

bio
biologie



Murray W. Nabors

Botanik

Benjamin Cummings

PEARSON
Studium

Botanik



Aus dem Amerikanischen von Micaela Krieger-Hauwede und Karen Lippert

Deutsche Bearbeitung von Renate Scheibe

Mit über 390 Abbildungen



ein Imprint von Pearson Education
München • Boston • San Francisco • Harlow, England
Don Mills, Ontario • Sydney • Mexico City
Madrid • Amsterdam

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Die Informationen in diesem Produkt werden ohne Rücksicht auf einen eventuellen Patentschutz veröffentlicht. Warennamen werden ohne Gewährleistung der freien Verwendbarkeit benutzt. Bei der Zusammenstellung von Texten und Abbildungen wurde mit größter Sorgfalt vorgegangen. Trotzdem können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden. Verlag, Herausgeber und Autoren können für fehlerhafte Angaben und deren Folgen weder eine juristische Verantwortung noch irgendeine Haftung übernehmen. Für Verbesserungsvorschläge und Hinweise auf Fehler sind Verlag und Herausgeber dankbar.

Alle Rechte vorbehalten, auch die der fotomechanischen Wiedergabe und der Speicherung in elektronischen Medien. Die gewerbliche Nutzung der in diesem Produkt gezeigten Modelle und Arbeiten ist nicht zulässig. Fast alle Produktbezeichnungen und weitere Stichworte und sonstige Angaben, die in diesem Buch verwendet werden, sind als eingetragene Marken geschützt. Da es nicht möglich ist, in allen Fällen zeitnah zu ermitteln, ob ein Markenschutz besteht, wird das ©-Symbol in diesem Buch nicht verwendet.

Authorized translation from the English language edition, entitled INTRODUCTION TO BOTANY, 1st Edition by NABORS, MURRAY, published by Pearson Education, Inc, publishing as Benjamin Cummings, Copyright © 2004 by Pearson Education, Inc.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc.

GERMAN language edition published by PEARSON EDUCATION DEUTSCHLAND GMBH, Copyright © 2007.

Umwelthinweis:

Dieses Buch wurde auf chlorfrei gebleichtem Papier gedruckt.

10 9 8 7 6 5 4 3 2 1

09 08 07

ISBN 978-3-8273-7231-4

© 2007 by Pearson Studium,
ein Imprint der Pearson Education Deutschland GmbH,
Martin-Kollar-Straße 10-12, D-81829 München
Alle Rechte vorbehalten
www.pearson-studium.de

Übersetzung: Micaela Krieger-Hauwede und Dr. Karen Lippert, Leipzig
Lektorat: Dr. Stephan Dietrich, sdietrich@pearson.de
Fachlektorat: Prof. Dr. Renate Scheibe, Universität Osnabrück (Kapitel 19: PD Dr. Dominik Begerow, MPI Marburg)
Korrektorat: Dunja Reulein, München
Herstellung: Martha Kürzl-Harrison, mkuerzl@pearson.de
Satz: mit L^AT_EX, PTP-Berlin, Protago T_EX-Production GmbH, Germany (www.ptp-berlin.eu)
Einbandgestaltung: Thomas Arlt, tarlt@adesso21.net
Druck und Verarbeitung: Print Consult GmbH

