

# Inhaltsverzeichnis

---

## Teil I Was ist Theoretische Elektrotechnik?

---

<b>1</b>	<b>Die elektrotechnischen Disziplinen</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Systemtheoretische Grundlagen</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>Grundlegende Aspekte physikalischer Systeme</b>	<b>15</b>
3.1	Verteilte physikalische Systeme	15
3.2	Mechanik und Energie-Impuls-Transporte	17

---

## Teil II Theorie elektrischer Netzwerke

---

<b>4</b>	<b>Grundgleichungen und Analysemethoden elektrischer Netzwerke</b>	<b>23</b>
4.1	Netzwerkmodellierung und Widerstandsnetzwerke	23
4.2	Elektrischen Netzwerke mit dynamischen Elementen	38
4.3	Die Wechselstromrechnung: AC-Kalkül	42
4.4	Darstellungen von Übertragungsfunktionen	55
4.5	Zweitore und Vierpole	63
<b>5</b>	<b>Einfache elektrische Grundsaltungen</b>	<b>74</b>
5.1	Einführende Überlegungen	74
5.2	Einfache Schaltungen aus Spulen und Widerständen	76
5.2.1	Lade- und Entladevorgang eines RC-Gliedes	76
5.2.2	Ein einfacher Wechselstromkreis mit Kondensator	81
5.3	Netzwerke aus Spulen und Widerständen	86
5.3.1	Aufladevorgang eines LR-Gliedes	86
5.3.2	Ein einfacher Wechselstromkreis mit Spule	89
5.4	Dreiphasennetzwerke	94
5.5	Der Gyrator	101

---

**Teil III Das elektrostatische Feld**

---

<b>6</b>	<b>Die Grundgleichungen des elektrostatischen Feldes</b>	<b>107</b>
<b>7</b>	<b>Elementare Betrachtungen zur Elektrostatik</b>	<b>113</b>
<b>8</b>	<b>Materialgesetze in der Elektrostatik</b>	<b>121</b>
<b>9</b>	<b>Influenzwirkungen</b>	<b>129</b>
<b>10</b>	<b>Einfache Beispiele für elektrostatische Felder</b>	<b>132</b>
10.1	Das elektrische Feld von Punktladungen	133
10.1.1	Die homogen geladene Kugel und die Punktladung	133
10.1.2	Endlich viele Punktladungen	134
10.1.3	Das Potenzial zweier Punktladungen	135
10.1.4	Der elektrische Dipol	137
10.1.5	Das elektrische Feld zweier Kugeln	140
10.1.6	Endlich ausgedehnte Linienladungen	142
10.2	Ebene elektrostatische Felder	144
10.2.1	Unendlich lange Linienleiter	144
10.2.2	Koaxialkabel, Zylinderkondensator	146
10.2.3	Zweidrahtleitung, parallele Zylinder	150
10.2.4	Zylinder und Platte	155
10.2.5	Liniendipol	156
10.2.6	Erdseil	158
<b>11</b>	<b>Lösungsverfahren der Poisson- und Laplace-Gleichung</b>	<b>161</b>
11.1	Grundlagen	161
11.1.1	Poisson- und Laplace-Gleichung und ihre Lösungsmengen	162
11.1.2	Rand- und Grenzbedingungen, Eindeutigkeit des Potenzials	164
11.2	Elementare Methoden	165
11.2.1	Die graphische Methode	165
11.2.2	Eindimensionale Potenzialprobleme	168
11.2.3	Überlagerung von Punktladungen	169
11.3	Das Kirchhoff-Integral	170
11.4	Die Greensche und Neumannsche Funktionen	171
11.5	Die Multipolmethode	172
11.6	Die Spiegelungsmethode	174
11.7	Konforme Abbildungen	176
11.8	Die Separationsmethode	192
11.9	Bemerkungen über numerische Verfahren	193

