

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Formelzeichen | XI |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Aufgaben der Radführung | 1 |
| 1.2 Zum Aufbau des Buches | 3 |
| 1.3 Das Koordinatensystem | 4 |
| 2 Bauarten und Freiheitsgrade | 7 |
| 2.1 Freiheitsgrade der Radaufhängungen | 7 |
| 2.2 Bauteile der Radaufhängungen | 8 |
| 2.2.1 Der Radträger | 8 |
| 2.2.2 Die Gelenke | 8 |
| 2.2.3 Die Lenker | 10 |
| 2.2.4 Die kinematische Kette | 12 |
| 2.3 Grundmodelle der Radaufhängungen | 13 |
| 2.3.1 Deduktion aus der starren Aufhängung eines Körpers | 13 |
| 2.3.2 Einzelradaufhängungen | 15 |
| 2.3.3 Starrachsaufhängungen | 18 |
| 2.3.4 Tandem-Radträger | 21 |
| 2.3.5 Verbundaufhängungen | 21 |
| 3 Kinematische Analyse der Radführungen | 23 |
| 3.1 Grundlagen aus der ebenen Getriebelehre | 23 |
| 3.2 Grundlagen der Vektorrechnung | 30 |
| 3.3 Zur Systematik der Radaufhängungen | 33 |
| 3.4 Bewegungszustand des Radträgers | 38 |
| 3.5 Äußere und innere Kräfte an der Radaufhängung | 44 |
| 3.6 Einfluss von Gelenkwellen und Vorgelegegetrieben | 49 |
| 3.7 Radbewegung bei Federungs- und Lenkvorgängen | 60 |
| 4 Der Reifen | 63 |
| 4.1 Aufbau und Eigenschaften | 63 |
| 4.2 Schräglauf und Schlupf | 65 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 5 | Federung und Dämpfung | 71 |
| 5.1 | Aufgaben der Federung | 71 |
| 5.2 | Fahrzeugschwingungen | 72 |
| 5.2.1 | Einmassenschwinger | 72 |
| 5.2.2 | Zweimassenschwinger | 79 |
| 5.2.3 | Nickschwingung und Wankschwingung | 81 |
| 5.3 | Federsysteme | 88 |
| 5.4 | Federung und Radaufhängung | 95 |
| 5.5 | Fahrzeugfedern | 102 |
| 5.5.1 | Allgemeines | 102 |
| 5.5.2 | Blattfedern | 102 |
| 5.5.3 | Drehstabfedern | 108 |
| 5.5.4 | Schraubenfedern | 111 |
| 5.5.5 | Gummielastische Federn | 116 |
| 5.5.6 | Gasfedern | 121 |
| 5.6 | Schwingungsdämpfer | 124 |
| 5.7 | Der Schrägfederungswinkel | 128 |
| | | |
| 6 | Antrieb und Bremsung | 131 |
| 6.1 | Stationärer Beschleunigungs- und Bremsvorgang | 131 |
| 6.2 | Antriebs- und Brems-Stützwinkel | 134 |
| 6.2.1 | Allgemeines | 134 |
| 6.2.2 | Radträgerfeste Momentenstütze | 138 |
| 6.2.3 | Fahrgestellfeste Momentenstütze | 141 |
| 6.2.4 | Sonderfälle | 147 |
| 6.2.5 | Effektiver Stützwinkel | 150 |
| 6.3 | Anfahr- und Bremsnicken | 152 |
| 6.3.1 | Statisches und dynamisches Anfahr- und Bremsnicken | 152 |
| 6.3.2 | Einachsantrieb und Einachsbremung | 154 |
| 6.3.3 | Kraftübertragung durch Gelenkwellen | 157 |
| 6.3.4 | Vorgelege-Untersetzungsgetriebe im Radträger | 159 |
| 6.3.5 | Rückwirkung der Längskräfte auf die Federungskennlinie | 161 |
| 6.3.6 | Unsymmetrische Fahrzeuglage | 163 |
| 6.3.7 | Einfluss der ungefederten und der rotierenden Massen | 165 |
| 6.3.8 | Einfluss der elastischen Lager der Radaufhängung | 166 |
| 6.4 | Doppelachsaggregate | 168 |

