

# Inhaltsverzeichnis

|   |            |
|---|------------|
| <b>Vorwort</b>  | <b>V</b>   |
| <b>1 Simulation mechanischer Systeme</b>  | <b>1</b>   |
| 1.1 Simulation eines einfachen Modells einer Radaufhängung .....                        | 1          |
| 1.1.1 Homogene Lösung .....   | 2          |
| 1.1.2 Partikuläre und allgemeine Lösung .....   | 9          |
| 1.1.3 Partikuläre Lösung für Zufallsanregung .....                                      | 14         |
| 1.2 Simulation einer Radaufhängung mit zwei Achsen .....                                | 19         |
| 1.2.1 Homogene und partikuläre Lösung .....   | 21         |
| 1.3 Feder-Masse-System mit Unwuchtanregung .....  | 36         |
| 1.3.1 Anlaufen des Systems mit Unwuchtanregung .....                                    | 47         |
| 1.4 Simulation der Selbstsynchronisation von zwei Unwuchttrotoren .....                 | 53         |
| 1.5 Simulation der Vorgänge in der Vibrationsfördertechnik .....                        | 59         |
| 1.5.1 Simulation einer Förderung mit Mikrowürfen .....                                  | 60         |
| 1.5.2 Simulation einer Förderung mit Haft- und Gleitreibung .....                       | 65         |
| 1.5.3 Die Förderung basierend auf dem Gleitprinzip .....                                | 68         |
| 1.6 Simulation von Schwingungstilgern .....   | 73         |
| 1.6.1 Feder-Masse-System ohne Tilger .....  | 73         |
| 1.6.2 Untersuchung einer passiven Tilgung .....   | 78         |
| 1.6.3 Identifikation der Übertragungsfunktion mit einem Gauß-Puls<br>als Anregung ..... | 89         |
| 1.6.4 Untersuchung einer Tilgung mit elektrischem Dämpfer .....                         | 95         |
| 1.7 Untersuchung von Systemen mit Reibung .....   | 100        |
| 1.7.1 Reibungskraftmodelle .....  | 101        |
| 1.7.2 Dynamische Reibungsmodelle. Das Dahl-Modell .....                                 | 107        |
| 1.7.3 Das dynamische LuGre-Modell .....   | 109        |
| 1.7.4 Untersuchungen des Slip-Stick-Phänomens .....                                     | 112        |
| 1.7.5 Positionsregelung für ein System mit Reibung .....                                | 125        |
| 1.7.6 <i>Differential-Filter</i> zur Schätzung der Geschwindigkeit .....                | 132        |
| <b>2 Simulation elektronischer Systeme</b>  | <b>141</b> |
| 2.1 Der <i>Step-Down</i> -Wandler .....   | 141        |
| 2.1.1 Simulink-Simulation des <i>Step-Down</i> -Wandlers .....                          | 144        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 2.1.2    | Simulink-Simulation des <i>Step-Down</i> -Wandlers mit Spannungsregler .....                         | 148        |
| 2.1.3    | <i>Step-Down</i> -Wandler mit nicht idealem Kondensator .....  | 151        |
| 2.2      | Simulation eines <i>Step-Up</i> -Wandlers .....  | 153        |
| 2.3      | Simulation eines Invertierenden-DC-DC-Wandlers .....   | 158        |
| 2.4      | Simulation eines DC-DC-Cuk-Wandlers .....  | 164        |
| 2.5      | Simulation eines DC-DC-SEPIC-Wandlers .....  | 168        |
| 2.5.1    | DC-DC-SEPIC-Wandler mit gekoppelten Induktivitäten .....   | 171        |
| 2.6      | Simulation eines Lock-In-Verstärkers .....   | 176        |
| 2.6.1    | Das Prinzip des Lock-In-Verfahrens .....   | 178        |
| 2.6.2    | Digitale Tiefpassfilter mit sehr kleinem Durchlassbereich .....                                      | 179        |
| 2.6.3    | Simulation eines digitalen Lock-In-Verstärkers .....   | 184        |
| <b>3</b> | <b>Simulation von Anwendungen aus dem Bereich der Regelungstechnik</b> .....                         | <b>193</b> |
| 3.1      | Simulation von Zweipunktreglern .....  | 193        |
| 3.1.1    | Einfache Zweipunktregelung mit Hysterese .....   | 193        |
| 3.1.2    | Untersuchung eines Zweipunktreglers mit Hysterese und verzögerter und nachgebender Rückführung ..... | 198        |
| 3.2      | Simulation einer Füllstandsregelung .....  | 207        |
| 3.2.1    | Modell eines Dreitanksystems .....   | 208        |
| 3.2.2    | Mathematische Linearisierung des Dreitanksystems .....   | 213        |
| 3.2.3    | PID-Regelung des Füllstandes des dritten Tanks .....   | 216        |
| 3.2.4    | Zweipunktregelung des Füllstandes .....  | 220        |
| 3.3      | Untersuchung einer aktiven Tilgung .....   | 223        |
| 3.3.1    | Vereinfachte Analyse über Übertragungsfunktionen .....   | 227        |
| 3.3.2    | Überprüfen der vereinfachten Übertragungsfunktionen .....  | 233        |
| 3.3.3    | Die aktive Tilgung mit zufälliger Anregung .....   | 238        |
| 3.4      | Simulation der Positionierung einer Laufkatze mit Pendellast .....                                   | 241        |
| 3.4.1    | Simulink-Modell der Laufkatze mit Pendellast .....   | 241        |
| 3.4.2    | Positionsregelung der Laufkatze .....  | 246        |
| 3.5      | Simulation der Anti- <i>Windup</i> -Lösungen .....   | 249        |
| 3.5.1    | Anti- <i>Windup</i> -Lösung mit <i>Clamping</i> .....  | 249        |
| 3.5.2    | Anti- <i>Windup</i> -Lösung mit <i>Back-Calculation</i> .....  | 252        |
| 3.6      | Simulation von Zustandsreglern .....   | 253        |
| 3.6.1    | Einfaches Beispiel für die Polplatzierung .....  | 254        |
| 3.6.2    | Polplatzierung für ein Servosystem .....   | 259        |
| 3.6.3    | Servosystem mit Polplatzierung durch Rückführungsmatrix und Regelung mit I-Wirkung .....             | 261        |
| 3.6.4    | Simulation eines Beobachters .....   | 269        |
| 3.6.5    | Anti- <i>Windup</i> für Zustandsregelungen .....   | 278        |
| 3.6.6    | Optimale LQR-Regelung .....  | 280        |

---

|                             |   |            |
|-----------------------------|---|------------|
| 3.6.7                       | Kalman-Filter für die Schätzung der Zustandsvariablen.....                  | 284        |
| 3.6.8                       | LQR-Regelung mit Kalman-Filter für die Schätzung der Zustandsvariablen..... | 296        |
| 3.6.9                       | LQR-Regelung mit zeitdiskretem Kalman-Filter .....                          | 301        |
| 3.6.10                      | Diskretes Kalman-Filter zur Sensorsignalverarbeitung .....                  | 305        |
| 3.6.11                      | Zeitabhängiges, zeitdiskretes Kalman-Filter .....                           | 311        |
| 3.6.12                      | Schlussbemerkungen .....  | 317        |
| <b>Literaturverzeichnis</b> |   | <b>319</b> |
| <b>Index</b>                |   | <b>325</b> |