

Physik für Mediziner

Physikalische Grundlagen

Prof. Dr. Günter Haase

Physikalische Grundlagen

Prof. Dr. Günter Haase

*Institut für Wissenschaftliche
Photographie der
Technischen Universität München*

mit 423 Abbildungen

*4. Auflage, unveränderter Nachdruck
der 3. Auflage*

***Akademische
Verlagsgesellschaft
Wiesbaden 1976***

© 1968 by Akademische Verlagsgesellschaft, Frankfurt am Main
Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, dieses
Buch oder Teile daraus auf photomechanischem Wege (Photokopie,
Mikrokopie) zu vervielfältigen.
Printed in Germany
Druck: Haupka und Streng, Bad Soden am Taunus
Einband: Buchbinderei Wochner, Horb am Neckar

ISBN 3-400-00339-5

Vorwort

Der Arzt JULIUS ROBERT MAYER (1814–1879), der als erster das mechanische Wärmeäquivalent bestimmte und das allgemeine, allen Naturerscheinungen zugrunde liegende Gesetz von der Erhaltung der Energie aussprach (vgl. S. 45), schrieb um die Mitte des vergangenen Jahrhunderts: „Will man nun über physiologische Punkte klar werden, so ist Kenntnis physikalischer Vorgänge unerlässlich, wenn man es nicht vorzieht, von metaphysischer Seite her die Sache zu bearbeiten, was mich unendlich disgoutiert.“ Die Kenntnis physikalischer Vorgänge ist heute in einem noch viel weiteren Umfang in nahezu allen Gebieten der Medizin „unerlässlich“. Arbeitsmethoden und Erkenntnisse der Physik gewinnen in der Biologie und Medizin zunehmend an Bedeutung. Mediziner benutzen heute in der Praxis Ultraschallwellen (vgl. §§ 77 und 78), Röntgen- und Gamma-Strahlen (§§ 276 und 277), Betastrons (§ 277), radioaktive Isotope (§ 281), Strahlendetektoren (§ 278), Elektronenstrahl-Oszillographen (§§ 256 und 211), mit Elektronenröhren (§§ 197 bis 199) oder Transistoren (§§ 201 und 202) ausgestattete elektronische Geräte der verschiedensten Art, Infrarot- und UV-Strahler (§§ 244 bis 246), Leuchtschirme (§ 247), verfeinerte licht- und elektronenmikroskopische Methoden (vgl. § 236 und § 255), Laser (§ 248), Infrarot- und UV-Bildwandler, Röntgenbildverstärker, Röntgen-Fernseh-Anordnungen (§ 259) usw.

Auch ein elementares Lehrbuch der Physik für Mediziner muß diesen Entwicklungen Rechnung tragen. Das kann auf verschiedene Weise geschehen. Der in diesem Lehrbuch beschrittene Weg mag als ein Versuch angesehen werden. Er wurde durch Unterrichts- und Prüfungserfahrungen und vor allem durch zahlreiche Gespräche mit Kollegen aus verschiedenen Fachrichtungen der Medizin angeregt. Bei der Darstellung der Grundlagen wurden einige einfache, heute gewöhnlich schon in der Schule erarbeitete mathematische Hilfsmittel benutzt, die die Beschreibung wesentlicher gemeinsamer Züge in der Vielfalt der Phänomene und damit die Übersicht über den immer stärker anwachsenden Stoff beträchtlich erleichtern. Durch die Gewöhnung an diese Hilfsmittel, deren Anwendung und Bedeutung an gut übersehbaren Beispielen in der Mechanik erläutert ist, wird dem Studenten auch der spätere Übergang zur physikalisch-medizinischen Fachliteratur geebnet. Die Stoffauswahl wurde zum Teil aus didaktischen Erwägungen, in der Hauptsache aber im Hinblick auf Anwendungsmöglichkeiten

in der Medizin getroffen, von denen jeweils einige Beispiele erwähnt werden. Ein weiterer Band soll einige spezielle Anwendungen ausführlicher behandeln.

