

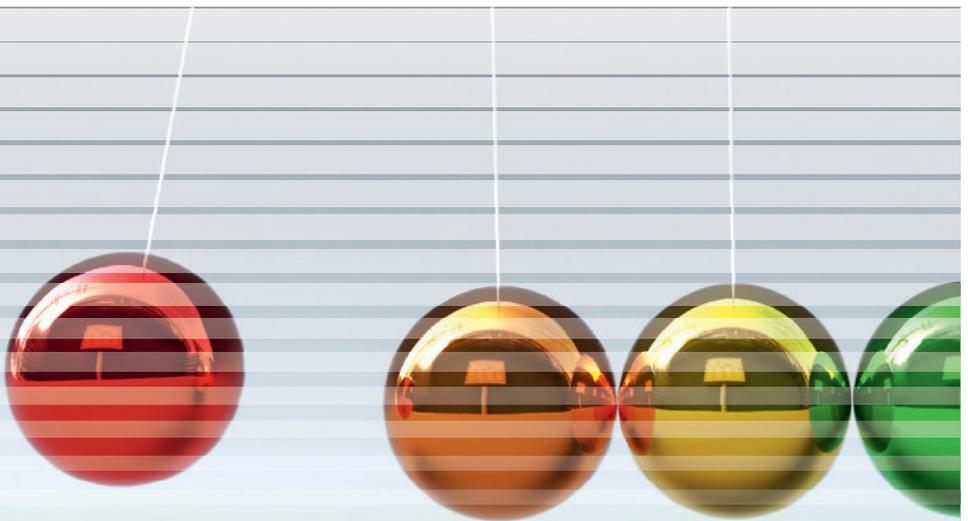


Werner Junker

PHYSIK

FÜR AHNUNG?LOSE

4. AUFLAGE



HIRZEL

Werner Junker
Physik für Ahnungslose



FÜR AHNUNG?LOSE

In dieser Reihe sind bisher erschienen:

Yára Detert / Christa Söhl, **Statistik** und Wahrscheinlichkeitsrechnung für Ahnungslose

Yára Detert, **Mathematik** für Ahnungslose

Werner Junker, **Physik** für Ahnungslose

Michael Haugk / Lothar Fritsche, **Quantenmechanik** für Ahnungslose

Katherina Standhartinger, **Chemie** für Ahnungslose

Katherina Standhartinger, **Organische Chemie** für Ahnungslose

Antje Galuschka, **Biochemie** für Ahnungslose

Christa Söhl, **Biologie** für Ahnungslose

Michaela Aubele, **Genetik** für Ahnungslose

Heinz-E. Klockhaus, **BWL** für Ahnungslose

Heinz-E. Klockhaus, **Buchführung** für Ahnungslose

Werner Junker

PHYSIK

für Ahnungslose

Eine Einstiegshilfe für Studierende

4. Auflage

von Dr. Werner Junker, Sachsenheim

Mit 437 Abbildungen und 5 Tabellen



S. Hirzel Verlag

Dr. Werner Junker
Metterzimmerstrasse 100
74343 Sachsenheim

Dr. Werner Junker, Jahrgang 1950, studierte Mathematik und Physik (Diplom und Lehramt) an der Universität Stuttgart und promovierte 1981 in Theoretischer Physik. Seitdem ist er Gymnasiallehrer für Mathematik und Physik, ließ sich aber zeitweise für seinen Forschungsauftrag auf dem Gebiet der Quantendiffusion freustellen.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN 978-3-7776-2332-0

Jede Verwertung des Werkes außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Übersetzung, Nachdruck, Mikroverfilmung oder vergleichbare Verfahren sowie für die Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen.

© 2013 S. Hirzel Verlag, Birkenwaldstraße 44, 70191 Stuttgart
Printed in Germany
www.hirzel.de

Satz: Claudia Wild, Konstanz
Druck: AZ-Druck, Berlin
Umschlaggestaltung: deblik, Berlin

Vorwort zur 4. Auflage

In weniger als Jahresfrist war die erste Auflage von „Physik für Ahnungslose“ ausverkauft, was Autor und Verlag überrascht und natürlich auch sehr gefreut hat. Offenbar besteht für ein derartiges Buch, ein Repetitorium der Schulphysik als Einstieghilfe für Studierende, ein echter Bedarf – der Erfolg bestätigt dies. Die zweite Auflage erfolgte daher als unveränderter Nachdruck.

Die dritte Auflage wurde vollständig überarbeitet, und in der vorliegenden vierten die nie zu vermeidenden Druckfehler korrigiert. Hier gilt der aufrichtige Dank den Lesern, die durch aufmerksames Durcharbeiten Unstimmigkeiten entdeckt und uns auf diese aufmerksam gemacht haben. Die Struktur und die Darstellung der Sachverhalte hat sich bewährt und wurde beibehalten.

Möge dieses Buch noch vielen Generationen eine wertvolle Hilfe sein!

Sachsenheim, im Sommer 2013

Werner Junker

*Meiner Frau gewidmet,
die als Nichtphysikerin die Rolle
des ahnungslosen Testlesers
übernommen hat*

Vorwort zur 1. Auflage

Dieses Buch wendet sich an Studierende technischer und naturwissenschaftlicher Fachrichtungen, die plötzlich über Physikkenntnisse verfügen sollen, im schlimmsten Falle gar eine Physikprüfung machen müssen, aber das entsprechende Schulwissen entweder vergessen, oder – aus Abneigung gegen das Fach bzw. wegen früher Abwahl des Faches in der Schule – sich nie angeeignet haben. In dieser Situation soll das Buch eine Möglichkeit bieten, sich den Schulstoff in Physik wieder ins Gedächtnis zu rufen oder ihn neu zu erwerben.

Entsprechend der Einteilung der Schulphysik in die Disziplinen Mechanik, Wärmelehre, Akustik, Optik, Elektrizitätslehre und Magnetismus sowie Atomphysik ist das Buch in sechs Kapitel (unterschiedlicher Länge) aufgeteilt, die in weiten Teilen unabhängig voneinander bearbeitet werden können – je nach Interessenlage. Allerdings werden grundlegende Begriffe von Kapitel 1, der Mechanik, des Öfteren in anderen Disziplinen gebraucht (z. B. das Newton'sche Grundgesetz oder Eigenschaften der mechanischen Wellen) – in diesem Falle erfolgt dann an entsprechender Stelle ein Rückverweis. Jedes Kapitel fängt beim Kenntnisstand „null“ an, behandelt dann zunächst den einfacheren Stoff der gymnasialen Mittelstufe und endet auf dem Abiturniveau des Leistungskurses der Oberstufe. Daher ist es bei entsprechender Interessenlage durchaus möglich, einzelne Kapitel (z. B. Optik oder Wärmelehre) an der Stelle, an der einem das bisher erworbene Wissen ausreichend erscheint, abzubrechen und zu einem anderen Kapitel (z. B. Elektrizitätslehre) überzugehen.

