

# Inhaltsübersicht

## 1 (Klassische) Mechanik: Bewegungen im Raum 1

- 1.1 Eine elementare, aber energiebetonte Einführung 2
  - 1.1. 1 Ist die Gießkanne ein hydrostatisches Paradoxon? 3
  - 1.1. 2 Herons Springbrunnen 4
  - 1.1. 3 Die seltsame Waage von Roberval 5
  - 1.1. 4 Die Höhe des Schwerpunkts 7
  - 1.1. 5 Ist die Schwerpunktsregel ein Naturgesetz? 7
  - 1.1. 6 Die Logik der schwarzen Raben und die „induktive Methode“ 9
  - 1.1. 7 Vorläufiges über die (Höhen-) Energie 12
  - 1.1. 8 Die Masse als Menge der Materie und ihre Dichte 13
  - 1.1. 9 der Formalismus mit Einheiten und Dimensionen 15
  - 1.1.10 Die Energie des homogenen Schwerefeldes 17
  - 1.1.11 Die einfache Maschine schlechthin 18
  - 1.1.12 Wo bleibt die Energie, woher kommt sie? 19
- 1.2 Kinematik: Geschwindigkeit und Beschleunigung 21
  - 1.2.1 (M) Funktion und Ableitung 21
    - 1.2.1.1 Reelle Zahlen und Funktionen 21
    - 1.2.1.2 Steigungsdiagramm, Tangente, Ableitung 22
    - 1.2.1.3 Rechenregeln für das Differenzieren (Ableiten) 24
    - 1.2.1.4 Zur Kurvendiskussion 26
    - 1.2.1.5 \* Historische Bemerkungen 26
  - 1.2.2 (M) Vektoren, Winkel sin & cos 27
    - 1.2.2.2 Betrag, Polarkoordinaten, Winkel, Winkelfunktionen 27
  - 1.2.3 Geschwindigkeit 29
    - 1.2.3.1 \* Mehr und weniger Ernsthaftes über Folgen und Reihen 30
    - 1.2.3.2 \* Überholte Achilleus die Schildkröte? 32
    - 1.2.3.3 \* Unendlich viele Schritte vor dem ersten? 33
    - 1.2.3.4 \*Ruhrt der fliegende Pfeil? 33
    - 1.2.3.5 (A) Überholen ohne Beschleunigen 35
  - 1.2.4 Beschleunigung 36
  - 1.2.5 Relativitätsprinzip 40
  - 1.2.6 Wurparabel 41
    - 1.2.6.1 (A) Weiteste Wurfarbel 41
    - 1.2.6.2 \* Wurf mit Reibung, Simulation WURF 43
    - 1.2.6.3 (A) Erweiterter grafischer Fahrplan 45
  - 1.2.7 \* Spiele zur Beschleunigung 45
    - 1.2.7.1 \* Kugel in Labyrinth mit verstellbarer Neigung 46
    - 1.2.7.2 \* Beschleunigung auf kariertem Papier 46
    - 1.2.7.3 \* Computer-Spiel BESCHLEUNIGUNG 47
    - 1.2.7.4 \* Differenzenfolgen und arithmetische Folgen 48
    - 1.2.7.5 \* Ungenauigkeiten aufgrund der iterativen Berechnung 49
    - 1.2.7.6 \* (A) Iterationsungenaugkeit 50
    - 1.2.7.7 \* Physik als Datenreduktion 50

