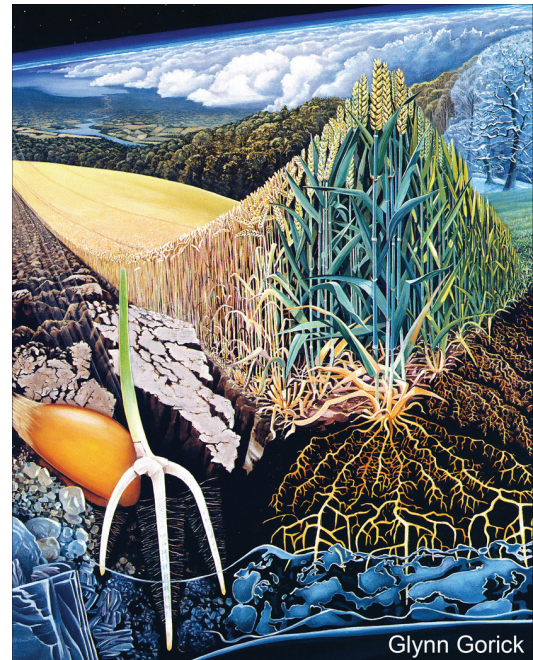


## Presseinformation

### **U. Kutschera** **Physiologie der Pflanzen.** **Sensible Gewächse in Aktion**

Ein wissenschaftliches Lehrbuch  
mit Beiträgen auch  
zum Klimawandel



ISBN 978-3-643-14226-9

Abb. Weizenfeld im Klimawandel  
(Umschlagsgrafik aus Kutschera 2019)

### Neuerscheinung 2019 **Physiologie der Pflanzen. Sensible Gewächse in Aktion** Prof. Dr. Ulrich Kutschera

Pflanzen sind „Lebende Sonnenkraftwerke mit Herz ohne Seele“, die dem Menschen nicht nur Nahrung, Sauerstoff, Baustoffe und Kleidung liefern, sondern auch unser Klima regulieren. Julius Sachs (1832 – 1897) hat vor 150 Jahren die Pflanzenphysiologie begründet. Ausgehend von „Sachs 1868“ werden folgende Inhalte behandelt: Lebenskraft-Glaube vs. Systembiologie; Prinzipien der Forschung/Theorienbildung; Stammzellen/Dynamik der Lebensvorgänge; Wasserpotenzial/Auferstehungspflanzen; Wassertransport/synthetische Bäume; Herz-artige Pumpen/Stofftransport; Lebenselixier ATP/Genome-Epigenetik; Keimlings-Schubkraft/Wachstum; Photosynthese/Klimawandel; Sex/Gender; Hormone/Selbstmord-Keimung; Licht-Konkurrenz/Schattenvermeidung; kommunizierende Pilzwurzel-Gemeinschaften; bakterielle Bio-Dünger; Stickstoff/Welternährung; Programmierter Zelltod; Im-mungedächtnis/Tier-ähnliches Pflanzenverhalten; pendelnde Sonnenblumen. Populäre Themen, wie Pflanzen-Intelligenz, Grüne Revolution, Goldener Reis und die Gentechnik werden kritisch diskutiert.

U. Kutschera

# Physiologie der Pflanzen

Sensible Gewächse in Aktion



Naturwissenschaft und Glaube Bd. 14

---

LIT

Link zum YouTube-Video Physiologie der Pflanzen:  
<https://www.youtube.com/watch?v=vUAM-houLQI>

## **Zum Verständnis der Klimaproblematik ist dieses Lehrbuch unabdingbar!**

Das Thema Klimawandel wird auf vielen Seiten behandelt: Treibhausgase (Wasserdampf, Kohlendioxid, Methan, Ozon) werden vorgestellt, der globale CO<sub>2</sub>-Kreislauf erstmals in einem Lehrbuch in grafischer Form anschaulich präsentiert. Grüne Pflanzen – die Sonnenkraftwerke der Erde – sind als „Treibhausgas-Entsorger“ definiert. Etwa 30 % der anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen (Autoabgase, Kohlekraftwerke usw.) werden derzeit von den Landpflanzen aus der Luft entfernt (Holz-Bildung). Lösungsvorschlag: Weltweites Aufforsten mit Gewächsen, die den Pflanzen-Nährstoff CO<sub>2</sub> optimal verwerten können!

