



H. Kindl G. Wöber

Biochemie der Pflanzen

Ein Lehrbuch

Mit 271 größtenteils zweifarbigen Abbildungen

Springer-Verlag
Berlin Heidelberg New York 1975

Professor Dr. HELMUT KINDL
Universität Marburg, 3550 Marburg-Lahnberge/BRD

Dr. GÜNTER WÖBER
Universität Marburg, 3550 Marburg-Lahnberge/BRD

ISBN-13: 978-3-642-96215-8 e-ISBN-13: 978-3-642-96214-1
DOI: 10.1007/978-3-642-96214-1

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdruckes, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten.

Bei Vervielfältigungen für gewerbliche Zwecke ist gemäß § 54 UrhG eine Vergütung an den Verlag zu zahlen, deren Höhe mit dem Verlag zu vereinbaren ist. © by Springer-Verlag Berlin · Heidelberg 1975.

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1975

Library of Congress Cataloging in Publication Data. Kindl, H. Biochemie der Pflanzen Bibliography: p. 1. Botanical chemistry. I. Wöber, G., 1941-joint author. II. Title. QK861.K53. 581.1'92. 74-12225

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Vorwort

Viele der heute bekannten biochemischen Prozesse, wie Informationsfluß, Energiehaushalt oder Stoffwechsel, laufen in allen Organismen – von den Bakterien bis zu den Pflanzen und Tieren – in ähnlicher Weise ab. Trotz dieser Gemeinsamkeiten nimmt die eukaryontische Pflanzenzelle auf der Ebene der Organisation und der Stoffwechsellkapazität eine gewisse Sonderstellung ein, der bei Beschreibungen von Problemen aus biochemischer Sicht häufig nicht die entsprechende Bedeutung beigemessen wird. Die – zum Teil noch kontroversen – Fragen der dynamischen Biochemie sowie die pflanzliche Zelle stehen im Mittelpunkt dieses Buches; der Bezug zu anderen Organismen wird in vielen Fällen hergestellt.

In erster Linie wendet sich das vorliegende Lehrbuch an den fortgeschrittenen Studenten der Biologie, Biochemie oder Chemie sowie an Fachkollegen, die sich über bestimmte Teilgebiete der Biochemie auf dem laufenden halten möchten. Über diesen Leserkreis hinaus hoffen wir, auch Vertreter anderer Disziplinen anzusprechen, wie z. B. der Pharmazie, der Ernährungsphysiologie, der Pflanzenzucht oder der Gärungstechnik, für die eine Biochemie der Pflanzen den Charakter einer Hilfswissenschaft hat.

Der Stil einer „Einführung in die Biochemie“ wurde bewußt vermieden, weil hier dem Studenten einige ausgezeichnete und verdientermaßen populäre Lehrbücher zur Verfügung stehen. Für das Verständnis des Textes wird vom Biologen die Kenntnis der Grundbegriffe der Chemie und Physikalischen Chemie erwartet; der Chemiker sollte vor der Lektüre mit den elementaren Fakten der Biologie vertraut sein. Aus der unterschiedlichen Vorbildung der recht heterogenen Zielgruppe dieses Buches ergab sich, daß vieles, dem Biologen Selbstverständliches, dargestellt werden mußte, um dem Chemiker den Zugang zu ermöglichen. Umgekehrt wird auch der Chemiker auf viel Bekanntes stoßen, das zum Nutzen des Biologen Einsicht in allgemein gültige Gesetzmäßigkeiten chemischer Reaktionen vermitteln soll.

Das vorliegende Buch ist als Komplement zu dem (in 3. Auflage erscheinenden) „Lehrbuch der Pflanzenphysiologie“ von H. Mohr gedacht. Geringfügige inhaltliche Überschneidungen waren unter dem Gesichtspunkt einer Geschlossenheit der Darstellung der einzelnen Texte unvermeidlich und werden vom Leser beider Bücher wohl kaum als Nachteil empfunden werden.

