einen Dauerstrom durch den leitend gewordenen Kohärer zu vermeiden, muss dieser durch leichte mechanische Erschütterungen wieder nichtleitend gemacht werden, wenn kein Signal mehr vom Sender her kommt. Bei dem von Branly vorgeschlagenen Empfänger (Fig. 6) geschieht dies durch den gegen das Glasröhrchen schlagenden Klöppel einer elektrischen Klingel.

6 Erste Versuche Marconis

Als erster benutzte der russische Physiker *A. St. Popow* 1895 den Kohärer zur Aufzeichnung luftelektrischer Entladungen. Er kam auf die Idee, eine Seite des Kohäriers mit dem Blitzableiter, die andere mit Erde zu verbinden, und konnte so durch einen Morseschreiber Blitzschläge aufzeichnen lassen, die in einem Umkreis von mehreren Kilometern auftraten. Er wurde in den Folgejahren der Pionier der drahtlosen Telegrafie in Russland, als er von den Erfolgen des italienischen Ingenieurs *G. Marconi* hörte. Dieser hatte nach intensiver Beschäftigung mit den Hertz'schen Versuchen 1894 den Plan gefasst, elektromagnetische Wellen zur drahtlosen Übertragung von Nachrichten zu verwenden. Für seine anfänglichen Experimente stellte er drei wesentliche Elemente zusammen: Auf der Senderseite einen Funkeninduktor und eine Funkenstrecke, wie Hertz sie benutzt hatte, auf der Empfängerseite die «Antenne» nach Popow und den Kohärer von Branly. Damit gelang es ihm Ende 1895 die ersten Signale im Freien mehrere hundert Meter weit zu übertragen [16]. Zur Überbrückung grösserer Entfernungen brachte Marconi auch an der Funkenstrecke eine Antenne an und konnte damit Morsezeichen über viele Kilometer übermitteln. Mit diesem entscheidenden Schritt des jungen Erfinders – Marconi war gerade 23 Jahre alt – begann der Siegeszug der drahtlosen Telegrafie, über den in «Die berühmten Erfinder» [16] berichtet wird:

«Im Jahre 1898 die erste Verbindung über den «Giants causeway» in Irland, ... im Jahre 1899 die Überwindung des Ärmelkanals, ... 1901 Verbindung des Kontinents mit Korsika über hundertfünfundsiebzig Kilometer. Ohne länger zu warten, beschloss Marconi ... den Versuch einer Überquerung des Atlantiks. ... Er errichtete in Poldhu (Cornwall) eine Sendestation, deren Stärke ... auf etwa zwanzig Kilowatt gesteigert wurde. Die Antenne bestand aus einem Netz von fünfzig Drähten, die von zwei neunundvierzig Meter hohen Masten aus einundsechzig Meter weit gespannt waren.» Um beim Empfänger in Neufundland, «auf billige Weise eine grosse Höhe der Antenne zu erreichen, wurde sie mit einem Papierdrachen hochgelassen. ... Vom ersten Tage (12. Dezember 1901 [17]) an waren die Signale von

Poldhu ... schwach hörbar; eine Strecke von dreitausendfünfhundertvierzig Kilometer war überbrückt.» Marconi, der den Empfang selbst überwachte, erklärte: «Dies ist die grösste Freude meines Lebens.»

Die «Marconi Wireless Company» wurde gegründet und schon 1903 der transatlantische Dienst auf kommerzieller Basis aufgenommen. Selten hat eine Erfindung die Öffentlichkeit so bewegt wie Marconis drahtlose Telegrafie um die Jahrhundertwende, insbesondere auch, weil dank ihr 1909 und 1912 die Rettung von Schiffbrüchigen beim Untergang der Dampfschiffe «Republic» und «Titanic» gelang.

Die Nutzbarmachung der Hertz'schen Versuche für die drahtlose Telegrafie gelang G. Marconi nicht zuletzt dadurch, dass er die Bedeutung der Antenne erkannte. Dazu sagte er 1909 in seiner Nobelpreis-Rede [18]:

«My previous tests had considered me that when endeavouring to extend the distance of communication it was not merely sufficient to augment the power of the electrical energy of the sender, but it was also necessary to increase the area or height of the transmitting and receiving elevated conductors. As it would have been too expensive to employ vertical wires of great height, I decided to increase their number and capacity, which seemed likely to make possible the efficient utilization of large amounts of energy.»

