

# Inhaltsverzeichnis

**Zusammenstellung häufig vorkommender Formelzeichen .....** XIII

|  |    |
|--|----|
| <b>Übersicht .....</b>   | 1  |
| 1 Inhalt dieses Bandes, Schwingungssysteme .....                               | 1  |
| 1.1 Schwingungssatzsysteme .....   | 3  |
| 1.2 Vereinfachte Schwingungssatzsysteme .....                                  | 4  |
| 2 Gliederung des Bandes .....  | 8  |
| <br>   |    |
| <b>I Einführung, Schwingungsanregung, regellose Schwingungen .....</b>         | 10 |
| 3 Einmassensysteme .....   | 10 |
| 3.1 Eigenschwingungen .....  | 11 |
| 3.2 Erregerschwingungen durch Unebenheiten .....                               | 14 |
| 3.3 Vergleich hydraulische Dämpfung und Gummidämpfung .....                    | 19 |
| 3.3.1 Vergleich der Dämpfungen bei Unebenheitsanregung .....                   | 21 |
| 3.4 Weitere Anregungen .....   | 21 |
| 3.4.1 Erregerschwingungen durch Motoranregung .....                            | 21 |
| 3.4.2 Erregerschwingungen durch Rad-Reifenanregung .....                       | 24 |
| 4 Sinusförmige Anregungen .....  | 29 |
| 4.1 Harmonische Anregung, Wellenfahrbahn .....                                 | 29 |
| 4.2 Periodische Anregungen .....   | 32 |
| 5 Stochastische Unebenheiten, statistische Kennzahlen, Spektrale Dichten ..... | 36 |
| 5.1 Stochastische Unebenheiten .....   | 36 |
| 5.2 Statistische Kennzahlen .....  | 38 |
| 5.3 Spektrale Dichte .....   | 40 |
| 6 Spektrale Dichte der Fahrbahnunebenheiten .....                              | 42 |
| 6.1 Meßergebnisse von $\Phi_h(\Omega)$ .....                                   | 44 |
| 6.2 Anschauliche Deutungen für $\Phi_h(\Omega)$ .....                          | 46 |
| 6.3 Einzelhindernisse .....  | 48 |

|  |    |
|--|----|
| <b>II Beurteilungsmaßstäbe und ihre Berechnung</b> .....   | 49 |
| 7 Radlastschwankung, Fahrsicherheit, Straßenbeanspruchung .....  | 50 |
| 7.1 Fahrsicherheit .....   | 51 |
| 7.2 Straßenbeanspruchung .....   | 52 |
| 7.3 Radlaststoßfaktor .....  | 54 |
| 8 Federwege .....  | 54 |
| 8.1 Sitzfederweg .....   | 54 |
| 8.2 Radfederweg .....  | 56 |
| 9 Beurteilung der Schwingungseinwirkung auf den sitzenden Menschen .....   | 57 |
| 9.1 Bewertete Schwingstärke, Bewertungsfunktion, Sinus-Erregung .....  | 57 |
| 9.2 Bewertete Schwingstärke bei stochastischer Erregung .....  | 60 |
| 9.3 Stochastische Erregung und Einzelhindernisse .....   | 63 |
| 9.4 Zusammensetzung der Gesamtwahrnehmung .....  | 64 |
| 9.5 Einwirkdauer .....   | 64 |
| 9.6 Schwingungseinwirkung in Längs- und Querrichtung .....   | 65 |
| 10 Zusammenfassung der Berechnungen, Anforderungen .....   | 65 |
| 10.1 Harmonische Anregung .....  | 66 |
| 10.2 Stochastische Anregung .....  | 69 |
| 10.3 Anforderungen an Fahrzeug und Anregungen .....  | 70 |
| <br>   |    |
| <b>III Schwingungstechnisch einfache Fahrzeuge bei Fahrt über Unebenheiten, Schwingungseigenschaften von Reifen und Sitz</b> ..... | 73 |
| 11 Ungefederetes Fahrzeug .....  | 74 |
| 12 Gefederetes Fahrzeug ohne Reifen .....  | 75 |
| 13 Reifenfederung und -dämpfung .....  | 76 |
| 13.1 Reifenfederkonstante, -subtangente .....  | 76 |
| 13.2 Reifendämpfung .....  | 77 |
| 14 „Ungefederetes“ Kraftfahrzeug .....   | 79 |
| 15 Sitz .....  | 83 |
| 16 „Ungefederetes“ Kraftfahrzeug mit Sitz .....  | 85 |
| <br>   |    |
| <b>IV Kraftfahrzeug, Unebenheits-Einpunktanregung</b> .....  | 88 |
| 17 Bewegungsgleichungen, bezogene Größen .....   | 89 |
| 18 Vergrößerungsfunktionen, Beurteilungsmaßstäbe .....   | 91 |

