



BIBLIOTHEK DES TECHNIKERS ***BDT***

# Elektrizitätslehre

## Technische Physik Band 5

von Ewald Bach

VERLAG EUROPA-LEHRMITTEL · Nourney, Vollmer GmbH & Co.  
Düsselderger Str. 23 · 42781 Haan-Gruiten

Europa-Nr.: 52115

# Inhaltsverzeichnis

Seite

## Grundlagen der Elektrizitätslehre ..... 1 bis 67

<b>Lektion 1</b>	<b>Elektrophysikalische Grundlagen</b> .....	<b>1</b>
1.1	Reibungselektrizität .....	1
1.2	Die elektrische Ladung und Atommodelle .....	1
1.2.1	Die elektrische Ladung .....	1
1.2.2	Atommodelle .....	2
1.3	Nachweis von Ladungen .....	3
1.3.1	Glimmlampe .....	3
1.3.2	Elektroskop .....	3
1.3.3	Polreagenzpapier .....	3
1.4	Wirkungen des elektrischen Stromes .....	4
1.4.1	Lichtwirkung .....	4
1.4.1.1	Atomphysikalische Ursachen der elektromagnetischen Strahlung .....	4
1.4.1.2	Glühlampen .....	5
1.4.1.3	Gasentladungslampen .....	5
1.4.2	Wärmewirkung .....	6
1.4.3	Elektromagnetische Wirkung .....	6
1.4.4	Elektrochemische Wirkung .....	6
1.4.5	Physiologische Wirkung .....	8
1.5	Der elektrische Strom .....	9
1.5.1	Definition der elektrischen Stromstärke .....	9
1.5.2	Messung der elektrischen Stromstärke .....	10
1.5.3	Stromrichtung .....	10
1.5.4	Stromarten .....	11
1.5.4.1	Gleichstrom .....	11
1.5.4.2	Wechselstrom .....	11
1.5.4.3	Mischstrom .....	11
1.6	Leiter und Nichtleiter .....	12
1.7	Widerstand und Leitwert .....	12
1.8	Die elektrische Spannung .....	13
1.8.1	Zusammenhang zwischen elektrischer Stromstärke und elektrischer Spannung .....	13
1.8.2	Definition der elektrischen Spannung .....	13
1.8.3	Messung der elektrischen Spannung .....	14
1.8.4	Spannungsarten .....	14
1.9	Spannungserzeugung .....	15
1.9.1	Spannungserzeugung durch Reibung .....	15
1.9.2	Spannungserzeugung durch Licht .....	15
1.9.3	Spannungserzeugung durch Wärme .....	16
1.9.4	Spannungserzeugung durch Induktion .....	16
1.9.5	Spannungserzeugung durch chemische Vorgänge .....	17
1.9.5.1	Primärelemente .....	18
1.9.5.2	Sekundärelemente .....	18
1.9.6	Spannungserzeugung durch Kristallverformung .....	19

<b>Lektion 2</b>	<b>Gesetzmäßigkeiten im elektrischen Stromkreis</b>	23
2.1	Das Ohm'sche Gesetz	23
2.2	Graphische Darstellung des Ohm'schen Gesetzes	24
2.3	Spezifischer Widerstand und Leitfähigkeit	25
2.4	Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes	27
2.4.1	Heißeleiter- und Kaltleiterwerkstoffe	27
2.4.1.1	Berechnung des Widerstandswertes von Leiterwerkstoffen	28
2.4.1.2	Ermittlung des Widerstandswertes von NTC- und PTC-Widerständen	30
2.4.1.3	Strombelastbarkeit von elektrischen Leitungen	31
2.4.2	Supraleitung	31
2.5	Elektrische Arbeit und elektrische Leistung	32
2.5.1	Elektrische Arbeit	32
2.5.2	Elektrische Leistung	34
2.6	Umwandlung der Energien und Wirkungsgrad	36
2.6.1	Umwandlung der Energien	36
2.6.2	Wirkungsgrad	36

