

Moeller/Fricke/Frohne/Vaske

Grundlagen der Elektrotechnik

Bearbeitet von

Professor Dr.-Ing. Hans Fricke
Technische Universität Braunschweig

Professor Dr.-Ing. Heinrich Frohne
Technische Universität Hannover

Professor Dr.-Ing. Paul Vasket

17., neubearbeitete Auflage
Mit 417 teils mehrfarbigen Abbildungen,
27 Tafeln und 251 Beispielen



B.G.Teubner Stuttgart 1986

Inhalt

1 Grundgesetze des Gleichstromkreises (Paul Vaske)

1.1	Grundbegriffe	1
1.1.1	Mechanismus der elektrischen Strömung	1
1.1.1.1	Stromkreis. 1.1.1.2 Wesen der elektrischen Strömung. 1.1.1.3 Leiter und Nichtleiter. 1.1.1.4 Wirkungen des Stromes	
1.1.2	Größe der elektrischen Strömung	5
1.1.2.1	Elektrizitätsmenge, Stromstärke, Stromdichte. 1.1.2.2 Einheiten und Maßsystem. 1.1.2.3 Schreibweise der Gleichungen. 1.1.2.4 Stromarten. 1.1.2.5 Messung der Stromstärke	
1.1.3	Elektrische Spannung	9
1.1.3.1	Ursache der Elektronenbewegung. 1.1.3.2 Eigenschaften der Spannung	
1.2	Strömungsgesetze im einfachen Stromkreis	11
1.2.1	Ohmsches Gesetz	11
1.2.1.1	Stromstärke. 1.2.1.2 Leitwert und Widerstand. 1.2.1.3 Einheiten. 1.2.1.4 Anwendungen	
1.2.2	Elektrischer Widerstand	14
1.2.2.1	Spezifischer Widerstand und Leitfähigkeit. 1.2.2.2 Lineare und nicht-lineare Widerstände. 1.2.2.3 Temperatureinfluß. 1.2.2.4 Weitere Einflüsse	
1.3	Kirchhoffsche Gesetze	21
1.3.1	Begriffe	21
1.3.1.1	Zweipol und Zweitor. 1.3.1.2 Kenngrößen elektrischer Netzwerke. 1.3.1.3 Zählrichtungen. 1.3.1.4 Zählpeilsysteme	
1.3.2	Erstes Kirchhoffsches Gesetz	25
1.3.2.1	Ladungserhaltungssatz. 1.3.2.2 Knotenpunktsatz	
1.3.3	Zweites Kirchhoffsches Gesetz	26
1.3.3.1	Spannungsgleichgewicht. 1.3.3.2 Maschensatz	
1.4	Zusammenwirken von Quelle und Verbraucher	28
1.4.1	Eigenschaften von Quellen	28
1.4.1.1	Spannungsquelle. 1.4.1.2 Stromquelle. 1.4.1.3 Vergleich	
1.4.2	Kennlinienfelder	33
1.4.2.1	Verbraucherkennlinie. 1.4.2.2 Arbeitspunkt. 1.4.2.3 Einfluß der Kenngrößen. 1.4.2.4 Nichtlineare Quellen und Verbraucher	