Die Gliederung des umfangreichen Materials ergab sich aus einer dynamischen Konzeption von den Vorgängen in der pflanzlichen Zelle; dem trägt auch die Bezeichnung der Kapiteltitle Rechnung. Mit Kapitel 1 wird das System vorgestellt, in dem die biochemischen Prozesse ablaufen: die Zelle und ihre Organisation. Zusammen mit der Besprechung der Eigenschaften biochemischer Katalysatoren in Kapitel 2 ist dann das Fundament für ein Verständnis der folgenden Abschnitte gelegt. Kinetische und thermodynamische Überlegungen zur enzymatischen Katalyse einzelner Reaktionen leiten zur Reaktionskette, zum Fließgleichgewicht, über. Im Einklang mit dem hier gemachten Versuch, den Leser auf die Bedeutung des Fließgleichgewichtes im Stoffwechsel hinzuweisen, wurde auf die (besonders im angelsächsischen Schrifttum übliche) Angabe der $\Delta G'_0$ -Werte einzelner Reaktionen in den dem Stoffwechsel gewidmeten Kapiteln ver-

zichtet. Zwei allgemeine Gesichtspunkte schließen sich an: Kapitel 3 (Informationsfluß) und Kapitel 4 (Energiefluß) behandeln die fundamentalen Prozesse der Informationsübertragung und Regulation sowie der Energiegewinnung in der pflanzlichen Zelle. Vor Beginn der Kapitel über den Substanzfluß im Stoffwechsel wird dem Leser in einer Synopsis ein Leitfaden zur Übersicht über den Aufbau dieser drei Kapitel in die Hand gegeben. Unter dem Blickwinkel der Energetik und der Zellorganisation verwendeten wir die physiologische Funktion der Stoffwechselwege, das Zusammenwirken subzellulärer Reaktionsräume als oberstes Ordnungsprinzip. Dies wurde nur durchbrochen, um unnötige Duplizierung zu vermeiden. Schließlich wurde in Kapitel 8 mit der Behandlung biologischer Membranen und Zellwände der Bedeutung dieser wichtigen und aktuellen Forschungsrichtung Rechnung getragen.

Dem Charakter eines Lehrbuches entsprechend werden Literaturzitate in gesammelter Form am Ende des Textes präsentiert, womit eine Weiterbildung und Vertiefung des Wissens über ausgewählte Monographien und Übersichtsartikel ermöglicht werden soll. Zahlreichen Fachkollegen und Verlagen sind wir für die Überlassung von Originalabbildungen zu Dank verpflichtet. Ebenso möchten wir den Mitarbeitern des Springer-Verlages für die angenehme Zusammenarbeit bei der Drucklegung des Manuskriptes und für die Bereitschaft zur Ausstattung dieses Buches im Zweifarbendruck danken. Die hervorragende Arbeit des Zeichenbüros (Nemela und Brokate, Ingenieurbüro, Schwetzingen/Baden) hat die reichhaltige Ausgestaltung des Textes mit Abbildungen ermöglicht. Fräulein U. Czichi hat in selbstloser Weise an der Durchsicht und Reinschrift des Manuskriptes mitgearbeitet; Frau M. Wöber danken wir für die graphische Gestaltung eines Großteiles der Abbildungen.

Marburg, im Herbst 1974

H. KINDL
G. WÖBER

Inhaltsverzeichnis

1	Das System: Die pflanzliche Zelle und ihre Kompartimente	1
	Methoden der Cytochemie für die Analyse der Beziehung: Struktur-Funktion – Organellen: Funktionelle Substrukturen	
2	Die Katalysatoren: Enzyme	20
	Kinetik der Enzymkatalyse – Das Fließgleichgewicht: eine Stoffwechselsituation – Das Enzym erniedrigt die Aktivierungsenthalpie – Die Biokatalysatoren sind Proteine	
3	Informationsfluß und Regulation	39
3-1	Replikation: die Verdopplung der DNA	40
	Die Struktur der Nukleinsäuren: ein Polymeres mit Informationsbereichen – Replikation bei Prokaryonten – Für die Erhaltung der Information ist ein DNA-Reparaturmechanismus notwendig – DNA-Rekombination: Sexualprozesse auch bei Prokaryonten – Modifikation von DNA: eine Spezifizierung – RNA-abhängige DNA-Polymerasen – RNA-abhängige RNA-Polymerase – Replikation in Eukaryonten: ein vom Zell-Zyklus abhängiger Vorgang – Replikation in Mitochondrien und Chloroplasten: Analogien zur DNA-Duplizierung in Bakterien – Transgenosis: Übertragung, stabiler Einbau und Expression fremder Information	
3-2	Transkription: Die Überschreibung der Information von DNA auf RNA . . .	53
	RNA-Polymerasen in Eukaryonten: multiple Formen – RNA-Synthese am Nukleolus: Bildung von hochmolekularen Vorläufern der rRNA – Synthese von tRNA: Bildung von Vorläufern im Kern – mRNA wird im Nukleoplasma an Euchromatin gebildet – Modifikation von RNA – Transkription in Mitochondrien und Chloroplasten ist ähnlich wie bei Prokaryonten	
3-3	Translation: Die Übersetzung der Information von RNA auf Protein	58
	Protein-Synthese an den Ribosomen – Aminoacyl-tRNA-Synthetase gewährleistet die Präzision der Translation – Codon-Anticodon-Bindung und Nukleinsäure-Protein-Wechselwirkung für die Expression des genetischen Codes	
3-4	Kontrolle über Transkription und Translation	66
3-5	Regulation des Stoffwechsels	69
	Die Zelle kann die Enzymmenge und die Enzymaktivität regulieren – Allosterische Enzyme dienen der Feinregulation des Stoffwechsels – Die Regulation durch Kompartimentierung	

