

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
<b>2 Lineare und nichtlineare Räume</b>	<b>9</b>
2.1 Definition affiner und euklidischer Räume . . . . .	9
2.2 Zur Tensoralgebra in euklidischen Räumen . . . . .	12
2.3 Mannigfaltigkeiten . . . . .	18
2.4 Riemannsche Räume . . . . .	22
<b>3 Lokale Variation geometrischer Objekte</b>	<b>25</b>
3.1 Variationsableitung, Variation 1. und 2. Ordnung . . . . .	25
3.2 Vertauschbarkeit von Variation und Differentiation . . . . .	27
3.3 Geometrische Objekte und lokale Variation . . . . .	28
3.4 Die lokale Variation bei Drehung des Koordinatensystems . . . . .	30
<b>4 Physikalische Grundlagen</b>	<b>33</b>
4.1 Lagrange- und Hamilton-Formalismus . . . . .	33
4.1.1 Der Lagrange-Formalismus in der klassischen Mechanik . . . . .	33
4.1.2 Der Hamilton-Formalismus in der klassischen Mechanik . . . . .	38
4.1.3 Einbeziehung von Verlusten und Kraftquellen . . . . .	39
4.1.4 Anpassung des Hamilton-Formalismus an das Tensorkalkül . . . . .	40
4.2 Analogien zwischen Mechanik und Elektrotechnik . . . . .	42
4.3 Kinetische Energie und metrischer Tensor . . . . .	44
<b>5 Analyse elektrotechnischer Systeme</b>	<b>49</b>
5.1 Methoden zur Berechnung elektrotechnischer Systeme . . . . .	49
5.2 Systeme mit linearen RLC-Elementen . . . . .	52
5.2.1 Aufstellung der Hamilton-Funktion mit den kovarianten verallgemeinerten Impulsen . . . . .	52
5.2.1.1 $\{L, D\}$ -Modell, kovariante Impulse und Metrik des Systems . . . . .	52

5.2.1.2	Bestimmung der Basis im euklidischen Raum . . . . .	54
5.2.1.3	Umrechnung von ko- bzw. kontravarianten Impulsen und Geschwindigkeiten . . . . .	57
5.2.1.4	Bestimmung der Hamilton-Funktion . . . . .	58
5.2.1.5	Aufstellung der Bewegungsgleichungen über die Variationsableitung . . . . .	60
5.2.1.6	Numerische Lösung der Bewegungsgleichungen . . . . .	60
5.2.2	Duale Form des Hamilton-Formalismus mit den kontravarianten verallgemeinerten Impulsen . . . . .	62
5.3	Transistor-Ersatzschaltbild nach Giacoletto . . . . .	64
5.4	Netzwerke mit singulärer Metrik . . . . .	69
5.5	Systeme mit nichtlinearen Elementen . . . . .	72
5.5.1	Nichtlineare dissipative Elemente . . . . .	72
5.5.2	Nichtlineare Elemente in der potentiellen Energie . . . . .	73
5.5.3	Zeitabhängige und parametrische Elemente . . . . .	75
5.5.4	Nichtlinearitäten und kinetische Energie . . . . .	75
5.6	Vergleich der Analysemethoden . . . . .	77
5.7	Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	79
<b>6</b>	<b>Syntheseproblem, Synthesestappen und Syntheseaufgabe</b>	<b>81</b>
6.1	Syntheseproblem und die Synthesestappen . . . . .	81
6.2	Normierung und Entnormierung bei der Syntheseaufgabe . . . . .	83
6.3	Deterministisches Modell und seine mathematische Form . . . . .	86
6.4	Präzisierung der Syntheseaufgabe . . . . .	89
<b>7</b>	<b>Die mathematische Synthese</b>	<b>93</b>
7.1	Mathematische Darstellungen und Approximationen . . . . .	94
7.2	Umformungen der Bewegungsgleichungen . . . . .	96
7.3	Mathematische Methoden und Verfahren . . . . .	99
7.3.1	Tschebyscheff-Polynome als mathematisches Modell . . . . .	99
7.3.2	Approximation im quadratischen Mittel – Regression . . . . .	100
7.3.3	Kubische Spline-Interpolation . . . . .	102
7.3.4	Fast Fourier Transformation – FFT . . . . .	104
7.4	Methoden zur mathematischen Synthese . . . . .	106
7.4.1	Netzwerke mit vorgeschriebener Zeitfunktion . . . . .	107
7.4.1.1	Die mathematische Synthese der beschreibenden Differentialgleichung . . . . .	107

