

Dieter Fleischmann

Basiswissen Elektrotechnik

Vogel Buchverlag Würzburg

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Physikalische Größen	21
1.1 Grundbegriffe	21
1.2 Vereinfachtes, <i>skalares</i> physikalisches Weltbild	23
1.3 Darstellung physikalischer Größen	25
1.3.1 Skalare physikalische Größen	25
1.3.2 Vektorgößen	26
1.4 Allgemeines über Zustandsvergleiche bei physikalischen Systemen	31
1.4.1 Allgemeines	31
1.4.2 Differenz, Quotient und Differenzenquotient	32
1.4.3 Übergang: Differenz \rightarrow Differential	33
1.4.4 Zählrichtung (Ordnungsprinzip) bei Skalaren und ihren Differenzen	34
1.4.5 Übergang: Größendifferenz \rightarrow Größe	34
2 Internationales Einheitensystem (SI)	35
2.1 Allgemeines	35
2.2 Strukturen im SI	35
2.2.1 Qualitativer Aspekt physikalischer Größen	35
2.2.2 Quantitativer Aspekt physikalischer Größen	36
2.2.3 SI-genormte Maßzahl- (Maßstabs-, oder Zahlen-) Vorsätze	37
2.2.4 Naturgesetze und bloße Definitionsgleichungen	37
2.2.5 Dimension einer physikalischen Größe	38
3 Gleichungsarten in der Physik	41
3.1 Mathematische Gleichungen	41
3.2 Physikalische Gleichungen	42
3.2.1 Allgemeines	42
3.2.2 Reine Größengleichungen	42
3.2.3 Reine Zahlenwertgleichungen	43
3.2.4 Gemischte Gleichungen	45

Inhaltsverzeichnis

4	Einige ausgewählte Größen	47
4.1	Mechanik	47
4.1.1	Länge	47
4.1.2	Masse	47
4.1.3	Zeit	47
4.1.4	Geschwindigkeit	48
4.1.5	Beschleunigung	48
4.1.6	Kraft	49
4.1.7	Energie oder Arbeit	49
4.1.8	Leistung	49
4.2	Wärmelehre: Thermodynamische Temperatur	50
4.3	Elektrodynamik	51
4.3.1	Elektrische Ladung	51
4.3.2	Elektrische Feldstärke	51
4.3.3	Elektrische Stromstärke („Strom“)	52
4.3.4	Raumladungsdichte	53
4.3.5	Elektrisches Potential	54
4.3.6	Elektrische Spannung	54
4.3.7	Elektrische Stromdichte	55
5	Felder	57
5.1	Feld-Definitionen	57
5.1.1	Skalarfelder	57
5.1.2	Vektorfelder	58
5.2	Graphische Darstellung von Vektorfeldern durch Feldlinienbilder	60
5.2.1	Arten von Vektorfeldern	60
5.2.2	Definition von Vektorfeldern durch ihre Ursachen	62
5.2.3	Feldlinienbilder	65
5.3	Zusammenhang zwischen Feldlinien und Äquipotentialflächen bei Quellenfeldern	67
6	Ursachen und Wirkungen	71
6.1	Allgemeines	71
6.2	Lineares System und Superpositionsprinzip	72
6.3	System mit Sättigung	74
7	Übergang: Elektrodynamik → Elektrotechnik	75
7.1	Zusammenhang Feldstärke \Leftrightarrow Spannung	75
7.2	Zusammenhang Stromdichte \Leftrightarrow Strom	76
7.3	Zählpfeile für Strom und Spannung	77
7.4	Zweipol	78
7.5	Grundstromkreis	78
7.5.1	Definition	78
7.5.2	Diskussion	79
7.6	Physikalische Bepfeilung von Zweipolen	79

