

Dietrich Wende

Fahrdynamik des Schienenverkehrs

Mit 164 Abbildungen, 83 Tabellen
und 83 Berechnungsbeispielen



Teubner

B. G. Teubner Stuttgart · Leipzig · Wiesbaden

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Statik und Dynamik der Fahrbewegung | 1 |
| 1.1 | Zusammenhang zwischen Kraft und Bewegung | 1 |
| 1.2 | Kräfte der Fahrbewegung | 2 |
| 1.2.1 | Bezeichnung der Kräfte | 2 |
| 1.2.2 | Gleichgewicht der Kräfte | 5 |
| 1.2.3 | Fahrdynamische Grundgleichung | 6 |
| 1.2.4 | Koeffizienten der Kräfte | 8 |
| 1.2.5 | Drehmasse | 10 |
| 1.2.6 | Beschleunigungen der Kräfte | 14 |
| 1.2.7 | Fahrbewegung an der Kraftschlussgrenze | 15 |
| 1.3 | Arbeit, Energie und Leistung der Fahrbewegung | 17 |
| 1.3.1 | Zugkraftarbeit | 17 |
| 1.3.2 | Kinetische und potentielle Energie | 19 |
| 1.3.3 | Berechnungen mit dem Energiesatz | 21 |
| 1.3.3.1 | Arbeit der Bremskraft | 21 |
| 1.3.3.2 | Ablaufberghöhe | 21 |
| 1.3.3.3 | Experimentelle Massenfaktorermittlung | 23 |
| 1.3.4 | Leistung | 25 |
| 1.4 | Variablen der Zugkraft | 27 |
| 1.5 | Tabellen und Diagramme der Zugförderung | 29 |
| 2 | Kinematik der Fahrbewegung | 33 |
| 2.1 | Grundbegriffe | 33 |
| 2.2 | Integration von Beschleunigungsgleichungen | 37 |
| 2.2.1 | Konstante Geschwindigkeit und Beschleunigung | 37 |
| 2.2.2 | Zeitabhängige Beschleunigung | 38 |
| 2.2.3 | Geschwindigkeitsabhängige Beschleunigung | 43 |
| 2.2.3.1 | Lineare Geschwindigkeitsabhängigkeit | 43 |
| 2.2.3.2 | Nichtlineare Geschwindigkeitsabhängigkeit (e-Funktion) | 45 |
| 2.2.3.3 | Nichtlineare Geschwindigkeitsabhängigkeit (allgemeine Exponentialfunktion) | 49 |
| 2.2.3.4 | Beschleunigungsparabel $a(v)$ | 51 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.2.4 | Zeitabhängige Geschwindigkeit | 54 |
| 2.3 | Integration mittels Schrittverfahren | 57 |
| 2.3.1 | Gliederung der Verfahren | 57 |
| 2.3.2 | Makroschrittverfahren | 57 |
| 2.3.3 | Mikroschrittverfahren | 64 |
| 2.4 | Mittlere Geschwindigkeiten, Beschleunigungen und Ruckwerte | 66 |
| 2.5 | Differentiation von Gleichungen und Tabellen der Fahrbewegung | 72 |
| 2.5.1 | Grundlagen und Zielsetzung | 72 |
| 2.5.2 | Gleichungen der mittleren Beschleunigungen | 73 |
| 2.5.3 | Differenzenquotientenverfahren | 78 |
| 2.5.4 | Polynomgleittechnik | 80 |
| 2.6 | Fahrbewegung im Gleisbogen | 84 |
| 3 | Neigungs- und Widerstandskraft | 91 |
| 3.1 | Neigung und Neigungskraft | 91 |
| 3.1.1 | Streckenlängsneigung und Neigungskraft | 91 |
| 3.1.2 | Effektive Neigung | 96 |
| 3.2 | Bogenwiderstandskraft | 98 |
| 3.2.1 | Definition und Ursachen | 98 |
| 3.2.2 | Berechnung der Bogenwiderstandskomponenten | 99 |
| 3.2.3 | Bogenwiderstandszahl | 105 |
| 3.3 | Fahrzeug- und Zugwiderstandskraft | 108 |
| 3.3.1 | Zusammensetzung | 109 |
| 3.3.2 | Grundwiderstandskraft | 110 |
| 3.3.3 | Anfahrwiderstandskraft | 116 |
| 3.3.4 | Äußere Luftwiderstandskraft | 119 |
| 3.3.4.1 | Geschwindigkeitsbeziehungen an Fahrzeug und Zug | 119 |
| 3.3.4.2 | Strömungstechnische Grundlagen | 121 |
| 3.3.4.3 | Einzelfahrzeug | 124 |
| 3.3.4.4 | Fahrzeuggruppe | 127 |
| 3.3.4.5 | Zug | 135 |
| 3.3.4.6 | Tunnel | 138 |
| 3.3.4.7 | Nichtstationäre Vorgänge | 141 |
| 3.3.5 | Innere Luftwiderstandskraft | 141 |
| 3.3.6 | Antriebssystemwiderstandskraft | 143 |
| 3.3.7 | Fahrzeug- und Zugwiderstandskraft insgesamt | 144 |
| 3.4 | Zugwiderstandskraft des Transrapid | 148 |