## **Über den Autor**

### **Ulrich Kutschera**



Prof. Dr. Ulrich Kutschera (geb. 1955) ist Inhaber des Lehrstuhls für Pflanzenphysiologie mit Lehrgebiet Evolutionsbiologie an der Universität Kassel (Berufung 1992). Seit 2007 arbeitet er zusätzlich als Visiting Scientist in Stanford/Palo Alto, Kalifornien (USA).

### **Lebenslauf deutsch und englisch:**

[https://de.wikipedia.org/wiki/Ulrich\\_Kutschera](https://de.wikipedia.org/wiki/Ulrich_Kutschera)

[https://en.wikipedia.org/wiki/Ulrich\\_Kutschera](https://en.wikipedia.org/wiki/Ulrich_Kutschera)

## Vorwort

Nach einer anstrengenden Physiologie-Vorlesung stellte mir eine sichtlich genervte Biologie-Studentin die folgende Frage: „Warum behandeln Sie die Photosynthese so ausführlich? Ich möchte Affen-Forscherin werden, mein Studienschwerpunkt ist die Primaten-Ethologie, und ich sehe nicht ein, warum die pflanzliche Biochemie so wichtig für mich sein soll, dass ich all diese abstrakten Details lernen muss.“ Der nachfolgende Dialog ist sinngemäß, als Parodie, wiedergegeben. Ich fragte die Schimpansen-Freundin, was denn ihre Lieblingstiere im Urwald hauptsächlich fressen würden. Sie antwortete: „Bananen, aber auch Früchte, Nüsse, Blätter, Blüten, Samen.“ Meine Gegenfrage lautete: „Kennen Sie die Inhaltsstoffe der Banane?“ Die überraschend korrekte Antwort war: „Stärke und andere Kohlenhydrate.“ Daraufhin erlaubte ich mir die Anschluss-Frage: „Woher stammen denn diese Inhaltsstoffe?“ Die Studentin sagte ganz richtig: „Aus den grünen Laubblättern.“ Meine weiterführende Frage lautete demgemäß: „Über welchen Prozess werden in den belichteten Laubblättern die energiereichen Kohlenhydrate hergestellt?“ Die angehende Primaten-Spezialistin überlegte kurz und antwortete spontan: „Über die Photosynthese!“ Dieser Gedankenaustausch soll zeigen, dass kein Teilgebiet der Biowissenschaften, auch nicht die für Studenten noch immer beliebte „Vergleichende Verhaltensforschung“, ohne eine Kenntnis der Lebensprozesse der Pflanzen sinnvoll betrieben werden kann – nicht einmal die so heiß begehrte, mit der Medizin verwandte Humanbiologie. Die festgewachsenen, grünen Landpflanzen (Embryophyten) sind, gemeinsam mit ihren ebenfalls pigmentierten Verwandten (Cyanobakterien und Algen), die „lebenden Sonnenkraftwerke“ unserer Erde. Ohne diese lichtgetriebenen Produzenten gäbe es weder den lebensnotwendigen Luft-Sauerstoff, noch die Primärnahrung (Kohlenhydrate, Fette, Proteine), von welcher alle heterotrophen Organismen, d. h. die Konsumenten (Tiere, Pilze, Menschen usw.), letztendlich leben. Das vorliegende, neu konzipierte Lehrbuch basiert auf meinem Spektrum-Titel Prinzipien der Pflanzenphysiologie (2. Auflage 2002). Die Urversion des Textes wurde weitgehend umgeschrieben und unserem Kenntnisstand 2018 angepasst. Ich konnte 16 zusätzliche Jahre (d. h. 32 durchlaufende Semester) an Erfahrung in Lehre und Forschung einbringen, darunter, von 2007 bis 2018, 12 Jahre als Visiting Scientist (bzw. V.-Professor mit Lehraufgaben) in den USA. Wie im alten Text dargelegt, war ich von 1985 bis 1988 als Post-Doktorand bzw. Research Associate an der kalifornischen Stanford University sowie an der Michigan State University (USA) tätig. Einige der dort entstandenen Forschungsarbeiten sind in die 2002er Auflage aufgenommen worden. Die seit 2007 regelmäßig durchgeführten Gastaufenthalte im „Department of Plant Biology“ (Carnegie Institution for Science), einer finanziell unabhängigen Forschungseinrichtung der Stanford University, habe ich zum einen dazu benutzt, auf verschiedenen Gebieten der Grundlagenforschung im Labor tätig zu sein (Wachstums- und Hormonphysiologie, quantitative Proteomanalytik, Photosynthese-Experimente). Zusätzlich war bei jedem Aufenthalt genügend Zeit, zoologische Freilandstudien zur Hirudineen-Fauna der Bay Area (Bucht von San Francisco) durchzuführen (Kooperationsprojekt mit Kollegen von der UC Berkeley), und um Fachvorträge weltweit führender Biologen zu besuchen. So fand z. B. kürzlich ein Stanford-Seminar mit dem Titel „The new Biology: Plant Science“ statt. Ein Spitzenforscher legte dar, dass die Pflanzenphysiologie wegen der wachsenden Weltbevölkerung, die ernährt werden muss, zur Leitdisziplin der „neuen Biologie“ erklärt werden sollte. Derartige Anregungen, die ich durch das Studium einschlägiger Fachliteratur vertieft habe, bilden die Eckpfeiler des vorliegenden Textes. Das Buch ist dem Leben und Werk von Julius Sachs (1832-1897) verpflichtet, der vor 150 Jahren (1868) mit der Veröffentlichung seines Freiburger Lehrbuchs der Botanik die in den Agrarwissenschaften entstandene Pflanzenphysiologie als universitäre Disziplin in die Botanik integrierte. Als zweite bemerkenswerte Leistung vollzog Sachs in seinem Lehrbuch, nach der Definition des Begriffs „Sexualität“ (Zellen-