Inhaltsverzeichnis

8	Kirchhoffsche Regeln	83
8.1	Allgemeines	83
8.2	Knotenregel	84
8.2.1	Theorie	84
8.2.2	Diskussion	85
8.2.3	Beispiele	86
8.3	Maschenregel	88
8.3.1	Theorie	88
8.3.2	Diskussion	90
8.3.3	Beispiele	90
9	Leitungsmechanismen	95
9.1	Allgemeines	95
9.2	Metallische Stromleitung (Reibungsmodell)	96
10	Strukturprinzipien skalarer elektrischer Feldgrößen	101
10.1	Vereinbarung	101
10.2	Strukturen	101
10.3	Zeitabhängigkeiten	102
10.3.1	Theoretische Gleichgrößen	102
10.3.2	Technische Gleichgrößen	102
10.3.3	Harmonisch zeitabhängige Wechselgrößen	103
10.3.4	Misch-Wechselgrößen	103
10.3.5	Periodisch zeitabhängige Größen	104
10.3.6	Größen mit beliebiger Zeitabhängigkeit (Großsignale)	104
10.3.7	Komplexe Größen	104
10.3.8	Mehrphasige Größen	105
11	Kenngrößen passiver Bauelemente und Analogien	107
11.1	Allgemeines	107
11.2	Ohmscher Widerstand	107
11.2.1	Physik	107
11.2.2	Systemtheorie	108
11.3	Induktivität	109
11.3.1	Physik	109
11.3.2	Systemtheorie	109
11.4	Kapazität	110
11.4.1	Physik	110
11.4.2	Systemtheorie	111
11.5	Verallgemeinerung der Systemtheorie	111
11.5.1	Analogiestruktur	111
11.5.2	Beispiele	112

12	Temperaturabhängigkeit von ohmschen Widerständen	115
12.1	Allgemeines	115
12.2	Definitionen	115
12.3	Einteilung bezüglich der Temperaturabhängigkeit	117
12.3.1	Schwach temperaturabhängige ohmsche Widerstände	117
12.3.2	Stark temperaturabhängige ohmsche Widerstände	118
12.4	Eigenerwärmte temperaturabhängige Widerstände	121
13	Schaltungen von Widerständen	123
13.1	Schaltungen von Zweipolen	123
13.1.1	Definitionen	123
13.1.2	Beispiele	123
13.2	Ersatzwiderstand	124
13.2.1	Allgemeines	124
13.2.2	Ersatzwiderstand bei Serienschaltung von Widerständen	125
13.2.3	Ersatzwiderstand bei Parallelschaltung von Widerständen	126
13.3	Spannungsteiler	128
13.4	Stromteiler	129
13.5	Beispiele	130
13.6	Stern-Dreieck-Umwandlung	135
13.6.1	Allgemeines	135
13.6.2	Elektrische Identität von dreistrahligen Sternen mit Dreiecken aus ohmschen Widerständen	135
13.7	Vereinfachung von Widerstandsnetzwerken	138
13.7.1	Problemstellung und Methodik	138
13.7.2	Beispiele	138
14	Quellen	143
14.1	Einteilung	143
14.2	Definitionen	143
14.2.1	Definitionen den Betrieb betreffend	143
14.2.2	Drei zweipolige Spezialbauelemente	144
14.2.3	Definitionen nach Einteilungsstrukturen	145
14.3	Unabhängige Quellen	145
14.3.1	Unabhängige ideale Quellen	145
14.3.2	Ersatzquellen	150
14.4	Gesteuerte ideale Quellen	155

