

# Inhaltsverzeichnis

## Evolution, Energetik und Bau der Pflanzenzelle

### 1 Einstieg in die Biologie pflanzlicher Zellen 3

1.1 Die Progenoten und die Evolution dreier grundlegender Erfordernisse des Lebens 3

1.1.1 Abgrenzung von der Umgebung: Fette und Lipide 4

1.1.2 Emanzipation von der Umgebung: Polynucleotide und Peptide 7

1.1.3 Speicherung und Weitergabe von Information: Ribonucleinsäure (RNA) und Desoxyribonucleinsäure (DNA) 8

1.2 Die Prokaryonten und die Realisierung der drei grundlegenden Erfordernisse des Lebens 8

1.3 Besondere Eubakterien: Die Cyanobakterien als prokaryotische Algen 9

1.4 Die Eukaryonten-Zellen 11

1.5 Endosymbiontentheorie der Evolution eukaryotischer Zellen 15

1.5.1 Die Urkaryonten und ihr Erwerb von Organellen 15

1.5.2 Cytologische und zellbiologische Belege für die Endosymbiontentheorie 16

1.5.3 Rezente Endosymbiosen 17

1.5.4 Symbiogenese 17

1.5.5 Hydrogen-Hypothese 19

Zusammenfassung und Übungsaufgaben 20

Weiterführende Literatur 21

### 2 Bioenergetik 23

2.1 Fließgleichgewichte und Bioenergetik 23

2.2 Wärme und Arbeit sind verschiedene Formen von Energie 25

2.3 Die Entropie bestimmt die Richtung von Prozessen 26

2.4 Die „Freie Energie“ ist ein Maß für nutzbare Energie 27

2.5 Die Energiekoppelung bei biochemischen Umsetzungen 28

2.6 Die Energiekoppelung bei biophysikalischen Umsetzungen mit Licht 31

2.6.1 Halobakterien 31

2.6.2 Durch Licht energetisierte Redoxreaktionen 31

2.6.3 Photosynthese betreibende Eubakterien 34

2.6.4 Photosynthese höher entwickelter Formen 36

2.6.5 Evolution der Elektronenübertragungsketten der Photosynthese und der Atmung 36

2.7 Die Enzyme 37

2.7.1 Aktivierungsenergie und Biokatalyse 37

2.7.2 Stoffliche Eigenschaften von Enzymen 38

2.7.3 Wirkungsweise der Enzyme 38

2.7.4 Kinetik der Biokatalyse 39

2.7.5 Regulierbare Enzyme 42

2.7.6 Isoenzyme 43

Zusammenfassung und Übungsaufgaben 45

Weiterführende Literatur 46

### 3 Plasmamembran, Tonoplast und Vakuole 47

3.1 Plasmamembran und Tonoplast begrenzen Apoplast, Cytoplasma und Vakuole 47

3.2 Der Membranaufbau 47

3.3 Transportprozesse 48

3.3.1 Die passive Permeation 48

3.3.2 Der primär aktive Transport von Protonen 51

3.3.3 Die Carrier-Mechanismen 54

3.3.4 Die Kanäle 54

3.3.5 Die Porine 57

3.3.6 Der sekundär aktive Transport 57

3.4 Die Vakuolen und Lysosomen: Speicherfunktionen und hydrolytische Enzyme 58

3.5 Die Osmose und der Turgor 58

3.6 Die Messung der Wasserhaushaltsparameter 62

Zusammenfassung und Übungsaufgaben 64

Weiterführende Literatur 65

## VI Inhaltsverzeichnis

### Funktionen der Pflanzenzelle

#### 4 Cytoplasma: Struktur

##### und Stoffwechselprozesse 69

- 4.1 Die Begriffe 69
- 4.2 Das Cytosol und das Cytoskelett 69
- 4.3 Die Stoffwechselprozesse im Cytosol 72
  - 4.3.1 Kohlenhydrate als Energiereserven 72
  - 4.3.2 Mobilisierung der Reservekohlenhydrate 73
  - 4.3.3 Glykolyse 73
  - 4.3.4 Lipidstoffwechsel 82
- Zusammenfassung und Übungsaufgaben 82
- Weiterführende Literatur 83