Vereinigung), eine Synthese der von Charles Darwin (1809-1882) im Jahr 1859 begründeten Abstammungslehre mit der „grünen Biologie“. Kurz formuliert, Julius Sachs hat damals nicht nur eine „universitäre Pflanzenphysiologie“ ins Leben gerufen, sondern darüber hinaus die nur im Lichte der sexuellen Reproduktion und Evolution zu verstehenden Eigenschaften der sensiblen, grünen Gewächse in Buchform dargestellt. Wir können ihn somit als den Urvater der „evolutionären Experimental-Physiologie der Pflanzen“ bezeichnen. Im Gegensatz zu seinen Vorgängern, die noch an metaphysische „Lebenskräfte“ als Wirkprinzip in den Zellen der Pflanzen glaubten, erklärte Sachs (1868) sämtliche physiologische Vorgänge ausschließlich physikalisch-chemisch – frei von jeglicher Esoterik. Da Sachs einen ganzheitlich (holistischen) Ansatz vertreten hat, gilt er, gemeinsam mit dem französischen Tierphysiologen Claude Bernard (1813-1878), als einer der Urväter der Systembiologie.

Das Buch verfolgt somit das übergeordnete Ziel, ausgehend von „Sachs (1868)“, die moderne Pflanzenphysiologie in ihrer Vielfalt als „Systembiologie photoautotropher Organismen“ zu präsentieren. Die wichtigsten Erkenntnisse dieser Leitdisziplin des 21. Jahrhunderts sollen in ihrer theoretischen wie praktischen Bedeutung einer gebildeten Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden, gemäß dem Grundsatz „biologisches Wissen befreit den Menschen aus dem Würgegriff unvernünftiger Glaubens-Verirrungen“. Mit dieser Physiologie der Pflanzen soll einer um sich greifenden anti-naturwissenschaftlichen Strömung, die exemplarisch in Sachbuch-Titeln zum (vermeintlichen) „Geheimen Leben der Gewächse“ in Erscheinung tritt, entgegengewirkt werden. Seit 1987 erforsche ich u. a. die Physiologie der Trockenboden-resistenten Sonnenblume und der an Überflutungen angepassten Weltwirtschaftspflanze Reis. Auf dieser Grundlage wurden die populären Themen Klimawandel und Grüne Gentechnik vorgestellt und diskutiert.

