

Inhalt

1	Einleitung: Zugang zum Elektromagnetismus	1
1.1	Allgemeinbildung als Ausgangspunkt	1
1.2	Vorgriff auf die Atomphysik	5
1.3	Verbindung von Elektrizität und Magnetismus	7
1.4	Nutzung des Internets	9
1.4.1	Web-Adressen von allgemeiner Nützlichkeit	10

Kapitel 2–6 Elektromagnetische Wechselwirkung von Ladungen, Strömen und Feldern 13

2	Oberflächenladungen und elektrische Felder	17
2.1	Experimentieren mit Ladungen	19
2.1.1	Reibungselektrizität	19
2.1.2	Influenzerscheinungen	25
2.1.3	Sitz der Ladungen auf einem Leiter	27
2.1.4	Entladungen durch die Luft	30
2.1.5	Elektrisiemaschinen	33
2.2	Elektrische Kraft und Feldstärke	36
2.2.1	Coulomb-Gesetz	36
2.2.2	Einheit der Ladung, elektrische Konstante	39
2.2.3	Elektrische Erregung und Feldstärke	41
2.2.4	Sichtbarmachung elektrischer Felder	44
2.2.5	Gauß'sche Formulierung des Coulomb-Gesetzes	47
2.2.6	Quantitative Erfassung der Influenz	50
2.3	Potential, Spannung	54
2.3.1	Potential und Feldstärke	54
2.3.2	Äquipotentialflächen	59
2.3.3	Dipole und Dipolschichten, Multipole	65
2.4	Kapazität	73
2.4.1	Zweileiter-Systeme als Kondensatoren	73
2.4.2	Elektrische Feldenergie	79
2.4.3	Permittivität	81
2.4.4	Kondensator-Bauformen	83
2.5	Anwendungsbeispiele	87
2.5.1	Vermeidung von Aufladungen	87
2.5.2	Sprüh- und Trennverfahren	89
2.5.3	Xerographie	90

2.6	Internet-Hinweise zu Kapitel 2	91
2.6.1	Sachthemen	91
2.6.2	Biographien	93
3	Leiterströme und magnetische Felder, Magnete	95
3.1	Von der Elektrostatik zum Galvanismus	97
3.2	Experimentieren mit Strömen	101
3.2.1	Elektrischer Strom in Metalldrähten	101
3.2.2	Ohm'sches Gesetz, Widerstand	105
3.2.3	Elektrische Arbeit, Stromwärme	109
3.2.4	Strom und Spannung in elektrischen Netzwerken	112
3.2.5	Erde und Masse	118
3.3	Magnetisches Kraftgesetz	119
3.3.1	Magnetfeld eines Leiterstroms	120
3.3.2	Kraft zwischen zwei Leiterströmen	123
3.3.3	Definition der magnetischen Feldstärke	126
3.3.4	Magnetisches Moment einer Stromschleife	129
3.3.5	Zur Deutung magnetischer Feldlinienbilder	131
3.4	Durch beliebige Ströme erzeugte magnetische Felder	132
3.4.1	Ampère-Gesetz	132
3.4.2	Biot-Savart-Gesetz	135
3.4.3	Magnetisches Vektorpotential, magnetischer Fluss	136
3.4.4	Spezielle Spulenformen	139
3.4.5	Magnetische Dipole	144
3.5	Vergleich der Gesetze für statische elektrische und magnetische Felder	146
3.6	Magnete	149
3.6.1	Permanentmagnete	149
3.6.2	Demonstrationsexperimente mit Permanentmagneten	152
3.6.3	Erregung und Feldstärke eines Ferromagneten	156
3.6.4	Hystereseschleife	158
3.6.5	Abschirmung von Magnetfeldern	160
3.6.6	Magnetische Kreise	161
3.7	Drehspul-Messinstrumente	171
3.8	Internet-Hinweise zu Kapitel 3	176
3.8.1	Leiterströme und magnetische Felder	176
3.8.2	Magnete	177
3.8.3	Biographien	177
4	Elektromagnetische Induktion	179
4.1	Induktionsgesetz	181
4.1.1	Entdeckung durch Faraday	181
4.1.2	Quantifizierung, Lenz'sche Regel	184
4.1.3	Induktionsexperimente mit bewegten Magneten	186
4.1.4	Induktionsexperimente mit bewegten Leitern	187
4.1.5	Allgemeine Formulierung des Induktionsgesetzes	191
4.1.6	Didaktische Variante	193
4.1.7	Erhaltung des magnetischen Flusses	195