|  |     |
|--|-----|
| 18.1 Radlastschwankung, Fahrsicherheit .....   | 94  |
| 18.2 Aufbaubeschleunigung, Bewertete Schwingstärke für Hände und Füße .....          | 95  |
| 18.3 Sitzbeschleunigung, Bewertete Schwingstärke auf dem Sitz .....                  | 95  |
| 18.4 Dynamische Federwege .....  | 96  |
| 19 Einfluß von Unebenheit und Fahrgeschwindigkeit .....                              | 97  |
| 19.1 Betrachtung zur maximalen Geschwindigkeit, Fahrdauer und -strecke .....         | 99  |
| 20 Vergleich Kraftfahrzeug – langsame Fahrzeuge .....                                | 101 |
| 21 Einfluß der Aufbaueigenfrequenz .....   | 102 |
| 22 Einfluß des Aufbaudämpfungsmaßes .....  | 107 |
| 22.1 Optimierung von Federung und Dämpfung, Konflikt-Schaubild .....                 | 110 |
| 22.2 Zusammenfassung .....   | 113 |
| 23 Einfluß der Sitzeigenfrequenz und des Sitzdämpfungsmaßes .....                    | 114 |
| 24 Einfluß der Radmasse .....  | 117 |
| 25 Einfluß der Reifenfederung .....  | 119 |
| 26 Beladungsabhängigkeiten .....   | 121 |
| 26.1 Einfluß der Beladung .....  | 121 |
| 26.2 Anpassung der Fahrzeugdaten an die Beladung .....                               | 124 |
| 27 Hinweise zur schwingungstechnischen Auslegung .....                               | 128 |
| 27.1 Hinweise für die Aufbaufederung .....   | 128 |
| 27.2 Hinweise für die Dämpfung, weitere Grenzen für Komfort und Fahrsicherheit ..... | 131 |
| 27.3 Weitere Hinweise .....  | 132 |
| 28 Anmerkungen zu nichtlinearen Kennungen .....                                      | 133 |
| 28.1 Linearisierung nichtlinearer Feder- und Dämpferkennungen .....                  | 133 |
| 28.2 Nichtlineare Federkennungen .....   | 136 |
| 28.3 Nichtlineare Dämpferkennungen .....   | 138 |
| 28.4 Geknickt lineare Dämpferkennung .....   | 139 |
| 28.5 Reibungsdämpfung .....  | 139 |
| 28.6 Radabheben .....  | 143 |
| 29 Geregelte Fahrwerke .....   | 144 |
| 29.1 Anforderungen an ideal geregelte Fahrwerke bei Unebenheitsanregung .....        | 148 |
| 29.2 Konflikt Fahrsicherheit – Fahrkomfort .....                                     | 149 |
| 29.3 Extremwerte, bester Komfort, keine Radlastschwankung ....                       | 153 |
| 29.4 Sky-Hook-Dämpfer .....  | 155 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>V Zweiachsiges Kraftfahrzeug, Unebenheits-Einspuranregung</b> .....              | 157 |
| 30 Bewegungsgleichungen, komplexe Größen .....                                      | 158 |
| 31 Vergrößerungsfunktionen und Spektrale Dichten für Systeme ohne Koppelmasse ..... | 161 |
| 31.1 Radlastschwankung, Radfederweg .....   | 163 |
| 31.2 Aufbauhub- und -nickbeschleunigungen .....                                     | 163 |
| 31.3 Hubbeschleunigung am Sitz .....  | 166 |
| 31.4 Bewertete Schwingstärken .....   | 167 |
| 31.5 Sitzfederweg .....   | 170 |
| 32 Einfluß von Fahrgeschwindigkeit und Fahrzeuggröße .....                          | 170 |
| 32.1 Einfluß der Fahrgeschwindigkeit .....  | 171 |
| 32.2 Einfluß der Fahrzeuggröße (Radstand) .....                                     | 173 |
| 32.3 Einfluß von Fahrzeuggröße und Fahrgeschwindigkeit .....                        | 174 |
| 33 Lage der Sitze .....   | 175 |
| 34 Abstimmung zwischen vorderem und hinterem System .....                           | 177 |
| 34.1 Unterschiedliche Aufbaueigenfrequenzen .....                                   | 177 |
| 34.2 Verschiedene Aufbaudämpfungen .....  | 181 |
| 34.3 Mittelwert über einem Geschwindigkeitsbereich .....                            | 182 |
| 35 Einfluß der Beladung .....   | 183 |
| 36 Einfluß von Koppelmasse und Radstand .....                                       | 185 |
| 36.1 Pkw mit unterschiedlichen Koppelmassen und gleichem Radstand .....             | 185 |
| 36.2 Busse mit unterschiedlichen Radständen und gleichem Nickträgheitsmoment .....  | 188 |
| 37 Hub- und Nickeigenfrequenz, Federkopplung vorn – hinten .....                    | 190 |
| 38 Bremsnicken, Nickpol .....   | 193 |
| 39 Einfluß des elastisch gelagerten Antriebsaggregates (Stuckern) ..                | 196 |
| 39.1 Einfluß der Aggregateigenfrequenz .....  | 200 |
| 39.2 Einfluß der Lagerdämpfung .....  | 201 |
| 39.3 Einfluß der Kopplung am Aggregat .....   | 202 |
| 39.4 Einfluß der Aggregatmasse .....  | 203 |
| 39.5 Einfluß der Radeigenfrequenz .....   | 204 |
| 40 Zusammenfassung der Ergebnisse aus Kap. V .....                                  | 204 |
| <b>VI Vierrädriges Kraftfahrzeug, Unebenheits-Zweispuranregung</b> .....            | 206 |
| 41 Bewegungsgleichungen des (vereinfachten) Vierradfahrzeuges ...                   | 207 |
| 42 Auto-, Kreuzdichten und Kohärenz der Unebenheiten .....                          | 212 |
| 42.1 Vereinfachung nach Parkhilowskij .....   | 214 |
| 42.2 Autospektren der Hub- und Wankanregung, Kohärenz .....                         | 215 |
| 42.3 Wegabhängige Spektren .....  | 217 |

