

# Inhaltsverzeichnis

---

|          |                                                                               |           |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einführung</b>                                                             | <b>1</b>  |
| 1.1      | Ziel dieses Buchs . . . . .                                                   | 1         |
| 1.2      | Modellbezogene Aufgaben . . . . .                                             | 2         |
| 1.2.1    | Physikalische Modellbildung . . . . .                                         | 3         |
| 1.2.2    | Datenbasierte Modellierung . . . . .                                          | 5         |
| 1.2.3    | Simulation . . . . .                                                          | 7         |
| 1.2.4    | Regelung . . . . .                                                            | 7         |
| <b>2</b> | <b>Systeme</b>                                                                | <b>11</b> |
| 2.1      | Definition von Systemen . . . . .                                             | 11        |
| 2.2      | Statische und dynamische Systeme . . . . .                                    | 12        |
| 2.3      | Zeitinvariante und zeitvariante Systeme . . . . .                             | 14        |
| 2.4      | Kontinuierliche und diskrete Systeme . . . . .                                | 14        |
| 2.5      | Stochastische und deterministische Systeme . . . . .                          | 15        |
| 2.6      | Lineare und nichtlineare Systeme . . . . .                                    | 16        |
| 2.7      | Mathematische Repräsentation von Systemen . . . . .                           | 17        |
| 2.7.1    | Darstellung als Differentialgleichung bzw. im Zustandsraum . . . . .          | 17        |
| 2.7.2    | Darstellung im Laplace-Bildbereich . . . . .                                  | 22        |
| 2.7.3    | Lösung im Zeitbereich . . . . .                                               | 25        |
| 2.7.4    | Zeitdiskrete Approximation des Systemverhaltens . . . . .                     | 29        |
| 2.7.5    | Impulsantwort und Faltungssatz . . . . .                                      | 32        |
| 2.7.6    | Lineare Darstellung nichtlinearer Systeme . . . . .                           | 34        |
| <b>3</b> | <b>Mathematische Grundlagen</b>                                               | <b>35</b> |
| 3.1      | Lösung von Gleichungssystemen . . . . .                                       | 35        |
| 3.1.1    | Methode der kleinsten Fehlerquadrate – Least Squares (LS) . . . . .           | 35        |
| 3.2      | Statistik . . . . .                                                           | 37        |
| 3.2.1    | Wahrscheinlichkeit, Wahrscheinlichkeitsfunktion und Wahrscheinlichkeitsdichte | 38        |
| 3.2.2    | Erwartungswert . . . . .                                                      | 42        |
| 3.2.3    | Varianz, Kovarianz und Korrelation . . . . .                                  | 43        |
| 3.2.4    | Schätzung . . . . .                                                           | 45        |

|          |                                                                          |           |
|----------|--------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2.5    | Stochastische Prozesse . . . . .                                         | 46        |
| <b>4</b> | <b>Modellbildung und Systemidentifikation</b>                            | <b>49</b> |
| 4.1      | Physikalische Modellbildung . . . . .                                    | 51        |
| 4.2      | Systemidentifikation – Datenbasierte Modellbildung . . . . .             | 57        |
| 4.2.1    | Heuristische Verfahren . . . . .                                         | 60        |
| 4.2.2    | Parametrische Modelle: AutoRegressive Modelle mit eXternem Eingang . . . | 63        |
| 4.2.3    | Verallgemeinerung der parametrischen Modelle . . . . .                   | 76        |
| 4.2.4    | Methode der Instrumentellen Variablen . . . . .                          | 82        |
| <b>5</b> | <b>Analyse und Interpretation der Eigenschaften von Systemen</b>         | <b>89</b> |
| 5.1      | Stabilität nach Ljapunov . . . . .                                       | 89        |
| 5.1.1    | Definition der Stabilitätsbegriffe . . . . .                             | 91        |
| 5.1.2    | Überprüfung der Stabilität einer Ruhelage . . . . .                      | 94        |
| 5.1.3    | Ljapunov-Stabilität linearer, schaltender Systeme . . . . .              | 102       |
| 5.2      | Bounded Input-Bounded Output (BIBO) Stabilität . . . . .                 | 107       |
| 5.2.1    | Eingangssignale mit endlicher Energie . . . . .                          | 108       |
| 5.2.2    | Eingangssignale mit unendlicher Energie . . . . .                        | 108       |
| 5.2.3    | Zeitdiskrete Systeme . . . . .                                           | 109       |
| 5.3      | Äquivalenz der Stabilitätsbegriffe für lineare Systeme . . . . .         | 110       |
| 5.3.1    | Abklingen der Impulsantwort . . . . .                                    | 110       |
| 5.3.2    | Energie der Impulsantwort . . . . .                                      | 112       |
| 5.3.3    | Pole der Übertragungsfunktion . . . . .                                  | 112       |
| 5.3.4    | Eigenwerte der Systemmatrix $A$ . . . . .                                | 112       |
| 5.3.5    | Stabilität zeitdiskreter linearer Systeme . . . . .                      | 116       |
| 5.4      | Nullstellen und Minimalphasigkeit . . . . .                              | 116       |
| 5.4.1    | Die Nullstelle als interne Abkürzung . . . . .                           | 117       |
| 5.4.2    | Die Nullstellen und spezielle Eingangssignale . . . . .                  | 119       |
| 5.4.3    | Instabile Nullstellen und Minimalphasigkeit . . . . .                    | 123       |
| 5.4.4    | Nullstellen in der zeitdiskreten Darstellung . . . . .                   | 124       |
| 5.5      | Steuerbarkeit . . . . .                                                  | 126       |
| 5.5.1    | Allgemeine Begriffe . . . . .                                            | 126       |
| 5.5.2    | Überprüfung der Steuerbarkeit bei linearen Systemen . . . . .            | 128       |
| 5.5.3    | Auswirkung der Beschränkungen . . . . .                                  | 130       |
| 5.5.4    | Maß der Steuerbarkeit . . . . .                                          | 131       |
| 5.6      | Beobachtbarkeit . . . . .                                                | 133       |
| 5.6.1    | Allgemeine Begriffe . . . . .                                            | 133       |
| 5.6.2    | Überprüfung der Beobachtbarkeit bei linearen Systemen . . . . .          | 134       |
| 5.6.3    | Maß der Beobachtbarkeit . . . . .                                        | 135       |