| | |
|---|-----|
| 7 Kurvenfahrt | 171 |
| 7.1 Die Sturz- und Vorspuränderung bei Radbewegung | 171 |
| 7.2 Kräfte und Momente unter Querbeschleunigung | 173 |
| 7.3 Das Rollzentrum | 181 |
| 7.3.1 Das Fahrzeug bei sehr geringer Querbeschleunigung | 181 |
| 7.3.2 Das Fahrzeug bei hoher Querbe- schleunigung | 187 |
| 7.3.3 Einfaches Modell zur Nachbildung der Radbewegung | 194 |
| 7.4 Die Fahrzeuglage bei stationärer Kurvenfahrt | 198 |
| 7.5 Das kinematische Eigenlenkverhalten | 210 |
| 7.6 Fahrstabilität bei Zweispurfahrzeugen | 220 |
| 7.7 Kurvenfahrt von Einspurfahrzeugen | 226 |
| | |
| 8 Die Lenkung | 231 |
| 8.1 Grund-Bauarten | 231 |
| 8.2 Lenkgetriebe | 232 |
| 8.3 Kenngrößen der Lenkgeometrie | 235 |
| 8.3.1 Herkömmliche Definitionen und physikalische Bedeutung | 235 |
| 8.3.2 Allgemeingültige Definitionen bei räumlicher Geometrie | 242 |
| 8.4 Das Lenkgestänge | 263 |
| 8.4.1 Bauarten | 263 |
| 8.4.2 Die Lenkfunktion | 266 |
| 8.4.3 Das Rückstellmoment der Lenkung | 274 |
| 8.4.4 Lenkungsschwingungen | 281 |
| 8.5 Selbst einstellende Lenkvorrichtungen | 282 |
| | |
| 9 Die Elasto-Kinematik der Radaufhängungen | 287 |
| 9.1 Allgemeines | 287 |
| 9.2 Elasto-Kinematik bei Einzelradaufhängungen | 292 |
| 9.2.1 Elastisches Verhalten des Radführungs- mechanismus | 292 |
| 9.2.2 Elastisch gelagerte Hilfsrahmen | 308 |
| 9.3 Statisch überbestimmte Systeme | 314 |
| | |
| 10 Servo- und Regelsysteme am Fahrwerk | 317 |
| 10.1 Allgemeines | 317 |
| 10.2 Bremsanlage und Antriebsstrang | 319 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 10.3 | Geregelte Federungs- und Dämpfersysteme | 322 |
| 10.4 | Servolenkungen und aktive Lenksysteme | 329 |
| 10.5 | Überwachung des Reifen-Innendrucks | 337 |
| 10.6 | Fahrwerks-Regelsysteme im Verbund | 338 |
| 11 | Synthese und Konstruktion | 341 |
| 11.1 | Allgemeines | 341 |
| 11.2 | Ebene Radaufhängungen | 342 |
| 11.3 | Kinematische Synthese des räumlichen Systems | 346 |
| 11.4 | Anmerkungen zur Konstruktion | 353 |
| 12 | Aufhängungen für Motorräder | 371 |
| 13 | Einzelradaufhängungen | 383 |
| 13.1 | Allgemeines | 383 |
| 13.2 | Aufhängungen für Vorderräder | 383 |
| 13.2.1 | Lenkgeometrie mit fahrgestellfestem Lenkzapfen | 383 |
| 13.2.2 | Lenkgeometrie mit radträgerfester Spreizachse | 387 |
| 13.2.3 | Lenkgeometrie mit ideeller Spreizachse | 396 |
| 13.3 | Aufhängungen für Hinterräder | 401 |
| 13.3.1 | Ebene Mechanismen | 401 |
| 13.3.2 | Sphärische Mechanismen | 405 |
| 13.3.3 | Räumliche Mechanismen | 410 |
| 14 | Starrachsführungen | 419 |
| 14.1 | Allgemeines | 419 |
| 14.2 | Deichsel- und Schubkugelachsen | 422 |
| 14.3 | Lenkergeführte Starrachsen | 427 |
| 14.4 | Statisch überbestimmte Systeme | 431 |
| 15 | Verbundaufhängungen | 435 |
| | Schlussbemerkung | 445 |
| | Schrifttum | 447 |
| | Stichwortverzeichnis | 451 |

Formelzeichen

Vektoren werden durch **Fettschrift** gekennzeichnet:

\mathbf{v} = Geschwindigkeitsvektor; v = skalare Größe der Geschwindigkeit.

$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = c$ „inneres“ oder „Skalarprodukt“ der Vektoren \mathbf{a} und \mathbf{b} ; das Ergebnis ist der Skalar c .