An mathematischen Kenntnissen sind der Stoff der Mittelstufe und Grundkurskenntnisse der Oberstufe des Gymnasiums erforderlich. Die inhaltliche und methodische Präsentation des Stoffes entspricht dem Vorgehen im Schulunterricht; allerdings können Versuchsergebnisse natürlich nur mitgeteilt werden. Die zahlreichen Aufgaben sollen – wie es in einer Prüfung ja erforderlich ist – die praktische Umsetzung verdeutlichen. Es sind durchweg Standardaufgaben, die in jedem Physikunterricht so oder in abgewandelter Form behandelt werden und die natürlich auch in den eingeführten Schulbüchern enthalten sind (unvollständige Auswahl in der Literaturliste im Anhang), auf die sich ja jeder Physikunterricht wesentlich stützt.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort		V
1	Mechanik	
1.1	Grundgrößen und ihre Messung	1
1.2	Die Dichte	2
1.3	Die Kraft	2
1.3.1	Wirkung einer Kraft	2
1.3.2	Vektorgroßen	2
1.3.3	Gewichtskraft	4
1.3.4	Hooke'sches Gesetz	5
1.3.5	Kraft und Gegenkraft	5
1.4	Geschwindigkeit/Beschleunigung	6
1.4.1	Geradlinige gleichförmige Bewegung	6
1.4.2	Gleichmäßig beschleunigte Bewegung	7
1.4.3	Durchschnitts- und Momentangeschwindigkeit	9
1.4.4	Durchschnitts- und Momentanbeschleunigung	9
1.5	Kräftegleichgewicht/Trägheitssatz	10
1.6	Reibung/Luftwiderstand	11
1.6.1	Gleitreibungskraft	11
1.6.2	Haftreibungskraft	11
1.6.3	Strömungswiderstand	12
1.7	Das Newton'sche Grundgesetz	13
1.8	Der freie Fall	14
1.8.1	Freier Fall ohne Luftwiderstand	14
1.8.2	Fall mit Luftwiderstand	14
1.9	Überlagerung von Bewegungen, Würfe, Bremsbewegungen	15
1.9.1	Überlagerung gleichförmiger Bewegungen	15
1.9.2	Würfe	15
1.9.3	Bremsbewegungen	19
1.10	Einfache Maschinen	20
1.10.1	Stange und Seil	20
1.10.2	Feste Rolle	20
1.10.3	Lose Rolle	21
1.10.4	Kombination einer festen und einer losen („masselosen“) Rolle	21
1.10.5	Der Flaschenzug	22
1.11	Die physikalische Arbeit	23
1.11.1	Spezialfälle	23
1.12	Leistung	27
1.13	Energie	28
1.13.1	Arten der Energie	28
1.13.2	Verlustfreie Speicherung von, verlustfreie Umsetzung in Arbeit	28
1.13.3	Energieumwandlungen	29

1.14	Impuls	32
1.14.1	Impulserhaltungssatz	32
1.14.2	Ballistisches Pendel	34
1.14.3	Unelastischer Stoß	34
1.14.4	Gerader elastischer Stoß	35
1.14.5	Schiefer Stoß gegen ruhende Wand	37
1.14.6	Kraft und Impulsänderung, Kraftstoß	38
1.15	Die Kreisbewegung	40
1.15.1	Zentripetalkraft und Zentripetalbeschleunigung	40
1.15.2	Größe der Zentripetalkraft F_z und der Zentripetalbeschleunigung a_z	41
1.15.3	Begriffe und Größen bei der Kreisbewegung	42
1.15.4	Vertikale Kreisbewegung	44
1.15.5	Arbeit bei der Kreisbewegung	45
1.15.6	Weitere Beispiele zur Kreisbewegung	46
1.16	Himmelsbewegung und Gravitation	48
1.16.1	Geozentrisches Weltsystem	48
1.16.2	Heliozentrisches Weltsystem	49
1.16.3	Kepler'sche Gesetze	49
1.16.4	Planetenbewegungen	50
1.16.5	Erd- und Sonnenmasse	52
1.16.6	Satelliten auf Kreisbahnen um die Erde	52
1.17	Trägheitskräfte	53
1.17.1	Möglichkeiten zur Beschreibung dynamischer Probleme	54
1.18	Der Stempeldruck in Flüssigkeiten und Gasen	56
1.18.1	Anwendungen des Stempeldrucks	57
1.19	Der hydrostatische Druck (Schweredruck)	58
1.20	Der Auftrieb/Schwimmen, Schweben, Sinken	61
1.20.1	Auftrieb	61
1.20.2	Schwimmen, Schweben, Sinken	63
1.21	Statik der Gase/Gesetz von Boyle-Mariotte	64
1.21.1	Statik der Gase	64
1.21.2	Gesetz von Boyle-Mariotte	66
1.22	Mechanische Schwingbewegungen	67
1.22.1	Schwingbewegung	67
1.22.2	Schwingungsfrequenz	68
1.22.3	Beispiel für eine kompliziertere Anfangsbedingung	69
1.22.4	Energie der mechanischen Horizontalschwingung	70
1.22.5	Die vertikale Federschwingung	70
1.22.6	Die U-Rohr-Schwingung	72
1.22.7	Das Fadenpendel	72
1.23	Gedämpfte Schwingungen/Erzwungene Schwingungen der Mechanik	75
1.23.1	Gedämpfte Schwingungen	75
1.23.2	Erzwungene Schwingungen	76
1.24	Überlagerung von Schwingungen	79

1.24.1	Zahlenbeispiele/Bewegungstypen bei der Überlagerung von Horizontal- und Vertikalschwingung	80
1.24.2	Eindimensionale Überlagerung	83
1.25	Mechanische Querwellen (eindimensional)	85
1.25.1	Transversal- und Longitudinalwellen	85
1.25.2	Reflexion der Transversalstörungen	87
1.25.3	Die sinusförmige Querwelle	88
1.26	Überlagerung von Wellen	92
1.26.1	Überlagerung einer Welle mit ihrer „Reflexion“ – Ausbildung stehender Wellen	94
1.26.2	Stehende Wellen in Trägern	95
1.26.3	Saitenschwingungen	96
1.27	Längswellen (Eindimensional)	99
1.27.1	Ausbreitung von Überdruck- und Unterdruckstörung	99
1.27.2	Reflexion von Längswellen	101
1.27.3	Reflexion einer sinusförmigen Längswelle am festen Ende/losen Ende	102
1.28	Zweidimensionale Wellenfelder (mechanischer Wellen)	103
1.28.1	Erklärung der Reflexion	105
1.28.2	Erklärung der Brechung	106
2	Wärmelehre	
2.1	Die Temperatur und ihre Messung	108
2.2	Längsausdehnung fester Körper beim Erwärmen	110
2.3	Die Volumenausdehnung von Flüssigkeiten/Anomalie des Wassers	111
2.3.1	Anomalie des Wassers	111
2.4	Die Volumenausdehnung der Gase/Kelvinskala	112
2.5	Temperatur und Teilchenbild/Wärme	114
2.5.1	Aufbau der Körper im Teilchenbild	114
2.5.2	Mechanische Arbeit und Wärme	116
2.6	Wärmemenge und spezifische Wärmekapazität	118
2.7	Mischungsversuche	119
2.8	Erscheinungsformen der Stoffe/Schmelz- und Verdampfungswärme	120
2.8.1	Aggregatzustände	120
2.8.2	Schmelzwärme	120
2.8.3	Verdampfungswärme	121
2.9	Ergänzungen: Verdunsten, Siedepunktserniedrigung	123
2.9.1	Verdunstung	123
2.9.2	Siedepunktserniedrigung	123
2.10	Wärmetransport	124
2.10.1	Wärmekonvektion	124
2.10.2	Wärmeleitung	125
2.10.3	Wärmestrahlung	125
2.11	Das allgemeine Gasgesetz	125
2.11.1	Erstfassung des Gasgesetzes	125
2.11.2	Avogadro- oder Loschmidt-Zahl, Endfassung des Gasgesetzes	127

2.12	Kinetische Gastheorie	128
2.12.1	Zusammenhang zwischen Druck und Geschwindigkeit	128
2.12.2	Zusammenhang zwischen Temperatur und Geschwindigkeit	130
2.12.3	Innere Energie	130
2.13	Der 1. Hauptsatz der Wärmelehre	131
2.14	Carnotprozess, 2. Hauptsatz, Wirkungsgrad bei Wärmemaschinen	131
2.14.1	Der Carnotprozess	131
2.14.2	Wirkungsgrad von Wärmemaschinen	133
2.14.3	Einige Erfahrungstatsachen	133
2.14.4	Der 2. Hauptsatz der Wärmelehre	134
2.14.5	Wärmemaschinen	135
2.15	Strahlungsgesetze	136
3	Akustik	
3.1	Grundtatsachen	138
3.1.1	Amplitude und Frequenz	138
3.1.2	Die Lochsirene	139
3.1.3	Ausbreitung von Schall	140
3.2	Schall als Längswelle	141
3.2.1	Versuche mit Schallwellen	141
3.3	Der Doppler-Effekt: Erreger oder Beobachter einer Welle bewegen sich	145
3.3.1	Erreger bewegt, Beobachter in Ruhe	145
3.3.2	Erreger fest, Beobachter bewegt	148
4	Optik	
4.1	Grundbegriffe	152
4.1.1	Punktförmige Lichtquelle, Lichtstrahl	152
4.1.2	Das optische Bild	152
4.2	Schatten	154
4.2.1	Kernschatten und Halbschatten	154
4.2.2	Die Entstehung der Mondphasen	154
4.2.3	Mond- und Sonnenfinsternisse	155
4.3	Die Reflexion des Lichts	156
4.3.1	Reflexionsgesetz	156
4.3.2	Das Spiegelbild	157
4.4	Die Brechung des Lichts	159
4.4.1	Brechungsgesetz	159
4.4.2	Anwendungen des Brechungsgesetzes	161
4.4.3	Totalreflexion	162
4.4.4	Strahlengang des Lichts im Prisma	163
4.5	Die Sammellinse	164
4.5.1	Strahlengang bei der Sammellinse	164
4.5.2	Abbildung durch Sammellinsen	166
4.6	Das menschliche Auge	169
4.6.1	Veränderung der Brennweite	169
4.6.2	Augenfehler	170

