

Theoretische Elektrotechnik

von Dr. K. SIMONYI

Professor für Theoretische Elektrotechnik
an der Technischen Universität Budapest

6., überarbeitete Auflage



VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften
Berlin 1977

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitende Übersicht	17
1.1.	Einleitung	19
1.2.	Der induktive Weg zu den Maxwell'schen Gleichungen	21
1.2.1.	Das Gesetz von BIOT-SAVART	21
1.2.2.	Der Begriff des Verschiebungsstromes und die I. Maxwell'sche Gleichung	24
1.2.3.	Die II. Maxwell'sche Gleichung	28
1.3.	Das vollständige System der Maxwell'schen Gleichungen	30
1.4.	Vereinfachte Formen der Maxwell'schen Gleichungen	35
1.4.1.	Die I. Maxwell'sche Gleichung	35
1.4.2.	Die II. Maxwell'sche Gleichung	37
1.4.3.	Die Größenordnung des Verschiebungsstromes	38
1.4.4.	Die übrigen Gleichungen	40
1.4.5.	Die Maxwell'schen Gleichungen bei sinusförmigem zeitlichem Verlauf	41
1.5.	Kompliziertere Formen der Maxwell'schen Gleichungen	42
1.5.1.	Die konstitutiven Relationen im allgemeinen Fall	42
1.5.2.	Anschauliche Deutung des Materialeinflusses	43
1.5.3.	Bewegte Medien	45
1.6.	Das Verhalten der Feldgrößen an der Grenzfläche von Volumenteilen mit verschiedenen Materialkonstanten	47
1.7.	Energieumwandlungen im elektromagnetischen Feld	53
1.7.1.	Allgemeine Beziehungen	53
1.7.2.	Der Poyntingsche Vektor	56
1.7.3.	Energieströmung in stationären Feldern	58
1.7.4.	Die Energiegleichung bei sinusförmigem zeitlichem Verlauf	62
1.7.5.	Einige weitere Energieumwandlungen	65
1.8.	Kraftwirkungen im elektromagnetischen Feld	68
1.9.	Die eindeutige Lösbarkeit der Maxwell'schen Gleichungen	75

1.10.	Nahwirkung — Fernwirkung	77
1.11.	Die Maßsysteme	79
1.12.	Messung von elektromagnetischen Grundgrößen	84
1.13.	Die Einteilung der Elektrodynamik	87
1.14.	Zusammenfassung der Grundbegriffe der Vektoranalysis	89
1.14.1.	Der Begriff der räumlichen Ableitung	89
1.14.2.	Der Begriff der Divergenz und der Rotation eines Vektors	92
1.14.3.	Zusammengesetzte Vektoroperationen	93
1.14.4.	Integralsätze	95
1.14.5.	Der Greensche Satz für Vektorfunktionen	96
1.15.	Die Umkehrung der Vektoroperationen	97
1.15.1.	Die Umkehrung der Gradientenbildung	97
1.15.2.	Die Umkehrung der Divergenz- und Rotationsbildung	99
1.15.3.	Das wirbelfreie Quellenfeld	102
1.15.4.	Das quellenfreie Wirbelfeld	109
1.15.5.	Das quellen- und wirbelfreie Feld in einem endlichen Raumteil	110
1.15.6.	Bestimmung des in einem endlichen Volumen definierten Vektorfeldes aus seinen Quellen und Wirbeln	114
2.	Statische und stationäre Felder	119
A.	Bestimmung des elektrischen Feldes aus einer gegebenen Ladungsverteilung	121
2.1.	Bestimmung des Feldes aus der räumlichen Ladungsdichte	121
2.2.	Multipole	124
2.2.1.	Der Dipol	124
2.2.2.	Axiale Multipole	126
2.2.3.	Allgemeine Multipole	133
2.3.	Bestimmung des Potentials der Flächenladungen und Doppelschichten	139
2.4.	Anschauliche Erklärung der sprunghaften Änderung des Potentials und der Feldstärke	145
2.5.	Ersatz der Raumladungen durch eine Flächenladung tragende geschlossene Fläche und durch Doppelschichten	148
2.6.	Praktische Bedeutung der bisherigen Ergebnisse	153
B.	Bestimmung des Feldes aus gegebenen Randwerten in den einfachsten räumlichen Fällen	154
2.7.	Fragen der praktischen Elektrostatik	154
2.8.	Die Grundbegriffe der Vektoranalysis und die Maxwellschen Gleichungen im orthogonalem krummlinigen Koordinatensystem	155
2.8.1.	Allgemeine Koordinaten, Koordinatenflächen und Koordinatenlinien. Das lokale kartesische Koordinatensystem	155
2.8.2.	Der Ausdruck für den elementaren Abstand	157
2.8.3.	Bildung des Gradienten	160
2.8.4.	Bildung der Divergenz	161

