

Inhaltsverzeichnis

13 Berechnung von Netzwerken mit fraktionaler Bauelementecharakteristik	1
13.1 Zur geschichtlichen Entwicklung der fraktionalen Rechnung und neue Aspekte für die nichtlineare Elektrotechnik	1
13.2 Integraldarstellung von fraktionalen Integrodifferenzialoperatoren	3
13.3 Fraktionale Integration nach Riemann-Liouville	4
13.4 Fraktionale Differenziation durch Integraldarstellung	6
13.4.1 Fraktionale Differenziation nach Riemann-Liouville	7
13.4.2 Eigenschaften des Riemann-Liouville Operators	8
13.4.3 Fraktionale Differenziation nach Grünwald-Letnikow	9
13.4.4 Fraktionale Differenziation nach Caputo	9
13.5 Darstellung der Elemente höherer Ordnung in der rationalen α - β -Ebene	10
13.5.1 Betrag und Phasenverhalten	11
13.5.2 Der Übergang zwischen den Charakteristiken der Elemente nullter und höherer ganzzahliger Ordnung	12
13.5.3 Fraktionale Elemente der Ordnung $k = 0$	13
13.6 Approximation des Übertragungsverhaltens eines RC-Hochpasses	16
13.6.1 Messung des Frequenzganges am realen RC-Hochpass	17
13.6.2 Approximation des Frequenzverhaltens eines realen RC-Hochpasses	18
13.6.3 Auswertung der Ergebnisse	25
13.7 Approximation des Übertragungsverhaltens eines realen RC-Tiefpasses .	27
13.7.1 Messung des Frequenzganges eines realen RC-Tiefpasses	27
13.7.2 Auswertung und Ergebnisse	29
13.8 Resümee zum Einsatz von Bauelementen mit fraktionalem Charakter . .	31
14 Prinzipien und Formalismen	33
14.1 Differenzialprinzipien der Mechanik	34
14.1.1 Das d'Alembert-Prinzip	34
14.1.2 Das Prinzip der virtuellen Arbeit	35
14.1.3 Das Gaußsche Prinzip des kleinsten Zwanges	38
14.2 Das Hamilton-Prinzip der extremalen Wirkung	39
14.3 Der Lagrange-Hamilton-Formalismus für klassische Felder	42
14.3.1 Das Hamilton-Prinzip als relativistisch invariantes Prinzip	43
14.3.2 Euler-Lagrange-Gleichungen des Feldsystems	44

14.3.3 Die Hamilton-Gleichungen	46
14.4 Lineare und nichtlineare Räume	49
14.5 Definition affiner und euklidischer Räume	49
14.6 Zur Tensoralgebra in euklidischen Räumen	51
14.7 Mannigfaltigkeiten	57
14.8 Riemannsche Räume	60
14.9 Beispiel zur Transformation bei Basiswechsel	62
14.9.1 Beispiel einer Transformation bei Basiswechsel in schiefwinkligen Koordinaten	63
14.9.2 Transformationsbeziehungen zwischen krummlinigen Koordina- tensystemen	71
14.10 Der Riemannsche Raum	78
14.10.1 Einbettung des Riemannschen Raumes in den euklidischen Raum	78
14.10.2 Rechengesetze im Riemannschen Raum	80
14.10.3 Der N-dimensionale Riemannsche Raum	82
14.10.4 Geodäten	82
14.10.5 Behandlung von mechanischen Punktsystemen	83
14.10.6 Variationsprobleme im Riemannschen Raum	86
14.10.7 Bildung der kovarianten Impulse	88
14.10.8 Forminvarianz der erweiterten Euler-Lagrange-DGL	89
15 Wirkungsintegral und Maxwellsche Gleichungen	91
15.1 Ereignisse in Raum und Zeit	92
15.1.1 Koordinatensysteme	92
15.1.2 Relativitätsprinzip und Prinzip von der Konstanz der Lichtge- schwindigkeit	93
15.1.3 Ereignis und Bezugssystem	93
15.1.4 Der Abstand	95
15.1.5 Die Eigenzeit	97
15.2 Die Lorentz-Transformation	98
15.2.1 Herleitung der Transformation	98
15.2.2 Die Galilei-Transformation	101
15.2.3 Die Umkehrtransformation	102
15.3 Vierertensoren erster Stufe	103
15.3.1 Vierervektoren	103
15.3.2 Lichtausbreitung in bewegten Bezugssystemen	105
15.3.3 Invarianz des Lichtkegels	106
15.3.4 Vierergradient des skalaren Potenzials und der Wellenoperator .	108
15.3.5 Die Vierergeschwindigkeit	109
15.4 Das Wirkungsintegral	111
15.4.1 Wirkungsintegral des Feldes	111
15.4.2 Wirkungsintegral auf Grund der Eigenschaften der Teilchen . . .	112
15.4.3 Wirkungsintegral infolge der Wechselwirkung zwischen Feld und Teilchen	114
15.5 Die Lagrange-Funktionen der Wirkungsintegrale	116
15.5.1 Lagrange-Funktion einer Ladung im elektromagnetischen Feld . .	116

