

Karl Küpfmüller

---

Einführung in die  
theoretische Elektrotechnik

---

10. verbesserte und erweiterte Auflage



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH 1973

Dr.-Ing. E. h. KARL KÜPFMÜLLER  
em. o. Professor an der  
Technischen Hochschule Darmstadt

Mit 623 Abbildungen

---

ISBN 978-3-662-06889-2    ISBN 978-3-662-06888-5 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-662-06888-5

---

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Bei Vervielfältigungen für gewerbliche Zwecke ist gemäß § 54 UrhG eine Vergütung an den Verlag zu zahlen, deren Höhe mit dem Verlag zu vereinbaren ist.

© by Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1932, 1952, 1955, 1959, 1962, 1965, 1968 and 1973.

Ursprünglich erschienen bei Springer-Verlag Berlin – Heidelberg – New York 1973  
Softcover reprint of the hardcover 10th edition 1973

Library of Congress Catalog Card Number 73-75693

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buch berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften

## **Vorwort zur zehnten Auflage**

In der vorliegenden 10. Auflage des Buches wurde das Ziel weiter verfolgt, eine Einführung in diejenigen elektrotechnischen Grundlagen zu geben, die möglichst vielen Anwendungen gemeinsam sind; die Auswahl des Stoffes und die Beispiele sollen das Verständnis für das Studium von Spezialgebieten erleichtern. Gegenüber der 9. Auflage sind in drei neuen Abschnitten (Halbleiterdioden, Transistoren, lineare Verstärker) wesentliche Erweiterungen aufgenommen worden. Eine Reihe von kleineren Ergänzungen (z. B. die internationalen Einheitendefinitionen, Leitungsmechanismen, Photodioden, Netzsynthese) berücksichtigt neuere Entwicklungen. Dabei wurde, soweit möglich, das Prinzip beibehalten, daß die Darstellung von Leichterem zu Schwierigerem fortschreitet.

Dem Verlag danke ich für das Eingehen auf meine Wünsche; ganz besonders möchte ich Herrn Dipl.-Ing. ULRICH KLUGE danken für die freundliche Durchsicht des Manuskripts und für Anregungen zu einer verbesserten Einteilung des Stoffes.

Darmstadt, im Februar 1973

**K. Küpfmüller**

# Inhaltsverzeichnis

<b>Einleitung</b> . . . . .	<b>1</b>
-----------------------------	----------

## Erstes Kapitel

### Der elektrische Strom

I. Einheiten und Größengleichungen . . . . .	6
1. Einheitendefinitionen . . . . .	6
Basiseinheiten und abgeleitete Einheiten 6 — Die fünf Basiseinheiten der mechanischen, elektrischen und thermischen Größen 6 — Abgeleitete Einheiten 7	
2. Größengleichungen . . . . .	9
Giorgi-System, Internationales Einheitensystem 10	
II. Elektrische Netze bei Gleichstrom . . . . .	11
3. Grundgesetze für Strom und Spannung in Gleichstromnetzen . . . . .	11
Das Ohmsche Gesetz 13 — Der erste Kirchhoffsche Satz 16 — Der zweite Kirchhoffsche Satz 17 — Anwendungsbeispiele 19 — Nichtlineare Leiter 21	
4. Hilfssätze für die Berechnung linearer Netze. . . . .	22
Der Überlagerungssatz 22 — Der Satz von der Zweipolquelle 23 — Die Netzwandlung 26	
III. Das Strömungsfeld . . . . .	30
5. Grundbegriffe des räumlichen Strömungsfeldes. . . . .	30
6. Die Grundgesetze des stationären Strömungsfeldes. . . . .	37
Das Ohmsche Gesetz im Strömungsfeld 37 — Der erste Kirchhoffsche Satz im Strömungsfeld 38 — Der zweite Kirchhoffsche Satz im Strömungsfeld 39 — Das Joulesche Gesetz im Strömungsfeld 40 — Grenzbedingungen im Strömungsfeld 40	
7. Beispiele von Strömungsfeldern . . . . .	41
Punktquelle 41 — Spiegelung 46 — Linienquelle 47	
IV. Stromleitung in festen Körpern und Flüssigkeiten . . . . .	50
8. Leitungsmechanismen . . . . .	50
Atomstruktur der Leiter 50 — Metallische Leiter 51 — Ionenleiter 55 — Halbleiter 56 — Eigenleitung 57 — Störstellenleitung 58 — Schwingungserscheinungen 61 — Wesen der Stromquellen; Quellenspannung 61	

