

|   |             |
|---|-------------|
| <b>Formelzeichen und Indizes</b> . . . . .                                | <b>VIII</b> |
| <b>Eigennamen und Abkürzungen</b> . . . . .                               | <b>XIV</b>  |
| <b>1 Einleitung</b> . . . . .   | <b>1</b>    |
| <b>2 Modellbildung</b> . . . . .  | <b>4</b>    |
| 2.1 Systemübersicht . . . . .   | 4           |
| 2.2 Rad-Schiene-Kontakt . . . . .   | 7           |
| 2.3 Mechanik des Antriebsstranges . . . . .                               | 11          |
| 2.3.1 Aufbau . . . . .  | 11          |
| 2.3.2 Torsionsschwingungersatzsystem . . . . .                            | 13          |
| 2.3.3 Differentialgleichungssystem . . . . .                              | 15          |
| 2.3.4 Eigenfrequenzen und Eigenschwingungsformen . . . . .                | 17          |
| 2.3.5 Ordnungsreduktion . . . . .   | 21          |
| 2.4 Stellglied . . . . .  | 24          |
| 2.4.1 Regelungstechnisches Strukturbild . . . . .                         | 24          |
| 2.4.2 Konventionelles Stellglied . . . . .                                | 26          |
| 2.4.3 Einsatz der Direkten Selbstregelung (DSR) . . . . .                 | 28          |
| 2.5 Zustandsraumdarstellung des Systems . . . . .                         | 37          |
| 2.5.1 Zustandsraummethodik . . . . .                                      | 37          |
| 2.5.2 Drei- und Zwei-Massen-Schwinger . . . . .                           | 39          |
| 2.5.3 Dämpfung durch den Rad-Schiene-Kontakt . . . . .                    | 43          |
| 2.5.4 Normierung . . . . .  | 46          |
| <b>3 Entwurf und Simulation der aktiven Schwingungsdämpfung</b> . . . . . | <b>48</b>   |
| 3.1 Motivation und Überblick . . . . .                                    | 48          |
| 3.2 Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit . . . . .                           | 52          |
| 3.3 Entwurfsverfahren . . . . .   | 53          |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 3.3.1    | Verfahren der Polvorgabe . . . . .                                    | 53         |
| 3.3.2    | Methode der Optimierung eines quadratischen Gütekriteriums . . . . .  | 54         |
| 3.4      | Prinzipien beim Entwurf des Zustandsreglers . . . . .                 | 55         |
| 3.4.1    | Entwurf eines einfachen Zustandsreglers . . . . .                     | 55         |
| 3.4.2    | Simulation des einfachen Zustandsreglers . . . . .                    | 57         |
| 3.4.3    | Methoden gegen bleibende Regelabweichung . . . . .                    | 59         |
| 3.4.4    | Vergleich der Entwurfsverfahren . . . . .                             | 62         |
| 3.5      | Zeitdiskretisierung . . . . .   | 63         |
| 3.6      | Schätzeinrichtung . . . . .   | 65         |
| 3.6.1    | Luenberger-Beobachter . . . . .                                       | 65         |
| 3.6.2    | Stochastische Optimalfilter . . . . .                                 | 74         |
| 3.6.3    | Vergleich und Bewertung der Schätzverfahren . . . . .                 | 82         |
| 3.7      | Robustheit . . . . .  | 84         |
| 3.8      | Vergleich mit einem konventionellen Drehzahlregler . . . . .          | 85         |
| 3.8.1    | Einschleifige Drehzahlregelung . . . . .                              | 85         |
| 3.8.2    | Vergleich bei deterministischer Belastung . . . . .                   | 86         |
| 3.8.3    | Vergleich bei stochastischer Belastung . . . . .                      | 88         |
| 3.8.4    | Betrieb bei negativer Kennliniensteigung . . . . .                    | 90         |
| 3.9      | Vergleich $PT_1$ - und $PT_2$ -Nachbildung des Stellgliedes . . . . . | 92         |
| <b>4</b> | <b>Prüfstand für Traktionsantriebsregelungen . . . . .</b>            | <b>100</b> |
| 4.1      | Zielsetzung . . . . .   | 100        |
| 4.2      | Aufbau . . . . .  | 103        |
| 4.3      | Struktur der Signalverarbeitung auf der Antriebsseite . . . . .       | 109        |
| 4.4      | Dynamisches Verhalten . . . . .                                       | 114        |
| <b>5</b> | <b>Prüfstandsergebnisse der aktiven Schwingungsdämpfung . . . . .</b> | <b>116</b> |
| 5.1      | Konventionelle einschleifige Drehzahlregelung . . . . .               | 116        |
| 5.2      | Zwei-Massen-Zustandsregelung . . . . .                                | 121        |
| 5.3      | Drei-Massen-Zustandsregelung . . . . .                                | 125        |
| 5.4      | Vergleich und Bewertung . . . . .                                     | 129        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| <b>6</b> | <b>Suchlogik mit variablem Arbeitsintervall . . . . .</b>                        | <b>130</b> |
| 6.1      | Zielsetzung . . . . .  | 130        |
| 6.2      | Beschreibung der Suchlogik . . . . .   | 133        |
| 6.3      | Erprobung am Prüfstand . . . . .   | 135        |
| 6.4      | Vergleichende Simulationen der neuen Suchlogik und anderer Verfahren .           | 139        |
| 6.4.1    | Einheitliche Simulationsumgebung . . . . .                                       | 140        |
| 6.4.2    | Neue Suchlogik . . . . .   | 142        |
| 6.4.3    | Suchlogik nach Schwartz . . . . .  | 146        |
| 6.4.4    | Suchlogik nach Schwartz mit Zustandsregelung . . . . .                           | 150        |
| 6.4.5    | Abschließender Vergleich zwischen den Verfahren . . . . .                        | 154        |
| <b>7</b> | <b>Schlußbetrachtung und Ausblick . . . . .</b>                                  | <b>156</b> |
|          | <b>Anhang A: Daten der Lokomotive Baureihe 120 . . . . .</b>                     | <b>158</b> |
| 1.       | Allgemeine Daten . . . . .   | 158        |
| 2.       | Drehstromantrieb, Fahrmotor . . . . .  | 158        |
| 3.       | Mechanischer Antriebsstrang . . . . .  | 158        |
| 3.1      | 6-Massen-Modell . . . . .  | 158        |
| 3.2      | 3-Massen-Modell . . . . .  | 159        |
|          | <b>Anhang B: Matrizen und Vektoren des Kalman-Bucy-Filters . . . . .</b>         | <b>160</b> |
|          | <b>Anhang C: Daten des Prüfstandes für Traktionsabtriebsregelungen . . . . .</b> | <b>161</b> |
| 1.       | Elektrische Maschinen . . . . .  | 161        |
| 1.1      | Fahrmotornachbildung . . . . .   | 161        |
| 1.2      | Lastmaschine 1 . . . . .   | 161        |
| 1.3      | Lastmaschine 2 . . . . .   | 161        |
| 2.       | Massenträgheiten, Federsteifigkeiten und Dämpfungskonstanten . . . . .           | 162        |
| 3.       | Daten des Drei-Massen-Schwingers . . . . .                                       | 163        |
| 4.       | Daten des Zwei-Massen-Schwingers . . . . .                                       | 163        |
|          | <b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>  | <b>164</b> |