VI Inhalt

15	Einfache Reihen- und Parallelschaltungen	38
1.5.1	Reihenschaltungen	38
1.5.1.1	Gesamtwiderstand von in Reihe geschalteten Widerständen. 1.5.1.2 Ersatzschaltung und Teilspannungen. 1.5.1.3 Spannungsteilerregel	
1.5.2	Parallelschaltungen	43
1.5.2.1	Gesamtleitwert von parallel geschalteten Leitwerten. 1.5.2.2 Ersatz- schaltung und Teilströme. 1.5.2.3 Stromteilerregel	
1.5.3	Duale Zusammenhänge.	47
1.5.4	Zusammengesetzte Schaltungen.	48
1.5.4.1	Einfache Widerstandsnetzwerke. 1.5.4.2 Annahme des Ergebnisses. 1.5.4.3 Schaltungen der Meßtechnik	
1.6	Berechnungsverfahren für Netzwerke	54
1.6.1	Netzumformung	54
1.6.1.1	Notwendige Voraussetzungen. 1.6.1.2 Regeln. 1.6.1.3 Vereinfachung der Schaltung. 1.6.1.4 Stern-Dreieck-Umwandlung	
1.6.2	Unmittelbare Anwendung der Kirchhoffschen Gesetze.	60
1.6.2.1	Topologie. 1.6.2.2 Regeln	
1.6.3	Überlagerungsgesetz	65
1.6.4	Ersatzquellen	68
1.6.4.1	Ersatz-Spannungsquelle. 1.6.4.2 Ersatz-Stromquelle	
1.6.5	Maschenstrom-Verfahren	72
1.6.5.1	Vorgehen. 1.6.5.2 Aufstellen der Matrixgleichung	
1.6.6	Knotenpunktpotential-Verfahren.	75
1.6.6.1	Vorgehen. 1.6.6.2 Aufstellen der Matrixgleichung	
1.6.7	Vergleich der Berechnungsverfahren	79

2 Energie der elektrischen Strömung (Paul Vaske)

2.1	Erzeugung elektrischer Energie.	83
2.1.1	Arbeit und Leistung.	83
2.1.1.1	Arbeitsvermögen der Spannung. 2.1.1.2 Leistung. 2.1.1.3 Verluste und Wirkungsgrad	
2.1.2	Elektrische Energiequellen.	86
2.1.2.1	Elektrodynamische Generatoren. 2.1.2.2 Elektrochemische Quellen. 2.1.2.3 Weitere Energie-Direktumwandlungs-Quellen	
2.2	Nutzung elektrischer Energie.	88
2.2.1	Übertragung von Energie und Signalen.	88
2.2.1.1	Energieversorgung. 2.2.1.2 Energieübertragung. 2.2.1.3 Übertragung von Nachrichten	
2.2.2	Umwandlung elektrischer Energie.	93
2.2.2.1	Gleichwertige Energiearten. 2.2.2.2 Joulesche Stromwärme	
2.2.3	Leistungsanpassung.	97
2.2.3.1	Anpassungsbedingung. 2.2.3.2 Wirkungsgrad. 2.2.3.3 Ausnutzungs- grad	

3 Elektrisches Potentialfeld (Heinrich Fröhne)

3.1	Elektrisches Feld in Leitern	103
3.1.1	Wesen und Darstellung des elektrischen Strömungsfeldes	103
3.1.2	Stromdichte und Strom	105
3.1.3	Elektrische Feldstärke und Spannung	109
3.1.4	Elektrisches Potential	113
3.1.5	Leistungsdichte im elektrischen Strömungsfeld	117
3.2	Elektrisches Feld in Nichtleitern	118
3.2.1	Wesen und Darstellung des elektrischen Feldes in Nichtleitern	119
3.2.2	Elektrische Feldstärke und Spannung	120
3.2.3	Elektrisches Potential	123
3.2.4	Elektrische Flußdichte und elektrischer Fluß	124
3.2.5	Zusammenhang zwischen elektrischer Flußdichte und elektrischer Feldstärke	129
	3.2.5.1 Permittivität. 3.2.5.2 Kapazität. 3.2.5.3 Schaltung von Kondensatoren.	
	3.2.5.4 Verlustleistung im elektrischen Feld	
3.2.6	Energie und Kräfte im elektrischen Feld	138
	3.2.6.1 Gespeicherte Energie im elektrischen Feld. 3.2.6.2 Kräfte auf Grenzflächen im elektrischen Feld	