Das Buch ist dem Andenken an Herrn Professor Hans Mohr (1930-2016) gewidmet. Herr Mohr hat, als einer der Nachfolger auf dem Sachs'schen Lehrstuhl für Botanik der Universität Freiburg, meine berufliche Entwicklung durch vorbildliche akademische Lehre, produktive Forschung und öffentlichkeitswirksames Eintreten für die Biologie als autonome Naturwissenschaft nachhaltig geprägt.

Stanford/Kalifornien, im April 2018  
Ulrich Kutschera

# Inhalt

<b>Vorwort</b>	5
<b>1 Von der Lebenskraft zur Pflanzenphysiologie als Systembiologie photoautotropher Organismen</b>	17
1.1 Die Vorläufer-Periode: Wassertransport und Ernährung der Gewächse . . . . .	19
1.2 Mystische Lebenskräfte und die spekulative Naturphilosophie . . . . .	21
1.3 Begründung der Experimentalphysiologie durch Julius Sachs und Wilhelm Pfeffer . . . . .	23
1.4 Photosynthese, Hydrokultur-Technik und Wachstumsmessungen . . . . .	27
1.5 Sachs-Pfeffer-Prinzip der Experimentalphysiologie . . . . .	31
1.6 Pflanzenphysiologie als Systembiologie photoautotropher Organismen . . . . .	33
1.7 Stellung der Pflanzen im Fünf-Reiche-System der Organismen . . . . .	36
1.8 Die Welt der Bakterien: Gnotobiologie der Pflanzen . . . . .	39
<b>2 Die Pflanzenphysiologie als induktive und angewandte Naturwissenschaft</b>	45
2.1 Beobachtungen und Experimente . . . . .	46
2.2 Das Sachs'sche Prinzip der Faktorenanalyse . . . . .	49
2.3 Intakte Systeme und <i>in vitro</i> -Analyse . . . . .	52
2.4 Hypothesen, Theorien und Modelle . . . . .	52
2.5 Das internationale Einheitensystem in der Pflanzenphysiologie . . . . .	54
2.6 Nutzpflanzen-Forschung und Modellorganismen . . . . .	56
2.7 Modellpflanze <i>Arabidopsis thaliana</i> : Vor- und Nachteile . . . . .	59
2.8 Pflanzen-Regeneration und bakterielle Phytosymbionten . . . . .	61
2.9 Grundlagenforschung und Anwendungen in der Agrikultur . . . . .	65
<b>3 Die Pflanze als überzellulärer Organismus und Dynamik der Lebensvorgänge</b>	67
3.1 Zell-Evolution und Ursprung der Eucyte . . . . .	69
3.2 Tier- und Pflanzenzelle: Gemeinsame Merkmale . . . . .	71
3.3 Der Bau ausgewachsener Pflanzenzellen . . . . .	76
3.4 Zellgröße und Kompartimentierung . . . . .	82
3.5 Die Zellwand: Biosynthese und chemische Zusammensetzung . . . . .	83
3.6 Dicke und Architektur der Zellwände . . . . .	89
3.7 Gewebespannung, Plasmodesmen und Organismustheorie . . . . .	92
3.8 Stammzellen und Dynamik der Lebensprozesse . . . . .	97

