Klassische Elektrodynamik

Theoretische Physik II   Vorlesungs-Skriptum

Zweisprachige Ausgabe

Classical Electrodynamics

Theoretical Physics II   Manuscript

Bilingual Edition

Franz Wegner
Institut für Theoretische Physik
Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg
2003

Hinweise auf Druckfehler nehme ich gerne entgegen.

I appreciate being informed of misprints.

Jörg Raufeisen, Andreas Haier, Stephan Frank und Bastian Engeser bin ich dankbar, dass sie mich auf mehrere Druckfehler in der ersten deutschen Auflage aufmerksam gemacht haben. In gleicher Weise danke ich Björn Feuerbacher, Sebastian Diehl, Karsten Freese, Markus Gabrysch und Jan Tomczak, dass sie mich auf Druckfehler der zweiten Auflage hingewiesen haben.

I am grateful to Jörg Raufeisen, Andreas Haier, Stephan Frank, and Bastian Engeser for informing me of a number of misprints in the first German edition. Similarly I thank Björn Feuerbacher, Sebastian Diehl, Karsten Frese, Markus Gabrysch, and Jan Tomczak for informing me of misprints in the second edition.

Cornelia Merkel, Melanie Steiert und Sonja Bartsch danke ich für das sorgfältige Lesen und Korrigieren des Textes der zweisprachigen Ausgabe.

I am indebted to Cornelia Merkel, Melanie Steiert, and Sonja Bartsch for carefully reading and correcting the text of the bilingual edition.

Bücher:

Books:

Becker, Sauter: Theorie der Elektrizität I
Jackson, Classical Electrodynamics
Landau, Lifschitz: Lehrbuch der Theoretischen Physik II: Klassische Feldtheorie
Panofsky, Phillips, Classical Electricity and Magnetism
Sommerfeld: Vorlesungen über Theoretische Physik III: Elektrodynamik
Stratton, Electromagnetic Theory
Stumpf, Schuler: Elektrodynamik

A

Grundgleichungen

Basic Equations

Vorbemerkungen

Ich gehe davon aus, dass der Student bereits etwas mit der klassischen Elektrodynamik aus einer einführenden Vorlesung vertraut ist. Daher setze ich die vollständigen Gleichungen an den Anfang und führe von diesen ausgehend die jeweiligen Spezialisierungen ein.

In dieser Ausarbeitung verwende ich das GAUSSsche Maßsystem und nicht das SI-System. Der Zusammenhang und die Motivation wird im nächsten Abschnitt und in Anhang A angegeben.

Im Anhang B sind Formeln zur Vektoralgebra und Vektoranalysis angegeben. Der Leser /Die Leserin sei jedoch gewarnt, dass er/sie an einigen Stellen (B.11, B.15, B.34-B.50 und Aufgabe nach B.71) die Ergebnisse selbst einzutragen hat. Er/Sie ist also aufgefordert, die Rechnungen selbst durchzuführen oder zumindest die Ergebnisse, die in dem Skriptum erarbeitet werden, dort einzutragen.

Introductory Remarks

I assume that the student is already somewhat familiar with classical electrodynamics from an introductory course. Therefore I start with the complete set of equations and from this set I spezialize to various cases of interest.

In this manuscript I will use GAUSSian units instead of the SI-units. The connection between both systems and the motivation for using GAUSSIAN units will be given in the next section and in appendix A.

Formulae for vector algebra and vector analysis are given in appendix B. A warning to the reader: Sometimes (B.11, B.15, B.34-B.50 and exercise after B.71) he/she should insert the result by him/herself. He/She is requested to perform the calculations by him/herself or should at least insert the results given in this script.

1 Grundgleichungen der Elektrodynamik

Die Elektrodynamik befasst sich mit elektrischen und magnetischen Feldern, ihrer Erzeugung durch Ladungen und Ströme, ihrer Ausbreitung (elektromagnetische Wellen), ihrer Rückwirkung auf die Materie (Kräfte).