Printed in the Slovak Republic

Inhaltsübersicht

Vorwort	XI
Kapitel 1 Die Pflanzenwelt	1
TEIL I Strukturen	27
Kapitel 2 Zellstruktur und Zellzyklus	29
Kapitel 3 Einführung in die Pflanzenstruktur	57
Kapitel 4 Wurzeln, Sprosse und Blätter: Der primäre Pflanzenkörper	83
Kapitel 5 Sekundäres Wachstum	117
Kapitel 6 Lebenszyklen und Fortpflanzungsstrukturen	143
TEIL II Funktionen	175
Kapitel 7 Grundlagen der Pflanzenbiochemie	177
Kapitel 8 Photosynthese	207
Kapitel 9 Zellatmung	231
Kapitel 10 Transportprozesse	251
Kapitel 11 Interne und externe Reize	277
TEIL III Genetik	305
Kapitel 12 Molekulare Grundlagen der Vererbung	307
Kapitel 13 Regulation der Genexpression	327
Kapitel 14 Molekularbiologie	353
TEIL IV Das Pflanzenreich	379
Kapitel 15 Evolution	381
Kapitel 16 Klassifikation	411
Kapitel 17 Viren und Prokaryoten	439
Kapitel 18 Algen	455
Kapitel 19 Pilze (<i>Fungi</i>)	479
Kapitel 20 Moose (Bryophyten)	505
Kapitel 21 Samenlose Gefäßpflanzen (Farnpflanzen)	526
Kapitel 22 Nacktsamer (<i>Gymnospermae</i>)	549
Kapitel 23 Bedecktsamer (<i>Angiospermae</i>)	573
TEIL V Ökologie	601
Kapitel 24 Biogeografie	603
Kapitel 25 Ökosysteme	625
Anhang	657

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	XI
Kapitel 1 Die Pflanzenwelt	1
1.1 Die Bedeutung der Pflanzen	3
1.2 Merkmale von Pflanzen und Pflanzendiversität	11
1.3 Botanik und wissenschaftliche Methodik	16
TEIL I Strukturen	27
Kapitel 2 Zellstruktur und Zellzyklus	29
2.1 Ein Überblick über Zellen	31
2.2 Wichtige Zellorganellen	35
2.3 Das Cytoskelett	41
2.4 Membranen und Zellwände	43
2.5 Zellzyklus und Zellteilung	46
Kapitel 3 Einführung in die Pflanzenstruktur	57
3.1 Haupttypen von Pflanzenzellen	59
3.2 Die Gewebe von Gefäßpflanzen	62
3.3 Überblick über die Organe von Gefäßpflanzen	70
3.4 Überblick über das Wachstum und die Entwicklung von Pflanzen	72
Kapitel 4 Wurzeln, Sprosse und Blätter: Der primäre Pflanzenkörper	83
4.1 Wurzeln	85
4.2 Sprossachsen	94
4.3 Blätter	101
Kapitel 5 Sekundäres Wachstum	117
5.1 Sekundäres Wachstum: Ein Überblick	119
5.2 Wachstumsmuster von Holz und Rinde	126
5.3 Wirtschaftliche Nutzung von Holz und Rinde	131
Kapitel 6 Lebenszyklen und Fortpflanzungsstrukturen	143
6.1 Fortpflanzung und Vermehrung bei Pflanzen: Ein Überblick	145
6.2 Meiose und Generationswechsel	147
6.3 Zapfen und Blüten	153
6.4 Samenstrukturen	158
6.5 Früchte	161
TEIL II Funktionen	175
Kapitel 7 Grundlagen der Pflanzenbiochemie	177
7.1 Die molekularen Komponenten lebender Organismen	179
7.2 Energie und chemische Reaktionen	191
7.3 Chemische Reaktionen und Enzyme	197