#### 5 Mitochondrien und Atmung 85

- 5.1 Struktur der Mitochondrien 85
- 5.2 Atmung 87
  - 5.2.1 Biochemische Umsetzungen 87
  - 5.2.2 Mitochondriale Elektronentransport- und Redoxkette 90
- 5.3 Oxidative Phosphorylierung: ATP-Bildung durch den mitochondrialen  $F_0/F_1$ -ATPase-Komplex 96
- 5.4 Energiebilanz des vollständigen oxidativen Abbaus der Glucose in der Atmung 97
- 5.5 Transport von Metaboliten durch die Mitochondrienmembran 98
- 5.6 Kohlenhydratabbau als Sammelbecken im Stoffwechsel 100
- Zusammenfassung und Übungsaufgaben 102
- Weiterführende Literatur 104

#### 6 Plastiden und ihre Funktionen: Photosynthese, Hexoseoxidation, Fettsäurebiosynthese 105

- 6.1 Plastiden 105
  - 6.1.1 Plastiden als Zellorganellen 105
  - 6.1.2 Größe und Gestalt 107
  - 6.1.3 Struktureller Feinbau 107
- 6.2 Der strahlungsabhängige biophysikalische Primärprozess der Photosynthese 110
  - 6.2.1 Elektromagnetische Strahlung: Lichtquanten, Wellenlänge und Energie 110
  - 6.2.2 Pigmente der Photosynthese 112

- 6.2.3 Anregung des Chlorophylls durch Lichtabsorption 113
- 6.2.4 Lichtsammelantennen und Photosysteme 118
- 6.2.5 Bildung von Reduktionsäquivalenten (NADPH) beim Elektronentransport der Lichtreaktion 121
- 6.2.6 Bildung von ATP durch die Photophosphorylierung 125
- 6.3 Nutzung der Redox-(NADPH) und Phosphorylierungs-(ATP) Äquivalente und Energiebilanz der  $CO_2$ -Reduktion 127
- 6.4 Kohlenhydrat-Stoffwechsel in den Chloroplasten 128
  - 6.4.1 Hexosesynthese und Hexoseoxidation 128
  - 6.4.2  $CO_2$ -Assimilation 129
  - 6.4.3 Hexose-Abbau: Glucose-Oxidation 131
  - 6.4.4 Die regenerierenden Phasen: reduktiver und oxidativer Pentosephosphatzyklus 131
  - 6.4.5 Funktionen und Regulation des reduktiven und oxidativen Pentosephosphatzyklus 134
- 6.5 Synthese weiterer Endprodukte der photosynthetischen  $CO_2$ -Assimilation 134
  - 6.5.1 Export von Metaboliten aus den Chloroplasten 134
  - 6.5.2 Stärke und Saccharose 134
  - 6.5.3 Fettsäuren 135
- Zusammenfassung und Übungsaufgaben 138
- Weiterführende Literatur 141

#### 7 Dictyosomen, Glyoxysomen und Peroxisomen 143

- 7.1 Dictyosomen 143
- 7.2 Glyoxysomen und Peroxisomen 145
  - 7.2.1 Glyoxysomen 145
  - 7.2.2 Die Peroxisomen 149
- Zusammenfassung und Übungsaufgaben 152
- Weiterführende Literatur 153