## Zweites Kapitel

## Das elektrische Feld

I. Das stationäre elektrische Feld. . . . .	63
9. Grundbegriffe des elektrischen Feldes . . . . .	63
Die Feldgrößen 63 — Grundgesetze des elektrostatischen Feldes 64 — Das allgemeine stationäre elektrische Feld 69 — Verhältnisse an Grenzflächen 69 — Influenzwirkung 70	
10. Kondensatoren . . . . .	72
Kapazität 72 — Zusammenhang zwischen Kapazität und Widerstand 74 — Parallelschaltung und Reihenschaltung 76	
11. Beispiele elektrostatischer Felder . . . . .	77
Felder von Punktladungen 77 — Felder von Linienladungen 85 — Ebene Felder 87	
12. Mehrleitersysteme. . . . .	97
Definition und Messung der Teilkapazitäten 97 — Form des elektrischen Feldes 99 — Berechnung der Teilkapazitäten 100	
13. Mechanische Kräfte im elektrischen Feld. Die Energie des elektrischen Feldes. . . . .	106
Kräfte an Leiteroberflächen 106 — Mechanische Spannungen im elektrischen Feld 107 — Kräfte an Grenzflächen zwischen Nichtleitern 108 — Berechnung der Feldkräfte aus der Kapazität. Energie des elektrischen Feldes 110 — Einwirkung elektrischer Felder auf Elektronenbahnen; Elektronenoptik 113	
14. Das elektrische Feld als Potentialfeld. . . . .	118
Die Potentialgleichung 118 — Graphische Methoden zur Ermittlung der Potentialverteilung in elektrostatischen Feldern 122	
15. Beispiele elektrostatischer Felder als Lösungen der Potentialgleichung . . . . .	124
Eindimensionales Feld 124 — Zweidimensionales Feld 124 — Dreidimensionales Feld 136	
II. Das langsam veränderliche elektrische Feld. . . . .	138
16. Der Verschiebungsstrom . . . . .	138
Verschiebungsstrom und Leitungsstrom 138 — Der zeitliche Vorgang des Aufbaues und Abbaues elektrischer Felder 140 — Nachwirkung im Dielektrikum 144	
17. Der Wechselstromkreis mit Kapazität. Komplexe Wechselstromrechnung. . . . .	147
Grundbegriffe 147 — Das Zeigerdiagramm 149 — Komplexe Wechselstromrechnung 149 — Dielektrische Verluste 152 — Messung von Kapazität und Ableitung 154	
III. Grundlagen der elektronischen Bauelemente . . . . .	157
18. Elektronenröhren . . . . .	157
Raumladungsgleichung 157 — Elektronenemission 160 — Thermische Elektronenemission 162 — Photoemission 162 — Elektronenröhren 164 — Hochvakuumdiode 167 — Hochvakuumtriode 168 — Raumladungen in leitenden Stoffen 169	
19. Halbleiterdioden . . . . .	170
Diffusionsspannung 170 — Gleichrichterwirkung 173 — Der Sperrstrom 176 — Halbleiterdioden 178 — Schaltverhalten der Halbleiterdioden 180 — Energiebänder-Modell der elektrischen Leitung 181 — Halbleiterphotodioden 183	
20. Transistoren . . . . .	185
Längsfeldtransistoren 185 — Feldeffekt-Transistoren 191 — Sperrschicht-Querfeldtransistoren 192 — Querfeldtransistor (MOSFET) 194	

IV. Stromleitung in Gasen und Durchschlag. . . . .	196
21. Gasentladungen. . . . .	196
Grundbegriffe 196 — Stoßionisierung 200 — Elektronenauslösung an der Kathode 204 — Anfangsspannung, Durchschlag in Gasen 206 — Koronaentladung 207 — Kurzzeitige Gasentladungen 208 — Glimmentladung 209 — Bogenentladung 212 — Thyratron 215 — Bogenentladung an Kontakten 216 — Die Kapazität bei Feldern mit Raumladungen 216	
22. Der Durchschlag von Isolierstoffen. . . . .	217

