

Inhaltsverzeichnis

Vorwort V

1 Theoretische Grundlagen und Zielsetzung der Physiologie 1

- 1.1 Das Selbstverständnis der Physiologie 1
- 1.2 Gesetzesaussagen in der Biologie 2
- 1.3 Systemtheorie 3
- 1.4 Prinzipien wissenschaftlichen Arbeitens 4
- 1.5 Das Kausalitätsprinzip in der Physiologie 5
- 1.6 Das Problem der Komplexität 8
- 1.7 Formulierung von Sätzen 12
- 1.8 Merkmale und Variabilität 12
- 1.9 Maßsystem und Bezugsgrößen 14
- 1.10 Darstellung von Daten 15

2 Die Zelle als morphologisches System 17

- 2.1 Die meristematische Pflanzenzelle 17
 - 2.1.1 Strukturelle Gliederung 17
 - 2.1.2 Endoplasmatisches Reticulum 20
 - 2.1.3 Zellkern (Nucleus) 20
 - 2.1.4 Golgi-Apparat 21
 - 2.1.5 Peroxisomen 21
 - 2.1.6 Mitochondrien und Plastiden 22
 - 2.1.7 Cytoskelett 22
 - 2.1.8 Zellwand 23
- 2.2 Zellteilung 30
 - 2.2.1 Cytokinese und Karyokinese 30
 - 2.2.2 Regulation des Zellcyclus 32
 - 2.2.3 Determination der Teilungsebene 33
- 2.3 Zelldifferenzierung 34
- 2.4 Zell- und Organpolarität 39
- 2.5 Die Evolution der Pflanzenzelle 42
- 2.6 Vom einzelligen zum vielzelligen Organismus 44

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3 | Die Zelle als energetisches System | 47 |
| 3.1 | Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik | 47 |
| 3.2 | Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik | 48 |
| 3.3 | Die Zelle als offenes System, Fließgleichgewicht | 49 |
| 3.4 | Chemisches Potenzial | 50 |
| 3.5 | Chemisches Potenzial von Wasser | 51 |
| 3.6 | Anwendung des Wasserpotenzialkonzepts auf den Wasserzustand der Zelle | 53 |
| 3.6.1 | Die Zelle als osmotisches System | 53 |
| 3.6.2 | Das Osmometermodell | 54 |
| 3.6.3 | Die Zelle als Osmometeranalogon | 55 |
| 3.6.4 | Das Matrixpotenzial | 56 |
| 3.6.5 | Nomenklatorische Schwierigkeiten | 56 |
| 3.6.6 | Das osmotische Zustandsdiagramm der Zelle (Höfler-Diagramm) | 57 |
| 3.6.7 | Die experimentelle Messung von π und ψ | 58 |
| 3.6.8 | Regulation des Wasserzustandes | 60 |
| 3.7 | Chemisches Potenzial von Ionen | 61 |
| 3.8 | Membranpotenzial | 62 |
| 3.9 | Energetik biochemischer Reaktionen | 64 |
| 3.10 | Phosphatübertragung und Phosphorylierungspotenzial | 66 |
| 3.11 | Redoxsysteme und Redoxpotenzial | 67 |
| 4 | Die Zelle als metabolisches System | 71 |
| 4.1 | Biologische Katalyse | 71 |
| 4.1.1 | Aktivierungsenergie | 71 |
| 4.1.2 | Enzymatische Katalyse | 72 |
| 4.1.3 | Enzymkinetik | 73 |
| 4.1.4 | Messung der Enzymaktivität | 74 |
| 4.1.5 | Modulation der Enzymaktivität | 75 |
| 4.2 | Metabolische Kompartimentierung der Zelle | 76 |
| 4.3 | Transportmechanismen an Biomembranen | 77 |
| 4.3.1 | Diffusion und Permeation | 77 |
| 4.3.2 | Spezifität des Membrantransports, Transportkatalyse | 79 |
| 4.3.3 | Transporter, Ionenpumpen und Ionenkanäle | 80 |
| 4.3.4 | Aquaporine | 82 |
| 4.3.5 | Passiver und aktiver Transport | 82 |
| 4.3.6 | Shuttle-Transport | 83 |
| 4.4 | ATP-Synthese an energietransformierenden Biomembranen | 84 |
| 4.5 | Stoffaufnahme in die Zelle | 85 |
| 4.5.1 | Ionenaufnahme | 85 |
| 4.5.2 | Aufnahme von Anelektrolyten | 88 |
