

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Analytische Berechnungsverfahren zur Lösung von Differentialgleichungen	7
2.1 Grundlagen zur Differentialrechnung	7
2.2 Lineare Differentialgleichungen	9
2.2.1 Lineare Differentialgleichungen 1. Ordnung	9
2.2.2 Lineare Differentialgleichungen höherer Ordnung mit konstanten Koeffizienten	14
2.2.3 Lineare Differentialgleichung 2. Ordnung mit konstanten Koeffizienten	15
2.3 Systeme von Differentialgleichungen 1. Ordnung	19
2.3.1 Systeme von linearen Differentialgleichungen 1. Ordnung	19
2.4 Laplace-Transformation	25
2.4.1 Zweck einer Transformation	25
2.4.2 Verfahrensweise bei der Laplace-Transformation	25
2.4.3 Eigenschaften der Laplace-Transformation	27
2.4.4 Anwendung der Laplace-Transformation an einem Beispiel	29
2.5 Klassifizierung eines Systems	31
2.5.1 Eigenschaften	32
2.5.2 Übertragungsglied und Übertragungsfunktion	33
2.5.3 Einheitssprung und Dirac-Impuls	33
2.5.4 Stabilität eines Systems	35
2.6 Fourier-Transformation	36
2.7 Duhamelsches Integral	41
2.8 Lineare partielle Differentialgleichungen	46
2.8.1 Spezielle Lösungen einfacher, linearer, partieller Differentialgleichungen	46

2.8.2	Lösungsverfahren für homogene lineare, partielle Differentialgleichungen 1.Ordnung	48
2.8.3	Die Wellengleichung	52

3.	Numerische Berechnungsverfahren zur Lösung von Differentialgleichungen	57
3.1	Diskretisierung	58
3.1.1	Diskretisierung einer Differentialgleichung	59
3.2	Grundbegriffe der Fehleranalyse	61
3.2.1	Fehlerquellen	61
3.2.2	Die wichtigsten Fehler der Berechnungsphase	62
3.3	Einschub: Bestimmtes und unbestimmtes Integral	63
3.4	Numerische Integration	64
3.4.1	Die Trapezregel	64
3.4.2	Die Simpsonsche Regel	66
3.4.3	Die Newton-Cotes-Formeln	68
3.5	Berechnung eines unbestimmten Integrals	69
3.5.1	Einteilung von Lösungsverfahren	70
3.6	Anfangswertprobleme gewöhnlicher Differentialgleichungen ..	72
3.6.1	Das Polygonzugverfahren nach Euler	72
3.6.2	Das verbesserte Polygonzugverfahren nach Euler	76
3.6.3	Das sukzessive Näherungsverfahren nach Picard	81
3.6.4	Das Runge-Kutta-Verfahren	85
3.6.5	Das Prädiktor-Korrektor-Verfahren nach Milne	91
3.6.6	Vergleich der Verfahren zur Lösung von Anfangswertproblemen	94
3.7	Randwertprobleme gewöhnlicher Differentialgleichungen	95
4.	Grundlagen zur Modellbildung in Elektroenergiesystemen	99
4.1	Elektrische Netzwerke	99
4.1.1	Drehstrom-Übertragung	99
4.1.2	Zählpeile und Zählpeilsysteme	104
4.1.3	Komplexe Kenngrößen	105
4.1.4	Zeigerdiagramme	106
4.1.5	Die Kirchhoffschen Regeln	107
4.1.6	Der Überlagerungssatz	108
4.1.7	Der Satz von der Ersatzspannungsquelle	108
4.2	Ausgleichsvorgänge	109
4.2.1	Unterscheidung elektrisch lang / elektrisch kurz	110
4.2.2	Konzentrierte und verteilte Parameter	111