1 Basic Equations of Electrodynamics

Electrodynamics describes electric and magnetic fields, their generation by charges and electric currents, their propagation (electromagnetic waves), and their reaction on matter (forces).

1.a Ladungen und Ströme

1.a.α Ladungsdichte

Die Ladungsdichte $\rho(\mathbf{r})$ ist die Ladung Δq pro Volumenelement ΔV

1.a Charges and Currents

1.a.α Charge Density

The charge density ρ is defined as the charge Δq per volume element ΔV

$$\rho(\mathbf{r}) = \lim_{\Delta V \to 0} \frac{\Delta q}{\Delta V} = \frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}V}. \tag{1.1}$$

Damit ergibt sich die Ladung q im Volumen V zu

Therefore the charge q in the volume V is given by

$$q = \int_V \mathrm{d}^3 r \rho(\mathbf{r}). \tag{1.2}$$

Besteht die Ladungsverteilung aus Punktladungen q_i an den Orten $\mathbf{r}_i$, so ist die Ladungsdichte durch die Summe

If the charge distribution consists of point charges q_i at points $\mathbf{r}_i$, then the charge density is given by the sum

$$\rho(\mathbf{r}) = \sum_i q_i \delta^3(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}), \tag{1.3}$$

gegeben, wobei die DIRACsche Delta-Funktion (eigentlich Delta-Distribution) die Eigenschaft

where DIRAC's delta-function (correctly delta-distribution) has the property

$$\int_V \mathrm{d}^3 r\, f(\mathbf{r}) \delta^3(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) = \begin{cases} f(\mathbf{r}_0) & \text{falls if } \mathbf{r}_0 \in V \\ 0 & \text{falls if } \mathbf{r}_0 \notin V \end{cases} \tag{1.4}$$

hat.

.

Ähnlich definiert man die Flächenladungsdichte $\sigma(\mathbf{r})$ an Grenz- oder Oberflächen als Ladung pro Fläche

Similarly one defines the charge density per area $\sigma(\mathbf{r})$ at boundaries and surfaces as charge per area

$$\sigma(\mathbf{r}) = \frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}f}, \tag{1.5}$$

ähnlich auch die Linienladungsdichte.

similarly the charge density on a line.

1.a.β Strom und Stromdichte

1.a.β Current and Current Density

Der Strom I ist die Ladung dq, die pro Zeiteinheit dt durch eine Fläche F fließt,

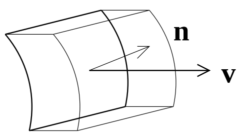
The current I is the charge dq that flows through a certain area F per time dt,

$$I = \frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t}. \tag{1.6}$$

Es sei nun $\mathbf{v}(\mathbf{r}, t)$ die mittlere Geschwindigkeit der Ladungsträger, $\mathbf{n}$ die (auf die Länge 1 normierte) Flächennormale. Dann ist $\mathbf{v}\mathrm{d}t$ der Weg, den die Ladungen in der Zeit dt zurücklegen. Multipliziert mit $\mathbf{n}$ ergibt sich die Schichtdicke $\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}\mathrm{d}t$, die die in der Zeit d$t$ durch die Fläche geflossenen Ladungen bilden.

Be $\mathbf{v}(\mathbf{r}, t)$ the average velocity of the charge carriers and $\mathbf{n}$ the unit vector normal to the area element. Then $\mathbf{v}\mathrm{d}t$ is the distance vector traversed during time dt. Multiplied by $\mathbf{n}$ one obtains the thickness of the layer $\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}\mathrm{d}t$ of the carriers which passed the surface during time dt.