| 4.5.3 | Akkumulation von Metaboliten und anorganischen Ionen in der Vacuole | 89 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.6 | Prinzipien der metabolischen Regulation | 91 |
| 4.6.1 | Ebenen der Regulation | 91 |
| 4.6.2 | Regulation des Enzymgehalts | 92 |
| 4.6.3 | Regulation des Aktivitätszustands bei konstantem Enzymgehalt | 94 |
| 4.6.4 | Intrazelluläre und interzelluläre Signaltransduktion | 94 |
| 4.6.5 | Die Integration der Regulationsmechanismen zum Kontrollsystem | 96 |
| 5 | Die Zelle als wachstumsfähiges System | 101 |
| 5.1 | Biophysikalische Grundlagen des Zellwachstums | 101 |
| 5.1.1 | Hydraulisches Zellwachstum | 101 |
| 5.1.2 | Messung der physikalischen Wachstumsparameter | 104 |
| 5.2 | Wachstum und Zellwandveränderungen | 105 |
| 5.2.1 | Die strukturelle Dynamik der Primärwand | 105 |
| 5.2.2 | Diffuses Wachstum der Zellwand | 106 |
| 5.2.3 | Lokales Wachstum der Zellwand | 109 |
| 5.3 | Integration des Zellwachstums in vielzelligen Systemen | 112 |
| 5.3.1 | Die Epidermiswand als zellübergreifende Organwand | 112 |
| 5.3.2 | Streckungs- und Kontraktionswachstum bei Wurzeln | 114 |
| 5.4 | Zur Beziehung zwischen Zellwachstum und Zellteilung | 116 |
| 5.5 | Regulation des Streckungswachstums | 116 |
| 6 | Die Zelle als gengesteuertes System | 119 |
| 6.1 | Das Gen – die Einheit der genetischen Information | 119 |
| 6.2 | Die Organisation des Genoms | 122 |
| 6.2.1 | Die drei Genome der Pflanzenzelle | 122 |
| 6.2.2 | Genomstruktur im Zellkern | 123 |
| 6.2.3 | Das plastidäre Genom | 126 |
| 6.2.4 | Das mitochondriale Genom | 129 |
| 6.3 | Die Transkriptionspromotoren, RNA-Polymerasen und RNA-Reifung | 131 |
| 6.3.1 | Transkription nucleärer Gene | 131 |
| 6.3.2 | Transkription plastidärer Gene | 132 |
| 6.3.3 | Transkription mitochondrialer Gene | 137 |
| 6.3.4 | RNA- <i>editing</i> | 137 |
| 6.4 | Proteinsynthese (Translation) und Protein- <i>turnover</i> | 137 |
| 6.4.1 | Translation und Protein- <i>turnover</i> im Cytoplasma | 137 |
| 6.4.2 | Translation und Protein- <i>turnover</i> in Plastiden | 138 |
| 6.4.3 | Translation und Protein- <i>turnover</i> in Mitochondrien | 140 |
| 6.5 | Die Zelle als regulatorisches Netzwerk der Genexpression | 140 |
| 6.5.1 | Regulation nucleärer Gene | 140 |
| 6.5.2 | Regulation plastidärer Gene | 144 |
| 6.5.3 | Regulation mitochondrialer Gene | 146 |
| 6.5.4 | Evolutionäre Adaption von Regulationsstrukturen | 146 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 7 | Intrazelluläre Proteinverteilung und Entwicklung der Organellen | 149 |
| 7.1 | Proteinsortierung in der Pflanzenzelle | 149 |
| 7.1.1 | Prinzipien der Proteinsortierung | 149 |
| 7.1.2 | Proteinexport aus der Zelle und Import in die Vacuole | 151 |
| 7.1.3 | Proteintransport in die Mitochondrien | 152 |
| 7.1.4 | Proteintransport in die Plastiden | 155 |
| 7.1.5 | <i>Isosorting</i> – das gleiche Protein für Cytoplasma, Mitochondrien und Plastiden | 156 |
| 7.1.6 | Evolution der Proteintransportsysteme in Mitochondrien und Plastiden | 156 |
| 7.1.7 | Proteintransport in die Peroxisomen | 156 |
| 7.1.8 | Proteintransport in den Zellkern | 157 |
| 7.2 | Entwicklung der Mitochondrien | 158 |
| 7.3 | Entwicklung der Plastiden | 160 |
