

Robert Wichard Pohl

Mechanik, Akustik und Wärmelehre

18., überarbeitete Auflage

Nach dem Tod des Verfassers herausgegeben
von Robert O. Pohl

Mit 591 Abbildungen

Springer-Verlag
Berlin Heidelberg New York 1983

Inhaltsverzeichnis

A. Mechanik

Seite

Über die Schreibweise der Gleichungen	XII
---	-----

I. Einführung, Längen- und Zeitmessung	1
--	---

Einführung S. 1. — Messung von Längen. Echte Längenmessung S. 2. — Die Längeneinheit Meter S. 3. — Unechte Längenmessung bei sehr großen Längen S. 4. — Winkelmessung S. 5. — Zeitmessung. Echte Zeitmessung. Registrierung S. 5. — Uhren, Registrierung S. 6. — Messung periodischer Folgen gleicher Zeiten und Längen S. 7. — Frequenzmessungen in der heutigen Meßtechnik S. 9. — Unechte Zeitmessung S. 9.

II. Darstellung von Bewegungen, Kinematik	10
---	----

Definition von Bewegung. Bezugssystem S. 10. — Definition von Geschwindigkeit. Beispiel einer Geschwindigkeitsmessung S. 10. — Definition von Beschleunigung. Die beiden Grenzfälle S. 12. — Bahnbeschleunigung, gerade Bahn. S. 13. — Konstante Radialbeschleunigung, Kreisbahn S. 15. — Die Unterscheidung physikalischer Größen und ihrer Zahlenwerte S. 17. — Grundgrößen und abgeleitete Größen S. 17.

III. Grundlagen der Dynamik	19
---------------------------------------	----

Übersicht. Kraft und Masse S. 19. — Meßverfahren für Kraft und Masse. Die Grundgleichung der Mechanik S. 21. — Einheiten von Kraft und Masse. Größengleichungen S. 23. — Körper und Menge S. 23. — Massendichte ρ , Anzahl-dichte N_v , spezifisches Volumen V_s und spezifische Molekülzahl N S. 24. — Zur Ausschaltung der äußeren Reibung, insbesondere für Modellatome S. 25.

IV. Anwendungen der Grundgleichung	26
--	----

Anwendung der Grundgleichung auf konstante Beschleunigungen in gerader Bahn S. 26. — Anwendung der Grundgleichung auf die Kreisbahn. Radialkraft S. 28. — Das D'ALEMBERTSche Prinzip S. 31. — Sinusförmige Schwingungen. Schwebependel als Sonderfall S. 31. — Zentralbewegungen, Definition S. 34. — Ellipsenbahnen, elliptisch polarisierte Schwingungen S. 35. — LISSAJOUS-Bahnen S. 38. — Die KEPLER-Ellipse und das Gravitationsgesetz S. 39. — Die Konstante des Gravitationsgesetzes S. 40. — Grundsätzliches zur Messung der Masse S. 42. — Gravitationsgesetz und Himmelsmechanik S. 42.

V. Hilfsbegriffe, Arbeit, Energie, Impuls	45
---	----

Vormerkung S. 45. — Arbeit und Leistung S. 45. — Energie und Energiesatz S. 47. — Erste Anwendungen des mechanischen Energiesatzes S. 49. — Kraftstoß und Impuls S. 49. — Der Impulssatz S. 50. — Erste Anwendungen des Impulssatzes S. 51. — Impuls und Energiesatz beim elastischen Zusammenstoß von Körpern S. 52. — Der Impulssatz beim unelastischen Zusammenstoß zweier Körper und das Stoßpendel S. 53. — Stoß ohne sichtbare Berührung und schiefer Stoß S. 54. — Das Stoßpendel als Urbild der ballistischen Meßinstrumente. Stoßgalvanometer, Messung einer Stoßdauer S. 54. — Bewegungen gegen energieverzehrende Widerstände, Relaxationsvorgänge S. 56. — Erzeugung von Kräften ohne und mit Leistungsaufwand S. 58. — Schlußbemerkung S. 59.