15	Netzwerkanalyse	157
15.1	Allgemeines	157
15.2	Elementarverfahren	158
15.2.1	Theorie	159
15.2.2	Beispiele	160
15.3	Überlagerungsverfahren	169
15.3.1	Theorie	169
15.3.2	Beispiele	170
15.4	Teilumwandelungsverfahren	172
15.4.1	Theorie	172
15.4.2	Beispiele	173
15.5	Gesamtumwandlung	175
15.5.1	Theorie	175
15.5.2	Beispiele	176
15.6	Maschenstromverfahren	180
15.6.1	Theorie	180
15.6.2	Beispiele	181
15.7	Knotenspannungsverfahren	186
15.7.1	Theorie	186
15.7.2	Beispiele	188
15.8	Verlegen idealer Quellen	194
15.8.1	Allgemeines	194
15.8.2	Verlegen idealer Spannungsquellen	195
15.8.3	Verlegen idealer Stromquellen	196
15.8.4	Beispiele	197
15.9	„Entrümpeln“	202
15.9.1	Theorie	202
15.9.2	Beispiele	203
16	Umwandlung elektrischer Energie	207
16.1	Physikalische Grundlagen	207
16.1.1	Allgemeines, Wirkungsgrad	207
16.1.2	Energie beim Verschieben einer Punktladung im elektrischen Feld	208
16.1.3	Leistung beim Verschieben einer Punktladung im elektrischen Feld	210
16.1.4	Leistung im ohmschen Widerstand	213
16.1.5	Speicherung thermischer Energie	214
16.2	Anpassung zwischen Quelle und ohmschem Verbraucher in der Gleichstromtechnik	230
16.2.1	Allgemeines	230
16.2.2	Anpassung von ohmschen Widerständen an Ersatzquellen	232
16.2.3	Beispiele	239

17	Magnetismus von Gleichströmen	241
17.1	Einführung	241
17.1.1	Homogener Anteil eines Vektorfeldes a^\wedge	242
17.1.2	Quellenanteil eines Vektorfeldes a_{qu}	244
17.1.3	Wirbelanteil eines Vektorfeldes a_w	244
17.1.4	Wesentliche Rechenoperationen, GIS und SIS	244
17.2	Wirkungskette des Magnetismus von Gleichströmen	245
17.3	Durchflutungssatz in Vektorform	248
17.4	Magnetische Materialgleichung	249
17.4.1	Allgemeines	249
17.4.2	Magnetisch anisotrope Materie	252
17.4.3	Magnetisch isotrope Materie	255
17.5	Verschiedene andere Schreibweisen des Durchflutungssatzes	268
17.5.1	Anwendung des SIS auf den Durchflutungssatz in Vektorform	268
17.5.2	Durchflutungssatz in vorläufiger technischer Formulierung	270
17.6	Magnetischer Fluß	271
17.6.1	Allgemeines	271
17.6.2	Magnetische Flußdichte	272
17.7	Analogie zur Netzwerkanalyse der Elektrotechnik	273
17.7.1	Allgemeines	273
17.7.2	Wahl der skalaren Feldgrößen des Magnetismus stationärer Ströme unter Benützung der Kirchhoffschen Regeln	273
17.7.3	(Zweipolige) Bauelemente	275
17.7.4	Grundmagnetkreis mit physikalischer Bepfeilung	280
17.7.5	Magnetische Serien- und Parallelschaltung	280
17.7.6	Bepfeilung von Magnetkreisen	280
17.7.7	Schlußbemerkung	282
17.8	Endgültig technisch formulierter Durchflutungssatz	282
17.9	Physikalische Anwendung des Kontrollvolumens beim Magnetismus konstanter Ströme	283
17.9.1	Allgemeines	283
17.9.2	Luftspalt im Kern	284
17.9.3	Kernteil mit Querschnittsänderung	286
17.9.4	Kernteil mit Flußverzweigung	287
17.10	Brechgesetz des Magnetismus	287
18	Beispiele zur Berechnung technischer Magnetkreise mit Gleich-Durchflutung	291
18.1	Allgemeines	291
18.2	Gerader Leiter	292
18.2.1	Unendlich dünner gerader elektrischer Leiter	292
18.2.2	Gerader elektrischer Leiter	293
18.3	Homogener Standard-Magnetkreis	295
18.4	Inhomogener Standard-Magnetkreis	301
18.5	Ferromagnetischer Kern mit einfacher Flußverzweigung und einer Wicklung	310
18.6	Ferromagnetischer Kern mit einfacher Flußverzweigung und zwei Wicklungen	317