## **1.3 Das Nullsummenspiel der Impulse 52**

1.3.1 Inertialsysteme 53

1.3.2 Impuls, Masse und Impulsatz 55

1.3.2.1 Gleiche Teilchen behalten ihren „Mittelpunkt“ 55

1.3.2.2 Die Materiemenge („Masse“) als Bewertungsfaktor 55

1.3.2.3 Der Impuls als Bewegungsgröße 56

1.3.2.4 Die Erhaltung des Impulses 57

1.3.2.5 Ruhe- und Schwerpunktssystem 57

1.3.3 Kräfte als (einseitige Ansichten) von Wechselwirkungen 58

1.3.3. 1 Definition der Kraft (-Summe) 59

1.3.3. 2 Eine Kjraft zwischen zwei Punktmassen 60

1.3.3. 3 Punktmechanik mitmehr als zwei Punktmassen 61

1.3.3. 4 Parallel- und Hintereinanderschaltung in einer Dimension 62

1.3.3. 5 Kräfte als Enden von Impulsströmen 63

1.3.3. 6 Kraftmessung 64

1.3.3. 7 \* Die Ankunft des Impulses heißt auch „Trägheitskraft“ 65

1.3.3. 8 Das Gesetz von Hooke 66

1.3.3. 9 Die Schwerkraft im homogenen Grenzfall 66

1.3.3.10 Kraftschluss und Haftung 67

1.3.3.11 Heimexperiment zur „Trägheit“? 69

1.3.3.12 Die Muskelkraft als besonders untypische Kraft 69

1.3.3.13 Ist die Kraft mehr als nur die Impulsänderungsrate? 70

1.3.4 Beispiele zur Dynamik 71

1.3.4.1 (A) Richtungsänderung 71

1.3.4.2 (A) Inelastischer Stoß 71

1.3.4.3 (A) Die Erde fällt auf den Apfel (?) 72

1.3.4.4 (A) Der Versuch von Atwood („Fallmaschine“) 73

1.3.4.5 (A) Ein Standard-Versuch mit der Luftkissenbahn 73

1.3.4.6 (A) Das Verlassen der Fähre 74

1.3.5 Ist das nun Statik oder Dynamik? 75

1.3.5.1 (A) Erbsen fallen auf die Waage 75

1.3.5.2 (A) Hüpfen 75

1.3.5.3 (A) Hubschrauber 76

1.3.5.4 (A) Tennis auf dem Wasser 76

1.3.6 Beispiele zur Statik 77

1.3.6.1 Haben acht Pferde so viel Kraft wie sechzehn? 77

1.3.6.2 Statische Netze (Fachwerk) 78

1.3.6.3 (A) Das goldene Fass 79

1.3.6.4 (A) Balkenwaage und Briefwaage 80

1.3.6.5 (A) Die Eleganz der Schrägseilbrücke 81

1.3.6.6 \* Ein Computerprogramm findet (auch) Gleichgewichte 81

1.3.7 Punktmassen auf Kreisbahnen 82

1.3.7.1 (A) Ein Doppelstern kommt selten allein 84

1.3.7.2 (A) Bremsen in der Kurve 84

1.3.7.3 (A) Kurvenüberhöhung und Glatteis 85

1.3.8 Kann man Trägheitskräfte spüren? 86

1.3.8.1 Echte und sogenannte Schwerlosigkeit: Volumenkraft 86

1.3.8.2 Der Marsch der Impulse durch die Strukturen: Oberflächenkraft 88

1.3.8.3 Vom Gefühl der Ruhe im Schwerefeld 90

1.3.8.4 Wo ist beim Kettenkarussell unten? 91

1.3.8.5 \* Das scheinbare Schwerefeld 92

1.3.8.6 (A) Warum fällt der Fahrgäst nicht aus der Achterbahn? 93

1.3.9 \* Historische Bemerkungen 93

1.3.9.1 \* Aristoteles 93

1.3.9.2 \* Buridan und die Impetustheorie 95

1.3.9.3 \* Galileo Galilei 95

## 1.3.9.4 \* Sir Isaac Newton 96

### 1.4 Energie in der Mechanik 98

#### 1.4.1 Kinetische Energie 98

1.4.1.1 (A) Wirkungsgrad von Windkonvertern nach Betz 99

#### 1.4.2 (M) Integral - einmal ganz anschaulich 100

#### 1.4.3 (M) Das skalare Produkt zweier Vektoren 102

#### 1.4.4 Kann man Energie aufbewahren? 103

1.4.4.1 (A) Stabhochsprung 106

1.4.4.2 Definition der Leistung 107

1.4.4.3 (A) Von menschlicher Leistung 107

1.4.4.4 (A) Was Autos so leisten 107

#### 1.4.5 Energieentwertung durch Reibung 108

1.4.5.1 (A) Ein Erbsenmodell für das Mischen von Impulsen 109

1.4.5.2 (A) Bremsdiagramme 110

#### 1.4.6 Gleichgewichte 112

#### 1.4.7 \* Hydrostatik 113

1.4.7.1 \* Kapillarität 114

#### 1.4.8 Energiebetrachtungen zu Stoßen 115

1.4.8. 1 Was ist ein elastischer Stoß?

