

# Theoretische Mechanik

Eine einleitende Abhandlung über die  
Prinzipien der Mechanik

Mit erläuternden Beispielen und zahlreichen  
Übungsaufgaben

Von

**A. E. H. Love, M.A., D.Sc., F.R.S.**

Ordentlicher Professor der Naturwissenschaft  
an der Universität Oxford

Autorisierte deutsche Übersetzung  
der zweiten Auflage von  
Dr.-Ing. **Hans Polster**

Mit 88 Textfiguren



Springer-Verlag  
Berlin Heidelberg GmbH  
1920

ISBN 978-3-642-52538-4      ISBN 978-3-642-52592-6 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-642-52592-6

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1920

## Auszug aus dem Vorwort zur ersten Auflage.

Den Grundstein zur Mechanik hat Newton gelegt, der wohl vor allem durch seine Großtaten auf diesem Gebiete dauernden Ruhm beanspruchen kann. Spätere Gelehrte haben zwar seine Prinzipien analytisch fortentwickelt und deren Anwendungsbereich erweitert, aber den Prinzipien selber gegenüber spielen sie doch nur die Rolle von Erklärern. Nichtsdestoweniger können wir in der neueren Forschung ein Bestreben finden, das seiner Natur nach ein allmählicher Wechsel in den Gesichtspunkten ist: Gegenüber dem Suchen nach Ursachen tritt mehr die Neigung in den Vordergrund, das zu erreichende Ziel in einer scharfen Formulierung der beobachteten Erscheinungen zu sehen. Andererseits sind die modernen Forscher in einer wichtigen Hinsicht von der Form der Newtonschen Theorie abgegangen. Der philosophische Grundsatz, daß jede Bewegung relativ ist, steht in ausgesprochenem Gegensatz mit Newtons dynamischem Apparat von absoluter Zeit, absolutem Raum und absoluter Bewegung. Es hat sich nötig gemacht, die Prinzipien und die aus ihnen abgeleiteten Ergebnisse von neuem zu erwägen und zu ermitteln, welcher Abänderungen es bedarf, um die von Newton begründete Theorie der Rationalen Mechanik mit der Lehre von der Relativität der Bewegung in Einklang zu bringen.

Dieses Buch soll ein Lehrbuch sein. Es soll den Studierenden einen möglichst genauen Bericht über die Prinzipien der Mechanik geben, der mit den modernen Ansichten im Einklang steht.

Die Studenten, für die das Buch bestimmt ist, können noch Anfänger in der Höheren Mathematik sein. Vom Leser wird nur vorausgesetzt, daß er einige Kenntnisse in analytischer Geometrie der Ebene besitzt und daß ihm die Elemente der Differential- und Integralrechnung nicht mehr ganz unbekannt sind. Über räumliche Geometrie und Differential-

gleichungen braucht er nichts zu wissen. Der Apparat der Cartesischen Koordinaten in drei Dimensionen wird im Buche selbst beschrieben; ebenso werden die Lösungen der auftretenden Differentialgleichungen erklärt. Häufig ist den analytischen Methoden gegenüber den geometrischen der Vorzug gegeben worden, da sie für die Studenten wahrscheinlich nützlicher sein werden, deren Bedürfnisse immer im Auge behalten sind.

Im Anschluß an die im Text gebrachten Beispiele, die einige wohlbekanntere Probleme enthalten und auf die im folgenden Bezug genommen wird, sind einigen Kapiteln größere Aufgabensammlungen beigelegt. Ich hoffe, daß sich diese ebenso für die Lehrer als auch für die Studenten beim Repe- tieren des Stoffes als nützlich erweisen. Die Beispiele sind zum größten Teil aus den Examensakten der Universität entnommen; andere, aber nur zum geringeren Teil, die ich in diesen Akten nicht gefunden habe, stammen aus den wohlbekannteren Sammlungen von Besant, Routh und Wolstenholme.

