

# Inhaltsverzeichnis

<b>Liste der Definitionen, Wissen und Rezepte</b>	<b>xiii</b>
<b>Wie verwendet man dieses Buch?</b>	<b>1</b>
<b>Motivation und Überblick</b>	<b>5</b>
<b>1 Wissenschaftliche Arbeitsweisen</b>	<b>9</b>
1.1 Gemeinsamer Ausgangspunkt . . . . .	9
1.2 Beobachten . . . . .	11
1.3 Genauer Beobachten . . . . .	12
1.4 Beschreiben / Empirie . . . . .	14
1.4.a Korrelationen suchen . . . . .	14
1.4.b Empirische Gleichungen finden . . . . .	16
1.4.c Wert von Korrelation und Empirie . . . . .	16
1.5 Verstehen / Theorie . . . . .	18
1.5.a Selbst Nachdenken . . . . .	18
1.5.b Recherchieren und Lesen . . . . .	19
1.5.c Hypothese – Modell . . . . .	19
1.5.d Theorie . . . . .	21
1.6 Vorhersagen . . . . .	24
1.6.a Empirie-basierte Vorhersagen . . . . .	24
1.6.b Theorie-basierte Vorhersagen . . . . .	25
1.6.c Hybride Vorhersagen . . . . .	26
1.7 Bewusst Herbeiführen / Experiment . . . . .	26
1.8 Gedankenexperiment . . . . .	28
1.9 Mitteilen und Erzählen . . . . .	30
1.9.a Publikation . . . . .	31
1.9.b Interner Bericht – Abschlussarbeit . . . . .	31
1.9.c Brief an die Chefin . . . . .	32
1.9.d Allgemeinverständliche Darstellung . . . . .	32
1.9.e Poster . . . . .	33
1.9.f Diskurs . . . . .	33
<b>2 Größen, Dimensionen und Einheiten</b>	<b>37</b>
2.1 Physikalische Größen . . . . .	37
2.1.a Definition von physikalischen Größen . . . . .	38
2.1.b Dimension und Größenart . . . . .	39
2.1.c Das internationale System der Größen . . . . .	40
2.1.d Vektorgrößen und Skalare . . . . .	42
2.2 Einheiten . . . . .	42
2.2.a Einheiten angeben . . . . .	43
2.2.b Das internationale System der Einheiten – SI . . . . .	44
2.2.c Umrechnen von Einheiten . . . . .	48

2.3	Rechnen mit Größen . . . . .	51
2.4	Dimensionsanalyse . . . . .	53
2.4.a	Einfache Dimensionsanalyse und Einheitenanalyse . . . . .	53
2.4.b	Dimensionsanalyse für Fortgeschrittene . . . . .	55
2.4.c	Dimensionsanalyse für Experten . . . . .	57
<b>3</b>	<b>Mathematik für die Physik</b>	<b>61</b>
3.1	Anwendbarkeit der Mathematik . . . . .	61
3.1.a	Unabhängigkeit der Mathematik von der physikalischen Anwendung . . . . .	62
3.1.b	Unterschied Mathematik – Physik . . . . .	62
3.1.c	Physik mit Mathematik . . . . .	63
3.2	Statistik . . . . .	64
3.2.a	Basiskennzahlen . . . . .	64
3.2.b	Mittelwert . . . . .	65
3.2.c	Varianz . . . . .	66
3.2.d	Standardabweichung . . . . .	67
3.2.e	Kovarianz . . . . .	67
3.2.f	Korrelation . . . . .	68
3.2.g	Weitere Anwendungen der Residuensumme . . . . .	69
3.2.h	Gauß-Verteilung . . . . .	70
3.3	Funktionen . . . . .	72
3.3.a	Warum Funktionen in der Physik nützlich sind . . . . .	72
3.3.b	Stetigkeit . . . . .	73
3.3.c	Grenzwerte und andere besondere Stellen . . . . .	73
3.3.d	Ableitung . . . . .	74
3.3.e	Integration . . . . .	77
3.3.f	Spezielle Funktionen . . . . .	80
3.3.g	Differentialgleichungen . . . . .	83
3.3.h	Mehrdimensionale Funktionen . . . . .	85
3.3.i	Partielle Ableitung . . . . .	86
3.3.j	Totales Differential . . . . .	87
3.4	Lineare Algebra . . . . .	89
3.4.a	Vektoren . . . . .	89
3.4.b	Skalarprodukt . . . . .	91
3.4.c	Matrizen . . . . .	93
3.4.d	Kreuzprodukt . . . . .	94
3.4.e	Spezielle Vektoren . . . . .	95
3.4.f	Bra-Ket-Schreibweise . . . . .	97
<b>4</b>	<b>Rechnen ohne Rechner</b>	<b>99</b>
4.1	Darstellung von Zahlen . . . . .	100
4.2	Grundrechenarten . . . . .	101
4.2.a	Addition und Subtraktion von Zahlen . . . . .	101
4.2.b	Multiplikation von Zahlen . . . . .	102
4.2.c	Division von Zahlen . . . . .	103
4.2.d	Vorsicht mit der Null . . . . .	104
4.3	Kopfrechnen für Fortgeschrittene . . . . .	105
4.3.a	Wurzeln von Zahlen . . . . .	105
4.3.b	Winkelfunktionen . . . . .	105
4.3.c	e-Funktion und Logarithmus . . . . .	106
4.4	Kopfrechnen für Spezialisten . . . . .	109