<b>4</b>	<b>Diffusion-Osmose-Wasserpotenzial: Auferstehungspflanzen und Klimawandel</b>	<b>103</b>
4.1	Wassergehalt und Lebensfähigkeit: Das pflanzliche Wüsten-Wunder . . . . .	105
4.2	Eigenschaften des Wassers . . . . .	107
4.3	Diffusion und Osmose: Welche Kräfte verursachen den Wasserfluss? . . . . .	108
4.4	Saugkraft und osmotischer Druck . . . . .	111
4.5	Osmotisches Zustandsdiagramm der Pflanzenzelle . . . . .	113
4.6	Aquaporine und gemeinsame Abstammung . . . . .	116
4.7	Saugkraft und Wasserpotenzial . . . . .	118
4.8	Größe des Wasserpotenzials: Grundregeln . . . . .	119
4.9	Das Wasserpotenzial der Erde und der Luft . . . . .	121
4.10	Trockenresistenz und anthropogener Klimawandel . . . . .	123
<b>5</b>	<b>Wassertransport und synthetische Bäume</b>	<b>127</b>
5.1	Globale Wasserflüsse und die drei Leitsysteme . . . . .	129
5.2	Der Wasserfluss durch das Hydrosystem . . . . .	131
5.3	Antriebskräfte für den Wasserferntransport: Übersicht . . . . .	133
5.4	Wassertransport in Keimpflanzen: Der Wurzeldruck . . . . .	134
5.5	Wasserströmung in Bäumen: Die Kohäsionstheorie . . . . .	136
5.6	Experimentelle Belege für den Kohäsions-Spannungs-Mechanismus. . . . .	138
5.7	Das Saftsteigen: Wassertransport vor Laubausbruch . . . . .	143
5.8	Kapillarität und Wasserfluss: Die Sachs'sche Imbibitionstheorie . . . . .	144
<b>6</b>	<b>Transport organischer Substanzen und das Herz der Pflanzen</b>	<b>147</b>
6.1	Dynamik der Translokation: Übergang vom Import- zum Exportgewebe . . . . .	148
6.2	Siebröhren: Kernlose Spezialisten für den Zuckertransport . . . . .	151
6.3	Die molekulare Zucker-Pumpe: Mechanismus des Siebröhrentransports . . . . .	154
6.4	Volumenstromhypothese und Phloem-Entladung . . . . .	159
6.5	Saccharose: Grundnahrungsmittel und Signalstoff der Pflanze . . . . .	162
<b>7</b>	<b>Systembiologische Analysen der Energetik des Stoffwechsels</b>	<b>167</b>
7.1	Der Lebensprozess als Selbsterhalt eines offenen Systems . . . . .	168
7.2	Leben und Tod: Hauptsätze der Thermodynamik . . . . .	169
7.3	Die freie Standardenergie . . . . .	172
7.4	Adenosintriphosphat: Freier Energieträger und Protein-Stabilisator . . . . .	174
7.5	Enzyme: Definition und Wirkungsweise . . . . .	177

7.6	Eigenschaften und Einteilung der Enzyme . . . . .	181
7.7	Cosubstrate und prosthetische Gruppen . . . . .	183
7.8	Quantifizierung der Enzymaktivität und Prinzip der Systemanalyse . . . . .	185
7.9	Regulation der Enzymaktivität in der intakten Zelle . . . . .	188
7.10	Das Erbgut: Informationsübertragung durch Nucleinsäuren und Epigenetik. . . . .	190
7.11	Genexpression und Epigenetik: Die Protein-Biosynthese . . . . .	194
7.12	Proteine: Endprodukte der Genexpression . . . . .	197
7.13	Systembiologische Studien zur Genexpression: Transkriptom, Proteom, Metabolom und Fluxom . . . . .	199
7.14	Das Genom von <i>Arabidopsis thaliana</i> und die Systemanalyse . . . . .	207
<b>8</b>	<b>Keimung: Vom ruhenden Embryo zur Jungpflanze</b>	<b>213</b>
8.1	Lebenszyklus und Generationen-Abfolge . . . . .	214
8.2	Anatomischer Bau und Speicherstoffe typischer Samen . . . . .	217
8.3	Varianten des Sachs'schen <i>Ricinus</i> -Bauplans . . . . .	219
8.4	Vitalität und Lebensdauer der Samen. . . . .	221
8.5	Beschreibung der Keimung. . . . .	222
8.6	Quieszenz, Dormanz und Keimstimulus . . . . .	222
8.7	Biophysik der Keimung . . . . .	224
8.8	Das Keimungspotenzial . . . . .	227
8.9	Die Keimung der Getreidekaryopse . . . . .	229
8.10	Epi- und hypogäische Keimlingsentwicklung . . . . .	232
<b>9</b>	<b>Zellatmung: Die ATP-getriebene Flamme des Lebens mit destruktiven Folgen</b>	<b>235</b>
9.1	Zellstoffwechsel: Sauerstoffverbrauch und Thermogenese . . . . .	237
9.2	Atmungsintensität und Metabolic Scaling . . . . .	238
9.3	Bilanz der Atmung: Übersicht . . . . .	242
9.4	Mobilisierung der Reservestoffe und Bereitstellung von Acetyl-Coenzym A. . . . .	244
9.5	Glykolyse und Gärung . . . . .	249
9.6	Regulation und Kompartimentierung der Glykolyse . . . . .	252
9.7	Citrat-Zyklus. . . . .	254
9.8	Fett-Kohlenhydrat-Transformation . . . . .	255
9.9	Redox-Prozesse und Atmungskette: Allgemeine Grundlagen. . . . .	258
9.10	Die Atmungskette: Energiebilanz . . . . .	262