<b>Lektion 3</b>	<b>Gesetzmäßigkeiten in Widerstandsschaltungen</b>	41
3.1	Parallelschaltung von Widerständen	41
3.1.1	Gesetzmäßigkeit der elektrischen Spannungen in der Parallelschaltung	41
3.1.2	Gesetzmäßigkeit der elektrischen Teilströme in der Parallelschaltung	41
3.1.2.1	Knotenregel	42
3.1.3	Gesetzmäßigkeit der Widerstände und Leitwerte in der Parallelschaltung	42
3.1.4	Gesetzmäßigkeiten zwischen den Teilströmen und Widerständen in der Parallelschaltung	43
3.1.5	Gesetzmäßigkeiten der elektrischen Leistungen und umgewandelten Energien	44
3.2	Reihenschaltung von Widerständen	45
3.2.1	Gesetzmäßigkeiten der elektrischen Ströme in der Reihenschaltung	45
3.2.2	Gesetzmäßigkeiten der Spannungen in der Reihenschaltung	45
3.2.2.1	Maschenregel	46
3.2.3	Gesetzmäßigkeiten der Widerstände in der Reihenschaltung	46
3.2.4	Gesetzmäßigkeiten der Spannungen und Widerstände in der Reihenschaltung	47
3.2.5	Gesetzmäßigkeiten der elektrischen Leistungen und umgewandelten Energien	47
3.3	Gemischte Widerstandsschaltungen	48
3.3.1	Erweiterte Reihenschaltung	49
3.3.2	Erweiterte Parallelschaltung	49
3.3.3	Kosten der elektrischen Arbeit	50
3.4	Spannungsteiler	50
3.4.1	Unbelasteter Spannungsteiler	50
3.4.2	Belasteter Spannungsteiler	52
3.5	Messbereichserweiterung von elektrischen Messinstrumenten	53
3.5.1	Messbereichserweiterung von Strommessern	53
3.5.2	Messbereichserweiterung von Spannungsmessern	54
3.6	Widerstandsmessung	55
3.6.1	Indirekte Widerstandsmessung mit einer Strom- und Spannungsmessung	55
3.6.1.1	Stromfehlerschaltung	56
3.6.1.2	Spannungsfehlerschaltung	56
3.6.2	Direkte Widerstandsmessung mit dem Widerstandsmesser	57

	Seite
3.6.3	Direkte Widerstandsmessung mit der Widerstandsmessbrücke ..... 58
3.6.3.1	Herleitung der Abgleichbedingung ..... 59
3.6.3.2	Brückenspannung $U_{AB}$ bei der nicht abgeglichenen Brückenschaltung ... 59
3.7	Innenwiderstand von Spannungserzeugern ..... 59
3.7.1	Leerlauf fall ..... 60
3.7.2	Belastungsfall ..... 60
3.7.3	Kurzschlussfall ..... 60

## Gesetzmäßigkeiten der elektrischen und magnetischen Felder ..... 68 bis 121

### **Lektion 4**      **Das elektrische Feld** ..... 68

4.1	Grundlegende Betrachtungen über elektrische Felder ..... 68
4.1.1	Coulomb'sches Gesetz ..... 69
4.1.2	Elektrische Influenz ..... 70
4.1.2.1	Elektrische Influenz bei Metallen ..... 70
4.1.2.1.1	Abschirmung elektrischer Felder ..... 71
4.1.2.2	Elektrische Influenz bei Nichtmetallen ..... 71
4.1.2.2.1	Verschiebungspolarisation ..... 72
4.1.2.2.2	Orientierungspolarisation ..... 72
4.2	Die elektrische Feldstärke ..... 72
4.2.1	Elektrische Feldstärke im homogenen Feld ..... 73
4.2.2	Elektrische Feldstärke im radialsymmetrischen Feld ..... 74
4.3	Die elektrische Spannung und Feldstärke im homogenen Feld ..... 75
4.4	Der Kondensator ..... 75
4.4.1	Speichervermögen und Flächenladungsdichte eines Plattenkondensators ..... 75
4.4.2	Kapazität eines Kondensators ..... 77
4.4.2.1	Kapazität eines Plattenkondensators ohne Dielektrikum ..... 77
4.4.2.2	Kapazität eines Kondensators mit Dielektrikum ..... 78
4.4.2.3	Kondensatorbauformen ..... 79
4.4.3	Auf- und Entladen von Kondensatoren ..... 80
4.4.3.1	Zeitkonstante von Kondensatoren ..... 80
4.4.3.2	Elektrische Energie von Kondensatoren ..... 81
4.4.4	Kondensatorschaltungen ..... 81
4.4.4.1	Parallelschaltung von Kondensatoren ..... 81
4.4.4.2	Reihenschaltung von Kondensatoren ..... 82
4.5	Feldtheoretische Überlegungen ..... 83