2.8.5.	Bildung der Rotation	163
2.8.6.	Der Laplacesche Ausdruck in allgemeinen orthogonalen Koordinaten	165
2.8.7.	Die Maxwellschen Gleichungen in allgemeinen orthogonalen Koordinaten	165
2.9.	Lösung der Laplaceschen Gleichung für einige einfache räumliche Probleme	166
2.9.1.	Kartesische Koordinaten	167
2.9.2.	Zylinderkoordinaten	168
2.9.3.	Kugelkoordinaten	171
2.9.4.	Konfokale Koordinaten	174
2.9.5.	Leitendes Ellipsoid im homogenen Feld	182
2.9.6.	Weitere orthogonale Koordinatensysteme	185
C.	Lösung der Randwertaufgabe in der Ebene	187
2.10.	Trennung der Variablen	187
2.11.	Lösung durch Reihenentwicklung	190
2.12.	Elementare Eigenschaften der Funktion einer komplexen Veränderlichen. Die konforme Abbildung	192
2.13.	Lösung des ebenen Problems mit Hilfe komplexer Funktionen	196
2.14.	Beispiele für die Anwendung von Funktionen einer komplexen Veränderlichen	199
2.15.	Der Fundamentalsatz der konformen Abbildung	206
2.16.	Das Feld von Elektroden mit polygonaler Grundkurve	208
2.17.	Beispiele für die Anwendung der Schwarz-Christoffelschen Abbildung	214
D.	Zylindersymmetrische Felder	218
2.18.	Berechnung des elektrostatischen Feldes zylindersymmetrischer Elektrodenanordnungen durch Trennung der Variablen	218
2.19.	Die Lösung der Besselschen Differentialgleichung. Eigenschaften der Besselschen Funktionen	221
2.19.1.	Bestimmung der Reihen der Besselschen Funktionen erster und zweiter Art	221
2.19.2.	Das Verhalten der Besselschen Funktionen bei kleinen und großen Argumenten	227
2.19.3.	Die modifizierten Besselschen Funktionen	228
2.19.4.	Beziehungen zwischen den Besselschen Funktionen verschiedener Ordnung	231
2.19.5.	Besselsche Funktionen mit Indizes in der Form $\frac{2k+1}{2}$	234
2.19.6.	Die Reihenentwicklung beliebiger Funktionen nach Besselschen Funktionen. Beweis der Orthogonalitätsrelation	236
2.20.	Beispiele für die Bestimmung zylindersymmetrischer Kraftfelder	240
2.21.	Berechnung des Potentials bei bekannter Potentialverteilung entlang der Symmetrieachse	252
2.22.	Lösung der zylindersymmetrischen Gleichung durch Reihenentwicklung	254
2.23.	Allgemeine Lösung der Laplaceschen Gleichung in Zylinderkoordinaten	258
E.	Lösung der Laplaceschen Gleichung in Kugelkoordinaten	260
2.24.	Behandlung der zylindersymmetrischen Felder mit Hilfe der Kugelfunktionen	260
2.25.	Die Eigenschaften der Legendreschen Polynome	265