4	Energiefluß: Aufbau, Speicherung und Verwendung von chemischem Potential	72
4-1	Die Komponenten der ET-Ketten	74
4-2	Funktion und Aufbau der mitochondrialen ET-Kette Die Elektronentransportkette in pflanzlichen Mitochondrien – Die ET-Kette der pflanzlichen Mitochondrien enthält zusätzlich eine Cyanid-unempfindliche Endoxidase	79
4-3	Photosynthese und ET der Thylakoide Aufbau der ET-Kette der Thylakoide	82
4-4	ET-abhängige Phosphorylierung Prozeß der Energiekonservierung – Topographie der ET-Membranen	87
4-5	Vergleich mit anderen membrangebundenen ET-Ketten	94
	Substanzfluß: Synopsis für Kapitel 5, 6 und 7	97
5	Heterotrophe Ernährung	99
5-1	Mobilisierung der Reservekohlenhydrate Stärke und Glykogen sind verzweigte α -Glucane – Beim Abbau von Stärke oder Glykogen müssen zwei Arten von Enzymen kooperieren – Am Abbau der Stärke in Pflanzen sind mindestens vier Enzyme beteiligt – Die Samen stärke-speichernder Kulturgräser dienen als Modellsystem für <i>in vivo</i> -Untersuchungen über die Mobilisierung von Reservestoffen während der Keimung – Der Abbau von Glykogen in Pilzen (und Säugetieren) verläuft anders als der Stärke-Abbau bei Pflanzen – Der Abbau von Speicherglykogen ist bei Pilzen sorgfältig reguliert – Viele Organismen transportieren Glucose als universellen Nährstoff in die Zelle – Beim Abbau von Glucose in der Glykolyse wird chemische Energie gewonnen – Einige Schlüsselmetaboliten der Zelle regulieren den Substanzfluß in die Glykolyse – Pyruvat kann in den Mitochondrien vollständig verbrannt werden – Der Citrat-Zyklus ist auch Ausgangspunkt für viele Synthesen der Zelle – Anaplerotische (auffüllende) Reaktionen halten den Spiegel an Zwischenstufen des Citrat-Zyklus konstant	99
5-2	Mobilisierung der Reservefette Die Speicherorgane der Pflanze können auch Fette als Reservestoffe enthalten – Die Mobilisierung der Reservefette beginnt mit der Verseifung durch Lipase – Die Enzyme des Fettsäure-Abbaues sind in Organellen zusammengefaßt – Das Glyoxysom: funktionale Einheit des Stoffwechsels in Kooperation mit anderen Organellen – In keimenden Samen findet neben der β -Oxidation von Fettsäuren auch eine α -Oxidation statt – Die cis-ungesättigten Fettsäuren der Reservefette machen bei der β -Oxidation Schwierigkeiten – Pflanzen können auch Fettsäuren mit einer ungeraden Zahl von Kohlenstoffatomen vollständig abbauen – Der Glyoxylat-Zyklus ist eine notwendige Voraussetzung für das Wachstum von Mikroorganismen auf Acetat	125