|   |            |
|---|------------|
| 42.4 Meßergebnisse, Näherungsformel für Kohärenz .....                        | 217        |
| 43 Streuung bei Zweispuranregung .....  | 219        |
| 44 Einfluß der zusätzlichen Wankschwingungen .....                            | 221        |
| 44.1 Vergrößerungsfunktion der Aufbauwankbeschleunigung .....                 | 221        |
| 44.2 Bewertete Schwingstärken mit Berücksichtigung der Wankschwingungen ..... | 225        |
| 44.3 Radlastschwankungen und Radfederwege .....                               | 227        |
| 44.4 Geschwindigkeitseinfluß .....  | 229        |
| 44.5 Verallgemeinerung .....  | 229        |
| 45 Wirkung von Stabilisatoren .....   | 230        |
| 46 Zusammenfassung der Ergebnisse aus Kap. VI .....                           | 233        |
| <br>  |            |
| <b>VII Auswirkung von Radaufhängungen bei Unebenheitsanregung .....</b>       | <b>234</b> |
| 47 Beschleunigungskopplung, Feder-Dämpferanordnung .....                      | 235        |
| 47.1 Gleichungen für ein Fahrzeug mit Längslenker .....                       | 235        |
| 47.2 Einfluß der Radaufhängung .....  | 238        |
| 47.3 Einfluß der Kopplung .....   | 239        |
| 48 Modellierung und Beurteilung im höheren Frequenzbereich (Hinweise) .....   | 241        |
| 49 Seitenkraft am Reifen durch Spurverschiebung .....                         | 244        |
| 50 Spurverschiebung .....   | 246        |
| 50.1 Gleichungen für ein Fahrzeug mit Pendelachse .....                       | 247        |
| 50.2 Einfluß der Spurverschiebung .....                                       | 249        |
| 51 Seitenschwingungen des Aufbaus, Starrachse .....                           | 249        |
| 51.1 Gleichungen für ein Fahrzeug mit Starrachse .....                        | 249        |
| 51.2 Eigenfrequenzen und Dämpfungsmaße .....                                  | 252        |
| 51.3 Seitenbeschleunigungen, Seitenkräfte .....                               | 256        |
| 52 Zusammenfassung der Ergebnisse aus Kap. VII .....                          | 257        |
| <br>  |            |
| <b>VIII Fahrzeug-Längsschwingungen .....</b>                                  | <b>258</b> |
| 53 Längsschwingungen durch Unebenheitsanregung .....                          | 258        |
| 53.1 Bewegungsgleichungen .....   | 258        |
| 53.2 Umfangskraft beim Überfahren von Unebenheiten .....                      | 258        |
| 53.3 Längsschwingungen mit steifer Lenkerlagerung und steifem Reifen .....    | 262        |
| 53.4 Anmerkungen .....  | 264        |
| 54 Längsschwingungen durch Motoranregung (Fahrzeugruckeln) ....               | 264        |
| 54.1 Bewegungsgleichungen .....   | 264        |
| 54.2 Zeitverlauf, Vergleich Theorie-Versuch .....                             | 266        |