7.4.1.2	Geometrische Bestimmung der Terme der Differentialgleichung . . . . .	111
7.4.1.3	Synthese eines exakt sinusförmigen Oszillators . . . . .	114
7.4.1.4	Synthese von Schwingungen mit mehr als einem Extremwert in der Halbperiode . . . . .	116
7.4.1.5	Synthese mittels numerischer Verfahren . . . . .	121
7.4.2	Mathematische Modelle von Frequenzteilern . . . . .	122
7.4.2.1	Das exakte Modell der Frequenzteilung . . . . .	123
7.4.2.2	Erweiterte Modelle gerader Ordnung bei neuen Variablen	130
7.4.2.3	Anwendung Tschebyscheffscher Mehrfachfunktionen . .	130
7.4.2.4	Parametrische Modelle der Frequenzteilung . . . . .	131
7.4.3	Frequenzvervielfacher, Gleichrichter und weitere nichtlineare Einrichtungen . . . . .	132
7.4.3.1	Frequenzvervielfachung . . . . .	132
7.4.3.2	Ideale Gleichrichtung . . . . .	135
7.4.3.3	Die ideale Amplitudendemodulation . . . . .	135
7.4.3.4	Umformung periodischer Funktionen . . . . .	136
<b>8</b>	<b>Struktursynthese</b>	<b>141</b>
8.1	Bedeutung und Inhalt der Struktursynthese . . . . .	141
8.2	Synthese über Topologie und Bauelementerelationen . . . . .	142
8.2.1	Ausgangspunkt, Begriffe und Definitionen . . . . .	142
8.2.2	Zum Bauelementenvorrat . . . . .	144
8.2.3	Zerlegung der Beschreibungsgleichungen in Quellenkombinationen	145
8.2.3.1	Einführung von Strukturkoeffizienten und Operatoren .	147
8.2.3.2	Reduktion des Matrixschemas . . . . .	149
8.2.3.3	Erzeugung der Inzidenzmatrizen . . . . .	150
8.2.3.4	Ermittlung von Netzwerkgraphen und Netzwerk . . . .	153
8.2.3.5	$\nu$ -fache Quellenkombinationen . . . . .	154
8.2.4	Zuordnung von Bauelementeklassen zu den Operatoren . . . . .	156
8.2.5	Vereinfachungsregeln . . . . .	158
8.2.6	Notwendiges und hinreichendes Kriterium zur Zweipolsynthese .	165
8.2.7	Algorithmus zur Netzwerkzuordnung . . . . .	169
8.3	Synthese nichtlinearer Schaltungen mit linearen Methoden . . . . .	171
8.3.1	Voraussetzungen . . . . .	171
8.3.2	Methode und Realisierungskriterien . . . . .	173