1.4.8. 2 (A) Elastischer Stoß zweier Punktmassen im SPS 116

1.4.8. 3 (A) Der schlechte Billardspieler (gleiche Massen) 117

1.4.8. 4 \* (A) der gute Billardspieler (Stoßparameter) 118

1.4.8. 5 (A) Tischtennisball (extrem verschiedene Massen) 119

1.4.8. 6 (Heimexperiment): Ein Ball will hoch hinaus 119

1.4.8. 7 (A) Swing-by

1.4.8. 8 (A) Molekül und Stempel 122

1.4.8. 9 (A) Die Unfallforschung der Biertisch-Experten 123

1.4.8.10 Ein elastisches Modell für den inelastischen Stoß 123

### 1.5 Drehimpuls und Starrer Körper 125

#### 1.5.1 (M) Kreuzprodukt 125

#### 1.5.2 Drehimpuls und sein Erhaltung 126

1.5.2.1 Zentralkraft und Flächensatz 127

#### 1.5.3 Drehmoment 128

1.5.3.1 (A) Unterarm 128

#### 1.5.4 Starrer Körper und Trägheitsmoment 128

1.5.4.1 (A und Heimversuch) Eine Latte als Falltür 129

1.5.4.2 (A) Speichen auf Biegen und Brechen 131

1.5.4.3 (A) Von der Tätigkeit der Eistänzerin 132

#### 1.5.5 Analogien zwischen Translation und Rotation 131

## 2 Gravitation und Astronomie 133

### 2.1 Keplers Gesetze 133

### 2.2 Newtons Gravitationsgesetz 134

2.2.1 (A) Newtons Exponent aus Keplers Gesetzen I und II 137

2.2.2 (A) Keplers 3. Gesetz für eine Kreisbahn 137

2.2.3 (A) Heliozentrische Mondbahn 137

2.2.4 (A) Erdmasse aus Fallbeschleunigung 139

2.2.5 (A) Fallbeschleunigungen bei gleicher Dichte 139

### 2.3 (M) Satz von Gauß 139

### 2.4 Bewegung im Potentialtopf 141

2.4.1 \* (A) Kreise im Geschwindigkeitsraum 145

2.4.2 \* Simulationsprogram PLANET 147

<b>2.5 * Weniger einfache Umläufe</b>	<b>148</b>
<b>2.6 * Entfernungen</b>	<b>151</b>
<b>2.7 * Warum ist es nachts dunkel?</b>	<b>152</b>
<b>2.8 * Bezugssysteme und Weltsysteme</b>	<b>153</b>
2.8.2 * Simulation TYCHO & COPERNICUS	157
2.8.3 * Zwei Jahrhunderte Aufspüren unbekannter Planeten	158
<b>2.9 * Der Zeitpfeil in der Astronomie</b>	<b>162</b>
2.9.1 * Kant und die Gezeitenreibung der Erde	162
2.9.2 * Hubble und die Expansion des Raumes	