Der Autor wählte in diesem Grundlagenband bewußt nicht die zuweilen gewünschte „möglichst knappe und einfache“ Darstellung der „wichtigsten“ physikalischen Phänomene, da bei einer solchen Darstellung naturgemäß vieles unverständlich und manches gerade für moderne Entwicklungen in der Biologie und Medizin Wichtige unerwähnt bleiben muß. Dieses Lehrbuch will dem Medizinstudenten mehr als den bei der Vorbereitung auf das Examen in der Physik unbedingt zu bewältigenden „Lernstoff“ bieten, es will ihm bei der Wiederholung, Vertiefung und Erweiterung des in den Vorlesungen und Praktika gebotenen Stoffes helfen und ihm insbesondere auch die Gelegenheit geben, auf Grund der gewonnenen Übersicht aus einem umfangreicheren Stoff die ihn besonders interessierenden Abschnitte selbst auszuwählen und mit größerer Sorgfalt zu erarbeiten. Das ist aber wohl auch die beste Vorbereitung sowohl für das Examen als auch für spätere Begegnungen mit der Physik, bei denen dieses Lehrbuch ebenfalls eine Hilfe sein möchte. An dieser Stelle muß aber auch betont werden, daß der Medizinstudent die Denk- und Arbeitsweise des Physikers im Grunde nur in den „lebendigen“ Vorlesungen und Praktika kennenlernt, für die kein Lehrbuch ein Ersatz ist.

Die Behandlung einiger besonders „aktueller“ Themen, deren Bedeutung in den letzten Jahren auch in der Verleihung von Nobelpreisen für Physik, Chemie und Medizin ihren Ausdruck gefunden hat, soll dazu beitragen, daß die Freude und der Eifer des Studierenden im Umgang mit der Physik geweckt und gefördert werden.

Großen Dank schulde ich Kollegen aus der Physik und Medizin für wertvolle Anregungen. Für die Anfertigung der Zeichnungen und des Manuskriptes und für das Mitlesen von Korrekturen danke ich meinen Assistenten, den Herren Dipl.-Phys. R. v. CRIEGERN, G. JUNG und H. MÖLLER-WENGHOFFER, meiner Sekretärin, Frau I. DIPPE, und ganz besonders meiner Frau.

Der Autor

Corrigenda

1.) Auf Seite 263 sollte Zeile 5 bis 6 folgenden Wortlaut haben:
 „Die Ferrite sind Doppeloxyde z. B: mit der chemischen Formel MeOFe_2O_3 . Me ist ein zweiwertiges Metall,“

2.) Auf Seite 299 muß es in § 202 Zeile 1 statt „Halbleiterdiode“
 „Halbleitertriode“ heißen.

3.) Auf Seite 326 muß es in der Zeile nach Formel 283 heißen:
 „Die Einheit der Strahlstärke ist 1 Watt/Steradian (W/sr)“.

4.) Auf Seite 331 muß in der Überschrift zu Tabelle 16 das Wort
 „Absolute“ weggelassen werden.

5.) Auf Seite 341 lautet die erste Formel:

$$\vartheta_d = \frac{\Phi_{el}}{\Phi_{e0}} = e^{-Kl}$$

6.) Auf Seite 455 muß die Formel 345a lauten:

$$L_{e\lambda S} = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\frac{c_2}{e^{\lambda T}} - 1}$$

7.) Auf Seite 456 muß die Formel 347a lauten:

$$\Phi_{eS} = \sigma f T^4$$

8.) Auf Seite 556 muß es in Zeile 10 von unten heißen:
 „weit mehr Neutronen als Protonen enthält;“

9.) Auf Seite 564 muß es in Zeile 1 heißen:
 Ein „Atom“, das aus einem Positron und einem Elektron aufgebaut
 ist, bezeichnet man als“