5-3	Mobilisierung von Reserveprotein	135
	Eine Einteilung der Speicherproteine ausschließlich aufgrund physikalisch-chemischer Eigenschaften ist historisch bedingt – Die Speicherproteine der Zelle sind in Organellen lokalisiert – Keimlinge enthalten verschiedene proteolytische Enzyme – Mit Proteinkörpern sind proteolytische Enzyme assoziiert – Die hormonale Regulation der Proteinmobilisierung: das System Gerstenkeimling – Aminosäuren werden bevorzugt zur Enzym-Synthese verwendet, können aber auch abgebaut werden – Proteinase-Inhibitoren: möglicherweise ein biochemischer Schutzmechanismus der Pflanzen	
6	Photoautotrophe Ernährung, Syntheseleistungen der Organellen	142
6-1	Photoassimilation von CO ₂	142
	Photoassimilierung und Respiration sind formal gegenläufige Prozesse – Die Carboxylierung von Ribulosebisphosphat ist die Primärreaktion der CO ₂ -Fixierung – 3-Phosphoglycerat, das Primärprodukt der CO ₂ -Fixierung, wird zu Glycerinaldehydphosphat reduziert – Die regenerierende Phase: aus 5 C ₃ mach 3 C ₅ – In Chloroplasten entstehen außer Kohlenhydraten auch andere Primärprodukte der CO ₂ -Assimilierung	
6-2	Bildung der Transport- und Speicherform des Assimilats	156
	Im Licht wird Saccharose in den Blättern synthetisiert und in andere Teile der Pflanze transportiert – In Chloroplasten entsteht Saccharose aus UDP-Glucose, Stärke aber aus ADP-Glucose – In reifenden Samen differenzieren Proplastiden zu Amyloplasten – Zwei Typen von Enzymen kooperieren bei der Synthese von Stärke – Wie wird die Chloroplasten-Stärke im Dunkeln abgebaut? – Die Biosynthese von Glykogen in Pilzen (und Säugtieren) verläuft analog der Stärkebildung in Pflanzen; die Regulation dieses Stoffwechselweges ist jedoch grundlegend verschieden	
6-3	Photorespiration	163
	Photorespiration ist die lichtstimulierte O ₂ -Aufnahme und CO ₂ -Abgabe – Photorespiration bedeutet nicht nur CO ₂ -Verlust, sondern ist vielleicht der Hauptweg zur Bildung von Glycin und Serin	
6-4	Kooperation zweier Chloroplastentypen bei C ₄ -Pflanzen	169
	Bei bestimmten Pflanzen ist der Carboxylierung von Ribulosebisphosphat eine andere CO ₂ -Fixierungsreaktion vorgeschaltet (Hatch-Slack-Weg)	
6-5	Stoffwechsel von C ₄ -Säuren bei Crassulaceen	177
	Der Säurestoffwechsel bei Crassulaceen ist biochemisch mit dem Stoffwechsel der C ₄ -Säuren verwandt – Alle grünen Pflanzen zeigen einen Isotopeneffekt bei der Fixierung von CO ₂	
6-6	Assimilatorische Nitrat-Reduktion (Anhang: N ₂ -Reduktion)	180
	Grüne Pflanzen und Pilze können Nitrat reduzieren und alle Stickstoffverbindungen aufbauen – Nitrat-Reduktase katalysiert die Reaktion Nitrit	