Von den Werken, die mir in Prinzipienfragen recht gute Dienste geleistet haben, nenne ich Kirchhoffs Vorlesungen über Mathematische Physik (Mechanik), Pearsons Grammar of Science und Machs Mechanik. Das letztere sollte überhaupt jeder Student besitzen, der Interesse für die geschichtliche Entwicklung der dynamischen Anschauungen hat. Für die Methoden der Behandlung einzelner Fragen verdanke ich vieles den Vorlesungen des Herrn R. R. Webb, dem ich mich dadurch sehr verpflichtet fühle.

Cambridge, August 1897.

A. E. H. Love.

## Vorwort zur zweiten Auflage.

Die in der neuen Auflage getroffenen Abänderungen bestehen im wesentlichen in einer Umgruppierung des Stoffes. Der hauptsächlichste Grund hierfür war der Wunsch, einesteils die Theorie in einer weniger abstrakten Weise zu bringen und andererseits lange einleitende Erörterungen zu vermeiden.

Wie bereits in der ersten Auflage sind wieder einzelne Abschnitte mit einem Sternchen bezeichnet. Das bedeutet, daß sie beim erstmaligen Lesen am besten weggelassen werden. Die Sammlungen vermischter Beispiele am Ende der meisten Kapitel sind mit einzelnen Änderungen beibehalten worden. Sämtliche Beispiele wurden nochmals nachgerechnet oder korrigiert, so daß zu hoffen ist, daß nur noch wenige Fehler darin enthalten sind. Denjenigen Studenten, die das Buch ohne Anleitung durch einen Lehrer lesen wollen, rate ich, vor allem den Abschnitten ohne Sternchen ihre Aufmerksamkeit zu schenken und sich zunächst auf die im Text angeführten Beispiele ohne Sternchen zu beschränken.

Schließlich danke ich Herrn A. E. Jolliffe bestens für seine freundliche Unterstützung durch das Lesen der Korrekturen.

Oxford, September 1906.

A. E. H. Love.

## Vorwort des Übersetzers.

Nach dem langjährigen Kriege mag die deutsche Herausgabe dieses englischen Buches manchem unangebracht erscheinen, vielleicht umsomehr, als wir an guten deutschen Mechanikbüchern keinen Mangel haben. Wenn ich die bereits im Jahre 1913 auf Anregung des Verlages begonnene Übersetzung nach einer Unterbrechung von  $4\frac{1}{2}$  Jahren, während denen ich im Felde stand, trotzdem zu Ende geführt habe, so geschah es aus der Meinung heraus, daß die Naturwissenschaft ebenso wie die Natur selbst zwischen den einzelnen Völkern keine Gegensätze kennt.

Das vorliegende Buch ist eine ziemlich wortgetreue Übersetzung der englischen Originalausgabe. Änderungen haben nur insofern stattgefunden, als einige Fehler der englischen Ausgabe verbessert und für die englischen Maße die deutschen eingeführt sind. Auch die englischen Literaturangaben sind beibehalten worden. Das alphabetische Sachverzeichnis wurde dagegen wesentlich ergänzt. Von den vielen Übungsaufgaben konnten die Lösungen nur zum kleinen Teil nachgerechnet werden, da hierzu ein unverhältnismäßig großer Zeitaufwand nötig gewesen wäre, der sich umsomehr verbot, als der Verlag bei der Honorierung auf die seit 1913 ja wesentlich veränderten Verhältnisse so gut wie keine Rücksicht nehmen zu können glaubte.

Merseburg, Ostern 1920.

H. Polster.

# Inhaltsverzeichnis.

## Einleitung.

	Seite
1. Das Wesen der Wissenschaft . . . . .	1
2. Die Bewegung eines materiellen Punktes . . . . .	2
3. Das Messen der Zeit . . . . .	3
4. Die Bestimmung der Lage . . . . .	3
5. Das Bezugssystem . . . . .	5
6. Die Wahl des für die Zeitmessung gewählten Vorganges und des Bezugssystems . . . . .	6