Inhaltsverzeichnis

19	Scherung	323
19.1	Allgemeines	323
19.2	Scherung des inhomogenen Standard-Magnetkreises	327
19.3	Zahlenbeispiel	329
20	Energiedichte im Elektromagnetischen Feld	333
20.1	Allgemeines	333
20.2	Ummagnetisierungsverluste bei ferromagnetischer Materie	336
21	Kräfte im Magnetfeld	343
21.1	Allgemeines	343
21.2	Kraft zwischen zwei Magnetpolen	343
21.2.1	Theorie	343
21.2.2	Beispiele	346
21.3	Lorentzkraft	351
21.3.1	Theorie	351
21.3.2	Motorprinzip	352
21.3.3	Weitere Beispiele zur Anwendung der Lorentzkraft	353
22	Elektrostatik	357
22.1	Allgemeines	357
22.2	Coulombsches Gesetz	360
22.2.1	Verallgemeinerungen des Coulombschen Gesetzes	363
22.2.2	Schlußbemerkung	364
22.3	Elektrostatisches Feld	365
22.3.1	Theorie	365
22.3.2	Beispiele	366
22.4	Elektrische Flußdichte	369
22.4.1	Theorie	369
22.4.2	Beispiele	371
22.5	Elektr(ostat)isches Potential	378
22.5.1	Theorie	378
22.5.2	Beispiele	380
22.5.3	Äquipotentialgebiete	386
22.6	Kontinuitätsgleichung	388
22.6.1	Theorie	388
22.6.2	Beispiele	389
22.6.3	Schlußbemerkung	390
22.7	Influenz	390

23	Kondensator	393
23.1	Definition.....	393
23.2	Bauteilegleichungen.....	393
23.2.1	Allgemeines.....	393
23.2.2	Elektrostatische Kennlinie.....	393
23.2.3	Elektrische Kennlinie.....	398
23.3	Diskussion der Kennlinie des Kondensators.....	399
23.3.1	Übungen zur mathematischen Deutung (Kurvendiskussion).....	399
23.3.2	Physikalische Deutung.....	401
23.3.3	Plattenkondensator.....	402
23.3.4	Beispiele.....	403
23.4	Schaltungen von Kondensatoren.....	413
23.4.1	Parallelschaltung von Kondensatoren.....	413
23.4.2	Serienschaltung von Kondensatoren.....	415
23.5	Vom Kondensator gespeicherte Energie.....	419
23.6	Beispiele.....	421
23.6.1	Plattenkondensator.....	421
23.6.2	Schaltungen mit Kondensatoren.....	422
24	Induktion ruhender Systeme	429
24.1	Physikalischer Hintergrund.....	429
24.2	Induktionsgesetz.....	433
24.2.1	Allgemeines.....	433
24.2.2	Vektorschreibweise.....	433
24.2.3	Technische Schreibweise.....	436
24.3	Ordnungsbegriff bei Induktionserscheinungen.....	440
24.4	Spule.....	441
24.4.1	Allgemeines.....	441
24.4.2	Ableitung der elektrischen Kennlinie.....	441
24.4.3	Diskussion der Kennlinie.....	445
24.4.4	Beispiele.....	447
24.4.5	Schaltungen von Spulen.....	453
24.4.6	Von der Spule gespeicherte Energie.....	454
24.4.7	Beispiele.....	456
24.4.8	Wirbelströme.....	461
24.4.9	Ersatzschaltbilder.....	464
24.5	Wachstumsgesetze elektrischer Maschinen.....	471