Bei typischen Wellenlängen von 2000 m...10 000 m betrug die Antennenhöhe den Bruchteil einer Wellenlänge, und ihr Strahlungswiderstand lag im Bereich um 1Ω . Der Wirkungsgrad war gering, infolge der hohen Senderleistung von vielen Kilowatt wurde indessen ausreichend Energie abgestrahlt.

Die Grundform der Antenne ist der von Marconi in seinen ersten Versuchen benutzte senkrecht hochgeführte Draht. Aufgrund seiner Überlegungen entstanden dann flächenhafte Antennen, wobei zahlreiche Einzeldrähte in Form eines Fächers oder einer Harfe aufgespannt waren. Die erste derartige von Marconi 1901 in Cape Cod nahe New York errichtete Anordnung, aufgehängt an zwei 48 m hohen Holzmasten im Abstand von 60 m, wurde vor ihrer Inbetriebnahme durch einen Sturm zerstört. Eine ähnliche Fächerantenne hatte zunächst auch Marconis Poldhu-Station in Cornwall, bevor sie später durch eine räumliche, auch für andere Marconi-Stationen typische Anordnung ersetzt wurde, bei der die zahlreichen Einzeldrähte in der Spitze einer auf dem Kopf stehenden Pyramide zusammenliefen und die an vier massiven 70 m hohen Holztürmen aufgehängt war (Fig. 7).

7 Grössere Entfernungen werden überbrückt

Um über grosse Entfernungen zuverlässig drahtlos telegrafieren zu können, mussten die abgestrahlte Leistung erhöht und die Empfängerempfindlichkeit gesteigert werden. Beides gelang dem deutschen Physikprofessor *F. Braun*, mehr bekannt durch die von ihm 1897 erfundene und später nach ihm benannte «Braunsche Röhre». Die Funkenstrecke im Marconi-Sender erzeugte nur kurze, stark gedämpfte Schwingungszüge, der im Empfänger benutzte Kohärer musste ständig mecha-

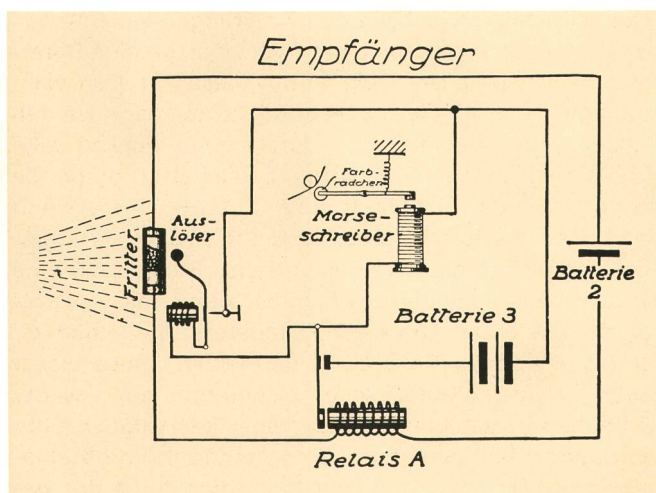


Fig. 6 Empfänger für elektromagnetische Wellen nach Branly [15]

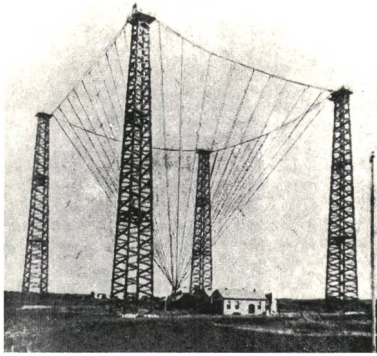


Fig. 7
Quadratische Pyramidenantenne in Marconis Poldhu-Station in England 1905 [19]