### **3 Elektrodynamik 165**

<b>3.1 Elektrostatik</b>	<b>166</b>
3.1.1 Coulomb-Gesetz	166
3.1.1.1 (A) Dipole	167
3.1.1.2 (A) Mechanisches Modell zum Dipol	168
3.1.2 Vergleich der Elektrostatik mit der Gravitation	168
3.1.3 Elektrische Feldstärke	169
3.1.3.1 * Ein Balance-Akt und der Satz von Earnshaw	170
3.1.4 Elektrische Spannung, Potential	171
3.1.5 * Feld-(linien-)bilder	171
3.1.6 Kondensator und Energiedichte	175
3.1.6.1 (A) Wo steckt der Fehler?	177
3.1.6.2 (A) Elektrostatisches Haften	178
3.1.7 * Polarisierbarkeit	178
<b>3.2 Elektrischer (Gleich-) Strom</b>	<b>180</b>
3.2.1 elektrische Stromstärke	180
3.2.2 Knotenregel	181
3.2.3 Energietransport	181
3.2.4 Maschenregel	184
3.2.5 Ohm-Widerstand	185
3.2.5.1 (A) Falsche Glühbirnen	186
3.2.5.2 (A) Spannungsteiler mit Last	186
3.2.5.3 (A) Vielfachdrehspulgerät	187
3.2.6 * Leitungsmechanismen	188
3.2.7 (M) Exponentialfunktionen und Logarithmen	189
3.2.7.1 (A) Kondensator auf- und entladen	191
<b>3.3 Magnetfeld und Lorentz-Kraft</b>	<b>194</b>
3.3.1 Ampère-Kraft	195
3.3.2 Lorentz-Kraft und Definition von B	195
3.3.2.1 (A) Induktion und Hall-Effekt	196
3.3.3 Durchflutungsgesetz	197
3.3.3.1 Der Magnetismus der Erde	198
3.3.3.2 (A) Magnetfeld eines Drahtes	199
3.3.3.3 (A) Lange Spule	199
3.3.4 * Biot-Savart-Gesetz und Helmholtz-Spulen	200
3.3.4.1 (A) Messung der Spezifischen Ladung	202
<b>3.4 Induktionsvorgang und Wechselstrom</b>	<b>203</b>
3.4.1 Induktionsgesetz	203
3.4.2 Wechselstromgenerator	204
3.4.2.1 (A) Erdinduktor	204

- 3.4.3 Effektivwerte 205
- 3.4.4 Zeigerdiagramm und Drehstrom 206
  - 3.4.4.1 (A) Drehstrom 207
- 3.4.5 \* (M) Komplexe Zahlen 207
- 3.4.6 \* Induktivität 208
- 3.4.7 \* Maxwell-Gleichungen (in Integral-Form) 209
- 3.4.8 \* Michael Faraday 210

## 4 Schwingungen und Wellen 211

### 4.1 Schwingungen 211

- 4.1. 1 Federpendel qualitativ 211
- 4.1. 2 (M) Sinus und Cosinus und ihre Ableitungen 212
- 4.1. 3 Ungedämpftes Federpendel quantitativ 213
  - 4.1. 3.1 (A) Federdrehpendel 214
  - 4.1. 3.2 (A) Energien beim Federpendel und beim Federdrehpendel 215
- 4.1. 4 Elektrischer Schwingkreis etc. 216
- 4.1. 5 \* Analogien zwischen mechanischen und elektrischen Größen 217
- 4.1. 6 Dämpfung 219
  - 4.1. 6.2 \* (A) Stark gedämpfte (d.h. aperiodische) Schwingung 219
  - 4.1. 6.3 \* (A) Aperiodischer Grenzfall 220
  - 4.1. 6.4 \* (A) Schwache Dämpfung (d.h. periodischer Fall) 221
- 4.1. 7 Rückkopplung und Resonanz 222
- 4.1. 8 \* Anharmonische Schwingungen 223
- 4.1. 9 Chaos 225
- 4.1. 10 Schwebungen 226
- 4.1. 11 Gekoppelte Schwingungen 227
- 4.1. 12 \* Bandbreite und Datenfluss 228