2.26.	Die allgemeine Lösung der Laplaceschen Gleichung in Kugelkoordinaten . . .	270
2.27.	Eigenschaften der zugeordneten Legendreschen Funktionen	273
2.28.	Entwicklung der Funktion $1/r$ nach Kugelflächenfunktionen	276
2.29.	Reihenentwicklung mit Hilfe der Kugelflächenfunktionen	280
2.30.	Anwendung der Kugelfunktionen zur Lösung elektrostatischer Probleme . . .	283
F.	Besondere Lösungsmethoden	286
2.31.	Elektrische Spiegelung	286
2.32.	Ermittlung der zu den gegebenen Ladungsverteilungen gehörenden Äqui- potentialflächen	293
2.33.	Numerisches Näherungsverfahren in der Ebene	293
2.34.	Die Monte-Carlo-Methode	295
2.35.	Graphische Ermittlung ebener und zylindersymmetrischer Kraftfelder . . .	298
2.36.	Theorie des Gummimodells	300
2.37.	Der elektrolytische Trog	304
G.	Randwertaufgaben der mathematischen Potentialtheorie	307
2.38.	Die Greensche Funktion im Raum	307
2.39.	Die Greensche Funktion in der Ebene	310
2.40.	Die Methode der Integralgleichungen	314
H.	Verallgemeinerung des Kapazitätsbegriffes	317
2.41.	Der Begriff der Teilkapazität	317
2.42.	Die Energie des elektrostatischen Feldes	323
2.43.	Das elektrostatische Feld in Isolatoren	326
2.44.	Das statische magnetische Feld	331
2.45.	Beispiele für die Berechnung statischer elektrischer und magnetischer Felder in Anwesenheit von Stoffen	333
J.	Das magnetische Feld stationärer Ströme.	341
2.46.	Berechnung des magnetischen Feldes mit Hilfe des Vektorpotentials	341
2.47.	Die Ableitung des magnetischen Feldes aus einem zyklischen Potential . . .	344
2.48.	Einige Beispiele zur Bestimmung des Vektorpotentials	347
2.49.	Berechnung des zylindersymmetrischen magnetischen Feldes	353
2.49.1.	Das Feld einer beliebigen Spule	353
2.49.2.	Berechnung des zylindersymmetrischen Feldes mit Hilfe des Vektorpotentials	355
2.49.3.	Berechnung des Magnetfeldes einer Helmholtzschen Spule.	358
2.50.	Die Energie des magnetischen Feldes.	359
2.51.	Der Begriff der Induktionskoeffizienten.	361
2.52.	Berechnungsmethoden für Selbstinduktivität und Gegeninduktivität	363
2.53.	Die elliptischen Integrale und die elliptischen Funktionen	364
2.53.1.	Die elliptischen Integrale	365

2.53.2.	Die elliptischen Funktionen als Umkehrfunktionen der elliptischen Integrale	369
2.54.	Singularitäten im magnetischen Feld	372
2.54.1.	Singularitäten im statischen Feld	372
2.54.2.	Der Begriff der magnetischen Ströme.	376
2.55.	Das magnetische Feld stationärer Ströme in Gegenwart ferromagnetischer Substanzen	378
3.	Quasistationäre Vorgänge	383
A.	Analyse der Netzwerke	385
3.1.	Die Kirchhoffschen Gleichungen	385
3.1.1.	Gleichstrom-Netzwerke	385
3.1.2.	Netzwerke bei beliebigem zeitlichem Verlauf	389
3.1.3.	Praktische Gesichtspunkte zur Anwendung der Kirchhoffschen Sätze	392
3.1.4.	Die Methode der Maschenströme und die Methode der Knotenpunktpotentiale	394
3.1.5.	Beispiel für die Aufstellung der Grundgleichungen	397
3.1.6.	Die allgemeinen Methoden zur Lösung der Grundgleichungen	399
3.2.	Netzwerke mit einfacher Geometrie und mit einfachem zeitlichem Verlauf.	402
3.2.1.	Sinusförmige Erregung. Einfachste Kreise.	403
3.2.2.	Energieverhältnisse bei sinusförmigem zeitlichem Verlauf	405
3.2.3.	Die Methode der Knotenpunktpotentiale und der Maschenströme bei sinusförmigem zeitlichem Verlauf	407
3.2.4.	Beispiele für die Anwendung der Methoden der Knotenpunktpotentiale und der Maschenströme	409
3.2.5.	Der n -Pol	412
3.2.6.	Der $2n$ -Pol oder das n -Tor	416
3.2.7.	Das Zweitor oder der Vierpol	419
3.2.8.	Das aktive n -Tor	427
3.3.	Netzwerkanalyse für die Netzwerksynthese	430
3.3.1.	Einführung der komplexen Frequenzebene	430
3.3.2.	Pole und Nullstellen	436
3.3.3.	Die Stabilität aktiver Netzwerke.	440
3.3.4.	Nullstellen und Pole auf der $j\omega$ -Achse	440
3.3.5.	Die Eigenschaften der verlustfreien Netzwerke	442
3.3.6.	Die Immittanzfunktion als PR-Funktion	444
3.3.7.	Die Grundprobleme der Netzwerksynthese	445
3.4.	Netzwerke mit allgemeinem zeitlichem Verlauf	446
3.4.1.	Die klassische Methode	446
3.4.2.	Die Methode der Übergangsfunktion und der Gewichtsfunktion	449
3.5.	Lösung des Einschaltproblems, wenn das Frequenzspektrum der Erregungsfunktion bekannt ist	455
3.5.1.	Die Fourier-Reihe und das Fourier-Integral	455
3.5.2.	Das Fourier-Integral der Sprungfunktion $1(t)$	462
3.5.3.	Das Fourier-Integral einiger praktisch wichtiger Funktionen	466
3.5.4.	Die Fourier-Transformation	470
3.6.	Die Laplace-Transformation.	473
3.7.	Anwendung der Laplace-Transformation bei einfachen Stromkreisen	476