nisch regeneriert werden und erlaubte daher keine schnelle Signalfolge. Braun hatte 1897 an der Universität Strassburg damit begonnen, sich auch mit der drahtlosen Telegrafie zu beschäftigen [20]. Ihm gelang die Erzeugung von länger dauernden, nur allmählich abklingenden Schwingungen, indem er die Funkenstrecke nicht unmittelbar in die Antenne, sondern in einen geschlossenen Resonanzkreis aus Spule und Kondensator legte und die Antenne induktiv an diesen ankoppelte (Fig. 8). Die Verwendung gekoppelter Kreise war nicht einfach eine Verbesserung der Anlage von Marconi, sondern eine wirklich grundlegende Erfindung, und dieses neue Verfahren ist auch in unserer modernen Technik die Basis für Senden und Empfang geblieben. Der 1898 patentierte «Braunsche Sender» [22] brachte nicht nur eine beträchtliche Vergrößerung der bis dahin zuverlässig möglichen Reichweiten, er brach auch das für die drahtlose Telegrafie bestehende patentrechtliche Monopol Marconis.

Nach der Entwicklung des neuen Senders richtete Braun sein Augenmerk auf die Verbesserung des Empfängers, in dem der Kohärer ein höchst unzuverlässiges, aber scheinbar unverzichtbares Bauelement war. Während daher alle, die sich damals mit der drahtlosen Telegrafie beschäftigten, den Kohärer zu verbessern suchten [23], war es Brauns Ziel, ihn durch ein neues, geeigneteres Element zu ersetzen. Er hatte bereits 1876 – damals als Physiklehrer am Thomasygnasium in Leipzig – in einem Vortrag vor der naturforschenden Gesellschaft zu Leipzig seine «Versuche über Abweichungen vom Ohmschen Gesetz in metallischleitenden Körpern» mitgeteilt und in einem Demonstrationsexperiment gezeigt, dass

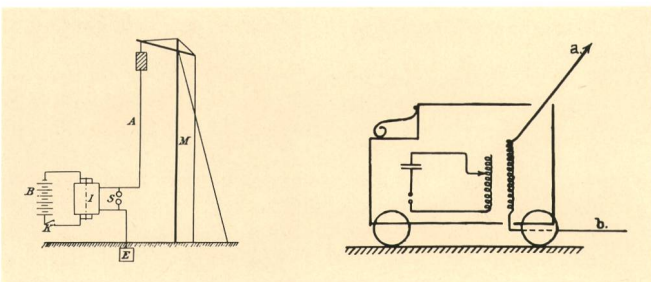


Fig. 8
Marconis und Brauns Sender (letzterer in einer mobilen Version), wie in den Nobelpreisvorträgen gezeigt [18, 21]



Fig. 9
Schwedische Briefmarke zur Erinnerung an die Verleihung des Nobelpreises für Physik 1909 an Marconi und Braun [24]

der Strom durch eine federnd auf einen Schwefelkies-Kristall aufgesetzte Nadel richtungsabhängig ist. Auf der Basis dieser Ventilwirkung entwickelte Braun den Kristalldetektor und setzte ihn 1901 an die Stelle des Branly'schen Kohäerers, der während des ersten Jahrzehnts der drahtlosen Telegrafie der einzige brauchbare Detektor geblieben war. Mit dem Braunschen Gleichrichter konnten die schwachgedämpften Schwingungen im Empfänger in einem Telefon hörbar gemacht werden, und damit vollzog sich der Übergang zum Hörempfang. Die Verbesserung der Empfindlichkeit durch den Kristalldetektor trug wie schon der Braunsche Sender wieder zu Steigerung der Reichweite bei. 1909 erhielten Braun und Marconi gemeinsam den Nobelpreis für Physik «in Anerkennung ihrer Verdienste um die Entwicklung der Telegrafie ohne Draht» (Fig. 9).