| 7.4 | Entwicklung der Peroxisomen | 163 |
| 8 | Photosynthese als Funktion des Chloroplasten | 167 |
| 8.1 | Photosynthese als Energiewandlung | 167 |
| 8.2 | Energiewandlung im Chloroplasten | 171 |
| 8.2.1 | Struktur der Chloroplasten | 171 |
| 8.2.2 | Struktur der Thylakoide | 172 |
| 8.2.3 | Photosynthesepigmente | 175 |
| 8.2.4 | Quantenmechanische Grundlagen der Lichtabsorption | 176 |
| 8.2.5 | Funktion der Pigmente | 178 |
| 8.2.6 | Energietransfer in den Pigmentkollektiven | 180 |
| 8.2.7 | Bildung von chemischem Potenzial | 181 |
| 8.2.8 | Funktionelle Verknüpfung der beiden Photosysteme | 183 |
| 8.3 | Die Pigmentsysteme der Rotalgen und Cyanobakterien | 186 |
| 8.4 | Photosynthetischer Elektronentransport | 189 |
| 8.4.1 | Offenkettiges System | 189 |
| 8.4.2 | Cyclisches System | 193 |
| 8.5 | Mechanismus der Photophosphorylierung | 194 |
| 8.6 | Der biochemische Bereich | 195 |
| 8.6.1 | Stoffwechselleistungen der Chloroplasten | 195 |
| 8.6.2 | Fixierung und Reduktion von CO ₂ | 196 |
| 8.6.3 | Reduktion und Fixierung von Nitrat und Sulfat | 200 |
| 8.6.4 | Photosynthetische H ₂ -Produktion | 202 |
| 8.6.5 | Photosynthetische N ₂ -Fixierung | 202 |
| 8.7 | Regulation der photosynthetischen Teilprozesse | 203 |
| 8.7.1 | Regulation der Energieverteilung zwischen PSI und PSII | 203 |
| 8.7.2 | Regulation der ATP-Synthase-Aktivität | 204 |
| 8.7.3 | Regulation der CO ₂ -Assimilation im Calvin-Cyclus | 207 |
| 8.7.4 | Koordination von C- und N-Assimilation | 209 |
| 8.7.5 | Fluoreszenzlöschung als Indikatorreaktion für die Effektivität der Photosynthese | 210 |
| 8.8 | Ein kurzer Blick auf die anoxygene Photosynthese der phototrophen Bakterien | 211 |

- 9 Dissimilation 215**
 - 9.1 Energiegewinnung bei der Dissimilation 215
 - 9.2 Dissimilation der Kohlenhydrate 216
 - 9.2.1 Freisetzung chemischer Energie 216
 - 9.2.2 Glycolyse 217
 - 9.2.3 Fermentation (alkoholische Gärung und Milchsäuregärung) 217
 - 9.2.4 Citratcyclus und Atmungskette 219
 - 9.2.5 Cyanidresistente Atmung 223
 - 9.2.6 Oxidative Phosphorylierung 224
 - 9.2.7 Elektronentransport an der Plasmamembran 226
 - 9.2.8 Oxidativer (dissimilatorischer) Pentosephosphatcyclus 226
 - 9.3 Photorespiration 227
 - 9.3.1 Lichtatmung und Dunkelatmung 227
 - 9.3.2 Photosynthese von Glycolat 228
 - 9.3.3 Metabolisierung des photosynthetischen Glycolats im C_2 -Cyclus 228
 - 9.3.4 Glycolatstoffwechsel bei Grünalgen und Cyanobakterien 231
 - 9.4 Mobilisierung von Speicherstoffen in Speichergeweben 232
 - 9.4.1 Natur und Lokalisierung der Speicherstoffe 232
 - 9.4.2 Umwandlung von Fett in Kohlenhydrat 232
 - 9.4.3 Metabolismus von Speicherpolysacchariden 237
 - 9.4.4 Metabolismus von Speicherproteinen 239
 - 9.5 Regulation des dissimilatorischen Gaswechsels 241
 - 9.5.1 Atmung: CO_2 -Abgabe und O_2 -Aufnahme 241
 - 9.5.2 Der Respiratorische Quotient 242
 - 9.5.3 Regulation des Kohlenhydratabbaus durch Sauerstoff 243
 - 9.5.4 Induktion der Fermentation durch Enzymsynthese und Modulation der Enzymaktivität 246
 - 9.5.5 Wärmeerzeugung durch Atmung (Thermogenese) 248
 - 9.5.6 Klimakterische Atmung 249
 - 9.5.7 Weitere Oxidasen pflanzlicher Zellen 250