3.8.	Die Umkehrung der Laplace-Transformation auf elementarem Wege	482
3.8.1.	Der Verschiebungssatz	482
3.8.2.	Der Ähnlichkeitssatz	484
3.8.3.	Der Faltungssatz	484
3.8.4.	Der Entwicklungssatz	485
3.8.5.	Der Entwicklungssatz für mehrfache Wurzeln	487
3.9.	Die Umkehrung der Laplace-Transformation	498
3.10.	Die wechselseitigen Beziehungen zwischen den charakteristischen Funktionen eines linearen Netzwerkes	502
3.11.	Weitere Sätze der Funktionentheorie	505
3.12.	Die allgemeinste Formulierung der Grundgleichungen linearer Netzwerke mit konzentrierten Parametern	512
3.12.1.	Die Grundlagen der Netzwerktopologie	512
3.12.2.	Die topologischen Matrizen eines Netzwerkes	518
3.12.3.	Die charakteristischen Matrizen des elektrischen Zustandes	523
3.12.4.	Die Grundzusammenhänge in Matrixschreibweise	525
3.12.5.	Die Energieverhältnisse	530
3.13.	Nichtlineare Netzwerke	531
3.13.1.	Allgemeine Netzwerkelemente	531
3.13.2.	Das Substitutionstheorem	533
3.13.3.	Das Thévenin-Nortonsche Äquivalenztheorem	535
3.14.	Die Methode der Zustandsvariablen	536
B.	Räumliche Strömungen	542
3.15.	Die Begriffe Widerstand und Induktivität bei räumlichen Strömen	542
3.16.	Das elektromagnetische Feld in Stoffen mit endlicher Leitfähigkeit	545
3.17.	Das elektromagnetische Feld im leitenden unendlichen Halbraum	547
3.18.	Die Impedanz eines leitenden unendlichen Halbraumes	553
3.19.	Das elektromagnetische Feld in kreiszylindrischen Leitern	554
3.20.	Die Impedanz zylindrischer Leiter	561
3.21.	Der Induktionssofen	566
3.22.	Wirbelströme in dünnen Platten	568
C.	Fernleitungen	574
3.23.	Ableitung der Differentialgleichung der Fernleitung	574
3.24.	Lösung der Differentialgleichung der Fernleitung	578
3.25.	Das Verhalten des Fortpflanzungsfaktors und der Wellenimpedanz als Funktion der Leitungskonstanten	584
3.25.1.	Ideale Leiter	585
3.25.2.	Leitungen mit geringer Dämpfung	589
3.25.3.	Große Dämpfung	591
3.26.	Erscheinungen am Ende der Leitung	592

