

Inhalt

| | |
|---|------------|
| Vorbemerkungen | VII |
| A ALLGEMEINES | 1 |
| 1 Größen, Gleichungen, Schreibweisen | 1 |
| 1.1 Grundgrößen der Physik | 1 |
| 1.2 Hier verwendete zusammengesetzte Größen | 2 |
| 1.3 Präfixe | 5 |
| 1.4 Gleichungen und Konstanten | 5 |
| 1.5 Schreibweisen | 8 |
| B ZUR MECHANIK DER FESTEN KÖRPER | 9 |
| 2 Länge und abgeleitete Größen; Winkel | 9 |
| 2.1 Länge l , Wegstrecke oder Strecke s | 9 |
| 2.2 Längenänderung: Verlängerung, Verkürzung Δl | 9 |
| 2.3 Dehnung ε | 10 |
| 2.4 Querdehnung ε_q , Querdehnungszahl ν , Poissonzahl μ | 11 |
| 2.5 Fläche A | 12 |
| 2.6 Längen-Durchmesser-Verhältnis l/d , Schlankheitsgrad λ | 12 |
| 2.7 Volumen V | 15 |
| 2.8 Winkel α | 15 |
| 2.9 Raumwinkel Ω | 16 |
| 3 Zeit und aus Zeit und Weg zusammengesetzte Größe | 21 |
| 3.1 Zeit t | 21 |
| 3.2 Frequenz f , Drehzahl n , Kreisfrequenz ω | 21 |
| 3.3 Geschwindigkeit v | 22 |
| 3.4 Winkelgeschwindigkeit ω | 23 |
| 3.5 Schwingungen und Wellen | 24 |
| 3.5.1 Kennzeichnung einer harmonischen Schwingung | 24 |
| 3.5.2 Kennzeichnung von harmonischen (linearen) Wellen im Vergleich mit harmonischen Schwingungen | 30 |
| 3.6 Beschleunigung a | 32 |
| 3.7 Winkelbeschleunigung α | 34 |
| 3.8 Coriolis-Beschleunigung a_c | 35 |
| 4 Masse und Kraft | 37 |
| 4.1 Masse m | 37 |
| 4.2 Dichte oder spezifische Masse ρ | 37 |
| 4.3 Kraft F | 37 |
| 4.3.1 Gewichtskraft F_g | 39 |
| 4.3.2 Trägheitskraft F_t | 40 |
| 4.3.3 Radialkraft F_{rad} und Fliehkraft F_r | 41 |
| 4.3.4 Corioliskraft F_c | 43 |
| 4.3.5 Reibungskraft oder Reibung F_r | 44 |
| 4.3.5.1 Haft- und Gleitreibung | 44 |
| 4.3.5.2 Anmerkung zur Rollreibung | 46 |
| 4.3.6 Widerstandskraft oder Widerstand F_w | 47 |
| 4.4 Wichte oder spezifisches Gewicht γ | 47 |
| 5 Momente | 51 |
| 5.1 Hebel„gesetze“ und Momente | 51 |