25	Transformator	475
25.1	Allgemeines	475
25.2	Physikalische Grundlagen des verlustlosen Zweiwicklungstrafo.	479
25.2.1	Verlustloser Zweiwicklungstrafo im Leerlauf, qualitativ.	479
25.2.2	Belasteter verlustloser Zweiwicklungstrafo, qualitativ.	481
25.2.3	Erster Teil der Ableitung der Bauteilegleichungen des verlustlosen Zweiwicklungstrafo.	484
25.3	Bauteilegleichungen des verlustlosen Zweiwicklungstrafo.	491
25.4	Gegeninduktivität, Kopplungsfaktor und Streufaktor.	495
25.5	Übersetzungsverhältnisse des verlustlosen Zweiwicklungstransformators	496
25.5.1	Definitionen.	496
25.5.2	Zusammenhänge zwischen den Übersetzungsverhältnissen.	497
25.5.3	Ideal fest gekoppelter verlustloser Zweiwicklungstransformator.	498
25.6	Idealer Zweiwicklungstransformator.	500
25.7	Ersatzschaltbilder des Zweiwicklungsübertragers.	510
25.7.1	Allgemeines.	510
25.7.2	Modellauswahl für das Ersatzschaltbild des verlustlosen Zweiwicklungsübertragers.	511
25.7.3	Physikalisches Ersatzschaltbild des verlustlosen Zweiwicklungstransformators	511
25.7.4	Theoretisches Ersatzschaltbild des verlustlosen Transformators.	524
25.8	Transformatorverluste und Kapazitäten des Zweiwicklungstransformators ..	526
25.8.1	Theorie.	526
25.8.2	Beispiele.	530
25.9	Transformatorprüfung	535
25.9.1	Allgemeines.	535
25.9.2	Leerlaufversuch des Zweiwicklungs-Netztrafo.	536
25.9.3	Kurzschlußversuch des Zweiwicklungs-Netztrafo.	537
26	Generatorprinzip	539
26.1	Allgemeines.	539
26.2	Induktionsgesetz für bewegte Systeme.	540
26.3	Technische Ausnutzung	541
26.3.1	Anordnung	541
26.3.2	Polarität der induzierten Stabspannung	543
26.3.3	Stabspannung quantitativ.	545
26.4	Technische Begriffe des Elektromaschinenbaues (Auswahl).	547
26.4.1	Umfangsgeschwindigkeit.	547
26.4.2	Stabspannung.	548
26.4.3	Polpaarzahl und elektrische Frequenz	549
26.4.4	Ankerabwicklung	550
26.4.5	Beispiele	551
26.5	Halleffekt	555

27	Schwingungen und Wellen.....	561
27.1	Definitionen.....	561
27.2	Beispiele.....	562
27.3	Begriff der Phase harmonischer Vorgänge.....	564
27.3.1	Allgemeines.....	564
27.3.2	Zeitabhängiger Anteil der Phase harmonischer Vorgänge.....	566
27.3.3	Welleneigenschaften, die von der Phase bestimmt werden.....	567
27.4	Konzentrierte Bauelemente.....	574
27.4.1	Theorie.....	574
27.4.2	Beispiele.....	576
28	Komplexe Wechselstromtechnik: Systemtheorie.....	577
28.1	Komplexe skalare Feldgrößen.....	577
28.1.1	Allgemeines.....	577
28.1.2	Reduktion der Differentialgleichung.....	578
28.1.3	Additives Konzept.....	578
28.2	Komplexer Momentanwert.....	579
28.3	Komplexer Zeiger.....	579
28.4	Beispiele.....	581
28.5	Zeigerdiagramm.....	582
28.6	Komplexe Bauteilegleichungen der passiven Zweipole.....	583
28.6.1	Kennlinie komplexer Zweipole.....	583
28.6.2	Ohmscher Widerstand.....	583
28.6.3	Ideale Spule.....	587
28.6.4	Idealer Kondensator.....	591
28.7	Korrespondenzen.....	594
28.8	Unabhängige komplexe ideale Quellen.....	596
28.8.1	Allgemeines.....	596
28.8.2	Unabhängige ideale komplexe Quellen.....	597
28.8.3	Drei zweipolige Spezialbauelemente.....	598
28.9	Komplexer Widerstand (Impedanz).....	598
28.9.1	Definitionen.....	598
28.9.2	Eigenschaften.....	600
28.9.3	Impedanz-Ebene.....	600
28.10	Komplexer Leitwert (Admittanz).....	602
28.10.1	Definitionen.....	602
28.10.2	Eigenschaften.....	603
28.10.3	Leitwert-Ebene.....	603
28.11	Netzwerke und Analyse im Komplexen.....	605
28.11.1	Allgemeines.....	605
28.11.2	Schaltung von Zweipolen.....	605
28.11.3	Analysenmethoden im Komplexen.....	606
28.12	Serienschaltung von Impedanzen, Spannungsteilerregel.....	609
28.12.1	Ersatzimpedanz.....	609
28.12.2	Spannungsteilerregel.....	610