- 8 Die Zellwand 155**
- 8.1 Chemische Zusammensetzung der Zellwände 156
- 8.1.1 Pectinstoffe: Protopectine und Pectine 156
- 8.1.2 Hemicellulosen 156
- 8.1.3 Cellulose 158
- 8.1.4 Kallose 160
- 8.1.5 Chitin: Ein Sonderfall unter den Zellwandsubstanzen 160
- 8.1.6 Zellwandproteine 160
- 8.2 Biosynthese der chemischen Zellwandkomponenten und ihre Kompartimentierung 160
- 8.3 Entwicklung der Zellwand 162
- 8.4 Bau der Zellwand 164
- 8.4.1 Hierarchie der Cellulosestrukturen 164
- 8.4.2 Textur der Cellulosefibrillen 166
- 8.4.3 Primärwand 167
- 8.4.4 Sekundärwand und Tertiärwand 167
- 8.5 Durchbrechungen in Zellwänden 168
- Zusammenfassung und Übungsaufgaben 171
- Weiterführende Literatur 172
- 9 Aminosäuren und Proteine 173**
- 9.1 Die Aminosäuren und ihre Eigenschaften 173
- 9.2 Die Kondensation von Aminosäuren zu Peptiden 176
- 9.3 Proteine und ihre Eigenschaften 177
- 9.4 Die Strukturhierarchie der Proteine 179
- 9.4.1 Primärstruktur 179
- 9.4.2 Sekundärstruktur 180
- 9.4.3 Tertiärstruktur 181
- 9.4.4 Quartärstruktur 184
- 9.5 Die Funktionen der Proteine 184
- 9.6 Posttranslationale Proteinmodifikationen 185
- 9.7 Der Stoffwechsel der Aminosäuren und Proteine 186
- 9.7.1 Synthese von Aminosäuren 186
- 9.7.2 Umsatz der Proteine 186
- Zusammenfassung und Übungsaufgaben 188
- Weiterführende Literatur 190
- 10 Naturstoffe: Pflanzen als vielseitige Synthetiker 191**
- 10.1 Ein Überblick 191
- 10.2 Terpenoide 191
- 10.3 Phenole 193
- 10.4 Alkaloide und organische Basen 198
- 10.5 Porphyrine 203
- Zusammenfassung und Übungsaufgaben 205
- Weiterführende Literatur 206
- 11 Mineralstoffernährung 207**
- 11.1 Autotrophie: Nährelemente und Spurenelemente 207
- 11.2 Die Rolle von Pflanzen im Stickstoff- und Schwefelstoffwechsel von Ökosystemen 209
- 11.3 Der Stoffwechsel des Stickstoffs 211
- 11.3.1 Nitrataufnahme und Nitratreduktion 211
- 11.3.2 Fixierung von Luftstickstoff 211
- 11.4 Der Stoffwechsel des Schwefels 215
- 11.5 Der Stoffwechsel des Phosphors 217
- 11.6 Die Carnivorie 217
- 11.7 Anorganische Ionen als besondere Standortfaktoren 221
- 11.7.1 Salinität 221
- 11.7.2 Calcium und Eisen 223
- 11.7.3 Belastung durch Metalle 225
- 11.7.4 Anionen des Bor, Arsen und Selen 226
- Zusammenfassung und Übungsaufgaben 227
- Weiterführende Literatur 229
- 12 Das Genom und die genetische Regulation 231**
- 12.1 Der Zellkern 231
- 12.1.1 Der Zellkern mit den Chromosomen als Kontrollzentrum der Zelle 231
- 12.1.2 Das Chromatin und die Chromosomen 233
- 12.1.3 Die Kern- und Zellteilung: Mitose 234
- 12.2 Kern-Genom und Vererbung: Die MENDELSchen Regeln 239
- 12.3 Die extrachromosomale Vererbung 242
- 12.4 Die Modifikationen und die Mutationen 243
- 12.5 Die genetische Regulation 245
- 12.5.1 Genetischer Code 245

## VIII Inhaltsverzeichnis

- 12.5.2 Autokatalytische Funktion der DNA: Replikation 245
- 12.5.3 Heterokatalytische Funktion der DNA: Transkription durch RNA-Polymerase 247
- 12.5.4 Translation und Proteinsynthese 250
- 12.5.5 Regulation der Genaktivität 252
- Zusammenfassung und Übungsaufgaben 256
- Weiterführende Literatur 258

## Pflanzenorganismen

### 13 Algen 261

- 13.1 Die eukaryotischen Algen im System der Organismen 261
- 13.2 Leben im Wasser und die Pigmente der Algen 262
- 13.3 Die vegetativen Entwicklungstendenzen und Lebensweisen der Algen 263
  - 13.3.1 Monadale Organisationsstufe 265
  - 13.3.2 Entwicklung von einzelligen Flagellaten zu mehrzelligen Kolonien mit Arbeitsteilung 265
  - 13.3.3 Coccale Organisationsstufe: Verlust der freien Beweglichkeit 267
  - 13.3.4 Trichale Organisationsstufe 269
  - 13.3.5 Siphonale Organisationsstufe 270
  - 13.3.6 Entwicklung von einfachen Zellfäden zu komplexen Thalli 270
- 13.4 Die generativen Entwicklungstendenzen 277
  - 13.4.1 Mitosen, Sexualität und Meiose 277
  - 13.4.2 Isogamie, Anisogamie, Oogamie 281
  - 13.4.3 Gametangien und Sporangien 281
  - 13.4.4 Generationswechsel 282
- 13.5 Ein phylogenetischer Überblick 288
- 13.6 Von den Algen der Streptophytina zu den grünen Landpflanzen 289
- Zusammenfassung und Übungsaufgaben 291
- Weiterführende Literatur 293

