

I

Rückblick und Ausblick

Review and Outlook

©2003 Franz Wegner Universität Heidelberg

In diesem letzten Kapitel wird zum einen ein Rückblick in Form eines knappen Abrisses der geschichtlichen Entwicklung der Elektrodynamik gegeben. Zum anderen aber wollen wir einen einfachen Effekt der allgemeinen Relativitätstheorie, nämlich den, dass der Zeitablauf vom Gravitationspotential abhängt, darstellen.

In this last chapter a review in the form of a short account of the historic development of electrodynamics is given. Additionally we will catch a glimpse of the general theory of relativity by showing that clocks run differently in the presence of gravitation.

30 Kurze Geschichte der Elektrodynamik

Ich schließe mit einer kurzen Geschichte der Elektrodynamik. Dabei habe ich vorwiegend die folgende Literatur verwendet:

SIR EDMUND WHITTAKER, A History of the Theories of Aether and Electricity

EMILIO SEGRÈ, Die großen Physiker und ihre Entdeckungen, Teil 1, Piper Band 1174

WILHELM H. WESTPHAL, Physik, Springer-Verlag

WILHELM H. WESTPHAL, Anhang I, Physikalisches Wörterbuch

MAX BORN, EMIL WOLF, Principles of Optics, Historical Introduction

EDMUND HOPPE, Geschichte der Physik

Encyclopedia Britannica: Stichworte / Article 'Electromagnetic Waves' und / and 'Magnetism'

WOLDEMAR VOIGT, Theoretische Physik

J.D. JACKSON and L.B. OKUN, Historical roots of gauge invariance, Rev. Mod. Phys. 73 (2001) 663.

Eine geschichtliche Entwicklung nachzuzeichnen ist nicht einfach. Zum einen stellt sich die Frage, ob man hinreichend vollständige Quellen hat. Zum zweiten werden häufig mehrere Personen für Entdeckungen oder Erklärungen genannt, zuweilen zu recht unterschiedlichen Zeiten. Dies kann daran liegen, dass diese Personen von ihren Entdeckungen gegenseitig nichts wussten. Es kann aber auch daran liegen, dass sie die Erscheinung unterschiedlich gut beobachtet oder erklärt haben. Manchmal haben sie das Ergebnis auch besonders gut weitergegeben, so dass ihre Arbeit sehr populär wurde und sie als vermeintliche Autoren galten.

30 Short History of Electrodynamics

I conclude with a short history of electrodynamics. For this purpose I have mainly used the following literature:

It is not easy to redraw a historical development. First of all, there is the question whether one has sufficiently complete sources. Secondly, it often happens that several persons are named for some discovery or explanation, sometimes even at separate times. One reason might be that one person did not know of the other's discovery. But it may also be that they observed or explained the phenomenon differently well. Sometimes they published the result particularly well so that their paper has become rather popular and they were considered alleged authors.

Wer hat zum Beispiel die Entstehung des Regenbogens erklärt? DIETRICH VON FREIBERG, MAHMUD AL SCHIRAZI und KAMAL AL-DIN, die anfangs des 14. Jahrhunderts fanden, dass im Regentropfen der Sonnenstrahl zweimal gebrochen und ein- oder zweimal reflektiert wird, oder DESCARTES, der um 1625 fand, dass der dadurch insgesamt entstehende Brechwinkel ein Extremum annimmt, so dass in diese Richtung eine besonders hohe Intensität an Licht gebrochen wird, oder YOUNG und AIRY, die um 1820 und 1836 die Wellennatur des Lichts berücksichtigten? Alle haben ein Stück zu unserem Wissen beigetragen.

Anfangs waren es vor allem drei verschiedene Phänomene der Elektrodynamik, die dem Menschen auffielen, ohne dass er Zusammenhänge zwischen diesen erahnte. Das offensichtlichste war das Licht, das ihm hervorragende Orientierung bot und ihm zuweilen mit furchterregenden und auch angenehmen Erscheinungen entgegentrat, wie dem Blitz und dem Regenbogen.

Zwei andere schon im Altertum bekannte Phänomene waren weitaus seltener zu beobachten, die seltsamen Eigenschaften zweier Minerale, Bernstein (*ηλεκτρον*) und Magnetit (*η λιθοζ Μαγνητιζ*). Ersterer zieht leichte Körper an, wenn man ihn reibt, letzterer hat die Kraft, Eisen anzuziehen und trägt seinen Namen von der Stadt Magnesia in Thessalien, wo man ihn findet. Man sagt, THALES VON MILET (um 600 v. Chr.) habe bereits die Eigenschaften dieser Minerale gekannt.

Entsprechend entwickelten sich die Untersuchungen dieser Phänomene parallel zueinander in einer Theorie des Lichts, der Elektrostatik und der Magneto- statik, bevor man erkannte, dass diese miteinander verknüpft sind.

30.a Theorie des Lichts bis FRESNEL

HERON VON ALEXANDRIEN begründete die Gleichheit von Einfallswinkel und Reflexionswinkel bei einem Spiegel damit, dass das Licht den kürzesten Weg nehme. Generell war man im Altertum und weitgehend im Mittelalter der Ansicht, dass die Naturabläufe einen Endzweck haben. Man fragte sich: *Warum* läuft etwas so ab und nicht *wie* läuft es ab?

HERON und PTOLEMÄUS vertraten die Ansicht, dass man mit Sehstrahlen sah, die vom Auge ausgingen und vom gesehenen Objekt reflektiert wurden. ALHAZEN (ibn al Haitham) kam zur korrekten Ansicht, dass das Licht von der Sonne oder einem anderen strahlenden Körper ausging und vom Körper reflektiert in unser Auge gelangte.

Who for example has explained how the rainbow comes about? DIETRICH VON FREIBERG, MAHMUD AL SCHIRAZI and KAMAL AL-DIN who in the beginning of the 14th century found that sunlight is refracted twice and reflected once or twice inside the raindrop, or DESCARTES who found around 1625 that the total angle of reflection has an extremum so that a high intensity of light is reflected under a certain angle, or FRESNEL and AIRY who took around 1820 and 1836 the wave character of light into account? All of them contributed a piece to our knowledge.

Initially there were three different phenomena of electrodynamics observed by man without foreseeing their connection. The most obvious one was light which offered him excellent orientation and which sometimes appeared to him both frightening and agreeable as in a flash of lightning and a rainbow.

Two other phenomena already known in antiquity were much rarer observed, the curious properties possessed by two minerals, amber (*ηλεκτρον*) and magnetic iron ore (*η λιθοζ Μαγνητιζ*). The former, when rubbed, attracts light bodies; the latter has the power of attracting iron and has its name from Magnesia in Thessalia, where this stone is found. THALES OF MILET (600 BC) is said to have known the properties of these minerals.

Accordingly, the investigation of these phenomena developed in parallel into a theory of light, of electrostatics, and of magnetostatics, before one realized that they are connected.

30.a Theory of Light to FRESNEL

HERO OF ALEXANDRIA argued that reflected light uses the shortest path and thus for light reflected at a mirror the angle of incidence equals the angle of reflexion. In antiquity and the middle ages one assumed that nature has final causes and thus asked *why*, not *how* does nature proceed?

HERO and PTOLEMY held the opinion that men saw by means of rays of light issuing from the eye and reflecting from the objects seen. ALHAZEN held the correct view that light was issued from the sun or from some other luminous source and was reflected from the object seen into the eye.

ALHAZEN machte bedeutende Entdeckungen auf dem Gebiet der Optik (1030): Lochkamera und Parabolspiegel. KEPLER lernte sehr viel aus seinen Werken. ALHAZEN wusste bereits, dass bei der Brechung der einfallende, der reflektierte und der gebrochene Lichtstrahl in einer Ebene liegen.

In das 13. Jahrhundert gehört die Erfindung der Brille.

Die Erklärung der Entstehung des Regenbogens durch zweimalige Brechung und ein- oder zweimalige Reflexion des Sonnenlichts im Regentropfen wird zu Beginn des 14. Jahrhunderts von DIETRICH VON FREIBERG und von AL-SHIRAZI und KAMAL AL-DIN gegeben.

SNELLIUS VON ROYEN fand experimentell das nach ihm benannte Brechungsgesetz um 1621. DESCARTES gab eine theoretische Herleitung unter der Annahme, dass die Geschwindigkeit in den beiden Medien feste Werte hat und die Komponente parallel zur Grenzfläche erhalten bleibt. Die Herleitung wird korrekt, wenn der Geschwindigkeitsvektor durch den Wellenvektor ersetzt wird. FERMAT führte dagegen das Prinzip der kleinsten Zeit (1657) ein und leitete daraus das Brechungsgesetz (1661) her.

HOKE war vermutlich 1667 der erste, der in seiner Arbeit *Micrographia* das Licht als Welle beschrieb, da er Beugungserscheinungen beobachtet hatte, und durch theoretische Betrachtung des Verlaufs der Wellenfronten das Brechungsgesetz herleitete. HUYGENS hängt ebenfalls der Wellentheorie in seinem *Traité de la lumière* (1678-1690) an. Wichtig wurde später vor allem für die Theorie der Beugung, aber auch der Brechung, das Prinzip von HUYGENS: Jeder Punkt einer Wellenfront kann selbst wieder als Quelle einer Sekundärwelle betrachtet werden. NEWTON wird weitgehend mit der Emanationstheorie in Verbindung gebracht, das heißt mit der Vorstellung, Licht sei korpuskularer Natur. Das ist nicht ganz korrekt. NEWTON vermied es lange Zeit, Vorstellungen einzuführen, die nicht experimentell überprüfbar waren. 'Um einen Disput zu vermeiden und diese Hypothese allgemein zu machen, soll jedermann hier seine Vorliebe haben; nur was immer das Licht sein mag, nehme ich an, dass es aus Strahlen besteht, die sich nach den jeweils herrschenden Umständen durch Größe, Form oder Energie unterscheiden.' Später allerdings favorisierte er die Korpuskular-Theorie.

NEWTON untersuchte die Farben dünner Blättchen intensiv. Er nahm an (*Opticks*), dass 'jeder Lichtstrahl bei seinem Durchgang durch eine reflektierende Oberfläche in einen Übergangszustand gebracht wird, welcher beim Fortgang des Strahls sich in gleichen Abständen wiederholt; bei jeder Wiederholung

ALHAZEN made important discoveries in optics (1030): pinhole camera and parabolic mirror. KEPLER learnt a lot from his work. ALHAZEN already knew that in refraction the incident, the reflected and the refracted beam lie in one plane.

Eye glasses were invented in the 13th century.

The explanation for the occurrence of the rainbow by two refractions and one or two reflections of sunlight in the rain drop was given by DIETRICH VON FREIBERG, AL-SHIRAZI, and KAMAL AL-DIN at the beginning of the 14th century.

In 1621 SNELL OF ROYEN found experimentally the law of refraction. DESCARTES gave a theoretical derivation assuming that the velocity of the beams have given values in both media and that the component of the velocity vector parallel to the boundary is conserved. This derivation becomes correct if the vector of velocity is replaced by the wave-vector. However, FERMAT introduced the principle of least time (1657) and derived from this the law of refraction (1661).