Multipliziert mit dem Flächenelement df ergibt sich das Volumen der Ladung, die durch df geflossen ist. Weitere Multiplikation mit der Ladungsdichte ρ ergibt die Ladung dq, die in der Zeit dt durch die Fläche df tritt



Multiplied by the surface element df one obtains the volume of the charge, which flows through the area. Additional multiplication by ρ yields the charge dq which passes during time dt the surface df

$$\mathrm{d}q = \int_F \mathbf{v}\mathrm{d}t \cdot \mathbf{n}\mathrm{d}f \rho \tag{1.7}$$

$$I = \mathrm{d}q/\mathrm{d}t = \int_F \mathbf{v}(\mathbf{r}, t)\rho(\mathbf{r}, t) \cdot \mathbf{n}(\mathbf{r})\mathrm{d}f = \int_F \mathbf{j}(\mathbf{r}, t) \cdot \mathrm{d}\mathbf{f} \tag{1.8}$$

mit der Stromdichte $\mathbf{j} = \rho\mathbf{v}$ und dem gerichteten Flächenelement $\mathrm{d}\mathbf{f} = \mathbf{n}\mathrm{d}f$.

with the current density $\mathbf{j} = \rho\mathbf{v}$ and the oriented area element $\mathrm{d}\mathbf{f} = \mathbf{n}\mathrm{d}f$.

1.a.γ Ladungserhaltung und Kontinuitätsgleichung

1.a.γ Conservation of Charge and Equation of Continuity

Die Ladung q in einem festen Volumen V

The charge q in a fixed volume V

$$q(t) = \int_V \mathrm{d}^3 r \rho(\mathbf{r}, t) \tag{1.9}$$

ändert sich pro Zeiteinheit um

changes as a function of time by

$$\frac{\mathrm{d}q(t)}{\mathrm{d}t} = \int_V \mathrm{d}^3 r \frac{\partial\rho(\mathbf{r}, t)}{\partial t}. \tag{1.10}$$

Da die Ladung erhalten ist, kann sie sich nur durch einen Strom durch die Oberfläche ∂V des Volumens ändern. Wir bezeichnen mit I den nach außen fließenden Strom. Dann ist

This charge can only change, if some charge flows through the surface ∂V of the volume, since charge is conserved. We denote the current which flows outward by I. Then

$$\frac{\mathrm{d}q(t)}{\mathrm{d}t} = -I(t) = -\int_{\partial V} \mathbf{j}(\mathbf{r}, t) \cdot \mathrm{d}\mathbf{f} = -\int_V \mathrm{d}^3 r \,\mathrm{div}\, \mathbf{j}(\mathbf{r}, t), \tag{1.11}$$

wobei wir vom Gaussschen Satz (B.59) Gebrauch machten. Da die Beziehungen (1.10) und (1.11) für jedes Volumen und auch jedes Volumenelement gilt, folgt die Gleichheit der Integranden in den beiden Volumenintegralen

where we make use of the divergence theorem (B.59). Since (1.10) and (1.11) hold for any volume and volume element, the integrands in the volume integrals have to be equal

$$\frac{\partial\rho(\mathbf{r}, t)}{\partial t} + \mathrm{div}\, \mathbf{j}(\mathbf{r}, t) = 0. \tag{1.12}$$

Diese Gleichung bezeichnet man als Kontinuitätsgleichung. Sie drückt in differentieller Form die Erhaltung der Ladung aus.

This equation is called the equation of continuity. It expresses in differential form the conservation of charge.

1.b Maxwell-Gleichungen

1.b Maxwell's Equations

Die elektrischen Ladungen und Ströme erzeugen das elektrische Feld $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ und die magnetische Induktion $\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)$. Diese Beziehung wird durch die vier Maxwell-Gleichungen beschrieben

The electric charges and currents generate the electric field $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ and the magnetic induction $\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)$. This relation is described by the four Maxwell Equations

$$\begin{aligned}
\mathrm{rot}\, \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) - \frac{\partial\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)}{c\partial t} &= \frac{4\pi}{c}\mathbf{j}(\mathbf{r}, t) && (1.13)\\
\mathrm{div}\, \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) &= 4\pi\rho(\mathbf{r}, t) && (1.14)\\
\mathrm{rot}\, \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) + \frac{\partial\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)}{c\partial t} &= \mathbf{0} && (1.15)\\
\mathrm{div}\, \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) &= 0. && (1.16)
\end{aligned}$$

Die Vektoroperation rot wird im Englischen mit curl bezeichnet. In den zentral gedruckten Gleichungen verwende ich stets rot, innerhalb des Textes die in der jeweiligen Sprache übliche Form.