Kapitel 8	Photosynthese	207
8.1	Ein Überblick über die Photosynthese	209
8.2	Die Umwandlung der Lichtenergie in chemische Energie: Die Lichtreaktionen	212
8.3	Die Umwandlung von CO ₂ in Zucker: Der Calvin-Zyklus	218
Kapitel 9	Zellatmung	231
9.1	Ein Überblick über die Ernährung	233
9.2	Zellatmung	237
9.3	Gärung	245
Kapitel 10	Transportprozesse	251
10.1	Molekularer Membrantransport	253
10.2	Aufnahme und Transport von Wasser und gelösten Stoffen	259
10.3	Boden, Mineralstoffe und Pflanzenernährung	266
Kapitel 11	Interne und externe Reize	277
11.1	Die Wirkung von Phytohormonen	279
11.2	Reaktionen auf Licht	288
11.3	Reaktionen auf andere Umgebungsreize	294
TEIL III	Genetik	305
Kapitel 12	Molekulare Grundlagen der Vererbung	307
12.1	Die Mendel'schen Vererbungsversuche	309
12.2	Die Genetik nach Mendel	316
Kapitel 13	Regulation der Genexpression	327
13.1	Genexpression	329
13.2	Differenzielle Genexpression	339
13.3	Die Identifizierung von Genen, die für die Entwicklung maßgeblich sind	343
Kapitel 14	Molekularbiologie	353
14.1	Die Methoden der Pflanzenbiotechnologie	355
14.2	Leistungen und Möglichkeiten der Pflanzenbiotechnologie	362
TEIL IV	Das Pflanzenreich	379
Kapitel 15	Evolution	381
15.1	Die Geschichte der Evolution auf der Erde	383
15.2	Die Mechanismen der Evolution	392
15.3	Der Ursprung der Arten	401
Kapitel 16	Klassifikation	411
16.1	Klassifikation vor Darwin	413
16.2	Klassifikation und Evolution	416
16.3	Hauptkategorien der Organismen	426
16.4	Die Zukunft der Klassifikation	430

Kapitel 17	Viren und Prokaryoten	439
17.1	Viren und die Pflanzenwelt	441
17.2	Prokaryoten und die Welt der Pflanzen	446
Kapitel 18	Algen	455
18.1	Merkmale und Evolution der Algen	457
18.2	Einzellige und Kolonien bildende Algen	460
18.3	Mehrzellige Algen	467
Kapitel 19	Pilze (<i>Fungi</i>)	479
19.1	Merkmale und Evolutionsgeschichte der Pilze	481
19.2	Die Vielfalt der Pilze	483
19.3	Interaktionen von Pilzen mit anderen Organismen	497
Kapitel 20	Moose (Bryophyten)	505
20.1	Ein Überblick über die Bryophyten	507
20.2	Lebermoose: Der Stamm der <i>Hepatophyta</i>	512
20.3	Hornmoose: Der Stamm der <i>Anthocerophyta</i>	515
20.4	Laubmoose: Der Stamm der <i>Bryophyta</i>	517
Kapitel 21	Samenlose Gefäßpflanzen (Farnpflanzen)	526
21.1	Die Evolution der samenlosen Gefäßpflanzen	526
21.2	Rezente samenlose Gefäßpflanzen	534
Kapitel 22	Nacktsamer (<i>Gymnospermae</i>)	549
22.1	Ein Überblick über Nacktsamer	551
22.2	Die heute lebenden Nacktsamer	558
Kapitel 23	Bedecktsamer (<i>Angiospermae</i>)	573
23.1	Sexuelle Fortpflanzung bei Blütenpflanzen	575
23.2	Die Evolution von Blüten und Früchten	580
23.3	Die Diversität der Bedecktsamer	591
TEIL V	Ökologie	601
Kapitel 24	Biogeografie	603
24.1	Abiotische Faktoren in der Ökologie	605
24.2	Ökosysteme	611
Kapitel 25	Ökosysteme	625
25.1	Populationen	626
25.2	Interaktionen zwischen Organismen in Ökosystemen	631
25.3	Gesellschaften und Ökosysteme	635
25.4	Biodiversität und Artenschutz	645
Anhang		657
A	Grundlagen der Chemie	658
B	Glossar	665
C	Index	685