HOKE was probably the first who described in his *Micrographia* light as a wave, since he had observed diffraction. Considering theoretically the progression of the wave-front he derived the law of refraction. However, HUYGENS, developed in his *Traité de la lumière* (1678-1690) a wave theory of light. Important for the theory of diffraction but also refraction became his principle, which says: 'Each point of a wave-front may be regarded as the source of a secondary wave.' NEWTON is considered having put forward the theory of emanation, i.e. the idea that light is of corpuscular nature. This is not completely correct. NEWTON disliked to introduce imaginative hypotheses, which could not be proven experimentally. 'To avoid dispute, and make this hypothesis general, let every man here take his fancy; only whatever light be, I suppose it consists of rays differing from one another in contingent circumstances, as bigness, form or vigour.' Later however, he was in favour of the corpuscular nature of light.

NEWTON devoted considerable attention to the colours of thin plates. He supposed (*Opticks*) that 'every ray of light, in its passage through any refracting surface, is put into a certain transient state, which, in the progress of the ray, returns at equal intervals, and disposes the ray, at every return, to be easily transmitted

entlässt er den Strahl leicht durch die nächste reflektierende Oberfläche und zwischen den Wiederholungen lässt er ihn reflektieren.' Er fand, dass die Intervalle zwischen leichtem Durchgang mit der Farbe variieren und diese am größten für rotes, am kürzesten für violettes Licht waren. Hätte er das Wellenbild akzeptiert, so hätte er die Wellenlängen des sichtbaren Lichts bestimmen können.

Das inzwischen bekannte Phänomen der Doppelbrechung erklärte NEWTON 1717 durch unterschiedlich geformte Querschnitte der Lichtkorpuskel, was der Idee einer transversalen Polarisation nahe kommt. HUYGENS Wellentheorie maß dem Äther elastische Eigenschaften bei; er zog dabei allerdings nur longitudinale Wellen in Erwägung und musste zur Erklärung der Doppelbrechung zwei verschiedene Arten von Wellen einführen, von denen sich eine isotrop, die andere dagegen sphäroidal ausbreitete. Zu jener Zeit wurde NEWTON's Erklärung überwiegend akzeptiert.

In diesem Kurs haben wir die Doppelbrechung und die Beugung nicht behandelt. Sie spielten in der Entwicklung der Theorie des Lichts eine wichtige Rolle. Es sei angemerkt, dass Doppelbrechung in anisotropen Kristallen auftritt, in denen die Dielektrizitätskonstante ein Tensor ist.

1675 konnte RÖMER durch Beobachtung der Verdunklung der Jupitermonde erstmals die Zeit bestimmen, die das Licht für die Strecke Sonne-Erde benötigt. Bis dahin war es nicht klar, ob sich Licht instantan oder mit endlicher Geschwindigkeit ausbreitet.

1728 fand JAMES BRADLEY die Aberration, das heißt eine Veränderung der Richtung des Lichts von einem Stern auf Grund der senkrechten Bewegung der Erde gegen das Licht. Dies wurde als Beweis für die Korpuskularnatur des Lichts angesehen. bereits 1677 hatte RÖMER in einem Brief an HUYGENS ein derartiges Phänomen vermutet.

1744 griff MAUPERTUIS die Kontroverse zwischen DESCARTES und FERMAT wieder auf. Er war zwar von der Korpuskularnatur des Lichts überzeugt, wollte aber FERMAT'S Methode erhalten. Er forderte daher, dass 'der Weg derjenige ist, für den die Wirkung am kleinsten wird' und erlangte, dass an Stelle von FERMAT'S $\int dt = \int ds/v$ jetzt $\int v ds$ extremal werden sollte. Er führte damit erstmals das Prinzip der kleinsten Wirkung ein, das alsbald auch von EULER und LAGRANGE aufgegriffen wurde und heute als das Prinzip gilt, das die Dynamik der Natur beherrscht.

through the next refracting surface, and, between the returns, to be easily reflected by it.' He found that the intervals between easy transmission vary with colour, being greatest for red and least for violet. If he had accepted the wave picture, he could have determined the wavelengths of visible light.

In 1717 the meanwhile known phenomenon of double-refraction was explained by NEWTON by light corpuscles of different shape which comes close the idea of a transversal polarization. HUYGENS' wave theory of light assigned elastic properties to the aether; However, he considered only longitudinal waves, and was forced to introduce two different kinds of these waves for double-refraction, one of which propagated isotropically, the other spheroidally. At that time NEWTON's explanation was generally accepted.

In this course we did not consider double-refraction and diffraction. They played an important role in the development of the theory of light. It should be remarked that double-refraction appears in anisotropic crystals where the dielectric constant is a tensor.

In 1675 RÖMER was able to determine the time light needs to transverse the distance from sun to earth by observing the eclipses of the moons of Jupiter. Until that time it was not clear whether light propagates instantly or at a finite velocity.

In 1728 JAMES BRADLEY found the aberration of light, i.e. a change in the direction of the light from a star due to the perpendicular motion of the observer to the direction of the star. This was considered a proof of the corpuscular nature of light. In 1677 RÖMER already had conjectured such a phenomenon in a letter to HUYGENS.

In 1744 MAUPERTUIS took up the old controversy between DESCARTES and FERMAT. Convinced of the corpuscular nature of light but wishing to retain FERMAT'S method, he supposed that 'the path described is that by which the quantity of action is the least' and required that instead FERMAT'S $\int dt = \int ds/v$ the action $\int v ds$ should be extremal. In this way he introduced for the first time the principle of least action which was soon taken up by EULER and LAGRANGE, and which today is considered the principle governing all dynamics of nature.

1801 führte THOMAS YOUNG das Konzept der Interferenz zweier Wellen ein und brachte damit das HUYGENSSCHE Konzept von neuem ins Spiel. Er ist in der Lage, die NEWTONSchen Ringe mit diesem Konzept zu erklären. MALUS fand 1808, dass reflektiertes Licht normalerweise partiell polarisiert ist und fand den Winkel der Totalpolarisation, jetzt als BREWSTER'Scher Winkel bekannt (nach Gl. 18.22). Das Problem, den außergewöhnlichen Strahl in doppelbrechenden Kristallen zu erklären, verblieb mit Erklärungen beider Seiten: LAPLACE argumentiert 1808 mit der Wirkungsfunktion für Korpuskel, YOUNG 1809 für Wellen, wobei sich beide nur in der Anisotropie des Kristalls einig sind. Die Situation wurde noch komplexer, als BREWSTER 1815 auch Kristalle mit zwei außergewöhnlichen Strahlen entdeckte (der Fall dreier verschiedener Eigenwerte des Dielektrizitätstensors).

Für 1818 schrieb die französische Akademie einen Preis für die Erklärung der Beugung aus. Die Anhänger der Emissionstheorie (LAPLACE, POISSON, BIOT) waren siegessicher, aber FRESNEL legte eine Arbeit vor, in der er fußend auf den Arbeiten von HUYGENS und YOUNG die Beugung für mehrere Anordnungen mit der Wellentheorie beschrieb. POISSON, der die Arbeit sorgfältig studierte, fand, dass im Mittelpunkt des Schattens einer kreisförmigen Scheibe ein heller Fleck sein müsste und verlangte eine experimentelle Überprüfung. ARAGO fand den hellen Fleck und FRESNEL gewann den Preis. Nachdem YOUNG auch 1818 die Aberration mit der Wellentheorie erklärt hatte, wurde diese die führende Theorie.

YOUNG schlug 1817 erstmals vor, bei Licht könne es sich um Transversalwellen handeln. Dies wurde unterstützt durch die Beobachtung, dass zwei senkrecht zueinander polarisierte Lichtstrahlen keine Interferenz zeigen. FRESNEL griff diese Idee auf und entwickelte in den Folgejahren eine erfolgreiche Theorie der Doppelbrechung, obwohl ihm die MAXWELL-Gleichungen noch nicht zur Verfügung standen. Geschickte Experimente von AIRY (1831) zur Unterdrückung von NEWTONSchen Ringen bei Einstrahlung des Lichts unter dem BREWSTER-Winkel und die Messung der Lichtgeschwindigkeit in Luft und Wasser bewiesen die Wellennatur des Lichts. (Im Medium größerer Brechzahl sagt die Wellentheorie eine kleinere, die Korpuskulartheorie eine größere Geschwindigkeit vorher.)

FRESNEL leitete einen Ausdruck für die Änderung der Lichtgeschwindigkeit in einem bewegten Medium her, der experimentell von FIZEAU (1851) bestätigt wurde. Es gab jedoch mehrere verschiedene Theorien

In 1801 THOMAS YOUNG introduced the concept of the interference of two waves and brought HUYGENS' concept anew in play. He is able to explain NEWTON'S rings with this concept. In 1808 MALUS found that reflected light is normally partially polarized and found the angle of total polarization, now known as BREWSTER'S angle (after eq. 18.22). The problem to explain the extraordinary beam in double-refracting crystals continued with explanations from both sides, in 1808 LAPLACE argued for corpuscles, in 1809 YOUNG argued for waves, both agreeing that the medium has to be anisotropic. In 1815 when BREWSTER discovered crystals with two extraordinary beams (the case of three different eigenvalues of the dielectric tensor) the situation became even more complex.

In 1818 the French Academy announced a prize for the explanation of diffraction. The followers of the theory of emission (LAPLACE, POISSON, BIOT) were confident of victory but FRESNEL submitted a paper at the basis of the papers by HUYGENS and YOUNG, in which he explained this phenomenon for several arrangements by means of the wave theory. POISSON who studied the paper carefully found that in the centre of the shadow behind a circular disc there had to be a bright spot and asked for an experimental test. ARAGO found the bright spot and FRESNEL received the prize. Since in 1818 YOUNG was also able to explain aberration by means of the wave theory it became the leading theory.

In 1817 YOUNG proposed for the first time, light might consist of transversal waves. This was supported by the observation that two light beams polarized perpendicular to each other do not show interferences. FRESNEL picked up this idea and developed a successful theory of double-refraction, although MAXWELL'S equations were not yet available. Clever experiments by AIRY (1831) showing that light irradiated under BREWSTER'S angle suppresses NEWTON'S rings, and that light propagated slower in water than air, proved the wave nature of light. (Wave-theory predicts in a medium with larger index of refraction a smaller velocity of light, in the corpuscular theory a larger one.)

FRESNEL derived an expression for the change of velocity of light in moving matter which was confirmed experimentally by FIZEAU (1851). However, there were several different theories on this subject among

darüber unter anderem auch eine von STOKES (1846). Verschiedene Ideen rivalisierten bei der Frage, in welchem Umfang Materie den Äther mitführt.

Es sei bemerkt, dass der Äther als elastischer Festkörper in der Folgezeit viele hervorragende Wissenschaftler beschäftigte und die Elastizitätstheorie zur Blüte brachte. Bei der Anwendung auf das Licht blieb es jedoch ein Problem, Longitudinalwellen zu unterdrücken.