The vector operation curl is denoted rot in the German language. In the equations printed in the center I use rot, within the text the usual form of the corresponding language.

Diese MAXWELL-Gleichungen werden bisweilen als MAXWELL-Gleichungen im Vakuum bezeichnet. Sie gelten jedoch auch in Materie. Die Ladungsdichte und die Stromdichte enthalten alle Beiträge, also freibewegliche und Polarisations-Ladungsdichten und freibewegliche, Polarisations- und Magnetisierungs-stromdichten.

Vielfach verlangt man als Randbedingung noch, dass das elektrische und das magnetische Feld im Unendlichen verschwinden.

These equations named after MAXWELL are often called MAXWELL's Equations in the vacuum. However, they are also valid in matter. The charge density and the current density contain all contributions, the densities of free charges and polarization charges, and of free currents and polarization- and magnetization currents.

Often one requires as a boundary condition that the electric and the magnetic fields vanish at infinity.

1.c COULOMB- und LORENTZ-Kraft

1.c COULOMB and LORENTZ Force

Das elektrische Feld **E** und die magnetische Induktion **B** üben auf eine Ladung q am Ort **r**, die sich mit der Geschwindigkeit **v** bewegt, die Kraft

The electric field **E** and the magnetic induction **B** exert a force **K** on a charge q located at **r**, moving with a velocity **v**

$$\mathbf{K} = q\mathbf{E}(\mathbf{r}) + q\frac{\mathbf{v}}{c} \times \mathbf{B}(\mathbf{r}) \tag{1.17}$$

aus.

.

Dabei sind **E** und **B** die Beiträge, die nicht von q selbst herrühren. Die von q selbst erzeugten Felder bewirken die Reaktionskraft, die wir jedoch im Weiteren nicht betrachten.

Der erste Beitrag in (1.17) ist die COULOMB-Kraft, der zweite die LORENTZ-Kraft. Dabei ist c= 299 792 458 m/s. Wir werden später sehen, dass diese Konstante die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ist. (Man hat sie zu obigem Wert definiert und damit den Umrechnungsfaktor zwischen Zeit und Länge festgelegt.) Die Kraft, die auf ein kleines Volumen ΔV wirkt, lässt sich schreiben als

Here **E** and **B** are the contributions which do not come from q itself. The fields generated by q itself exert the reaction force which we will not consider further.

The first contribution in (1.17) is the COULOMB force, the second one the LORENTZ force. One has c= 299 792 458 m/s. Later we will see that this is the velocity of light in vacuum. (It has been defined with the value given above in order to introduce a factor between time and length.) The force acting on a small volume ΔV can be written as

$$\Delta\mathbf{K} = \mathbf{k}(\mathbf{r})\Delta V \tag{1.18}$$

$$\mathbf{k}(\mathbf{r}) = \rho(\mathbf{r})\mathbf{E}(\mathbf{r}) + \frac{1}{c}\mathbf{j}(\mathbf{r}) \times \mathbf{B}(\mathbf{r}). \tag{1.19}$$