Inhalt

A. Mechanik

I. Mechanik der Massenpunkte und der starren Körper 1

§ 1. Massenpunkt und starrer Körper	1
§ 2. Die gleichförmige Bewegung	2
§ 3. Die beschleunigte geradlinige Bewegung	3
§ 4. Die momentane Geschwindigkeit	6
§ 5. Die momentane Beschleunigung	8
§ 6. Die Berechnung des Weges aus der Geschwindigkeit	9
§ 7. Die Berechnung der Geschwindigkeit aus der Beschleunigung	13
§ 8. Die Geschwindigkeit als Vektor	15
§ 9. Die Kreisbewegung	17
§ 10. Der freie Fall	18
§ 11. Die Wurfbewegung	19
§ 12. Die Newtonschen Axiome	21
§ 13. Kraft und Masse	21
§ 14. Die Schwere	22
§ 15. Die Masse als Maß der Menge	24
§ 16. Trägheitskräfte bei geradliniger Bewegung	24
§ 17. Die Zentrifugalkraft	27
§ 18. Die Erde als rotierendes System	29
§ 19. Die Keplerschen Gesetze	31
§ 20. Das Gravitationsgesetz	34
§ 21. Bahnen künstlicher Satelliten	35
§ 22. Gravitation und mechanistisches Naturbild	36
§ 23. Die Arbeit	38
§ 24. Leistung und Wirkung	41
§ 25. Potentielle und kinetische Energie	42
§ 26. Der Energiesatz der Mechanik	44
§ 27. Der allgemeine Energiesatz	44
§ 28. Energie und Masse	46
§ 29. Der Impuls	49
§ 30. Der Impulssatz	49
§ 31. Beispiele für die Erhaltung des Impulses	50
§ 32. Elastischer und unelastischer Stoß	52
§ 33. Die Zusammensetzung von Kräften am starren Körper	55
§ 34. Das Drehmoment	56
§ 35. Der Massenmittelpunkt oder Schwerpunkt	58
§ 36. Das Kräftepaar	59

§ 37. Gleichgewicht der Kräfte am starren Körper	59
§ 38. Arten des Gleichgewichts	60
§ 39. Arbeit gegen ein Drehmoment	61
§ 40. Das Trägheitsmoment	61
§ 41. Die Waage	63
§ 42. Der Drehimpuls	64
§ 43. Der Drehimpulssatz	66
§ 44. Der Kreisel	66
II. Mechanik deformierbarer Körper	68
§ 45. Beispiele elastischer Deformation	68
§ 46. Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm	71
§ 47. Der Druck in ruhenden Flüssigkeiten	72
§ 48. Der Auftrieb in Flüssigkeiten	75
§ 49. Die Messung der Dichte von festen Körpern und Flüssigkeiten	76
§ 50. Die Oberflächenspannung von Flüssigkeiten	78
§ 51. Der Druck von Gasen	83
§ 52. Der Luftdruck	83
§ 53. Der Auftrieb in Gasen	85
§ 54. Die Messung von Drucken	85
§ 55. Mechanische Vakuumpumpen	87
§ 56. Die Viskosität von Flüssigkeiten und Gasen	89
§ 57. Die Reynoldssche Zahl	91
§ 58. Strömung bei weit überwiegenden Reibungskräften	92
§ 59. Die Stokessche Formel	93
§ 60. Ideale Flüssigkeiten	94
§ 61. Umströmung von Körpern durch Flüssigkeiten. Stromlinien- profil	97
§ 62. Rheologie	100
III. Schwingungen und Wellen	103
§ 63. Die harmonische Schwingung	103
§ 64. Harmonische Drehschwingungen	109
§ 65. Das Schwerependel	110
§ 66. Gedämpfte Schwingungen	111
§ 67. Die Überlagerung harmonischer Schwingungen	112
§ 68. Erzwungene Schwingungen	119
§ 69. Die Entstehung von Wellen	121
§ 70. Die Energie in der elastischen Welle	125
§ 71. Interferenz von Wellen	126
§ 72. Das Huygenssche Prinzip	127
§ 73. Reflexion und Brechung	127
§ 74. Stehende Wellen	131
§ 75. Schwingungen von Saiten und Stäben	131

§ 76. Schwingungen von Luftsäulen	133
§ 77. Reflexion, Brechung und Absorption von Schallwellen	135
§ 78. Wirkungen des Ultraschalls	136
§ 79. Phonometrie	137
§ 80. Das menschliche Ohr und das Gehör	139
§ 81. Töne, Klänge, Geräusche	143
§ 82. Der Doppler-Effekt	145
§ 83. Der Machsche Kegel	146