### **Lektion 5**      **Das magnetische Feld** ..... 87

5.1	Grundlegende Betrachtungen über magnetische Felder ..... 87
5.1.1	Merkmale der magnetischen Felder ..... 88
5.1.2	Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule ..... 89
5.1.3	Magnetische Influenz ..... 90
5.2	Magnetische Größen ..... 90
5.2.1	Durchflutung ..... 90
5.2.2	Magnetische Feldstärke ..... 91
5.2.3	Magnetische Spannung ..... 92

	Seite
5.2.4	Magnetischer Fluss ..... 93
5.2.5	Magnetische Flussdichte ..... 93
5.3	Kraftwirkung eines Magnetfeldes auf einen stromdurchflossenen Leiter ... 93
5.3.1	Stromdurchflossene Spule ohne Eisenkern ..... 96
5.3.2	Stromdurchflossene Spule mit Eisenkern ..... 96
5.3.3	Entmagnetisierung ..... 98
5.3.4	Permeabilität ..... 99
5.3.4.1	Permeabilität von verschiedenen Werkstoffen ..... 100
5.3.4.2	Hystereseschleifen ..... 101
5.4	Der magnetische Kreis ..... 102
5.4.1	Magnetischer Widerstand und magnetische Leitfähigkeit ..... 103
5.4.2	Das Ohm'sche Gesetz des magnetischen Kreises ..... 104
5.5	Elektrische und magnetische Felder in Natur und Technik ..... 105

<b>Lektion 6</b>	<b>Elektromagnetische Induktion</b> ..... 110
------------------	---

6.1	Historische Entwicklung der Spannungserzeugung durch Induktion ..... 110
6.1.1	Spannungserzeugung bei Bewegung eines Leiters im homogenen Magnetfeld ..... 110
6.1.2	Induzierte Spannung in Abhängigkeit von der Flächenänderungsgeschwindigkeit ..... 112
6.2	Spannungserzeugung im ruhenden Leiter bei Änderung des Magnetfeldes 113
6.3	Selbstinduktion ..... 115
6.3.1	Induktivität einer Spule ..... 117
6.3.2	Schaltungen von Spulen ..... 118
6.3.3	Wirbelströme ..... 119
6.4	Elektrische Energie einer Spule ..... 120

## Anwendungen elektrischer und magnetischer Felder ..... 122 bis 248

<b>Lektion 7</b>	<b>Elektromagnetische Schaltung und elektrische Messgeräte</b> . 122
------------------	--

7.1	Elektromagnete ..... 122
7.2	Elektromagnetische Schalter ..... 122
7.2.1	Schütze ..... 122
7.2.1.1	Einfache Schützsteuerung ..... 123
7.2.1.2	Relais ..... 125
7.2.1.3	Leitungsschutzschalter und Motorschutzschalter ..... 126
7.3	Elektrische Messgeräte ..... 128
7.3.1	Aufbau und Wirkungsweise eines Drehspulmesswerks ..... 128
7.3.2	Elektrische Eigenschaften und Anwendungen ..... 129
7.4	Das Oszilloskop ..... 130
7.4.1	Aufbau und Wirkungsweise des Oszilloskopes ..... 130
7.4.2	Elektrische Eigenschaften der Oszilloskope ..... 136
7.4.3	Messungen mit dem Oszilloskop ..... 137
7.4.3.1	Messungen der Wechselspannung und der Frequenz mit dem Oszilloskop 137
7.4.3.2	Messung des Wechselstromes mit dem Oszilloskop ..... 138
7.4.3.3	Messung von Selbstinduktionsvorgängen mit dem Oszilloskop ..... 139