8.3.3	Synthese einer Differentialgleichung mit einer nichtlinearen Funktion	174
8.3.4	Synthesevorschriften bei vorgeschriebener Bauelementekombination	177
8.3.5	Sätze zu Variante 1 . . . . .	177
8.3.5.1	Differentialgleichungen mit einer Nichtlinearität und $B_1=1$	177
8.3.5.2	Differentialgleichungen mit einer Nichtlinearität und $B_1 \neq 1$	182
8.3.5.3	Differentialgleichungen mit n Nichtlinearitäten und $B_\nu=1$	186
8.3.5.4	Differentialgleichungen mit n Nichtlinearitäten und $B_\nu \neq 1$	189
8.3.6	Variante 2, Existenz von nichtlinearen gesteuerten Elementen . . . . .	189
8.3.6.1	Zwei nichtlineare Zweipole . . . . .	190
8.3.6.2	Ein nichtlinearer Zweipol . . . . .	191
8.3.6.3	Realisierbarkeitskriterien . . . . .	194
8.3.6.4	Verwendung gesteuerter Quellen bei $B_\nu = 1$ . . . . .	196
8.3.7	Variante 3 – nur gesteuerte nichtlineare Elemente . . . . .	196
8.3.8	Schaltungssynthese nach den Varianten 4, 5 und 6 . . . . .	198
8.3.9	Zur prinzipiellen Realisierbarkeit . . . . .	199
8.3.10	Synthese einer Stabilisatorschaltung . . . . .	202
8.4	Synthese von Korrekturgliedern und Elementen höherer Ordnung . . . . .	206
8.4.1	Korrektur- und Transformatortvierpole . . . . .	206
8.4.1.1	Impedanzkonverter . . . . .	206
8.4.1.2	Korrekturglieder mit Operationsverstärkern . . . . .	207
8.4.1.3	Korrekturglieder mit Gyratoren . . . . .	208
8.4.1.4	Korrekturglieder mit Transformationsvierpolen . . . . .	208
8.4.2	Synthese von Elementen höherer Ordnung . . . . .	210
8.4.2.1	Beschreibung . . . . .	210
8.4.2.2	Prinzipielle Realisierung von Elementen höherer Ordnung	210
8.4.2.3	Realisierung der einzelnen Baugruppen . . . . .	211
8.4.2.4	Dimensionierung und Aufbau . . . . .	214
9	Die Äquivalenzetappe	217
9.1	Begriff der Äquivalenz nichtlinearer Netzwerke . . . . .	217
9.2	Grundlegende Sätze zur Äquivalenz nichtlinearer Netzwerke . . . . .	218
9.2.1	Erweiterung des Satzes von der Kompensation . . . . .	218
9.2.2	Umwandlung von Mehrpolen in Zweipole . . . . .	219
9.2.3	Satz zur Invarianz bezüglich der Dualität . . . . .	222
9.2.4	Verfahren zur Bestimmung des dualen Netzwerkes . . . . .	225
9.3	Verfahren der Maschenimpedanzmatrix . . . . .	227

9.3.1	Lineares Maschenimpedanzmatrixverfahren . . . . .	227
9.3.2	Erweiterung auf lineare aktive 2n-Pole . . . . .	228
9.3.3	Die Maschenimpedanzmatrix bei nichtlinearen Netzwerken . . . . .	231
9.3.4	Anwendung auf einen Ferroresonanzstabilisator . . . . .	232
9.3.5	Algorithmus zur Äquivalenztransformation . . . . .	234
9.3.6	Nichtlineare Netzwerke mit Mehrpolen . . . . .	234
9.4	Nichtlineare Widerstandszweipole . . . . .	235
<b>10</b>	<b>Synthese mechatronischer Antriebe</b>	<b>239</b>
10.1	Allgemeiner Entwurfsablauf nach VDI-Richtlinie 2206 . . . . .	240
10.1.1	Besonderheiten des Entwurfs . . . . .	240
10.1.2	Wesentliche Elemente der Entwicklung mechatronischer Produkte . . . . .	242
10.1.2.1	Vorgehensweise . . . . .	242
10.1.2.2	Der allgemeine Problemlösungszyklus auf der Mikroebene . . . . .	243
10.1.3	Das V-Modell als Makrozyklus . . . . .	246
10.1.3.1	Systementwurf . . . . .	246
10.1.3.2	Systemintegration . . . . .	251
10.1.3.3	Eigenschaftsabsicherung . . . . .	254
10.1.4	Integrativer Entwurf von Produkt und Produktionssystem . . . . .	255
10.2	Domänenpezifischer Entwurf magnetischer Antriebe . . . . .	256
10.2.1	Modellierung von Magnetkreisen . . . . .	257
10.2.2	Grobdimensionierung mit der Netzwerkmethode . . . . .	258
10.2.2.1	Aufstellen des Geometriemodells . . . . .	259
10.2.2.2	Aufstellen des magnetischen Netzwerks . . . . .	261
10.2.3	Optimierung unter statischen und dynamischen Gesichtspunkten . . . . .	265
10.2.4	Dynamiksimulation in der Optimierung . . . . .	269
10.2.5	Einsatz der numerischen Feldberechnung im Entwurf . . . . .	273
10.3	Optimierung von Magnetkreisen mit Netzwerkmethoden . . . . .	277
10.3.1	Simulation magnetischer Netzwerke . . . . .	277
10.3.2	Energie- und Kraftberechnung mit magnetischen Netzwerken . . . . .	279
10.3.2.1	Defintion der magnetischen Energie . . . . .	279
10.3.2.2	Magnetkraft und magnetische Energie . . . . .	280
10.3.2.3	Die magnetische Co-Energie bei geteilten Quellen . . . . .	282
10.3.2.4	Energieberechnung in magnetischen Netzwerken . . . . .	283
10.3.2.5	Kraftberechnung für magnetische Netzwerke . . . . .	286
10.3.3	Simulation des dynamischen Verhaltens . . . . .	289