<b>12</b>	<b>Kapazitätskoeffizienten</b> .....	195
12.1	Der elementare Kapazitätsbegriff .....	195
12.2	Graphische Berechnung von Kapazitätskoeffizienten .....	197
12.3	Kapazität einfacher Anordnungen .....	198
12.4	Parallel- und Reihenschaltung von Kapazitäten .....	207
12.5	Kapazitäten in Mehrleitersystemen .....	208
12.5.1	Maxwellsche Potenzial- und Kapazitätskoeffizienten ...	208
12.5.2	Berechnung von Teilkapazitäten .....	221
<b>13</b>	<b>Energie in der Elektrostatik</b> .....	230
<b>14</b>	<b>Mechanische Kräfte in der Elektrostatik</b> .....	234
14.1	Kräfte an Leiteroberflächen .....	234
14.2	Mechanische Spannungen im elektrischen Feld .....	236
14.3	Kräfte an Grenzflächen zwischen Nichtleitern .....	238
14.4	Berechnung der Feldkräfte aus der Kapazität .....	240
14.5	Einwirkung elektrischer Felder auf Elektronenbahnen: Elektronenoptik (Internet) .....	243
14.6	Einwirkung elektrischer Felder auf Elektronenbahnen: Elektronenoptik (Internet) .....	244

---

## Teil IV Das elektrische Strömungsfeld

---

<b>15</b>	<b>Grundgleichungen des elektrischen Strömungsfeldes</b> .....	247
<b>16</b>	<b>Elementare Betrachtungen zum elektrischen Strömungsfeld</b>	252
16.1	Experimentelle Betrachtungen .....	252
16.2	Das stationäre Strömungsfeld und Widerstandsnetzwerke .....	256
16.3	Zusammenhang zwischen Kapazität und Widerstand .....	262
<b>17</b>	<b>Beispiele von elektrischen Strömungsfeldern</b> .....	266
17.1	Punktquelle .....	266
17.2	Spiegelung .....	274
17.3	Linienquelle .....	276

---

## Teil V Das stationäre Magnetfeld

---

<b>18</b>	<b>Grundgleichungen des stationären Magnetfeldes</b> .....	285
<b>19</b>	<b>Elementare Betrachtungen zum stationären Magnetfeld</b> ...	292
19.1	Magnetische Kraftwirkungen und das B-Feldes .....	292
19.2	Beispiele für magnetische Kraftwirkungen .....	297
19.3	Das Durchflutungsgesetz .....	301
19.4	Der magnetische Dipol .....	305

<b>20</b>	<b>Materialgesetze im stationären Magnetfeld</b>	307
20.1	Diamagnetismus und Paramagnetismus	307
20.2	Messung der Permeabilität	310
20.3	Ferromagnetismus	311
20.4	Magnetische Werkstoffe	319
20.5	Magnetische Anisotropie	322
<b>21</b>	<b>Lösungsverfahren für die Vektor-Poissongleichung</b>	325
21.1	Ableitung der Vektor-Poissongleichung	325
21.2	Das vektorielle Kirchhoff-Integral	327
21.2.1	Kirchhoff-Integral für Stromdichteverteilungen	327
21.2.2	Kirchhoff-Integral für einen Linienleiter	329
21.3	Das Biot-Savart-Integral	333
21.4	Die Multipolmethode	335
21.5	Das skalare magnetische Potenzial und konforme Abbildungen	337
<b>22</b>	<b>Beispiele für stationäre Magnetfelder</b>	346
22.1	Anwendung der Laplaceschen Formel	346
22.2	Anwendung des magnetischen skalaren Potenzials	348
22.3	Der magnetische Kreis: Elektro- und Dauermagnete	353
22.3.1	Grundgleichungen des magnetischen Kreises	353
22.3.2	Angenäherte Berechnung von Elektromagneten	354
22.3.3	Scherung	359
22.3.4	Berechnung von Dauermagneten	360
22.3.5	Theorie der Kompassnadel	365
<b>23</b>	<b>Induktionskoeffizienten</b>	367
23.1	Der Induktivitätsbegriff	367
23.2	Induktivitäten einfacher Anordnungen	368
23.2.1	Induktivität einer Ringspule	368
23.2.2	Induktivität einer Zylinderspule	370
23.2.3	Induktivität einer Doppelleitung	370
23.2.4	Induktivität eines Drahringes	371
23.2.5	Induktivität von Drähten beliebiger Form	372
23.2.6	Induktivität in nichtlinearen magnetischen Kreisen	373
23.3	Gegeninduktivität und Koppelkoeffizient	374
<b>24</b>	<b>Energie im stationären Magnetfeld</b>	379
<b>25</b>	<b>Kräfte im stationären Magnetfeld</b>	388
25.1	Kräfte zwischen Stromleitern	388
25.2	Methode der virtuellen Verschiebung zur Kraftberechnung	391
25.3	Kräfte zwischen Stromleitern und magnetischen Stoffen	392
25.4	Kräfte an Grenzflächen	393