 - 9.6 Regulatorische Wechselbeziehungen zwischen Aufbau und Abbau von Kohlenhydraten 251
- 10 Das Blatt als photosynthetisches System 255**
 - 10.1 Wirkungsspektrum und Quantenausbeute 255
 - 10.2 Brutto- und Nettophotosynthese 257
 - 10.2.1 Messung der Photosyntheseintensität 257
 - 10.2.2 Der CO_2 -Kompensationspunkt Γ 257
 - 10.2.3 Der Lichtkompensationspunkt (LK) 258
 - 10.2.4 Reelle und apparente Photosynthese 259
 - 10.2.5 Licht- und Dunkelatmung 260
 - 10.3 Begrenzende Faktoren der apparenten Photosynthese 261
 - 10.3.1 Die Photosynthese als Multifaktorensystem 261
 - 10.3.2 Die Verrechnung der Faktoren Lichtfluss und CO_2 -Konzentration 261
 - 10.3.3 Quantitative Analyse von Lichtfluss-Effekt-Kurven 263
 - 10.4 Ökologische Anpassung der Photosynthese 264
 - 10.5 Temperaturabhängigkeit der apparenten Photosynthese 267

- 10.6 Der Einfluss von Sauerstoff auf die apparente Photosynthese 269
- 10.7 Die Regulation des CO₂-Austausches durch die Stomata 270
 - 10.7.1 Physiologische Grundlagen 270
 - 10.7.2 Lichtabhängige Steuerung der Stomaweite 272
 - 10.7.3 Der H₂O-abhängige Regelkreis 273
 - 10.7.4 Hydraulik der Stomabewegung 274
- 11 C₄-Pflanzen, C₃-C₄-Pflanzen und CAM-Pflanzen 279
 - 11.1 Systematische Verbreitung der C₄-, C₃-C₄- und CAM-Pflanzen 279
 - 11.2 Das C₄-Syndrom 280
 - 11.3 Der C₄-Dicarboxylatcyclus 283
 - 11.4 Ökologische Aspekte des C₄-Syndroms 286
 - 11.5 Genphysiologische Aspekte des C₄-Syndroms 289
 - 11.6 C₃-C₄-Pflanzen, eine Vorstufe der C₄-Pflanzen? 289
 - 11.7 CAM, eine Alternative zur C₄-Photosynthese 291
 - 11.8 Isotopendiskriminierung bei der CO₂-Fixierung 294
- 12 Stoffwechsel von Wasser und anorganischen Ionen 297
 - 12.1 Wasser 297
 - 12.2 Mineralernährung der Pflanze 299
 - 12.3 Essenzielle Mikroelemente 301
 - 12.4 Funktion der Nährelemente im Stoffwechsel 302
 - 12.4.1 Makroelemente 302
 - 12.4.2 Mikroelemente 304
 - 12.5 Interaktionen zwischen Wurzel und Boden bei der Nährstoffaneignung 305
 - 12.6 Salzexkretion bei Halophyten 306
 - 12.7 Sequestrierung von Schwermetallen durch Phytochelatine 308
- 13 Ferntransport von Wasser und anorganischen Ionen 311
 - 13.1 Grundlegende Überlegungen 311
 - 13.2 Der Transportweg aus dem perirhizalen Raum in die Gefäße der Wurzel 313
 - 13.3 Der Transportweg im Xylem 316
 - 13.4 Die Abgabe von Wasser an die Atmosphäre 318
 - 13.5 Die treibende Kraft des Wassertransports im Xylem 320
 - 13.6 Wasserbilanz 324
 - 13.7 Analogiemodell für den Wassertransport in einer Pflanze 326
 - 13.8 Der Transport organischer Moleküle im Xylem 328

- 14 Ferntransport von organischen Molekülen 333**
 - 14.1 Grundlegende Überlegungen 333
 - 14.2 Die Leitbahnen 334
 - 14.3 Die Transportmoleküle 337
 - 14.4 Mechanismen des Phloemtransports 338
 - 14.4.1 Beladung der Siebröhren 338
 - 14.4.2 Entladung der Siebröhren 342
 - 14.4.3 Die Druckstromtheorie 343
 - 14.4.4 Die Volumenstromtheorie 344
 - 14.5 Regulation der Assimilatverteilung in der Pflanze 344
- 15 Ökologische Kreisläufe der Stoffe und der Strom der Energie 347**
 - 15.1 Die Kreisläufe von Kohlenstoff und Sauerstoff 347
 - 15.2 Der Kreislauf des Stickstoffs 350
 - 15.3 Der Strom der Energie 352