B. Wärmelehre

§ 84. Temperatur und Temperaturskala	149
§ 85. Die thermische Ausdehnung fester Körper	150
§ 86. Die thermische Ausdehnung von Flüssigkeiten	150
§ 87. Wärme und spezifische Wärme	151
§ 88. Die Bestimmung der spezifischen Wärme	153
§ 89. Die Wärmeübertragung	154
§ 90. Die Temperaturabhängigkeit des Volumens idealer Gase	157
§ 91. Die Temperaturabhängigkeit des Druckes idealer Gase	158
§ 92. Relative Atommasse, Mol, Avogadrosche Zahl	159
§ 93. Die Zustandsgleichung der idealen Gase	161
§ 94. Das Daltonsche Gesetz der Addition der Partialdrucke	162
§ 95. Die Brownsche Molekularbewegung	163
§ 96. Die Diffusion	165
§ 97. Osmose und osmotischer Druck	167
§ 98. Mittlere freie Weglängen und Stoßzahl in Gasen	168
§ 99. Die Verdampfung im Vakuum	169
§ 100. Diffusionspumpen	170
§ 101. Wärme und Arbeit beim idealen Gas	171
§ 102. Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik	173
§ 103. Reversible Prozesse	173
§ 104. Isotherme Prozesse	174
§ 105. Die Enthalpie	174
§ 106. Adiabatische Prozesse	175
§ 107. Zustandsänderungen realer Gase	176
§ 108. Der Joule-Thomson-Prozeß	178
§ 109. Die Erzeugung tiefer Temperaturen und die Verflüssigung von Gasen	179
§ 110. Die Verdampfung	180
§ 111. Die Kondensation	184
§ 112. Die Luftfeuchtigkeit	184
§ 113. Schmelzen und Erstarren	185
§ 114. Überhitzte und unterkühlte Flüssigkeiten. Unterkühlte Dämpfe	186
§ 115. Dampfdruckerniedrigung, Siedepunkterhöhung und Gefrier- punkterniedrigung bei verdünnten Lösungen	187

§ 116. Der Carnotsche Kreisprozeß	189
§ 117. Kältemaschine und Wärmepumpe	193
§ 118. Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik	195
§ 119. Die Entropie	196
§ 120. Reversible und irreversible Prozesse	197
§ 121. Entropie und Wahrscheinlichkeit	200
§ 122. Freie Energie und freie Enthalpie	202
§ 123. Zur Thermodynamik irreversibler Prozesse	204

C. Elektrizitätslehre

I. Elektrostatik 205

§ 124. Die elektrische Ladung	205
§ 125. Das Coulombsche Gesetz	205
§ 126. Die elektrische Feldstärke	206
§ 127. Die elektrischen Feldlinien	208
§ 128. Potential und Spannung	209
§ 129. Äquipotentialflächen	211
§ 130. Feldstärke und Spannung im homogenen Feld	212
§ 131. Potential und potentielle Energie	212
§ 132. Das Potential einer Punktladung	213
§ 133. Der Dipol im elektrischen Feld	216
§ 134. Leiter und Nichtleiter	217
§ 135. Die Verteilung elektrischer Ladungen auf Leitern	217
§ 136. Leiter im elektrischen Feld. Influenz	218
§ 137. Die Kapazität eines Plattenkondensators	220
§ 138. Die Kapazität einer Kugel	221
§ 139. Schaltungen von Kondensatoren	222
§ 140. Die Dielektrizitätskonstante	223
§ 141. Atome und Moleküle im elektrischen Feld	225
§ 142. Dielektrika im elektrischen Feld. Polarisierung	226
§ 143. Die Piezoelektrizität	229
§ 144. Elektrostatische Meßinstrumente	230
§ 145. Die Wirkung von Spitzen in elektrischen Feldern	232
§ 146. Der Van De Graaff-Hochspannungsgenerator	232

II. Der elektrische Strom 233

§ 147. Der Leitungsmechanismus in Metallen	233
§ 148. Die Stromstärke	234
§ 149. Das Ohmsche Gesetz	235
§ 150. Arbeit und Leistung des elektrischen Stromes	236
§ 151. Die Wärmewirkung des elektrischen Stromes	237
§ 152. Die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes	238
§ 153. Die Supraleitung	238