---

**Teil VI Das quasistationäre elektromagnetische Feld**

---

<b>26</b>	<b>Grundgleichungen des quasistationären Feldes</b>	<b>401</b>
26.1	Elektrisches und magnetisches Feld	401
26.2	Das Induktionsgesetz	402
26.3	Die Grundgleichungen mit Induktionsgesetz	405
26.4	Das Induktionsgesetz und die Kontinuitätsgleichung	407
26.5	Die Grundgleichungen des quasistationären elektromagnetischen Feldes	409
<b>27</b>	<b>Elementare Betrachtungen zur Induktionswirkung</b>	<b>413</b>
<b>28</b>	<b>Lösungsverfahren für Diffusionsgleichungen</b>	<b>431</b>
<b>29</b>	<b>Anwendungen des quasistationären Feldes</b>	<b>434</b>
29.1	Wirbelströme und Skinneffekt	434
29.1.1	Stromverdrängung im zylindrischen Leiter	435
29.1.2	Ebene Wirbelfelder	440
29.1.3	Einseitige Stromverdrängung in Ankerleitern und Spulen	445
29.1.4	Wirbelströme in Eisenblechkernen	449
29.1.5	Abschirmung von Hochfrequenzfeldern	455
29.1.6	Triebströme eines Wechselstromzählers	456
29.2	Ummagnetisierungsverluste bei ferromagnetischen Werkstoffen	457
29.3	Der Transformator	466
29.3.1	Allgemeine Beziehungen	466
29.3.2	Streuungs-Ersatzbild	469
29.3.3	Die Streuung	470
29.3.4	Der lineare Übertrager	473
29.3.5	Kopplungs-Ersatzbilder des linearen Übertragers	477
29.4	Elektrisch-mechanische Energiewandlung	479
29.4.1	Allgemeines	479
29.4.2	Die Grundgleichungen der elektrischen Maschine	480
29.4.3	Die Gleichstrommaschine	481
29.4.4	Die Synchronmaschine	485
29.4.5	Die Induktionsmaschine	491
29.4.6	Lineare elektrisch-mechanische Systeme	497
<b>30</b>	<b>Der Verschiebungsstrom im quasistationären Feld</b>	<b>503</b>
<b>31</b>	<b>Bewegte Leiter und das Induktionsgesetz</b>	<b>508</b>
31.1	Bewegte Leiter	508
31.2	Bewegte nichtleitende Körper	511
31.3	Weitere Bewegungseffekte	512

---

**Teil VII Das instationäre elektromagnetische Feld**

---

<b>32</b>	<b>Die Maxwellsche Theorie des elektromagnetisches Feldes ..</b>	<b>519</b>
32.1	Die Maxwellsche Ergänzung und Wellen .....	519
32.2	Die Maxwellschen Gleichungen .....	521
<b>33</b>	<b>Elementare Betrachtungen zum instationären elektromagnetischen Feld .....</b>	<b>524</b>
<b>34</b>	<b>Elektromagnetische Wellen .....</b>	<b>533</b>
34.1	Elementarform der elektromagnetischen Welle .....	533
34.1.1	Nahfeld der schwingenden Ladung .....	539
34.1.2	Fernfeld der schwingenden Ladung .....	539
34.1.3	Energiefluss in der Elementarwelle, Strahlungswiderstand .....	540
34.2	Energiedichte des elektromagnetischen Feldes .....	546
34.3	Ebene Welle .....	549
34.4	Empfangsantennen .....	559
34.5	Elektromagnetische Schirme .....	560
<b>35</b>	<b>TEM-Wellen auf Doppel- und Mehrfachleitungen .....</b>	<b>564</b>
35.1	Vorbemerkungen .....	564
35.2	Verlustfreie Doppelleitungen .....	566
35.2.1	Feldtheoretische Beschreibung .....	566
35.2.2	Leitungsgleichungen .....	577
35.2.3	Konstruktion von Leitungsmodellen mit Differenzenformeln .....	591
35.2.4	Ausblick: Mehrfachleitungen .....	595
35.2.5	Schlußbemerkung .....	597
35.3	Verlustbehaftete Doppelleitungen .....	597
35.3.1	Doppelleitungen mit verlustbehaftetem Dielektrikum .....	597
35.3.2	Doppelleitungen mit verlustbehaftetem Dielektrikum und verlustbehafteten Leitern .....	600
35.4	Lösung der Leitungsgleichungen im Zeitbereich .....	603
35.4.1	Wellenausbreitung auf verlustlosen Doppelleitungen .....	603
35.4.2	Leitungsmodelle zur Netzwerkanalyse im Zeitbereich .....	616
35.5	Lösung der Leitungsgleichungen im Frequenzbereich .....	625
35.5.1	Sinusförmig eingeschwungene Lösungen der Leitungsgleichungen .....	626
35.5.2	Leitungsmodelle für die Netzwerkanalyse im Frequenzbereich .....	632
35.5.3	Eigenschaften der Lösungen der Leitungsgleichungen im Frequenzbereich .....	635
<b>36</b>	<b>Hohlleiter und Hohlraumresonatoren .....</b>	<b>644</b>