Vorwort zur amerikanischen Ausgabe

Sich mit Pflanzen zu beschäftigen, lohnt sich aus vielerlei Gründen. Pflanzen sind verblüffende und faszinierende Lebensformen, die unser eigenes Leben sowohl in ästhetischer als auch in praktischer Hinsicht verändern und bereichern. Die Schönheit von Blumensträußen und die Wärme von Lagerfeuern sind nur zwei Beispiele für die Bedeutung und die Nützlichkeit von Pflanzen für uns. Tatsächlich sind Pflanzen an allen Aspekten der menschlichen Zivilisation beteiligt. Sämtliche fossilen Brennstoffe sind Überreste von frühen Photosynthese betreibenden Organismen. Pflanzen liefern Nährstoffe und medizinische Wirkstoffe, Fasern für unsere Kleidung sowie Holz als Heiz- und Baumaterial. Pflanzen sind in mehrfachem Sinne die Grundlage für das Leben auf der Erde. Zusammen mit anderen Photosynthese betreibenden Organismen machen sie die in der Strahlung der Sonne enthaltene Energie für das Leben auf der Erde nutzbar. Durch Photosynthese produzieren sie Sauerstoff und Nahrung. Sie synthetisieren organische Moleküle, die über die Nahrungsketten von den übrigen Lebewesen, die keine Photosynthese betreiben, modifiziert und recycelt werden.

Grundkonzept

Das vorliegende Buch basiert auf meinen Erfahrungen, die ich in den letzten 31 Jahren als Dozent für Botanik und Biologie erworben habe. Während dieser Zeit ist der Umfang grundlegender Erkenntnisse der Pflanzenwissenschaft enorm angewachsen. Einige Lehrbücher der Botanik und Biologie versuchen mit dieser Entwicklung Schritt zu halten und nehmen dabei den Umfang von Enzyklopädien an. Andere wiederum beschränken sich auf kurze, vereinfachte Darstellungen ausgewählter Teilgebiete der Botanik. Ich habe versucht, einen Text von moderater Länge zu schreiben und dabei einerseits alle zentralen Themen der Botanik gleichermaßen zu berücksichtigen, andererseits wichtige Schnittstellen zu anderen Fachgebieten zu betonen. In meiner Darstellung habe ich besonderen Wert darauf gelegt, die Bedeutung der Erkenntnisgewinnung und der wissenschaftlichen Methodik deutlich zu machen.

Ziele des Buches

Das generelle Ziel dieses Buches ist es, wichtige, aktuelle und grundlegende Informationen über Pflanzen und die moderne Pflanzenbiologie in interessanter und gut lesbarer Form zusammenzustellen. Ich werde aufzeigen, was Pflanzen mit anderen Lebewesen gemeinsam haben, und hoffe, dabei gleichzeitig schlüssig darzulegen, dass Pflanzen und andere Photosynthese betreibenden Organismen durch ihre einzigartigen Merkmale für das Überleben aller Lebensformen einschließlich des Menschen notwendig sind.

Immer wieder komme ich in diesem Buch auf vier besonders wichtige Themen zurück: **Evolution, Biotechnologie, Biodiversitätsforschung** und **Pflanzen und Menschen**. Die durch natürliche Auslese vorangetriebene *Evolution* ist das wichtigste Paradigma der modernen Botanik. Die anatomischen und biochemischen Merkmale von Pflanzen sowie ihre Wechselwirkungen in Populationen und Ökosystemen werden im Rahmen der Darwin'schen Theorie verständlich. Das zentrale Dogma der Molekularbiologie, wonach der Informationsfluss von den Genen zu den Enzymen, Strukturen und Funktionen erfolgt, ist ein zweites wichtiges Paradigma der Botanik. Pflanzenbiotechnologie und Gentechnik demonstrieren eindrucksvoll, welche Chancen und Probleme aus dem immer besseren Verständnis der Molekularbiologie der Pflanzen erwachsen können. Themen aus der Pflanzenbiotechnologie und den mit ihr verwandten Gebieten der Genomik und Proteomik werden immer öfter von den Massenmedien aufgegriffen. Ein grundlegendes Verständnis der Pflanzenbiotechnologie ist für Studenten von großer Bedeutung, um den künftigen Anforderungen ihrer Berufsfelder gerecht werden zu können. Angesichts der weiterhin wachsenden Weltbevölkerung bei gleichzeitig schwindenden Ressourcen und zunehmender Umweltzerstörung ist das Wissen um die Rolle der Pflanzen innerhalb der Biosphäre von großer Bedeutung. Die *Biodiversitätsforschung* ist ein sich rasch entwickelndes Gebiet der Forschung und des konkreten Handelns. Sie basiert auf Erkenntnissen verschiedenster Teilgebiete der Biologie und auf dem Wissen um die Bedeutung von Pflanzen in natürlichen Ökosystemen wie auch in Ökosystemen, die durch menschliche Aktivitäten entstanden sind. Ein grundlegendes Verständnis der Welt