4 Magnetisches Feld (Heinrich Fröhne)

4.1	Beschreibung und Berechnung des magnetischen Feldes	143
4.1.1	Wesen und Darstellung des magnetischen Feldes	143
	4.1.1.1 Wirkungen und Ursachen des magnetischen Feldes. 4.1.1.2 Feldbilder und Feldlinien. 4.1.1.3 Feldrichtung und Polarität	
4.1.2	Vektorielle Feldgrößen des magnetischen Feldes	146
	4.1.2.1 Induktion (Intensität des magnetischen Feldes). 4.1.2.2 Durchflutung, Zusammenhang zwischen Feldgrößen und erregendem Strom. 4.1.2.3 Magnetische Feldstärke (magnetische Erregung). 4.1.2.4 Einheiten der magnetischen Feldgrößen	
4.1.3	Integrale Größen des magnetischen Feldes	153
	4.1.3.1 Magnetische Spannung. 4.1.3.2 Durchflutungssatz. 4.1.3.3 Magnetischer Fluß. 4.1.3.4 Ohmsches Gesetz des magnetischen Kreises	
4.1.4	Überlagerung magnetischer Felder	168
4.1.5	Magnetisches Feld in Materie	170
	4.1.5.1 Typisches Verhalten der Materie im Magnetfeld. 4.1.5.2 Brechung magnetischer Feldlinien	
4.2	Magnetisches Feld in Eisen	173
4.2.1	Ferromagnetische Eigenschaften	173
	4.2.1.1 Hystereseschleife. 4.2.1.2 Magnetisierungskurve. 4.2.1.3 Permeabilität und Suszeptibilität. 4.2.1.4 Dauermagnete	
4.2.2	Berechnung des magnetischen Feldes im Eisenkreis	180
	4.2.2.1 Magnetische Streuung und Randverzerrung. 4.2.2.2 Ermittlung der Durchflutung	

VIII Inhalt

4.3 Wirkungen im magnetischen Feld *	186
4.3.1 Spannungserzeugung im magnetischen Feld, elektrisches Wirbelfeld	187
4.3.1.1 Induktionswirkung im bewegten Leiter. 4.3.1.2 Induktionswirkung im zeitlich veränderlichen Magnetfeld. 4.3.1.3 Induktionsgesetz in allgemeiner Form. 4.3.1.4 Selbstinduktionsspannung. 4.3.1.5 Selbst- und Gegeninduktivität. 4.3.1.6 Selbst- und Gegeninduktionsspannung im Verbraucherzählpeilsystem. 4.3.1.7 Wirbelströme	
4.3.2 Energie und Kräfte im magnetischen Feld.	208
4.3.2.1 Energie des magnetischen Feldes. 4.3.2.2 Kraftwirkung auf Grenzflächen. 4.3.2.3 Kraftwirkung auf stromdurchflossene Leiter im Magnetfeld. 4.3.2.4 Kraftwirkung zwischen stromdurchflossenen Leitern	
4.4 Vergleich elektrischer und magnetischer Felder.	220

Elektrischer Leitungsmechanismus (Hans Fr ick e)

5.1 Leitung in metallischen Körpern	223
5.1.1 Vereinfachte Darstellung.	223
5.1.2 Bändermodell.	223
5.1.2.1 Energiewerte des Atoms. 5.1.2.2 Energiewerte mehrerer gleichartiger Atome in Festkörpern	
5.1.3 Leitungsmechanismus, Leitfähigkeit	226
5.2 Halbleitung	228
5.2.1 Kennzeichen der Halbleiter.	228
5.2.2 Leitungsmechanismus.	229
5.2.2.1 Bändermodell. 5.2.2.2 Eigenleitung. 5.2.2.3 Störstellenleitfähigkeit	
5.2.3 Übergang zwischen zwei Halbleiterzonen verschiedenen Leitungstyps	237
5.2.3.1 PN-Übergang. 5.2.3.2 Spannung in Sperrichtung. 5.2.3.3 Spannung in Durchlafrichtung. 5.2.3.4 Kennlinie des PN-Übergangs (Diode, Gleichrichter). 5.2.3.5 Hochdotierter PN-Übergang (Tunneldiode). 5.2.3.6 Übergang zwischen Halbleiter und metallischem Leiter	
5.2.4 Kombination von mehreren Halbleiterzonen unterschiedlicher Dotierung . .	248
5.2.4.1 Backward-Diode. 5.2.4.2 Hot-carrier-Diode. 5.2.4.3 Step-recovery-Diode. 5.2.4.4 PIN-Diode. 5.2.4.5 Impatt-Diode. 5.2.4.6 Gunn-Diode	
5.2.5 Gesteuerter PN-Übergang	253
5.2.5.1 Bipolartransistor. 5.2.5.2 Thyristor	
5.2.6 Feldeffekttransistor.	261
5.2.6.1 Sperrschicht-Feldeffekttransistor PN-FET. 5.2.6.2 Isolierschicht-Feldeffekttransistor IG-FET (MOS-FET). 5.2.6.3 Dünnschicht-Feldeffekttransistor TF-FET. 5.2.6.4 Grundschaltungen von Feldeffekttransistoren	
5.2.7 Optoelektronische Halbleiterbauelemente.	267
5.2.7.1 Lichtdetektor (Lichtempfänger). 5.2.7.2 Lichtemitter (Lichtsender). 5.2.7.3 Opto-elektronischer Koppler	
5.2.8 Galvanomagnetische Halbleiterbauelemente.	270
5.2.8.1 Hall-Generator. 5.2.8.2 Feldplatte	
5.2.9 Integrierte Schaltungen	272
5.2.9.1 Ziel der Integration. 5.2.9.2 Bipolar-Technik (TTL, ECL, I ² L). 5.2.9.3 MOS-Technik (CMOS)	