Inhaltsverzeichnis

28.12.3	Beispiel	610
28.13	Parallelschaltung von Impedanzen, Stromteilerregel	611
28.13.1	Ersatzimpedanz	611
28.13.2	Stromteilerregel	612
28.13.3	Beispiele	612
28.14	Normierung	614
28.14.1	Allgemeines	614
28.14.2	Frequenznormierung	614
28.14.3	Impedanznormierung	614
28.14.4	Leitwertnormierung	615
28.14.5	Spannungsnormierung	615
28.15	Beispiele zur Netzwerkanalyse	616
29	Ortskurven	637
29.1	Definition	637
29.2	Inversion	637
29.3	Gerade als Ortskurve	638
29.4	Inversion der Ursprungsgeraden am Einheitskreis	640
29.5	Inversion der Geraden am Einheitskreis	641
29.6	Kreis als Ortskurve	645
29.7	Inversion des Kreises	646
29.8	Zusammenstellung	646
29.9	Beispiele	647
29.9.1	Allgemeines Beispiel zur Inversion	647
29.9.2	Impedanzen und Leitwerte der Standardbauelemente	647
29.9.3	Impedanzen und Leitwerte einfacher Schaltungen	650
29.9.4	Leerlaufspannungsverstärkung	659
29.10	Schlußbemerkung	670
30	Bode-Diagramm	671
30.1	Theorie	671
30.1.1	Problemstellung	671
30.1.2	Logarithmische Skalen	671
30.2	Definitionen	677
30.3	Leerlaufende Grundglieder	678
30.3.1	Einführende genaue Diskussion	678
30.3.2	Beispiele	690
30.4	Reell belastete Grundglieder	694
30.5	Kettenschaltung entkoppelter Vierpole	703
30.5.1	Theorie	703
30.5.2	Beispiele	706