9.11 Oxidative Phosphorylierung: Die ATP-Synthase . . . . .	263
9.12 Elektronentransportkette und cyanidresistente Atmung . . . . .	264
9.13 Effizienz der Zellatmung . . . . .	266
9.14 Reaktive Sauerstoff-Spezies als Signal und toxisches Agens . . . . .	268
9.15 Oxidativer Pentosephosphatzyklus und Stoffwechsel-Netzwerke . . . . .	270
9.16 Zell- und Bodenatmung im Tag-Nacht-Rhythmus. . . . .	271
<b>10 Photosynthese: Pflanzen als lebende Sonnenkraftwerke und Treibhausgas-Entsorger</b> . . . . .	<b>275</b>
10.1 Chlorophyllkörner als Orte der Photosynthese. . . . .	276
10.2 Heterotrophe und photoautotrophe Organismen. . . . .	278
10.3 Photosynthese-Messungen im Labor und Freiland . . . . .	281
10.4 Das Licht und die Pflanze. . . . .	283
10.5 Photosynthesepigmente . . . . .	285
10.6 Absorptionsspektrum der Pigmente und Wirkungsspektrum der Photosynthese . . . . .	287
10.7 Lichtabsorption: Fluoreszenz von Chlorophyll . . . . .	290
10.8 Experimente mit isolierten Chloroplasten: Licht- und Dunkelreaktion . . . . .	293
10.9 Photolyse des Wassers und Elektronentransportkette . . . . .	299
10.10 Modell der Lichtreaktion der Photosynthese. . . . .	304
10.11 Quantenbedarf der Photosynthese und Photophosphorylierung . . . . .	306
10.12 Photosystem II und Sauerstoffproduktion . . . . .	308
10.13 Sekundärreaktion: Übersicht der drei Photosynthese-Typen . . . . .	311
10.14 Der Calvin-Zyklus: Weg des Kohlendioxids im Laubblatt . . . . .	313
10.15 Regulation der Kohlendioxid-Assimilation . . . . .	319
10.16 Biosynthese von Stärke und Saccharose . . . . .	320
10.17 Warburg-Effekt und Photorespiration . . . . .	322
10.18 Photosynthese bei Starklicht: C4-Pflanzen. . . . .	326
10.19 Photosynthese bei Trockenheit: CAM-Pflanzen . . . . .	333
10.20 Photosynthese des Blattes . . . . .	336
10.21 Photosynthese und Zellatmung . . . . .	341
10.22 Nachwachsende Rohstoffe und der Klimawandel . . . . .	342

