

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1 Grundlegende Aufgaben des Rad/Schiene-Systems	1
1.2 Bedeutung der Dynamik für den Betrieb von Schienenfahrzeugen	2
1.3 Zur Geschichte der bahntechnischen Forschung seit 1800	4
1.3.1 Von 1800 bis 1945	4
1.3.2 Neuanfang nach 1945: Japan und Frankreich	8
1.3.3 Forschung und Entwicklung in Deutschland zur Überwindung der „Grenzen des Rad/Schiene-Systems“	11
1.4 Bahntechnische Industrie in Europa	13
1.5 Übersicht über das Buch	14
1.5.1 Einteilung in Gruppen	14
1.5.2 Vertikalschwingungen und Lateralenschwingungen	14
1.5.3 Bogenlauf	15
1.5.4 Frequenzbereichsrechnung und Zeitbereichsrechnung	15
2. Modellierung von Fahrzeug, Gleis und Anregung	17
2.1 Vorüberlegungen und Koordinatensysteme	17
2.2 Fahrzeugmodellierung	18
2.2.1 Laufwerkskonstruktionen, Radsatzfesselungen und Drehgestellführungen	18
2.2.2 Mechanisches Modell des Fahrzeugs. Verbindungselemente	23
2.2.3 Elastische Wagenkästen	24
2.3 Modellierung des Gleises und der Anregung	26
2.3.1 Gleismodellierung	26
2.3.2 Modellierung der Anregung	28
3. Modellierung des Rad/Schiene-Kontaktes	33
3.1 Profilgeometrie	34
3.2 Kinematik des Kontakts von Rad und Schiene	37
3.2.1 Kinematik des Kontakts bei konischen Profilen und Kreisprofilen	37
3.2.2 Kontaktkinematik bei beliebigen Profilen	43

3.2.3	Zur Ermittlung der äquivalenten Berührkenngrößen mit der Methode der Quasilinearisierung	45
3.2.4	Umrechnung in äquivalente Kreisprofile	48
3.2.5	Linearisierte Kontaktkinematik mit Gleislagefehlern ..	49
3.2.6	Schlupfberechnung.....	50
3.3	Normalkontaktmechanik.....	52
3.3.1	Überblick zur Kontaktspannungsberechnung	52
3.3.2	Annahmen zum Normalkontaktproblem	52
3.3.3	Nichtelliptische Kontaktflächen	53
3.3.4	Behandlung des Normalkontaktproblems nach Hertz ..	54
3.3.5	Kugelkontakt oder Punktkontakt (point contact)	57
3.3.6	Ellipsoidkontakt	57
3.3.7	Walzenkontakt, Linienkontakt	59
3.3.8	Linearisiertes Ersatzmodell	60
3.4	Tangentialkontaktechanik	60
3.4.1	Einführung in das Tangentialkontaktechanikproblem	60
3.4.2	Analytische Lösung für Walzenkontakt (Linienkontakt)	64
3.4.3	Kalkers Theorie des Rollkontakts für Ellipsoidkontakt	66
3.4.4	Näherungslösung nach Vermeulen-Johnson und Shen-Hedrick-Elkins	68
3.4.5	Vereinfachte Theorie des rollenden Kontaktes [107] ..	72
3.4.6	Anpassung der Theorie an die Praxis	78
4.	Vertikaldynamik. Bewegungsgleichungen und freie Schwingungen	79
4.1	Bezeichnungen und Annahmen	79
4.2	Bewegungsdifferentialgleichungen mit Impuls und Drallsatz ..	80
4.2.1	Verschiebungsfreiheitsgrade beim Zweiachser	81
4.2.2	Zwangbedingungen	82
4.2.3	Kräfte in den Feder- und Dämpferelementen	82
4.2.4	Freischneiden der Einzelmassen	85
4.2.5	Impuls- und Drallsatz zum Aufstellen des Gleichungssystems	87
4.2.6	Elimination der Zwangskräfte. Endgültiges Gleichungssystem	87
4.3	Prinzip der virtuellen Verrückungen für Starrkörpersysteme..	90
4.3.1	Vorbemerkungen	90
4.3.2	Formulierung des Prinzips der virtuellen Verrückungen	90
4.3.3	Einbau kinematischer Zwangbedingungen. Beispiel Fahrzeug	93
4.4	Aufstellen der Bewegungsgleichungen mit dem Prinzip	94
4.4.1	Verschiebungsvektor mit den Freiheitsgraden des freigeschnittenen Systems	94
4.4.2	Zusammenhang zwischen Federdehnungen und Systemverschiebungen	94