der Pflanzen ist auch für Nichtbotaniker unabdingbar, um die oft kontrovers geführten Debatten über Themen der Pflanzenbiotechnologie und der Erhaltung der Biodiversität richtig einschätzen zu können. Der Mensch ist in vielfältiger Weise von Pflanzen abhängig. Diese Beziehungen und Abhängigkeiten werden in mehreren Kästen unter der Überschrift *Pflanzen und Menschen* näher beleuchtet.

Aufbau des Buches

Die Kapitel des Buches decken alle klassischen Themen ab, die üblicherweise in einem Botaniklehrbuch zu finden sind. Jedes Kapitel enthält mindestens einen Kasten zu einem der vier zentralen Themen des Buches (**Evolution, Biotechnologie, Biodiversitätsforschung und Pflanzen und Menschen**) sowie einen weiteren Infokasten mit dem Titel **Die wunderbare Welt der Pflanzen**, der die Studenten motivieren soll, mehr über Botanik zu lernen. Die vier zentralen Themen werden auch im Haupttext immer wieder aufgegriffen.

Das einführende Kapitel ist dazu gedacht, seines Inhalts wegen gelesen zu werden, und dient nicht als Zusammenfassung des Buches. Es behandelt die grundlegenden Unterscheidungsmerkmale von Pflanzen gegenüber anderen Lebensformen sowie die Bedeutung der Pflanzen für das Leben auf der Erde. Die wissenschaftliche Methodik wird anhand eines konkreten Beispiels – der Entdeckung des Phototropismus durch Charles Darwin – verdeutlicht. Der erste Teil (Kapitel 2 bis 6) trägt den Titel **Strukturen** und befasst sich mit der Anatomie von Zellen und Pflanzen. Die in diesem Teil vermittelten grundlegenden Kenntnisse über Pflanzenstrukturen sind für alle anderen Teilgebiete der Botanik von Bedeutung, doch je nach Vorgehensweise seines Dozenten kann der Leser diese Kapitel auch zunächst überspringen und erst später durcharbeiten. Innerhalb der Kapitel zur Anatomie wird in Kapitel 4 das primäre Wachstum von Sprossachsen und Wurzeln behandelt und in Kapitel 5 deren sekundäres Dickenwachstum. Durch diese Organisation lassen sich Dopplungen vermeiden, die entstehen würden, wenn man Sprossachsen und Wurzeln in separaten Kapiteln, jeweils mit Abschnitten über primäres und sekundäres Wachstum behandeln würde. Innerhalb der Kapitel werden Sprossachsen und Wurzeln jedoch separat behandelt, so dass auch Studenten, deren Dozenten diese Herangehensweise vorziehen, keine Probleme haben werden. Die grundlegenden Aspekte der Reproduktion

von Pflanzen wie Lebenszyklen, Strukturen von Zapfen, Blüten, Früchten und Samen werden in Kapitel 6 behandelt. Die Studenten werden also vertrauten Boden betreten, wenn sie später in den Kapiteln über Pflanzendiversität den verschiedenen Lebenszyklen begegnen.