## I. Verschiebung, Geschwindigkeit, Beschleunigung.

7. Vorbemerkung . . . . .	7
8. Die Verschiebung . . . . .	7
9. Die Definition des Vektors . . . . .	8
10. Beispiele gleichwertiger Vektoren . . . . .	9
11. Komponenten und Resultierende . . . . .	11
12. Zusammensetzung einer beliebigen Anzahl von Vektoren . . . . .	13
13. Vektoren, die den Wert Null ergeben . . . . .	15
14. Die Komponenten der Verschiebung . . . . .	15
15. Die Geschwindigkeit der geradlinigen Bewegung . . . . .	15
16. Die Geschwindigkeit im allgemeinen . . . . .	17
17. Die gebundenen Vektoren . . . . .	18
18. Formale Definition der Geschwindigkeit . . . . .	20
19. Geschwindigkeitsmessung . . . . .	20
20. Das Moment eines gebundenen Vektors . . . . .	21
21. Hilfssatz . . . . .	22
22. Der Momentensatz . . . . .	22
23. Die Beschleunigung . . . . .	23
24. Beschleunigungsmessung . . . . .	24
25. Bezeichnungsweise für Geschwindigkeiten und Beschleunigungen	25
26. Die Winkelgeschwindigkeit und die Winkelbeschleunigung . . . . .	25
27. Relative Koordinaten und Relativbewegung . . . . .	26
28. Die Geometrie der Relativbewegung . . . . .	27

## II. Die Bewegung eines freien Massenpunktes in einem Kraftfelde.

29. Die Gravitation . . . . .	29
30. Das Kraftfeld . . . . .	29

	Seite
31. Die geradlinige Bewegung in einem gleichförmigen Felde . . .	29
32. Beispiele . . . . .	30
33. Die Parabelbewegung unter dem Einfluß der Schwerkraft . . .	31
34. Beispiele . . . . .	33
35. Die krummlinige Bewegung . . . . .	35
36. Die Beschleunigung eines Punktes, der eine ebene Bahn be- schreibt . . . . .	35
37. Beispiele . . . . .	36
38. Die einfache harmonische Bewegung . . . . .	37
39. Zusammensetzung einfacher harmonischer Bewegungen . . . .	40
40. Beispiele . . . . .	41
41. Die Keplerschen Gesetze der Planetenbewegung . . . . .	41
42. Gleichförmige Beschreibung von Flächen . . . . .	42
43. Radial- und Transversalkomponenten von Geschwindigkeit und Beschleunigung . . . . .	43
44. Beispiele . . . . .	44
45. Die Beschleunigung der Zentralbewegung . . . . .	45
46. Beispiele . . . . .	45
47. Ellipsenbewegung um einen Brennpunkt . . . . .	46
48. Beispiele . . . . .	47
49. Die Umkehrung des Problems der Zentralbewegung . . . . .	49
50. Die Bestimmung der Zentralbewegungsbahnen in gegebenem Kraftfeld . . . . .	50
51. Bahnen unter dem Einfluß einer Zentralbeschleunigung, die sich umgekehrt mit dem Quadrat der Entfernung ändert . . . . .	51
52. Einige weitere Beispiele für die Bestimmung von Zentralbewe- gungsbahnen bei gegebenem Kraftfeld . . . . .	52
53. Newtons Art der Untersuchung . . . . .	53
54. Geradlinige Bewegung unter dem Einfluß einer Beschleunigung, die nach einem Punkte der Geraden gerichtet ist und sich umgekehrt mit dem Quadrat des Abstandes ändert . . . . .	55
55. Beispiele . . . . .	56
56. Das Feld der Erdschwere . . . . .	57
57. Beispiele . . . . .	58
Vermischte Beispiele . . . . .	58

### III. Kräfte, die an einem Massenpunkt angreifen.

58. Die Schwerkraft . . . . .	75
59. Das Kraftmaß . . . . .	77
60. Die Masseneinheit und die Kräfteinheit . . . . .	77
61. Die Vektoreigenschaft der Kraft . . . . .	78
62. Beispiele . . . . .	80
63. Die Definitionen der Bewegungsgröße und der Beschleunigungs- kraft . . . . .	81
64. Bewegungsgleichungen . . . . .	81