4.4.3	Angabe der Federgesetze und Formulierung der virtuellen Formänderungsenergie	95
4.4.4	Angabe der Massenmatrix und Formulierung der virtuellen Arbeit der Massenträgheitskräfte	96
4.4.5	Äußere Belastungen und Zwangskräfte	96
4.4.6	System von Bewegungsdifferentialgleichungen des freien Systems. Einführung von Zwangsbedingungen	97
4.5	Bewegungsgleichungen für elastische Wagenkästen	98
4.6	Lösung für freie Schwingungen	100
4.7	Übungsaufgaben zu Kapitel 4	103
4.7.1	Zwangskräfte bei Erfüllung der Zwangsbedingungen ..	103
4.7.2	Gültigkeit der Rollbedingung	103
5.	Erzwungene Vertikalschwingungen, Frequenzbereichslösung	105
5.1	Komplexe Schreibweise	106
5.2	Vertikalschwingungen beim Abrollen über ein Cosinusgleis ...	109
5.2.1	Gleislagefehler und Fußpunktanregung	109
5.2.2	Lösung für die Tauchbewegung	110
5.2.3	Interpretation der Lösung	113
5.3	Fahrzeug auf allgemein periodischem Gleis	117
5.4	Lösung für ein Fahrzeug mit elastischem Wagen	121
5.5	Aufgaben zu Kapitel 5	122
5.5.1	Zweiachsiges Fahrzeug auf Cosinusgleis	122
5.5.2	Zweiachser auf allgemein periodischem Gleis	123
6.	Regellose Schwingungen	125
6.1	Charakterisierung einer unregelmäßigen Fahrbahn	125
6.2	Ermittlung der Fahrzeugantwort bei regelloser Gleisanregung	127
6.3	Spektrale Leistungsdichten von Gleislagefehlern	131
6.3.1	Einige Anmerkungen zur Ermittlung der spektralen Leistungsdichte der Gleislagefehler	131
6.3.2	Spektrale Leistungsdichten für das Netz der DB	133
6.4	Wegkreisfrequenzen und Zeitkreisfrequenzen	137
6.5	Bedeutung des Antwortleistungsspektrums	137
7.	Schwingungseinwirkungen auf den Menschen - Komfortbeurteilung	139
7.1	Wertungsziffer nach Sperling	140
7.1.1	Allgemein periodische Schwingungen	143
7.1.2	Regellose Schwingungen	145
7.2	ISO 2631	146
7.3	CEN Norm ENV 12299	149
7.3.1	Vereinfachtes Kriterium für mittleren Komfort – N_{MV}	150
7.3.2	Komfortstörungen in Übergangskurven – P_{CT}	151
7.3.3	Diskrete Komfortstörungen – P_{DE}	153