3.27.	Die Eingangsimpedanz einer Fernleitung	607
3.28.	Der Leitungsabschnitt endlicher Länge als Schaltungselement	613
3.28.1.	Der Leitungsabschnitt als Impedanz	613
3.28.2.	Der Leitungsabschnitt als Transformator	616
3.28.3.	Der Leitungsabschnitt als Schwingungskreis	619
3.29.	Die Einschaltvorgänge bei verlustlosen Fernleitungen	627
3.30.	Anwendung der Laplace-Transformation beim Studium der Einschaltvorgänge an Fernleitungen	633
3.31.	Einschaltvorgänge bei Fernleitungen endlicher Länge	637
4.	Elektromagnetische Wellen	639
A.	Ebene Wellen	641
4.1.	Die einfachste Lösung der Wellengleichung	641
4.2.	Die Reflexion der ebenen Wellen an Leitern und Isolierstoffen	649
4.3.	Ebene Wellen in Stoffen mit endlicher Leitfähigkeit	653
4.4.	Ebene Wellen in gyromagnetischen Stoffen	661
B.	Lineare Antennen und Antennensysteme	672
4.5.	Lösung der Maxwell'schen Gleichungen mit Hilfe der retardierten Potentiale	672
4.6.	Lösung der Maxwell'schen Gleichungen mit Hilfe des Hertz'schen Vektors in Isolatoren	678
4.7.	Die Strahlung einer Dipolantenne	682
4.7.1.	Allgemeine Lösung	682
4.7.2.	Das gesamte Feld der Dipolantenne	689
4.7.3.	Die ausgestrahlte Leistung	689
4.8.	Die Strahlung bewegter Ladungen	693
4.9.	Die Strahlung der Rahmenantenne	694
4.10.	Die Strahlung linearer Antennen mit beliebiger Stromverteilung	702
4.10.1.	Lineare Antennen mit sinusförmiger Stromverteilung	702
4.10.2.	Dipolzeile	708
4.10.3.	Dipolgruppe	710
4.10.4.	Dipolebene	711
4.11.	Einwirkung der Erde auf das Strahlungsfeld	715
4.12.	Die Impedanz linearer Antennen	717
4.13.	Das Reziprozitätsgesetz	724
C.	Lösung der Wellengleichung in verschiedenen Koordinatensystemen	728
4.14.	Die Rückführung der vektoriellen Wellengleichung auf die skalare Wellengleichung	728
4.15.	Homogene und inhomogene ebene Wellen	734
4.16.	Zylinderwellen	738

4.17.	Kugelwellen	742
4.18.	Beziehungen zwischen ebenen, Zylinder- und Kugelwellen	745
D.	Randwertprobleme I.	753
4.19.	Brechung und Reflexion ebener Wellen	753
4.20.	Lösung des Randwertproblems auf Zylinderflächen	759
4.20.1.	Auslaufende Zylinderwellen	759
4.20.2.	Zylinderwellen entlang einem Kreiszylinder	761
4.20.2.1.	Allgemeine Lösung	761
4.20.2.2.	Dielektrische Wellenleiter	763
4.20.2.3.	Die Sommerfeldsche Oberflächenwelle	765
4.20.2.4.	Der Goubausche Oberflächenleiter	766
4.21.	Lösung des Randwertproblems auf einer Kugelfläche	769
4.21.1.	Allgemeine Lösung	769
4.21.2.	Eigenschwingungen einer massiven Metallkugel	771
4.21.3.	Die Kugelantenne	772
4.21.4.	Doppelkonusleitungen und -antennen	777
4.22.	Die einfachsten Streuungsprobleme	779
4.22.1.	Streuung ebener Wellen am gut leitenden Kreiszylinder	779
4.22.2.	Streuung ebener Wellen an einer gut leitenden Kugel	781
E.	Randwertprobleme II — Wellen in Hohlleitern	785
4.23.	Berechnung der Feldstärke im Innern eines Hohlleiters mit beliebiger Leitkurve	785
4.24.	Der kreiszylindrische Hohlleiter	787
4.24.1.	Die allgemeine Lösung	787
4.24.2.	Die Erfüllung der Randbedingungen	788
4.24.3.	Die Grenzwellenlänge	792
4.24.4.	Die Eigenschaften einiger einfacher Wellenarten	793
4.25.	Verschiedene Wellenarten im Koaxialkabel	795
4.26.	Verschiedene Wellenarten in elliptischen Hohlleitern	797
4.27.	Wellen in rechteckigen Hohlleitern	800
4.28.	Vergleich zwischen Kreis- bzw. Rechteckhohlleiter und Koaxialkabel	803
4.29.	Berechnung der Leistungsübertragung in den einfachsten Fällen	805
4.29.1.	TM ₀₁ -Welle in kreiszylindrischen Hohlleitern	806
4.29.2.	TE ₁₀ -Welle in Rechteckhohlleitern	807
4.29.3.	Bestimmung der Konstante A	808
4.30.	Verluste in Hohlleitungen	809
4.30.1.	Verluste in der Wand	809
4.30.2.	Verluste im Dielektrikum	810
4.30.3.	Dämpfungskoeffizient	811
4.31.	Zusammenfassung der wichtigsten Zusammenhänge für Kreis- und Rechteckhohlleiter	812
4.31.1.	Die Feldkomponenten	812