4.7	Der Fotoapparat	171
4.8	Farbiges Licht, Körperfarben	172
4.8.1	Spektralfarben	172
4.8.2	Entstehung des Regenbogens	173
4.8.3	Linienspektrum und kontinuierliches Spektrum	173
4.8.4	Farbaddition	173
4.8.5	Farbsubtraktion	175
4.8.6	Körperfarben	175
4.9	Newton'sches Teilmodell, Huygens'sches Wellenmodell für Licht	176
4.9.1	Korpuskelmodell des Lichts	176
4.9.2	Huygens'sches Wellenmodell	177
4.10	Messung der Lichtgeschwindigkeit	177
4.10.1	Astronomische Methode nach Olaf Rønner (1675)	177
4.10.2	Terrestrische Methode nach Fizeau (1849) – Zahnradmethode	178
4.10.3	Drehspiegelmethode nach Foucault	179
4.10.4	Ergebnisse der Lichtgeschwindigkeitsmessung	179
4.11	Die Interferenz des Lichts	179
4.11.1	Bestätigungsversuch nach Wiener	179
4.11.2	Interferenzversuch von Fresnel	180
4.11.3	Interferenz an dünnen Schichten	180
4.12	Die Beugung des Lichts	184
4.12.1	Beugung an verschiedenen kleinen Objekten	184
4.12.2	Beugung am Spalt	185
4.12.3	Beugung am Gitter	187
4.12.4	Überlagerung von Gitter- und Spaltinterferenz	191
4.13	Die Polarisierung des Lichts	192
4.13.1	Licht als Querwelle	192
4.13.2	Brewster'sches Gesetz	192
5	Elektrizitätslehre und Magnetismus	
5.1	Einfache Grundaussagen des Magnetismus	194
5.1.1	Magnetische Pole	194
5.1.2	Elementarmagnete	194
5.1.3	Magnetische Influenz	195
5.1.4	Das magnetische Feld	195
5.1.5	Das Erdmagnetfeld	197
5.2	Elektrizitätslehre – Grundbegriffe, Grundaussagen	198
5.2.1	Stromkreis	198
5.2.2	Leiter und Nichtleiter	199
5.2.3	Wirkungen des Stroms	200
5.2.4	Ergänzungen	201
5.3	Ladung und Stromstärke	202
5.3.1	Elektrische Ladung	202
5.3.2	Definition der Ladungseinheit	203
5.3.3	Definition der elektrischen Stromstärke	203
5.3.4	Eigenschaften der Ladung	204
5.4	Elektronen, Atombau, Ionen	205

5.4.1	Versuch von Edison	205
5.4.2	Atombau	206
5.4.3	Stromleitung in Metallen	207
5.4.4	Erklärung verschiedener elektrischer Erscheinungen im Elektronenbild	208
5.4.5	Stromleitung in Flüssigkeiten (Elektrolyse)	209
5.5	Geräte zur Messung der Stromstärke	210
5.5.1	Hitzedrahtampèremeter	210
5.5.2	Drehspulampèremeter	210
5.5.3	Mittelwert bei der Stromanzeige	211
5.6	Die elektrische Spannung	211
5.6.1	Definition der Spannung	211
5.6.2	Reihenschaltung (Hintereinanderschaltung) von Stromquellen	213
5.6.3	Elektrisches Potenzial	214
5.7	Das Ohm'sche Gesetz/Elektrischer Widerstand	214
5.8	Widerstand eines Drahts	215
5.8.1	Widerstandsformel für einen Draht	215
5.8.2	Schiebewiderstand	216
5.9	Stromstärke, Ladung, Spannung, Arbeit, Leistung im Stromkreis	217
5.10	Parallelschaltung und Reihenschaltung von Widerständen	218
5.10.1	Kirchhoff'sches Gesetz	218
5.10.2	Reihenschaltung von Widerständen	219
5.10.3	Anwendung von Reihenschaltung	220
5.10.4	Parallelschaltung von Widerständen	221
5.11	Messbereichserweiterung beim Strom- und Spannungsmesser	223
5.11.1	Strommesser	223
5.11.2	Spannungsmesser	224
5.12	Fernsehröhre	225
5.13	Der Elektromotor	226
5.14	Die Lorentzkraft (qualitativ)	227
5.15	Elektromagnetische Induktion – 1. Teil: Einfache Aussagen (qualitativ)	229
5.15.1	Generatorprinzip	229
5.15.2	Induktion von Wechselspannung bei einer sich im Magnetfeld drehenden Leiterschleife	230
5.15.3	Induktion von Spannung durch Magnetfeldänderung	231
5.16	Röhrendiode und Röhrentriode	231
5.16.1	U_A - I_A -Kennlinien der Röhrendiode	231
5.16.2	Diode als Gleichrichter	232
5.16.3	Röhrentriode	233
5.16.4	Anwendung: Triode als Verstärker	233
5.17	Halbleiter, Halbleiterdiode, Transistor	234
5.17.1	Undotierte Halbleiter	234
5.17.2	Dotierte Halbleiter	236
5.17.3	Der p/n-Übergang	236
5.17.4	Halbleiterdiode als Gleichrichter	237
5.17.5	Gleichrichterschaltung mit vier Dioden und Foto-Diode	238

5.17.6	Der Transistor	239
5.18	Das elektrische Feld, elektrische Feldstärke	241
5.18.1	Elektrische Felder, Feldlinien	241
5.18.2	Elektrische Feldstärke	243
5.19	Elektrische Feldstärke und Spannung	245
5.20	Ladungsdichte und Kapazität	246
5.20.1	Flächenladungsdichte und Feldkonstante	246
5.20.2	Kapazität	248
5.20.3	Dielektrizitätszahl	248
5.20.4	Polarisation der Atome	249
5.20.5	Ergänzungen	249
5.20.6	Größenfaktoren	252
5.21	Schaltung von Kondensatoren	252
5.21.1	Parallelschaltung von Kondensatoren	252
5.21.2	Reihenschaltung von Kondensatoren	253
5.21.3	Aufgaben	253
5.21.4	Kondensator mit Dielektrikum und Luftschlitz	254
5.22	Die Energie des elektrischen Feldes	255
5.22.1	Energie des geladenen Kondensators	255
5.22.2	Räumliche Energiedichte	255
5.23	Radialfeld einer punktförmigen Ladung, Coulomb-Gesetz	256
5.24	Die magnetische Flussdichte	261
5.24.1	Definition der Flussdichte	262
5.24.2	Magnetische Flussdichte B in einer lang gestreckten Spule	264
5.25	Lorentzkraft auf ein Elektron (quantitativ), Hall-Effekt	266
5.25.1	Eine Formel für die Stromstärke im Leiter	266
5.25.2	Lorentzkraft auf ein Elektron	267
5.25.3	Der Hall-Effekt	267
5.26	Geladene Teilchen in elektrischen Feldern, Millikanversuch	268
5.26.1	Elektronenvolt	268
5.26.2	Parabelbahnen bei Teilchen im Kondensatorfeld	269
5.26.3	Bremsbewegung	269
5.26.4	Millikanversuch – Bestimmung der Elementarladung e	270
5.27	Teilchen in magnetischen und elektrischen Feldern	270
5.27.1	Teilchen in magnetischen Feldern	270
5.27.2	E-Feld und B-Feld senkrecht zueinander	272
5.27.3	Teilchenbeschleuniger	273
5.28	Ladungsträger in Gasen	276
5.29	Elektromagnetische Induktion – 2. Teil (quantitativ)	278
5.29.1	Wirbelströme	282
5.29.2	Versuch: „Aluring“/Spulenmagnet	283
5.29.3	Aufgaben	284
5.30	Selbstinduktion bei Spulen	285
5.30.1	Größe der induzierten Spannung der Spule im Falle der Selbstinduktion	286
5.30.2	Quantitative Betrachtung des Ein- und Ausschaltvorgangs	287
5.30.3	Energie des Magnetfeldes	288