Die weitere Entwicklung der drahtlosen Telegrafie spiegelt sich im Aufbau der *Telefunken*-Versuchsstation Nauen wider. In den Jahren 1906...1909 wurden mit einem Braunschen Sender Reichweiten von 3000 km erzielt. Mit der von *M. Wien* entwickelten Löschfunkstrecke konnten in den Jahren 1909...1911 eine drahtlose Verbindung mit den damaligen deutschen Kolonien Kamerun und Togo hergestellt und eine Entfernung von 5000 km fast ganz über Land bezwungen werden. 1911 wurde die Versuchsstation Nauen zur Betriebsstation. Eine 1912 vergrößerte Löschfunkenanlage von 100 kW Sendeleistung reichte bis Mittelfrika und Nordamerika und stellte während des Ersten Weltkrieges über eine Entfernung von 8000 km die unmittelbare Verbindung mit Windhuk in Deutsch-Südwestafrika her. 1913 und 1915 erhielt die Station Nauen ihre ersten Hochfrequenzmaschinen mit Sendeleistungen von 100 kW und 200 kW, und 1920 zwei weitere von je 400 kW. Dadurch konnten Mittel- und Südamerika, Australien und Neuseeland in einer Entfernung von 20 000 km und damit praktisch jeder Punkt der Erde erreicht werden. Ein interessantes Zeitdokument aus jenen Jahren ist eine Skizze der umfangreichen Antennenanlage von Nauen (Fig. 10).

Mit der Erzeugung ungedämpfter elektrischer Schwingungen hoher Frequenz durch Maschinen und deren Einführung in die Sendertechnik endet Anfang der 30er Jahre der erste grosse Abschnitt der Nachrichtenübertragungstechnik. Das folgende halbe Jahrhundert ist

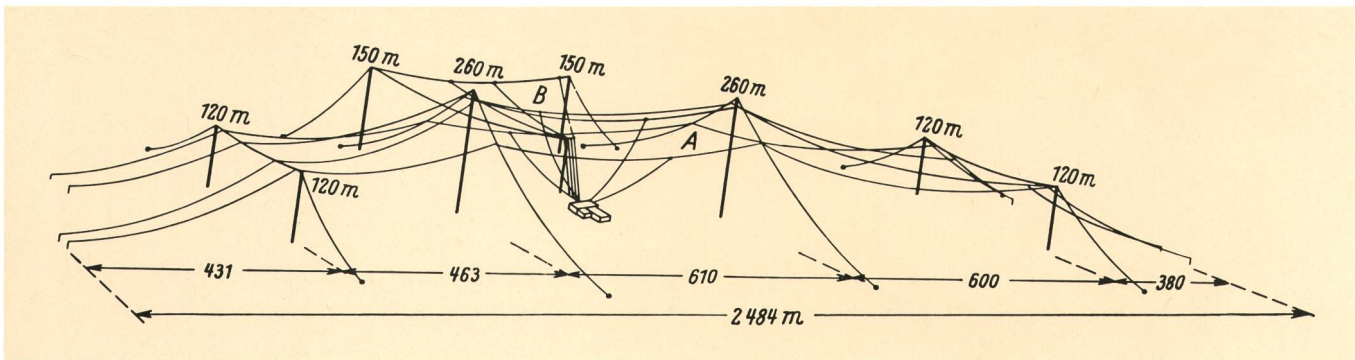


Fig. 10
Antennenanlage der Station Nauen, 1916...1919 [25]

durch den Siegeszug von Elektronenröhre und Transistor gekennzeichnet. Den Beginn des dritten Abschnitts erleben wir gerade mit der Entwicklung der optischen Nachrichtentechnik. Damit wird sicher auch die Einheit des Spektrums elektromagnetischer Wellen (Fig. 11) stärker ins Bewusstsein der Allgemeinheit gerückt werden. Wenn sie auch seit Maxwell und Hertz unumstrittene Erkenntnis ist, so denkt man, wenn man von «elektromagnetischen Wellen» spricht, aufgrund der technischen Entwicklung der letzten 100 Jahre derzeit in erster Linie an die Wellen der elektrischen Nachrichtentechnik. Dieser heute noch dominierende Frequenzbereich des Spektrums wird mit wachsendem Gewicht der optischen Nachrichtentechnik vielleicht in nicht allzu ferner Zukunft wieder wie in früheren Publikationen als der Bereich der «Hertzischen Wellen» bezeichnet werden.