§ 154. Elektrische Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit	239
§ 155. Die Kirchhoffschen Sätze über Stromverzweigungen	239
§ 156. Die Schaltung von Strom- und Spannungsmeßinstrumenten	240
§ 157. Spannungsteilung und Spannungsmessung durch Kompen- sation	241
§ 158. Die Widerstandsmessung mit der Wheatstoneschen Brücke	242
§ 159. Die Schaltung von Akkumulatoren	243
§ 160. Die Entladung eines Kondensators	244
§ 161. Das magnetische Feld elektrischer Ströme	245
§ 162. Die elektromagnetische Induktion	247
§ 163. Magnetische Induktion B und magnetischer Induktionsfluß Φ	248
§ 164. Das Induktionsgesetz	249
§ 165. Die Verknüpfung elektrischer und magnetischer Felder	251
§ 166. Die Messung der magnetischen Induktion	251
§ 167. Die Lenzsche Regel	251
§ 168. Wirbelströme	252
§ 169. Wirkungen eines Magnetfeldes auf einen stromdurchflossenen Leiter	252
§ 170. Der magnetische Dipol im homogenen Magnetfeld	253
§ 171. Das magnetische Moment einer Spule	254
§ 172. Das magnetische Moment eines Atoms	255
§ 173. Diamagnetismus und Paramagnetismus	256
§ 174. Magnetisierung, Permeabilität und magnetische Suszeptibi- lität	258
§ 175. Eigenschaften ferromagnetischer Stoffe	260
§ 176. Der Ferromagnetismus	261
§ 177. Antiferromagnetismus und Ferrimagnetismus	262
§ 178. Die Ferroelektrizität	263
§ 179. Die Magnetostriktion	263
§ 180. Supraleiter im Magnetfeld	264
§ 181. Drehspulinstrumente für Gleichstrommessungen	265
§ 182. Elektrische Maschinen	267
§ 183. Mikrophon und Lautsprecher	268
§ 184. Momentanwerte und Effektivwerte von Spannung und Strom	269
§ 185. Meßinstrumente für Wechselströme	270
§ 186. Die Selbstinduktion	272
§ 187. Ein- und Ausschalten eines Gleichstromes	273
§ 188. Der Wechselstromkreis mit Induktivität	274
§ 189. Arbeit und Leistung des Wechselstromes	275
§ 190. Der Transformator	276
§ 191. Der Wechselstromkreis mit Kapazität	278
§ 192. Der Wechselstromkreis mit Kapazität und Induktivität	280
§ 193. Der geschlossene elektrische Schwingungskreis	281
§ 194. Der stabförmige elektrische Dipol	282
§ 195. Die Ausstrahlung elektromagnetischer Wellen durch einen elektrischen Dipol	283

§ 196. Nachrichtenübermittlung durch elektromagnetische Wellen	285
§ 197. Die Röhrendiode	288
§ 198. Die Röhrentriode	289
§ 199. Aufbau und Wirkungsweise eines Röhrengenerators	290
§ 200. Halbleiter	291
§ 201. Die Halbleiterdiode	297
§ 202. Die Halbleitertriode. Der Flächentransistor	299
§ 203. Berührungsspannungen zwischen festen Körpern	301
§ 204. Die Thermoelektrizität	302
§ 205. Die Temperaturmessung mit Thermoelementen	304
§ 206. Elektrolytische Leiter	305
§ 207. Beispiele zur Elektrolyse	307
§ 208. Das Faradaysche Gesetz der Elektrolyse	309
§ 209. Chemische Stromquellen	312
§ 210. Elektrokinetische Erscheinungen	316
§ 211. Elektrobiologie	318

D. Optik

I. Ausbreitung des Lichtes 322

§ 212. Lichtstrahlen und Strahlenbündel	322
§ 213. Hilfsmittel zur Beschreibung der Übertragung von Strahlungsenergie	323
§ 214. Die Reflexion	329
§ 215. Die Brechung	330
§ 216. Die Totalreflexion	334
§ 217. Die Absorption	337
§ 218. Reflexions-, Absorptions- und Transmissionsgrad	340
§ 219. Die Dispersion	342
§ 220. Die Polarisierung	344
§ 221. Polarisierung durch Reflexion	346
§ 222. Doppelbrechung und Polarisierung	349
§ 223. Optische Anisotropie bei biologischen Objekten	354
§ 224. Die optische Aktivität	354
§ 225. Die Interferenz	358
§ 226. Interferenzerscheinungen an dünnen Schichten	366
§ 227. Interferometer	373
§ 228. Die Beugung	376
§ 229. Die Streuung	385
§ 230. Die Lichtgeschwindigkeit	387