<b>11 Die Sexualität: Wachstum und Entwicklungszyklen</b>	347
11.1 Sexualität als Gameten-Kopulation . . . . .	348
11.2 Wachstum und Entwicklung . . . . .	351
11.3 Sexualität beim Wasserfrosch: Das Wachstum der Tierzelle. . . . .	352
11.4 Das Wachstum typischer Pflanzenzellen . . . . .	354
11.5 Beschreibung des Organwachstums und die BBCH-Skala . . . . .	360
11.6 Die drei Perioden der Zellstreckung. . . . .	368
11.7 Biophysik der Zellstreckung . . . . .	370
11.8 Zellwandextensibilität und Turgordruck: Die Schubkraft der Gewächse. . . . .	374
11.9 Äußere vs. innere Befruchtung: Vergleich der Sexual-Zyklen von Tieren und Pflanzen . .	380
11.10 Evolution der Entwicklungszyklen und Generationswechsel. . . . .	382
11.11 Generationswechsel und doppelte Befruchtung . . . . .	384
11.12 Embryogenese und post-embryonale Entwicklung. . . . .	387
<b>12 Phytohormone: Wunder-Reis und Selbstmord-Keimung</b>	391
12.1 Auxine und Unkraut-Vernichter. . . . .	392
12.2 Gibberelline und die erste Grüne Revolution . . . . .	407
12.3 Ethylen und Pflanzenstress . . . . .	415
12.4 Cytokinine und Körner-Ertrag . . . . .	422
12.5 Abscisinsäure und Viviparie . . . . .	427
12.6 Brassinosteroide und Sex-Determination . . . . .	432
12.7 Strigolactone und Prinzip der Selbstmord-Keimung. . . . .	435
12.8 Wirkungsmechanismen und Interaktionen der Phytohormone. . . . .	438
<b>13 Photomorphogenese: Licht-Konkurrenz und Schattenvermeidung</b>	443
13.1 Photo- und Skotomorphogenese . . . . .	444
13.2 Pflanzliche Sehpigmente: Die fünf Photorezeptor-Gruppen . . . . .	446
13.3 Entdeckung des Phytochroms . . . . .	447
13.4 Struktur von Phytochrom und Phototropin . . . . .	450
13.5 Vorkommen von Phytochrom . . . . .	452
13.6 Phytochrom und Ackerbau: Photobiologische Unkrautbekämpfung. . . . .	453
13.7 Beschreibung der Photomorphogenese . . . . .	455
13.8 Photomorphogenese der Keimpflanze. . . . .	456
13.9 Fragwürdige <i>Arabidopsis</i> -Forschungen . . . . .	461

13.10	Wirkungsmechanismus von Phytochrom . . . . .	463
13.11	Phytochrom als Licht- und Temperatursensor . . . . .	464
13.12	Phytochrom in der Natur: Die Licht-Konkurrenz . . . . .	469
13.13	Das Ergrünen der Stängel und Blätter . . . . .	476
13.14	Licht-Warnsignale und Schattenflucht . . . . .	481
<b>14</b>	<b>Pflanzenernährung und Wurzel-Pilz-Gemeinschaften</b>	<b>483</b>
14.1	Grundfragen der pflanzlichen Ernährungsproblematik . . . . .	485
14.2	Experimentelle Analyse des Nährstoffbedarfs. . . . .	486
14.3	Die essentiellen Nährelemente der Pflanze . . . . .	488
14.4	Mechanismus der Ionenaufnahme. . . . .	491
14.5	Interaktion Wurzel-Boden: Mykorrhiza-Waldgemeinschaften. . . . .	494
14.6	Funktion der Nährelemente und das Ionom . . . . .	498
14.7	Bio-Reinigung: Phytoremediation . . . . .	503
14.8	Bakterielle Bio-Dünger . . . . .	504
<b>15</b>	<b>Ohne Proteine kein Leben: Assimilation und Fixierung von Stickstoff</b>	<b>507</b>
15.1	Stickstoff-Assimilation als Nebenweg der Photosynthese . . . . .	508
15.2	Stickstoffkreislauf und Nitratassimilation . . . . .	510
15.3	Stickstoff-Fixierung: Vorkommen und Prinzip . . . . .	513
15.4	Symbiontische Stickstoff-Fixierung bei Leguminosen . . . . .	516
15.5	Gründüngung und Biotechnologie . . . . .	520
15.6	Assimilation von Sulfat . . . . .	521
15.7	Synthetische Mineraldünger und Welternährung . . . . .	522
<b>16</b>	<b>Blütenbildung-Seneszenz: Sachs'sches Florigen und grüner Suizid</b>	<b>525</b>
16.1	Blütenbildung: Allgemeine Definitionen . . . . .	526
16.2	Nachtlängen-Messung: Der Photoperiodismus . . . . .	529
16.3	Lichtperzeption und Blüh-Hormon . . . . .	531
16.4	Blühinduktion in der Natur . . . . .	535
16.5	Vernalisation: Effekt von Wärme und Kälte. . . . .	536
16.6	Lebensdauer der Pflanzen. . . . .	538
16.7	Die Organ-Seneszenz . . . . .	540
16.8	Cytokinine und Blattalterung . . . . .	544
16.9	Die Seneszenz der Blüte . . . . .	545

