

# Physik 2

## Elektrodynamik und Optik

Notizen zur Vorlesung im Sommersemester 2013

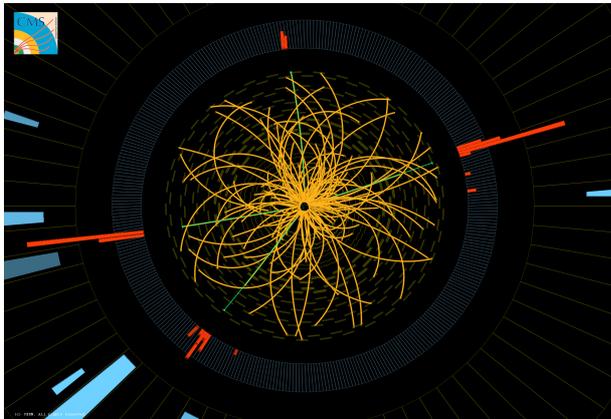
Peter Schleper

6. Juni 2013

Institut für Experimentalphysik, Universität Hamburg

[peter.schleper@physik.uni-hamburg.de](mailto:peter.schleper@physik.uni-hamburg.de)

[http://www.desy.de/~schleper/lehre/physik2/SS\\_2013](http://www.desy.de/~schleper/lehre/physik2/SS_2013)





# Danksagung

Diese Notizen zur Vorlesung Physik-2 basieren in Teilen auf Unterlagen zur selben Vorlesung meiner Kollegen Prof. Friedrich Wilhelm Büsser, Prof. Rudolf Langkau, Prof. Gunnar Lindström und Prof. Wolfgang Scobel an der Universität Hamburg. Ich bedanke mich ganz herzlich bei ihnen für die großzügige und hilfreiche Überlassung ihrer Unterlagen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>6</b>
1.1	Übersicht . . . . .	6
1.2	Literatur zu Elektromagnetismus und Optik . . . . .	8
<b>2</b>	<b>Elektrostatik</b>	<b>9</b>
2.1	Coulomb-Kraft und elektrische Ladung . . . . .	9
2.2	Das MKSA Einheitensystem . . . . .	10
2.3	Die Elementarladung . . . . .	11
2.4	Das Elektrische Feld . . . . .	13
2.5	Elektrisches Potential und Spannung . . . . .	14
2.6	Influenz und Metalle . . . . .	15
2.7	Ladungsverteilungen . . . . .	17
2.7.1	Superpositionsprinzip . . . . .	17
2.7.2	Elektrischer Dipol in einem äußeren Feld . . . . .	18
2.7.3	Das Potential eines Dipols . . . . .	18
2.7.4	Flächenladungen, Kondensator und Kapazität . . . . .	19
2.7.5	Raumladungen und Multipole . . . . .	21
2.8	Gauß'scher Satz . . . . .	22
2.8.1	Integrale und Differentielle Form . . . . .	22
2.8.2	Begründung des Gauß'schen Satzes . . . . .	23
2.8.3	Anwendung des Gauß'schen Satzes . . . . .	24
2.9	Energie des $E$ -Feldes . . . . .	26
2.10	Dielektrika . . . . .	27
<b>3</b>	<b>Elektrische Leitung</b>	<b>29</b>
3.1	Strom und Ladungserhaltung . . . . .	29
3.2	Mechanismen des Ladungstransports . . . . .	30
3.3	Stromkreise . . . . .	32
<b>4</b>	<b>Statische Magnetfelder</b>	<b>34</b>
4.1	Magnetismus und Ströme . . . . .	34
4.2	Lorentz-Kraft . . . . .	35
4.3	Biot-Savart Gesetz . . . . .	37
4.4	Ampere'sches Gesetz . . . . .	38
4.5	Leiterschleife und magnetischer Dipol . . . . .	40
4.6	Magnetfeld der Erde . . . . .	42
4.7	Hall-Effekt . . . . .	44
4.8	Das Vektorpotential . . . . .	44
4.9	Materie im Magnetfeld . . . . .	46
<b>5</b>	<b>Induktion</b>	<b>49</b>
5.1	Statische und zeitlich veränderliche Felder . . . . .	49
5.2	Faraday'sches Induktionsgesetz . . . . .	51
5.2.1	Lenz'sche Regel . . . . .	52
5.2.2	Stromerzeugung . . . . .	52

5.2.3	Wirbelströme . . . . .	53
5.3	Selbst-Induktivität . . . . .	53
<b>6</b>	<b>Schaltkreise</b>	<b>55</b>
6.1	Schaltvorgänge mit Spulen und Kondensatoren . . .	55
6.1.1	Einschalten einer Spule . . . . .	55
6.1.2	Einschalten eines Kondensators . . . . .	56
6.1.3	Ausschalten einer Spule . . . . .	56
6.2	Energiedichte des Magnetfelds . . . . .	57
6.3	Energie im Wechselstromkreis . . . . .	58
6.4	Komplexe Widerstände . . . . .	59
6.4.1	Ohm'scher Widerstand . . . . .	60
6.4.2	Kondensator . . . . .	60
6.4.3	Spule . . . . .	61
6.4.4	R-L-C Schaltungen . . . . .	61
6.5	Wechselstromschaltungen . . . . .	62
6.5.1	R-C Glied als Hochpass . . . . .	62
6.5.2	R-C Glied als Tiefpass . . . . .	63
6.6	R-C-L Serienschwingkreis als Frequenzfilter . . . . .	63
6.7	R-C-L als Parallelschwingkreis . . . . .	65
<b>7</b>	<b>Maxwell - Gleichungen</b>	<b>66</b>
7.1	Der Verschiebungsstrom . . . . .	66
7.2	Zusammenfassung der Maxwell-Gleichungen . . . . .	68
7.3	Skalares Potential und Vektorpotential . . . . .	69
7.3.1	Maxwell-Gleichungen und Potentiale . . . . .	69
7.3.2	Eichtransformationen . . . . .	70
7.3.3	Bedeutung der Potentiale . . . . .	71
<b>A</b>	<b>Mathematische Formeln</b>	<b>73</b>
<b>B</b>	<b>Formeln zum Elektromagnetismus</b>	<b>75</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Übersicht