| | |
|---|------------|
| 5.2 Drehmoment M | 52 |
| 5.3 Biegemoment M_b | 54 |
| 5.4 Massenträgheitsmomente J | 55 |
| 5.4.1 Axiales Massenträgheitsmoment J_x | 55 |
| 5.4.2 Polares Massenträgheitsmoment J_p | 57 |
| 5.5 Flächenträgheitsmoment I | 58 |
| 5.5.1 Axiales Flächenträgheitsmoment I_x | 58 |
| 5.5.2 Polares Flächenträgheitsmoment I_p | 61 |
| 5.6 Trägheitsradius i | 63 |
| 5.7 Widerstandsmoment W | 63 |
| 6 Arbeit, Leistung, Impuls | 67 |
| 6.1 Arbeit (Energie), Leistung und Wirkungsgrad | 67 |
| 6.1.1 Reibungsarbeit W_r , bzw. Verschiebearbeit W_v ; Verschiebeleistung P_v | 73 |
| 6.1.2 Hubarbeit W_h , potentielle Energie W_{pot} ; Hubleistung P_h | 76 |
| 6.1.2.1 Senkrecht Hochsteigen, Hochheben, Hochziehen | 76 |
| 6.1.2.2 Hochziehen auf schiefer Ebene | 77 |
| 6.1.2.3 Physikalische Arbeit und physiologische „Haltearbeit“ oder „Tragearbeit“ | 81 |
| 6.1.3 Spannarbeit W_s oder Formänderungsarbeit, elastische Energie W_e | 84 |
| 6.1.4 Beschleunigungsarbeit W_b ; kinetische Energie W_{kin} | 90 |
| 6.1.5 Rotationsenergie W_{rot} , Rotationsleistung P_{rot} | 92 |
| 6.1.6 Oberflächenarbeit, Oberflächenenergie W_o | 93 |
| 6.1.7 Druck-Volumen-Arbeit W_{pV} , Druck-Volumen-Leistung P_{pV} | 94 |
| 6.1.8 Produktion W_p | 95 |
| 6.1.9 Elektrische Arbeit W_{el} | 96 |
| 6.1.10 Chemische Arbeit W_{chem} | 97 |
| 6.2 Impuls J und Kraftstoß $F \cdot t$ | 98 |
| 6.3 Drehimpuls L und Drehmomentenstoß $M \cdot t$ | 103 |
| 7 Druck, Spannung, Festigkeit | 111 |
| 7.1 Druck p , Zug $-p$, Spannung σ | 111 |
| 7.1.1 Druck und Zug, p , $-p$ | 111 |
| 7.1.2 Druck- und Zug-, Normal- und Tangentialspannungen σ_d , σ_t , σ_n , σ_t | 111 |
| 7.1.3 Biegespannung σ_b | 113 |
| 7.2 Festigkeitsbetrachtungen | 115 |
| 7.2.1 Beanspruchung | 115 |
| 7.2.2 Festigkeit | 116 |
| 7.2.3 Sicherheitsfaktor S | 117 |
| 7.3 Elastizitätsmodul E | 117 |
| 7.3.1 Definition, Messung, Interpretation | 117 |
| 7.3.2 Dehnungszahl α | 123 |
| 7.3.3 Biegeelastizitätsmodul E_b | 123 |
| 7.4 Biegesteifigkeit C | 125 |
| 7.5 Sonstige Kenngrößen und Moduli | 126 |
| 7.5.1 Kompressibilität κ und Kompressionsmodul K | 126 |
| 7.5.2 Scherspannung τ und Schubmodul G | 127 |
| 7.5.3 Torsionsspannung τ_t und Gleitmodul G_t | 127 |
| 7.6 Der einseitig eingespannte Balken | 128 |
| 7.6.1 Biegemomentenverteilung | 128 |
| 7.6.2 Biegespannungsverteilung | 130 |
| 7.6.3 Zusammenhänge zwischen Biegespannung σ_{bx} , Biegemoment M_{bx} und Widerstandsmoment W_x ; Ausformung | 132 |
| 7.7 Beispiele für Belastungsfälle | 132 |
| 7.8 Beispiele für eine Reduktion der Biegebeanspruchung | 135 |
| 7.8.1 Gegenbiegung, Zuggurtung, Ausgleichsstäbe | 135 |
| 7.8.2 Modellüberlegungen mit sukzessive größerer Wirklichkeitsnähe | 138 |
| 7.9 Zum Problem der Knickung | 141 |