Der zweite Teil des Buches, betitelt mit **Funktionen**, umfasst Kapitel über Biochemie, Photosynthese, Atmung und den Transport von Wasser und Nährstoffen innerhalb der Pflanze. Die Biochemie wird als Erstes behandelt (Kapitel 7), da das Wissen über die Moleküle von Pflanzen hilfreich für das Verständnis der Kapitel über Energetik und Physiologie ist.

Genetik, der dritte Teil des Buches, umfasst Kapitel über Genetik und Genexpression sowie ein Kapitel über Molekularbiologie (Kapitel 14). Die Molekularbiologie wird als eines der vier zentralen Themen des Buches auch in vielen anderen Kapiteln des Buches aufgegriffen, wobei die komplizierteren Sachverhalte nach Kapitel 14 eingeführt werden.

Der vierte Teil des Buches, **Das Pflanzenreich**, beinhaltet Kapitel über die Evolution und die Klassifikation sowie sieben Kapitel über Photosynthese betreibende Lebewesen und andere Organismen wie Pilze, die üblicherweise in Büchern über Botanik behandelt werden. Da die Prinzipien der Evolution fundamental für eine phylogenetische Betrachtungsweise von Lebewesen sind, werden diese vor den Kapiteln zur Diversität besprochen. Während Viren und Prokaryoten in einem gemeinsamen Kapitel behandelt werden, ist den Algen sowie jeder Gruppe der Landpflanzen ein separates Kapitel gewidmet, das jeweils die Unterscheidungsmerkmale der Gruppe besonders hervorhebt. Der letzte Teil beschäftigt sich mit **Ökologie**, wobei zunächst die Biosphäre als Ganzes und dann Ökosysteme betrachtet werden.

Didaktik

Jedes Kapitel beginnt mit einer einführenden Geschichte, die mit den im Kapitel behandelten Themen im Zusammenhang steht. In diesen einführenden Geschichten werden keine neuen Begriffe eingeführt; sie dienen lediglich dazu, das Interesse an den behandelten Themen zu wecken.

Die Schlüsselaussagen jedes Kapitels werden durch Grafiken und Fotos illustriert. Erläuternder Text ist, wann immer möglich, in den Grafiken selbst anstatt in der Bildunterschrift enthalten. Die Gestaltung des Hintergrunds wurde zugunsten eines Stils minimiert, der

die eigentlichen Kernelemente der Grafik betont. Dieses gestalterische Prinzip wird durch die freundliche, ansprechende Farbwahl unterstützt. Bei der Auswahl der Fotos wurden vor allem solche Themen berücksichtigt, von denen anzunehmen ist, dass sie für Studenten neu sind, oder die aus irgendeinem Grund besonders betont werden sollten.

An jedem Kapitelende finden sich eine **Zusammenfassung**, **Verständnisfragen** und **Diskussionsfragen** sowie Literaturhinweise. In einer speziellen Fragestellung unter der Überschrift **Zur Evolution** wird das zentrale Thema der Evolution aufgegriffen. Diese Fragen sollen Studenten dazu anregen, pflanzliches Leben unter dem Gesichtspunkt der Evolution zu betrachten. Die letzte Wiederholungsfrage jedes Kapitels erfordert von den Studenten jeweils eine zeichnerische Lösung und damit aktives Nachdenken über die Strukturen, die sie sehen.

Gutachter und Testleser

Ohne Rezensenten würde kein Manuskript in Form eines gedruckten Textes zur Reife gelangen. Ich bin außerordentlich dankbar für die klugen und wertvollen Kommentare meiner Kollegen, die an den verschiedensten Orten des Landes Botanik unterrichten. Außerdem danke ich den Studenten und Dozenten, die sich die Mühe gemacht haben, einige Kapitel des Buches hinsichtlich ihrer Eignung als studienbegleitender Text zu testen; ihre Rückmeldungen haben wesentlich zur Gestaltung des vorliegenden Materials beigetragen.