5.31	Erzeugung sinusförmiger Wechselspannung im Generator	290
5.32	Effektivwerte von Strom und Spannung bei Wechselstrom	291
5.33	Ohm'scher Widerstand, Spule und Kondensator im Wechselstromkreis	293
5.33.1	Induktiver Widerstand	293
5.33.2	Kapazitiver Widerstand	295
5.33.3	Zeigerdiagramm	296
5.33.4	Reihenschaltung von Ohm'schem Widerstand R , Spule mit Induktivität L und Kondensator mit Kapazität C im Wechselstromkreis (Siebkette)	297
5.33.5	Abhängigkeit der Größen I_{eff} und δ von der Frequenz f , wenn R , L , C und U_{eff} fest vorgegeben sind	299
5.33.6	Sperrkreis	301
5.33.7	Aufgabe	302
5.34	Der Schwingkreis	303
5.34.1	Ungedämpfter Schwingkreis	303
5.34.2	Gedämpfter Schwingkreis	306
5.34.3	Aufhebung der Dämpfung durch Rückkopplung (Meißner-Schaltung)	306
5.34.4	Erzwungene elektromagnetische Schwingungen	307
5.35	Der Transformator (Trafo)	309
5.35.1	Hoch- und Niederspannungstrafo	309
5.35.2	Belasteter und unbelasteter Trafo	309
5.36	Drehstrom	311
5.36.1	Prinzip der drei Phasen	311
5.36.2	Erzeugung von Drehstrom	312
5.37	Elektromagnetische Wellen	313
5.37.1	Hertz'scher Dipol	313
5.37.2	Elektromagnetische Wellen im Raum	314
5.37.3	Maxwells Überlegungen	315
5.37.4	Ergänzungen	317
5.38	„Lichteigenschaften“ elektromagnetischer Wellen	318
5.39	Licht als elektromagnetische Welle	320
5.39.1	Faraday-Effekt und Kerr-Effekt	320
5.39.2	Entspricht die Modell-Lichtwelle der elektrischen oder der magnetischen Teilwelle?	321
5.40	Nicht sichtbare Spektralbereiche im elektromagnetischen Spektrum/Überblick	323
5.40.1	„Infrarotlicht“, „Ultraviolettlicht“	323
5.40.2	Röntgenstrahlen	323
5.40.3	γ -Strahlung	323
5.40.4	Überblick über das elektromagnetische Spektrum	324
6	Atomphysik und Quantenphysik	
6.1	Kernphysik	325
6.1.1	Kernaufbau	325
6.1.2	Radioaktivität	325

6.1.3	Wie wird die unsichtbare Strahlung nachgewiesen?	326
6.1.4	Was passiert beim radioaktiven Zerfall eines Atomkerns?	328
6.1.5	Kernreaktionen	328
6.1.6	Kernspaltung (Otto Hahn, 1938)	329
6.1.7	Kernfusion	329
6.2	Kristalluntersuchungen mit Röntgenstrahlen	330
6.2.1	Bragg'sche Reflexionsbedingung	330
6.2.2	Drehkristallmethode	331
6.2.3	Debye-Scherrer-Methode (Pulvermethode)	332
6.3	Der Fotoeffekt	333
6.3.1	Lichtquanten und Planck'sches Wirkungsquantum	333
6.3.2	Fotostrom	335
6.4	Einige Aussagen der speziellen Relativitätstheorie, Comptoneffekt	337
6.4.1	Massenzunahme und relativistische Energie	337
6.4.2	Photonenmasse, Photonenimpuls	339
6.4.3	Comptoneffekt	340
6.5	Materiewellen	342
6.5.1	Wellencharakter von Elektronen	342
6.5.2	Bedeutung der Welle bei Materieteilchen	342
6.5.3	Frequenz und Wellengeschwindigkeit bei Materiewellen	343
6.5.4	Elektronen am Doppelspalt	344
6.5.5	Elektronen am Einzelspalt	344
6.6	Entwicklung des Atommodells, Erklärung der Balmerreihe	346
6.6.1	Bohr'sche Postulate	346
6.6.2	Halbklassische Berechnung des Wasserstoffspektrums	346
6.6.3	Strahlungsreihen	348
6.7	Der eindimensionale Potentialtopf – Quantengesetz des eingesperrten Elektrons	349
6.8	Der Franck-Hertz-Versuch, Umkehrung der Na-Linie	352
6.8.1	Franck-Hertz-Versuch	352
6.8.2	Umkehrung der Na-Linie	354
6.8.3	Fraunhofer'sche Linien	354
6.9	Röntgenstrahlung	355
6.9.1	Bremsstrahlung und charakteristische Röntgenstrahlung	355
6.9.2	Deutung der kontinuierlichen Röntgenstrahlung	356
6.9.3	Deutung der charakteristischen Röntgenstrahlung	356
6.10	Quantenmechanische Behandlung physikalischer Probleme mit der Schrödingergleichung	359
6.10.1	Zeitabhängige und zeitunabhängige Schrödingergleichung	359
6.10.2	Teilchen im eindimensionalen Potenzialtopf	361
6.10.3	Das Wasserstoffproblem	361
6.10.4	Der harmonische Oszillator – „Teilchen, das an einer Feder hängt“	363
	Anhang I: Physikalische Konstanten	368
	Anhang II: Literatur	369
	Sachregister	370

1 Mechanik

1.1 Grundgrößen und ihre Messung

Die grundlegenden Größen der Mechanik sind die *Länge*, gemessen in Meter, die *Zeit*, gemessen in Sekunden und die *Masse*, gemessen in Kilogramm. 1 m (Meter) ist die Länge des Urmeterprototyps, 1 kg (Kilogramm) die Masse des Urkilogrammprototyps – beide werden in Paris aufbewahrt.

Flächeninhalt (gemessen in m^2) und *Volumen* (gemessen in m^3) sind von der Länge abgeleitete Größen. Die Ermittlung des Flächeninhalts erfolgt über bestimmte Rechenformeln (z. B. Dreiecksfläche = $\frac{1}{2} \cdot \text{Länge} \cdot \text{Höhe}$) und Längenmessung, bei krummlinigen Objekten experimentell durch Auszählung von Quadraten auf Millimeterpapier (Abb. 1.1):

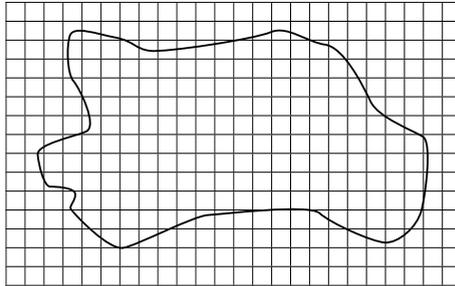


Abb. 1.1

Man zählt beispielsweise die am Rande liegenden Quadrate „halb“ und die innen liegenden „ganz“ und ermittelt so näherungsweise den Flächeninhalt.

Die Ermittlung von Volumina erfolgt über Längenmessung und Rechenformeln (z. B. Kugelvolumen = $\frac{4\pi}{3} \cdot \text{Radius}^3$) oder bei unregelmäßigen Körpern experimentell über Messgläser und Überlaufgefäße (Abb. 1.2):

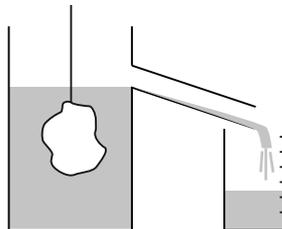


Abb. 1.2

Man misst das vom Stein beim Eintauchen verdrängte aufgefangene Wasservolumen.