- 16 Produkte und Wege des biosynthetischen Stoffwechsels – eine kleine Auswahl 355**
 - 16.1 Primärer und sekundärer Stoffwechsel 355
 - 16.2 Biosynthese von Fettsäuren und Speicherlipiden 357
 - 16.3 Biosynthese der aromatischen Aminosäuren 359
 - 16.4 Biosynthese der Flavonoide 361
 - 16.5 Biosynthese des Lignins 363
 - 16.6 Biosynthese des Chlorophylls 366
 - 16.7 Biosynthese der Carotinoide 368
- 17 Entwicklung der vielzelligen Pflanze 373**
 - 17.1 Grundlegende Gesichtspunkte 373
 - 17.1.1 Entwicklung als ontogenetischer Kreislauf 373
 - 17.1.2 Das genetisch festgelegte Entwicklungsprogramm und der Einfluss der Umwelt 375
 - 17.1.3 Entwicklung und Chromosomensatz 376
 - 17.1.4 Generationswechsel 377
 - 17.1.5 Alternative Entwicklungsstrategien des Gametophyten 379
 - 17.2 Wachstum 379
 - 17.2.1 Definition von Wachstum 379
 - 17.2.2 Messung des Wachstums 380
 - 17.2.3 Allometrisches Wachstum 381
 - 17.3 Morphogenese als Musterbildung und Differenzierung 384
 - 17.3.1 Musterbildung im Embryo 384
 - 17.3.2 Steuerung von Musterbildung und Differenzierung im Embryo 387
 - 17.3.3 Anlage der beiden primären Meristeme 388
 - 17.3.4 Wachstum und Histodifferenzierung der Wurzel 390
 - 17.3.5 Histodifferenzierung und Organogenese im Sprossmeristem 391

| | | |
|-----------|---|------------|
| 17.3.6 | Molekulargenetische Analyse der Meristemfunktionen | 393 |
| 17.3.7 | Blattinduktion und Phyllotaxis | 395 |
| 17.3.8 | Oben-unten-Polarität des Blattes | 397 |
| 17.3.9 | Blattentwicklung | 397 |
| 17.3.10 | Konstruktion der Sprossachse | 401 |
| 17.3.11 | Die Bedeutung der Reaktionsnorm | 402 |
| 17.3.12 | Korrelationen | 403 |
| 17.3.13 | Umdifferenzierungen | 403 |
| 18 | Chemoregulation im Organismus – Hormone und Hormonwirkungen | 407 |
| 18.1 | Definition und Eigenschaften der Hormone bei Pflanzen | 407 |
| 18.2 | Überblick über die Struktur und Funktion der Phytohormone | 412 |
| 18.2.1 | Auxin | 412 |
| 18.2.2 | Gibberelline | 418 |
| 18.2.3 | Cytokinine | 422 |
| 18.2.4 | Abscisinsäure | 426 |
| 18.2.5 | Ethylen | 428 |
| 18.2.6 | Brassinosteroide | 432 |
| 18.2.7 | Salicylsäure | 435 |
| 18.2.8 | Jasmonsäure | 435 |
| 18.2.9 | Systemin | 436 |
| 18.2.10 | Strigolactone | 436 |
| 18.3 | Molekulare Mechanismen der hormonellen Signaltransduktion | 437 |
| 18.3.1 | Auxin aktiviert responsive Gene durch den Abbau von Repressorproteinen | 437 |
| 18.3.2 | Negative Regulatoren sind zentrale Elemente in der Signaltransduktionskette der Gibberelline | 438 |
| 18.3.3 | Der Cytokininreceptor CRE1 ist eine Zweikomponenten-Histidinkinase, die eine Phosphorelaskaskade von Signalen in den Zellkern auslöst | 440 |
| 18.3.4 | Der Ethylenreceptor ETR1 ist eine Zweikomponenten-Histidinkinase, die nicht als Histidinkinase wirksam wird | 440 |
| 19 | Die Wahrnehmung des Lichtes – Photosensoren und Photomorphogenese | 445 |
| 19.1 | Was ist Licht für die Pflanze? | 445 |
| 19.2 | Farbstoffe und Photosensoren | 446 |
| 19.3 | Wirkungsspektren | 446 |
| 19.4 | Wirkungen von UV-B-Strahlung | 448 |
| 19.5 | Photosensoren für den UV-Blau-Bereich | 449 |
| 19.5.1 | Cryptochrom | 449 |
| 19.5.2 | Phototropine | 450 |