Anhang	709
A Größenordnungs-Vorsätze im SI	709
A.1 Größenordnungs-Vorsätze, Vorsatz-Kurzzeichen und andere Abkürzungen ..	709
A.2 Verwendungsvorschriften für genormte Größenordnungs-Vorsätze (Auswahl)	709
B Einfache Rechenregeln für Beträge und Einheiten	710
B.1 Rechenregeln für den Betrag	710
B.1.1 Betrag eines Produktes	710
B.1.2 Betrag eines Quotienten	710
B.2 Rechenregeln für die Einheit physikalischer Größen	710
B.2.1 Einheit von Summen oder Differenzen	710
B.2.2 Einheit eines Produktes	710
B.2.3 Einheit eines Quotienten	710
C Unbestimmte und bestimmte Formen	711
D Zwei wichtige mathematische Kürzel	711
D.1 Definitionen	711
D.2 Beispiele	712
E Definitionen einiger Funktionen	713
E.1 Betrag einer reellen Zahl	713
E.2 Gerade und ungerade Funktionen	713
E.3 Signum- oder Vorzeichenfunktion einer reellen Zahl	714
E.4 Umkehrfunktion	714
E.5 Exponentialfunktion	714
E.5.1 Eigentliche Exponentialfunktion	714
E.5.2 Bearbeitete Exponentialfunktion	715
F Komplexe Rechnung	716
F.1 Definitionen	716
F.2 Darstellung komplexer Zahlen	716
F.3 Unimodulare Zahlen	719
F.4 Konjugiert Komplexes von z	721
F.5 Rechenempfehlungen	722
F.5.1 Gleichungen im Komplexen	722
F.5.2 Addition und Subtraktion	722
F.5.3 Produkt	723
F.5.4 Quotient	723
F.5.5 Potenz	724
F.5.6 Logarithmus	725
F.5.7 Summe mit konjugiert Komplexem	725
F.5.8 Differenz mit konjugiert Komplexem	725
F.5.9 Produkt mit konjugiert Komplexem	726
F.5.10 Vier spezielle unimodulare Zahlen	726
F.6 Einheit komplexer physikalischer Größen	726
G Lineare Interpolation	726
H Differentiale	727
I Ausgewählte Beispiele der Vektorrechnung	729
I.1 Inneres Produkt, koordinatenfrei	729

Inhaltsverzeichnis

12	Inneres Produkt in kartesischen Koordinaten des \mathbb{R}^3	729
13	Quadrat eines Vektors.	729
14	Äußeres Produkt, koordinatenfrei.	729
15	Äußeres Produkt in kartesischen Koordinaten des \mathbb{R}^3	730
16	Nabla-Operator in kartesischen Koordinaten des \mathbb{R}^3	730
17	Gradient in kartesischen Koordinaten des \mathbb{R}^3	730
18	Divergenz in kartesischen Koordinaten des \mathbb{R}^3	730
19	Rotation in kartesischen Koordinaten des \mathbb{R}^3	731
1.10	Vektoralgebra: $\text{div}(a \times \vec{o})$	731
1.11	Vektoralgebra: $\text{div}(\text{rot } a)$	732
1.12	Vektoralgebra: $\text{rot}(A \cdot a)$	732
J	Bestimmung von Vektorfeldern aus ihren räumlichen Ursachen	732
J.1	Prinzip: Koordinatenfreiheit	732
J.2	Homogenes Feld	733
J.3	Reines Quellenfeld	733
J.3.1	Beschreibung	733
J.3.2	Kürzel für Quellenfelder	734
J.3.3	Eigenschaften	734
J.4	Reines Wirbelfeld	735
J.4.1	Beschreibung	735
J.4.2	Kürzel für Wirbelfelder	735
J.4.3	Eigenschaften	735
J.5	Allgemeines Vektorfeld im \mathbb{R}^3	736
J.6	Die wichtigsten physikalischen Begriffe bei Vektorfeldern in koordinatenfreier Darstellung	736
J.6.1	Fluß	736
J.6.2	Quelldichte	737
J.6.3	Verallgemeinerte Energie	737
J.6.4	Wirbeldichte	738
J.6.5	Verallgemeinerte Energie und Potential bei reinen Quellenfeldern	738
J.6.6	Wegunabhängigkeit des Linienintegrals bei reinen Quellenfeldern	740
J.6.7	Spannung beim homogenen elektrischen Feld	741
J.6.8	Integralsatz von Gauß	742
J.6.9	Integralsatz von Stokes	743
K	Zusatz zum Brechgesetz der Magnetostatik	744
L	Energiedichte im elektromagnetischen Feld	746
M	Potenzreihen	749
M.1	Definitionen	749
M.2	Taylorreihe	750
M.3	Lineare Näherung	750
M.4	Beispiele	752
N	Groß- und Kleinsignale	752
N.1	Großsignale	752
N.2	Kleinsignale	753
	Sadiwortverzeichnis	755