Man bezeichnet **k** als die Kraftdichte. Die auf das Volumen V wirkende elektromagnetische Kraft ergibt sich dann zu

k is called the density of force. The electromagnetic force acting on the volume V is given by

$$\mathbf{K} = \int_V \mathrm{d}^3r\,\mathbf{k}(\mathbf{r}). \tag{1.20}$$

2 Dimensionen und Einheiten

2 Dimensions and Units

2.a Gausssches Maßsystem

In dieser Vorlesung verwenden wir das Gausssche Maßsystem. Wir betrachten nun die Dimensionen der auftretenden Größen. Aus der Kontinuitätsgleichung (1.12) und den Maxwellgleichungen (1.13) bis (1.16) folgt

2.a Gaussian Units

In this course we use Gaussian units. We consider the dimensions of the various quantities. From the equation of continuity (1.12) and Maxwell's equations (1.13 to 1.16) one obtains

$$[\rho]/[t] = [j]/[x] \tag{2.1}$$
$$[B]/[x] = [E]/([c][t]) = [j]/[c] \tag{2.2}$$
$$[E]/[x] = [B]/([c][t]) = [\rho]. \tag{2.3}$$

Daraus folgt

From this one obtains

$$[j] = [\rho][x]/[t] \tag{2.4}$$
$$[E] = [\rho][x] \tag{2.5}$$
$$[B] = [\rho][c][t] = [\rho][x]^2/([c][t]), \tag{2.6}$$

sowie

and

$$[c] = [x]/[t] \tag{2.7}$$
$$[B] = [\rho][x]. \tag{2.8}$$

Daraus sieht man, dass c tatsächlich die Dimension einer Geschwindigkeit hat. Um die weiteren Größen in ihrer Dimension festzulegen, müssen wir noch den Ausdruck (1.19) für die Kraftdichte k verwenden

From (2.7) one sees that c really has the dimension of a velocity. In order to determine the dimensions of the other quantities we still have to use expression (1.19) for the force density k

$$[k] = [\rho][E] = [\rho]^2[x]. \tag{2.9}$$

Daraus folgt dann

From this one obtains

$$[\rho]^2 = [k]/[x] = \text{dyn cm}^{-4} \tag{2.10}$$
$$[\rho] = \text{dyn}^{1/2}\ \text{cm}^{-2} \tag{2.11}$$
$$[E] = [B] = \text{dyn}^{1/2}\ \text{cm}^{-1} \tag{2.12}$$
$$[j] = \text{dyn}^{1/2}\ \text{cm}^{-1}\ \text{s}^{-1} \tag{2.13}$$
$$[q] = [\rho][x]^3 = \text{dyn}^{1/2}\ \text{cm} \tag{2.14}$$
$$[I] = [j][x]^2 = \text{dyn}^{1/2}\ \text{cm s}^{-1}. \tag{2.15}$$

2.b Andere Einheitensysteme

Für jede Größe kann die Einheit in jedem System unabhängig definiert werden. Glücklicherweise macht man davon nicht vollständigen Gebrauch.

2.b Other Systems of Units

The unit for each quantity can be defined independently. Fortunately, this is not used extensively.

Neben dem GAUSSschen Maßsystem werden noch eine Reihe weiterer cgs-Systeme sowie das SI-System (internationales Maßsystem, GIORGI-System) verwendet. Letzteres ist das gesetzliche Maßsystem in vielen Ländern (z.B. in USA seit 1894, in Deutschland seit 1898) und wird in der Technik angewandt.

Während das GAUSSsche Maßsystem alle elektromagnetischen Größen in cm, g und s ausdrückt, verwendet das GIORGI-System neben den mechanischen Einheiten m, kg und s noch zwei weitere Einheiten A (Ampere) und V (Volt), allerdings nicht unabhängig voneinander, vielmehr gilt für die Einheit der Energie

Besides the GAUSSian system of units a number of other cgs-systems is used as well as the SI-system (international system of units, GIORGI-system). The last one is the legal system in many countries (e.g. in the US since 1894, in Germany since 1898) and is used for technical purposes.