| 19.6 | Photosensoren für den Rotlichtbereich | 452 |
| 19.6.1 | Licht als Signalgeber der Entwicklung | 452 |
| 19.6.2 | Photobiologische Eigenschaften der Phytochrome | 454 |
| 19.6.3 | Phytochrom A und Phytochrom B | 457 |
| 19.6.4 | Molekulare Eigenschaften des Phytochroms | 459 |
| 19.6.5 | Signaltransduktion zwischen Phytochrom und Genexpression | 460 |
| 19.6.6 | Phytochromregulierte Enzyme | 462 |
| 19.6.7 | Phytochromregulierte Plastidendifferenzierung | 464 |
| 19.6.8 | Phytochromregulierte Reaktionen von Zellen, Geweben und Organen | 467 |
| 19.6.9 | Phytochromregulierte Reaktionen älterer, grüner Pflanzen | 467 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 19.7 | Koaktion verschiedener Photosensoren | 468 |
| 20 | Reifung und Keimung von Fortpflanzungs- und Verbreitungseinheiten | 471 |
| 20.1 | Aufbau des Samens | 471 |
| 20.2 | Entwicklung zum reifen Samen | 472 |
| 20.2.1 | Histodifferenzierung | 472 |
| 20.2.2 | Samenreifung | 472 |
| 20.2.3 | Steuerung der Samenreifung | 475 |
| 20.3 | Keimung des gereiften Samens | 476 |
| 20.3.1 | Physiologische Analyse der Keimung | 476 |
| 20.3.2 | Biochemische Analyse der Keimung | 480 |
| 20.3.3 | Physikalische Analyse der Keimung | 481 |
| 20.4 | Regulation der Genexpression während der Embryonalentwicklung | 484 |
| 20.5 | Steuerung der Fruchtentwicklung durch den Samen | 484 |
| 20.6 | Knospenruhe und Knospenkeimung | 485 |
| 20.7 | Austrocknungstoleranz im vegetativen Stadium: Auferstehungspflanzen | 487 |
| 21 | Endogene Rhythmik | 489 |
| 21.1 | Der ursprüngliche Befund: Tagesperiodische Blattbewegungen | 489 |
| 21.2 | Weitere ausgewählte Phänomene der circadianen Rhythmik | 490 |
| 21.2.1 | Tagesperiodische Bewegung von Blütenblättern | 490 |
| 21.2.2 | Tagesperiodischer Sporangienabschuss bei <i>Pilobolus</i> | 490 |
| 21.2.3 | Circadiane Rhythmik in Gewebekulturen | 491 |
| 21.2.4 | Endogene Rhythmik und Biolumineszenz | 491 |
| 21.3 | Einige Experimente zur Analyse der endogenen Rhythmik | 493 |
| 21.3.1 | Auslösung der Rhythmik | 493 |
| 21.3.2 | Anpassungen der Rhythmik an Programmänderungen | 493 |
| 21.3.3 | Endogene Rhythmik und Zellatmung | 494 |
| 21.3.4 | Endogene Rhythmik und Zellkern | 495 |
| 21.4 | Genetische Analyse des Oscillators bei <i>Arabidopsis</i> | 495 |
| 21.5 | Verschiedene innere Uhren in verschiedenen Organismen | 498 |
| 22 | Blütenbildung und Befruchtung | 501 |
| 22.1 | Autonome Induktion des Blütenmeristems – die oberste Ebene der Blühkontrollgene | 501 |
| 22.2 | Exogene Induktion der Blütenbildung – ebenfalls auf der obersten Ebene der Blühkontrollgene | 503 |
| 22.2.1 | Photoperiode und Kälte als exogene Auslöser | 503 |
| 22.2.2 | Kritische Tageslängen | 504 |
| 22.2.3 | Blätter als Receptororgane des Photoperiodismus | 505 |
| 22.2.4 | Blütenbildung und Gibberelline | 506 |
| 22.2.5 | Molekulare Rezeptoren beim Photoperiodismus | 506 |
| 22.2.6 | Photoperiodismus und circadiane Rhythmik | 507 |
| 22.2.7 | Photoperiodische Phänomene unabhängig von der Blütenbildung | 508 |
| 22.2.8 | Selektionsvorteil des Photoperiodismus | 509 |
| 22.2.9 | Thermoperiodismus | 509 |
| 22.2.10 | Vernalisation | 510 |

