

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	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 Lateralschwingungen	14
1.5.3 Bogenlauf	15
1.5.4 Frequenzbereichsrechnung und Zeitbereichsrechnung	15
<b>2. Modellierung von Fahrzeug, Gleis und Anregung</b>	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
<b>3. Modellierung des Rad/Schiene-Kontaktes</b>	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	Tangentialkontaktmechanik . . . . .	60
3.4.1	Einführung in das Tangentialkontaktproblem . . . . .	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
<b>4.</b>	<b>Vertikaldynamik. Bewegungsgleichungen und freie Schwingungen . . . . .</b>	<b>79</b>
4.1	Bezeichnungen und Annahmen . . . . .	79
4.2	Bewegungsdifferentialgleichungen mit Impuls und Drallsatz . .	80
4.2.1	Verschiebungsfreiheitsgrade beim Zweiachser . . . . .	81
4.2.2	Zwangsbedingungen . . . . .	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 Zwangsbedingungen. 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
<b>5.</b>	<b>Erzwungene Vertikalschwingungen, Frequenzbereichslösung</b>	<b>105</b>
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
<b>6.</b>	<b>Regellose Schwingungen</b> . . . . .	<b>125</b>
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
<b>7.</b>	<b>Schwingungseinwirkungen auf den Menschen - Komfortbeurteilung</b> . . . . .	<b>139</b>
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
<b>8.</b>	<b>Einführung in die Lateraldynamik . . . . .</b>	<b>157</b>
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
<b>9.</b>	<b>Bewegungsgleichungen für die Lateraldynamik . . . . .</b>	<b>167</b>
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 Lateralschwin- gungen . . . . .	175
9.2.4	Rollwiderstand in der vereinfachten Theorie . . . . .	176
9.2.5	Nummerische Besetzung der Bewegungsdifferentialglei- chung eines gefesselten Radsatzes . . . . .	176
9.2.6	Schlupfkraft bei Annahme eines nicht schlupfkraft- freien Referenzzustandes . . . . .	176
<b>10.</b>	<b>Laterales Eigenverhalten eines Radsatzes . . . . .</b>	<b>179</b>
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 Einzelrad- satzes . . . . .	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
<b>11.</b>	<b>Laterales Eigenverhalten und Stabilität von Drehgestellen</b>	<b>197</b>
11.1	Numerische Ermittlung der Eigenwerte und der Grenzgeschwindigkeit	197
11.2	Analytische Näherungslösungen bei Drehgestellen	203
11.2.1	Koordinatentransformationen zur Einführung generalisierter 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
<b>12.</b>	<b>Stabilität von Drehgestell-Fahrzeugen</b>	<b>229</b>
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
<b>13.</b>	<b>Nichtlineare Stabilitätsuntersuchungen</b>	<b>243</b>
13.1	Vorbemerkung	243
13.2	Nichtlineare kritische Geschwindigkeit	244
13.3	Verfahren von Urabe und Reiter	246
13.4	Methode der Quasilinearisierung	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
<b>14.</b>	<b>Quasistatischer Bogenlauf . . . . .</b>	<b>255</b>
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 Federung . . . . .	270
14.6	Verschleißberechnung im Rad-Schiene Kontakt . . . . .	272
14.7	Übungsaufgaben zu Kapitel 14 . . . . .	275
14.7.1	Vorzeichen der Schlupfkkräfte bei unterschiedlichen Radsatzstellungen . . . . .	275
14.7.2	Schiefstellung und Versatz von Radsätzen . . . . .	275
14.7.3	Bogenlauf eines Einzelradsatzes . . . . .	276
<b>15.</b>	<b>Beanspruchungsermittlung von Fahrzeugkomponenten . . . . .</b>	<b>277</b>
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	Schadensakkumulationshypothesen . . . . .	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
<b>16. Anhang</b> . . . . .	301
16.1 Formelzeichen . . . . .	301
16.2 Koordinatensysteme . . . . .	309
16.3 Grundlagen der Kontaktmechanik . . . . .	311
16.3.1 Hertzsche Kontaktmechanik . . . . .	311
16.3.2 Kontaktgleichung . . . . .	313
16.3.3 Grundgleichungen für das Tangentialkontaktproblem nach Carter . . . . .	315
16.4 Funktion $\Phi$ für die Lösung nach Vermeulen-Johnson . . . . .	318
16.5 Grundgleichungen der vereinfachten Rollkontakttheorie . . . . .	319
16.6 Stabilitätsbedingungen charakteristischer Gleichungen mit dem Hurwitz-Kriterium . . . . .	320
16.7 $v_{\text{crit}}$ mit Nebendiagonalgliedern der Dämpfungsmatrix . . . . .	322
<b>17. Literaturverzeichnis</b> . . . . .	323
<b>Sachregister</b> . . . . .	337