II. Optische Abbildung 390

§ 231. Abbildung durch Spiegel	390
§ 232. Abbildung durch Linsen	396

§ 233. Abbildungsfehler	404
§ 234. Das menschliche Auge als optisches Instrument	412
§ 235. Die Lupe	420
§ 236. Das Mikroskop	421
§ 237. Das Fernrohr	429
§ 238. Die Holographie	432

III. Strahlungsempfänger und Strahlungsmessung 438

§ 239. Thermische Strahlungsempfänger	438
§ 240. Photoelektrische Strahlungsempfänger	438
§ 241. Das Auge als Strahlungsempfänger	443
§ 242. Die photographische Schicht	445
§ 243. Die photometrischen Größen	447

IV. Strahlungsquellen 451

§ 244. Temperaturstrahler	451
§ 245. Gasentladungen	457
§ 246. Gasentladungslampen	461
§ 247. Lumineszierende Festkörper	462
§ 248. Der Laser	464
§ 249. Der Maser	470
§ 250. Die spektrale Zerlegung einer Strahlung	471

E. Elektronen- und Ionenoptik

§ 251. Elektronen im homogenen elektrischen Feld	475
§ 252. Elektronen im homogenen magnetischen Feld	477
§ 253. Elektrische und magnetische Linsen	479
§ 254. Elektronenstrahlquellen	480
§ 255. Das Elektronenmikroskop	481
§ 256. Der Elektronenstrahl-Oszillograph	483
§ 257. Die Fernseh-Kameraröhre	483
§ 258. Die Fernseh-Bildröhre	485
§ 259. Bildwandler und Bildverstärker	486
§ 260. Der Massenspektrograph	487

F. Atomphysik

§ 261. Der Atomismus der Materie	489
§ 262. Die elektrische Elementarladung	490
§ 263. Lichtquanten oder Photonen	491
§ 264. Der Compton-Effekt	494

§ 265. Der Dualismus Welle-Korpuskel	495
§ 266. Die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation	496
§ 267. Das Bohrsche Atommodell	497
§ 268. Aufbau und Spektren von Atomen	499
§ 269. Neuere Vorstellungen über das Atom	504
§ 270. Die Bedeutung der Quantenzahlen	505
§ 271. Das periodische System der Elemente	509
§ 272. Die chemische Bindung	515
§ 273. Aufbau und Spektren von Molekülen	517
§ 274. Elektronenspinresonanz	518
§ 275. Magnetische Kernresonanz	521
§ 276. Röntgenstrahlen	522
§ 277. Teilchenbeschleuniger	531
§ 278. Strahlendetektoren	535

G. Kernphysik

§ 279. Der Aufbau der Atomkerne	543
§ 280. Die natürliche Radioaktivität	547
§ 281. Künstliche Kernumwandlungen	550
§ 282. Kernspaltung und Kernfusion	556
§ 283. Kernreaktoren	558
§ 284. Elementarteilchen	559

Register	569
--------------------	-----

A. Mechanik

Die *Mechanik*, die die Lehre vom Gleichgewicht der Kräfte (*Statik*) und von der Bewegung der Körper unter der Einwirkung von Kräften (*Dynamik*) umfaßt, gibt uns *allgemeine Grundlagen für die gesamte Physik*. In der Mechanik, deren Ursprünge im Bereich der täglichen Erfahrung des Menschen liegen, bildeten sich die wichtigsten *Grundbegriffe* wie die der Geschwindigkeit, der Beschleunigung, der Masse, der Kraft, des Impulses und der Energie. Hier können wir die Ablösung von der unmittelbaren sinnlichen Wahrnehmung, die fortschreitende *Abstraktion* verfolgen, die im 17. Jahrhundert zu dem in der Folgezeit so fruchtbaren Newtonschen Axiomensystem führte und die später nicht nur für die Physik, sondern auch für andere Zweige der Naturwissenschaften charakteristisch ist. Die ersten Beispiele von *Erhaltungssätzen*, die überall in der Physik eine entscheidende Rolle spielen, wurden in der Mechanik entdeckt: die Sätze von der Erhaltung der Energie, des Impulses und des Drehimpulses. Aus der glanzvollen Entwicklung der Mechanik ging schließlich auch *das mechanische Naturbild* hervor¹, die Vorstellung, alle physikalischen Erscheinungen müßten sich aus der Mechanik heraus „erklären“ lassen. Erst durch die Erfahrungen in der Elektrodynamik im vergangenen Jahrhundert sah man sich gezwungen, diese mechanistische Betrachtungsweise aufzugeben.