---

**Teil VIII Das elektromagnetische Feld in elektronischen Bauelementen**

---

<b>37</b>	<b>Mechanismen der Stromleitung</b>	659
37.1	Stromleitung in Gasen: Grundbegriffe (Internet)	659
37.1.1	Stoßionisierung	659
37.1.2	Elektronenauslösung an der Kathode	659
37.1.3	Anlaufspannung, Durchschlag in Gasen	659
37.1.4	Koronaentladung	659
37.1.5	Kurzzeitige Gasentladung	659
37.1.6	Bogenentladung	659
37.1.7	Bogenentladung an Kontakten	659
37.1.8	Die Kapazität bei Feldern mit Raumladungen	659
37.1.9	Der Durchschlag von Isolierstoffen	659
37.2	Stromleitung in festen Körpern und Flüssigkeiten	660
37.2.1	Atomstruktur der Leiter und Leitungsmechanismen	660
37.2.2	Metallische Leiter	661
37.2.3	Ionenleiter	666
37.2.4	Schwankungserscheinungen	667
37.2.5	Das Wesen der Spannungsquellen - Quellenspannung	669
37.3	Stromleitung in Halbleitern	670
37.3.1	Siliziumkristall	670
37.3.2	Bändermodell	672
37.3.3	Eigenleitung	673
37.3.4	Störstellenleitung	675
37.3.5	Feldstrom und Diffusionsstrom	678
37.3.6	Diffusion von Minoritätsträger	681
37.3.7	Diffusion von Löchern aus einer $p$ -Zone in eine $n$ -Zone. Diffusionsspannung	685
37.3.8	Thermoeffekt	689
37.3.9	Photoeffekt	689
<b>38</b>	<b>Elektronenröhren (Internet)</b>	692
38.1	Die Raumladungsgleichung	692
38.2	Elektronenemission	692
38.3	Photoemission	692
38.4	Die Strom-Spannungsrelation für Elektronenröhren	692
38.5	Die Hochvakuumtriode	692
38.6	Die Hochvakuumtriode	692
38.7	Raumladung in leitenden Stoffen	692

<b>39 Halbleiterbauelemente</b>	693
39.1 Der $pn$ -Übergang	693
39.1.1 Der $pn$ -Übergang im stromlosen Zustand	693
39.1.2 $pn$ -Übergang im Durchlassbereich	697
39.1.3 $pn$ -Übergang im Sperrbereich	702
39.1.4 Kapazität des $pn$ -Überganges	702
39.2 Der bipolare $npn$ -Transistor	707
39.2.1 Der Aufbau	710
39.2.2 Die Ersatzschaltung	710
39.3 Der MOSFET	716
<b>40 Schaltungen und Netzwerke</b>	722
40.1 Grundbegriffe der Schaltungstechnik	722
40.2 Der Bipolartransistor und seine Grundsaltungen	725
40.2.1 Die Basisschaltung	725
40.2.2 Die Emitterschaltung	729
40.2.3 Die Kollektorschaltung (Emitterfolger)	732
40.3 Grundaufbau von Operationsverstärkern	734
40.4 Systeme mit Rückkopplung	737
40.4.1 Stabilitätsbedingungen	737
40.4.2 Negativer Widerstand	739
40.4.3 Die beiden Typen von negativen Widerständen	743
40.4.4 Rückkopplung	747
40.4.5 Erzeugung von Schwingungen in Oszillatoren	750
<b>A Mathematische Felder</b>	757
A.1 Differentialoperatoren und Rechenregeln	757
A.2 Das Satz von Helmholtz	763
<b>B Der Laplace-Operator</b>	765
B.1 Skalare Felder	765
B.2 Vektorielle Felder	766
<b>Literatur</b>	769
<b>Index</b>	783