4.2	Induktivität	196
4.2.1	Selbstinduktion, Definition der Induktivität	196
4.2.2	Magnetische Feldenergie	200
4.2.3	Induktive Kopplung	201
4.2.4	Induktive Messung von Flüssen	202
4.2.5	Wirbelströme	208
4.2.6	Spulen als Bauelemente	211
4.3	Wechselstrom	214
4.3.1	Definitionen, Erzeugung, Messung	214
4.3.2	<i>RLC</i> -Stromkreise	219
4.3.3	Mehrphasenströme, magnetische Drehfelder	230
4.3.4	Transformatoren	234
4.3.5	Umwandlung von Wechselstrom in Gleichstrom und umgekehrt	242
4.4	Generatoren und Motoren	246
4.4.1	Überblick	246
4.4.2	Gleichstrommaschinen	247
4.4.3	Drehstrom-Synchronmaschinen	251
4.4.4	Drehstrom-Asynchronmaschinen	254
4.4.5	Einphasen-Wechselstrom-Maschinen	257
4.5	Stromversorgung	260
4.5.1	Technische Grundlagen	260
4.5.2	Aufbau des öffentlichen Netzes	263
4.5.3	Erzeugung und Verbrauch der Sekundärenergie „Strom“	266
4.5.4	Entwicklungsperspektiven	268
4.6	Internet-Hinweise zu Kapitel 4	270
4.6.1	Grundlagen der Elektrotechnik	270
4.6.2	Stromversorgung	271
4.6.3	Elektrische Antriebe	272
4.6.4	Energie	272
4.6.5	Biographien	273
5	Elektromagnetische Schwingungen und Wellen	275
5.1	Experimentieren mit Hochfrequenz	278
5.1.1	Schwingkreis, gedämpfte Schwingungen	278
5.1.2	Ungedämpfte Schwingungen	284
5.1.3	Induktiver Widerstand, Skineneffekt	291
5.1.4	Erzwungene Schwingungen, Resonanz	293
5.1.5	Gekoppelte Schwingkreise	302
5.2	Elektromagnetische Drahtwellen	306
5.2.1	Lecher-Leitung	306
5.2.2	Theorie der Drahtwellen	309
5.2.3	Verschiedene Doppelleitungen	313
5.3	Elektromagnetische Raumwellen	316
5.3.1	Messung der kritischen Geschwindigkeit	316
5.3.2	Theorie von James Clerk Maxwell	318
5.3.3	Experimente von Heinrich Hertz	325
5.3.4	Strahlung des Hertz'schen Dipols	330
5.3.5	Elektromagnetisches Spektrum	333