8 Eine ungeahnte Entwicklung

Heinrich Hertz konnte nicht ahnen, dass seine Ergebnisse eine Entwicklung einleiten würden, die zu Rundfunk, Fernsehen und Satellitenfunk führen, und dass 100 Jahre später das gesamte Spektrum der elektromagnetischen Wellen einschliesslich der Lichtwellen für Zwecke der Nachrichtentechnik genutzt werden würde. Aber er hat sehr wohl die Einheit von elektrischen und optischen Vorgängen erkannt, wenn er in seinem Vortrag [8] nach der Schilderung seiner Versuche zusammenfasst: «Von dem Gebiete rein elektrischer Erschei-

nungen ausgehend, sind wir Schritt vor Schritt zu rein optischen Erscheinungen gelangt. . . Die Verbindung zwischen Licht- und Electricität, welche die Theorie ahnte, vermutete, voraussah, ist hergestellt, den Sinnen fasslich, dem natürlichen Geiste verständlich . . . es eröffnet sich uns ein weiter Einblick in beide Gebiete. Sie erscheinen uns grösser als wir sie bisher gekannt. Die Herrschaft der Optik beschränkt sich nicht mehr auf Ätherwellen, welche kleine Bruchteile des Millimeters messen, sie gewinnt Wellen, deren Länge nach Decimetern, Metern, Kilometern rechnen.»

Eine ausführliche Darstellung «100 Jahre elektromagnetische Wellen» findet der Leser in einer anlässlich des 100jährigen Jubiläums verfassten sechsteiligen Artikelreihe des Autors über die historische Entwicklung in der «Frequenz» [26].

Bibliographie

- [1] 100 Jahre Entdeckung der elektromagnetischen Wellen durch Heinrich Hertz in Karlsruhe. Fridericiana Zeitschrift der Universität Karlsruhe, Heft 41, 1988.
- [2] Heinrich-Hertz-Symposium «100 Jahre elektromagnetische Wellen», 14./15. März 1988 in Karlsruhe. VDE-Verlag, Berlin 1988.
- [3] Heinrich Hertz, «100 Jahre elektromagnetische Wellen». Baden-Württemberg Themenheft 1/88. Verlag G. Braun, Karlsruhe.
- [4] Hertz H. Gesammelte Werke. Bd. I: Schriften verschiedenen Inhalts. Bd. II: Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft. Bd. III: Prinzipien der Mechanik. J. A. Barth, Leipzig, 1894/95, und Sändig Reprint Verlag, Vaduz/Liechtenstein 1984.
- [5] Hertz J. Heinrich Hertz, Erinnerungen, Briefe, Tagebücher. Akadem. Verlagsges. mbH, Leipzig 1927.
- [6] Maxwell J. C. A dynamic theory of the electromagnetic field. Proc. Roy. Soc. London 13, 1864, p. 531.
- [7] Hertz H. Über sehr schnelle elektrische Schwingungen. Wiedemanns Ann. Phys. 31, 1887, S. 421, und [4] Bd. II, S. 32.
- [8] Hertz H. Über die Beziehungen zwischen Licht und Electricität. Vortrag bei der 62. Versammlung deutscher Naturforscher und Ärzte in Heidelberg am 20. Sept. 1889. [1] Bd. I, S. 339.
- [9] Hertz H. Über Inductionerscheinungen hervorgerufen durch die elektrischen Vorgänge in Isolatoren. Sitzungsbericht der Berliner Akademie vom 10. Nov. 1887. Wiedemanns Ann. Phys. 34, 1888, S. 273, und [4] Bd. II, S. 102.
- [10] Hertz H. Über die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektrodynamischen Wirkungen. Sitzungsbericht der Berliner Akademie vom 2. Febr. 1888. Wiedemanns Ann. Phys. 34, 1888, S. 551, und [4] Bd. II, S. 115.