#### Bewegungsgleichungen in einfachen Fällen.

65. Die Bewegung auf einer glatten Leitkurve unter dem Einfluß der Schwere . . . . .	82
66. Beispiele . . . . .	84
67. Kinetische Energie und Arbeit . . . . .	85



	Seite
68. Die Energieeinheit und die Arbeitseinheit . . . . .	85
69. Die Leistung . . . . .	86
70. Die Reibung . . . . .	86
71. Die Bewegung auf einer rauhen Ebene . . . . .	87
72. Beispiele . . . . .	88
73. Die Atwoodsche Fallmaschine . . . . .	88
74. Beispiele . . . . .	89
75. Kleine Schwingungen des mathematischen Pendels . . . . .	90
76. Beispiele . . . . .	91
77. Einseitiger Zwang durch eine Führung . . . . .	91
78. Beispiele . . . . .	92
79. Das Kegelpendel . . . . .	93
80. Beispiele . . . . .	94

**Die Bewegungsgröße.**

81. Der Antrieb . . . . .	94
82. Plötzliche Bewegungsänderungen . . . . .	95
83. Der Satz von der Erhaltung der Bewegungsgröße . . . . .	95
84. Das Kraftmoment, der Drall und das Moment der Beschleunigungskraft um eine Achse . . . . .	96
85. Der Satz von der Erhaltung des Dralls . . . . .	98

**Arbeit und Energie.**

86. Die Arbeit einer veränderlichen Kraft . . . . .	98
87. Die Berechnung der Arbeit . . . . .	99
88. Die Kraftfunktion . . . . .	101
89. Die Potentialfunktion . . . . .	101
90. Die Ableitung der Kraft aus dem Potential . . . . .	102
91. Die Energiegleichung . . . . .	103
92. Die potentielle Energie eines Massenpunktes in einem Kraftfeld . . . . .	105
93. Kräfte, die keine Arbeit leisten . . . . .	105
94. Konservative und nichtkonservative Felder . . . . .	105
Vermischte Beispiele . . . . .	106

**IV. Die Bewegung eines Massenpunktes unter der Wirkung gegebener Kräfte.**

95. Vorbemerkung . . . . .	113
96. Der Ansatz der Bewegungsgleichungen . . . . .	113
97. Die Beschleunigung eines Punktes auf einer Raumkurve . . . . .	114
98. Räumliche Polarkoordinaten . . . . .	115
99. Die Integration der Bewegungsgleichungen . . . . .	116
100. Beispiele . . . . .	117
101. Die Bewegung eines Körpers, der an einem Seil oder an einer Feder hängt . . . . .	117
102. Beispiele . . . . .	118
103. Die Zentralbewegung . . . . .	119
104. Die Apsiden . . . . .	120
105. Beispiele . . . . .	121
106. Der Apsidenwinkel bei angenäherten Kreisbahnen . . . . .	122
107. Beispiele . . . . .	124

	Seite
108. Beispiele für Bewegungsgleichungen, die in Polarkoordinaten ausgedrückt sind . . . . .	124
109. Beispiele für Bewegungen, die unter dem Einfluß mehrerer Zentralkräfte vor sich gehen . . . . .	125
110. Die gestörte Ellipsenbewegung . . . . .	127
111. Tangential-Impuls . . . . .	127
112. Normal-Impuls . . . . .	129
113. Beispiele . . . . .	130
Vermischte Beispiele . . . . .	130