<b>5 Diagramme und Visualisierung von Daten</b>	<b>113</b>
5.1 Grundregeln Diagramme . . . . .	113
5.1.a Achsenbeschriftung und Skalierung . . . . .	114
5.1.b Originaldaten . . . . .	115
5.2 Häufigkeitsverteilung . . . . .	115
5.2.a Einfache Häufigkeitsverteilungen . . . . .	115
5.2.b Histogramm . . . . .	116
5.3 $x$ - $y$ -Diagramme . . . . .	118
5.3.a $x$ - $y$ -Diagramme – ein Datensatz . . . . .	118
5.3.b $x$ - $y$ -Diagramme – mehrere Datensätze . . . . .	119
5.3.c Logarithmische Darstellung . . . . .	122
5.4 Ausgleichskurven . . . . .	123
5.4.a Grundgedanken zu Ausgleichsfunktionen . . . . .	123
5.4.b Polynome . . . . .	124
5.4.c Andere empirische Funktionen . . . . .	125
5.4.d Theoriebasierte Ausgleichsfunktion . . . . .	125
5.4.e Empirische Funktionen suchen . . . . .	128
5.5 Wie liest man Diagramme . . . . .	129
<b>6 Symmetrien</b>	<b>133</b>
6.1 Symmetrien . . . . .	133
6.1.a Mathematische Beschreibung von Symmetrien . . . . .	135
6.1.b Physikalische Symmetrien . . . . .	139
6.1.c Nutzen von Symmetrien . . . . .	140
6.2 Skalierungen . . . . .	142
6.2.a Skalierungsfaktor und Skalierungsexponent . . . . .	143
6.2.b Geometrische Skalierungen . . . . .	144
6.2.c Allgemeine Skalierungen . . . . .	146
6.3 Bezugssysteme . . . . .	148
<b>7 Modellbildung</b>	<b>151</b>
7.1 In vier Schritten zur Lösung . . . . .	152
7.1.a Variablen und grafisches Modell . . . . .	152
7.1.b Mathematisches Modell: Die Formel . . . . .	154
7.1.c Annahmen treffen, Werte schätzen . . . . .	154
7.1.d Ausrechnen . . . . .	155
7.2 Grundlegendes und Tipps zur Modellbildung . . . . .	156
7.2.a Reduktion der Komplexität . . . . .	156
7.2.b Rückführen auf Bekanntes . . . . .	157
7.3 Prognose oder Szenario? . . . . .	161
<b>8 Messungen und Auswertung</b>	<b>163</b>
8.1 Grundlagen einer Messung . . . . .	163
8.1.a Aufgabe einer Messung . . . . .	164
8.1.b Einzelmessung . . . . .	166
8.1.c Messstrategie . . . . .	166
8.1.d Dokumentation . . . . .	167
8.1.e Messunsicherheiten . . . . .	168
8.1.f Kalibrieren, Eichen, Korrektion und Justierung . . . . .	169
8.2 Wiederholungsmessungen . . . . .	171
8.2.a Verteilung der Messwerte – Histogramm . . . . .	172
8.2.b Auswahl der Messwerte . . . . .	172
8.2.c Schnellanalyse . . . . .	173
8.2.d Mittelwert und Standardabweichung . . . . .	174