### 4.2 Wellen 231

- 4.2. 1 \* Wellengleichung 232
  - 4.2.1.1 \* Die Differentialgleichung für Wellen auf einer Saite 232
  - 4.2.1.2 \* Verallgemeinerung der Wellengleichung und Lösungen 234
  - 4.2.1.3 \* Stehende Wellen 236
- 4.2. 2 Elongation und Energiestromdichte 237
- 4.2. 3 Zwei dünne Spalte 239
  - 4.2.3.1 (A) Lautsprecher übereinander
- 4.2. 4 Gitter aus  $n$  Spalten 242
- 4.2. 5 Breite Spalte 245
- 4.2. 6 Weitere Anwendungen und Fermat-Prinzip 247
  - 4.2.6.1 (A) Brechung einer Welle 247
  - 4.2.6.2 (A) Strahlenoptik als Grenzfall
  - 4.2.6.3 (A) Exakte Abbildungen 249
  - 4.2.6.4 \* Wie eine Linse funktioniert 250
  - 4.2.6.5 \* Fermat-Prinzip 251
  - 4.2.6.6 \*(A) Überzählige Pfade? 252
- 4.2. 7 \* In Luft hören 253
- 4.2. 8 \* Farben sehen 256
- 4.2. 9 \* Hologramme als Speicher optischer Informationen 258

## **5 Strahlenoptik 260**

### **5.1 Lichtstrahl als Modell 260**

- 5.1.1 Gültigkeitsgrenzen auf Grund der Wellenoptik 261
- 5.1.2 Gültigkeitsgrenzen auf Grund der Quantenphysik 261
- 5.1.3 Historische Anmerkungen 262
- 5.1.4 Grundregeln der Strahlenoptik 263

### **5.2 Paraxiale Optik 263**

- 5.2.1 (A) Brechung an Kugelfläche (Auge ohne Linse) 264
- 5.2.2 Dünne Linse (zwei koaxiale Kugelschalen „im Abstand 0“) 265
- 5.2.3 Anwendungen der „Knick-Formel“ 266
  - 5.2.3.1 \* Computerzeichnung von Strahlengängen 266
  - 5.2.3.2 Zeichnerisches Verfahren 267
  - 5.2.3.3 (A) Ausgezeichnete Strahlen 268
- 5.2.4 Optische Abbildung 269
  - 5.2.4.1 (A) Objektiv als dünne Linse 271
  - 5.2.4.2 (A) Zwischenring 271
  - 5.2.4.3 Mikroskop 271
  - 5.2.4.4 (A) Fernrohre 273
  - 5.2.4.5 (A) Brillenoptik 274
  - 5.2.4.6 \* Knobelaufgabe und Programmervorschlag 275
- 5.2.5 \* Bemerkungen zum Auge 276

## **6 Thermodynamik und kinetische Gastheorie 277**

### **6.1 Ideales Gas 277**

- 6.1.1 Ideales Gas als Modell 277
- 6.1.2 Vom Impuls zum Druck 278
- 6.1.3 Thermische Zustandsgleichung 279
  - 6.1.3.1 \* Historische Bemerkungen (id. Gas) 279
  - 6.1.3.2 \* Teilchenzahl als sogenannte Stoffmenge 280
  - 6.1.3.3 (A) Luftmoleküle im Zimmer 280
  - 6.1.3.4 (A) Heißluftballon
- 6.1.4 \* Spezifische Wärmekapazität 281

### **6.2 Der Stirling-Kreisprozess 282**

- 6.2.1 Isotherme Volumenänderungen 282
- 6.2.2 Der Stirling-Prozess als Kreisprozess 284
- 6.2.3 Wärmepumpe und Wärmekraftmaschine 286
- 6.2.4 Bleibt die „Arbeitsfähigkeit“ erhalten? 288
  - 6.2.4.1 (A) Wärmepumpe 291

### **6.3 Die Entropie, ein unbekanntes Wesen? 292**

- 6.3.1 Makroskopische Definition der Entropie 292
- 6.3.2 (A) Entropie bei dem Stirling-Prozess 294
- 6.3.3 Die schwierige Klärung des Wortes „Wärme“ 294
- 6.3.4 (A) Zunahme der Entropie bei der Wärmeleitung 296
- 6.3.5 Ausströmvorschuss von Gay-Lussac 297
- 6.3.6 Satz von der nicht abnehmenden Entropie (2. Hauptsatz) 297
- 6.3.7 Wahrscheinlichkeit und Entropie 299