$\mathbf{a} \times \mathbf{b} = \mathbf{c}$ „äußeres“ oder „Vektorprodukt“ der Vektoren \mathbf{a} und \mathbf{b} ; das Ergebnis ist ein Vektor \mathbf{c} , der senkrecht auf \mathbf{a} und \mathbf{b} steht.

| | | |
|-------------|-------------------------|---|
| A | mm^2 | Fläche |
| A | | Radaufstandspunkt |
| a | mm/s^2 | Beschleunigung |
| a_q | mm/s^2 | Querbeschleunigung |
| b | mm | Spurweite |
| c | N/mm | Federrate |
| c_F | N/mm | Tragfederrate |
| c_{FA} | N/mm | effektive Federrate am Radaufstandspunkt |
| c_S | N/mm | Stabilisatorrate je Rad |
| c_A | N/mm | Ausgleichsfederrate je Rad |
| c_φ | Nmm/rad | Drehfederrate zum Winkel φ |
| D | | Dämpfungsmaß |
| D | | Schnittpunkt Spreizachse/Fahrbahnebene |
| D | | Drehpunkt |
| d | | Spreizachse; Drehachse |
| E | N/mm^2 | Elastizitätsmodul |
| e | | Einheitsvektor |
| e | mm | Randfaserabstand eines Profilquerschnitts |
| F | | Freiheitsgrad eines Mechanismus |
| F | N | Kraft |
| F_F | N | Federkraft |

| | | |
|----------|----------------------|--|
| F_{FA} | N | Federkraft reduziert auf den Radaufstandspunkt |
| f | | Freiheitsgrad eines Gelenks |
| f | mm | Federweg an einem Federelement |
| f_R | | Rollwiderstandsbeiwert |
| G | N | Fahrzeuggewicht |
| G | N/mm ² | Gleitmodul (Schubmodul) |
| g | | Zahl der Gelenke eines Mechanismus |
| g | mm/s ² | Erdbeschleunigung |
| H | | Hilfspunkt auf der Radachse |
| H | | Lenkrad; Lenkspindel |
| h | mm | Schwerpunktshöhe |
| h | mm | Steigung der Momentanschraube |
| h_{RZ} | mm | Höhe des Rollzentrums über der Fahrbahn |
| I | mm ⁴ | Flächenträgheitsmoment |
| i | | Über- oder Untersetzungsverhältnis |
| i_D | | Dämpferübersetzung |
| i_F | | Federübersetzung |
| i_H | | Lenkgetriebeübersetzung |
| i_L | | Lenkgestängeübersetzung |
| i | mm | Trägheitsradius |
| K | | Radträger |
| k | | Zahl der Radträger einer Radaufhängung |
| k_D | Ns/mm | Dämpferkonstante |
| L | | Längspol (Pol in der Fahrzeug-Seitenansicht) |
| L | | Lenkgetriebe |
| L | mm ² kg/s | Drall, Drehimpuls |
| l | | Zahl der Lenker einer Radaufhängung |
| l | mm | Radstand |
| l | mm | Länge |
| M | | Radmittelpunkt |
| M | Nmm | Moment |
| M_B | Nmm | Biegemoment |
| M_D | Nmm | Drehmoment |

| | | |
|------------|-----|---|
| M_H | Nmm | Drehmoment am Lenkrad |
| M_{RB} | Nmm | Reifen-Bohrmoment |
| M_{RS} | Nmm | Reifen-Rückstellmoment aus dem Schräglauf |
| m | | Momentanachse |
| m_p | | Momentanachse bei Parallelfederung |
| m_w | | Momentanachse bei Wankbewegung |
| m | kg | Masse |
| n | | Normalvektor |
| n | | Polytropenexponent |
| n | mm | geometrische Nachlaufstrecke |
| n_R | mm | Reifennachlauf |
| n_τ | mm | Nachlaufversatz |
| P | | Pol, Momentanpol |
| p | bar | Gasdruck |
| p | mm | Polabstand |
| p | mm | Radlasthebelarm |
| p' | mm | Hebelarm der Gewichtsrückstellung |
| Q | | Querpol (Pol in der Fahrzeug-Querschnittsebene) |
| q | mm | Querpolabstand |
| R | mm | Reifenradius |
| R_F | mm | Fertigungsradius des Reifens |
| R_{St} | mm | statischer Reifenradius |
| R_w | mm | wirksamer oder „Abrollradius“ des Reifens |
| RZ | | Rollzentrum |
| r | | Rollachse des Fahrzeugs |
| r | | Zahl der freien Eigenrotationen von Lenkern in einem Mechanismus |
| r | mm | Hebelarm, Radius |
| r_S | mm | Lenkrollradius |
| r_σ | mm | Spreizungsversatz („Störkrafthebelarm“) |
| r_T | mm | Triebkrafthebelarm (wirksamer Hebelarm der Antriebskraft bei Gelenkwellenantrieb) |