1.2 Die Dichte

Misst man bei verschiedenen Körpern aus dem gleichen Material jeweils das Volumen V und die Masse m , so stellt man fest, dass sie zueinander proportional sind, geschrieben $m \sim V$. Dies äußert sich in dreierlei Weise:

1. Das Schaubild ist eine Ursprungsgerade im m/V -Achsenkreuz (Abb. 1.3).

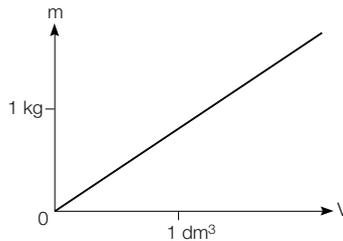


Abb. 1.3

2. Zum k -fachen Volumen gehört die k -fache Masse.

3. Der Quotient $\frac{m}{V}$ ist eine Konstante.

Dieser Quotient heißt *Dichte* $\rho = \frac{m}{V}$ und beschreibt das Material; die Einheit der Dichte ist $[\rho] = 1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ (üblicher sind $1 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} = 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$). Dichtewerte sind tabelliert.

Aufgabe: Welche Masse hat ein Eisenquader der Dichte $\rho = 7,9 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$, der 20 cm lang, 15 cm breit und 10 cm hoch ist?

Lösung: $V = 20 \text{ cm} \cdot 10 \text{ cm} \cdot 15 \text{ cm} = 3000 \text{ cm}^3 = 3 \text{ dm}^3$; $\rho = \frac{m}{V}$, also $m = \rho \cdot V = 7,9 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} \cdot 3 \text{ dm}^3 = 23,7 \text{ kg}$.

1.3 Die Kraft

1.3.1 Wirkung einer Kraft

Eine *Kraft* (z. B. Muskelkraft, magnetische Kraft) erkennt man an ihrer *Wirkung*: sie *verformt* Körper (z. B. Dehnen einer Feder) oder *verändert Bewegungen* (sie beschleunigt oder bremst beispielsweise einen fahrenden Wagen oder ändert dessen Bewegungsrichtung).

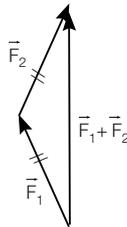
1.3.2 Vektorgößen

Kräfte sind *Vektorgößen*; neben ihrer Größe, gemessen in N (Newton), ist auch ihre Richtung wichtig. Man veranschaulicht Kräfte durch Pfeile, deren Länge ein Maß für den Betrag, d. h. die Größe der Kraft ist und deren Richtung die Kraft-Richtung angibt (Abb. 1.4 a).

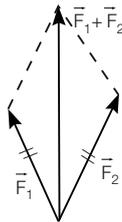
**Abb. 1.4a**

Kräfte werden wie Vektoren addiert (siehe Abb. 1.4):

1. Möglichkeit (Abb. 1.4 b): Man hängt den zweiten Kraftpfeil an den ersten und erhält so die Gesamtkraft

**Abb. 1.4b**

2. Möglichkeit (Abb. 1.4 c): Man setzt die Kraftpfeile am Ende aneinander und ergänzt zum Parallelogramm, dessen Diagonale die Gesamtkraft $\vec{F}_1 + \vec{F}_2$ liefert.

**Abb. 1.4c**

Man erkennt, dass beide Konstruktionen zum gleichen Gesamtkraft-Pfeil $\vec{F}_1 + \vec{F}_2$ führen; er ersetzt die beiden Einzelkräfte, deren Pfeile daher nach der Konstruktion durchgestrichen werden, und heißt Resultierende.

Umgekehrt kann man eine *gegebene Kraft* \vec{F} durch zwei andere Kräfte \vec{F}_1 , \vec{F}_2 ersetzen, die in andere Richtungen wirken – sie heißen Komponenten.

Aufgabe: Ein Stab BC ist mit einem Gelenk bei B an einer Mauer befestigt, das Seil AC hindert ihn am Abkippen. Ein angehängter Körper zieht bei C mit der Kraft \vec{F} nach unten. (Abb. 1.5) Mit welcher Kraft \vec{F}_1 zieht das Seil bei A an der Mauer, mit welcher Kraft \vec{F}_2 drückt der Stab bei B auf das Gelenk?

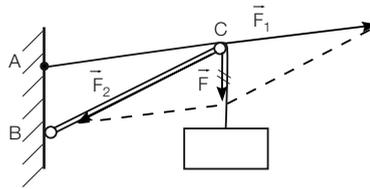


Abb. 1.5

Lösung: Man fasst „ \vec{F} “ als Diagonale eines Parallelogramms auf, dessen Seiten „ \vec{F}_1 “ und „ \vec{F}_2 “ man ermitteln möchte – man kennt aber von \vec{F}_1 nur die Richtung (die von AC), ebenso von \vec{F}_2 (die von BC). Die gestrichelten Parallelen zu AC bzw. BC durch die Spitze von \vec{F} liefern die Pfeilspitzen von \vec{F}_1 bzw. \vec{F}_2 .

Die Längen von Kraftkomponenten bei der Kräftezerlegung bzw. Resultierenden bei der Kräfteaddition lassen sich auch rechnerisch ermitteln (Satz des Pythagoras, Trigonometrie!); ebenso die Winkel zwischen den Kräften. Ein wichtiges Beispiel ist die Zerlegung der Gewichtskraft \vec{G} eines Körpers an der *schiefen Ebene* (Abb. 1.6) in die *Hangabtriebskraft* \vec{F}_H (parallel zur Ebene) und die *Normalkraft* \vec{F}_N (senkrecht zur Ebene). Da der Neigungswinkel α auch zwischen \vec{G} und \vec{F}_N auftaucht, gilt:

$$\frac{F_N}{G} = \cos\alpha, \text{ also: } \begin{cases} F_N = G \cdot \cos\alpha \\ F_H = G \cdot \sin\alpha \end{cases} \quad (\text{F1.1 a, b})$$

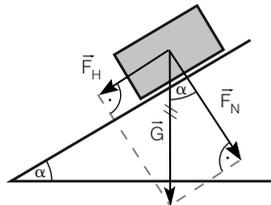


Abb. 1.6

1.3.3 Gewichtskraft

Die *Gewichtskraft* \vec{G} (Betrag G oder $|\vec{G}|$) eines Körpers auf der Erde ist die Kraft, mit der ihn die Erde (nach unten) anzieht. An einem festen Ort ist G proportional zur Masse des Körpers: $G \sim m$.

Die Konstante $\frac{G}{m} = g$ heißt *Ortsfaktor* g . Auf der Erde ist $g \approx 9,81 \frac{\text{N}}{\text{kg}}$ (am Pol $9,83 \frac{\text{N}}{\text{kg}}$, am Äquator $9,78 \frac{\text{N}}{\text{kg}}$), auf dem Mond ist $g \approx 1,67 \frac{\text{N}}{\text{kg}}$.

Die Gewichtskraft eines Körpers ist also ortsabhängig, ein Kilogrammstück hat auf der Erde etwa die Gewichtskraft $9,81 \text{ N}$, auf dem Mond etwa $1,67 \text{ N}$; die Masse eines Körpers ist dagegen überall (auf der Erde, auf dem Mond, im Weltall) gleich.

Massen bestimmt man mit Balken- oder Tafelwaagen (man vergleicht sie mit der Masse der Stücke des Wägesatzes), Kräfte misst man mit geeichten Kraftmessern (d. h. über Federverlängerungen).

1 N (Newton) ist etwa die Gewichtskraft eines „102 g-Stückes“ auf der Erde.

Aufgabe: Welche Masse hat ein Körper, dessen Gewichtskraft auf dem Mond 20 N beträgt?

Lösung: $\frac{G}{m} = g$, also $m = \frac{G}{g} = \frac{20\text{N}}{1,67\frac{\text{N}}{\text{kg}}} \approx \frac{20}{\frac{5}{3}}\text{kg} = 12\text{ kg}$

1.3.4 Hooke'sches Gesetz

Untersucht man, um welche Strecke s eine gegebene Feder durch eine Kraft F verlängert wird, so stellt man fest, dass in einem gewissen Kraftbereich gilt: $F \sim s$ (Abb. 1.7).

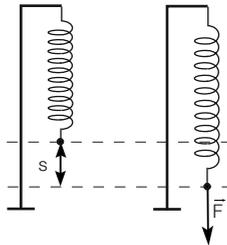


Abb. 1.7

Die Konstante $D = \frac{F}{s}$ heißt Federkonstante – sie beschreibt die Härte der Feder und hat die Einheit $[D] = 1\frac{\text{N}}{\text{cm}}$. Wird die Kraft zu groß, gilt die Proportionalität nicht mehr.