4.3	Fehlerarten im Netz	113
4.4	Die Maxwell'schen Gleichungen	116
4.4.1	Die Integralsätze	116
4.4.2	Die Feldgleichungen	117
4.4.3	Die Kontinuitätsgleichungen	117
4.4.4	Die Materialgleichungen	118
5.	Einfache Ausgleichsvorgänge	121
5.1	Konzentrierte Elemente und Energiespeicher	121
5.2	Elektrische Kreise mit einem Energiespeicher	123
5.2.1	RL-Glied an Gleichspannungsquelle	123
5.2.2	RC-Glied an Gleichspannungsquelle	126
5.2.3	Vergleich des Verhaltens der Energiespeicher L und C ..	130
5.3	Elektrische Kreise mit zwei Energiespeichern	134
5.3.1	RLC-Glied an Gleichspannungsquelle	134
5.3.2	RLC-Glied an Gleichspannungsquelle (Kurzschluß) ..	137
5.3.3	Vergleich des Verhaltens von Gliedern mit einem und mit zwei Energiespeichern an Gleichspannung	141
5.3.4	RLC-Glied an Wechselfspannungsquelle	142
5.3.5	RLC-Glied an Wechselfspannungsquelle (Kurzschluß) ..	151
6.	Modellbildung von Leitungen	153
6.1	Modellbildung mittels konzentrierter Parameter	153
6.2	Modellbildung von Leitungen mittels verteilter Parameter ...	155
6.2.1	Herleitung der Leitungsgleichungen	156
6.2.2	Komplexe Leitungsgleichungen	161
6.3	Ausbreitung von Wanderwellen in technischen Anlagen	169
6.3.1	Konfigurationen nur aus Leitungen	169
6.3.2	Parallelwiderstand zwischen zwei Leitungen	177
6.3.3	Serienwiderstand zwischen zwei Leitungen	181
6.3.4	Parallelkapazität zwischen zwei Leitungen	186
6.3.5	Serienkapazität zwischen zwei Leitungen	192
6.3.6	Induktivität am Ende einer Leitung	198
6.3.7	Parallelinduktivität zwischen zwei Leitungen	202
6.3.8	Serieninduktivität zwischen zwei Leitungen	206
6.3.9	Lösungen für exponentielle Anregungen	211
7.	Berechnung der Leitungskonstanten	217
7.1	Ohmscher Widerstand	217
7.1.1	Einfluß der Stromverdrängung auf den Widerstand ...	218

7.2	Querverluste	222
7.3	Induktivitäten von Leitungen	223
7.3.1	Induktivität eines Leiters	223
7.3.2	Induktivität einer Leiterschleife	225
7.3.3	Induktivität eines Mehrleitersystems	227
7.3.4	Induktivität eines Dreileitersystems	229
7.3.5	Induktivität eines Vierleitersystems	232
7.4	Kapazitäten von Leitungen	234
7.4.1	Kapazität eines Leiters	235
7.4.2	Kapazitäten einer Drehstromfreileitung ohne Erdseil ..	240
7.4.3	Kapazitäten einer Drehstromfreileitung mit Erdseil ...	243
7.4.4	Kapazitäten von Kabeln	244
7.5	Beispiel zur Berechnung des Wellenwiderstands bei einem Leiter	246
8.	Spezielle Verfahren zur Berechnung ausgedehnter Systeme	249
8.1	Das Wellengitter-Verfahren nach Bewley	249
8.2	Das Bergeron-Verfahren	252
8.3	Die Laplace-Transformation	259
8.3.1	Die zweidimensionale Laplace-Transformation	262
8.3.2	Berechnung des Spannungsverlaufs beim Abschalten eines Abstandskurzschlusses mit einem Wanderwellen- verfahren	265
8.3.3	Berechnung des Spannungsverlaufs beim Abschalten eines Abstandskurzschlusses mit zweidim. Laplace-Trans- formation	269
8.4	Digitale Berechnung ausgedehnter Systeme mittels EMTP ...	273
9.	Modellbildung von Transformatoren	283
9.1	Transformatoren in Elektroenergiesystemen	283
9.2	Modellbildung von Transformatoren bei niederfrequenter An- regung	286
9.3	Kurzschlußberechnungen	293
9.3.1	Dreipoliger Kurzschluß an einer 10 kV-Sammelschiene	293
9.3.2	Dreipoliger Klemmenkurzschluß an einem Transformator	298
9.3.3	Abschalten eines Kurzschlußstroms	302
9.4	Modellbildung von Transformatoren bei hochfrequenter An- regung	306
9.4.1	Idealisiertes Netzwerkmodell (<i>black-box-Modell</i>)	307
9.4.2	Detailliertes Netzwerkmodell	313
9.4.3	Methode der Finiten Elemente	324