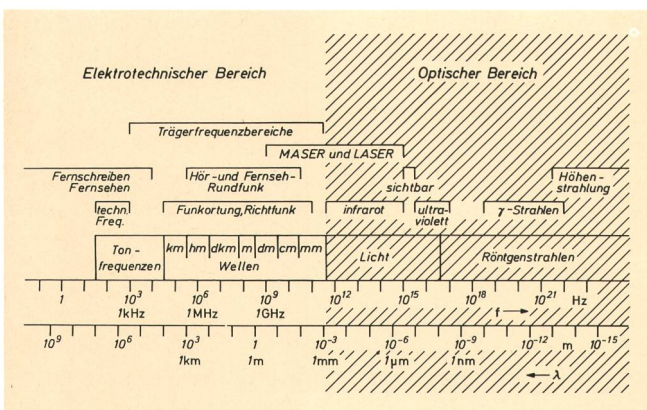


Fig. 11
Spektrum der elektromagnetischen Wellen

- [11] *Hertz H.* Über elektrodynamische Wellen im Luftraume und deren Reflexion. Wiedemanns Ann. Phys. 34, 1888, S. 610, und [4] Bd. II, S. 133.
- [12] *Hertz H.* Über Strahlen elektrischer Kraft. Sitzungsbericht der Berliner Akademie vom 13. Dez. 1888. Wiedemanns Ann. Phys. 36, 1889, S. 769, und [4] Bd. II, S. 184.
- [13] *Branly E.* Variations de conductibilité sous diverses influences électriques. Compt. Rend. 111, 1890, p. 785.
- [14] *Graetz L.* Kurzer Abriss der Elektrizität. Verlag von H. Engelhorn, Stuttgart 1910.
- [15] *Fürst A.* Das Weltreich der Technik, Entwicklung und Gegenwart. 1. Bd. Telegraphie und Telephonie. Der Verkehr im Draht und im Äther. Ullstein Verlag, Berlin 1923.
- [16] *Leprince-Ringuet L.* (Herausg.). Die berühmten Erfinder. Physiker und Ingenieure, S. 220. Kunstverlag Lucien Mazenod, Genf 1951.
- [17] *Marconi G.* Signals across the Atlantic. Elec. World 38, 1901, p. 1023.
- [18] *Marconi G.* Nobelpreisrede. Les Prix Nobel en 1909. Imprimerie Royale P. A. Norsted u. Söner, Stockholm 1910.
- [19] *Kraus J. D.* Antennas since Hertz und Marconi. IEEE-Trans. AP 33, 1985, p. 131.
- [20] *Kurylo F.* Ferdinand Braun, Leben und Wirken des Erfinders der Braunschen Röhre, Nobelpreisträger 1909. Heinz Moos Verlag, München 1965.
- [21] *Braun F.* Nobelpreisrede. Les Prix Nobel en 1909. Imprimerie Royale P. A. Norsted u. Söner, Stockholm 1910.
- [22] *Braun F.* Deutsches Reichs-Patent 111 578, 14. Okt. 1898. Schaltungsweise des mit einer Luftleitung verbundenen Gebers für Funkentelegraphie.
- [23] *Zenneck J.* Lehrbuch der drahtlosen Telegraphie. 3. Auflage, Verlag von Ferdinand Enke, Stuttgart 1916.
- [24] *Süsskind Ch.* Ferdinand Braun: Forgotten forefather. Advances in electronics and physics, Bd. 50, p. 241. Academic Press, New York 1980.
- [25] *Meissner A.* Die Zeit des Maschinensenders. Telefunken-Ztg. 26, 1953, S. 159.
- [26] *Severin H.* 100 Jahre elektromagnetische Wellen – 1. Heinrich Hertz, Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft. Frequenz 41, Schiele & Schön Verlag, 1987, S. 250. 2. Meilensteine in der Entwicklung der Nachrichtenübertragungstechnik. Frequenz 41, Schiele & Schön Verlag, 1987, S. 286. 3. Antennen. Frequenz 42, Schiele & Schön Verlag, 1988, S. 106. 4. Ausbreitung im Raum. Frequenz 42, Schiele & Schön Verlag, 1988, S. 138. 5. Ausbreitung längs Leitungen. Frequenz, Schiele & Schön Verlag. Im Druck. 6. Anwendungen in Forschung, Technik und Medizin. Frequenz, Schiele & Schön Verlag. In Vorbereitung.