Ein Rätsel blieb, ob der Raum oberhalb der Erde ein Plenum sei, das dem Licht die notwendigen elastischen Eigenschaften zur Ausbreitung gibt, oder ein Vakuum, das den Planeten ihre Bewegungen erlaubt. Diese Diskussion bestand schon Jahrhunderte vorher. Nach DESCARTES war der Raum ein Plenum, von einem Medium ausgefüllt, unseren Sinnen nicht wahrnehmbar, das Kräfte übertragen kann und Effekte auf die materiellen Körper übertragen kann, die in ihm eingebettet sind, genannt Äther. GASSENDI, ein Anhänger von KOPERNIKUS und GALILEI, führte hingegen die Doktrin der antiken Atomisten wieder ein, dass das Universum aus massebehafteten Atomen, ewig und unveränderlich bestehe, die in einem Raum, der abgesehen von ihnen selbst leer ist. Seine Doktrin wurde bald darauf von NEWTON aufgenommen und wurde Ausgangspunkt der darauffolgenden Naturphilosophie.

30.b Elektrostatik

Bereits THALES VON MILET (600 v. Chr.) berichtet, dass geriebener Bernstein (griechisch 'elektron') leichte Körper anzieht. Um 1600 entdeckte GILBERT, dass viele andere Stoffe durch Reiben die gleiche Eigenschaft annehmen. Er prägte hierfür den Begriff 'elektrisch'. Das Wort 'Elektrizität' wurde von BROWNE 1646 eingeführt. GILBERT arbeitete auch wesentliche Unterschiede zwischen magnetischen und elektrischen Kräften heraus. (Magnete sind im Gegensatz zu elektrisierten Körpern permanent. Magnetische Kräfte werden durch andere Substanzen nicht abgeschirmt. Magnete ziehen nur magnetisierbare Substanzen an, elektrisierte alle.)

OTTO VON GUERICKE, bekannt durch die Herstellung des Vakuums in den Magdeburger Kugeln, machte sehr frühzeitig - 1672 erschien die *Experimenta nova magdeburgica* - eine Reihe wichtiger Entdeckungen auf dem Gebiet der Elektrizität: Er führte das erste Mal die Unterscheidung zwischen Leitern und Nichtleitern ein, beobachtete elektrische Abstoßung und Anziehung, die Influenz und baute die erste brauchbare Elektrisiermaschine. Seine Entdeckungen

others by STOKES (1846). Different ideas competed on the question, to which extent matter would drag the aether.

It may be remarked that the aether as an elastic solid occupied many excellent scientists in the following time and made the theory of elasticity flourishing in the following years. Applied to the theory of light there remained the problem to suppress longitudinal waves.

There remained the puzzle whether the space above the earth is a plenum, which provides the necessary properties of elasticity for the propagation of light, or a vacuum, which allows the planets to move freely. This discussion existed already centuries before. Space was, in DESCARTES' view, a plenum (in contrast to a vacuum), being occupied by a medium which, though imperceptible to the senses, is capable of transmitting force, and exerting effects on material bodies immersed in it - the aether, as it was called. GASSENDI, a follower of COPERNICUS and GALILEO, re-introduced the doctrine of the ancient atomists that the universe is formed of material atoms, eternal and unchangeable, moving about in a space which except for them is empty, thus he re-introduced the vacuum. His doctrine was accepted not long afterwards by NEWTON and in fact became the departure point for all subsequent natural philosophy.

30.b Electrostatics

THALES OF MILET (600 BC) is said to have known that rubbed amber (Greek 'elektron') attracts light bodies. Around 1600 GILBERT discovered that many other materials assume the same property by rubbing. He coined the word 'electric' for this property. The word 'electricity' was introduced by BROWNE in 1646. GILBERT remarked essential differences between magnetic and electric forces. (Magnets are permanent in contrast to electrified bodies. Magnetic forces are not shielded by other substances. Magnets attract only magnetizable substances, electrified ones all substances.)

OTTO OF GUERICKE known for the preparation of the vacuum in the Magdebourgous spheres made pretty early a number of important electric discoveries - his *Experimenta nova magdeburgica* appeared in 1672 - For the first time he introduced the distinction between conductors and non-conductors, he observed electric attraction and repulsion, the phenomenon of influence. He designed the first reasonably working electrostatic generator. It seems that his discoveries

fanden aber offensichtlich keine allgemeine Beachtung.

WALL verglich 1708 den Funken, der von geriebenem Bernstein mit einem Knall überspringt, mit Donner und Blitz, ein Hinweis darauf, dass es sich beim Blitz um eine elektrostatische Entladung handelt.

GRAY fand 1729, dass Elektrizität durch bestimmte Stoffe übertragen wird, die DESAGULIERS Nicht-Elektrika oder Leiter nannte. GRAY fand auch, dass sich die Elektrizität auf der Oberfläche von Körpern ansammelt. DUFAY beobachtete 1734, dass es zwei Arten von Elektrizität gibt, Glas- und Harzelektrizität und dass sich gleichartige abstoßen, verschiedenartige anziehen.

Verbesserte Elektrisiermaschinen wurden in verschiedenen Varianten zwischen 1744 und 1746 von JOHANN HEINRICH WINKLER, GEORGE MATTHIAS BOSE und BENJAMIN WILSON entwickelt.

Der Kondensator in Form der Leidener Flasche wurde 1745 von PIETER VAN MUSSCHENBROEK erfunden, unabhängig davon vermutlich etwas früher von EWALD VON KLEIST, aber erst 1746 von J. G. KRÜGER beschrieben.

WILLIAM WATSON schloss 1746, dass 'durch das Laden oder Entladen einer Leidener Flasche Elektrizität transferiert wird, aber nicht erzeugt oder vernichtet.' 'Unter geeigneten Umständen war es möglich die Elektrizität in einigen Körpern rarer zu machen als sie natürlicherweise ist, und durch Übertragung auf andere Körper denen eine zusätzliche Menge zu geben und deren Elektrizität dichter zu machen.' Dies war ein erster Hinweis auf die Erhaltung der Ladung.

Ähnliche Experimente, die BENJAMIN FRANKLIN nach einem Vortrag von DR. SPENCE, der von Schottland nach Amerika gekommen war, durchführte, brachten ihn 1747 ebenfalls zur Schlussfolgerung, 'dass die Gesamtmenge Elektrizität eines isolierten Systems unveränderlich ist'. Populär wurde FRANKLIN durch die Erfindung des Blitzableiters. Er bemerkte, dass es sich beim Blitz um eine elektrische Entladung handelt.

Die Einführung der Vorzeichen für die Ladung wird sowohl FRANKLIN als auch LICHTENBERG (1777) zugeschrieben: 'Ich nenne diejenige Elektrizität positiv, die, durch blankes Glas erregt, auf leitende Körper geleitet wird; die entgegengesetzte nenne ich negativ.'

AEPINUS und WILCKE kamen zu dem Ergebnis, dass 'gewöhnliche Materie' (darunter verstanden sie ungefähr das, was wir heute Materie ohne äußere Elektronen nennen würden) sich abstößt, die Teilchen der 'elektrischen Flüssigkeit' (heute äußere

did not receive general attention.

In 1708 WALL compared the spark which flashes over rubbed amber with thunder and flash, an indication that a flash is an electrostatic discharge.

In 1729 GRAY found that electricity is transferred by certain substances which DESAGULIERS called non-electrics or conductors. GRAY found that electricity is assembled at the surface of bodies. In 1734 DUFAY observed that there are two kinds of electricity, vitreous and resinous electricity; similar ones repel each other, whereas dissimilar ones attract each other.

Improved electrostatic generators were designed between 1744 and 1746 by JOHANN HEINRICH WINKLER, GEORGE MATTHIAS BOSE and BENJAMIN WILSON.

The capacitor in form of a Leyden jar was invented in 1745 by PIETER VAN MUSSCHENBROEK, and independently probably a bit earlier by EWALD VON KLEIST, described by J. G. KRÜGER in 1746.

In 1746 WILLIAM WATSON concluded that 'in charging or discharging of a Leyden jar electricity is transferred, but it is not created or destroyed.' 'Under certain circumstances, it was possible to render the electricity in some bodies more rare than it naturally is, and, by communicating this to other bodies, to give them an additional quantity, and make their electricity more dense.' This was a first indication of the conservation of charge.

Similar experiments conducted by BENJAMIN FRANKLIN after a talk by DR. SPENCE who had come from Scotland to America, brought him in 1747 to the conclusion that 'the total amount of electricity in an insulated system is invariable.' FRANKLIN became popular by the introduction of the lightning rod. He realized that lightning was an electric discharge.

The introduction of the signs for charges is ascribed to both FRANKLIN and LICHTENBERG (1777): 'I call that electricity positive, which, stimulated by blank glass, is transferred to conduction bodies; the opposite one I call negative.'

AEPINUS and WILCKE found that 'ordinary matter' (this is approximately what we nowadays call matter without outer electrons) repels itself, particles of the 'electric fluid' (nowadays called outer electrons) are repelling themselves, too, and ordinary matter and the

Elektronen) sich ebenfalls abstoßen und gewöhnliche Materie und die elektrische Flüssigkeit einander anziehen. Weiterhin stellten sie fest, dass Glas und sogar Luft für die elektrische Flüssigkeit undurchdringlich ist, obwohl sich die elektrische Wechselwirkung über größere Entfernungen erstreckt.

Das Phänomen der Influenz (auch elektrische Induktion), das schon von GUERICKE, JOHN CANTON und WILCKE beobachtet worden war, erklärte AEPINUS 1757 mit den elektrostatischen Kräften und der freien Beweglichkeit der elektrischen Flüssigkeit. WILCKE beschrieb 1762 viele Experimente im Zusammenhang mit der Influenz und argumentiert, dass ein Dielektrikum im elektrischen Feld polarisiert ist.

JOSEPH PRIESTLEY berichtet 1767 in seinem wenig beachteten Werk *History and present State of Electricity* von einem von FRANKLIN ausgeführten und von ihm wiederholten Experiment, dass im Inneren einer Metalldose keine elektrische Kraft auftritt und die Innenflächen keine Ladungen tragen. Er schließt daraus, dass sich gleichnamige Ladungen mit einer Kraft abstoßen, die umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstandes ist. 'Können wir nicht aus dem Experiment schließen, dass die Anziehung der Elektrizität denselben Gesetzen wie die Gravitation genügt,... da man leicht zeigen kann, dass die Erde, hätte sie die Form einer Schale, einen Körper im Inneren nicht nach einer Seite mehr anziehen würde als zur anderen.'

DANIEL BERNOULLI hatte 1760 die Vermutung geäußert, dass für die elektrostatische Wechselwirkung ein $1/r^2$ -Gesetz gelten sollte. JOHN ROBISON hatte 1769 vermutlich als erster die $1/r^n$ -Abhängigkeit mit $n = 2 \pm 0.06$ gemessen. CAVENDISH hatte 1771 erklärt, dass die Wechselwirkung mit einer inversen Potenz kleiner als 3 abfällt. ROBISON und CAVENDISH ließen Jahre verstreichen, bis sie ihre Ergebnisse veröffentlichten. CAVENDISH hatte 1775 vergleichende Angaben über die Leitwerte verschiedener Substanzen gemacht (Eisen, Seewasser, etc.).

COULOMB verifizierte 1785 mittels der von MICHELL und unabhängig von ihm entwickelten Drehwaage das $1/r^2$ -Gesetz sehr genau. Die Drehwaage diente auch zur Bestimmung der Gravitationskonstante (CAVENDISH).