Gutachter

David Aborne, *University of Tennessee-Chattanooga*;
Richard Allison, *Michigan State University*;
Bonnie Amos, *Angelo State University*;
Martha Apple, *Northern Illinois University*;
Kathleen Archer, *Trinity College*;
Robert M. Arnold, *Colgate University*;
Ellen Baker, *Santa Monica College*;
Susan C. Barber, *Oklahoma City University*;
T. Wayne Barger, *Tennessee Tech University*;
Marilyn Barker, *University of Alaska, Anchorage*;
Linda Barnes, *Marshalltown Community College*;
Paul Barnes, *Texas State University San Marcos*;
Susan R. Barnum, *Miami University*;
Terese Barta, *University of Wisconsin-Stevens Point*;
Hans Beck, *Northern Illinois University*;

Donna Becker, *Northern Michigan University*;
Maria Begonia, *Jackson State University*;
Jerry Beilby, *Northwestern College*;
Tania Beliz, *College of San Mateo*;
Andrea Bixler, *Clarke College*;
Allan W. Bjorkman, *North Park University*;
Catherine Black, *Idaho State University*;
J. R. Blair, *San Francisco State University*;
Allan J. Bornstein, *Southeast Missouri State University*;
Paul J. Bottino, *University of Maryland College Park*;
Jim Brenneman, *University of Evansville*;
Michelle A. Briggs, *Lycoming College*;
Beverly J. Brown, *University of Arizona*;
Judith K. Brown, *Nazareth College of Rochester*;
Patrick J. P. Brown, *University of South Carolina*;
Beth Burch, *Huntington College*;
Marilyn Cannon, *Sonoma State University*;
Shanna Carney, *Colorado State University*;
Gerald D. Carr, *University of Hawaii*;
J. Richard Carter, *Valdosta State University*;
Youngkoo Cho, *Eastern New Mexico*;
Jung Choi, *Georgia Tech*;
Thomas Chubb, *Villanova University*;
Ross Clark, *Eastern Kentucky University*;
W. Dennis Clark, *Arizona State University*;
John Clausz, *Carroll College*;
Keith Clay, *Indiana University*;
Liane Cochran-Stafira, *Saint Xavier College*;
Deborah Cook, *Clark Atlanta University*;
Anne Fernald Cross, *Oklahoma Chapter Trustee*;
Billy G. Cumbie, *University of Missouri-Columbia*;
Roy Curtiss, *Washington University*;
Paul Davison, *University of North Alabama*;
James Dawson, *Pittsburg State University*;
John V. Dean, *DePaul University*;
Evan DeLucia, *University of Illinois at Urbana-Champaign*;
Roger del Moral, *University of Washington*;
Ben L. Dolbeare, *Lincoln Land Community College*;
Valerie Dolja, *Oregon State University*;
Tom Dudley, *Angelina College*;
Arri Eisen, *Emory University*;
Brad Elder, *University of Oklahoma*;
Inge Eley, *Hudson Valley Community College*;
Sherine Elsawa, *Mayo Clinic*;
Gary N. Ervin, *Mississippi State University*;
Elizabeth J. Esselman, *Southern Illinois University, Edwardsville*;