- NH₄⁺ scheinbar in einem Schritt – Nitrat-Reduktase, das erste Enzym des Nitratstoffwechsels, sollte reguliert sein – Der letzte Schritt der assimilatorischen Nitrat-Reduktion ist der Einbau von NH₄⁺ in organische Stickstoffverbindungen – Die Reduktion von molekularem Stickstoff ist von fundamentaler Bedeutung in der Versorgung aller Organismen mit organischen Stickstoffverbindungen („Nahrungskette“) – Nur Bakterien, frei oder in Symbiose lebend, können N₂ reduzieren – Eine genaue Untersuchung der Nitrogenase liefert wertvolle Informationen über die Biochemie der Stickstoff-Fixierung – Heterotrophe Bakterien und Blaualgen erzeugen ATP und reduziertes Ferredoxin für die N₂-Fixierung auf verschiedene Weise
- 6-7 Assimilatorische Sulfat-Reduktion 190
 Der Kreislauf des Schwefels – Die Biochemie der Sulfat-Reduktion ist nur in groben Zügen geklärt – Der Chloroplast kann den Schwefel des Cysteins zur Methioninbildung verwenden
- 6-8 *De novo*-Synthese der Struktur lipide in Chloroplasten 197
 Chloroplasten und Mitochondrien enthalten Lipide, die vorwiegend als Membrankomponente Bedeutung besitzen – Für Chloroplasten wurde die *de novo*-Synthese von Fettsäuren aus Acetat-Einheiten bewiesen – Wie kommen Chloroplasten zu Acetyl-SCoA? – Malonyl-SCoA, der zweite Partner bei der Neusynthese von Fettsäuren, entsteht durch CO₂-Anlagerung an Acetyl-SCoA – Die Einführung von Doppelbindungen ist mit dem Aufbau der Fettsäure gekoppelt – *De novo*-Synthese *versus* Verlängerung vorgebildeter Fettsäuren um Acetat-Einheiten – Zur Synthese der Lipide werden die an das Acyl-Trägerprotein gebundenen ungesättigten Fettsäuren auf freie Hydroxylgruppen in Glycerin übertragen – Wichtige Pigmente für die Lichtabsorption und die Elektronentransportkette der Thylakoide werden auch aus Acetat-Einheiten aufgebaut
- 7 **Cytoplasmatische Syntheseleistungen** 211
- 7-1 Biosynthese aus Acetat-Einheiten: Fette, Phosphatide und Isoprenoide . . . 211
 Im Cytoplasma läuft die *de novo*-Synthese von Fettsäuren an einem Multi-enzymkomplex ab – Die Produkte der Fettsäure-Synthase können weiter verlängert werden und/oder Doppelbindungen erhalten – Über die Bildung der „seltenen“ Fettsäuren oder der Polyacetylenverbindungen ist wenig bekannt – Coenzym A-Derivate der Fettsäuren werden für die Lipidbildung an den Mikrosomen benützt – Auch Wachse und Cutine leiten sich nach Struktur und Biosynthese von Fettsäuren ab – Acetogenine: auch aromatische Verbindungen können aus Acetat-Einheiten aufgebaut werden – Isoprenoide sind eine heterogene Klasse von Naturstoffen, die nach einem einheitlichen Prinzip aus Acetat-Einheiten aufgebaut werden – Die Bildung von Isopentenylpyrophosphat aus drei Acetat-Einheiten – Isopentenylpyrophosphat reagiert wiederholt mit einem Allylkation – Schwanz-an-Schwanz-Dimerisierungen bei der Bildung der Steroide (C₁₅+C₁₅) oder der Carotinoide (C₂₀+C₂₀) – Polyprenoide und Polyisoprene

7-2 Synthese der Aminosäuren 236

Die Aufnahme von Amin-Stickstoff über Glutamat-Dehydrogenase und Transaminasen – Das Kohlenstoffskelett von Aspartat oder Glutamat ist der Ausgangspunkt für die Synthese zahlreicher Aminosäuren – Valin und Isoleucin werden aus den um zwei C-Atome kürzeren α -Ketosäuren aufgebaut; dies geschieht durch Kondensation mit einer C_2 -Einheit und anschließender Alkylumlagerung – Für die Bildung von Lysin existieren zwei prinzipiell verschiedene Aufbauwege – Glutamat als Vorstufe einer Reihe von C_5 -Aminosäuren – Die C-Atome des Histidins stammen von Ribose bzw. aus dem Purinring von ATP – Die Biosynthese der aromatischen Aminosäuren über den Shikimisäure-Weg nimmt bei Produkten des Kohlenhydratstoffwechsels ihren Ausgang

7-3 Von Aminosäuren ausgehender Stoffwechsel 256

Homologe Aminosäuren können durch einen C_1 -Kettenverlängerungsmechanismus entstehen – Weitere Möglichkeiten der C_1 -Kettenverlängerung – Cystein und Homocystein als Vorläufer schwefelhaltiger Aminosäurederivate – Ornithin als Vorläufer von Tropan- und Pyrrolizidin-Alkaloiden – Allgemeine Überlegungen zur Funktion von Phenylpropankörpern als Vorläufer von C_6C_2 -, C_6C_1 -Derivaten, Chinonen, Flavonoiden, Stilbenen und Lignin – Von Zimtsäure zweigen eine Reihe von Biosynthesewegen ab – Durch Kettenverkürzung entstehen aus aromatischen Aminosäuren Aldoxime und Phenylessigsäuren mit einem C_6-C_2 -Skelett – Die Biosynthese von Isochinolin- und Amaryllidaceen-Alkaloiden geht von aromatischen Aminosäuren aus – Benzoesäuren leiten sich von Zimtsäuren des gleichen Substitutionstyps ab – Anthranilsäure ist nicht nur Vorläufer von Tryptophan sondern auch eine Komponente von Alkaloid-Biosynthesen-Biosynthesen, die von Chorisminsäure ausgehen – Die Bildung von Benzochinonen aus aromatischen Aminosäuren