POISSON stellte 1813 die nach ihm benannte Gleichung für das elektrostatische Potential auf. LAPLACE hatte 1777 gezeigt, dass der nach ihm benannte Operator angewandt auf das Gravitationspotential in dem Teil des Raums, der materiefrei ist, Null ergibt. POISSON hatte nun die Dichte der Materie mit eingeführt und

electric fluid attract each other. Further, they realized that glass and even air is impermeable for the electric fluid despite the fact that the electric interaction acts over larger distances.

AEPINUS explained in 1757 the phenomenon of influence (or electric induction), which had already been observed by GUERICKE, CANTON, and WILCKE, by the electrostatic forces and the free mobility of the electric fluid. WILCKE described in 1762 many experiments in connection with influence and argues that dielectric media are polarized in an electric field.

JOSEPH PRIESTLEY communicates in his work *The History and present State of Electricity ...* which did not receive much attention an experiment conducted by FRANKLIN and repeated by him that inside a metallic box there is no electric force and the interior sides do not carry any charges. He concludes that charges of equal sign repel each other with a force inversely proportional to the square of the distance. 'May we not infer from this experiment that the attraction of electricity is subject to the same laws with that of gravitation, ... since it is easily demonstrated that were the earth in the form of a shell, a body in the inside of it would not be attracted to one side more than another?'

In 1760 DANIEL BERNOULLI conjectured that there might be a $1/r^2$ -law for the electrostatic interaction. In 1769 JOHN ROBISON was presumably the first to measure a $1/r^n$ -dependence with $n = 2 \pm 0.06$. In 1771 CAVENDISH declared that the interaction falls off with an inverse power less than 3. It took many years until ROBISON's and CAVENDISH's results were published. In 1775 CAVENDISH gave comparative results for the conductances of various materials. (iron, sea water, etc.)

In 1785 COULOMB verified by means of the torsion balance invented by MICHELL and independently by himself the $1/r^2$ -law with high precision. This torsion balance served also for the determination of the gravitational constant (CAVENDISH).

In 1813 POISSON showed that the electrostatic potential obeys the equation, now called after him. In 1777 LAPLACE had shown that the operator, now called Laplacian, applied to the gravitational potential in matter free space yields zero. POISSON had included the regions filled with matter, and explicitly stated

ausdrücklich darauf hingewiesen, dass dies auch analog im elektrostatischen Fall gilt. Er hat damit das elektrostatische Potential eingeführt und darauf hingewiesen, dass es auf der Oberfläche von Leitern konstant ist. GEORGE GREEN hat 1828 die Überlegungen POISSONS weitergeführt. Wir kennen das GREENSche Theorem (B.67). Die GREENSche Funktionen sind nach ihm benannt.

WILLIAM THOMSON (LORD KELVIN) (1845) und MOSSOTTI (1847) stellten auf Grund von Überlegungen FARADAYS die Zusammenhänge zwischen Polarisation und elektrischem Feld her, die wir in Abschnitt 6 dargelegt haben, $\mathbf{D} = \mathbf{E} + 4\pi\mathbf{P} = \epsilon\mathbf{E}$, $\rho_P = -4\pi \operatorname{div} \mathbf{P}$.

30.c Magnetostatik

Bereits im Altertum waren Magnete bekannt. Sie sind nach der Stadt Magnesia in Thessalien benannt, in deren Gegend der Magnetstein (Magnetit Fe_3O_4) natürlich vorkommt, der die Eigenschaft hat, anderen Magnetstein und Eisen anzuziehen. Bereits um 1000 waren in China magnetische Nadeln als Richtungsweiser bekannt. Der englische Enzyklopädist ALEXANDER NECKAM berichtet vom Kompass.

Der Kreuzfahrer PETRUS PEREGRINUS DE MARICOURT gab 1269 in seiner *Epistola de magnete* eine genaue Beschreibung der Magnetsteine. Er legte auf einen runden Magnetstein an verschiedenen Stellen eine Eisennadel und markierte die Richtungen, welche die Nadel einnahm. Er fand, dass diese Kreise wie die Meridiane der Erde verliefen und sich in zwei Punkten trafen, die er Pole nannte. Er beobachtete, dass ein zerbrochener Magnet zwei Magnete mit Nord- und Südpol bildet, es also keine magnetischen Monopole gibt.

Von zwei magnetischen Polen der Erde sprach zuerst 1588 LIVIO SANUTO. WILLIAM GILBERT gab 1600 eine umfassende Darstellung in seiner Arbeit *De magnete*. Er betont, dass die Erde ein großer Magnet ist.

Ähnlich dem Kraftgesetz zwischen Ladungen untersuchte man auch das Kraftgesetz zwischen den Polen von Magneten. NEWTON gab an, dass die Wechselwirkung fast mit $1/r^3$ abfällt. MICHELL fand 1750 auf Grund eigener Messungen wie auch denen von BROOK TAYLOR und MUSSCHENBROEK das $1/r^2$ -Gesetz, wie auch TOBIAS MAYER 1760, LAMBERT 1766. Dies führte rasch zu der Vorstellung von 'magnetischen Flüssigkeiten' im Sinne magnetischer Ladungen analog zu elektrischen. COULOMB vertrat die These, dass der Magnetismus in Molekülen gefangen sei, und nur

that one has an analog equation in electrostatics. Thus he has introduced the electrostatic potential and has stated that it is constant over the surface of a conductor. In 1828 GEORGE GREEN continued the calculations of POISSON. We know GREEN's theorem (B.67). GREEN's functions are named after him.

WILLIAM THOMSON (LORD KELVIN) (1845) and MOSSOTTI (1847) formulated on the basis of FARADAY's considerations the relation between electric field and polarisation, $\mathbf{D} = \mathbf{E} + 4\pi\mathbf{P} = \epsilon\mathbf{E}$, $\rho_P = -4\pi \operatorname{div} \mathbf{P}$, which we showed in sect. 6.

30.c Magnetostatics

Magnets were already known in antiquity. Their name is derived from the city of Magnesia in Thessalia, where load stone (magnetite Fe_3O_4) occurs naturally, which has the property to attract other load stone and iron. Already about the year 1000 in China magnetic needles were known to have directive properties. The English encyclopedist ALEXANDER NECKAM reports on the compass.

In 1269 The crusader PETRUS PEREGRINUS DE MARICOURT gave a precise description of magnetic stones in his *Epistola de magnete*. He laid an iron needle on a round magnetic stone and marked the directions which was assumed by the needle. He found that these lines formed circles like the meridians of the earth which passed through two points, which he called poles. He observed that a magnet broken into two pieces constitute again magnets with North and South poles; thus no magnetic monopoles exist.

In 1588 the idea of two magnetic poles of the earth was first noted by LIVIO SANUTO. In 1600 WILLIAM GILBERT gave a comprehensive review in his work *De magnete*. He emphasizes that the earth is a large magnet.

Similarly to the force law between charges the force between poles of a magnet was investigated. NEWTON found a law close to $1/r^3$. In 1750 MICHELL found the $1/r^2$ -law based on own measurements and on those of BROOK TAYLOR and MUSSCHENBROEK, similarly in 1760 TOBIAS MAYER and in 1766 LAMBERT. This led soon to the idea of a 'magnetic fluid' in the sense of magnetic charges similarly to electric ones. COULOMB put forward the thesis that magnetism is captured in molecules and only inside molecules both magnetic fluids can be separated and yield magnetization.

innerhalb dieser könnten sich die beiden magnetischen Flüssigkeiten trennen und so eine Magnetisierung bewirken. (Die TAYLOR-Reihe ist nach BROOK TAYLOR benannt, obwohl sie schon vorher bekannt war).

POISSON führte 1824 nach dem elektrischen Potential auch ein magnetisches, ähnlich dem in Unterabschnitt 11.b, ein sowie den quantitativen Begriff der Magnetisierung. Eine weiterführende Theorie wurde von GREEN 1828 gegeben.

WILLIAM THOMSON (LORD KELVIN) stellte 1847 die Gleichungen $\operatorname{div} \mathbf{B} = 0$ und $\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{0}$ für den stromfreien Raum auf, führte die Beziehung $\mathbf{B} = \mathbf{H} + 4\pi\mathbf{M}$ ein, fand den Ausdruck für die magnetische Energiedichte und schloss daraus, dass in der Beziehung $\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$, die schon POISSON 1824 mit einem Tensor μ für anisotrope Kristalle einführte, μ symmetrisch sein muss. Er prägte die Begriffe Suszeptibilität und Permeabilität.

30.d Aufbruch zur Elektrodynamik

Lange stellten Elektrizität und Magnetismus zwei von einander unabhängige Phänomene dar. Einen ersten Hinweis auf eine Beziehung ergab sich durch die Beobachtung, dass ein Blitz eine Kompassnadel ausschlagen ließ. Auch gab es vereinzelt Fälle, in denen durch Blitzschlag Magnete ummagnetisiert wurden oder Eisen magnetisiert wurde: 1731, so wird berichtet, schlug ein Blitz in eine Kiste mit Messern und Gabeln, die schmolzen. Beim Aufheben bemerkte man, dass herumliegende Nägel angezogen wurden. Ein Schiff, das 1681 nach Boston fuhr, wurde vom Blitz getroffen. Anschließend zeigten die Kompassnadeln in die umgekehrte Richtung.

Experimentell verbesserte sich die Situation, als VOLTA um 1800 den Prototyp der Batterie mit der nach ihm benannten Säule erfand, die es erlaubte, stetige Ströme zu erzeugen. Tatsächlich stand damit jetzt eine elektrische Leistung zur Verfügung, die die bisherige elektrostatische um einen Faktor 1000 überstieg.

1820 beobachtete ØRSTED, dass eine Magnetnadel durch einen parallel dazu fließenden Strom abgelenkt wurde. Diese Entdeckung verbreitete sich wie ein Lauffeuer in Europa. BIOT und SAVART bestimmten noch im gleichen Jahr quantitativ die Kraft eines geraden Stromes auf einen Magneten. Auf Grund einer Rechnung von LAPLACE für einen geraden Draht und einem anderen Experiment mit einem V-förmigen

(TAYLOR series are named after BROOK TAYLOR, although they were known before.)

In 1824 POISSON introduced a magnetic potential besides the electric one similarly to the one in subsection 11.b and introduced magnetization quantitatively. In 1828 this theory was extended by GREEN.

WILLIAM THOMSON (LORD KELVIN) introduced the equations $\operatorname{div} \mathbf{B} = 0$ and $\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{0}$ for current-free space, introduced the relation $\mathbf{B} = \mathbf{H} + 4\pi\mathbf{M}$, obtained the expression for the magnetic energy density and concluded that in the relation from the expression $\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$, which had already been given in 1824 by POISSON with a tensor μ for anisotropic crystals the tensor μ has to be symmetric. He coined the notions susceptibility and permeability.

30.d Set out for Electrodynamics

For a long time electricity and magnetism were two separate phenomena. A first hint on a connection was the observation that lightnings made compass needles deflected. Occasionally it happened that during lightning the magnetization of magnets was reversed or that iron became magnetic: It is reported that in 1731 a flash hit a box filled with knives and forks, which melted. When they were taken up some nails which laid around were attracted. In 1681 a ship bound for Boston was hit by a flash. After this stroke the compasses showed into the opposite direction.