| | |
|--|------------|
| Inhaltsverzeichnis | IX |
| 3.5 Fahrzeug- und Zugwiderstandsgleichungen | 151 |
| 4 Zugkraft | 157 |
| 4.1 Kraftschlusszug- und -bremskraft | 157 |
| 4.1.1 Fahrgrenzen und Kraftschluss | 157 |
| 4.1.2 Physikalische Kraftschluss­theorie | 159 |
| 4.1.2.1 Radschlupf | 159 |
| 4.1.2.2 Bestandteile des Kraftschlussbeiwerts | 160 |
| 4.1.2.3 Kraftschluss-Schlupf-Gesetz | 161 |
| 4.1.2.4 Variable des Kraftschlussbeiwerts | 165 |
| 4.1.3 Statistische Kraftschluss­theorie | 171 |
| 4.1.4 Kraftschlussgleichungen und Kraftschlussbeiwerte | 175 |
| 4.1.5 Ausnutzungsfaktor | 178 |
| 4.2 Zugkraft und Leistungsaufnahme der Dieselt­riebfahrzeuge | 183 |
| 4.2.1 Energiefluss zur Zugk­rafterzeugung | 183 |
| 4.2.2 Dieselmotor | 186 |
| 4.2.3 Mechanisches Wechsel­getriebe | 190 |
| 4.2.4 Hydrodynamisches Ge­triebe | 194 |
| 4.2.5 Elektrische Leistungs­übertragung | 201 |
| 4.3 Zugkraft und Leistungsaufnahme der elektrischen Triebfahrzeuge | 203 |
| 4.3.1 Gleichstromtriebfahrzeuge | 203 |
| 4.3.2 Wechselstromtriebfahrzeuge | 209 |
| 4.3.3 Drehstromantriebstechnik | 213 |
| 4.3.4 Transrapidtechnik | 216 |
| 4.3.5 Erwärmung und Grenz­temperatur | 218 |
| 5 Bremskraft | 219 |
| 5.1 Bremssystem der Züge | 219 |
| 5.2 Bremsk­rafterzeugung | 225 |
| 5.2.1 Klotz- und Belagskraft | 225 |
| 5.2.2 Bremskraft von Klotz- und Scheibenbremse | 229 |
| 5.2.3 Klotz- und Belagsreibwert | 231 |
| 5.2.4 Bremskraft alternativer Bremsen | 238 |
| 5.2.5 Zeitabhängigkeit | 246 |
| 5.2.6 Bremsmanagement | 250 |
| 5.3 Bremsweg- und Brems­fahrtberechnung | 252 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5.3.1 | Mindener Bremsweggleichung | 252 |
| 5.3.2 | Berechnung mit Bremsablaufmodellen | 254 |
| 5.3.2.1 | Grundlagen | 254 |
| 5.3.2.2 | Zweiteiliges Bremsablaufmodell mit Sprungfunktion | 255 |
| 5.3.2.3 | Dreiteiliges Bremsablaufmodell | 258 |
| 5.3.2.4 | Schrittintegration | 262 |
| 5.3.3 | Bremskraftbeschleunigung der Fahrzeuge | 262 |
| 5.3.4 | Betriebsbremsung im konventionellen Verkehr | 269 |
| 5.3.5 | Betriebsbremsung im Hochgeschwindigkeitsverkehr | 276 |
| 5.4 | Bremsbewertung | 280 |
| 5.4.1 | Bremsversuche | 280 |
| 5.4.2 | Bremsgewicht und Bremsbewertungsblatt | 287 |
| 5.4.3 | Mindestbremshundertstel und Bremsstafel | 295 |
| 5.4.4 | Fahrdynamischer Bremswert und Bremsstafel | 298 |
| 6 | Zugfahrtberechnung | 303 |
| 6.1 | Grundlagen | 303 |
| 6.2 | Nahverkehrsfahrschaubild | 306 |
| 6.2.1 | Fahrschaubildvarianten | 306 |
| 6.2.2 | Fahrschaubildberechnung mit konstanter Beschleunigung | 308 |
| 6.2.2.1 | Vorbereitung der Berechnungen | 308 |
| 6.2.2.2 | Fahrschaubilder ohne Auslauf und Abrollen | 310 |
| 6.2.2.3 | Fahrschaubilder mit Auslauf | 312 |
| 6.2.2.4 | Fahrschaubilder mit Abrollen | 315 |
| 6.2.3 | Fahrschaubildberechnung mit geschwindigkeitsabhängiger Beschleunigung | 319 |
| 6.2.3.1 | Fahrschaubildberechnung mit Gleichungen für Anfahrt und Auslauf | 319 |
| 6.2.3.2 | Fahrschaubildberechnung durch Simulation | 322 |
| 6.2.3.3 | Zugkraftarbeit und Energieverbrauch | 324 |
| 6.3 | Fernverkehrsfahrschaubild | 327 |
| 6.3.1 | Zugfahrtberechnungsprogramm | 327 |
| 6.3.2 | Zugkraftarbeit, Kraftstoff- und Energieverbrauch | 330 |
| 6.3.3 | Energieoptimale Fahrstrategie | 333 |
| 6.4 | Zugfahrtschreiberdiagramme | 337 |
| 6.5 | Fahrdynamische Unfallanalyse | 339 |
| | Literaturverzeichnis | 343 |
| | Stichwortverzeichnis | 351 |