15.5.2	Der Feldtensor und die Berechnung von Invarianten	116
15.5.3	Dreidimensionale Darstellung des Wirkungsintegrals des Feldes und seine Lagrange-Funktion	121
15.5.4	Gesamtwirkungsintegral von Feld und Ladungen	122
15.5.5	Die Lagrange-Funktion zum Gesamtwirkungsintegral	123
15.6	Grundgleichungen der Elektromagnetik	124
15.6.1	Die erste Gruppe der Maxwell'schen Gleichungen	124
15.6.2	Die zweite Gruppe der Maxwell'schen Gleichungen	126
15.7	Zusammenstellung von Gesamtwirkungsintegral und Gesamt-Lagrange- Funktion	131
15.8	Drei- und vierdimensionale Form der Kontinuitätsgleichung	133
15.9	Dimensionen und Bezeichnung der Feldgrößen	136
15.9.1	Die Dimensionen der drei- und vierdimensionalen Feldgrößen	136
15.9.2	Bezeichnung der Feldgrößen der Elektromagnetik	137
15.10	Die Eichinvarianz	138
15.11	Aufgaben	139
16	Tensoren der Elektromagnetik	149
16.1	Tensor des elektromagnetischen Feldes	150
16.2	Energieströmung, Leistungsbilanz und Poynting-Vektor	151
16.3	Der Energie-Impuls-Tensor	157
16.3.1	Herleitung des Energie-Impuls-Tensors vom Prinzip der kleinsten Wirkung	157
16.3.2	Die Koordinaten des Energie-Impuls-Tensors	160
16.3.3	Energie-Impuls-Tensor des elektromagnetischen Feldes	164
17	Elektromagnetische Felder	173
17.1	Maßsysteme, Anzahl der Feldgleichungen, Feldbegriffe und Randwert- aufgaben	174
17.1.1	Formen der Maxwell'schen Gleichungen in verschiedenen Maßsy- stemen	174
17.1.2	Die Anzahl der Feldgleichungen	175
17.1.3	Der Feldbegriff	175
17.1.4	Konvektive und konduktive Ladungs- und Stromdichten	178
17.2	Eindeutige Lösbarkeit der Maxwell'schen Gleichungen	179
17.3	Arten von Randbedingungen	181
17.3.1	Hyperbolische Differenzialgleichung und ihre Anfangsbedingungen	181
17.3.2	Elliptische Differenzialgleichungen und ihre Randbedingungen	182
17.3.3	Parabolische Differenzialgleichungen	182
17.3.4	Homogene und inhomogene Randbedingungen	183
17.3.5	Forderungen an die einzelnen Randwertaufgaben	183
17.4	Gliederung der elektromagnetischen Felder	183
17.4.1	Unterteilung nach den Materialeigenschaften	184
17.4.2	Gliederung nach dem Zeitverhalten	184
17.5	Verhalten der Feldgrößen an Grenzflächen	187