### 14 Bryophyten 295

- 14.1 Allgemeine Merkmale 295
- 14.2 Systematik und Phylogenie der Moose 295
  - 14.2.1 Thallose und foliose Lebermoose (Marchantiophytina) 296
  - 14.2.2 Laubmoose (Bryophytina) 299
  - 14.2.3 Hornmoose (Anthocerotophytina) 301
- 14.3 Fortpflanzung und Vermehrung der Moose 301
- 14.4 Wasserhaushalt und Lebensweise der Moose 306
- Zusammenfassung und Übungsaufgaben 310
- Weiterführende Literatur 310

### 15 Schleimpilze und Pilze 311

- 15.1 Allgemeine Merkmale 311
- 15.2 Ein systematischer Überblick 311
  - 15.2.1 Organisationsform Schleimpilze 313
  - 15.2.2 Organisationsform Pilze 314
- 15.3 Die Bedeutung der Pilze 320
- Zusammenfassung und Übungsaufgaben 320
- Weiterführende Literatur 321

### 16 Der Generationswechsel bei Farnen, Gymnospermen und Angiospermen und die Evolution von Blüten, Samen und Früchten 323

- 16.1 Ur-Sprosspflanzen und endständige Sporangien 323
- 16.2 Telomtheorie 324
- 16.3 Der Generationswechsel der isosporen Farne 325
- 16.4 Die Evolution der Blüten 327
- 16.5 Der Generationswechsel der heterosporen Farne 329
- 16.6 Die Gymnospermen: Evolution der Samen 331
  - 16.6.1 Männliche Blüten und Pollenkörner 331
  - 16.6.2 Weibliche Blüten und Samenanlagen 333
  - 16.6.3 Bestäubung, Befruchtung und Samenbildung 333
  - 16.6.4 Phylogenetische Tendenzen 334
- 16.7 Der versteckte Generationswechsel der Angiospermen 336
  - 16.7.1 Staubblätter und Pollenkörner 336
  - 16.7.2 Fruchtknoten und Samenanlagen 337

16.7.3 Bestäubung, Befruchtung, Samen- und Fruchtbildung 337  
 16.7.4 Phylogenetische Tendenzen 338  
 16.8 Die Pollenübertragung 342  
 16.8.1 Bestäubungsmechanismen 342  
 16.8.2 Phylogenetische Tendenzen 343  
 16.9 Die Früchte 344  
 16.10 Die Entwicklungstendenzen bei den Angiospermen 345  
 16.11 Zusammenfassender Überblick über die Klassen der Pteridophytina und Spermatophytina 351  
 Zusammenfassung und Übungsaufgaben 351  
 Weiterführende Literatur 353

**Pflanzenorgane und Funktionen**

**17 Die Wurzel 357**  
 17.1 Die Wurzel als besonderes, neues Organ der Sprosspflanzen (Kormophyten) beim Übergang zum Leben an Land 357  
 17.2 Der äußere Bau der Wurzeln 359  
 17.3 Der innere Bau der Primärwurzel 362  
 17.3.1 Wurzelhaube 362  
 17.3.2 Der Vegetationspunkt der Wurzel 362  
 17.3.3 Die Streckungs- und Differenzierungszone 366  
 17.3.4 Die Wurzelhaarzone 369  
 17.4 Seitenwurzeln 371  
 17.5 Sekundäres Dickenwachstum 373  
 17.6 Die Aufnahme von Wasser und Nährsalzen durch die Wurzeln 375  
 17.7 Die Metamorphosen der Wurzel 377  
 17.8 Signalübertragung in der Rhizosphäre: Allelopathie 379  
 Zusammenfassung und Übungsaufgaben 380  
 Weiterführende Literatur 381

**18 Die Sprossachse 383**  
 18.1 Die äußere Gliederung der Sprossachse 383  
 18.2 Die Verzweigung der Sprossachse 384  
 18.3 Der Vegetationskegel 385  
 18.3.1 Grundlage des Spitzenwachstums 385

18.3.2 Regulation der Stammzellenpopulation 390  
 18.3.3 Determination, Differenzierung und Streckung der vom SAM abgegebenen Zellen 391  
 18.4 Der Bau der primären Sprossachse 393  
 18.4.1 Gewebe der primären Sprossachse 393  
 18.4.2 Leitbündel 395  
 18.5 Das sekundäre Dickenwachstum 402  
 18.5.1 Kambium 402  
 18.5.2 Holz 404  
 18.5.3 Sekundäre Rinde (Bast) 407  
 18.5.4 Sekundäres Abschlussgewebe 407  
 18.5.5 Sekundäres Dickenwachstum der Monokotyledonen 409  
 18.6 Die Metamorphosen der Sprossachse 409  
 18.7 Die physiologischen Leistungen der Sprossachse 411  
 18.7.1 Wassertransport im Xylem 411  
 18.7.2 Ferntransport der Assimilate im Phloem 416  
 Zusammenfassung und Übungsaufgaben 419  
 Weiterführende Literatur 421