Whereas all electromagnetic quantities in the GAUSSian system are expressed in cm, g und s, the GIORGI-system uses besides the mechanical units m, kg and s two other units, A (ampere) und V (volt). They are not independent, but related by the unit of energy

$$1\ \mathrm{kg\ m^2\ s^{-2}} = 1\ \mathrm{J} = 1\ \mathrm{W\ s} = 1\ \mathrm{A\ V\ s}. \tag{2.16}$$

Die Umrechnung einiger gebräuchlicher Maßsysteme ineinander kann durch drei Umrechnungsfaktoren ϵ_0, μ_0 und ψ beschrieben werden. Dabei können ϵ_0 und μ_0 (im SI-System als Dielektrizitätskonstante und Permeabilitätskonstante des Vakuums bekannt) und die Verkettungskonstante

The conversion of the conventional systems of units can be described by three conversion factors ϵ_0, μ_0 and ψ. The factors ϵ_0 and μ_0 (known as the dielectric constant and permeability constant of the vacuum in the SI-system) and the interlinking factor

$$\gamma = c\,\sqrt{\epsilon_0\mu_0} \tag{2.17}$$

dimensionsbehaftet sein, während ψ ein dimensionsloser Zahlenfaktor ist. Man unterscheidet zwischen rationalen Maßsystemen ($\psi = 4\pi$) und nicht rationalen Maßsystemen ($\psi = 1$). Die Umrechnungsfaktoren einiger gebräuchlicher Maßsysteme sind

can carry dimensions whereas ψ is a dimensionless number. One distinguishes between rational systems $\psi = 4\pi$) and non-rational systems ($\psi = 1$) of units. The conversion factors of some conventional systems of units are

Maßsystem / System of Units	ϵ_0	μ_0	γ	ψ
GAUSS / GAUSSian	1	1	c	1
Elektrostatisch / electrostatic (esu)	1	c^{-2}	1	1
Elektromagnetisch / electromagnetic (emu)	c^{-2}	1	1	1
HEAVISIDE-LORENTZ	1	1	c	4π
GIORGI (SI)	$(c^2\mu_0)^{-1}$	$\frac{4\pi}{10^7}\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{Am}}$	1	4π

Die bisher eingeführten Größen drücken sich durch die Größen der anderen Maßsysteme (mit einem Stern versehen) folgendermaßen aus

The quantities introduced until now are expressed in GAUSSian units by those of other systems of units (indicated by an asterisk) in the following way

$$\mathbf{E} = \sqrt{\psi\epsilon_0}\mathbf{E}^* \qquad 1\ \mathrm{dyn}^{1/2}\ \mathrm{cm}^{-1} \mathrel{\hat{=}} 3\cdot 10^4\mathrm{V/m} \tag{2.18}$$

$$\mathbf{B} = \sqrt{\psi/\mu_0}\mathbf{B}^* \qquad 1\ \mathrm{dyn}^{1/2}\ \mathrm{cm}^{-1} \mathrel{\hat{=}} 10^{-4}\mathrm{Vs/m}^2 \tag{2.19}$$

$$q = \frac{1}{\sqrt{\psi\epsilon_0}}q^* \qquad 1\ \mathrm{dyn}^{1/2}\ \mathrm{cm} \mathrel{\hat{=}} 10^{-9}/3\mathrm{As},\ \substack{\text{ähnlich}\\ \text{similarly}}\ \rho, \sigma, I, j. \tag{2.20}$$

Ein Umrechnungsbeispiel: Die COULOMB-LORENTZ-Kraft lässt sich schreiben

An example of conversion: The COULOMB-LORENTZ-force can be written

$$\mathbf{K} = q(\mathbf{E} + \frac{1}{c}\mathbf{v}\times\mathbf{B}) = \frac{q^*}{\sqrt{\psi\epsilon_0}}(\sqrt{\psi\epsilon_0}\mathbf{E}^* + \frac{\sqrt{\psi}}{c\,\sqrt{\mu_0}}\mathbf{v}\times\mathbf{B}^*) = q^*(\mathbf{E}^* + \frac{1}{c\,\sqrt{\epsilon_0\mu_0}}\mathbf{v}\times\mathbf{B}^*) = q^*(\mathbf{E}^* + \frac{1}{\gamma}\mathbf{v}\times\mathbf{B}^*). \tag{2.21}$$