<b>Lektion 8</b>	<b>Der Wechselstromkreis</b> .....	142
8.1	Historische Entwicklung der Wechselstromtechnik .....	142
8.2	Erzeugung von sinusförmigen Wechselspannungen und Wechselströmen .	142
8.3	Darstellung und Berechnung von sinusförmigen Wechselgrößen .....	143
8.4	Wirkwiderstand, Kondensator und Spule im Wechselstromkreis .....	147
8.4.1	Wirkwiderstand im Wechselstromkreis .....	147
8.4.2	Der Kondensator im Wechselstromkreis .....	149
8.4.2.1	Der verlustfreie Kondensator .....	149
8.4.2.2	Kapazitiver Blindwiderstand .....	150
8.4.2.3	Kapazitive Blindleistung .....	150
8.4.2.4	Der verlustbehaftete Kondensator .....	152
8.4.2.5	Leistungsfaktor, Blindfaktor, Verlustfaktor und Gütefaktor bei Kondensatoren .....	153
8.5	Die Spule im Wechselstromkreis .....	154
8.5.1	Die verlustfreie Spule im Wechselstromkreis .....	154
8.5.2	Induktiver Blindwiderstand .....	155
8.5.3	Induktive Blindleistung .....	156
8.5.4	Die verlustbehaftete Spule .....	157
8.5.5	Leistungsfaktor, Blindfaktor, Verlustfaktor und Gütefaktor bei Spulen ....	158
8.6	Blindleistungskompensation .....	159
<b>Lektion 9</b>	<b>Dreiphasenwechselspannung</b> .....	165
9.1	Erzeugung einer Dreiphasenwechselspannung .....	165
9.2	Stern- und Dreieckschaltung .....	167
9.2.1	Sternschaltung .....	167
9.2.2	Dreieckschaltung .....	170
9.3	Bedeutung des Drehstroms für die elektrische Energieübertragung .....	172
9.4	Technische Anwendungen der Stern- und Dreieckschaltung .....	172
9.5	Drehstromleistung .....	173
<b>Lektion 10</b>	<b>Transformatoren</b> .....	177
10.1	Aufbau und Wirkungsweise eines Einphasen-Transformators .....	177
10.1.1	Leerlauf .....	178
10.1.2	Belastungsfall .....	179
10.1.3	Leistungsschild .....	180
10.1.4	Leistung und Wirkungsgrad von Einphasen-Transformatoren .....	181
10.1.5	Anwendungsbeispiele der Einphasen-Transformatoren .....	182
10.2	Aufbau und Wirkungsweise eines Drehstrom-Transformators .....	182
10.3	Energieversorgung und Energieverteilung .....	185
<b>Lektion 11</b>	<b>Elektrische Maschinen</b> .....	189
11.1	Unterscheidungsmöglichkeiten der elektrischen Maschinen .....	189
11.2	Gleichstrommotoren .....	189
11.2.1	Aufbau und Wirkungsweise von Gleichstrommotoren .....	189
11.2.2	Drehzahlsteuerung von Gleichstrommotoren .....	192
11.2.3	Gleichstrommotoren in Sonderbauformen .....	196

	Seite
11.2.3.1	Universalmotor ..... 196
11.2.3.2	Scheibenläufermotor ..... 196
11.2.3.3	Schlankläufermotor ..... 197
11.2.4	Schaltungsarten und Betriebsverhalten von Gleichstrommotoren ..... 197
11.3	Drehstrommotoren ..... 199
11.3.1	Erzeugung eines Drehfeldes ..... 199
11.3.2	Synchronmotoren ..... 201
11.3.3	Drehstrom-Asynchronmotoren ..... 202
11.4	Aufbau und Wirkungsweise von Drehstrom-Kurzschlussläufermotoren ... 202
11.5	Betriebsverhalten von Drehstrom-Kurzschlussläufermotoren ..... 205
11.6	Anlassverfahren für Drehstrom-Kurzschlussläufermotoren ..... 206
11.6.1	Stern-Dreieck-Anlassverfahren ..... 206
11.6.2	Anlassen mit dem Anlasstransformator ..... 207
11.6.3	Ständeranlasser mit Widerständen ..... 208
11.7	Drehzahlsteuerung von Drehstrom-Asynchronmotoren ..... 208
11.7.1	Frequenzsteuerung ..... 208
11.7.2	Polumschaltung ..... 209
11.7.3	Spannungsänderung ..... 210
11.7.4	Schlupfänderung ..... 210
11.8	Drehstrommotor als Einphasenmotor ..... 211