7.4	Abschlussbemerkungen	154
7.4.1	Messen oder Rechnen	154
7.4.2	Komfort als Systemeigenschaft	154
7.4.3	Einwirkungsdauer einer komfortbeeinträchtigenden Schwingung	155
7.5	Übungsaufgaben zu Kapitel 7	155
7.5.1	Berechnen der Wertungsziffer nach Sperling	155
8.	Einführung in die Lateralodynamik	157
8.1	Vorbemerkung	157
8.2	Sinuslauf und Klingelformel	161
8.3	Voraussetzungen und Annahmen bei der Ableitung der Klingel-Formel	164
8.4	Bestimmung der wirksamen Konizität mit Gleichung (8.13) ..	166
9.	Bewegungsgleichungen für die Lateralodynamik	167
9.1	Prinzip für einen gefesselten Radsatz	167
9.1.1	Betrachtetes System und einwirkende Kräfte	167
9.1.2	Formulierung des Prinzips der virtuellen Verrückungen	169
9.1.3	Ermittlung der virtuellen Verschiebungen	170
9.1.4	Gleichgewichtsbedingungen in x -Richtung und um die y -Achse	173
9.1.5	Gleichgewichtsbedingungen in y -Richtung und um die z -Achse	173
9.2	Übungsaufgaben zu Kapitel 9	175
9.2.1	Interpretation der Schlupfkraftterme in Gl (9.13)	175
9.2.2	Rollwiderstand infolge Bohrschlupf	175
9.2.3	Bewegungsgleichungen für erzwungene Lateralschwingungen	175
9.2.4	Rollwiderstand in der vereinfachten Theorie	176
9.2.5	Nummerische Besetzung der Bewegungsdifferentialgleichung eines gefesselten Radsatzes	176
9.2.6	Schlupfkräfte bei Annahme eines nicht schlupfkraftfreien Referenzzustandes	176
10.	Laterales Eigenverhalten eines Radsatzes	179
10.1	Ermittlung von Eigenwerten und Eigenvektoren	179
10.2	Wurzelortskurven	181
10.3	Näherungslösung für niedrige Geschwindigkeiten	183
10.4	Stabilitätsuntersuchung mit Beiwertbedingung oder Hurwitz-Kriterium	187
10.5	Kritische Geschwindigkeit eines Einzelradsatzes	189
10.6	Interpretation der Stabilitätsgrenzbedingung des Einzelradsatzes	190
10.7	Übungsaufgaben zu Kapitel 10	195

10.7.1 Charakteristische Gleichung	195
10.7.2 Transformation der Radsatz- Bewegungsdifferentialgleichung	195
10.7.3 Grafische Darstellung der Wurzelortskurven eines gefesselten Einzelradsatzes und Bestimmung der kritischen Geschwindigkeit	196
10.7.4 Losradsatz.....	196
11. Laterales Eigenverhalten und Stabilität von Drehgestellen	197
11.1 Numerische Ermittlung der Eigenwerte und der Grenzgeschwindigkeit	197
11.2 Analytische Näherungslösungen bei Drehgestellen	203
11.2.1 Koordinatentransformationen zur Einführung generализierter Verschiebungszustände	206
11.2.2 Drehgestelle mit unendlich großer Biege- und Schersteifigkeit.....	215
11.2.3 Konstruktive Realisierung sehr großer Biege- und Schersteifigkeiten.....	219
11.2.4 Drehgestelle mit unendlich großer Schersteifigkeit	220
11.2.5 Drehgestelle mit unendlich großer Biegesteifigkeit.....	223
11.2.6 Drehgestelle mit endlicher Biege- und Schersteifigkeit ..	224
11.3 Übungsaufgaben zu Kapitel 11	226
11.3.1 Bewegungsgleichungen eines Drehgestells	226
11.3.2 Bewegungsgleichungen eines frei rollenden Drehgestells bei niedrigen Geschwindigkeiten	227
11.3.3 Beziehungen für Biegesteifigkeit und Schersteifigkeit ..	227
12. Stabilität von Drehgestell-Fahrzeugen	229
12.1 Stabilität eines aus zwei Wagen bestehenden Zuges	229
12.2 Stabilität eines Drehgestellfahrzeugs	233
12.2.1 Sinuslauf eines Drehgestellfahrzeugs	234
12.2.2 Drehgestell-Sinuslauf	238
12.2.3 Auswirkung von Reibdrehhemmungen.....	239
12.3 Anregungen zur Weiterarbeit zu Kapitel 12	241
12.3.1 Abhängigkeit der Stabilität des Drehgestellfahrzeugs von Biege- und Schersteifigkeit	241
12.3.2 Stabilität eines Fahrzeugs mit Losradsätzen	241
12.3.3 Reibdrehhemmung und Drehhemmung mit viskosen Dämpfern	241
13. Nichtlineare Stabilitätsuntersuchungen	243
13.1 Vorbemerkung	243
13.2 Nichtlineare kritische Geschwindigkeit	244
13.3 Verfahren von Urabe und Reiter	246
13.4 Methode der Quasilineararisierung.....	250