Aufgabe: Welche Länge hat eine Feder (unverlängert 20 cm) der Härte $D = 2\frac{\text{N}}{\text{cm}}$, wenn an ihr 300 g hängen?

Lösung: $F \approx 3\text{N}$, also Verlängerung $s = \frac{F}{D} = \frac{3\text{N}}{2\frac{\text{N}}{\text{cm}}} = 1,5\text{ cm}$; Federlänge also 21,5 cm.

1.3.5 Kraft und Gegenkraft

Eine Person A drückt mit der Kraft \vec{F}_1 auf einen Baum B. Dann spürt auch A eine Kraft \vec{F}_2 vom Baum auf sich. Sie ist betraglich gleich groß wie \vec{F}_1 , wirkt aber in die Gegenrichtung; außerdem wirkt \vec{F}_1 auf B, \vec{F}_2 auf A (Abb. 1.8).

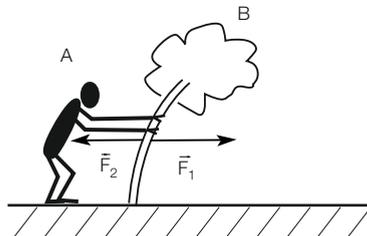


Abb. 1.8

Allgemein gilt:

Wirkt ein Körper mit der *Kraft* \vec{F}_1 (actio) auf einen anderen Körper, so wirkt von diesem eine *Gegenkraft* \vec{F}_2 (reactio) auf den ersten Körper zurück. Kraft und Gegenkraft sind betraglich gleich groß, aber entgegengesetzt gerichtet und greifen an verschiedenen Körpern an.

Beispiel: Beim Start drückt der Sprinter mit einer Kraft auf den Startblock. Die Gegenkraft vom Startblock auf den Sprinter lässt diesen herausschnellen.

Problem: Ein Pferd soll einen Klotz ziehen. Es weigert sich und argumentiert: Wenn ich an dem Klotz ziehe, wirkt der Klotz mit einer gleich großen Gegenkraft – also kann ich den Klotz nicht von der Stelle bewegen!

Lösung des Paradoxons: Richtig ist, dass die Zugkraft \vec{F}_1 des Pferdes auf den Klotz eine Gegenkraft \vec{F}_2 vom gleichen Betrag hervorruft. Allerdings wirkt \vec{F}_2 auf das Pferd! Man kann also nicht \vec{F}_1 und \vec{F}_2 in einen Topf werfen und sagen, sie heben sich auf – dies ginge nur, wenn \vec{F}_1 und \vec{F}_2 auf den gleichen Körper wirkten! Tatsächlich wirkt auf den Klotz nur \vec{F}_1 , er kann wohl bewegt werden (Abb. 1.9).

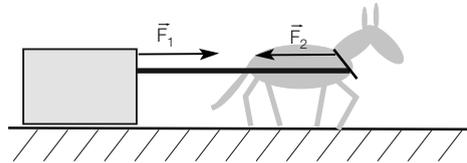


Abb. 1.9

1.4 Geschwindigkeit/Beschleunigung

1.4.1 Geradlinige gleichförmige Bewegung

Der einfachste Fall einer Bewegung ist der, bei dem ein Körper sich geradlinig bewegt und der zurückgelegte Weg proportional zur vergangenen Zeit ist: $s \sim t$. Der Quotient aus Weg und Zeit ist eine Konstante, die die Bewegung beschreibt, die *Geschwindigkeit* v des Körpers:

$$\frac{s}{t} = \text{const} = v \quad \text{bzw. Geschwindigkeit} = \frac{\text{Weg}}{\text{Zeit}}$$

Eine solche Bewegung heißt *geradlinige gleichförmige Bewegung* (Spezialfall: $v = 0$ heißt Körper in Ruhe).

Beispiel: Ein Spielzeugauto hat nach 10 s den Weg 4 m, nach 20 s den Weg 8 m, ... zurückgelegt.

Im *Weg-Zeit-Diagramm* liegen die Messpunkte auf einer Ursprungsgerade (Abb. 1.10 a), deren Steigung gerade die Geschwindigkeit ist:

$$v = \frac{s}{t} = \frac{16\text{m}}{40\text{s}} = \frac{4\text{m}}{10\text{s}} = \frac{2\text{m}}{5\text{s}}$$

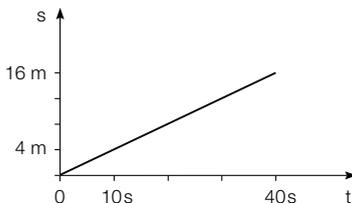


Abb. 1.10a

Das Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm (Abb. 1.10 b) zeigt eine Gerade parallel zur Zeit-Achse, da ja $v = \text{const}$ ist.

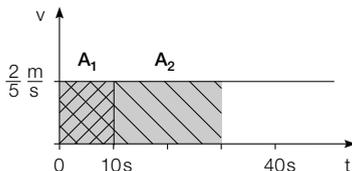


Abb. 1.10b

Wir betrachten die Fläche unter der „Kurve“ in Abbildung 1.10b

$$\text{bis } t = 10\text{ s: } A_1 = 10\text{ s} \cdot \frac{2\text{m}}{5\text{s}} = 4\text{ m} = \text{zurückgelegter Weg von 0 bis 10 s}$$

$$\text{bis } t = 30\text{ s: } A_2 = 30\text{ s} \cdot \frac{2\text{m}}{5\text{s}} = 12\text{ m} = \text{zurückgelegter Weg von 0 bis 30 s}$$

Allgemein: Fläche unter der Kurve = zurückgelegter Weg bzw. $v \cdot t = s$

1.4.2 Gleichmäßig beschleunigte Bewegung

Der nächste Fall sei der einer geradlinigen Bewegung eines Körpers aus der Ruhe, bei der die Geschwindigkeit nicht konstant ist, sondern gleichmäßig, d. h. proportional zur Zeit anwächst:

$$v \sim t \text{ oder } \boxed{\frac{v}{t} = \text{const} = a} \text{ oder } v = a \cdot t \text{ (F1.2)}$$

Eine solche Bewegung heißt *gleichmäßig beschleunigte Bewegung*; die Größe a ist die *Beschleunigung* des Körpers – sie gibt die Geschwindigkeitszunahme je Zeit an.

Beispiel: Ein Körper hat nach 10 s die Geschwindigkeit $2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, nach 20 s habe er $4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, nach 40 s habe er $8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ usw.

$$\text{Hier w\u00e4re } a = \frac{v}{t} = \frac{8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{40\text{s}} = \frac{2 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{10\text{s}} = \frac{1\text{m}}{5\text{s}^2}.$$

Um herauszufinden, welchen *Weg* s der K\u00f6rper nach jeweils der *Zeit* t zur\u00fcckgelegt hat, ist ein Blick auf das v - t -Diagramm hilfreich, das jetzt eine Ursprungsgerade darstellt (Abb. 1.11).

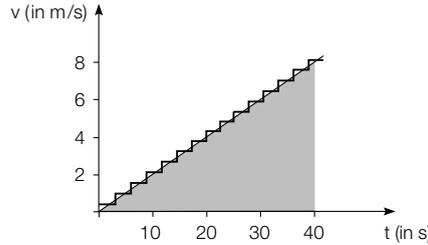


Abb. 1.11

Ihre Steigung ist jetzt die Beschleunigung: $\frac{v}{t} = a = \frac{8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{40\text{s}} = \frac{1\text{m}}{5\text{s}^2}$

Wir nehmen an, dass der zur\u00fcckgelegte Weg wieder die Fl\u00e4che unter der Geraden ist (diese Annahme ist gerechtfertigt, denn der exakte Geschwindigkeitsverlauf l\u00e4sst sich beliebig genau durch eine „Treppenkurve“ mit st\u00fcckweise konstanter Geschwindigkeit ann\u00e4hern).

$$\text{So ergibt sich: } s(t = 40\text{ s}) = \frac{1}{2} \cdot 40\text{s} \cdot 8 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 160\text{ m (Dreiecksfl\u00e4che)}$$

$$s(t = 20\text{ s}) = \frac{1}{2} \cdot 20\text{s} \cdot 4 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 40\text{ m usw.}$$

$$\text{Allgemein: } s(t) = \frac{1}{2} \cdot t \cdot v(t) = \frac{1}{2} \cdot t \cdot (a \cdot t) = \frac{1}{2} at^2$$

Der Weg w\u00e4chst also proportional zum Quadrat der Zeit:

$$s \sim t^2 \text{ oder } \frac{s}{t^2} = \text{const} = \frac{1}{2} a \text{ oder } s = \frac{1}{2} at^2 \quad (\text{F1.3}) \text{ Hier: } \frac{s}{t^2} = \frac{1\text{m}}{10\text{s}^2}$$

Das Weg-Zeit-Diagramm ist demnach eine Parabel!