<b>Lektion 12</b>	<b>Schutzmaßnahmen</b> ..... 214
12.1	Gefährliche Wirkungen des elektrischen Stromes ..... 214
12.1.1	Sofortmaßnahmen bei elektrischen Unfällen ..... 216
12.1.1.1	Abschaltung ..... 216
12.1.1.2	Erste-Hilfe-Maßnahmen ..... 216
12.1.1.3	Brandbekämpfung ..... 216
12.2	Fehlerarten ..... 216
12.2.1	Isolationsfehler ..... 216
12.2.2	Körperschluss, Kurzschluss und Erdschluss ..... 217
12.2.3	Leiterschluss ..... 217
12.3	Schutzmaßnahmen gegen Berühren unter Spannung stehender Betriebsmittel ..... 218
12.3.1	Schutzmaßnahmen gegen direktes Berühren ..... 218
12.3.2	Schutzmaßnahmen gegen indirektes Berühren ..... 219
12.3.2.1	Schutzmaßnahmen gegen indirektes Berühren bei Verbrauchern ohne Schutzleiter ..... 219
12.3.2.2	Schutzmaßnahmen gegen indirektes Berühren bei Verbrauchern mit Schutzleiter ..... 220
12.3.3	Schutzmaßnahmen gegen direktes und indirektes Berühren ..... 221
12.3.4	Überstromschutzorgane ..... 222
12.4	Schutz vor elektromagnetischen Störungen ..... 223
12.4.1	Funkentstörquellen ..... 223
12.4.2	Störungsempfänger und Störungsübertragung ..... 224
12.4.3	Entstörmaßnahmen ..... 224
12.4.3.1	Entstörkondensator und Tiefpassfilter ..... 225
12.4.3.2	Funkentstördrossel und Netzentstörfilter ..... 226
12.4.3.3	Funkenlöschung eines Schalters ..... 226
12.4.3.4	Abschirmung ..... 227
12.4.3.5	Galvanische Trennung ..... 228
12.4.3.6	Potentialausgleich und Überspannungsschutz in der Energietechnik ..... 229
12.5	Allgemeine Hinweise zu den Schutzmaßnahmen ..... 230

<b>Lektion 13</b>	<b>Elektromagnetische Schwingungen</b>	235
13.1	Resonanzerscheinung	235
13.2	Elektrischer Schwingkreis	235
13.2.1	Reihenschwingkreis	236
13.2.2	Parallelschwingkreis	237
13.3	Entstehung und Ausbreitung elektromagnetischer Wellen	239
13.3.1	Entstehung elektromagnetischer Wellen	239
13.3.2	Ausbreitung elektromagnetischer Wellen im Raum	240
<b>Lektion 14</b>	<b>Elektrische Messtechnik</b>	243
14.1	Grundbegriffe der elektrischen Messtechnik	243
14.2	Messwertaufnehmer	244
14.3	Messung elektrischer und nichtelektrischer Größen	245
14.4	Messfehler	247

## **Elektronische Bauelemente** ..... 249 bis 266

<b>Lektion 15</b>	<b>Grundlagen der Halbleitertechnik</b>	249
15.1	Kurze Entstehungsgeschichte der Halbleiterphysik	249
15.2	Halbleiterwerkstoffe	249
15.2.1	Energiebändermodell	250
15.2.1.1	Leiterwerkstoffe	251
15.2.1.2	Isolierwerkstoffe	251
15.2.1.3	Halbleiterwerkstoffe	251
15.2.2	Kristallaufbau eines Halbleiters	251
15.2.3	Leitungsmechanismen in Halbleiterwerkstoffen	253
15.2.3.1	Eigenleitung	253
15.2.3.2	Störstellenleitung	254
15.2.4	PN-Übergang	255
15.3	Bauelemente mit Halbleiterwerkstoffen	257
15.3.1	Aufbau und Wirkungsweise einer Halbleiterdiode	257
15.3.2	Transistor	259
15.3.2.1	Aufbau eines bipolaren Transistors	259
15.3.2.2	Wirkungsweise eines Transistors	260
15.3.2.3	Grundsaltungen eines Transistors	261
15.3.2.4	Transistor als Verstärker	261
15.3.3	Aufbau und Wirkungsweise eines Thyristors	262
15.3.4	Optoelektronische Bauelemente	263
15.3.4.1	Photoelement	263
15.3.4.2	Photodiode	264
15.3.4.3	Leuchtdiode	264
15.3.4.4	Phototransistor	264

<b>Lösungsgänge zu den Übungsaufgaben</b> .....	267 bis 294
<b>Ergebnisse der Vertiefungsaufgaben</b> .....	295 bis 311
<b>Sachwortverzeichnis</b> .....	312 bis 319
<b>Griechisches Alphabet</b> .....	319
<b>DIN-Normen, Auswahl zu den Sachgebieten dieses Buches</b> .....	320