| | | |
|----------------------------|--|------------|
| 7.10 | Landlokomotion | 143 |
| 7.10.1 | Springen | 144 |
| 7.10.2 | Gehen | 150 |
| 7.10.3 | Laufen | 153 |
| C ZUR FLUIDMECHANIK | | 161 |
| 8 | Fluidstatik und zwischenmolekular Kräfte | 161 |
| 8.1 | Dichte ρ eines Fluids | 161 |
| 8.1.1 | Luftdichte, abhängig von Temperatur und Meereshöhe | 161 |
| 8.1.2 | Wasserdichte, abhängig von Temperatur und Salzgehalt | 162 |
| 8.2 | Dynamische Zähigkeit η ; Newton'sche Reibung | 163 |
| 8.2.1 | Definition | 163 |
| 8.2.2 | Viskosimetrie | 165 |
| 8.3 | Kinematische Zähigkeit ν | 166 |
| 8.3.1 | Definition | 166 |
| 8.3.2 | Eingehen in die Reynoldszahl Re | 167 |
| 8.4 | Druck p | 167 |
| 8.4.1 | Schweredruck p_h | 167 |
| 8.4.2 | Schweredruck p_{Luft} der Lufthülle | 168 |
| 8.4.3 | Betriebsdruck oder Außendruck p_a | 169 |
| 8.4.4 | Hydrostatischer Druck p_{hydr} | 169 |
| 8.4.5 | Druckwandlung | 170 |
| 8.4.6 | Drücke und Druckeffekte von Membranvorgängen | 171 |
| 8.4.6.1 | Osmotischer Druck p_{osm} und osmotischer Wert p_{osm}^* | 172 |
| 8.4.6.2 | Wasserpotential ψ | 175 |
| 8.4.6.3 | Turgor p_T , Wandspannung S_w , Saugspannung S_s | 178 |
| 8.5 | Fluidstatischer Auftrieb | 179 |
| 8.5.1 | Kennzeichnung | 179 |
| 8.5.2 | Dichtebestimmung | 180 |
| 8.5.3 | Schwimmen, Schweben, Sinken | 180 |
| 8.5.4 | Metazentrum und Schwimmstabilität | 181 |
| 8.6 | Kohäsion, Adhäsion, Adsorption | 181 |
| 8.7 | Oberflächeneffekte | 182 |
| 8.7.1 | Oberflächenenergie W_O | 182 |
| 8.7.2 | Oberflächenspannung σ | 183 |
| 8.7.3 | Oberflächendruck p_O | 185 |
| 8.8 | Benetzung | 186 |
| 8.9 | Kapillarität | 188 |
| 9 | Strömungsdruck und Strömungsimpuls | 192 |
| 9.1 | Stromlinien und andere Strömungskennzeichnungen | 192 |
| 9.2 | Kontinuitätsgleichung | 194 |
| 9.3 | Dynamischer Druck (Staudruck) q | 196 |
| 9.3.1 | Definition und Beispiele | 196 |
| 9.3.2 | Addition mit statischen Druckkomponenten; Bernoulli-Gleichung | 199 |
| 9.3.3 | Druckmessung | 202 |
| 9.3.4 | Widerstandsbestimmung eines umströmten Körpers aus der Druckverteilung | 203 |
| 9.4 | Strömungsimpuls | 205 |
| 9.4.1 | Prinzipansatz | 205 |
| 9.4.2 | Weitere impulsänderungsbedingte Kräfte | 207 |
| 9.4.3 | Vereinfachte Propellertheorie, ausgehend von Impulsbetrachtungen | 208 |
| 9.4.4 | Huberzeugung beim Vogelflug (Schwirrflug) | 209 |
| 9.4.5 | Widerstandsbestimmung über die „Impulsdelle“ | 212 |
| 10 | Grenzschichten, Kräfte und Momente an umströmten Körpern | 221 |
| 10.1 | Grenzschichten | 221 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 10.1.1 | Das Grenzschichtkonzept | 221 |
| 10.1.2 | Laminare und turbulente Grenzschicht | 222 |
| 10.1.3 | Laufstrecke, Umschlag, Ablösung | 222 |
| 10.2 | Fluidkräfte | 223 |
| 10.2.1 | Zum Begriff der Reynoldszahl Re | 223 |
| 10.2.2 | Widerstandskräfte F_W und -beiwerte c_W | 224 |
| 10.2.2.1 | Widerstandsarten | 227 |
| 10.2.2.2 | Abhängigkeit von der Reynoldszahl Re | 227 |
| 10.2.2.3 | Beispiele aus Technik und Biologie | 229 |
| 10.2.2.4 | Abhängigkeit des Widerstands F_W von der Anströmgeschwindigkeit bei kleiner und großer Re -Zahl | 231 |
| 10.2.2.5 | Oberflächenwiderstand F_{WO} | 233 |
| 10.2.3 | Auftriebskraft F_A und -beiwert c_A | 235 |
| 10.2.4 | Seitkraft F_S und -beiwert c_S | 235 |
| 10.3 | Momente | 236 |
| 10.3.1 | Kipp-, Roll- und Giernoment | 237 |
| 10.3.2 | Momentengleichgewicht und Stabilität | 237 |
| 10.4 | Strömungen in Röhren | 239 |
| 10.4.1 | Grenzschichten, Kenngrößen, Reynoldszahlen | 239 |
| 10.4.2 | Hagen-Poiseuille'sches Gesetz für Kapillaren | 240 |
| 10.4.3 | Einfluß von Elastizitäten | 241 |
| 11 | Vereinfachte Theorie des Tragflügels und Kenngrößen des Gleitflugs | 247 |
| 11.1 | Auftriebsentstehung | 247 |
| 11.1.1 | Magnus-Effekt | 247 |
| 11.1.2 | Ansätze über die Zirkulation, Druckverteilung und Beiwertbetrachtung | 247 |
| 11.2 | Luftkräfte, Momente und Drücke | 250 |
| 11.2.1 | Komponenten der Luftkraftresultierenden | 250 |
| 11.2.2 | Momente | 250 |
| 11.2.3 | Druckverteilungen | 252 |
| 11.3 | Geometrische Flügelkennzeichnungen | 253 |
| 11.3.1 | Profilierung | 253 |
| 11.3.2 | Seitenverhältnis λ und Streckung Λ | 254 |
| 11.4 | Induzierter Widerstand F_{Wi} | 255 |
| 11.5 | Flächenbelastung $F_q \text{ A}^{-1}$ | 255 |
| 11.6 | Polarendarstellungen | 257 |
| 11.6.1 | Lilienthal'sche Polaren | 257 |
| 11.6.2 | Abhängigkeit von der Reynoldszahl | 259 |
| 11.6.3 | Parabeln des induzierten Widerstands | 260 |
| 11.7 | Gleitflug | 261 |
| 11.7.1 | Gleitkenngrößen, Gleitzahl ϵ | 261 |
| 11.7.2 | Beiwertbestimmung über Gleitversuche | 264 |
| 11.7.3 | Sinkpolaren und Gleitleistung | 265 |
| 11.8 | Segelflug | 267 |
| 12 | Wirbel und wirbelbedingte Fluidkräfte | 275 |
| 12.1 | Definitionen und Wirbelarten | 275 |
| 12.2 | Wirbelfaden, Wirbelfläche, Wirbelring | 276 |
| 12.3 | Zirkulation, Wirbelintensität | 277 |
| 12.4 | Wirbelbildung bei der Umströmung von Körpern | 279 |
| 12.4.1 | Strömungsbild um einen Kreiszyylinder, abhängig von der Reynoldszahl | 279 |
| 12.4.2 | Komplexe Wirbelstrukturen | 280 |
| 12.4.3 | Wirbelablösungsfrequenz f_w und Strouhal-Zahl St | 282 |
| 12.4.4 | Berechnung des Widerstandsbeiwerts eines umströmten Körpers aus den Kenngrößen seiner Wirbelstraße | 284 |
| 12.5 | Ringwirbel und darauf aufbauende fluidmechanische Rechnungen bei Rückstoßvorgängen | 287 |