## x Inhaltsverzeichnis

8.2.e	Typ-A Unsicherheit des Bestwertes . . . . .	175
8.2.f	Addition der Unsicherheiten . . . . .	175
8.2.g	Darstellung eines Messergebnisses . . . . .	176
8.3	Kombinierte Unsicherheiten . . . . .	178
8.3.a	Aufstellen eines mathematischen Modells . . . . .	178
8.3.b	Bestwert bei einer indirekten Messung . . . . .	179
8.3.c	Kombination von Unsicherheiten (Fortpflanzung) . . . . .	180
8.3.d	Vereinfachungen . . . . .	182
8.4	Zusammenfassung zum Auswerten von Messungen . . . . .	185
8.5	Optimierung von Experimenten . . . . .	187
8.6	Andere Unsicherheiten . . . . .	188
<b>9</b>	<b>Erhaltungsgrößen und Bilanzen</b>	<b>191</b>
9.1	System . . . . .	191
9.2	Mengenartige Größen . . . . .	194
9.2.a	Mengenartige Größen finden . . . . .	194
9.2.b	Erhaltungsgrößen . . . . .	195
9.2.c	Dichte einer mengenartigen Größe $G$ . . . . .	196
9.2.d	Erhaltungsgrößen aus dem Nichts? . . . . .	197
9.3	Ströme und Zustandsänderung . . . . .	198
9.3.a	Das Stromkonzept . . . . .	198
9.3.b	Strom von Erhaltungsgrößen . . . . .	199
9.3.c	Umdrehen der Bilanzrichtung . . . . .	200
9.3.d	Mehrere Austauschkanäle zwischen zwei Systemen . . . . .	202
9.3.e	Bilanzgleichung eines Systems . . . . .	203
9.3.f	Zwischenstand Bilanzgleichung und deren Einsatzgebiet . . . . .	204
9.3.g	Welche Mechanismen von Strömen gibt es? Stromarten . . . . .	208
9.3.h	Beschreibung von Stromwegen . . . . .	209
9.3.i	Stromdichten . . . . .	210
9.4	Mengenartige Ströme und Energie . . . . .	211
9.4.a	Energieform . . . . .	211
9.4.b	Intensive Größe finden . . . . .	212
9.4.c	Reservoir . . . . .	213
9.4.d	Stromrichtung einer freien Strömung . . . . .	214
9.5	Steckbriefe mengenartiger Größen . . . . .	214
<b>10</b>	<b>Spezielle mengenartige Größen und Ströme</b>	<b>217</b>
10.1	Masse . . . . .	217
10.2	Volumen . . . . .	218
10.3	Elektrische Ladung . . . . .	220
10.4	Impuls . . . . .	221
10.4.a	Was ist Impuls? . . . . .	221
10.4.b	Impulserhaltung . . . . .	222
10.4.c	Einfache Anwendungen der Impulserhaltung . . . . .	224
10.4.d	Mathematische Notation des Impulsstroms . . . . .	227
10.5	Drehimpuls . . . . .	228
10.5.a	Was ist Drehimpuls . . . . .	228
10.5.b	Drehimpulsströme und Drehimpulsänderung . . . . .	230
10.6	Stoffmenge und Teilchenzahl . . . . .	232
10.7	Entropie . . . . .	234
10.7.a	Was ist Entropie? . . . . .	235
10.7.b	Entropie erzeugen . . . . .	235
10.7.c	Entropie und Zeit . . . . .	235
10.7.d	Entropie und Wahrscheinlichkeit . . . . .	236