About 1800 the experimental situation improved when VOLTA invented what is called the VOLTA pile, a prototype of battery. Now it was possible to generate continuous electric currents with a power improved by a factor 1000 over the electrostatic one.

In 1820 ØRSTED observed that a magnetic needle was deflected by a parallel flowing current. This discovery spread like wildfire in Europe. BIOT and SAVART determined in the same year quantitatively the force of a straight current on a magnet. On the basis of a calculation of LAPLACE for the straight wire and another experiment with a V-shaped wire, BIOT abstracted in 1824 the force between a magnetic pole and a current

Draht erschloss Biot 1824 die Kraft zwischen einem magnetischen Pol und einem Leiterelement, was im wesentlichen dem nun nach Biot und Savart benannten Gesetz entspricht.

AMPÈRE nahm 1820 ein Kraft-Gesetz der Form

$$\mathbf{K} = I_1 I_2 \oint \oint \hat{\mathbf{r}}_{12} (f_1(r_{12})(d\mathbf{r}_1 \cdot d\mathbf{r}_2) + f_2(r_{12})(\hat{\mathbf{r}}_{12} \cdot d\mathbf{r}_1)(\hat{\mathbf{r}}_{12} \cdot d\mathbf{r}_2)),$$

zwischen zwei von Strömen I_1 und I_2 durchflossenen Schleifen an. Durch Vergleich mit seinen Messungen erhielt er $f_1 = A/r_{12}^2$, $f_2 = B/r_{12}^2$. Jeder dieser beiden Beiträge ergibt einzeln bei geeigneter Wahl von A bzw. B die Kraft zwischen zwei geschlossenen Leiterschleifen, vgl. (9.21). AMPÈRE hatte aber bereits beobachtet, dass die Kraft auf ein Leiterelement senkrecht zu diesem steht, was mit $B = -3A/2$ erfüllt wird. So steckt bereits in seinem Kraft-Gesetz die LORENTZ-Kraft, obwohl er den Begriff eines magnetischen Feldes nicht verwendet.

Nach Vorarbeiten von AMPÈRE und ARAGO konstruierte WILLIAM STURGEON 1825 einen Elektromagneten, der das zwanzigfache seines Gewichtes tragen konnte.

HUMPHREY DAVY fand 1821, dass der Leitwert ('leitende Kraft') von Metallen proportional ihrem Querschnitt und invers proportional ihrer Länge waren. GEORG WILHELM OHM fand 1826-27 in seiner Arbeit *Die galvanische Kette* den linearen Zusammenhang zwischen dem Strom durch einen Leiter und der Spannung, die am Leiter anliegt. KIRCHHOFF formulierte 1845 die nach ihm benannten Knoten- und Maschengesetze (13.10, 13.11).

MICHAEL FARADAY, ein Buchbindergeselle mit naturwissenschaftlichen Interessen, bewarb sich 1812 um eine Anstellung bei der Royal Institution in London. Sein Direktor, HUMPHREY DAVY, akzeptierte ihn, kaum ahnend, dass er damit einen der größten zukünftigen Experimentatoren in seinem Institut aufgenommen hatte. (Nach DAVY'S Tod wurde FARADAY Direktor des Instituts.) Kurz nach der Entdeckung ØRSTED'S untersuchte FARADAY die Experimente zur Elektrizität und zum Magnetismus, die er 1821 in dem *Historical Sketch of Electro-Magnetism* zusammenfasste. Angeregt durch die Influenz elektrischer Ladungen, d.h. die Beeinflussung elektrischer Ladungen auf einem Leiter durch andere Ladungen, untersuchte er, ob ein Strom in einem Leiterkreis einen Strom in einem anderen Leiterkreis anregen könne. Er fand, dass dies

element, which is basically what we now call the law of BIOT and SAVART.

In 1820 AMPÈRE assumed a law of force of the form

$$\mathbf{r}_{12} = \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2, \quad \hat{\mathbf{r}}_{12} = \frac{\mathbf{r}_{12}}{r_{12}}. \quad (30.1)$$

between two circuits with currents I_1 and I_2 . In comparison with his measurements he obtained $f_1 = A/r_{12}^2$, $f_2 = B/r_{12}^2$. Each one of these contributions yields separately by an appropriate choice of A and B , resp., the force between two closed circuits, compare (9.21). AMPÈRE had already observed that the force on a line element of the conductor is perpendicular to it, which is fulfilled by $B = -3A/2$. Thus his force law includes already the LORENTZ force, although he did not use the notion of a magnetic field.

After some preliminary work by AMPÈRE and ARAGO, WILLIAM STURGEON constructed in 1825 an electromagnet which could hold twenty times its own weight.

In 1821 HUMPHREY DAVY found that the conductance ('conducting power') of a metal is proportional to its cross-section and inverse proportional to its length. GEORG WILHELM OHM found in his *Die Galvanische Kette* (1826-1827) the linearity between the current through a conductor and the voltage applied to the conductor. In 1845 KIRCHHOFF formulated the current and the voltage laws (13.10, 13.11) named after him.

In 1812 MICHAEL FARADAY, a bookbinder journeyman interested in science applied for a position at the Royal Institution in London. Its director, HUMPHREY DAVY accepted the application, hardly anticipating that he had accepted one of the greatest future experimentalists to his institute. (After DAVY'S death FARADAY became director of the institute.) Shortly after ØRSTED'S discovery FARADAY investigated the known experiments in electricity and magnetism, which he reviewed in his *Historical Sketch of Electro-Magnetism* (1821). Inspired by the influence i.e. the effect of a charge on charges on a conductor, he investigated, whether a current may excite a current on another circuit. He found that this happened when the current in the first circuit changed. This was the starting point for the law of induction. (1831)

jeweils beim Verändern des Stromes im ersten Leiterkreis geschah. Dies war der Ausgangspunkt für das Induktionsgesetz (1831).

Als ein Politiker FARADAY fragte, was denn seine Entdeckungen wert seien, antwortete er: 'Im Moment weiss ich es noch nicht, aber eines Tages wird man sie besteuern können.' Bekannt sind natürlich auch FARADAYS Arbeiten zur Elektrolyse. Da er selbst keine klassische Ausbildung genossen hatte, bat er WILLIAM WHEELER, einen Philosophen und Mathematiker aus Cambridge um Hilfe bei der Wahl von Termini. Dabei entstanden die uns geläufigen Begriffe wie Elektrode, Anode, Kathode, Ion, Elektrolyse. FARADAY entdeckte auch den Diamagnetismus.

FARADAY arbeitete sehr viel mit dem Konzept elektrischer und magnetischer Feldlinien. Er machte sie durch Gipskriställchen und Eisenfeilspäne sichtbar. Diese Verfahren waren nicht neu, aber bei mathematischen Physikern in der Nachfolge NEWTONS, die das Konzept der Fernwirkung vorzogen, nicht populär. Bereits WILCKE machte die elektrischen Feldlinien sichtbar. Viele Experimente FARADAYS zur Elektrostatik hatte WILCKE bereits durchgeführt. Eine Zusammenstellung von Experimenten zum gleichen Thema beider Physiker findet sich in der *Geschichte der Physik* von HOPPE. Die magnetischen Kraftlinien wurden schon von NICCOLO CABEO (1629) und PETRUS PEREGRINUS (1269) sichtbar gemacht. Der Leser überlege sich, wieso elektrische und magnetische Kraftlinien durch länglich geformte Körper hoher Dielektrizitätskonstante oder Suszeptibilität sichtbar gemacht werden.

FARADAY hatte eine recht präzise Vorstellung vom magnetischen Feld. Er betrachtete es als Röhren von Feldlinien mit der Eigenschaft, dass das Produkt aus der Feldstärke und dem Querschnitt proportional ist, was der Divergenzfreiheit entspricht. Er stellte fest, dass der induzierte Strom proportional zur Anzahl der Feldlinien ist, die der Leiter überstreicht; wir sagen heute proportional zur Änderung des magnetischen Flusses.

Der Name Elektron wurde 1890 von JOHNSTONE STONEY geprägt. Vorher wurden auch (die heutigen) Elektronen als Ionen bezeichnet.

30.e Elektrodynamik und Wellen

FARADAY beobachtete 1845, dass polarisiertes Licht, das man durch Glas schickt, seine Polarisations Ebene ändert, wenn parallel zum Strahl ein Magnetfeld angelegt wird. Das veranlasste ihn zur Vermutung, dass

When a politician asked FARADAY, what his discoveries are worth, he answered 'Presently I do not know, but may be they can be taxed one day.' Well-known are also FARADAY's investigations on electrolysis. Since he himself did not enjoy a classical education he asked WILLIAM WHEELER, a philosopher and mathematician from Cambridge to help him choose appropriate termini. They introduced the names electrode, anode, cathode, ion, electrolysis which are still in use. FARADAY discovered diamagnetism, too.

FARADAY often used the concept of electric and magnetic field lines. He made them visible by plaster shavings and iron filings. These procedures were not new, but they were not popular with mathematical physicists in the succession of NEWTON who preferred the concept of long-distance action. Already WILCKE made electric field lines visible. Many experiments of FARADAY on electrostatics were already performed by WILCKE. A survey of experiments of both physicists on the same topic is given in the *History of Physics* by HOPPE. The lines of magnetic force were already made visible by NICCOLO CABEO (1629) and by PETRUS PEREGRINUS (1269). The reader should consider why electric and magnetic lines of forces can be made visible by prolate bodies of large dielectric constant and susceptibility, resp.

FARADAY had a rather precise imagination of the magnetic field. He considered it as tubes of lines with the property that the product of magnitude and cross-section is constant, which corresponds to a divergency free field. He stated that the induced current is proportional to the number of field lines crossed by the circuit; we say today proportional to the change of the magnetic flux.

In 1890 the name electron was coined by JOHNSTONE STONEY. Before also (today's) electrons were called ions.

30.e Electrodynamics and Waves

In 1845 FARADAY observed that polarized light transversing glass changes its plain of polarization if a magnetic field is applied parallel to the ray. From this he conjectured that light is an electromagnetic

es sich beim Licht um einen elektromagnetischen Vorgang handelt.

Bei den Bemühungen um eine einheitliche Theorie des Elektromagnetismus gab es zwei Stoßrichtungen. Die eine ging vom Induktionsgesetz aus und führte das Vektorpotential \mathbf{A} ein, die zweite verharrte bei der Fernwirkungstheorie und führte im Anschluss an die Untersuchungen AMPÈRE'S geschwindigkeitsabhängige Kräfte ein.

Das Vektorpotential wurde auf Grund verschiedener Überlegungen eingeführt. FRANZ NEUMANN stellte 1845/48 fest, dass sich die Induktionsspannung als Zeitableitung des Integrals $\oint \mathbf{dr} \cdot \mathbf{A}(\mathbf{r})$ schreiben ließ. Auf Grund anderer Überlegungen, die uns heute nicht mehr so zwingend erscheinen, haben 1846 sowohl WILHELM WEBER als auch WILLIAM THOMSON (LORD KELVIN) das Vektorpotential eingeführt. KIRCHHOFF verwendete es 1857.