Unter den vier grundlegenden Naturkräften

- Gravitation
- Elektromagnetische Wechselwirkung
- Starke Wechselwirkung
- Schwache Wechselwirkung

nimmt die elektromagnetische Wechselwirkung eine besondere Rolle ein. Ursache hierfür ist vor allem die sehr kurze Reichweite der schwachen Wechselwirkung ( $10^{-18}$  m) und der starken Wechselwirkung ( $10^{-15}$  m). Beide sind also nur im sub-atomaren Bereich relevant. Im Gegensatz dazu ist die Reichweite der Gravitation und der elektromagnetischen Wechselwirkung im Prinzip unendlich groß. Die Gravitationskraft ist aber viel schwächer.

Elektromagnetische Wechselwirkungen sind daher für unsere Umgebung, unser tägliches Leben und technologische Entwicklung von überragender Bedeutung. Mit ihr können so unterschiedliche Phänomene wie Reibung, chemische Bindungen, Licht oder allgemeiner elektromagnetische Wellen und viele andere durch das gleiche System von Naturgesetzen vollständig erklärt werden.

Ein tiefes Verständnis des Elektromagnetismus ist in essentiellen Fragen nur auf der Grundlage der Relativitätstheorie und der Quantenphysik möglich. Tatsächlich kann sogar eine rigorose Ableitung des Elektromagnetismus erfolgen, wenn man eine bestimmte Symmetrieeigenschaft elementarer Teilchen postuliert<sup>1</sup>. Da hier die Quantenmechanik nicht vorausgesetzt werden kann, werden an den entsprechenden Stellen die Folgerungen aus der Quantenmechanik als Annahmen formuliert beziehungsweise aus Experimenten abgeleitet.

Die elektromagnetische Wechselwirkung beschreibt Kräfte, die sich mit Hilfe von

- elektrischen Feldern,  $\vec{E}$
- magnetischen Feldern,  $\vec{B}$
- Teilchen mit elektrischer Ladung,  $q$

---

<sup>1</sup>Grundlage ist die 'Phaseninvarianz' der Quantenmechanik und darauf beruhend die 'Eichtheorie' des Elektromagnetismus. Ganz ähnlich lassen sich auch die Starke und die Schwache Wechselwirkung ableiten. Diese Ableitungen werden in der Regel im Rahmen der Vorlesungen zur Teilchenphysik behandelt.

beschreiben und mathematisch formulieren lassen. Diese Größen lassen sich nicht direkt beobachten, sie dienen vielmehr der effektiven Beschreibung der Kräfte zwischen Teilchen und z.B. des Energietransports durch elektromagnetische Wellen. Im Einzelnen:

- Elektrische Ladungen erzeugen elektrische Felder.
- Bewegte elektrische Ladungen erzeugen Magnetfelder<sup>2</sup>
- Elektrische Felder bewirken eine Kraft auf Teilchen mit elektrischer Ladung.
- Magnetische Felder bewirken eine Kraft auf bewegte Teilchen mit elektrischer Ladung.
- Die Änderung elektrischer Felder führt zu magnetischen Feldern, und umgekehrt.

Offenbar benötigt man zur Beschreibung aller dieser Effekte nicht nur eine Gleichung, sondern mehrere miteinander gekoppelte Gleichungen.

Im Anhang findet sich dazu eine Sammlung mathematischer und physikalischer Formeln.

## Maxwell-Gleichungen

---

<sup>2</sup>Offenbar ist dies eine zu einfache Darstellung, da der Unterschied zwischen bewegten und ruhenden Ladungen ja nur einem Wechsel des Bezugssystems entspricht. Die  $\vec{E}$  und  $\vec{B}$  Felder müssen also durch Lorentz-Transformationen ineinander umgerechnet werden können.

## 1.2 Literatur zu Elektromagnetismus und Optik

### Skripte:

Erdmann, Flügge            Physik Denken, Bd. 6, Springer Spektrum  
Lindström, Langkau,      Physik kompakt: Elektrodynamik, Springer  
Scobel

### Lehrbücher:

Demtröder                    Experimentalphysik Bd. 2, Elektrizität und  
Optik, Springer  
Alonso, Finn                 Fundamental University Physics, Addison-  
Wesley  
Young, Freedman            University Physics, Pearson  
Giancoli                     Physik, Pearson  
Feynman                     Feynman Lectures

### Theorie:

Griffiths                     Elektrodynamik, Pearson  
Nolting                      Grundkurs Theoretische Physik  
Fließbach                    Elektrodynamik, Lehrbuch zur Theoreti-  
schen Physik, Spektrum

### Mathematik:

Wang                         Introduction to Mathematical Physics,  
Oxford

### Sonstiges:

Kehlmann                    Die Vermessung der Welt  
Simonyi                      Kulturgeschichte der Physik, Harri  
Roger G. Newton            Thinking about Physics, Princeton  
Genz, Henning              Gedankenexperimente, Weinheim Wiley