

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 Lateralschwingungen | 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 | 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 |
| 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 | 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 |
| 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 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 | Schlupfkräfte bei Annahme eines nicht schlupfkraft- freien 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 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 |
| 11. | Laterales Eigenverhalten und Stabilität von Drehgestellen | 197 |
| 11.1 | Numerische Ermittlung der Eigenwerte und der Grenzwinkelgeschwindigkeit | 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 |
| 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 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 |
| 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 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 |
| 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 | 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 |
| 16. Anhang | 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 Φ 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_{crit} mit Nebendiagonalgliedern der Dämpfungsmatrix | 322 |
| 17. Literaturverzeichnis | 323 |
| Sachregister | 337 |