### Drittes Kapitel

#### Das magnetische Feld

I. Das stationäre magnetische Feld . . . . .	222
23. Grundbegriffe und Grundgesetze des magnetischen Feldes. . . . .	222
Mechanische Kraftwirkung 222 — Elektrische Induktionswirkung 227 — Hall-Effekt 229 — Allgemeine Form des Induktionsgesetzes 230 — Durchflutungsgesetz 238 — Magnetischer Dipol 240	
24. Magnetische Stoffeigenschaften . . . . .	241
Diamagnetismus und Paramagnetismus 241 — Messung der Permeabilität 243 — Ferromagnetismus 244 — Magnetische Werkstoffe 249 — Magnetische Anisotropie 252	
25. Der magnetische Kreis, Elektromagnete, Dauermagnete . . . . .	253
Angenäherte Berechnung von Elektromagneten 254 — Scherung 258 — Berechnung von Dauermagneten 258 — Theorie der Kompaßnadel 262	
26. Berechnungsverfahren für magnetische Felder. . . . .	263
Skalares magnetisches Potential 263 — Vektorpotential 268 — Anhang: Vektorielles Laplace-Operator 273	
27. Beispiele magnetischer Felder. . . . .	274
Anwendung der Ampèreschen Formel und des Vektorpotentials 274 — Anwendung des magnetischen Potentials 277	
28. Selbstinduktion, Gegeninduktion . . . . .	280
Definition der Induktivität und Beispiele 280 — Der zeitliche Aufbau des magnetischen Feldes 284 — Magnetische Feldenergie 286 — Gegeninduktion, Gegeninduktivität 290	
29. Mechanische Kräfte im magnetischen Feld . . . . .	293
Kräfte zwischen Stromleitern 293 — Kräfte zwischen Stromleitern und magnetischen Stoffen 296 — Kräfte an Grenzflächen 296	
30. Gegenüberstellung der Grundgesetze der stationären Felder. . . . .	299
II. Das langsam veränderliche magnetische Feld. . . . .	301
31. Der Wechselstromkreis mit Induktivität . . . . .	301
32. Wirbelströme. . . . .	304
Stromverdrängung im zylindrischen Leiter 304 — Ebene Wirbelstromfelder 308 — Einseitige Stromverdrängung in Ankerleitern und Spulen 311 — Wirbelströme in Eisenblechkernen 314 — Abschirmung von Hochfrequenzfeldern 317 — Triebströme eines Motorzählers 318	
33. Ummagnetisierungsverluste bei ferromagnetischen Werkstoffen . . . . .	319
III. Anwendungen . . . . .	324
34. Der Transformator . . . . .	324
Allgemeine Beziehungen 324 — Streuungs-Ersatzbild 326 — Die Streuung 327 — Der lineare Übertrager 329 — Kopplungs-Ersatzbilder des linearen Übertragers 331	
35. Elektro-mechanische Energiewandlung. . . . .	332
Allgemeines 332 — Die Grundgleichungen der elektrischen Maschinen 333 — Die Gleichstrommaschine 334 — Die Synchronmaschine 337 — Die Asynchronmaschine 341 — Lineare elektrisch-mechanische Systeme 345	

Viertes Kapitel

**Netzwerke**

36. Theorie der Netze bei Wechselstrom . . . . . 349  
 Allgemeine Regeln bei Sinusgrößen und linearen Netzen 349 — Beispiele 354 —  
 Formelzeichen für komplexe Größen 362 — Ortskurven 362 — Dreiphasennetze  
 366 — Allgemeine Wechselströme und -spannungen 370 — Nichtlineare Strom-  
 kreiselemente 372 — Schwingkennlinien 374 — Oberschwingungen in Dreiphasen-  
 systemen 375 — Modulierte Sinusschwingungen 376

37. Allgemeine Netztheorie . . . . . 378  
 Die Maschengleichungen 378 — Die Knotengleichungen 381 — Allgemeine Eigen-  
 schaften der Netzfunktionen 382 — Reaktanzzweipole 387 — Vierpole, Zwei-  
 tore 389 — Gyrtator 395

38. Lineare Verstärker . . . . . 397  
 Allgemeine lineare Verstärkerelemente 397 — Wechselstromersatzbilder des  
 Verstärkerdreipols 398 — Vierpolgleichungen des Verstärkerelementes 402