### V. Die Bewegung beim Vorhandensein von Zwangs- und Widerstandskräften.

114. Vorbemerkung . . . . .	143
115. Die Bewegung auf einer glatten ebenen Kurve unter der Wirkung beliebiger Kräfte . . . . .	143
116. Beispiele . . . . .	144
117. Die Bewegung zweier durch einen unausdehnbaren Faden verbundenen Körper . . . . .	144
118. Beispiele . . . . .	145
119. Pendelschwingungen . . . . .	145
120. Vollständige Umdrehung . . . . .	147
121. Sonderfall . . . . .	148
122. Beispiele . . . . .	149
123. Die Drehung einer glatten ebenen Röhre in ihrer Ebene . . . . .	149
124. Newtons sich drehende Bahn . . . . .	151
125. Beispiele . . . . .	152
126. Die Bewegung auf einer rauhen ebenen Kurve unter der Wirkung der Schwere . . . . .	152
127. Beispiele . . . . .	154
128. Die Bewegung auf einer Raumkurve . . . . .	154
129. Die Bewegung auf einer glatten Umdrehungsfläche mit lotrechter Achse . . . . .	155
130. Beispiele . . . . .	156
131. Die Bewegung auf einer beliebigen Oberfläche . . . . .	156
132. Die Schmiegungeebene der Bahn . . . . .	158
133. Beispiele . . . . .	159
134. Die Bewegung im widerstehenden Mittel . . . . .	160
135. Widerstand proportional der Geschwindigkeit . . . . .	160
136. Einfache harmonische Schwingung mit Dämpfung . . . . .	161
137. Beispiele . . . . .	162
138. Die Bewegung in einer lotrechten Ebene unter der Wirkung der Schwere . . . . .	163
139. Beispiele . . . . .	166
Vermischte Beispiele . . . . .	166

### VI. Das Gegenwirkungsgesetz.

140. Der gerade zentrale Stoß von Kugeln . . . . .	189
141. Die ballistische Wage . . . . .	189
142. Die Aufstellung des Gegenwirkungsgesetzes . . . . .	190
143. Das Massenverhältnis . . . . .	191

	Seite
144. Die Masse . . . . .	191
145. Die Dichte . . . . .	192
146. Die Gravitation . . . . .	192
147. Die Theorie der Anziehungskräfte . . . . .	193
148. Die mittlere Dichte der Erde . . . . .	194
149. Die Anziehungskraft im Innern einer schweren Kugel . . . . .	194
150. Beispiele . . . . .	194

**Die Theorie des Punkthaufens.**

151. Vorbemerkung . . . . .	195
152. Der Massenmittelpunkt . . . . .	196
153. Die resultierende Bewegungsgröße . . . . .	196
154. Die resultierende Beschleunigungskraft . . . . .	197
155. Relative Koordinaten . . . . .	197
156. Der Drall . . . . .	198
157. Das Moment der Beschleunigungskraft . . . . .	199
158. Die kinetische Energie . . . . .	199
159. Beispiele . . . . .	200
160. Die Bewegungsgleichungen eines Punkthaufens . . . . .	200
161. Das Gesetz über die Wirkung der inneren Kräfte . . . . .	200
162. Vereinfachte Form der Bewegungsgleichungen . . . . .	201
163. Die Bewegung des Massenmittelpunktes . . . . .	202
164. Die Bewegung relativ zum Massenmittelpunkt . . . . .	202
165. Die Unabhängigkeit von Schiebung und Drehung . . . . .	203
166. Die Erhaltung der Bewegungsgröße . . . . .	203
167. Die Erhaltung des Dralls . . . . .	203
168. Plötzliche Bewegungsänderungen . . . . .	204
169. Die Arbeit einer zwischen zwei Massenpunkten wirkenden Kraft . . . . .	205
170. Die Kraftfunktion . . . . .	206
171. Die potentielle Energie . . . . .	206
172. Die potentielle Energie eines Gravitationssystems . . . . .	207
173. Die Energiegleichung . . . . .	207
174. Die durch Stöße erzeugte kinetische Energie . . . . .	208

**Das Problem des Sonnensystems.**

175. Das Problem der $n$ Körper . . . . .	209
176. Das Problem der zwei Körper . . . . .	209
177. Beispiele . . . . .	211
178. Das allgemeine Problem der Planetenbewegung . . . . .	212