VI. Drehbewegungen fester Körper.	60
---	----

Vorbemerkung S. 60. — Drehmoment und Arbeit S. 60. — Herstellung bekannter Drehmomente. Die Winkelrichtgröße D^* . Die Winkelgeschwindigkeit ω als Vektor S. 62. — Trägheitsmoment, Drehschwingungen S. 63. — Das physikalische Pendel und die Balkenwaage S. 66. — Der Drehimpuls (Drall) S. 67. — Freie Achsen S. 70. — Freie Achsen bei Mensch und Tier S. 71. — Definition des Kreisel und seiner drei Achsen S. 72. — Die Nutation des kräftefreien Kreisels und sein raumfester Drehimpuls S. 73. — Kreisel unter Einwirkung von Dreh-

momenten; die Präzession der Drehimpulsachse S. 75. — Präzessionskegel mit Nutationen S. 78. — Kreisel mit nur zwei Freiheitsgraden S. 79. — Schlußbemerkung S. 81.

VII. Beschleunigte Bezugssysteme 82

Vorbemerkung. Trägheitskräfte S. 82. — Bezugssystem mit reiner Bahnbeschleunigung S. 83. — Bezugssystem mit reiner Radialbeschleunigung. Zentrifugal- und Corioliskraft S. 85. — Unsere Fahrzeuge als beschleunigte Bezugssysteme S. 90. — Das Schwerependel als Lot in beschleunigten Fahrzeugen S. 91. — Die Erde als beschleunigtes Bezugssystem: Zentrifugalbeschleunigung ruhender Körper S. 92. — Die Erde als beschleunigtes Bezugssystem: Coriolisbeschleunigung bewegter Körper S. 94. — Der Kreiselkompaß in Fahrzeugen und seine unvermeidliche Mißweisung S. 95.

VIII. Einige Eigenschaften fester Körper 96

Vorbemerkung S. 96. — Elastische Verformung, Fließen und Verfestigung. Hochpolymere Stoffe S. 98. — HOOKEsches Gesetz und POISSONsche Beziehung S. 99. — Schiebung und Schubgröße S. 100. — Normal-, Schub- und Hauptspannung S. 101. — Biegung und Drillung S. 103. — Zeitabhängigkeit der Verformung. Elastische Nachwirkung und Hysteresis S. 106. — Zerreißfestigkeit und spezifische Oberflächenarbeit fester Körper S. 107. — Haft- und Gleitreibung S. 109. — Adhäsion (Kleben), Schleifen und Polieren S. 111. — Nutzen der Haftreibung und Verminderung der Gleitreibung S. 112. — Rollreibung S. 113. — Die Rolle der drei Reibungsarten beim Autofahren S. 113.

IX. Über ruhende Flüssigkeiten und Gase. 114

Die freie Verschieblichkeit der Flüssigkeitsmoleküle S. 114. — Druck in Flüssigkeiten, Manometer S. 116. — Allseitigkeit des Druckes und Anwendungen S. 117. — Druckverteilung im Schwerfeld und Auftrieb S. 119. — Zug in Flüssigkeiten, ihre Zugfestigkeit, spezifische Oberflächenarbeit und Oberflächenspannung S. 120. — Gase und Dämpfe als Flüssigkeiten geringer Dichte ohne Oberfläche. BOYLE-MARIOTTsches Gesetz S. 126. — Modell eines Gases. Der Gasdruck als Folge der ungeordneten Bewegung („Wärmebewegung“) S. 127. — Grundgleichung der kinetischen Gastheorie. Geschwindigkeit der Gasmoleküle S. 128. — Die Lufthülle der Erde. Der Luftdruck in Schauversuchen S. 129. — Druckverteilung der Gase im Schwerfeld. Barometerformel S. 131. — Der statische Auftrieb in Gasen S. 133. — Gase und Flüssigkeiten in beschleunigten Bezugssystemen S. 134 — Rückblick Was heißt Kraft? S. 136. — Sortier-Apparate (Spektralapparate oder Diskriminatoren) S. 137.

