

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 Zellzyklus 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	<i>Shuttle</i> -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 Kontrollsyste	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	Energi transfer 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	Fluoreszenzlösung 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	Glykolyse	217
9.2.3	Fermentation (alkoholische Gärung und Milchsäuregärung)	217
9.2.4	Citratzyklus 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) Pentosephosphatzzyklus	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 -Zyklus	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 Enzmysynthese 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 apparette Photosynthese	259
10.2.5	Licht- und Dunkelatmung	260
10.3	Begrenzende Faktoren der apparetten 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 apparetten Photosynthese	267

10.6	Der Einfluss von Sauerstoff auf die apparenre Photosynthese	269
10.7	Die Regulation des CO ₂ -Austausches durch die Stomata	270
10.7.1	Physiologische Grundlagen	270
10.7.2	Lichtabhängige Steuerung der Stomaweite	272
10.7.3	Der H ₂ O-abhängige Regelkreis	273
10.7.4	Hydraulik der Stomabewegung	274
11	C ₄ -Pflanzen, C ₃ –C ₄ -Pflanzen und CAM-Pflanzen	279
11.1	Systematische Verbreitung der C ₄ -, C ₃ –C ₄ - und CAM-Pflanzen	279
11.2	Das C ₄ -Syndrom	280
11.3	Der C ₄ -Dicarboxylatzyklus	283
11.4	Ökologische Aspekte des C ₄ -Syndroms	286
11.5	Genphysiologische Aspekte des C ₄ -Syndroms	289
11.6	C ₃ –C ₄ -Pflanzen, eine Vorstufe der C ₄ -Pflanzen?	289
11.7	CAM, eine Alternative zur C ₄ -Photosynthese	291
11.8	Isotopendiskriminierung bei der CO ₂ -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 Nährlemente im Stoffwechsel	302
12.4.1	Makrolemente	302
12.4.2	Mikrolemente	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 Cytokininrezeptor CRE1 ist eine Zweikomponenten-Histidinkinase, die eine Phosphorelaiskaskade von Signalen in den Zellkern auslöst	440
18.3.4	Der Ethylenrezeptor 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 Histon differenzierung	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 Rezeptororgane 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 Blütenymmetrie, 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 <i>in vitro</i> 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 <i>Chara</i> -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 <i>Phycomyces</i> -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 O ₂ 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 N ₂ -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 Phytoxine	631
27.2.5	Pflanzliche Antibiotika: 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