Die Elementarladung e_0 ist in dem von uns verwendeten GAUSSschen Maßsystem $4.803\cdot 10^{-10}\ \mathrm{dyn}^{1/2}$ cm und im SI-System $1.602\cdot 10^{-19}$ As. Das Elektron trägt die Ladung $-e_0$, das Proton e_0, ein Kern der Kernladungszahl Z die Ladung Ze_0, Quarks die Ladungen $\pm e_0/3$ oder $\pm 2e_0/3$.

The elementary charge e_0 is $4.803\cdot 10^{-10}\ \mathrm{dyn}^{1/2}$ cm in GAUSSian units and $1.602\cdot 10^{-19}$ As in SI-units. The electron carries charge $-e_0$, the proton e_0, a nucleus with Z protons the charge Ze_0, quarks the charges $\pm e_0/3$ and $\pm 2e_0/3$.

Weitere Angaben werden jeweils bei der Einführung weiterer Größen gegeben und sind im Anhang A zusammengefasst.

2.c Motivation für Gaussche Einheiten

Im SI-System sind das elektrische Feld **E** und die dielektrische Verschiebung **D** wie auch die magnetische Induktion **B** und das Magnetfeld **H** mit unterschiedlichen Dimensionen behaftet. Hierdurch wird leicht der irreführende Eindruck erweckt, es handele sich um unabhängige Felder. Auf einem mikroskopischen Niveau hat man es nur mit zwei Feldern, **E** und **B** zu tun, (1.13-1.16) (Lorentz 1892).

Tatsächlich wird der zweite Satz Felder nur dadurch eingeführt, dass man Polarisations- und Magnetisierungsanteile der Ladungen und Ströme in Materie aus den totalen Ladungen und Strömen herauszieht und zu den Feldern addiert (Abschnitt 6 und 11).

Dieser enge Zusammenhang kommt besser in einem cgs-System zum Ausdruck, in dem **E** und **D** gleiche Dimension haben wie auch **B** und **H**.

Leider gehört das Gausssche Maßsystem zu den irrationalen, während das SI-System ein rationales ist, so dass bei Umrechnungen auch immer Faktoren 4π auftreten. Ich hätte ein rationales Maß-System wie das von Heaviside und Lorentz vorgezogen. Leider wird aber in gängigen Lehrbüchern nur das SI-System und das Gausssche verwendet. Ich möchte die Studierenden nicht mit einem Maßsystem konfrontieren, mit dem praktisch kein Lehrbuch arbeitet.

The conversion of other quantities is given where they are introduced. A summary is given in Appendix A.

2.c Motivation for Gaussian Units

In the SI-system the electrical field **E** and the dielectric displacement **D** as well as the magnetic induction **B** and the magnetic field **H** carry different dimensions. This leads easily to the misleading impression that these are independent fields. On a microscopic level one deals only with two fields, **E** and **B**, (1.13-1.16) (Lorentz 1892).

However, the second set of fields is introduced only in order to extract the polarization and magnetization contributions of charges and currents in matter from the total charges and currents, and to add them to the fields. (Section 6 and 11).

This close relation is better expressed in cgs-units, where **E** and **D** have the same dimension, as well as **B** and **H**.

Unfortunately, the Gaussian system belongs to the irrational ones, whereas the SI-system is a rational one, so that in conversions factors 4π appear. I would have preferred to use a rational system like that of Heaviside and Lorentz. However, in the usual textbooks only the SI-system and the Gaussian one are used. I do not wish to offer the electrodynamics in a system which in practice is not used in other textbooks.