

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

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 Bremsfahrberechnung	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	Mindestbremsleistung und Bremsstapel	295
5.4.4	Fahrdynamischer Bremswert und Bremsleistung	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