Fünftes Kapitel

**Leitungen und Kettenleiter**

39. Allgemeine Theorie der Leitungen . . . . . 404  
 Die Leitungsgleichungen 404 — Übertragungskonstante und Wellenwiderstand.  
 Berechnung von Leitungen 410 — Reflexionsfaktor 417 — Leerlauf und Kurz-  
 schluß 419

40. Spezialfälle und Näherungsformeln der Leitungstheorie. . . . . 421  
 Kurze Leitungen 421 — Lange Leitungen 424 — Abschlußwiderstand angenähert  
 gleich dem Wellenwiderstand 425 — Ersatzbilder 426 — Hochfrequenzleitun-  
 gen 428 —  $\lambda/4$ - und  $\lambda/2$ -Leitungen 429 — Exponentialleitung 431

41. Die Leistungsverhältnisse bei Leitungen . . . . . 433

42. Kettenleiter. Siebketten . . . . . 437  
 Wellenparameter 437 — Reaktanzvierpole 438 — Siebketten 440 — Allgemeine  
 Grundvierpole 444 — Erdseil einer Hochspannungsleitung 446

Sechstes Kapitel

**Das rasch veränderliche elektromagnetische Feld**

43. Grundgleichungen der elektromagnetischen Vorgänge . . . . . 448  
 Maxwellsche Feldgleichungen 448 — Bewegte Leiter 454 — Bewegte nichtleitende  
 Körper 456 — Weitere Bewegungseffekte 456 — Bemerkungen 456

44. Elektromagnetische Wellen. . . . . 458  
 Elementarform der elektromagnetischen Welle 458 — Nahfeld der schwingenden  
 Ladung 462 — Fernfeld der schwingenden Ladung 462 — Energiefluß in der Ele-  
 mentarwelle. Strahlungswiderstand 463 — Strahlungsdichte 466 — Ebene Welle  
 468 — Empfangsantennen 474 — Elektromagnetische Schirme 475

45. Hohlleiter und Hohlresonatoren. . . . . 477

## Siebentes Kapitel

**Allgemeine Vorgänge in linearen Systemen**

46. Allgemeine Gesetze der Ausgleichsvorgänge in linearen Systemen. . . . . 486  
 Schalten einer Gleichspannung 487 — Schalten einer Wechselfpannung 492 —  
 Übergangsfunktion. Beliebig veränderliche Spannung 493
47. Zeitfunktion und Spektrum. . . . . 497  
 Fourier-Reihen 497 — Das Fourier-Integral 499 — Die Fourier-Transformation  
 502 — Die Laplace-Transformation 503 — Einige Hilfssätze für die Berechnung  
 von Ausgleichsvorgängen 506 — Der Zusammenhang zwischen den Frequenz-  
 charakteristiken und den Ausgleichsvorgängen. Systemtheorie 510
48. Ausgleichsvorgänge in Leitungen . . . . . 513  
 Die Wellengleichung 513 — Wanderwellen 515 — Reflexion und Brechung 516 —  
 Wellenersatzbild 520
49. Systeme mit Rückkopplung. Stabilität. . . . . 522  
 Allgemeine Stabilitätsbedingungen 522 — Negativer Widerstand 523 — Die beiden  
 Typen von negativen Widerständen 525 — Rückkopplung 527 — Ortskurven-  
 kriterium 529 — Schwingungserzeugung 532 — Netzsynthese mit aktiven Elementen  
 534
50. Unregelmäßige Ströme. . . . . 535  
 Wärmerauschen 535 — Effektivwert unregelmäßiger Ströme 539

## Achstes Kapitel

**Systeme mit nichtlinearen Elementen**

51. Ausgleichsvorgänge in nichtlinearen Systemen. . . . . 542  
 Lichtbogen beim Öffnen eines Stromkreises 542 — Gleichstromschaltvorgänge in  
 nichtlinearen induktiven Kreisen 543 — Speicherkerne 546 — Wechselstromvor-  
 gänge in nichtlinearen induktiven Kreisen 548
52. Gesteuerte magnetische Elemente . . . . . 551  
 Sättigungsrossel 551 — Magnetische Verstärker 552
53. Parametrische Verstärker . . . . . 561
54. Gleichrichter . . . . . 565  
 Leistungsgleichrichter 565 — Meßgleichrichter 572
- Anhang** Einheitensysteme. Wichtige Konstanten . . . . . 576
- Literatur** . . . . . 577
- Sachverzeichnis** . . . . . 581