10.7.e Prozesse mit Entropieerzeugung . . . . .	237
10.7.f Entropiebilanz . . . . .	239
10.8 Energie . . . . .	239
10.9 Übersicht physikalische Erhaltungsgrößen . . . . .	240
<b>11 Energie</b>	<b>243</b>
11.1 Energie Vokabeln . . . . .	243
11.1.a Energie eines Systems . . . . .	244
11.1.b Energie und Arbeit . . . . .	244
11.1.c Energiedichte . . . . .	246
11.1.d Energiestromstärke . . . . .	247
11.1.e Energiestromdichte . . . . .	248
11.1.f Energiespeicher . . . . .	249
11.1.g Energieträger . . . . .	250
11.1.h Energiequellen . . . . .	250
11.2 Energieversorgung der Erde . . . . .	251
11.2.a Sonnenenergie . . . . .	251
11.2.b Energie aus dem Erdinnern . . . . .	252
11.2.c Rotationsenergie Erde . . . . .	252
11.3 Energieaustausch zwischen 2 Systemen . . . . .	253
11.3.a Energieformen . . . . .	253
11.3.b Übertragung durch ideale Leitungen . . . . .	253
11.3.c Energetisches Gleichgewicht . . . . .	254
11.3.d Erreichen des Gleichgewichts – der Weg dahin . . . . .	258
11.3.e Energieverbrauch . . . . .	261
11.3.f Umsetzer, Maschinen, Lebewesen . . . . .	262
11.3.g Qualitätsmaß für Energieumsetzer . . . . .	264
11.3.h Energetische Analyse von Anlagen . . . . .	267
11.4 Gibbssche Fundamentalform . . . . .	268
<b>12 Besserwissen</b>	<b>271</b>
12.1 Kinematik . . . . .	271
12.1.a Beschreibung von Punkten im Raum . . . . .	272
12.1.b Bewegung von Punkten im Raum . . . . .	272
12.1.c Geradlinige Bewegung . . . . .	274
12.1.d Kreisbewegung . . . . .	275
12.1.e Harmonische Schwingung . . . . .	278
12.1.f Kinematik auf einen Blick . . . . .	279
12.2 Wie man mit Impuls die Welt beschreibt . . . . .	280
12.2.a Was ist bereits über Impuls bekannt? . . . . .	280
12.2.b Was geschieht, wenn einem System Impuls übertragen wird? . . . . .	281
12.2.c Muss ich warten, bis mich jemand anschiebt? Impulstrennung . . . . .	285
12.2.d Impulspumpe . . . . .	286
12.2.e Wo kommt der Impuls her und wo geht er hin? . . . . .	287
12.2.f Impulsübertrag durch Felder / Gravitation . . . . .	288
12.2.g Freier Fall und Schwerelosigkeit . . . . .	291
12.2.h Impulsübertrag durch direkten Kontakt . . . . .	292
12.2.i Impulsleitung (konduktiver Impulsübertrag) . . . . .	295
12.2.j Impulstransport durch Konvektion . . . . .	297
12.2.k Ziehen einer Kiste . . . . .	297
12.2.1 Wie misst man eine Impulsstromstärke? . . . . .	298
12.3 Energieerhaltungssatz in der Punktmechanik . . . . .	300
12.3.a Energiebilanz zwischen Zuständen . . . . .	300
12.3.b Energiebilanz eines energetisch isolierten Systems . . . . .	301

**xii Inhaltsverzeichnis**

12.3.c Energiebilanz eines energetisch offenen Systems . . . . .	303
<b>12.4 Warum fliegt ein Flugzeug? . . . . .</b>	<b>304</b>
12.4.a Beobachtung: Ein Flugzeug fliegt. . . . .	304
12.4.b Recherche: Warum fliegt ein Flugzeug? . . . . .	304
12.4.c Nachhaken: Stimmt das? . . . . .	305
12.4.d Andere Erklärung, Verbesserung der Theorie . . . . .	305
12.4.e Warum sind Flugzeugflügel gewölbt? . . . . .	306
12.4.f Fazit Flugzeugbetrachtung . . . . .	307
<b>12.5 Gedanken zu Einheiten und Dimensionen . . . . .</b>	<b>308</b>
12.5.a Sind Größen mit eigenen Einheiten wichtiger als andere? . . . . .	308
12.5.b Ist ein Mol eine gewisse Anzahl an Teilchen? . . . . .	309
<b>A Tabellen</b>	<b>311</b>
<b>B Literatur</b>	<b>315</b>