| | | |
|------------|------|---|
| S, SP | | Schwerpunkt |
| S_F | | Federschwerpunkt |
| s | | Momentanschraubenachse |
| s | mm | Radhub |
| T | | Schubmittelpunkt |
| T, T_s | | Stoßmittelpunkt |
| T | | Trägheitspol |
| T | s | Schwingungsdauer |
| t | mm/s | Vorschubgeschwindigkeit (Momentanschraubung) |
| t | s | Zeit |
| U | J | Energie |
| u | mm/s | Umfangsgeschwindigkeit |
| v | mm/s | Geschwindigkeit |
| v_M | mm/s | Geschwindigkeit des Radmittelpunktes |
| v^* | mm/s | (fiktive) Geschwindigkeit bei als „blockiert“ betrachteter radträgerfester Momentenstütze |
| v_A^* | mm/s | (fiktive) Geschwindigkeit des Radaufstandspunktes bei „blockierter“ Momentenstütze |
| v^{**} | mm/s | (fiktive) Geschwindigkeit bei „blockierter“ Momentenstütze und Gelenkwellenantrieb |
| v_A^{**} | mm/s | (fiktive) Geschwindigkeit des Radaufstandspunktes bei „blockierter“ Momentenstütze und Antrieb durch Gelenkwellen |
| W | | Mittelstück einer Gelenkwelle |
| x, y, z | | Hauptachsen eines Koordinatensystems |

Griechische Buchstaben:

| | | |
|----------|-----------|---------------------------------|
| α | rad, Grad | Anstellwinkel eines Gummilagers |
| α | rad, Grad | Beugewinkel eines Wellengelenks |
| α | rad, Grad | Schräglaufwinkel des Reifens |
| β | rad, Grad | Schwimmwinkel des Fahrzeugs |
| γ | rad, Grad | Radsturzwinkel |
| δ | rad, Grad | Lenkwinkel eines Rades |

| | | |
|--------------------|--------------------|--|
| δ_v | rad, Grad | Vorspurwinkel |
| ε | rad, Grad | Schrägfederungswinkel |
| ε_A | rad, Grad | Antriebs-Stützwinkel |
| ε_B | rad, Grad | Brems-Stützwinkel |
| ε_{MB} | rad, Grad | Stützwinkel bei Motorbremsung |
| ε^* | rad, Grad | Stützwinkel bei radträgerfester Momentenstütze |
| ε^{**} | rad, Grad | Stützwinkel bei Gelenkwellenantrieb |
| η | | Abstimmung (Schwingungssystem) |
| η | | Wirkungsgrad |
| Θ | mm ² kg | Massenträgheitsmoment |
| ϑ | rad, Grad | Nickwinkel |
| κ | | Adiabatexponent |
| κ | rad, Grad | Anstellwinkel zwischen Fahrzeug-Rollachse und Wank-Momentanachse einer Radaufhängung |
| λ | | Schlupf |
| λ | rad, Grad | räumlicher Neigungswinkel der Spreizachse |
| μ | | Reibwert |
| μ | rad, Grad | Übertragungswinkel in einem Mechanismus |
| Π | | Ebene |
| Π' | | Seitenriss |
| Π'' | | Querriss |
| Π''' | | Grundriss |
| π | | Kreiszahl |
| ρ | mm | Krümmungsradius |
| ρ | kg/mm ³ | Dichte |
| σ | N/mm ² | Normalspannung |
| σ | rad, Grad | Spreizungswinkel |
| τ | rad, Grad | Nachlaufwinkel |
| τ | N/mm ² | Schubspannung |
| φ | rad, Grad | Wankwinkel |
| φ_d | rad, Grad | Drehwinkel |

| | | |
|-----------------|-----------|---|
| φ_k | rad, Grad | kardanischer Winkel |
| χ | | Antriebs- oder Bremskraftanteil der Vorderachse |
| ω | rad/s | Winkelgeschwindigkeit |
| ω_0 | rad/s | Eigenkreisfrequenz |
| ω_K | rad/s | Winkelgeschwindigkeit des Radträgers |
| ω_R | rad/s | Winkelgeschwindigkeit des Radkörpers |
| ω_γ | rad/s | Sturzwinkelgeschwindigkeit |
| ω_δ | rad/s | Lenkwinkelgeschwindigkeit |
| ω_H | rad/s | Winkelgeschwindigkeit des Lenkrades |
| ω_L | rad/s | Winkelgeschwindigkeit des Lenkstockhebels |

Indizes:

| | |
|-----|-----------------------|
| a | kurvenaußen |
| a | ausgefedertes Rad |
| e | eingefedertes Rad |
| h | hinten |
| i | kurveninnen |
| i | ideell |
| k | zum Radträger gehörig |
| l | links |
| m | mittlerer Wert |
| n | Normallage |
| p | bei Parallelfederung |
| r | rechts |
| u | ungefedert (Masse) |
| v | vorn |
| w | bei Wankbewegung |