5.4	Experimentieren mit Mikrowellen	336
5.4.1	Antennen	336
5.4.2	Wellenausbreitung	342
5.4.3	Hohlleiter	347
5.5	Anwendungsbeispiele	355
5.5.1	Rundfunk	355
5.5.2	Radioastronomie	366
5.6	Internet-Hinweise zu Kapitel 5	370
5.6.1	Signalübertragung auf Leitungen	370
5.6.2	Funk- und Radiotechnik	371
5.6.3	Radar, Radioastronomie	372
5.6.4	Satellitentechnik	373
5.6.5	Biographien	373
6	Licht	375
6.1	Experimentieren mit Licht	378
6.1.1	Messgrößen, Standards	378
6.1.2	Strahlenoptik	387
6.1.3	Wellenoptik	406
6.1.4	Polarisationsoptik	424
6.2	Lichtgeschwindigkeit	437
6.2.1	Messungen der Lichtgeschwindigkeit	437
6.2.2	Lichtgeschwindigkeit in bewegten Medien	440
6.2.3	Michelson-Morley-Experiment	442
6.2.4	Lösung des Ätherproblems	445
6.3	Relativistische Optik	446
6.3.1	Lorentz-Transformation	446
6.3.2	Aberration, Doppler-Effekt	448
6.3.3	Transformation der elektromagnetischen Felder	450
6.3.4	Ladungen mit relativistischen Geschwindigkeiten	451
6.4	Internet-Hinweise zu Kapitel 6	456
6.4.1	Sachthemen	456
6.4.2	Biographien	456
Kapitel 7–14 Elektromagnetische Effekte in atomarer Materie		459
7	Einführung in die Atomphysik	461
7.1	Anschaulicher Atomismus	463
7.1.1	Akzeptanz der Atomvorstellung	463
7.1.2	Ionen, freie Elektronen	464
7.1.3	Elektronen in Metallen	467
7.1.4	Offene Fragen	469
7.2	Welle-Teilchen-Dualismus	470
7.2.1	Teilchencharakter des Lichtes	470
7.2.2	Wellencharakter der Elektronen	472
7.2.3	Unbestimmtheitsrelation	475

7.3	Struktur der Atome	478
7.3.1	Rutherford-Bohr'sches Atommodell	478
7.3.2	Drehimpuls, Richtungsquantelung, Gyromagnetismus	480
7.3.3	Quantenmechanische Beschreibung des Wasserstoffatoms	484
7.3.4	Aufbau der Mehrelektronen-Atome	488
7.3.5	Orbitale, chemisches Verhalten	492
7.4	Quantenstatistik	496
7.4.1	Statistische Behandlung identischer Elemente	497
7.4.2	Photonen der thermischen Strahlung	500
7.4.3	Bose-Einstein-Kondensation	503
7.4.4	Leitungselektronen der Metalle	504
7.5	Internet-Hinweise zu Kapitel 7	506
7.5.1	Sachthemen	506
7.5.2	Biographien	506
8	Elektrische Effekte in Metallen	509
8.1	Leitungselektronen	511
8.1.1	Kinetische Theorie	511
8.1.2	Hall-Effekt	514
8.1.3	Rauschen	517
8.2	Grenzfläche Metall/Vakuum	519
8.2.1	Austrittsarbeit	520
8.2.2	Elektronen-Emissionsprozesse	523
8.3	Grenzfläche Metall/Metall	528
8.3.1	Kontaktspannung	528
8.3.2	Thermoelektrizität	530
8.3.3	Übergangswiderstand	538
8.4	Supraleitung	541
8.4.1	Grundlagen	541
8.4.2	Quanteneffekte	546
8.4.3	Anwendungen	551
8.5	Internet-Hinweise zu Kapitel 8	553
8.5.1	Elektrische Ströme in Metallen	553
8.5.2	Grenzflächen-Effekte	554
8.5.3	Supraleitung	556
8.5.4	Biographien	556
9	Elektrische Effekte in Halbleitern	559
9.1	Ladungstransport-Prozesse, Hall-Effekt	560
9.2	Bändermodell	562
9.2.1	Grundbegriffe	562
9.2.2	Leitfähigkeit	565
9.2.3	Zustands- und Ladungsträgerdichten	569
9.2.4	Bänder im k -Raum und im Ortsraum	571
9.2.5	pn-Übergang	574
9.2.6	Metall/Halbleiter-Übergang	578