I. Mechanik der Massenpunkte und der starren Körper

§ 1. Massenpunkt und starrer Körper

Bei einem *starren*, d. h. *nicht deformierbaren* Körper unterscheiden wir: 1. die reine fortschreitende Bewegung oder *Translation*, bei der der Körper seine Orientierung im Raum beibehält, und 2. die reine Drehbewegung oder *Rotation*. Bei der Drehung eines Rades um seine festgehaltene Achse liegt z. B. eine Rotation vor, beim rollenden Rad dagegen eine Überlagerung von Rotation und Translation. Kompliziertere Bewegungen starrer Körper können wir als zusammengesetzt aus Translationen und Rotationen beschreiben.

Eine starke Vereinfachung ergibt sich, wenn wir zunächst auch von der Ausdehnung des Körpers absehen und uns seine Masse in einem Punkt, dem sogenannten *Massenpunkt*, *zusammengezogen* denken.

In der Wirklichkeit gibt es natürlich nur ausgedehnte Körper. Aber auch im täglichen Leben betrachten wir ausgedehnte Körper häufig als Punkte.

¹ Vgl. E. J. DIJKSTERHUIS, *Die Mechanisierung des Weltbildes*, Springer-Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1956

Wir beschreiben z. B. die Stelle, an der sich ein Kraftwagen auf der Autobahn befindet, allein durch die Entfernung von einem bekannten Ausgangspunkt und den Ort eines Schiffes auf dem Ozean allein durch die geographische Breite und Länge. Außerdem sei hier schon darauf hingewiesen, daß es in jedem ausgedehnten Körper einen Punkt gibt, den sogenannten *Massenmittelpunkt oder Schwerpunkt*, der sich nach den Gesetzen des Massenpunktes bewegt. Diesen Punkt meinen wir, wenn wir in der Mechanik der Massenpunkte von einem Körper sprechen.

Beide Begriffe, der des Massenpunktes und der des starren Körpers, beruhen auf einer *Abstraktion*, bei der wir jeweils ein bestimmtes, allen Körpern gemeinsames Merkmal herausgreifen. Wir sehen dabei von allen übrigen Eigenschaften ab, die wir erst nach und nach in den Kreis unserer Betrachtungen einbeziehen.

In der *Mechanik der Massenpunkte* gewinnen wir grundlegende und sehr allgemein gültige Gesetze. In der *Mechanik der starren Körper* nehmen wir zu der Masse als weiteres gemeinsames Merkmal die räumliche Ausdehnung hinzu, wir sehen jedoch von der Deformierbarkeit ab. Erst die *Mechanik der deformierbaren Körper* schließt dann die Vorgänge bei der Deformation ein.

§ 2. Die gleichförmige Bewegung

Bewegt sich ein Körper auf geradliniger Bahn und legt dabei in gleich großen Zeitintervallen Δt immer gleich große Wegabschnitte Δx zurück, so heißt die Bewegung *gleichförmig*. Der Quotient Weg/Zeit $= \Delta x / \Delta t$ ist die *Geschwindigkeit* v des Körpers. Ist etwa $\Delta x = 20$ m und $\Delta t = 5$ s, dann ergibt sich für die Geschwindigkeit $v = \Delta x / \Delta t = 20/5 = 4$ m/s. Der Körper legt in jeder Sekunde den Weg $\Delta x = 4$ m zurück.

$$\text{Geschwindigkeit} = \frac{\text{zurückgelegter Weg}}{\text{dazu benötigte Zeit}}$$

$$\boxed{v = \frac{\Delta x}{\Delta t}} \quad (1)$$

$$\boxed{\Delta x = v \Delta t} \quad (2)$$

Die Geschwindigkeit ist bei der gleichförmigen Bewegung konstant. Es ist gleichgültig, von welchem Zeitpunkt an wir Δt messen und wie groß wir bei der Bildung des Quotienten $\Delta x / \Delta t$ das Zeitintervall Δt wählen, $\Delta x / \Delta t$ hat immer den gleichen Wert.