**Körper von endlicher Größe.**

179. Die Theorie von der Bewegung eines Körpers . . . . .	213
180. Die Bewegung eines starren Körpers . . . . .	214
181. Die Verlegbarkeit der Kräfte . . . . .	215
182. Die Kräfte zwischen starren Körpern, die sich berühren . . . . .	216
183. Die Reibung . . . . .	216
184. Die potentielle Energie eines Körpers . . . . .	217
185. Die Energie eines starren Körpers . . . . .	218
186. Die potentielle Energie einer gedehnten Saite . . . . .	218
187. Der Sitz der potentiellen Energie . . . . .	219
188. Die Leistung . . . . .	220

	Seite
189. Die Bewegung eines Seiles oder einer Kette . . . . .	221
190. Seil oder Kette mit vernachlässigbarer Masse in Berührung mit einer glatten Fläche . . . . .	222
Vermischte Beispiele . . . . .	223

### Anhang zu Kapitel VI. Reduktion eines Systems von gebundenen Vektoren.

a) Das Vektorenpaar . . . . .	226
b) Gleichwertigkeit von Vektorpaaren in ein und derselben Ebene . . . . .	226
c) Parallele Vektoren . . . . .	227
d) Gleichwertigkeit von Vektorpaaren in parallelen Ebenen . . . . .	228
e) Die Zusammensetzung von Vektorpaaren . . . . .	229
f) Ebenes System gebundener Vektoren . . . . .	230
g) Die Reduktion eines Systems linienflüchtiger Vektoren . . . . .	231

### VII. Verschiedene Methoden und Anwendungen.

191. Vorbemerkung . . . . .	233
-----------------------------	-----

#### Plötzliche Bewegungsänderungen.

192. Das Aufeinanderwirken von Körpern beim Stoß . . . . .	233
193. Newtons Versuchsergebnis . . . . .	234
194. Der Stoßkoeffizient . . . . .	235
195. Gerader Stoß elastischer Kugeln . . . . .	235
196. Die verallgemeinerte Newtonsche Regel . . . . .	236
197. Schiefer Stoß vollkommen glatter, elastischer Kugeln . . . . .	237
198. Die Ableitung der Newtonschen Regel auf Grund einer besonderen Annahme . . . . .	238
199. Elastische Systeme . . . . .	238
200. Die allgemeine Theorie der plötzlichen Bewegungsänderungen . . . . .	239
201. Erläuternde Aufgaben . . . . .	239
202. Beispiele . . . . .	242

#### Beginnende Bewegungen.

203. Die Art der Aufgaben . . . . .	245
204. Die Methode zur Bestimmung der Anfangsbeschleunigungen . . . . .	245
205. Erläuterndes Beispiel . . . . .	246
206. Die Anfangskrümmung . . . . .	247
207. Beispiele . . . . .	248

#### Anwendungen der Energiegleichung.

208. Das Gleichgewicht . . . . .	249
209. Die Maschinen . . . . .	251
210. Beispiele . . . . .	251
211. Kleine Schwingungen . . . . .	252
212. Beispiele . . . . .	254
213. Das Energieprinzip und das Prinzip von der Erhaltung der Bewegungsgröße . . . . .	255
214. Beispiele . . . . .	256
Vermischte Beispiele . . . . .	257

### VIII. Die zweidimensionale Bewegung eines starren Körpers.

	Seite
215. Vorbemerkung . . . . .	276
216. Das Trägheitsmoment . . . . .	277
217. Lehrsätze über Trägheitsmomente . . . . .	278
218. Die Berechnung von Trägheitsmomenten . . . . .	279
219. Beispiele . . . . .	281
220. Die Geschwindigkeit und Bewegungsgröße des starren Körpers	282
221. Die Beschleunigungskraft des starren Körpers . . . . .	284
222. Beispiele . . . . .	285
223. Die Bewegungsgleichungen des starren Körpers . . . . .	286
224. Beständigkeit der zweidimensionalen Bewegung . . . . .	287
225. Das physische Pendel . . . . .	287
226. Beispiele . . . . .	288
227. Erläuternde Aufgaben (Betrachtungen über die Bewegung eines Zuges) . . . . .	289
228. Beispiele . . . . .	293
229. Die kinematische Bedingung für das Rollen . . . . .	294
230. Beispiele . . . . .	296
231. Die Kraftwirkungen in einem Stabe . . . . .	301
232. Die Bewegung unter der Wirkung von Impulsen . . . . .	302
233. Die durch Impulsen erzeugte kinetische Energie . . . . .	303
234. Beispiele . . . . .	304
235. Beginnende Bewegungen . . . . .	305
236. Kleine Schwingungen . . . . .	305
237. Erläuternde Beispiele . . . . .	306
238. Beispiele . . . . .	307
Vermischte Beispiele . . . . .	308