- 22.3 Steuerung der Blütensymmetrie, der Blütenzahl und der Abgrenzung der Blütenorgankreise – die 2. Ebene der Blühkontrollgene 511
- 22.4 Die Identität der Blütenorgane – die 3. Ebene der Blühkontrollgene 514
- 22.5 Befruchtung bei den Blütenpflanzen 516
 - 22.5.1 Selbstinkompatibilität 516
- 23 Regulation von Altern und Tod 525**
 - 23.1 Seneszenz von Molekülen 525
 - 23.2 Seneszenz von Zellen 526
 - 23.2.1 Programmierter Zelltod während der Entwicklung der vielzelligen Pflanze 526
 - 23.2.2 Programmierter Zelltod bei der Xylogenese 526
 - 23.2.3 Programmierter Zelltod der Suspensorzellen während der Embryonalentwicklung 527
 - 23.2.4 Programmierter Zelltod zur Bildung von Aerenchym 527
 - 23.3 Seneszenz von Organen 528
 - 23.3.1 Physiologische Steuerung der Organseneszenz 528
 - 23.3.2 Anatomie des Blattfalles 528
 - 23.3.3 Abbau der Plastiden und des Chlorophylls 528
 - 23.3.4 Genaktivierung während der Seneszenz 529
 - 23.3.5 Physiologie der Blattalterung 530
 - 23.3.6 Wirkung von Außenfaktoren 531
 - 23.3.7 Herbstfärbung 532
 - 23.3.8 Alterung der Blütenblätter 532
 - 23.4 Seneszenz von Organismen 533
- 24 Physiologie der Regeneration und Transplantation 535**
 - 24.1 Untersuchungen mit Organkulturen 535
 - 24.2 Gewebekulturen und Zelldifferenzierung 536
 - 24.3 Beweisführung für die Omnipotenz spezialisierter Pflanzenzellen 538
 - 24.3.1 Regenerationsexperimente an Farnprothallien 538
 - 24.3.2 Regenerationsexperimente an Begonienblättern 538
 - 24.3.3 Regeneration *in vitro* aus isolierten Einzelzellen 538
 - 24.3.4 Differenzierung und Regeneration 540
 - 24.3.5 Bildung („Regeneration“) haploider Sporophyten aus Pollenkörnern 540
 - 24.3.6 Regeneration aus Protoplasten und Cybridisierung 542
 - 24.4 Wundheilung 543
 - 24.5 Regeneration ohne Kallusbildung 544
 - 24.5.1 Bildung von Adventivwurzeln 544
 - 24.5.2 Blütenbildung 545
 - 24.6 Transplantation 545
 - 24.6.1 Pfropfen 545
 - 24.6.2 Chimären 546
 - 24.6.3 Intrazelluläre Chimären 546

- 25 Aktive Bewegungen von Zellen, Organen und Organellen 549**
 - 25.1 Freie Ortsbewegungen 549**
 - 25.1.1 Phototaxis freilebender Algen 549
 - 25.1.2 Chemotaxis von Geschlechtszellen 552
 - 25.1.3 Feinstruktur und Funktion von Geißeln 552
 - 25.2 Orientierungsbewegungen von Organen 553**
 - 25.2.1 Grundphänomene 553
 - 25.2.2 Gravitropismus des *Chara*-Rhizoids 553
 - 25.2.3 Gravitropismus bei Keimwurzeln und Sprossorganen 555
 - 25.2.4 Weitere tropische Reaktionen 562
 - 25.2.5 Phototropismus bei höheren Pflanzen 562
 - 25.2.6 Phototropismus des Farnsporenkeimlings 568
 - 25.2.7 Phototropismus der *Phycomyces*-Sporangiophore 570
 - 25.2.8 Osmotische Bewegungen von Zellen und Organen 570
 - 25.2.9 Rankbewegungen 573
 - 25.3 Aktive intrazelluläre Bewegungen 575**
 - 25.3.1 Plasmaströmung 576
 - 25.3.2 Chloroplastenbewegungen 576
- 26 Stress und Stressresistenz 583**
 - 26.1 Grundlegende Begriffe 583**
 - 26.2 Mechanischer Stress 584**
 - 26.3 Trockenstress 586**
 - 26.3.1 Konstitutive Trockenstressresistenz 586
 - 26.3.2 Adaptative Trockenstressresistenz bei Mesophyten 588
 - 26.3.3 Abhärtung gegen Trockenstress 591
 - 26.3.4 Salzstress 592
 - 26.4 Temperaturstress 593**