**19 Das Blatt 423**  
 19.1 Die Blatttypen: Ein Überblick 423  
 19.2 Die Entwicklung der Blätter 423  
 19.3 Die Keimblätter und die Niederblätter 425  
 19.4 Die Laubblätter 426  
 19.4.1 Äußere Gestalt 426  
 19.4.2 Phyllotaxis: Stellung und Ausrichtung der Blätter 428  
 19.4.3 Innerer Aufbau der Blattspreite 431  
 19.5 Die Hochblätter 440  
 19.6 Die Metamorphosen des Blattes 440  
 19.7 Die Funktionsweise der Blätter 442  
 19.7.1 Gasaustausch 442  
 19.7.2 Photosynthese 446  
 19.7.3 Xeromorphie der Blätter, ein Ausweg aus dem Gaswechselfeldilemma der Landpflanzen 453  
 19.7.4 Hygrophyten und Hydrophyten 453  
 Zusammenfassung und Übungsaufgaben 457  
 Weiterführende Literatur 459

## X Inhaltsverzeichnis

### Pflanzen in ihren Lebensräumen

- 20 Die Vegetation der Erde 463**
- 20.1 Die lokale Gliederung der Vegetation: Die Pflanzengesellschaften 463
- 20.2 Die großräumige Gliederung der Vegetation: Die Biome 466
- 20.3 Die Biome verschiedener geographischer Breiten 467
- 20.4 Die Zonierung der Vegetation durch die Höhenlage 475
- Zusammenfassung und Übungsaufgaben 478
- Weiterführende Literatur 478
  
- 21 Abiotische Umweltfaktoren 479**
- 21.1 Netzwerk von fünf besonders wichtigen abiotischen Umweltfaktoren 479
- 21.2 Ökosysteme und ihre Stoffkreisläufe unter dem Einfluss der abiotischen Umweltfaktoren 480
- 21.3 Umweltfaktoren als Stressoren: das biologische Stresskonzept 481
- 21.4 Der Faktor Licht 483
- 21.4.1 Photomorphosen: Phytochrom, Cryptochrom und Phototropin 484
- 21.4.2 Photoperiodismus 486
- 21.5 Der Faktor Wasser 489
- 21.6 Der Faktor Mineralstoffe 490
- 21.7 Der Faktor Kohlendioxid 490
- 21.7.1 CO<sub>2</sub>-Konzentrierungsmechanismen 490
- 21.7.2 C<sub>4</sub>-Photosynthese und CAM als CO<sub>2</sub>-Konzentrierungsmechanismen 491
- 21.7.3 Der biochemische Reaktionsweg der C<sub>4</sub>-Photosynthese 493
- 21.7.4 Der biochemische Reaktionsweg des CAM 495
- 21.7.5 Ökophysiologische Anpassungen durch C<sub>4</sub>-Photosynthese und CAM in Bezug auf die Faktoren Kohlendioxid, Wasser und Strahlung 497
- 21.8 Der Faktor Temperatur 503
- 21.9 Faktorenvernetzung: Das molekular-genetische Regulationsnetz bei der Verarbeitung von Temperatur- und Lichtsignalen zur Blühinduktion 506
- Zusammenfassung und Übungsaufgaben 508
- Weiterführende Literatur 511

- 22 Biotische Umweltfaktoren: Symbiose und Parasitismus 513**
- 22.1 Definitionen und allgemeine Gesichtspunkte 513
- 22.2 Symbiosen 514
- 22.2.1 N<sub>2</sub>-fixierende Symbiosen 514
- 22.2.2 Symbiosen zwischen Pflanzen und Pilzen 517
- 22.3 Parasitismus bei Angiospermen 526
- 22.3.1 Halbschmarotzer (Hemiparasiten) 527
- 22.3.2 Vollschmarotzer (Holoparasiten) 528
- Zusammenfassung und Übungsaufgaben 530
- Weiterführende Literatur 531