## **6.4 \* Aus Geschichte und Gegenwart der Energietechnik 300**

- 6.4.1 \* Viele Sorten Kreisprozesse 300**
  - 6.4.1.1 \* Rückblick auf die Stirling-Maschine 300
  - 6.4.1.2 \* Isobaren, Isentropen usw 300
  - 6.4.1.3 \* Zehn Kombinationen von „Iso-Kurven“ als Kreisprozesse 301
  - 6.4.1.4 \* Die Dampfmaschine und ihr glückloser Erfinder Denys Papin 302
  - 6.4.1.5 \* Carnot und Reitlinger 304
  - 6.4.1.6 \* Ericsson und der Jet-Set 305
  - 6.4.1.7 \* Verbrennungsmotoren nach Otto und Diesel 306
- 6.4.2 \* Zur Energiewirtschaft: Die unsichtbaren Sklaven 307**

## **7 Spezielle Relativitätstheorie (SRT) 308**

### **7.1 Relativistische Dynamik 308**

- 7.1.1 Hängt die Masse von der Geschwindigkeit ab? 308**
- 7.1.2 Das Pythagoras-Dreieck der SRT 309**
- 7.1.3 Grenzfall: langsam und also klassisch 311**
- 7.1.4 Grenzfall: fast oder ganz wie das Licht 312**
- 7.1.5 Wechsel des Bezugssystems 312**
- 7.1.6 Systeme aus mehreren Teilchen, Erhaltung und Invarianz 313**
  - 7.1.6.1 \* (A) Ruheenergie mehrerer Photonen (!) 315
  - 7.1.6.2 (A) Warum Collider so wirtschaftlich sind 316
  - 7.1.6.3 \* (A) HERA 317
  - 7.1.6.4 (A) Kann ein freies Elektron ein Photon verschlucken? 317
  - 7.1.6.5 Compton-Effekt 318
- 7.1.7 Masse und Energie: identisch oder ineinander umwandelbar? 319**
- 7.1.8 Das „Ganze“ ist *weniger* als seine „Teile“: Bindungsenergien 321**

### **7.2 \* Relativistische Kinematik 322**

- 7.2.1 \* Die sogenannte Galilei-Transformation (zum Vergleich) 322**
- 7.2.2 \* Lorentz-Transformation 323**
  - 7.2.2.1 \* Myonen lassen sich Zeit mit dem Zerfall 325
  - 7.2.2.2 \* Werden Maßstäbe kürzer? („Lorentz-Fitzgerald-Kontraktion“) 326
  - 7.2.2.3 \*Das „Additionstheorem“ der Geschwindigkeiten 328
  - 7.2.2.4 Unser Gehirn ist zu langsam zum Sehen der Relativitätstheorie 329

### **7.3 \* Albert Einstein 330**

## **8 Struktur der Materie 332**

- 8.0.1 \* Historische Anmerkungen (Atomphysik) 332**

### **8.1 Quantenmechanik 333**

- 8.1.1 Wellenmechanik und Unbestimmtheit 334**
  - 8.1.1.1 Klassische Unbestimmtheit bei Schwingungen 334
  - 8.1.1.2 (A) Akustische Unbestimmtheit 335
  - 8.1.1.3 Fotoeffekt 336
  - 8.1.1.4 Materiewellen 338
  - 8.1.1.5 Quantenmechanische Unbestimmtheit 338
  - 8.1.1.6 (A) Passen Elektronen in den Kern? 340
- 8.1.2 Bosonen, Fermionen und Pauli-Prinzip 340**

### **8.2 Fundamentale Fermionen: Leptonen und Quarks 341**

- 8.2.1 Nichts ist einfacher als das Elektron 343**
- 8.2.2 Das Positron und andere „Anti-Materie“ 344**
- 8.2.3 Neutrinos als Poltergeister und Welträtsel 346**
- 8.2.4 Myon und Tauon, des Elektrons schwere Geschwister 347**