5.3 Elektrische Strömung in Elektrolyten	274
5.3.1 Elektrochemische Vorgänge.	274
5.3.1.1 Mechanismus der elektrolytischen Leitung. 5.3.1.2 Polarisierung und Spannungsbedarf	
5.3.2 Elektrochemische Stromerzeuger.	279
5.3.2.1 Elektrolytische Spannung galvanischer Zellen. 5.3.2.2 Primärzellen. 5.3.2.3 Sekundärzellen	
5.4 Elektrische Leitung im Vakuum	283
5.4.1 Bewegung der Elektronen.	284
5.4.1.1 Bewegungsgleichungen. 5.4.1.2 Elektronen-Geschwindigkeit. 5.4.1.3 Ablenkung durch ein elektrisches Feld. 5.4.1.4 Ablenkung durch ein magnetisches Feld	
5.4.2 Emission aus der Kathode.	288
5.4.3 Anwendungen.	289
5.4.3.1 Elektronenstrahl-Röhren. 5.4.3.2 Elektronenröhren. 5.4.3.3 Elektronenröhren mit Gitter. 5.4.3.4 Röntgenröhren	
5.5 Elektrische Leitung in Gasen	292
5.5.1 Erzeugung von Ladungsträgern durch Ionisierung von Gasen.	292
5.5.2 Umwandlung und Verschwinden von Ladungsträgern	293
5.5.3 Entladungsformen.	294
5.5.3.1 Unselbständige Entladung. 5.5.3.2 Selbständige Entladung. 5.5.3.3 Erscheinungsformen der Gasentladungen	
5.5.4 Elektrische Festigkeit	296
5.5.5 Gasentladungslampen	297

6 Einfacher Sinusstromkreis (Paul Vaske)

6.1 Eigenschaften von Sinusgrößen.	298
6.1.1 Erzeugung von Sinusspannungen	299
6.1.1.1 Anwendung des Induktionsgesetzes. 6.1.1.2 Phasenlage. 6.1.1.3 Periodendauer und Frequenz	
6.1.2 Kennwerte von Wechselstromgrößen.	304
6.1.2.1 Mittelwerte. 6.1.2.2 Messung der Kennwerte	
6.1.3 Zeigerdiagramm.	308
6.1.3.1 Zeiger. 6.1.3.2 Zählpfeile. 6.1.3.3 Addition und Subtraktion von Sinusgrößen	
6.2 Passive Zweipole bei Sinusstrom	316
6.2.1 Wirkwiderstand	316
6.2.1.1 Spannung, Strom und Phasenwinkel. 6.2.1.2 Wirkleistung	
6.2.2 Induktivität.	319
6.2.2.1 Spannung, Strom und Phasenwinkel. 6.2.2.2 Induktiver Blindwiderstand. 6.2.2.3 Induktive Blindleistung	
6.2.3 Kapazität	322
6.2.3.1 Spannung, Strom und Phasenwinkel. 6.2.3.2 Kapazitiver Blindwiderstand. 6.2.3.3 Kapazitive Blindleistung	