17.5.1	Berechnung der Kraftwirkung unter Berücksichtigung der Materialeigenschaften	192
--------	--	-----

18 Methoden zur Berechnung elektromagnetischer Felder **195**

18.1	Berechnung elektrostatischer Felder	196
18.1.1	Die Gleichungen von Laplace und Poisson	196
18.1.2	Direkte Integration der Gleichungen von Laplace und Poisson . .	197
18.1.3	Behandlung von elektrostatischen Feldern mit konformen Abbildungen	231
18.1.4	Der Satz von Schwarz-Christoffel	241
18.1.5	Die Abbildungsfunktion für das Smith-Diagramm	254
18.1.6	Berechnung elektrischer Felder durch Spiegelung	256
18.1.7	Die Monte-Carlo-Methode	261
18.1.8	Graphische Ermittlung des Feldbildes bei gegebener Elektrodenform	264
18.1.9	Zusammenfassung der Ergebnisse	265
18.2	Stationäre Felder und ihre Berechnung	265
18.2.1	Das stationäre elektrische Strömungsfeld	265
18.2.2	Das stationäre magnetische Feld	270
18.3	Quasistationäre und raschveränderliche Felder	285
18.3.1	Die mathematische Formulierung der Verschiebungsstromdichte .	285
18.3.2	Die Feldgleichungen der magnetischen Feldstärke bei quasistationären Vorgängen	287
18.3.3	Berechnung quasistationärer Felder	288
18.3.4	Raschveränderliche Felder	291

19 Numerische Methoden zur Feldberechnung **305**

19.1	Übersicht zu den Methoden	305
19.2	Die Finite Differenzen Methode - FDM	308
19.2.1	Diskretisierung	309
19.2.2	Entwicklung der Potenzialgleichung im Differenzenstern	309
19.2.3	Rand- und Grenzbedingungen	312
19.2.4	Diskretisierungs- und Nummerierungsmöglichkeiten	315
19.2.5	Lösung des Gleichungssystems	316
19.2.6	Finite-Differenzen-Methode <i>per Hand</i>	317
19.2.7	Aufbau eines Rechenprogramms	321
19.3	Die Finite Elemente Methode - FEM	322
19.3.1	Grundlagen	322
19.3.2	Vorgehen und Ansatzfunktion	328
19.4	Die Randelementemethode - BEM (Boundary element method)	331
19.4.1	Die Methode	334
19.4.2	BEM - Strategie	334
19.5	Anwendung der numerischen Feldberechnung	340
19.5.1	Berechnung statischer Feldprobleme mit MAXWELL	340
19.5.2	Berechnung transienter Felder mit PROFI	351