 - 26.4.1 Resistenz gegen Hitzestress 593
 - 26.4.2 Hitzeschockproteine 595
 - 26.4.3 Resistenz gegen Kältestress 596
 - 26.4.4 Resistenz gegen Froststress 598
 - 26.5 Oxidativer Stress 601**
 - 26.5.1 Warum ist O₂ giftig? 601
 - 26.5.2 Entgiftungsreaktionen für reaktive Sauerstoffformen 603
 - 26.6 Licht- und UV-Stress 606**
 - 26.6.1 Photoinhibition der Photosynthese 606
 - 26.6.2 Resistenz gegen UV-Schäden 607
 - 26.7 Stress durch ionisierende Strahlung 614**
- 27 Interaktionen mit anderen Organismen 617**
 - 27.1 Symbiosen 617**
 - 27.1.1 Pflanzen und Pilze: Mykorrhiza 617
 - 27.1.2 Pflanzen und Bakterien: Biologische N₂-Fixierung in Wurzelknöllchen 621

| | | |
|--------|---|-----|
| 27.2 | Pathogenese | 627 |
| 27.2.1 | Infektionsabwehr durch konstitutive Barrieren und ihre Überwindung | 628 |
| 27.2.2 | Induzierte Abwehr, hypersensitive Reaktion | 629 |
| 27.2.3 | Der <i>oxidative burst</i> : Abwehr und Alarmsignal der Pflanze | 630 |
| 27.2.4 | Schwächung der Wirtspflanze durch Phytotoxine | 631 |
| 27.2.5 | Pflanzliche Antibiotica: Phytoalexine und fungitoxische Proteine | 632 |
| 27.2.6 | Induzierte Resistenz durch Immunisierung | 633 |
| 27.2.7 | Abwehr von Viren/Viroiden: RNAi | 634 |
| 27.3 | Tumorbildung durch <i>Agrobacterium tumefaciens</i> | 635 |
| 27.4 | Interaktionen zwischen Pflanzen und Insekten | 639 |
| 27.4.1 | Symbiosen zwischen Pflanzen und Carnivoren | 639 |
| 27.4.2 | Gallenbildung als pathologische Morphogenese | 640 |
| 27.5 | Interaktionen zwischen Pflanzen und Pflanzen | 641 |
| 28 | Ertragsbildung: Physiologie und Gentechnik | 643 |
| 28.1 | Grundlegende Gesichtspunkte | 643 |
| 28.1.1 | Zur Situation | 643 |
| 28.1.2 | Zur Terminologie | 644 |
| 28.1.3 | Ertrag und Energie | 644 |
| 28.1.4 | Zielsetzung der Ertragsphysiologie | 644 |
| 28.1.5 | Systemsynthese, Produktsynthese | 645 |
| 28.1.6 | Bildung von Speicherstoffen | 646 |
| 28.1.7 | Produktionsfaktoren | 647 |
| 28.2 | Ertragsgesetze | 647 |
| 28.3 | Praktische Optimierung von Produktionsverfahren | 649 |
| 28.3.1 | Versorgung mit Stickstoff | 649 |
| 28.3.2 | Dämpfung von Antagonisten der Ertragsbildung: Herbizide | 652 |
| 28.3.3 | Synthetische Wachstumsretardanzien | 656 |
| 28.4 | Verbesserung des Erbguts | 656 |
| 28.4.1 | Die Tradition | 656 |
| 28.4.2 | Klassische Züchtung | 657 |
| 28.4.3 | Gentechnik und Transformationsmethoden | 660 |
| 28.4.4 | Strategien zur Nutzung der gentechnischen Manipulation | 664 |
| 28.5 | Gentechnische Ansätze in der molekularen Pflanzenphysiologie | 666 |
| 28.5.1 | Grundsätzliche methodische Einschränkungen | 666 |
| 28.5.2 | Hemmung der Pollenreifung für die Hybridzüchtung | 667 |
| 28.5.3 | Manipulationen im Kohlenhydratmetabolismus | 668 |
| 28.5.4 | Manipulationen zur Synthese neuer Produkte | 669 |
| 28.5.5 | Transgene Ansätze zur Virusresistenz | 670 |
| 28.5.6 | Gezielte Beeinflussung von ökonomisch interessanten Merkmalen | 671 |
| 28.5.7 | Gentechnisch veränderte Nahrungsmittel | 673 |
| 28.6 | Ökologische Auswirkungen transgener Veränderungen bei Pflanzen | 674 |
| Anhang | Physikalische Messgrößen, Maßeinheiten, Umrechnungsfaktoren, Konstanten | 677 |
| Index | | 681 |