X Inhalt

6.2.4 Allgemeiner passiver Sinusstrom-Zweipol	325
6.2.4.1 Spannung, Strom und Phasenwinkel. 6.2.4.2 Leistungen. 6.2.4.3 Zusammenhängende Betrachtung der Eigenschaften von passiven Sinusstrom-Zweipolen	
6.3 Komplexe Rechnung	330
6.3.1 Begriffe und Rechenregeln	330
6.3.1.1 Darstellung komplexer Zahlen. 6.3.1.2 Rechenregeln für komplexe Zahlen. 6.3.1.3 Komplexe Gleichungssysteme	
6.3.2 Komplexe Größen der Sinusstromtechnik	336
6.3.2.1 Komplexe Drehzeiger. 6.3.2.2 Komplexe Festzeiger. 6.3.2.3 Bezugsgröße. 6.3.2.4 Symbolische Methode. 6.3.2.5 Allgemeiner Sinusstromkreis. 6.3.2.6 Komplexe Widerstands- und Leitwertsebenen	
7 Sinusstrom-Netzwerke (Paul Vaske)	
7.1 Einfache Reihen- und Parallelschaltungen.	344
7.1.1 Reihenschaltung	344
7.1.1.1 Komplexer Maschensatz. 7.1.1.2 Reihenschaltung von zwei Grundzweipolen. 7.1.1.3 Allgemeine Reihenschaltung	
7.1.2 Parallelschaltung	352
7.1.2.1 Komplexer Knotenpunktsatz. 7.1.2.2 Parallelschaltung von zwei Grundzweipolen. 7.1.2.3 Allgemeine Parallelschaltung	
7.2 Netzumformung	359
7.2.1 Ersatzschaltungen	360
7.2.1.1 Reihen-Ersatzschaltung. 7.2.1.2 Parallel-Ersatzschaltung. 7.2.1.3 Bedingt gleichwertige Schaltungen. 7.2.1.4 Komplexe Stern-Dreieck-Umwandlung	
7.2.2 Magnetische Kopplung	371
7.2.2.1 Idealer Übertrager. 7.2.2.2 Ersatzschaltung für gekoppelte Spulen	
7.2.3 Ersatzquellen	378
7.2.4 Leistungsanpassung.	381
7.2.4.1 Zusammenwirken von Sinusstrom-Quellen und -Zweipolen. 7.2.4.2 Anpassungsbedingungen	
7.3 Sinusstrom-Netzwerke	385
7.3.1 Gemischte Schaltungen	385
7.3.1.1 Komplexe Spannungs- und Stromteilerregel. 7.3.1.2 Anwendung des Zeigerdiagramms. 7.3.1.3 Anwendung der komplexen Rechnung	
7.3.2 Lineare Maschennetze	396
7.3.2.1 Überlagerungsgesetz. 7.3.2.2 Anwendung der Kirchhoffschen Gesetze. 7.3.2.3 Maschenstrom-Verfahren. 7.3.2.4 Knotenpunktpotential-Verfahren	
7.3.3 Anwendungen.	405
7.3.3.1 Wechselstrombrücken. 7.3.3.2 Blindstromkompensation	

8 Ortskurven und Schwingkreise (Heinrich Frohne)

%

- 8.1 Ortskurven 410
 - 8.1.1 Erläuterung und Konstruktion von Ortskurven 410
 - 8.1.1.1 Ortskurven für Spannung und Widerstand. 8.1.1.2 Ortskurven für Strom und Leitwert
 - 8.1.2 Inversion komplexer Größen und Ortskurven. 416
 - 8.1.3 Amplituden- und Phasenwinkeldiagramme. 418
- 8.2 Schwingkreise 420
 - 8.2.1 Freie Schwingungen. 421
 - 8.2.2 Erzwungene Schwingungen. 422
 - 8.2.2.1 Reihenschwingkreise. 8.2.2.2 Parallelschwingkreise. 8.2.2.3 Vergleich von Reihen- und Parallelschwingkreisen
 - 8.2.3 Kenngrößen für Schwingkreise. 431
 - 8.2.4 Schwingkreise mit mehreren Freiheitsgraden. 434