8.2.5 Zweimal sechs Sorten Quarks	347
<b>8.3 Bosonen und Wechselwirkungen</b>	<b>349</b>
8.3.1 Reichweiten: Wer leicht ist, kommt weiter!	349
8.3.2 „Farbiger Klebstoff“ hält die Welt zusammen (Gluonen)	349
8.3.3 elektromagnetische Kraft und Photon, QED	350
8.3.3.1 (A) Skalenbeispiele zu Photonen	350
8.3.3.2 (A) Photoelektronenspektroskopie (PES)	352
8.3.4 Schwache Kraft und Weakonen, $\beta$ -Zerfall	352
8.3.5 * Gravitation und Graviton	353
8.3.6 * Vereinheitlichungen	353
<b>8.4 Teilchenverbindungen</b>	<b>354</b>
8.4.1 Hadronen als Verbindungen aus Quarks	354
8.4.2 * Was sind elementare Teilchen?	356
8.4.2.1 * Ist das Tolu-wa-Bohu einfacher?	358
8.4.2.2 * Teilchen als Wandergruppen	359
<b>8.5 Atomkerne</b>	<b>360</b>
8.5.1 Elemente und Nuklide	360
8.5.2 Abmessungen der Kerne	361
8.5.3 Bethe-Weizsäcker-Formel	361
8.5.3.1 Volumenterm	362
8.5.3.2 Oberflächenterm	363
8.5.3.3 Asymmetrie-Term	363
8.5.3.4 Coulomb-Term	364
8.5.3.5 Paarungsterm	365
8.5.4 Isobarenschnitt und Beta-Zerfälle	365
8.5.4.1 (A) Massenbilanz bei Betazerfällen	366
8.5.5 Alpha-Zerfälle: mit Heisenberg-Kredit aus dem Gefängnis	367
8.5.6 Stabilitätstafel	369
8.5.7 Spaltung	369
8.5.7.1 * Historische Anmerkungen zur Kernspaltung	371
8.5.8 Kernfusion	374
8.5.8.1 (A) Sonnenenergie	375
8.5.8.2 (A) Massebezogene Leistung	375
8.5.9 Zerfallskonstante	376
8.5.9.1 (A) Halbwertszeiten	376
8.5.9.2 (A) Das verschwundene Nuklid	377
<b>8.6 Atome, Moleküle und Festkörper</b>	<b>377</b>
8.6.1 Atome und ihre Hüllen	377
8.6.1.2 Die Unbestimmtheit bestimmt die Mindestgröße	378
8.6.1.3 Wellenfunktionen	379
8.6.1.4 Die radiale Abhängigkeit	380
8.6.1.5 Energiestufen im H-Atom und in Ionen, die ihm ähnlich sind.	381
8.6.1.5 Haben Atome Zwiebelschalen?	382
8.6.1.6 *Noch mehr Quantenzahlen	386
8.6.2 * Moleküle	388
8.6.3 Festkörper	389
8.6.3.1 (A) Bragg-Reflexion	390

## **9 Anhang 392**

### **9.1 Jahreszahlen vor allem zur Physik 392**

### **9.2 Englische Vokabeln zur Physik 397**

### **9.3 Zur Wortkunde physikalischer Fachwörter 399**

9.3.1 Griechisches Alphabet 399

9.3.2 Präfixe (Vorsilben) 399

9.3.3 Wörter 400

### **9.4 Nicht nur Geheimtips 402**

9.4.1 Fachliche und populäre Literatur 402

9.4.2 Aufgaben und Heimversuche 403

9.4.3 Physikgeschichte und klassische Originalliteratur 403

9.4.4 Physikalische und technische Ausstellungen 403

9.4.5 Fernsehsendungen 404

9.4.6 Vorträge und Tagungen nicht nur für Spezialisten 404

9.4.7 Unterhaltung mit Nähe zu Physik oder Mathematik 404

9.4.7.1 Rätsel und Scherze 404

9.4.7.2 Kunst und Physik 404

9.4.7.3 Romane, Erzählungen, Theaterstücke 405

### **9.5 Register 406**

### **9.6 Zahlen und Einheiten 413**

9.6.1 Naturkonstanten und atomare Einheiten 413

9.6.2 Metrische Basiseinheiten 413

9.6.3 Symbole für Zehnerpotenzen 413

9.6.4 Abgeleitete metrische Einheiten 414

9.6.5 Astronomische Faustdaten 414