KIRCHHOFF (1848) und RIEMANN (1858) fiel auf, dass in den Kraftgleichungen für Ladungen und Ströme Faktoren eingehen, deren Dimension das Quadrat einer Geschwindigkeit c ist. Zwei Ladungen q_1 und q_2 im Abstand r üben die COULOMB-Kraft $q_1 q_2 / r^2$ aufeinander aus, zwei Ströme I_1 und I_2 der Länge l im Abstand r ($r \ll l$) die Kraft $k I_1 I_2 l / (c^2 r)$ mit einer Zahlenkonstanten k , die der Leser selbst bestimmen möge. Die Bestimmung von c zeigte, dass diese Geschwindigkeit gut mit der Lichtgeschwindigkeit übereinstimmte. Es waren dann WHEATSTONE 1834, FIZEAU und GOUNELLE 1849, FOUCAULT 1850, die erste Messungen zur Ausbreitungsgeschwindigkeit der Elektrizität durchführten, wobei sie Werte erhielten, die um einen Faktor zwei oder anderthalb zu groß oder zu klein waren. (Dass einige Werte größer als die Lichtgeschwindigkeit waren, war möglich, da nicht alle Anordnungen linear waren.)

Die Einführung unterseeischer Kabel zur Übertragung elektrischer Signale begann 1851 (Dover-Calais). WILLIAM THOMSON (KELVIN) fand 1854, dass sich für hinreichend hohe Frequenzen eine gedämpfte Welle mit nahezu konstanter Geschwindigkeit ausbreitet. KIRCHHOFF fand 1857, dass diese Geschwindigkeit für kreisförmigen Querschnitt mit der Geschwindigkeit c übereinstimmte, die auch als Quotient zwischen den Kräften zwischen zwei Ladungen und zwei Strömen auftritt. Dieser Wert war kurz zuvor von WILHELM WEBER und KOHLRAUSCH zu 3.1×10^{10} cm/sec gemessen worden.

Schließlich war es MAXWELL, dem es auf Grund seiner Vorstellungskraft und analytischen Begabung gelang, die Gleichungen der Elektrodynamik in sich geschlossen darzustellen. Er hatte durch das Studium

phenomenon.

In order to obtain a unified theory of electromagnetism there were mainly two directions of effort. One started out from the law of induction and introduced the vector-potential \mathbf{A} , the other stayed mainly with the theory of action on distance following AMPÈRE'S investigations and introduced velocity dependent forces.

The vector-potential was introduced on the basis of various considerations. In 1845/48 FRANZ NEUMANN found in that the voltage of induction could be expressed as the time-derivative of the integral $\oint \mathbf{dr} \cdot \mathbf{A}(\mathbf{r})$. In 1846 the vector potential was also introduced by WILHELM WEBER and WILLIAM THOMSON (LORD KELVIN) on the basis of other considerations which today are no longer that convincing. In 1857 KIRCHHOFF used it.

In 1848 KIRCHHOFF and in 1858 RIEMANN realized that the equations of forces for charges and currents differed by a factor which is the square of a velocity c . Two charges q_1 and q_2 at distance r exert the COULOMB force $q_1 q_2 / r^2$ on each other, two wires of length l at distance r ($r \ll l$) carrying currents I_1 and I_2 exert the force $k I_1 I_2 l / (c^2 r)$ on each other with a number k , which may be determined by the reader. The determination of c showed that this velocity agreed well with that of light. In 1834 first measurements of the propagation of electricity were performed by WHEATSTONE, in 1849 by FIZEAU and GOUNELLE, and in 1850 by FOUCAULT. They yielded velocities which were larger or smaller by factors of two or three-half from the velocity of light. (That some velocities were larger than light velocity was only possible because some arrangements were not linear).

In 1851 the construction of cables under water for the transmission of electric signals began (Dover-Calais). In 1854 WILLIAM THOMSON (KELVIN) found that at sufficiently high frequencies a damped wave propagates with approximately constant velocity. KIRCHHOFF showed by calculation that the velocity for a circular cross-section agrees with the velocity c , which appears in the ratio of the forces between charges and currents. This value had been measured shortly before by WEBER and KOHLRAUSCH to 3.1×10^{10} cm/sec.

Finally it was MAXWELL who succeeded due to his imagination and analytic facilities to present the equations of electrodynamics in closed form. Studying FARADAY'S *Experimental Researches* he had learned a

FARADAYS *Experimenteller Untersuchungen* viel gelernt und doch die notwendige Abstraktion behalten. An FORBES schrieb er 1857, dass er 'keineswegs ein Konvertit zu den Ansichten FARADAYS' war, aber 1858 schrieb er über FARADAY als 'dem Kern alles elektrischen seit 1830.'

MAXWELL verwendete immer noch viele mechanische Analogien wenn er etwa die Felder \mathbf{B} und \mathbf{D} als Geschwindigkeiten einer inkompressiblen Flüssigkeit betrachtet. Er bemerkte 1861, dass in der Gleichung $\text{rot } \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}$ der Verschiebungsstrom $\dot{D}/(4\pi)$ zu \mathbf{j} hinzuzufügen ist, so dass die Erhaltung der Ladung gewährleistet ist. Aus diesen Gleichungen fand er, dass die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit durch c , das im Verhältnis der Kräfte zwischen Ladungen und Strömen auftritt, gegeben ist, was sehr gut mit den gemessenen Werten übereinstimmte. Daraus schloss er 'Wir können kaum die Einlassung umgehen, dass das Licht aus den transversalen Wellen des gleichen Mediums besteht, das die Ursache der elektrischen und magnetischen Phänomene ist.' MAXWELLS Gleichungen enthielten die Potentiale Φ und \mathbf{A} , wobei er die Eichung verwendete, die wir COULOMB-Eichung nennen. Den kompletten Satz der Gleichungen der Elektrodynamik hatte er 1864 in seiner Arbeit *On a Dynamical Theory of the Electromagnetic Field* vorgestellt. Sein komplettes Lehrbuch *Treatise on Electricity and Magnetism* erschien 1871.

1867 veröffentlichte LUDVIG VALENTIN LORENZ seine Theorie des Elektromagnetismus, die den Verschiebungs-Strom enthielt und die mit der nach ihm benannten Eichung die Ausdrücke (21.14) und (21.15) für die retardierten Potentiale enthielt. Die Arbeit fußte auf der Potentialtheorie von FRANZ NEUMANN. Auch RIEMANN fand 1858 diese retardierten Potentiale, doch wurde seine Arbeit erst 1867 zusammen mit der LORENZschen veröffentlicht. Vieles, was LUDVIG LORENZ fand, wurde später dem Holländer HENDRICK LORENZ zugeschrieben, der umfassende Arbeiten zur Elektrodynamik schrieb. Dabei spielte auch die Fast-Namensgleichheit eine Rolle, wie auch die unberechtigte Kritik MAXWELLS (1886) 'Aus den Annahmen dieser beiden Arbeiten können wir die Folgerungen ziehen, erstens, dass Kraft und Gegenkraft nicht immer gleich und entgegengesetzt sind, und zweitens, dass man Apparate konstruieren kann, die beliebige Mengen Arbeit aus ihren Mitteln produzieren können.' Ironischerweise hatte MAXWELL nicht bedacht, dass auch in den Feldern Energie und Impuls steckt. Die LORENZ-LORENZ-Beziehung (1880), die der CLAUSIUS-MOSSOTTI-Beziehung (6.34) äquivalent ist, wenn man ϵ durch das Quadrat n^2 des

lot and still maintained the necessary abstraction. In 1857 he wrote to FORBES that he was 'by no means as yet a convert to the views which FARADAY maintained', but in 1858 he wrote about FARADAY as 'the nucleus of everything electric since 1830.'

MAXWELL still worked a lot using mechanical analogies when he considered the fields \mathbf{B} and \mathbf{D} as velocities of an incompressible fluid. In 1861 he realized that in the equation $\text{curl } \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}$ the displacement current $\dot{D}/(4\pi)$ had to be added to \mathbf{j} , so that conservation of charge was guaranteed. From these equations he found that the velocity of light in vacuum was given by the factor c appearing in the ratio between forces between charges and currents, which agreed very well with the measured ones. He concluded: 'We can scarcely avoid the interference that light consists in the transverse undulations of the same medium which is the cause of electric and magnetic phenomena.' MAXWELL'S equations contained the potentials Φ and \mathbf{A} , where he used the gauge we call COULOMB gauge. In 1864 he presented the complete set of electrodynamic equations in his paper *On a Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*. In 1871 his monograph *Treatise on Electricity and Magnetism* was published.

In 1867 LUDVIG VALENTIN LORENZ published his theory of electromagnetism, which contained the displacement current and the expressions (21.14) and (21.15) for the retarded potentials in which he had used the gauge named after him. The paper was based on the potential theory of FRANZ NEUMANN. In 1858 RIEMANN had found the retarded potentials, too. However, his paper was published only in 1867 together with that of LORENZ. Much of what LUDVIG LORENZ found, was later attributed to the Dutch HENDRICK LORENZ who wrote comprehensive papers on electrodynamics. This might be also due to their nearly equal names as well as MAXWELL'S inadequate criticism (1868) 'From the assumptions of both these papers we may draw the conclusions, first, that action and reaction are not always equal and opposite, and second, that apparatus may be constructed to generate any amount of work from its resources.' Ironically MAXWELL did not realize that the fields contained energy and momentum. The LORENZ-LORENZ relation (1880) which is equivalent to the CLAUSIUS-MOSSOTTI relation (6.34) when one replaces ϵ by the square n^2 of the index of refraction goes back to both of them.

Brechungsindex ersetzt, geht auf beide zurück.

In seinem *Treatise on Electricity and Magnetism* leitete MAXWELL den Spannungstensor des elektromagnetischen Feldes her. Der POYNTING-Vektor als Dichte des elektromagnetischen Energiestroms wurde von POYNTING 1884 und von HEAVISIDE 1885 gefunden. Schließlich fand J.J. THOMSON 1893, dass die elektromagnetische Impulsdichte durch den POYNTING-Vektor ausgedrückt werden kann.

1889 gab HEAVISIDE den Ausdruck (1.17) für die Kraft an, die auf eine Ladung in einem Magnetfeld wirkt. 1881 hatte J.J. THOMSON, der Kathodenstrahlen untersuchte, den halben Wert dafür angegeben. LORENTZ gibt das korrekte Ergebnis in seiner Arbeit aus dem Jahr 1895 an. Sie wird heute als LORENTZ-Kraft bezeichnet. MAXWELL gab bereits 1864 $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ als Beitrag zur elektromotorischen Kraft in einem bewegten Körper an.