X. Bewegungen in Flüssigkeiten und Gasen 139

Erster Teil: Flüssigkeitsströmung mit und ohne Reibung S. 139. — Drei Vorbemerkungen S. 139. — Innere Reibung und Grenzschicht S. 139. — Schlichte, unter entscheidender Mitwirkung der Reibung entstehende Bewegung S. 141. — Die REYNOLDSSche Zahl S. 142. — Reibungsfreie Flüssigkeitsbewegung, BERNOULLI'sche Gleichung S. 144. — Ausweichströmung. Quellen und Senken, drehungsfreie oder Potentialströmung S. 147. — Drehungen von Flüssigkeiten und ihre Messung. Das drehungsfreie Wirbelfeld S. 150. — Wirbel und Trennungsflächen in praktisch reibungsfreien Flüssigkeiten S. 153. — Widerstand und Stromlinienprofil S. 154. — Die dynamische Querkraft S. 156. — Zweiter Teil: Anwendungen der Querkraft S. 158. — Flügel als Tragflächen und Segel S. 158. — Mechanische Strömungsmaschinen mit rotierenden Flügel- oder Schaufelrädern S. 160. — Zum Antrieb fliegender und schwimmender Tiere S. 161.

B. Akustik

XI. Schwingungslehre 162

Vorbemerkung S. 162. — Erster Teil: Allgemeines über Schwingungen und Kippfolgen S. 162. — Schwingungen und Kippfolgen S. 162. — Darstellung nichtsinusförmiger periodischer Vorgänge und Strukturen mit Hilfe von Sinuskurven, Fourier Analyse S. 165. — Spektraldarstellung verwickelter Schwingungs-Vorgänge S. 168. — Amplituden- und Phasen- oder Frequenzmodulation S. 170. — Zur Modulation in der Nachrichtentechnik S. 172. — Allgemeines über elastische Eigenschwingungen von beliebig gestalteten festen Körpern S. 173. — Elastische Transversalschwingungen gespannter linearer fester Körper S. 174. — Elastische Longitudinal- und Torsionsschwingungen gespannter linearer fester Körper S. 176. —

Elastische Schwingungen in Säulen von Flüssigkeiten und Gasen S. 177. — Eigenschwingungen starrer linearer Körper. Biegeschwingungen S. 179. — Eigenschwingungen flächenhaft und räumlich ausgedehnter Gebilde. Wärmeschwingungen S. 180. — Erzwungene Schwingungen S. 181. — Durch Resonanz stimulierte Energieabgabe S. 185. — Erzeugung ungedämpfter Schwingungen mit Fremd- und mit Selbststeuerung S. 185. Mit- und Gegenkopplung S. 188. — Regel- oder Steuertechnik (Kybernetik) S. 189. Zweiter Teil: Einige Anwendungen erzwungener Schwingungen. Wackelschwingungen. S. 190. — Die Resonanz in ihrer Bedeutung für den Nachweis einzelner Sinusschwingungen. Spektralapparate S. 190. — Die Bedeutung erzwungener Schwingungen für die verzerrungsfreie Aufzeichnung nichtsinusförmiger Schwingungen. Registrierapparate S. 191. — Zwei gekoppelte Pendel und ihre erzwungenen Schwingungen S. 192. — Gedämpfte und ungedämpfte Wackelschwingungen S. 194.