9.3	Halbleiter-Bauelemente	579
9.3.1	Dioden, Thyristoren	579
9.3.2	Transistoren	584
9.3.3	Operationsverstärker	591
9.3.4	Bauelemente der Digitalelektronik	594
9.4	Photohalbleiter	597
9.4.1	Photowiderstände	597
9.4.2	Photodioden, Photoelemente	598
9.4.3	Leuchtdioden	603
9.4.4	Halbleiter-Laser	604
9.4.5	Leuchtstoffe, Elektrolumineszenz	605
9.5	Halbleiter-Technologie	606
9.5.1	Präparation, Dotierung, Strukturierung	606
9.5.2	Integrierte Schaltungen, Mikroelektronik	609
9.6	Internet-Hinweise zu Kapitel 9	609
9.6.1	Umfangreiche Sachthemen	609
9.6.2	Halbleiter/Elektronik	610
9.6.3	Photohalbleiter/Optoelektronik	611
9.6.4	Biographien	612
10	Gasentladungen, Plasmen	615
10.1	Ladungstransport ohne Gasverstärkung	617
10.1.1	Ionisation und Rekombination	617
10.1.2	Strom-Spannungs-Charakteristik	620
10.1.3	Anwendungen im Strahlenschutz	621
10.1.4	Ionen als Kondensationskeime	624
10.2	Ladungstransport mit Gasverstärkung	626
10.2.1	Townsend-Lawinen	626
10.2.2	Ionisationskammern mit Gasverstärkung	628
10.2.3	Proportionszähler, Drahtkammern	628
10.3	Selbständige Entladungen	631
10.3.1	Zündbedingung	631
10.3.2	Zünden und Löschen im Geiger-Zähler	633
10.3.3	Korona- und Funkenentladungen in Luft	634
10.3.4	Gewitter	639
10.3.5	Glimmentladungen	646
10.3.6	Lichtbögen	652
10.4	Plasmen	655
10.5	Internet-Hinweise zu Kapitel 10	658
10.5.1	Strahlung, Detektoren, Strahlungsschutz	658
10.5.2	Gewitter	659
10.5.3	Plasmen	659
10.5.4	Biographien	660
11	Geladene Teilchen im Vakuum	663
11.1	Techniken	664
11.1.1	Vakuum	664

11.1.2	Spannungsversorgung	666
11.1.3	Abschirmung	668
11.1.4	Elektronenquellen	669
11.1.5	Ionenquellen	672
11.1.6	Elektronen- und Ionennachweis	675
11.1.7	Bewegung geladener Teilchen in Feldern	682
11.1.8	Elektronenoptik	684
11.2	Elektronenröhren	693
11.2.1	Dioden, Röntgenröhren	693
11.2.2	Verstärkerrohren	696
11.2.3	Elektronenstrahlrohren	699
11.2.4	Lichtgesteuerte Röhren	702
11.3	Geräte, Großgeräte	704
11.3.1	Strahlssysteme zur Materialbearbeitung	704
11.3.2	Massenspektrometer	706
11.3.3	Teilchenfallen	710
11.3.4	Elektronenmikroskope	712
11.3.5	Teilchenbeschleuniger	715
11.4	Internet-Hinweise zu Kapitel 11	721
11.4.1	Elektronenröhren	721
11.4.2	Elektronen- und Ionenstrahlen	722
11.4.3	Speicherung geladener Teilchen	722
11.4.4	Mikroskope	723
11.4.5	Beschleuniger	723
11.4.6	Biographien	724
12	Elektrochemie	727
12.1	Elektrolyse	728
12.1.1	Grundbegriffe und Beispiele	728
12.1.2	Faraday-Gesetz	736
12.1.3	Dissoziation, Leitfähigkeit	737
12.1.4	Ladungstransport	741
12.1.5	Starke Elektrolyte	746
12.2	Galvanische Elemente	748
12.2.1	Überblick	748
12.2.2	Daniell-Element	749
12.2.3	Konzentrationselemente	751
12.2.4	Spannungsreihe der Metalle	752
12.3	Elektrodenprozesse	755
12.3.1	Prinzip der Sekundärelemente	755
12.3.2	Polarisations- und Überspannung	757
12.4	Technische Anwendungen	759
12.4.1	Einweg-Batterien und Akkumulatoren	759
12.4.2	Brennstoffzellen	763
12.4.3	Elektrolytische Verfahren	765
12.4.4	Korrosionsschutz	767
12.5	Internet-Hinweise zu Kapitel 12	769