Schon WILCKE (1758) und FARADAY (1837) hatten den Begriff der Polarisierung eines Isolators eingeführt. Die Vorstellung, dass die Magnetisierung auf atomaren Strömen beruht, findet sich bereits bei COULOMB, AMPÈRE und THOMSON (KELVIN). Dieser Zusammenhang tritt in den Formulierungen MAXWELLS nicht klar heraus. Es ist das Verdienst LORENTZ', dass er 1895 mit seiner *Elektronentheorie* die Felder \mathbf{E} und \mathbf{B} als elementare Felder einführt und klarstellte, dass die beiden anderen \mathbf{D} und \mathbf{H} nur durch Polarisierung und Magnetisierung entstehen. 'Sitz des elektromagnetischen Feldes ist der leere Raum. Es gibt in diesem nur *einen* elektrischen und *einen* magnetischen Feldvektor. Dieses Feld wird erzeugt durch atomistische elektronische Ladungen, auf welche das Feld ponderomotorisch zurückwirkt. Eine Verknüpfung des elektromagnetischen Feldes mit der ponderablen Materie besteht nur dadurch, dass elektrische Elementarladungen mit atomistischen Bausteinen der Materie starr verbunden sind.' Lorentz hat damit eine klare Trennung zwischen Elektrodynamik und den Eigenschaften der kondensierten Materie durchgeführt.

ALFRED LIÉNARD und EMIL WIECHERT gaben 1898 und 1900 die Potentiale einer beliebig bewegten Punktladung an.

MAXWELL fand bereits 1873, dass das Magnetfeld unter der Eichtransformation $\mathbf{A} \rightarrow \mathbf{A} + \nabla\chi$ invariant ist. Doch untersuchte er nicht die Konsequenzen für das skalare Potential. LORENTZ gab 1904 die allgemeine Eichtransformation an.

Neben LORENTZ haben wir es vor allem auch HENRI POINCARÉ, OLIVER HEAVISIDE und HEINRICH HERTZ zu verdanken, dass sie die Grundzüge der

In his *Treatise on Electricity and Magnetism* MAXWELL derived the stress tensor of an electromagnetic field. The POYNTING vector as the current density of electromagnetic energy was found by POYNTING (1884) and by HEAVISIDE (1885). In 1893 J.J. THOMSON finally found that electromagnetic momentum can be expressed by the POYNTING vector.

In 1889 HEAVISIDE gave the expression (1.17) for the force on a charge moving in a magnetic field. J.J. THOMSON who investigated cathode rays, had given it as half this amount in 1881. In 1895 LORENTZ gives the correct result in his treatise. Today it is called LORENTZ force. Already in 1864 MAXWELL gave the contribution $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ to the electromotive force in a moving body.

Already WILCKE (1758) and FARADAY (1837) introduced the notion of polarization of an insulator. The idea that magnetization is related to atomic currents was already found in the work of COULOMB, AMPÈRE and THOMSON (KELVIN). This connection is not clearly stated in MAXWELL's formulation. It is the merit of LORENTZ that in 1895 he introduced in his *Elektronentheorie* the fields \mathbf{E} and \mathbf{B} as fundamental fields and clarified that \mathbf{D} and \mathbf{H} are due to polarization and magnetization. 'Seat of the electromagnetic field is the empty space. In this space there is only one electric and one magnetic field-vector. This field is generated by atomistic electronic charges, onto which the fields in turn act ponderomotorically. A connection of the electromagnetic field with the ponderable matter exists only since the electric elementary charges are rigidly tied to the atomistic building blocks of matter.' Lorentz was able to provide a clear cut between electrodynamics and the properties of condensed matter.

ALFRED LIÉNARD (1898) and EMIL WIECHERT (1900) determined the potentials of an arbitrarily moving point charge.

In 1873 MAXWELL already realized that the magnetic field is invariant under a gauge transformation $\mathbf{A} \rightarrow \mathbf{A} + \nabla\chi$. However, he did not consider the consequences for the scalar potential. In 1904 LORENTZ gave the general gauge transformation.

Besides to LORENTZ we are indebted to HENRI POINCARÉ, OLIVER HEAVISIDE and HEINRICH HERTZ for working out MAXWELL's theory more clearly so that it

MAXWELLSchen Theorie klarer herausgearbeitet haben, so dass diese eine allgemeine Verbreitung fand.

LARMOR und SCHWARZSCHILD führten 1900 und 1903 das Prinzip der kleinsten Wirkung für das kombinierte System des elektromagnetischen Felds und geladener Teilchen ein.

MICHELSON und Mitarbeiter bestimmten seit 1878 die Lichtgeschwindigkeit mit hoher Präzision. Es war letztendlich HEINRICH HERTZ, dem es 1886 gelang, elektromagnetische Wellen herzustellen (HERTZscher Dipol) und zu detektieren, zunächst im Meter-Bereich, dann auch kürzere. WIENER wies 1890 die Wellennatur des Lichtes nach, indem er es auf einen Spiegel auffallen ließ und die periodische Schwärzung der Photoschicht durch die stehenden Wellen erhielt.

30.f Relativitätstheorie

Um die Geschwindigkeit der Erde gegen den postulierten Äther zu bestimmen, führten MICHELSON und MORLEY ihr Experiment erstmals 1887 mit negativem Ergebnis durch: Keine Bewegung gegen den Äther konnte festgestellt werden. FITZGERALD postulierte 1889, dass sich alle Gegenstände in Richtung der Bewegung gegen den Äther verkürzen. LORENTZ gibt 1892 die Verkürzung bis Ordnung v^2/c^2 an (LORENTZ-Kontraktion, Unterabschnitt 23.b, β). Wesentlich war LORENTZ' Beobachtung, dass die Annahme eines Äthers, der sich mit Materie bewegt, falsch war.

VOIGT fand 1887, dass die homogene Gleichung $\square\Phi = 0$ mit dem D'ALEMBERT-Operator \square (20.13) unter einer Klasse von linearen Transformationen der \mathbf{x} und t invariant ist. LARMOR gab in seiner 1898 fertiggestellten und 1900 erschienen Arbeit *Äther und Materie* bereits die Transformation (23.2) an. Welchen Einfluss dies auf LORENTZ hatte, ist nicht bekannt. 1898 zog POINCARÉ bereits den Begriff der Gleichzeitigkeit in Zweifel. 1899 gab LORENTZ die nach ihm benannte Transformation mit einem unbestimmten Skalenfaktor, der dem Faktor f nach Gleichung (23.14) entspricht, an.

1904 fand LORENTZ, dass die MAXWELL-Gleichungen ohne Ladungen und Ströme invariant unter den Transformationen (23.2) sind, falls man die Felder in geeigneter Weise mittransformiert (siehe Abschnitt 25). 1905 bemerkte POINCARÉ, dass man die Ladungs- und Stromdichten so transformieren kann, dass der volle Satz MAXWELL-Gleichungen invariant unter LORENTZ-Transformationen ist (vgl. Abschnitte 24 und 25).

found a broad distribution.

In 1900 and 1903, resp., LARMOR and SCHWARZSCHILD introduced the principle of least action for the combined system of the electromagnetic field and charged particles.

Since 1878 MICHELSON and collaborators determined the velocity of light with high precision. Finally HEINRICH HERTZ succeeded in 1886 to produce electromagnetic waves (HERTZscher Dipol) and to detect them, initially in the range of meters, later also shorter ones. In 1890 WIENER proved the wave-nature of light by reflecting it on a mirror and obtaining a periodic blackening of the photographic emulsion by the standing waves.

30.f Theory of Relativity

In order to determine the velocity of the earth against the postulated ether MICHELSON and MORLEY performed their experiment initially in 1887 with the negative result: No motion against the ether was detected. In 1889 FITZGERALD postulated that all material objects are contracted in their direction of motion against the ether. LORENTZ gave an expression for this contraction in 1892 up to order v^2/c^2 (LORENTZ contraction, subsection 23.b, β). Essential was LORENTZ's observation that the assumption of an aether carried along with matter was wrong.

In 1887 VOIGT realized that the homogeneous equation $\square\Phi = 0$ with the D'ALEMBERT operator \square (20.13) is form invariant under a class of linear transformations of \mathbf{x} and t . LARMOR gives in his paper *Ether and Matter* written in 1898 and published in 1900 already the transformation (23.2). It is unknown whether this had an influence on LORENTZ. Already in 1898 POINCARÉ expressed doubts on the concept of simultaneity. In 1899 LORENTZ stated the transformation called after him, but with an undetermined scale factor, which corresponds to the factor f after eq. (23.14).

In 1904 LORENTZ found that MAXWELL's equations without charges and currents are invariant under the transformations (23.2) provided that the fields are transformed in an appropriate way (see section 25). In 1905 POINCARÉ realized that the charge and current densities could be transformed so that the full set of MAXWELL's equations are invariant in form under LORENTZ transformations (compare sections 24 and 25).

EINSTEIN formulierte 1905 in Unkenntnis der Arbeit von LORENTZ und gleichzeitig mit der oben genannten Arbeit von POINCARÉ die spezielle Relativitätstheorie in einer allgemeinen und vollständigen Weise. Er bemerkte, dass die Idee einer konstanten Lichtgeschwindigkeit in allen Inertialsystemen eine Realität ist, die nicht nur die Elektrodynamik, sondern die gesamte Physik einschließlich der Mechanik beherrscht, und welche die GALILEI-Invarianz ablöst. Der Grund, dass es so lange dauerte, die (spezielle) Relativitätstheorie zu entwickeln und die Wissenschaftler davon zu überzeugen, dass diese die Realität beschreibt, ist die Rolle, welche die Zeit in ihr spielt.

Es war (und ist für manchen noch heute) schwierig zu akzeptieren, dass man den Begriff einer absoluten (d. h. vom Inertialsystem unabhängigen) Gleichzeitigkeit aufgeben muss. Mehr zur Geschichte findet man in A. Pais, *"Raffiniert ist der Herrgott..."* Albert Einstein, Vieweg Verlag Braunschweig. Ein anderes Problem besteht darin, dass damit der Äther als Referenzsystem verschwand.

Eine elegante Formulierung des vierdimensionalen Raums wurde von MINKOWSKI 1908 eingeführt, die von EINSTEIN zunächst als überflüssig bezeichnet, später von ihm aber als nützlich geschätzt wurde. Ausgehend von der speziellen Relativitätstheorie, die in einem ebenen Raum beschrieben wird, entwickelte EINSTEIN die allgemeine Relativitätstheorie unter der Annahme, dass die Gravitation durch eine Krümmung des Raums bewirkt wird.

30.g Von der klassischen zur Quanten-Elektrodynamik

Im Jahre 1900 stellte MAX PLANCK zunächst eine Interpolationsformel zwischen den beiden Grenzfällen für die Energieverteilung des schwarzen Strahlers in Abhängigkeit der Strahlungsfrequenz her, nämlich dem RAYLEIGH-JEANS-Gesetz (1900-1905) für niedrige Frequenzen und dem WIENSchen Gesetz (1896) für hohe Frequenzen, das PLANCKsche Strahlungs-Gesetz. Dieses stimmte hervorragend mit der Beobachtung überein. Wenige Monate später postulierte er, dass dies dadurch zu erklären sei, dass elektromagnetische Strahlung der Frequenz $\nu = \omega/(2\pi)$ keine beliebige Energie haben könne, sondern nur in ganzzahligen Vielfachen von $h\nu$ auftrete, wobei h eine neue Elementarkonstante ist, die man heute als PLANCKsches Wirkungsquantum bezeichnet. Diese Energiequantelung wurde alsbald durch den lichtelektrischen Effekt bestätigt: Die kinetische Energie der an einer

In 1905 EINSTEIN without the knowledge of LORENTZ's paper and simultaneously with POINCARÉ's work mentioned above formulated the theory of special relativity in a general and complete way. He realized that the idea of a constant velocity of light in all systems of inertia constitutes a reality which governs all physics including mechanics and not only electrodynamics and which has to replace GALILEIAN invariance. The reason that it took so long to develop the theory of (special) relativity and to convince scientists that it describes the reality, is the role of time in this theory.