10.3.4 Wirbelströme und Kurzschlussringe . . . . .	291
10.3.4.1 Modell der Wirbelströme und Kurzschlussringe . . . . .	291
10.3.4.2 Flussverdrängung . . . . .	292
10.3.4.3 Blechung, Lamellierung . . . . .	293
10.3.5 Dynamisches Ersatzmodell für Induktivitäten und Kapazitäten . . . . .	295
10.4 Berücksichtigung des thermischen Verhaltens . . . . .	296
10.4.1 Temperaturdefinitionen . . . . .	296
10.4.2 Berechnung der Erwärmung . . . . .	299
10.4.3 Spulendimensionierung . . . . .	301
10.5 Elektromagnetische Schrittmotoren . . . . .	313
10.5.1 Das Wesen elektromagnetischer Schrittmotoren . . . . .	313
10.5.1.1 Besonderheiten elektromagnetischer Schrittmotoren . . . . .	317
10.5.2 Reluktanzschrittmotoren . . . . .	318
10.5.3 Wechselpolschrittmotoren . . . . .	322
10.5.4 Hybridschrittmotoren . . . . .	324
10.5.4.1 Rotatorische Hybridschrittmotoren . . . . .	324
10.5.4.2 Lineare Hybridschrittmotoren . . . . .	326
10.5.5 Mehrkoordinatenhybridschrittmotoren . . . . .	329
10.5.6 Dynamische Eigenschaften von Schrittmotoren . . . . .	332
10.5.6.1 Bewegungsgleichungen . . . . .	332
10.5.6.2 Schrittmotorcharakteristik . . . . .	336
10.5.7 Elektronische Schrittteilung . . . . .	338
10.5.8 Die Ansteuerung von Schrittmotoren . . . . .	340
10.5.8.1 Aufgaben der Ansteuerung . . . . .	340
10.5.8.2 Leistungsstellglieder für Schrittmotoren . . . . .	342
10.5.9 Schrittmotoren in Regelkreisen . . . . .	347
10.6 Gleichstrommotoren . . . . .	351
10.6.1 Wirkprinzip . . . . .	351
10.6.2 Grundstruktur . . . . .	353
10.6.3 Permanentmagneterregter Gleichstrommotor . . . . .	354
10.6.3.1 Möglichkeiten zum Drehzahlstellen . . . . .	355
10.6.3.2 Leistung und Wirkungsgrad . . . . .	356
10.6.4 Nebenschlussmotor . . . . .	357
10.6.5 Reihenschlussmotor . . . . .	358
10.6.6 Dynamisches Verhalten . . . . .	359
10.6.7 Integrierte Gleichstrommotoren . . . . .	361

---

<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>361</b>
<b>Index</b>	<b>369</b>