

# Inhaltsverzeichnis

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einführung</b>  | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>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</b> | <b>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</b> | <b>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</b> | <b>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<br>Geschwindigkeiten . . . . .                 | 57        |
| 5.2.1.4  | Bestimmung der Hamilton-Funktion . . . . .  | 58        |
| 5.2.1.5  | Aufstellung der Bewegungsgleichungen über die Variati-<br>onsableitung . . . . .                    | 60        |
| 5.2.1.6  | Numerische Lösung der Bewegungsgleichungen . . . . .  | 60        |
| 5.2.2    | Duale Form des Hamilton-Formalismus mit den kontravarianten<br>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 Diffe-<br>rentialgleichung . . . . .                  | 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 Bauelementevorrat . . . . .   | 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 Transformatorvierpole . . . . .                        | 206        |
| 8.4.1.1  | Impedanzkonverter . . . . .   | 206        |
| 8.4.1.2  | Korrekturglieder mit Operationsverstärkern . . . . .                  | 207        |
| 8.4.1.3  | Korrekturglieder mit Gyrotoren . . . . .                              | 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        |
| <b>9</b> | <b>Die Äquivalenzetappe</b>   | <b>217</b> |
| 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      | Domänenspezifischer Entwurf magnetischer Antriebe . . . . .      | 256        |
| 10.2.1    | Modellierung von Magnetkreisen . . . . .                         | 257        |
| 10.2.2    | Grobdimensionierung mit der Netzwerkmethod . . . . .             | 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   | Wechselfeldschrittmotoren . . . . .                             | 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> |