9.4.4	Diskretisierung eines 115/22 kV Transformators	328
10.	Modellbildung weiterer Betriebsmittel	345
10.1	Modellbildung von Synchronmaschinen	345
10.2	Modellbildung von Leistungsschaltern	349
10.2.1	Transiente wiederkehrende Spannungen beim Abschalten eines Kurzschlusses am Leistungsschalter	352
10.3	Simulationsgestützte Berechnung elektromagnetischer Ausgleichsvorgänge	356
10.3.1	Transiente wiederkehrende Spannung und Blitzschlag	357
10.3.2	Überspannungsableiter	359
10.3.3	Simulation elektromagnetischer Ausgleichsvorgänge in einer exemplarischen Konfiguration	362
10.3.4	Zusammenfassung	368
11.	Die Drehstromsynchronmaschine	371
11.1	Prinzipieller Aufbau einer Synchronmaschine	371
11.1.1	Ausführung von Anker und Läufer	371
11.1.2	Mehrpolige Maschinen	373
11.2	Mathematische Beschreibung	374
11.2.1	Park-Transformation ($dq0$ -Transformation)	376
11.2.2	Einführung bezogener Größen	382
11.2.3	Ersatzschaltbild für die d - und q -Achse	388
11.2.4	Berücksichtigung der magnetischen Sättigung	390
11.2.5	Zusammenfassung	393
11.3	Berechnung der Modellparameter	393
11.3.1	Operatorschreibweise	394
11.3.2	Berechnung der internen Parameter unter Auswertung der Operatoren	397
11.3.3	Zusammenfassung	404
11.4	Anwendung des mathematischen Modells	405
11.4.1	Sonderfall des stationären Betriebs	405
11.4.2	Dreipoliger Stoßkurzschluß	409
11.4.3	Numerische Berechnung eines vollständigen mathematischen Modells: Parallelschaltung zweier Schwungmasse-Synchrongeneratoren	416
11.4.4	Zusammenfassung	426
12.	Stabilität in Elektroenergiesystemen	427
12.1	Einführung	427

12.2 Leistungsflußberechnung	428
12.2.1 Leistungsfluß an einer kurzen Übertragungsleitung	429
12.2.2 Iterativer Algorithmus zur Leistungsflußberechnung	432
12.2.3 Die Leistungsflußgleichungen	433
12.2.4 Die Gauß- und die Gauß-Seidel-Methode	434
12.3 Klassifizierung von Stabilität	437
12.3.1 Was ist Stabilität?	437
12.3.2 Rotorwinkelstabilität	440
12.3.3 Spannungsstabilität	446
12.4 Modellbildung zur statischen und transienten Stabilitätsunter- suchung	447
12.4.1 Synchronmaschinenmodell	448
12.4.2 Die Schwingungsdifferentialgleichung einer Synchron- maschine	450
12.4.3 Modellierung der Übertragungsleitungen und der Lasten	451
12.4.4 Modellierung des Gesamtnetzwerkes	452
12.4.5 Aufstellen des Differentialgleichungssystems eines Mehr- maschinennetzwerkes	454
12.4.6 Knotenadmittanzmatrix und Netzwerkreduzierung	455
12.4.7 Gültigkeitsbereich der hier verwendeten Modellierung	458
12.5 Transiente Stabilitätsuntersuchungen	459
12.5.1 Einleitung	459
12.5.2 Transiente Stabilitätsuntersuchung an einem Einma- schinensystem	461
12.5.3 Der Flächensatz	466
12.5.4 Die numerische Methode	471
12.5.5 Die Methode nach Lyapunov	473
12.5.6 Anwendung der Methode nach Lyapunov zur transien- ten Stabilitätsuntersuchung bei Elektroenergiesystemen	475
12.5.7 Beschreibung der transienten Energiefunktionsmethode	476
12.5.8 Anwendung auf Elektroenergiesysteme	477
Abbildungsverzeichnis	491
Tabellenverzeichnis	505
Literaturverzeichnis	507
Index	513