4.31.2.	Wellenimpedanz. Übertragene Leistung	814
4.31.3.	Verlustleistung. Dämpfungskoeffizient	815
4.31.4.	Kopplung der Moden infolge der Wandverluste	817
4.32.	Erregung von Hohlleiterwellen	818
4.33.	Inhomogenitäten in Hohlleitern	821
4.33.1.	Stoßstelle eines gefüllten und eines leeren Wellenleiters	821
4.33.2.	Zum Teil gefüllter Hohlleiter	823
4.33.3.	Sprunghafte Abmessungsänderung in der E -Ebene	826
4.33.4.	„Induktiver“ Stab	829
4.33.5.	Blende in einem Rechteckwellenleiter	830
4.34.	Mit Ferriten gefüllte Wellenleiter	833
4.35.	Entwicklung nach Eigenfunktionen	839
4.35.1.	Einführung der orthonormierten Typen-Funktionen	839
4.35.2.	Berechnung der Leistung der Hohlleiterwellen	842
4.35.3.	Die Analogie mit den Fernleitungen	843
4.35.4.	Beweis der Orthogonalitätsrelationen	845
4.35.5.	Explizite Form der Funktionen e und h für Kreis- und Rechteckquerschnitte	847
4.35.6.	Beweis der Formeln (11 a) und (11 b) des Abschnitts 4.31.2.	848
4.35.7.	Berücksichtigung der Verluste im Ersatzschaltbild	849
4.35.8.	Allgemeine Theorie der Erregung	850
F.	Randwertprobleme III — Hohlraumresonatoren	852
4.36.	Der Zylinder als Hohlraumresonator	852
4.37.	Die Kugel als Hohlraumresonator	858
4.38.	Der Gütefaktor und die Stromkreisparameter der Hohlraumresonatoren	862
4.39.	Allgemeine Theorie der Hohlraumresonatoren	867
4.39.1.	Die Eigenschaften der Eigenlösungen	867
4.39.2.	Störungsrechnung	870
4.39.3.	Erregung der Hohlraumresonatoren	874
4.39.4.	Mikrowellen- n -Tore	876
G.	Allgemeine Strahlungsprobleme	880
4.40.	Das vektorielle Huygenssche Prinzip	880
4.40.1.	Berechnung des Feldes aus den Quellen und aus Oberflächenangaben	880
4.40.2.	Veranschaulichung des Ergebnisses mit Hilfe elektrischer und magnetischer Flächenstromdichten	884
4.40.3.	Die Ausstrahlungsbedingung	885
4.40.4.	Das Streuungsproblem	889
4.40.5.	Das Beugungsproblem	891
4.40.6.	Ausstrahlung eines Koaxialkabelendes	892
4.40.7.	Ausstrahlung einer Huygensschen Quelle	894
5.	Abschließende Übersicht	897
5.1.	Die Einheit der Maxwell'schen Elektrodynamik	899
5.1.1.	Die physikalische Einheit	899
5.1.2.	Die Einheit der mathematischen Methode	907
5.2.	Die Grundgleichungen der relativistischen Elektrodynamik	918

5.2.1.	Die Lorentz-Transformation	918
5.2.2.	Die Maxwellschen Gleichungen und die Lorentz-Transformation	921
5.2.3.	Die kovariante Formulierung der Maxwellschen Gleichungen	924
5.2.4.	Einige Resultate der relativistischen Elektrodynamik.	930
5.3.	Die Übersetzung der Maxwellschen Gleichungen in die Formelsprache der Mechanik	938
5.3.1.	Die Grundgleichungen der Punktmechanik	938
5.3.2.	Analogie zwischen mechanischen Punktsystemen und elektrischen Netzwerken	941
5.3.3.	Die Grundgleichungen bei kontinuierlichen Systemen	943
5.3.4.	Die Dichtefunktionen der Elektrodynamik und die Maxwellschen Gleichungen	946
5.4.	Die Elemente der Quantenelektrodynamik	950
5.4.1.	Der Matrix-Formalismus der Quantenmechanik	950
5.4.2.	Die Grundzusammenhänge der Quantenelektrodynamik.	955
5.4.3.	Qualitative Betrachtungen über einige Resultate der Quantenelektrodynamik	959
Literaturverzeichnis		963
Sachverzeichnis		967