16.10 Apoptose: Der programmierte Zelltod . . . . .	548
<b>17 Interaktion Pflanze – Tierwelt: Sekundärstoffe und Selbstverteidigung</b>	<b>551</b>
17.1 Sekundärstoffe: Definition und Einteilung . . . . .	552
17.2 Terpene und Feind-Abwehr . . . . .	553
17.3 Phenole und Blütenfärbung . . . . .	557
17.4 Stickstoffhaltige Sekundärstoffe . . . . .	563
17.5 Ernteverluste durch Schadinsekten . . . . .	566
17.6 Pflanzliche Duftstoffe und Insektenabwehr . . . . .	567
17.7 Zerstörung von Nutzpflanzen durch pilzartige Parasiten . . . . .	569
17.8 Das angeborene Immungedächtnis der Pflanzen . . . . .	572
<b>18 Reiz-Reaktionsketten und die Uniformität der Lebensprozesse</b>	<b>573</b>
18.1 Bewegungsvorgänge und Reizqualitäten . . . . .	574
18.2 Induzierte Bewegungen: Reiz und Reaktion. . . . .	575
18.3 Präsentations- und Reaktionszeit: Nastien. . . . .	581
18.4 Oszillatorische Schlaf-/Wach-Bewegungen . . . . .	583
18.5 Rasche, einmal ablaufende Bewegungen . . . . .	588
18.6 Tier-ähnliches Verhalten bei Landpflanzen und die Universalität der Lebensvorgänge . .	593
<b>19 Tropismen und endogen-mechanische Bewegungen: Sind Pflanzen intelligente Wesen?</b>	<b>597</b>
19.1 Tropistische Wachstumsbewegungen . . . . .	598
19.2 Gravitropismus und Wurzelverankerung . . . . .	600
19.3 Phototropismus: Hinwendung zum Licht . . . . .	610
19.4 Hydrotropismus: Wahrnehmung von Feuchtigkeit . . . . .	616
19.5 Taxien: Schwimmbewegungen von Grünalgen . . . . .	617
19.6 Intrazelluläre Bewegungen . . . . .	619
19.7 Endogene Bewegungen und Zeitgeber . . . . .	623
19.8 Mechanische Bewegungen . . . . .	629
19.9 Pflanzen-Intelligenz: Fakten und Spekulationen. . . . .	633
<b>20 Julius Sachs und die Welternährung: Grüne Gentechnik im Wissens-Glaubens-Konflikt</b>	<b>641</b>
20.1 Philosophisch-wissenschaftstheoretische Ansichten von Julius Sachs. . . . .	642
20.2 Welche Eigenschaften zeichnen große Naturforscher aus? . . . . .	645

20.3 Pflanzenphysiologie und Welternährung . . . . .	647
20.4 Wasserlinsen als Nutzpflanzen: Grüne Revolution und Gentechnik . . . . .	652
20.5 Organischer Landbau und Goldener Reis . . . . .	658
20.6 Wissenschaftliches Denken contra Ideologie . . . . .	662
<b>Literatur</b>	665
<b>Anhang 1: Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole</b>	683
<b>Anhang 2: Internet-Adressen</b>	687
<b>Register</b>	691