Beginnt die Bewegung insbesondere zur Zeit $t = 0$ am Ort $x = 0$ und ist der in einer beliebigen Zeit t zurückgelegte Weg x , so erhalten wir

$$\boxed{v = \frac{x}{t}} \quad (3)$$

und

$$\boxed{x = vt} \quad (4)$$

Der Weg x ist proportional der Zeit t . Der Proportionalitätsfaktor ist die Geschwindigkeit v . In Bild 1 ist der Weg in Abhängigkeit von der Zeit graphisch dargestellt. Das Bild zeigt eine gerade Linie. Der Weg ist eine lineare Funktion der Zeit t . Wir können zu jeder Zeit t (= Abszisse des Punktes P), die seit dem Beginn der Bewegung ($t = 0$) verfloren ist, den innerhalb dieser Zeit zurückgelegten Weg x (= Ordinate des Punktes P) ablesen. Je größer die Geschwindigkeit v ist, desto größer ist der Weg x nach einer festen Zeit t und damit auch die Steigung der Geraden in Bild 1. Die Steigung der Kurve, die den Weg in Abhängigkeit von der Zeit darstellt, ist ein Maß für die Geschwindigkeit.

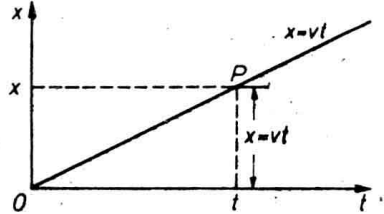


Bild 1. Der Weg x in Abhängigkeit von der Zeit t bei der gleichförmigen Bewegung

In Bild 2 ist die Geschwindigkeit v in Abhängigkeit von der Zeit t graphisch dargestellt. Das Bild zeigt eine Gerade, die im Abstand $v = \text{const}$ parallel zur t -Achse verläuft. v hat während der ganzen Zeit t der Bewegung einen konstanten Wert. Verfolgen wir die Bewegung vom Beginn ($t = 0$) bis zur Zeit t (Punkt P), dann ist nach Gl. 4 der zurückgelegte Weg $x = vt$. Er entspricht dem Flächeninhalt des schraffierten Rechtecks von der Breite t und der Höhe v . Der Weg wird allgemein durch die Fläche unter der Kurve dargestellt, die die Abhängigkeit der Geschwindigkeit v von der Zeit t beschreibt.

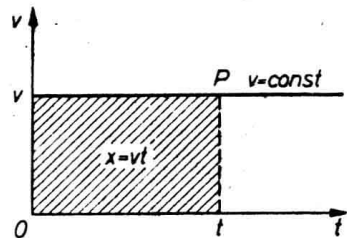


Bild 2. Zur Bestimmung des Weges aus der Geschwindigkeit bei der gleichförmigen Bewegung

Die Maßeinheit, in der wir die Geschwindigkeit angeben, hängt von den Maßeinheiten ab, die wir für den Weg x und die Zeit t wählen:

In dem international gebräuchlichen MKS-System werden gemessen: Die Länge in Metern (m), die Masse in Kilogramm (kg) und die Zeit in Sekunden (s). In diesem System ist die Einheit der Geschwindigkeit 1 m/s.

Daneben wird in der Physik häufig noch das CGS-System mit den Einheiten Centimeter (cm), Gramm (g) und Sekunde (s) benutzt. In diesem System ist die Einheit der Geschwindigkeit 1 cm/s.

§ 3. Die beschleunigte geradlinige Bewegung

Bewegungen, bei denen sich die Geschwindigkeit mit der Zeit ändert, heißen beschleunigt.

Nimmt die Geschwindigkeit v bei der geradlinigen Bewegung in gleich großen Zeitintervallen Δt immer um gleich große Beträge Δv zu, so sprechen