Aufgabe: Ein Auto f\u00e4hrt gleichm\u00e4\u00dfig beschleunigt mit $a = 4 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ an. Welchen Weg hat es nach 2 s zur\u00fcckgelegt? Welchen Weg legt es zwischen der 2. und 3. Sekunde zur\u00fcck? Welche Geschwindigkeit hat es nach 2,5 s?

L\u00f6sung: Weg nach 2 s: $s(2\text{s}) = \frac{1}{2} \cdot 4 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (2\text{s})^2 = 8\text{ m}$; Weg zwischen 2. und 3. Sekunde:

$$s(3\text{s}) - s(2\text{s}) = \frac{1}{2} \cdot 4 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (3\text{s})^2 - \frac{1}{2} \cdot 4 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (2\text{s})^2 = 18\text{ m} - 8\text{ m} = 10\text{ m};$$

$$\text{Geschwindigkeit nach 2,5 s: } v(2,5\text{s}) = 4 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 2,5\text{s} = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Beachte: Bei der gleichm\u00e4\u00dfig beschleunigten Bewegung gilt *nicht* $\frac{s}{t} = v!$

$$\left(\frac{s}{t} = \frac{\frac{1}{2} at^2}{t} = \frac{1}{2} at = \frac{1}{2} v \right)$$

1.4.3 Durchschnitts- und Momentangeschwindigkeit

An dieser Stelle muss der Begriff Geschwindigkeit präzisiert werden. Wenn ein Autofahrer sagt, er habe 2 Stunden für eine Strecke von 150 km gebraucht, so hat er die *Durchschnittsgeschwindigkeit* $\bar{v} = \frac{150\text{km}}{2\text{h}} = 75 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ gehabt; sein Tachometer hat ihm die ganze Zeit über die *Momentangeschwindigkeit* $v(t)$ angezeigt und diese hat sich wohl dauernd geändert. Bei der gleichförmigen Bewegung sind beide Geschwindigkeiten gleich, bei anderen Bewegungen muss man sie unterscheiden.

Beispiel: Ein Wagen auf einer Fahrbahn startet aus der Ruhe und hat nach 1,7 s den Weg 0,3 m und nach 3,1 s den Weg 1 m zurückgelegt.

Die *Durchschnittsgeschwindigkeit* beträgt zwischen 0 und 0,3 m gerade $\bar{v}_1 = \frac{0,3\text{m}}{1,7\text{s}} \simeq 0,18 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, zwischen 0,3 m und 1 m beträgt sie $\bar{v}_2 = \frac{0,7\text{m}}{1,4\text{s}} \simeq 0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Allgemein gilt: $\bar{v} = \frac{\text{zurückgelegter Weg}}{\text{benötigte Zeit}} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$

Will man die Momentangeschwindigkeit näherungsweise messen, so muss man die Wegstrecke Δs möglichst klein machen, dann wird natürlich auch die Zeitdifferenz Δt sehr klein. Beispielsweise könnte man, um die Momentangeschwindigkeit bei 1 m zu ermitteln, die Zeitdifferenz Δt zwischen den Wegmarken 97 cm und 103

cm, also für $\Delta s = 6$ cm, messen – dann gilt: $v(\text{bei } 1 \text{ m}) \approx \bar{v} = \frac{6 \text{ cm}}{\Delta t}$.

Genau genommen müssen Δs , Δt beliebig klein sein,

d. h. $\boxed{v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t}}$ (F1.4) liefert die Momentangeschwindigkeit.

Mathematisch bedeutet der Grenzwert $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t}$ die Ableitung der Wegfunktion $s(t)$ nach der Zeit t . Üblicherweise schreibt der Mathematiker dafür $s'(t)$; wir schreiben $\dot{s}(t)$ (Ableitung nach der Zeit).

Überprüfung der Formel (F1.4) für die gleichmäßig beschleunigte Bewegung: $s(t) = \frac{1}{2}at^2$, also $\dot{s}(t) = \frac{1}{2}a \cdot 2t = a \cdot t$ – dies ist aber gerade die Momentangeschwindigkeit $v(t)$!

1.4.4 Durchschnitts- und Momentanbeschleunigung

Auch bei der Beschleunigung muss man zwischen dem Durchschnitts- und Momentanwert unterscheiden.

Beispiel: Die Geschwindigkeit eines Autos erhöhe sich zunächst beim Anfahren gleichmäßig von 0 auf $20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ in 10 s; anschließend gibt der Fahrer mehr Gas, sodass sie nach 15 s bereits $45 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ beträgt. Welche Beschleunigungen treten auf?

Zwischen 0 und 10 s: $a_1 = \frac{20 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{10\text{s}} = 2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$; zwischen 10 s und 15 s: $a_2 = \frac{25 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{5\text{s}} = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

Durchschnittliche Beschleunigung zwischen 0 und 15 s: $a_3 = \frac{45 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{15\text{s}} = 3 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

Allgemein: Durchschnittliche Beschleunigung = $\frac{\text{Geschwindigkeitszunahme}}{\text{benötigte Zeit}}$,
also $\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$

Wenn sich die Beschleunigung immer wieder ändert, betrachtet man die

Momentanbeschleunigung $a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \dot{v} = \ddot{s}$ (F1.5)

Gleichmäßig beschleunigte Bewegung (Überprüfung von (F1.5)):

$s(t) = \frac{1}{2}at^2$, $\dot{s}(t) = v(t) = a \cdot t$, $\ddot{s}(t) = \dot{v}(t) = a$ – dies ist die Beschleunigung!

Bemerkung: Die Umrechnung von $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ in $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ erfolgt durch Multiplikation mit dem Faktor 3,6

$1 \frac{\text{km}}{\text{h}} = \frac{1000\text{m}}{3600\text{s}} = \frac{1}{3,6} \frac{\text{m}}{\text{s}}$, $1 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 3,6 \frac{\text{km}}{\text{h}}$; z. B.: $108 \frac{\text{km}}{\text{h}} = \frac{108\text{m}}{3,6\text{s}} = 30 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

1.5 Kräftegleichgewicht/Trägheitssatz

Wirken auf einen Körper zwei betraglich gleich große Kräfte \vec{F}_1 , \vec{F}_2 entgegengesetzter Richtung (d. h. $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$), so heben sie sich in ihrer Wirkung auf; man sagt, am Körper herrscht Kräftegleichgewicht. (Abb. 1.12).

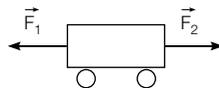


Abb. 1.12

Im Unterschied zum Prinzip von Actio/Reactio (Kap. 1.3.5) wirken hier die Kräfte auf den gleichen Körper. Wenn er in Ruhe ist, wird er auch in Ruhe bleiben; wenn er in Bewegung ist und Kräftegleichgewicht an ihm herrscht, wird er sich in gleicher Richtung mit konstanter Geschwindigkeit weiterbewegen.

Trägheitssatz: Körper sind träge, d. h. sie behalten ihren Bewegungszustand bei, wenn an ihnen Kräftegleichgewicht herrscht.

Beispiel: Plötzlicher Stopp beim Auffahrunfall ohne Gurt! Der Wageninsasse möchte seinen Bewegungszustand beibehalten und „schießt“ nach vorne auf die Windschutzscheibe.

Bemerkung: Auch mehrere Kräfte, deren Vektorsumme „null“ ergibt, bewirken ein Kräftegleichgewicht.