|  |            |
|--|------------|
| 54.3 Einfluß der Übersetzung und der Momente.....                                    | 267        |
| 54.4 Einfluß der Kraftschluß-Schlupf-Beziehung.....                                  | 268        |
| <br>   |            |
| <b>IX Motorerregte Fahrzeugschwingungen .....</b>                                    | <b>270</b> |
| 55 Anregung durch einen Einzylinder-Motor.....                                       | 271        |
| 55.1 Kinematik des Kurbeltriebs.....   | 271        |
| 55.2 Massenkraft .....   | 273        |
| 55.3 Massenmoment.....   | 273        |
| 55.4 Gasmoment .....   | 276        |
| 55.5 Gesamte Anregung beim Einzylinder-Motor .....                                   | 276        |
| 56 Anregungen durch einen 4-Takt-4-Zylinder-Reihenmotor .....                        | 278        |
| 56.1 Massenkraft .....   | 278        |
| 56.2 Massen- und Gasmomente .....  | 280        |
| 56.3 Betriebsverhalten .....   | 284        |
| 56.4 Auswirkung ungleicher Verbrennung .....   | 287        |
| 57 Weitere Mehrzylinder-Motoren .....  | 289        |
| 58 Schwingungsanregung für den Fahrzeugaufbau .....                                  | 289        |
| 58.1 Schwingungseratzsystem.....   | 289        |
| 58.2 Vorteil einer elastischen Aggregatlagerung .....                                | 293        |
| 58.3 Vereinfachte Betrachtungen, Asymptoten für<br>Karosserieanregungen.....         | 294        |
| 58.3.1 Asymptoten.....   | 296        |
| 58.3.2 Anwendungsbeispiele .....   | 297        |
| 58.4 Allgemeiner Fall .....  | 300        |
| 58.4.1 Gasmomentenanregung.....  | 300        |
| 58.4.2 Einfluß der Kopplung am Antriebsaggregat.....                                 | 302        |
| 59 Auslegung von Aggregatlagern .....  | 303        |
| 59.1 Auslegung bei Massenanregung.....   | 303        |
| 59.2 Auslegung bei Gasmomentenanregung .....   | 304        |
| 59.3 Gemeinsame Betrachtung von Unebenheits- und<br>Motorerregten Schwingungen ..... | 305        |
| <br>   |            |
| <b>X Zusammenfassung von Band B .....</b>  | <b>307</b> |
| <br>   |            |
| <b>Sachverzeichnis .....</b>   | <b>309</b> |