20	Synthese von elektrischen und magnetischen Feldern	365
20.1	Die Syntheseaufgabe	367
20.2	Die Syntheseetappen und die Methode der Feldsynthese	367
20.3	Synthese der Potenzial- und Feldstärkefunktion im euklidischen Raum	369
20.3.1	Synthese eines hyperbolischen Potenzialverlaufs	369
20.3.2	Synthese eines zylindersymmetrischen Feldes	375
20.3.3	Der elliptische Potenzialverlauf und seine Synthese	380
20.4	Synthese von Feldern im vierdimensionalen Raum	388
20.4.1	Minkowski-Raum und seine Metrik	388
20.4.2	Mathematische Beziehungen vom elektromagnetischen Feld im Minkowski-Raum	398
20.4.3	Synthese von Feldern in Abhängigkeit von einer Koordinate	404
20.4.4	Abhängigkeit der Feldgrößen von zwei Koordinaten	412
20.4.5	Synthese von Feldern in Abhängigkeit von drei Koordinaten	415
21	Analyse von Bauelementen und Abbildung der Bewegung im Riemannschen Raum	419
21.1	Programmpaket Lagrange‘ und numerische Voraussetzungen	419
21.2	Implementation neuer Bauelemente	423
21.3	Anwendungen	424
21.3.1	Aufstellung des $\{L, D\}$ -Modells für ein Relais	424
21.3.2	Modellierung einer Relaischaltung	432
21.3.3	Koordinatentransformation im Riemannschen Raum	434
21.3.4	Ermittlung der Metrik und der kovarianten Impulse	436
21.3.5	Ankerrückwirkung und Kontaktprellen	438
21.3.6	Ermittlung des Anzugs- und Abfallstromes	441
21.3.7	Verzögerungsschaltung mit Kondensator	443
21.3.8	Parameteroptimierung einer Zerhackerschaltung	445
22	Synthese mechatronischer Antriebe	449
22.1	Allgemeiner Entwurfsablauf nach VDI-Richtlinie 2206	450
22.1.1	Besonderheiten	450
22.1.2	Wesentliche Elemente der Entwicklung mechatronischer Produkte	452
22.1.3	Das V-Modell als Makrozyklus	455
22.1.4	Integrativer Entwurf von Produkt und Produktionssystem	464
22.2	Domänenspezifischer Entwurf magnetischer Antriebe	465
22.2.1	Modellierung von Magnetkreisen	467
22.2.2	Grobdimensionierung mit der Netzwerkmethod	467
22.2.3	Optimierung unter statischen und dynamischen Gesichtspunkten	474
22.2.4	Dynamiksimulation in der Optimierung	478
22.2.5	Einsatz von numerischer Feldberechnung im Entwurf	481
22.3	Rechenmodell zur Optimierung von Magnetkreisen mittels Netzwerkmethoden	484
22.3.1	Simulation magnetischer Netzwerke	484
22.3.2	Energie- und Kraftberechnung mit magnetischen Netzwerken	486
22.3.3	Dynamiksimulation	495

22.3.4	Wirbelströme und Kurzschlussringe	498
22.3.5	Dynamisches Ersatzmodell für Induktivitäten und Kapazitäten	501
22.4	Berücksichtigung des Erwärmungsverhaltens	502
22.4.1	Temperaturdefinitionen	503
22.4.2	Berechnung der Erwärmung	505
22.4.3	Spulendimensionierung	507
22.5	Elektromagnetische Schrittmotoren	519
22.5.1	Das Wesen elektromagnetischer Schrittmotoren	519
22.5.2	Reluktanzschrittmotoren	523
22.5.3	Wechselpolschrittmotoren	527
22.5.4	Hybridschrittmotoren	529
22.5.5	Mehrkoordinatenhybridschrittmotoren	535
22.5.6	Dynamische Eigenschaften von Schrittmotoren	536
22.5.7	Elektronische Schrittteilung	542
22.5.8	Die Ansteuerung von Schrittmotoren	545
22.5.9	Schrittmotoren in Regelkreisen	550
22.6	Gleichstrommotoren	554
22.6.1	Wirkprinzip	554
22.6.2	Grundstruktur	557
22.6.3	Permanentmagneterregter Gleichstrommotor	558
22.6.4	Nebenschlussmotor	560
22.6.5	Reihenschlussmotor	561
22.6.6	Dynamisches Verhalten	563
22.6.7	Integrierte Gleichstrommotoren	564
A	Koordinatensysteme und deren metrische Koeffizienten	567
A.1	Kreiszyylinderkoordinatensystem	567
A.2	Hyperbolisches Zylinderkoordinatensystem	568
A.3	Koordinatensystem sich berührender Zylinder	568
A.4	Kugelkoordinatensystem	569
A.5	Gestrecktes Elliptisches Koordinatensystem	570
A.6	Abgeplattetes Elliptisches Koordinatensystem	571
B	Rechenoperationen im \mathbb{R}^n	575
B.1	Alternierung	575
B.2	Divergenz	575
B.3	Rotation	576
C	Das Paket Lagrange'	577
	Literaturverzeichnis	583
	Index	592