### IX. Starre Körper und Körpersysteme.

239. Der Stoß zwischen zwei festen Körpern . . . . .	321
240. Der Stoß vollkommen glatter Körper . . . . .	322
241. Der Stoß rauher Körper . . . . .	323
242. Der Fall ohne Gleiten . . . . .	324
243. Beispiele . . . . .	325
244. Stoßbewegung von Körpersystemen . . . . .	326
245. Beispiele . . . . .	329
246. Beginnende Bewegungen und Anfangskrümmung der Bahnen	330
247. Erläuterndes Beispiel . . . . .	331
248. Beispiele . . . . .	334
249. Kleine Schwingungen . . . . .	334
250. Beispiele . . . . .	335
251. Die Stabilität stetiger Bewegungen . . . . .	336
252. Beispiele . . . . .	337
253. Erläuterndes Beispiel (Energie und Bewegungsgröße) . . . . .	339
254. Kinematische Bemerkung . . . . .	340
255. Beispiele (Bemerkung über Momente um eine sich bewegende Achse) . . . . .	341

<b>Die Bewegung eines Seiles oder einer Kette.</b>		Seite
256.	Die unausdehnbare Kette . . . . .	344
257.	Die Spannung an einer Stelle, an der eine Bewegungsänderung eintritt . . . . .	344
258.	Erläuternde Beispiele . . . . .	345
259.	Die erzwungene Bewegung einer Kette unter der Wirkung der Schwere . . . . .	346
260.	Beispiele . . . . .	347
261.	Die freie, ebene Bewegung einer Kette. Kinematische Gleichungen . . . . .	348
262.	Die freie, ebene Bewegung einer Kette. Ihre Bewegungsgleichungen . . . . .	351
263.	Veränderliche Form der Kurve . . . . .	352
264.	Beispiele . . . . .	352
265.	Beginnende Bewegung . . . . .	354
266.	Die stoßweise Bewegung . . . . .	355
267.	Beispiele . . . . .	356
	Vermischte Beispiele . . . . .	356

### X. Die Drehung der Erde.

268.	Vorbemerkung . . . . .	386
269.	Die Sternzeit und die mittlere Sonnenzeit . . . . .	386
270.	Das Gravitationsgesetz . . . . .	387
271.	Die Schwerkraft . . . . .	388
272.	Die Veränderlichkeit der Schwere mit der geographischen Breite . . . . .	389
273.	Masse und Gewicht . . . . .	391
274.	Der Einfluß des Mondes auf die Schwerkraft . . . . .	391
275.	Beispiele . . . . .	392
276.	Die Bewegung eines freien Körpers an der Erdoberfläche . . . . .	392
277.	Beginnende Bewegung . . . . .	394
278.	Die Bewegung eines Pendels . . . . .	395
279.	Das Foucaultsche Pendel . . . . .	396
280.	Beispiele . . . . .	397

### XI. Zusammenstellung und Besprechung der Prinzipien der Dynamik.

Die Newtonschen Bewegungsgesetze Das Kraftfeld. Die Definition der Kraft Die Masse. Der innere Aufbau von Körpern. Die Materialspannung. Die Erhaltung der Energie. Die „energetische“ Methode. Das Bezugssystem und der als Zeitmaß benutzte Vorgang . . . . .	399
---	-----

### Anhang.

Das Messen und die Einheiten . . . . .	415
--	-----

Alphabetisches Sachverzeichnis . . . . .	419
--	-----