12.5.1	Grundlagen	769
12.5.2	Anwendungen	770
12.5.3	Biographien	772
13	Elektrisches Verhalten von Isolatoren	775
13.1	Oberflächenladungen durch Transfer	778
13.1.1	Reibungselektrizität	778
13.1.2	Strömungselektrizität	781
13.2	Oberflächenladungen durch Polarisierung	783
13.2.1	Isolatoren im elektrischen Feld	783
13.2.2	Polarisierung, elektrische Erregung	784
13.2.3	Demonstrationsexperimente	786
13.2.4	Dielektrische Stoffe (im engeren Sinn)	789
13.2.5	Parelektrische Stoffe	791
13.2.6	Elektrorheologische Flüssigkeiten	794
13.3	Elektrische Kristalle	794
13.3.1	Überblick	795
13.3.2	Piezoelektrizität	798
13.3.3	Ferroelektrizität	801
13.3.4	Technische Anwendungen	804
13.4	Elektrete	808
13.5	Internet-Hinweise zu Kapitel 13	810
13.5.1	Elektrostatik	810
13.5.2	Strömungselektrizität, ER-Flüssigkeiten	810
13.5.3	Piezoelektrizität	811
13.5.4	Ferroelektrika/Elektrete	812
13.5.5	Biographien	813
14	Magnetismus	815
14.1	Dia- und Paramagnetismus	817
14.1.1	Definitionen	817
14.1.2	Messung der Suszeptibilität	818
14.1.3	Diamagnetische Stoffe	821
14.1.4	Paramagnetische Stoffe	822
14.2	Ferromagnetismus	824
14.2.1	Ferromagnetische Messgrößen	825
14.2.2	Gyromagnetische Experimente	828
14.2.3	Entstehung der spontanen Magnetisierung	831
14.2.4	Ummagnetisierungsprozesse	834
14.2.5	Magnetostriktion	845
14.2.6	Antiferro- und Ferrimagnetismus	846
14.2.7	Ferrite	849
14.2.8	Magnetowiderstand	851
14.2.9	Magneto-elektrische Effekte	854
14.3	Magnetische Flüssigkeiten	854
14.3.1	Ferrofluide	854
14.3.2	Magnetorheologische Flüssigkeiten	857

14.4	Magnetfeld der Erde	858
14.4.1	Feld auf der Erdoberfläche	858
14.4.2	Magnetosphäre der Erde	861
14.5	Internet-Hinweise zu Kapitel 14	864
14.5.1	Dia-, Para-, Ferro-, Ferrimagnetismus	864
14.5.2	Magnetowiderstand	865
14.5.3	Magneto-elektrische Effekte	866
14.5.4	Magnetische Flüssigkeiten	866
14.5.5	Erdmagnetismus	867
14.5.6	Biographien	867
 Kapitel 15–17 Anhänge		 869
15	Mathematische Hilfsmittel	871
15.1	Vorbemerkungen	871
15.2	Algebra mit physikalischen Größen	873
15.3	Infinitesimalrechnung	880
15.4	Vektoranalysis	883
15.5	Komplexe Zahlen	888
15.6	Schwingungsgleichung	891
15.7	Fourier-Reihen und -Integrale	896
15.8	Schaltalgebra	904
15.9	Internet-Hinweise zu Kapitel 15	906
 16 Gefahren im Umgang mit Elektrizität		 909
16.1	Wirkungen auf den menschlichen Körper	909
16.2	Schutzmaßnahmen	914
16.2.1	Netzanschluss und Erdung	914
16.2.2	Sicherungen, Schutzschalter	917
16.2.3	Erkennung von Defekten	920
16.3	Verhaltensregeln	920
16.3.1	Umgang mit Haushaltselektrizität	921
16.3.2	Zusätzliche Regeln für das Labor	923
16.4	Erste Hilfe	924
16.4.1	Sofortmaßnahmen	924
16.4.2	Atemspende und Herz-Lungen-Wiederbelebung	925
16.5	Internet-Hinweise zu Kapitel 16	927
16.5.1	Gefahrenvermeidung	927
16.5.2	Erste Hilfe nach Stromschlag	928
16.5.3	Umstritten: Gefährdung durch Elektromog	928
 17 Hinweise und Tabellen		 929
17.1	Übungsaufgaben	929
17.2	Ergänzende Literatur	929
17.3	Einheiten	930