13.5 Grenzen der Fourierzerlegung	252
13.6 Nichtlineare Stabilitätsberechnung im Zeitbereich	253
13.7 Anregungen zur Weiterarbeit zu Kapitel 13	253
13.7.1 Stabilitätsuntersuchung für das Boedecker-Fahrzeug ..	253
14. Quasistatischer Bogenlauf	255
14.1 Historische Vorbemerkung	255
14.2 Allgemeine Anmerkungen	256
14.3 Bogenlauf eines Radsatzes	257
14.3.1 Frei laufender Radsatz im Bogen (kinematischer Bogenlauf)	257
14.4 Radsatz im mitgeführten Rahmen	258
14.5 Bogenlauf von Drehgestellen und ganzen Fahrzeugen	266
14.5.1 Verfahren zur Berechnung des Bogenlaufes nach Uebelacker und Heumann	267
14.5.2 Kräfte beim Bogenlauf von Drehgestellen mit Federn	270
14.6 Verschleißberechnung im Rad-Schiene Kontakt	272
14.7 Übungsaufgaben zu Kapitel 14	275
14.7.1 Vorzeichen der Schlupfkräfte bei unterschiedlichen Radsatzstellungen	275
14.7.2 Schiefstellung und Versatz von Radsätzen	275
14.7.3 Bogenlauf eines Einzelradsatzes	276
15. Beanspruchungsermittlung von Fahrzeugkomponenten	277
15.1 Einleitung	277
15.2 Prinzipielle Vorgehensweise	278
15.3 Spannungsberechnung im Bauteil	280
15.3.1 FE-Rechnung in jedem Zeitschritt	280
15.3.2 Spannungsberechnung mit Hilfe von Transformationsmatrizen	281
15.4 Ermittlung von Beanspruchungskollektiven	283
15.4.1 Ermittlung ertragbarer Beanspruchungen	284
15.4.2 Zählverfahren zur Kollektivermittlung	286
15.4.3 Umrechnen des zweiparametrischen Kollektivs in ein einparametrisches Kollektiv	292
15.4.4 Superposition zum Gesamtkollektiv	294
15.5 Schadensakkumulation – Festigkeitsnachweis	296
15.5.1 Schadensakkumulationshypthesen	296
15.5.2 Konzepte zur Betriebsfestigkeitsberechnung bei Schienenfahrzeugen	297
15.6 Übungsaufgaben zu Kap. 15	299
15.6.1 Transformationsmatrix zwischen MKS-Freiheitsgraden und Spannungen im Drehgestell	299

15.6.2 Ermittlung des Belastungskollektivs der Federkräfte mit Hilfe der Spektraldichtemethode	299
16. Anhang	301
16.1 Formelzeichen	301
16.2 Koordinatensysteme	309
16.3 Grundlagen der Kontaktmechanik	311
16.3.1 Hertz'sche Kontaktmechanik	311
16.3.2 Kontaktgleichung	313
16.3.3 Grundgleichungen für das Tangentialkontaktproblem nach Carter	315
16.4 Funktion Φ für die Lösung nach Vermeulen-Johnson	318
16.5 Grundgleichungen der vereinfachten Rollkontakteorie	319
16.6 Stabilitätsbedingungen charakteristischer Gleichungen mit dem Hurwitz-Kriterium	320
16.7 v_{crit} mit Nebendiagonalgliedern der Dämpfungsmatrix	322
17. Literaturverzeichnis	323
Sachregister	337