XII. Fortschreitende Wellen und Strahlung 195

Erster Teil: Wellenlehre S. 195. — Fortschreitende Wellen S. 195. — Longitudinaler Dopplereffekt S. 197. — Interferenz S. 197. — Interferenz bei zwei etwas verschiedenen Senderfrequenzen S. 198. — Stehende Wellen S. 198. — Ausbreitung fortschreitender Wellen S. 200. — Reflexion und Brechung S. 202. — Abbildung S. 203. — Totalreflexion S. 203. — Keilwellen nach Überschreiten der Phasengeschwindigkeit S. 205. — Das HUYGENSSCHE Prinzip S. 206. — Modellversuche zur Wellenausbreitung S. 206. — Quantitatives zur Beugung an einem Spalt S. 208. — FRESNELSche Zonenkonstruktion S. 210. — Verschärfung der Interferenzstreifen durch gitterförmige Anordnung der Wellenzentren S. 212. — Ausstrahlung von Wellen mit kleinem Öffnungswinkel S. 214. — Interferenz von Wellenzügen begrenzter Länge S. 214. — Entstehung von Longitudinalwellen. Ihre Geschwindigkeit S. 214. — Hochfrequente Longitudinalwellen in Luft. Schallprägeverfahren S. 215. — Strahlungsdruck des Schalles. Schallradiometer S. 217. — Typische Versuche mit räumlichen Wellen S. 218. — Die Entstehung von Wellen auf der Oberfläche von Flüssigkeiten S. 222. — Dispersion und Gruppengeschwindigkeit S. 226. — Einfluß der Dispersion auf die Gestalt von Wellengruppen S. 228. — Zweiter Teil: Etwas Akustik im engeren Sinne S. 231. — Energie des Schallfeldes. Schallwellenwiderstand S. 231. — Relativmessungen in der akustischen Literatur S. 233. — Eine Phonographie S. 233. — Schallsender S. 233. — Unperiodische Schallsender und Überschallgeschwindigkeit S. 235. — Schallempfänger S. 236. — Vom Hören S. 237. — Phonometrie S. 239. — Das Ohr als Spektralapparat S. 241.

C. Wärmelehre

XIII. Grundbegriffe 244

Vorbemerkungen. Definition des Wortes Stoffmenge S. 244. — Einige Begriffe aus den Grundlagen der Chemie S. 244. — Definition und Messung der Temperatur S. 246. — Definition des Wortes Wärme S. 248. — Spezifische Wärmekapazität c_p , einige spezifische Enthalpien und innere Energie U S. 250.

XIV. I. Hauptsatz und Zustandsgleichung idealer Gase 253

Ausdehnungsarbeit und technische Arbeit S. 253. — Thermische Zustandsgrößen S. 254. — Innere Energie U und erster Hauptsatz S. 255. — Die Zustandsgröße Enthalpie J S. 256. — Die beiden spezifischen Wärmekapazitäten c_p und c_v S. 257. — Thermische Zustandsgleichung idealer Gase. Eine absolute Temperatur S. 260. — Addition der Partialdrucke S. 262. — Bestimmung des Molekulargewichtes (M) aus der Dampfdichte ρ S. 263. — Kalorische Zustandsgleichungen der idealen Gase. GAY-LUSSACScher Drosselversuch S. 264. — Zustandsänderungen idealer Gase S. 266. — Anwendungsbeispiele für polytrope und adiabatische Zustandsänderungen. Messungen von $\kappa = c_p/c_v$ S. 269. — Druckluftmotor und Gaskompressor S. 271.

XV. Reale Gase und Dämpfe 273

Zustandsänderungen realer Gase und Dämpfe S. 273. — Unterscheidung von Gas und Flüssigkeit S. 274. — Die VAN DER WAALSSche Zustandsgleichung realer Gase S. 276. — Der JOULE-THOMSONSche Drosselversuch S. 278. — Herstellung kleiner Temperaturen und Gasverflüssigung im Laboratorium S. 279. — Technische Verflüssigung und Entmischung von Gasen S. 280. — Dampfdruck und Temperatur. Tripelpunkt S. 281. — Behinderung des Phasenwechsels flüssig \rightarrow fest. Unterkühlte Flüssigkeiten S. 283. — Behinderung des Phasenwechsels flüssig \rightarrow dampfförmig. Zerreißfestigkeit der Flüssigkeiten S. 284. — Keime beim Phasenwechsel S. 285.