1.6 Reibung/Luftwiderstand

1.6.1 Gleitreibungskraft

Um einen Körper auf einer Unterlage mit konstanter Geschwindigkeit \vec{v} nach rechts zu ziehen, muss man auf ihn die Kraft \vec{F} anwenden (Abb. 1.13a). Da er nicht schneller wird, zieht offenbar eine zweite Kraft an ihm nach links, d. h. entgegen der Bewegungsrichtung – die *Gleitreibungskraft* \vec{F}_{gl} . Sie rührt von mikroskopischen Rauigkeiten an Körperunterseite und Unterlage her, die sich ineinander verhaken.

Abb. 1.13a



Versuche zeigen, dass die Gleitreibungskraft vom Stoffpaar Körper/Unterlage abhängt, proportional zur Gewichtskraft des Körpers ist, d. h. $F_{gl} \sim G$, aber *kaum* von der Geschwindigkeit \vec{v} und von der Größe der reibenden Fläche abhängt. Versuche an der schiefen Ebene zeigen, dass dort die Gleitreibungskraft kleiner ist; hier presst ja nicht \vec{G} , sondern \vec{F}_N den Körper gegen die Unterlage und $F_N < G!$ Die Aussage $F_{gl} \sim G$ muss also präzisiert werden zu $F_{gl} \sim F_N$ bzw. $\frac{F_{gl}}{F_N} = \text{const} = f_{gl}$.

Allgemein: $F_{gl} = f_{gl} \cdot F_N$ (F1.6 a), wobei die Gleitreibungszahl f_{gl} vom Stoffpaar abhängt.

1.6.2 Haftreibungskraft

Abb. 1.13b



Ein weiterer Versuch zeigt, dass ein ruhender Körper auf einer Unterlage in Ruhe bleibt, wenn man an ihm mit einer Kraft \vec{F} angreift, die nicht zu groß ist (Abb. 1.13b). Offenbar stellt sich eine Haftreibungskraft \vec{F}_h in Gegenrichtung ein, die mit \vec{F} zusammen ein Kräftegleichgewicht bewirkt. Vergrößert man F , so bleibt der Körper immer noch in Ruhe – offenbar hat sich F_h gleichermaßen vergrößert. Die Haftreibungskraft hat also keinen bestimmten Wert, sondern passt sich dem Wert der Zugkraft an. Wenn allerdings F und damit F_h einen bestimmten Wert überschreiten, wird der Körper „aus der Verankerung gerissen“; diese maximale Haftreibungskraft $F_{h,max}$ kann man angeben – sie ist ebenfalls proportional zu F_N :

$F_{h,max} \sim F_N$ bzw. $\frac{F_{h,max}}{F_N} = \text{const} = f_h$

Allgemein: $F_{h,max} = f_h \cdot F_N$ (F1.6 b), wobei die Haftreibungszahl f_h wieder vom

Stoffpaar abhängt. f_{gl} und f_h sind tabelliert, wobei $f_h > f_{gl}$ ist – man braucht mehr Kraft, den Körper aus der „Verankerung im Ruhezustand zu reißen“, als ihn mit konstanter Geschwindigkeit gleiten zu lassen.

Aufgabe: Ein Klotz der Masse 5 kg gleite auf einer schiefen Ebene mit Neigungswinkel $\alpha = 30^\circ$ nach unten, wobei Gleitreibung mit $f_{gl} = 0,1$ auftritt. Welche resultierende Kraft wirkt auf den Klotz?

Lösung: Die Gewichtskraft \vec{G} wird in Normalkraft \vec{F}_N und Hangabtrieb \vec{F}_H zerlegt (Abb. 1.14). Die Normalkraft möchte den Körper an die Unterlage pressen – die Unterlage reagiert mit einer entgegengesetzt gleich großen Kraft \vec{F}_u ! Da \vec{F}_u und \vec{F}_N sich ausgleichen, bleiben \vec{F}_H mit $F_H = G \cdot \sin\alpha = 50\text{N} \cdot \sin 30^\circ = 25\text{N}$ und \vec{F}_{gl} mit $F_{gl} = f_{gl} \cdot G \cdot \cos\alpha = 0,1 \cdot 50\text{N} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \approx 4,3\text{N}$ übrig; der Körper erfährt also die resultierende Kraft \vec{F}_r parallel zur Ebene nach unten mit $F_r = F_H - F_{gl} \approx 20,7\text{N}$

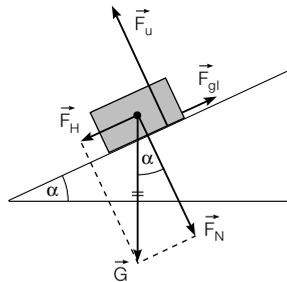


Abb. 1.14

1.6.3 Strömungswiderstand

Für den Strömungswiderstand \vec{F}_W (z. B. in Luft) findet man nach Messungen die Formel:

$$\boxed{F_W = \frac{1}{2} \cdot c_w \cdot A \cdot \rho \cdot v^2} \quad (\text{F1.7})$$

Hierbei ist A der größte Querschnittsflächeninhalt senkrecht zur Strömung (Abb. 1.15), ρ ist die Dichte (z. B. der Luft), \vec{v} die Geschwindigkeit gegenüber der Luft und c_w der so genannte Widerstandsbeiwert (hängt vom Profil ab). Insbesondere gilt $F_W \sim v^2$!

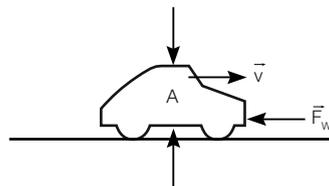


Abb. 1.15

Aufgabe: Eine Limousine mit $A = 2\text{m}^2$ fährt bei $c_w = 0,3$ mit $72 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ gegen einen Wind von $10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$; die Luftdichte beträgt $\rho = 1,25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$. Berechne den Luftwiderstand F_W !

Lösung: $72 \frac{\text{km}}{\text{h}} = \frac{72\text{m}}{3,6\text{s}} = 20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Wegen des Gegenwindes von $10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ist die Geschwindigkeit des Autos gegenüber der Luft $v = 20 \frac{\text{m}}{\text{s}} + 10 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 30 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

$$F_w = \frac{1}{2} \cdot 0,3 \cdot 2\text{m}^2 \cdot 1,25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(30 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = 0,375 \cdot 900 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 337,5 \text{ kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$= 337,5 \text{ N. Hier wurde } 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} = 1 \text{ N} \text{ gesetzt, was im nächsten Kapitel gerechtfertigt wird!}$$

1.7 Das Newton'sche Grundgesetz

Welche Kräfte rufen welchen Bewegungstyp hervor?

- In 1.5 wurde erläutert, dass ein Körper im Kräftegleichgewicht seinen Bewegungszustand beibehält, d. h. sich geradlinig gleichförmig nach dem Trägheitssatz fortbewegt.
- Versuche zeigen, dass ein ruhender Körper, auf den fortwährend eine betraglich und richtungsmäßig konstante Kraft \vec{F} wirkt, eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung aus der Ruhe vollführt. Die Beschleunigung a hängt dabei von F und von der Masse m des Körpers ab.

Man stellt fest: $a \sim F$ (wenn $m = \text{const}$) und $a \sim \frac{1}{m}$ (wenn $F = \text{const}$) („dreifache Kraft heißt dreifache, doppelte Masse heißt halbe Beschleunigung“)

Daraus folgt: $a \sim \frac{F}{m}$ bzw. $\frac{a}{F/m} = \frac{a \cdot m}{F} = \text{const}$

Messungen zeigen, dass diese Konstante den Wert $\text{const} = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{kg}$ hat, sodass man $F = \frac{a \cdot m}{\text{const}} = a \cdot m \cdot 1 \frac{\text{N}}{\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2}$ erhält.

Speziell erhält man für $F = 1 \text{ N}$, $m = 1 \text{ kg}$, gerade $a = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$, d. h.

1 N ist diejenige konstante Kraft, die einem 1 kg-Stück die Beschleunigung $1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ verleiht

Das kann als dynamische Definition der Kraft 1 N aufgefasst werden (statische Definition: Gewichtskraft von 102 g auf der Erde). Wir gehen noch weiter und sagen direkt:

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (\text{F1.8})$$

Damit wird die Konstante im obigen Gesetz dimensionslos und man erhält eine neue Fassung des Beschleunigungsgesetzes:

$$F = m \cdot a \quad (\text{F1.9}) \quad (\text{Newton'sches Grundgesetz})$$