It was (and still is for some persons) difficult to accept that the idea of absolute (that is independent of the system of inertia) simultaneity has to be abandoned. More on the history can be found in A. Pais, *"Subtle is the Lord ..."* Albert Einstein, Oxford University Press. Another problem is that now the ether as a system of reference disappeared.

An elegant formulation of the four-dimensional space was introduced by MINKOWSKI in 1908, which was considered by EINSTEIN initially as superfluous, but later as very useful. Starting from the special theory of relativity, which acts in a planar space, EINSTEIN developed the general theory of relativity assuming that gravitation yields a curved space.

30.g From Classical to Quantum Electrodynamics

In 1900 Max Planck derived an interpolation formula between the two limit cases of the energy distribution of a black body radiator as a function of the frequency radiated, namely the Rayleigh-Jeans law (1900-1905) for low frequencies and the Wien law (1896) for high frequencies, the Planck radiation law. It agreed excellently with the observations. A few months later he postulated that this can be explained by the fact that electromagnetic radiation of frequency $\nu = \omega/(2\pi)$ cannot have arbitrary energies but only integer multiples of $h\nu$, where h is a new fundamental constant now called Planck constant. This quantization of energy was soon confirmed by the photoelectric effect: The kinetic energy of electrons emitted from the surface of a metal by means of light is independent of the intensity of light but depends on its frequency (Lenard 1902).

Metalloberfläche ausgelösten Elektronen ist von der Lichtintensität unabhängig und hängt nur von der Frequenz des Lichts ab (Lenard 1902).

Von dieser Beobachtung bis zu einer Quanten-Theorie der Elektrodynamik dauerte es ein Vierteljahrhundert. Erst musste die Quantentheorie für die Teilchen, die man bisher als punktförmige Massen angesehen hatte, entwickelt werden, bis auch das elektromagnetische Feld quantisiert werden konnte (P.A.M. DIRAC 1927, P. JORDAN und W. PAULI, 1928; W. HEISENBERG und W. PAULI, 1929; siehe z.B. W. HEITLER, *The Quantum Theory of Radiation*).

It took a quarter of a century from this observation to the quantum theory of electrodynamics. First the quantum theory for the particles which hitherto had been considered point masses had to be developed until it was possible to quantize the electromagnetic field (P.A.M. Dirac 1927, P. Jordan and W. Pauli, 1928; W. Heisenberg and W. Pauli, 1929; see e.g. W. Heitler, *The Quantum Theory of Radiation*).

31 Gravitations-Zeitdilatation

31.a Lichtquant im Gravitationsfeld

Wir wollen hier noch einen Effekt der allgemeinen Relativitätstheorie betrachten, der sich elementar herleiten lässt, nämlich den unterschiedlichen Gang von Uhren im Gravitationspotential. Die Aussage ist, dass Uhren in verschiedenen Entfernungen eines massiven Körpers unterschiedlich rasch gehen, weiter entfernt schneller, näher daran langsamer. Dies ist ein Effekt, der beim HAFELE-KEATING-Experiment beobachtet wurde. Bei diesem Experiment ließ man Caesium-Atomuhren im Flugzeug um die Erde fliegen (J. C. HAFELE and R. E. KEATING, Science 177, 166 (1972)). Dabei kann man einmal die Zeitdilatation beobachten, aber der Effekt, dass Uhren in verschiedenen Höhen unterschiedlich gehen, ist von der gleichen Größenordnung. Diesen zweiten Effekt wollen wir nun erklären.

Wir geben zwei Erklärungen: Die erste macht Gebrauch von der Erhaltung der Energie. (Zwar gilt in der allgemeinen Relativitätstheorie der Satz von der Erhaltung der Energie nicht mehr generell. In einem Raum, der außen hinreichend flach wird, gilt er aber trotzdem. Wir brauchen daher diesen Einwand nicht zu beachten.) Fällt ein Körper der Masse m um die Höhe h in einem Gravitationsfeld der Beschleunigung g , so gewinnt er $\delta E = mgh$ an kinetischer Energie. Dies gilt zumindest für Massen einer Geschwindigkeit $v \ll c$.

Das hat zur Konsequenz, dass auch Lichtquanten beim Fallen im Gravitationsfeld Energie gewinnen und beim Aufsteigen gegen das Feld Energie verlieren. Wäre das nicht der Fall, so könnte man ein Perpetuum mobile bauen, indem man Teilchen und Antiteilchen fallen lässt, unten in Lichtquanten zerstrahlen lässt. Diese lässt man nach oben fliegen und bildet wieder das Teilchen-Antiteilchenpaar, wobei man dann dem System die gewonnene potentielle Energie entnehmen könnte.

Da sich die Energien aller Masse um $\delta E = mgh = \frac{gh}{c^2}E$ verändert, muss dies auch für Lichtquanten gelten, das heißt wir finden für ein Lichtquant der Energie $E = \hbar\omega$

31 Gravitational Time Dilatation

31.a Light Quantum in the Gravitational Field

Finally we will consider an effect of the general theory of relativity, which can be derived in an elementary way, namely, the different behaviour of clocks in a gravitational potential. The statement is that clocks at different distances from a massive body run differently fast, those at further distance faster, the closer ones slower. This is an effect which had been observed in the HAFELE-KEATING experiment. In this experiment cesium atomic beam clocks were carried in an airplane around the earth (J.C. HAFELE and R. E. KEATING, Science 177, 166 (1972)). In this experiment one can observe time dilatation due to different velocities of the airplanes with respect to the center of the earth; but the effect that clocks run differently in different gravitational potentials is of the same order of magnitude. We will now explain this second effect.

We give two explanations: The first one uses the conservation of energy. (Actually, the theorem of conservation of energy does not hold in generally in the general theory of relativity. If however, the space becomes sufficiently plane at large distances then it is still valid. Therefore we need not consider this objection.) If a body of mass m falls the height h in a field of gravitation of acceleration g , then it gains $\delta E = mgh$ of kinetic energy. This holds at least for masses of velocity $v \ll c$.

As a consequence, light quanta will gain energy in falling in the field of gravitation and they loose energy while climbing against the field. If this were not true, then one could construct a perpetuum mobile by letting particles and anti-particles falling in the gravitational field, and having them irradiated into light quanta. These could now move up and recombine to a particle anti-particle pair, where one could extract the gained potential energy from the system.

Since the energies of all masses are changed by $\delta E = mgh = \frac{gh}{c^2}E$, the same has to hold for light quanta, that is we find for light quanta of energy $E = \hbar\omega$

$$\delta\omega = \frac{\delta E}{\hbar} = \frac{gh}{c^2} \frac{E}{\hbar} = \frac{gh}{c^2} \omega. \quad (31.1)$$

Dieser Verlust an Frequenz beim Verlassen eines Gravitationsfeldes ist als Rotverschiebung im Gravitationsfeld bekannt. Sie lässt sich zum Beispiel mit dem MÖSSBAUER-Effekt messen. Der Frequenzverlust bei einem Höhenunterschied von etwa 20 m genügt bereits. Vergleichen wir nun den Gang zweier Atomuhren unten und oben mit einem Höhenunterschied h , dann beobachtet man oben, dass die Frequenz der unteren Uhr um $\delta\omega$ kleiner ist. Die obere Uhr geht also rascher um einen Faktor

$$1 + \frac{\delta\omega}{\omega} = 1 + \frac{gh}{c^2}. \quad (31.2)$$

31.b Äquivalenz-Prinzip

Die allgemeine Relativitätstheorie bedient sich nicht der Quantentheorie und damit der Beziehung $E = \hbar\omega$. Sie führt aber das Äquivalenz-Prinzip ein. Dieses Prinzip sagt aus, dass sich ein Bezugssystem, das sich frei unter der Gravitationskraft bewegt, wie ein Inertialsystem verhält. Nehmen wir also an, wir betrachten ein System, das sich wie ein freifallender Fahrstuhl bewegt. Nehmen wir an, die untere Uhr sei zu einem bestimmten Zeitpunkt bezogen auf den Fahrstuhl in Ruhe und strahle mit der Frequenz ω nach oben. Bis dieses Licht bei der oberen Uhr angekommen ist, vergeht die Zeit $t = h/c$. Betrachtet von unserem freifallenden Fahrstuhl bewegen sich Erde und Uhren nach der Zeit t mit der Geschwindigkeit $v = gt$ nach oben. Ein Beobachter an der oberen Uhr wird also eine Dopplerverschiebung um die Frequenz $\delta\omega = \omega v/c$ beobachten (für das schwache Gravitationsfeld, das wir hier betrachten, genügt es im Unterabschnitt 25.e nur den Beitrag linear in β zu betrachten). Damit folgt eine Dopplerverschiebung von

$$\delta\omega = \frac{gh}{c^2}\omega, \quad (31.3)$$

was mit dem oben gewonnenen Ergebnis übereinstimmt.

Sie werden jetzt fragen, wie kann man das Äquivalenz-Prinzip anwenden, wenn das Gravitationsfeld nicht überall in die gleiche Richtung und mit der gleichen Stärke wirkt. In der Tat wird dann die Beschreibung komplizierter. Man kann dann nämlich der Beschreibung nicht mehr einen ebenen Raum zu Grunde legen und muss sich dann ernsthaft in die allgemeine Relativitätstheorie einarbeiten.

This loss of frequency while leaving a gravitational field is known as the red shift in a gravitational field. It can be measured by means of the MÖSSBAUER effect. A loss of frequency at a height of about 20 m is already sufficient. Thus if we compare the course of two atomic clocks down and up at a difference of height h , then one observes that the frequency of the lower clock is smaller by $\delta\omega$. The upper clock is thus faster by a factor of

31.b Principle of Equivalence

The general theory of relativity does not make use of quantum theory, i.e. it does not use the relation $E = \hbar\omega$. Instead it uses the principle of equivalence. This principle says that a system of reference which moves freely in the gravitational field behaves like a system of inertia. Let us assume we consider a system which moves like a freely falling elevator. Let us assume the lower clock is at a certain time relative to the elevator at rest and radiates upwards with frequency ω . It takes the time $t = h/c$ until the light has arrived the upper clock. During that time the earth and the upper clock have gained the velocity $v = gt$ upwards as seen from the elevator. Thus an observer at the upper clock will observe a Doppler shift by the frequency $\delta\omega = \omega v/c$ (for the weak gravitational field we consider here it is sufficient to consider in subsection 25.e only the contribution linear in β). Thus we obtain the Doppler shift

which agrees with the result obtained above.

Now you may ask, how can one apply the principle of equivalence, if the gravitational field does not point everywhere in the same direction and is of the same strength. Then, indeed, the description becomes more complicated. Then the description can no longer be founded on a flat space, and one has to dig seriously into the general theory of relativity.