XVI. Die Temperatur und der kinetische Anteil der inneren Energie 286

Die Temperatur und ungeordnete Bewegung („Wärmebewegung“) in idealen Gasen S. 286. — Rückstoß der Gasmoleküle bei der Reflexion. Radiometerkraft S. 288. — Geschwindigkeitsverteilung und mittlere freie Weglänge der Gasmoleküle S. 289. — Spezifische Wärmekapazitäten im molekularen Bilde. Das Gleichverteilungsprinzip S. 290. — Osmose und osmotischer Druck S. 293. — Physikalische Moleküle. Experimentelle Bestimmung der **BOLTZMANN**schen Konstanten k und der spezifischen Molekülzahl N S. 296. — Bestimmung der **BOLTZMANN**schen Konstanten k aus der **BROWNS**chen Bewegung S. 298. — Wärmebewegung und Empfindlichkeitsgrenze von Meßinstrumenten S. 299. — Statistische Schwankungen und Individuenzahl S. 300. — Das **BOLTZMANN**sche Theorem S. 301.

XVII. Transportvorgänge, insbesondere Diffusion 303

Vorbemerkung S. 303. — Diffusion und Durchmischung S. 303. — I. **FICK**sches Gesetz und Diffusionskonstante S. 303. — Quasistationäre Diffusion S. 305. Nichtstationäre Diffusion S. 306. — Allgemeines über Wärmeleitung und Wärmetransport S. 307. — Stationäre Wärmeleitung S. 309. — Nichtstationäre Wärmeleitung S. 309. — Die Transportvorgänge in Gasen und ihre Unabhängigkeit vom Druck S. 310. — Bestimmung der mittleren freien Weglänge S. 312. — Wechselseitige Verknüpfung der Transportvorgänge in Gasen S. 313.

XVIII. Die Zustandsgröße Entropie 316

Reversible Vorgänge S. 316. — Irreversible Vorgänge S. 317. — Die Zustandsgröße Entropie S. Zweiter Hauptsatz S. 318. — Vergeudete Arbeit und Arbeitsfähigkeit S. 321. — Die Entropie im molekularen Bild S. 321. — Beispiele für die Berechnung von Entropien S. 323. — Anwendung der Entropie auf reversible Zustandsänderungen in abgeschlossenen Systemen S. 325. — Das J - S -oder **MOLLIER**-Diagramm nebst Anwendungen. Gasströmung mit Überschallgeschwindigkeit S. 326. — Verdichtungsstöße S. 329.

XIX. Umwandlung von innerer Energie in Arbeit 330

Fragestellung und Disposition S. 330. — Erster Teil: Wärmekraftmaschinen und Wärmepumpen S. 330. — Die ideale Wärmekraftmaschine S. 330. — **CARNOT**scher Kreisprozeß S. 331. — Der **Stirling** Motor S. 332. — Wärmepumpe (Kältemaschine) S. 333. — Die thermodynamische Definition der Temperatur S. 335. — Zweiter Teil: Isotherme Umwandlung von innerer Energie in Arbeit S. 335. — Druckluftmotor, Freie und gebundene Energie S. 335. — **HELMHOLTZ**sche Gleichung S. 336. — Beispiele für die Anwendung der freien Energie S. 338. — Rückblick auf die Rolle der Entropie bei der Umwandlung von innerer Energie in Arbeit S. 340. — Die inneren Uhren S. 340. — Dritter Teil: Technische Wärmekraftmaschinen und Muskel als Motor S. 340. — Technische Wärmekraftmaschinen S. 340. — Der Mensch als isotherme Kraftmaschine S. 342.

Anhang: Dimensionen physikalischer Größen 342

Wichtige Konstanten 344

Längeneinheiten, Kräfteinheiten, Druckeinheiten, Energieeinheiten 345

Sachverzeichnis 346