| | |
|--|------------|
| 13 Schlagflügel und Flossen | 293 |
| 13.1 Schlagflügel mit Parallelbewegung | 294 |
| 13.2 Schuberzeugung über den Schwanzflossen-Schlag von Fischen | 299 |
| 13.3 Tierflügel und Propeller als Fluidkraftherzeuger mit Winkelbewegung | 301 |
| 13.3.1 Kräfte- und Impulsgleichgewicht | 301 |
| 13.3.2 Geometrische Verwindung von Propellerblatt und Tierflügel | 302 |
| 13.3.3 Erweiterungen zur Propellertheorie | 303 |
| 13.4 Wirbelphänomene hinter Schlagflügeln und Flossen | 304 |
| 13.4.1 Wirbelstraßen hinter passiv umströmten und aktiv bewegten Körpern | 305 |
| 13.4.2 Fisch-Vortrieb | 307 |
| 13.4.3 Insektenflug | 309 |
| 13.4.4 Näherungsansätze | 318 |
| 14 Temperatur und Temperatureffekte | 321 |
| 14.1 Temperatur ϑ und Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ | 321 |
| 14.2 Mischtemperaturen | 322 |
| 14.3 Temperaturkoeffizienten und Wärmeausdehnung | 322 |
| 14.3.1 Längen-Temperatur-Koeffizient α | 322 |
| 14.3.2 Volumen-Temperatur-Koeffizient γ | 323 |
| 14.4 Druck-Volumen-Beziehungen bei Gasen | 323 |
| D ZUR KALORIK | 329 |
| 15 Wärme und Wärmeeffekte | 329 |
| 15.1 Wärmeenergie Q | 329 |
| 15.1.1 Grundkenngrößen | 330 |
| 15.1.2 Spezifische Wärmekapazität c_s | 330 |
| 15.1.3 Molare Wärmekapazität c_m | 331 |
| 15.1.4 Volumenbezogene Wärmekapazität c_v | 331 |
| 15.1.5 Wärmespeicherkapazität Q | 332 |
| 15.1.6 Wasserwert WW | 333 |
| 15.2 Wärmeleistung, Wärmestrom Φ | 333 |
| 15.2.1 Wärmestromdichte q | 334 |
| 15.2.2 Wärmeleitkoeffizient λ | 335 |
| 15.2.3 Wärmedurchgangskoeffizient k | 337 |
| 15.2.4 Strahlungskoeffizient C | 339 |
| 15.2.5 Zum Begriff „Isolierung“ | 342 |
| 15.3 Wärmeausdehnung und thermisch induzierte Spannungen | 343 |
| 15.4 Phasenübergangswärme | 343 |
| 15.4.1 Änderungen des Aggregatzustands | 343 |
| 15.4.2 Schmelzwärme und Erstarrungswärme; Verdampfungswärme und Kondensationswärme | 344 |
| 15.4.3 Kühlung durch Schwitzen und durch ausgeatmeten Wasserdampf | 344 |
| 15.5 Wärmeproduktion durch Verbrennung | 346 |
| 15.5.1 Brennwert B | 346 |
| 15.5.2 Freigesetzte Wärmemenge bei der Oxidation technischer und biologischer Betriebsstoffe Q | 346 |
| 15.5.3 Wärmeproduktionsleistung durch Oxidation technischer und biologischer Betriebsstoffe Φ_{prod} | 348 |
| 15.5.4 Abbaugleichungen charakteristischer Kohlenhydrate, Fette und Eiweiße | 349 |
| 15.5.5 Respiratorische Austauschrate RA und Respiratorischer Quotient RQ | 352 |
| 15.5.6 Oxikalisches Äquivalent $O\ddot{A}$ | 354 |
| 15.6 Kalorimetrie | 355 |
| 15.6.1 Indirekte Kalorimetrie | 355 |
| 15.6.2 Direkte Kalorimetrie | 356 |
| 15.7 Energiebilanzen | 358 |