7-4 Biosynthese der Nukleotide, Porphyrine und anderer N-Heterozyklen . . . 280

Aspartat und Carbamylphosphat sind Vorläufer für die Synthese der Pyrimidine – Das Purinskelett wird in einer komplexen Reaktionssequenz aus vielen kleinen Bausteinen zusammengesetzt – Für die Bildung der Desoxyribonukleotide muß auf der Stufe der Ribonukleosiddiphosphate reduziert werden – Heterozyklische Ringsysteme sind auch Bestandteile einiger Coenzyme – Strukturen verschiedener Tetrapyrrol-Systeme, die als prosthetische Gruppen in Chromoproteiden fungieren – Die Pyrrolringe des Porphyrinskelettes werden aus Succinyl-SCoA und Glycin aufgebaut

7-5 Cytoplasmatische Kohlenhydrat-Synthesen 296

Die Gluconeogenese ist die Neubildung von Glucose und deren Folgeprodukten aus Oxalacetat – Bei Pilzen und keimenden Samen hat die Gluconeogenese die gleiche physiologische Funktion – Überlegungen zur physiologischen Funktion der Gluconeogenese beim grünen Blatt während der Dunkelperiode – Der oxidative Hexosephosphat-Pentosephosphat-Zyklus ist einer der wichtigen Prozesse, die an die Gluconeogenese anschließen –

Der oxidative Hexosephosphat-Pentosephosphat-Zyklus im Cytoplasma hat zwei wesentliche physiologische Funktionen – Pflanzen synthetisieren eine große Vielfalt nukleotidgebundener Zucker – Pilze haben ganz andere Strukturpolysaccharide als Pflanzen; aber auch sie werden über nukleotidgebundene Zwischenstufen synthetisiert – Die Reservepolysaccharide der Algen können von jenen höherer Pflanzen verschieden sein – Algen haben auch ganz charakteristische Strukturpolysaccharide – Die Biosynthese verzweigt-kettiger Zucker: Beispiele für weitgehende strukturelle Modifikationen nukleotidgebundener Kohlenhydrate – Nukleosiddiphosphatgebundene Zucker sind nicht immer der Glykosyl-Donor beim Aufbau glykosidischer Bindungen – Einige Beispiele für die Vielfalt struktureller Modifikationen von Zuckern, die nicht an Nukleosiddiphosphat gebunden sind

8	Biologische Membranen und Zellwände	318
8-1	Membranen	318
	Die Kompartimentierung von Enzymen ist für das Funktionieren der eukaryontischen Zelle stets vorteilhaft und vielfach auch notwendig – Eine Lipid-Doppelschicht bildet eine viskose Matrix, in die globuläre Proteine beweglich eingelagert sind – Aussagen des Modells einer Mosaikstruktur der Lipide und Proteine in Membranen	
8-2	Zellwände	323
	Die chemische Zusammensetzung der Zellwand von Pilzen ist ein taxonomisches Merkmal – Die chemische Zusammensetzung der Zellwand von Pflanzen ändert sich im Verlauf der Differenzierung – Wie sind die Komponenten in der Zellwand angeordnet? – Eine elegante Anwendung moderner analytischer Technik: die Strukturaufklärung der Primärwand von <i>Acer pseudo-platanus</i> – Das Modell für den Aufbau einer Zellwand erlaubt Voraussagen über das Prinzip der Zellwand-Biosynthese und des Zell-Wachstums – Pflanze - Pathogen Wechselwirkung: Angriff und Abwehr mit Enzymen als Waffe – Protoplasten pflanzlicher Zellen sind ein aussichtsreiches Studienobjekt für verschiedene biologische Disziplinen	
	Appendix 1: Prochirale Substrate (Aspekte der Stereochemie)	339
	Appendix 2: Strukturformeln von Hemmstoffen und Hilfsverbindungen	346
	Literatur	349
	Sachverzeichnis	355