### Regulation der pflanzlichen Entwicklung

- 23 Molekulare Netzwerke der pflanzlichen Entwicklungsbiologie: Wachstum, Differenzierung, Altern und Tod 535**
- 23.1 Einzeller, annuelle und perennierende Pflanzen 535
- 23.2 Symmetriebrechung und Polaritätsinduktion 537
- 23.3 Differenzierung, Korrelationen und Musterbildung 540
- 23.4 Von der Samenkeimung bis zur Samenbildung 542
- 23.4.1 Samenkeimung 542
- 23.4.2 Fruchtwachstum und Samenbildung 543
- 23.5 Programmierter Zelltod (Apoptose) 543
- 23.6 Abscission 544
- 23.7 Altern und Tod der ganzen Pflanze 545
- 23.8 Primäre und sekundäre molekulare Botschafter und Signalnetze 546
- 23.8.1 Die Phytohormone: Primäre molekulare Botschafter 546
- 23.8.2 Die chemische Charakterisierung der Phytohormone 547
- 23.8.3 Die Wirkungen der Phytohormone 549
- 23.8.4 Der Nachweis von Phytohormonen: Biologische Tests 553
- 23.8.5 Die Wirkungsweise der Phytohormone 554
- 23.9 Sekundäre molekulare Botschafter 557
- 23.10 Die Ausbreitung molekularer Signale und Musterbildung 560
- Zusammenfassung und Übungsaufgaben 562
- Weiterführende Literatur 564

<b>24</b>	<b>Physikalische Signale</b>	565
24.1	Aktionspotenziale	565
24.2	Erregungsleitung	566
24.3	Reaktionen	569
24.4	Formative Wirkungen	570
	Zusammenfassung und Übungsaufgaben	572
	Weiterführende Literatur	572

<b>25</b>	<b>Die Ausnutzung des Lebensraums: Bewegungen</b>	573
25.1	Phänomene	573
25.1.1	Äußerer Bewegungsverlauf	573
25.1.2	Reaktionsarten	575
25.1.3	Reizarten	576
25.1.4	Bewegungsmechanismen	576
25.2	Die Orientierung im Raum	578
25.2.1	Gravitropismus	578
25.2.2	Phototropismus	584
	Zusammenfassung und Übungsaufgaben	588
	Weiterführende Literatur	589

<b>26</b>	<b>Chronobiologie</b>	591
26.1	Grundbegriffe und Konventionen	591
26.2	Die Phänomene	592
26.3	Die circadianen Rhythmen	593
26.4	Die Regulationsnetzwerke circadianer Rhythmik	594
26.4.1	Eingangs-, Oszillator- und Ausgangsnetzwerke	594
26.4.2	Molekulare Grundlagen	594
26.4.3	Eine einzige zentrale Uhr oder viele selbstständige Oszillatoren?	597
	Zusammenfassung und Übungsaufgaben	599
	Weiterführende Literatur	600

## **Pflanzen und aktuelle Herausforderungen**

<b>27</b>	<b>Biotechnologie</b>	603
27.1	Sammler und Ackerbauer	603
27.2	Konventionelle Biotechnologie unabhängig von der molekularbiologischen Revolution	604
27.3	Molekulare Biotechnologie	607
27.3.1	Isolierung und Klonierung von Genen	607
27.3.2	Transformation: Neue Eigenschaften in Empfängerpflanzen	609
27.3.3	Unterdrückung vorhandener Eigenschaften: Die Antisense und die RNA-Interferenz-Technik	612
27.3.4	Selektion, Regeneration und Austesten transgener Pflanzen	613
27.3.5	Neue Produkte der molekularbiologischen Revolution	615
27.4	Nutzen und Risiken, Segen und Fluch: die Ambivalenz unseres Tuns	616
	Zusammenfassung und Übungsaufgaben	618
	Weiterführende Literatur	620

<b>28</b>	<b>Pflanzen als Ideengeber für Problemlösungen in der Technik: Bionik</b>	621
28.1	Was ist Bionik?	621
28.2	Merkmale der Bionik	621
28.3	Vorgehensweisen der Bionik	622
28.3.1	Abstraktions-Bionik	623
28.3.2	Analogie-Bionik	629
28.4	Die Evolution als Vorbild für Optimierungsverfahren	637
28.5	Grenzen der Bionik	638
	Zusammenfassung und Übungsaufgaben	638
	Weiterführende Literatur	639

<b>Sachverzeichnis</b>	641
------------------------	-----