| | |
|--|------------|
| E SIMILARITÄTEN | 369 |
| 16 Größeneffekte und biologische Ähnlichkeit | 369 |
| 16.1 Einführungsbeispiel: Oberflächen-Volumen-Verhältnis bei kugelförmigen Organismen | 369 |
| 16.2 Auftragung und Ablesung im doppelt logarithmischen Koordinatensystem | 371 |
| 16.2.1 Koordinateneinteilungen | 371 |
| 16.2.2 Kenngrößenablesung | 372 |
| 16.3 Relatives Wachstum in Potenzfunktions-Darstellung | 372 |
| 16.3.1 Isometrisches und allometrisches Wachstum | 373 |
| 16.3.2 Hilfsmittel für Zeichnung und Ablesung logarithmischer Skalen | 374 |
| 16.4 Geometrische und „statische“ Ähnlichkeit | 375 |
| 16.4.1 Isometrie: Beispiel Schleimpilzen | 375 |
| 16.4.2 Allometrie: Beispiel Bäume | 376 |
| 16.5 Physikalische Ähnlichkeitstheorie (MLT-System) | 378 |
| 16.5.1 Abhängigkeit der Grundgrößen von der Masse | 378 |
| 16.5.2 Abhängigkeit zusammengesetzter Größen von der Masse | 379 |
| 16.6 Biologische Ähnlichkeitstheorie (MLT-System) (Beispiel) | 379 |
| 16.6.1 Unterschiede zur physikalischen Ähnlichkeitstheorie | 380 |
| 16.6.2 Erweiterung: Abhängigkeit einer massenproportionalen Größe y von einer anderen massenproportionalen Größe x | 382 |
| Ausführliche Legenden zu den Bildtafeln | 391 |
| Literatur | 393 |
| Lösungen | 399 |
| Sachverzeichnis | 443 |

Bildtafeln

| | |
|---|-----|
| 1 Maulkinematik | 19 |
| 2 Beine und Füße von Wirbeltieren | 20 |
| 3 Knochenleichtbau | 48 |
| 4 Hochbaukonstruktionen und Schlankheit | 50 |
| 5 Biegesteifigkeit von Pflanzen | 66 |
| 6 Grashalmquerschnitte und FEM-Rechnungen | 110 |
| 7 Sprungvorgang | 159 |
| 8 Biegebeanspruchung, Kerbspannungsminimierung u.a. | 160 |
| 9 Hydrophobe Systeme | 189 |
| 10 Hai und Delphin als bionische Vorbilder | 220 |
| 11 Vogelflug | 269 |
| 12 Schwimmen mit „Flügelbewegung“ | 273 |
| 13 Messungen an Vogelflügelmodellen, Arbeitsgruppe Nachtigall | 274 |
| 14 Wirbel- und Grenzschichtdarstellungen | 284 |
| 15 Kleinvogelflug | 318 |
| 16 Strömungssichtbarmachung bei einem Gelbrandkäfer | 320 |
| 17 Insektenflug | 328 |
| 18 Schlangen-Kriechen | 367 |
| 19 Starenflug im Windkanal | 368 |
| 20 Springen bei Vertebraten und Invertebraten | 386 |
| 21 Massenspanne bei Insekten | 390 |
| 22 Vögel und Vogelmodelle in der biomechanischen Forschung | 396 |

Hinweis: An den Randstreifen der Seiten wird auf die Bildtafeln („T“) mit Seitenzahlen („p“) hingewiesen