XVI Inhalt

17.3.1	SI-Einheiten	930
17.3.2	Ergänzungseinheiten	932
17.3.3	Anmerkungen zu einigen anderen Einheiten	933
17.4	Naturkonstanten	935
17.5	Chemische Elemente	938
17.6	Schaltzeichen der Elektrotechnik	939
17.7	Internet-Hinweise zu Kapitel 17	941
17.7.1	Übungsaufgaben	941
17.7.2	Einheiten und Naturkonstanten	942
17.7.3	Chemische Elemente	942
17.7.4	Elektrische Schaltzeichen	942
Register	943

Bild auf dem Einband

Der **Transrapid** verkehrt seit 2004 zwischen der *Long Yang Road Station* im Finanzzentrum von Shanghai und dem 30 km entfernten *Pudong International Airport* mit einer maximalen Betriebsgeschwindigkeit von 430 km/h.

Berührungsfreies elektromagnetisches Trag-, Führ- und Antriebssystem: Die einzeln elektronisch regelbaren Trag- und Führungsmagnete sind auf beiden Seiten längs des Fahrzeugs in den die Fahrbahn umgreifenden „Klauen“ installiert (s. Abschn. 4.4.3, Abb. 4.64). Die Tragemagnete ziehen das Fahrzeug von unten an die ferromagnetischen Statorpakete im Fahrweg heran und mit schneller elektronischer Regelung wird der Schwebезustand in 1 cm Abstand eingehalten. Die Führungsmagnete halten das Fahrzeug seitlich in der Spur. Den Bordstrom erhält das Fahrzeug auf induktivem Weg von einem im Fahrweg untergebrachten Lineargenerator. Bordbatterien können das Fahrzeug im Stillstand bis zu einer Stunde in der Schwebе halten. Von einem auf die Tragemagnete im Fahrzeug wirkenden magnetischen Wanderfeld, erzeugt durch den fahrwegseitigen eisenbehafteten synchronen Langstator-Linearmotor, wird das Fahrzeug berührungsfrei mitgezogen. Eingeschaltet wird nur der Streckenabschnitt, in dem sich das Fahrzeug gerade befindet. Die Geschwindigkeit ist proportional zur Drehstrom-Frequenz und lässt sich mit dieser stufenlos regeln. Durch Umpolung des magnetischen Wanderfeldes wird der Motor zum Generator, der das Fahrzeug berührungsfrei bremst und dabei elektrische Energie zurückspeist.

Die Betriebszentrale steuert die Fahrzeuge und kommuniziert mit ihnen über Richtfunk-Datenübertragung. Die Ortung der Fahrzeuge auf der Strecke erfolgt durch ein fahrzeugseitiges Ortungssystem, das digital kodierte Ortsmarken am Fahrweg erfasst.

(Foto freundlicherweise zur Verfügung gestellt von der *Transrapid International GmbH & Co. KG*, Berlin)