9 Mehrphasen-Sinusstrom (Paul Vaske)

- 9.1 Mehrphasensysteme 436
 - 9.1.1 Begriffe. 436
 - 9.1.1.1 Dreiphasengenerator. 9.1.1.2 Sternschaltung. 9.1.1.3 Dreieckschaltung. 9.1.1.4 Benennungen
 - 9.1.2 Symmetrische Mehrphasensysteme. 439
 - 9.1.2.1 Phasenzahl. 9.1.2.2 Schaltungen
- 9.2 Symmetrisches Dreiphasensystem 440
 - 9.2.1 Spannungen und Ströme. 441
 - 9.2.1.1 Sternschaltung. 9.2.1.2 Dreieckschaltung
 - 9.2.2 Leistung und Drehfeld. 444
 - 9.2.2.1 Leistungen. 9.2.2.2 Drehfelderzeugung
- 9.3 Unsymmetrische Dreiphasenbelastung 447
 - 9.3.1 Vierleiternetz 447
 - 9.3.1.1 Elektrische Energieverteilung. 9.3.1.2 Allgemeine Belastung
 - 9.3.2 Dreileiternetz 449
 - 9.3.2.1 Dreieckschaltung. 9.3.2.2 Sternschaltung

10 Wechselstrom und Mischstrom (Paul Vaske)

- 10.1 Darstellung nichtsinusförmiger Vorgänge 452
 - 10.1.1 Fourier-Reihe. 452
 - 10.1.1.1 Zeitfunktion. 10.1.1.2 Fourier-Analyse. 10.1.1.3 Sonderfälle
 - 10.1.2 Kenngrößen. 457
- 10.2 Nichtsinusförmige Vorgänge in linearen Netzwerken. 460
 - 10.2.1 Einfluß der Wechselstrom-Zweipole. 460
 - 10.2.2 Leistungen 463

XII Inhalt

10.3 Nichtlineare Wechselstromkreise	464
10.3.1 Nichtlineare Verzerrungen	464
10.3.2 Gleichrichterschaltungen	465
10.3.3 Eisendrossel	468
10.3.3.1 Magnetisierungsstrom. 10.3.3.2 Leistung	
11 Schaltvorgänge (Paul Vaske)	
11.1 Berechnungsverfahren	470
11.1.1 Begriffe	471
11.1.1.1 Verhalten der Energiespeicher. 11.1.1.2 Zustandsgrößen	
11.1.2 Exponentialansatz	472
11.1.2.1 Aufstellen der Differentialgleichung. 11.1.2.2 Lösung der Differentialgleichung. 11.1.2.3 Anwendung des Energiesatzes	
11.2 Netzwerke mit gleichartigen Speichern	477
11.2.1 Schalten von Gleichstrom	478
11.2.1.1 Idealisirtes Einschalten. 11.2.1.2 Idealisirtes Ausschalten. 11.2.1.3 Umschalten von Netzwerken	
11.2.2 Schalten von Sinusstrom	485
11.2.2.1 Einschalten einer Luftdrossel. 11.2.2.2 Einschalten eines RC-Gliedes. 11.2.2.3 Ausschalten	
11.3 Schwingkreise	490
11.3.1 Schalten von Gleichstrom	490
11.3.1.1 Schwingfall. 11.3.1.2 Kriechfall. 11.3.1.3 Aperiodischer Grenzfall. 11.3.1.4 Entladen	
11.3.2 Schalten von Sinusstrom	497
Anhang	
1 Ergänzende Bücher	418
2 DIN-Normen (Auswahl)	501
3 Griechisches Alphabet	502
4 Einheiten	502
5 Werkstoffigenschaften	504
6 Schaltzeichen	505
7 Formelzeichen	506
Sachverzeichnis	510

Hinweise auf DIN-Normen in diesem Werk entsprechen dem Stand der Normung bei Abschluß des Manuskriptes. Maßgebend sind die jeweils neuesten Ausgaben der Normblätter des DIN Deutschen Institut für Normung e.V. im Format A4, die durch die Beuth-Verlag GmbH, Berlin und Köln, zu beziehen sind. - Sinngemäß gilt das gleiche für alle in diesem Buche angezogenen amtlichen Richtlinien, Bestimmungen, Verordnungen usw.