|          |                                                               |            |
|----------|---------------------------------------------------------------|------------|
| 5.7      | Informationsgehalt von Modellen und Modellreduktion . . . . . | 136        |
| 5.7.1    | Zeitskalenzerlegung . . . . .                                 | 136        |
| 5.7.2    | Modellreduktion anhand Steuer- und Beobachtbarkeit . . . . .  | 137        |
| <b>6</b> | <b>Einführung in die Regelung als Systemerweiterung</b>       | <b>141</b> |
| 6.1      | Bestandteile einer Regelung . . . . .                         | 141        |
| 6.2      | Zusammenschaltung von Systemen . . . . .                      | 143        |
| 6.2.1    | Serienschaltung . . . . .                                     | 143        |
| 6.2.2    | Parallelschaltung . . . . .                                   | 145        |
| 6.2.3    | Kreisschaltung . . . . .                                      | 146        |
| 6.3      | Herausforderungen in der Regelungstechnik . . . . .           | 147        |
| 6.3.1    | Stabilisierung . . . . .                                      | 148        |
| 6.3.2    | Folgeregelung . . . . .                                       | 150        |
| 6.3.3    | Störungsunterdrückung . . . . .                               | 152        |
| 6.4      | Ansätze zum Reglerentwurf . . . . .                           | 152        |
| 6.4.1    | Zustandsregelung . . . . .                                    | 152        |
| 6.4.2    | PID-Regelung . . . . .                                        | 158        |
| 6.5      | Ausblick . . . . .                                            | 164        |
| <b>A</b> | <b>Mathematische Werkzeuge</b>                                | <b>167</b> |
| A.1      | Lineare Algebra . . . . .                                     | 167        |
| A.1.1    | Norm . . . . .                                                | 167        |
| A.1.2    | Auswirkung von Matrizen auf Vektoren . . . . .                | 170        |
| A.1.3    | Koordinatentransformation . . . . .                           | 171        |
| A.2      | Hinweise zur Differentialrechnung . . . . .                   | 173        |
| <b>B</b> | <b>Normalformen</b>                                           | <b>175</b> |
| B.1      | Diagonalform und Jordan-Normalform . . . . .                  | 175        |
| B.1.1    | Diagonalform . . . . .                                        | 175        |
| B.1.2    | Jordan-Normalform . . . . .                                   | 177        |
| B.1.3    | Kanonische Dekomposition . . . . .                            | 179        |
| B.2      | Regelungs- und Beobachternormalform . . . . .                 | 180        |
| B.2.1    | Regelungsnormalform . . . . .                                 | 181        |
| B.2.2    | Beobachternormalform . . . . .                                | 183        |
|          | <b>Literaturverzeichnis</b>                                   | <b>185</b> |