Frederick Essig, *University of South Florida*;
 Richard Falk, *University of California, Davis*;
 Diane M. Ferguson, *Louisiana State University*;
 Jorge F.S. Ferreira, *Southern Illinois University-Carbondale*;
 Lloyd Fitzpatrick, *University of North Texas*;
 Richard Fralick, *Plymouth State College*;
 Jonathan Frye, *McPherson College*;
 Stephen W. Fuller, *Mary Washington College*;
 Stanley Gemborys, *Hampden-Sydney College*;
 Patricia Gensel, *University of North Carolina*;
 Daniel K. Gladish, *Miami University*;
 David Gorchov, *Miami University*;
 Govindjee, *University of Illinois at Urbana-Champaign*;
 Mary Louise Greeley, *Salve Regina University*;
 Sue Habeck, *Tacoma Community College*;
 Kim Hakala, *St. John's River CC*;
 Michael Hansen, *Bellevue CC*;
 Laszlo Hanzely, *Northern Illinois University*;
 Suzanne Harley, *Weber State University*;
 Neil A. Harriman, *University of Wisconsin, Oshkosh*;
 Jill Haukos, *South Plains College*;
 Jeffrey Hill, *Idaho State University*;
 Jason Hoeksema, *University of Wisconsin, Oshkosh*;
 Scott Holaday, *Texas Tech University*;
 J. Kenneth Hoober, *Arizona State University*;
 Patricia Hurley, *Salish Kootenai College*;
 Stephen Johnson, *William Penn University*;
 Elaine Joyal, *Arizona State University*;
 Grace Ju, *Gordon College*;
 Walter Judd, *University of Florida*;
 Sterling C. Keeley, *University of Hawaii*;
 Gregory Kerr, *Bluefield College*;
 John Z. Kiss, *Miami University*;
 Kaoru Kitajima, *University of Florida*;
 Kimberley Kolb, *California State University, Bakersfield*;
 Ross Koning, *Eastern Connecticut State University*;
 Robert Korn, *Bellarmino College*;
 David W. Kramer, *Ohio State University*;
 Vic Landrum, *Washburn University*;
 Deborah Langsam, *University of North Carolina*;
 A. Joshua Leffler, *Utah State University*;
 David E. Lemke, *Texas State University-San Marcos*;
 Manuel Lerda, *State University of New York*;
 Alicia Lesnikowska, *Georgia Southwestern State University*;
 Gary Lindquister, *Rhodes College*;

John F. Logue, *University of South Carolina, Sumter*;
 Marshall Logvin, *South Mountain Community College*;
 A. Christina W. Longbrake, *Washington & Jefferson*;
 Steven Lynch, *Louisiana State University, Shreveport*;
 Linda Lyon, *Frostburg State University*;
 Carol C. Mapes, *Kutztown University of Pennsylvania*;
 Michael Marcovitz, *Midland Lutheran College*;
 Bernard A. Marcus, *Genesee Community College*;
 Diane Marshall, *University of New Mexico*;
 Tonya McKinley, *Concord College*;
 Laurence Meissner, *Concordia University at Austin*;
 Elliot Meyerowitz, *California Institute of Technology*;
 Mike Millay, *Ohio University*;
 David Mirman, *Mt. San Antonio College*;
 John Mitchell, *Ohio University*;
 L. Maynard Moe, *California State University, Bakersfield*;
 Clifford W. Morden, *University of Hawaii at Manoa*;
 Beth Morgan, *University of Illinois at Urbana-Champaign*;
 Dawn Neuman, *University of Las Vegas*;
 Richard Niesenbaum, *Muhlenberg College*;
 Gisele Miller-Parker, *Western Washington University*;
 Carla Murray, *Carl Sandburg College*;
 Terry O'Brien, *Rowan University*;
 Jeanette Oliver, *Flathead Valley Community College*;
 Clark L. Ovrebo, *University of Central Oklahoma*;
 Fatima Pale, *Thiel College*;
 Lou Pech, *Carroll College*;
 Charles L. Pederson, *Eastern Illinois University*;
 Carolyn Peters, *Spoon River College*;
 Ioana Popescu, *Drury University*;
 Calvin Porter, *Texas Tech University*;
 David Porter, *University of Georgia*;
 Daniel Potter, *University of California, Davis*;
 Mike Powell, *Sul Ross State University*;
 Elena Pravosudova, *Sierra College*;
 Barbara Raffail, *Georgetown College*;
 V. Raghavan, *Ohio State University*;
 Brett Reeves, *Colorado State University*;
 Bruce Reid, *Kean University*;
 Eric Ribbens, *Western Illinois University*;
 Stanley Rice, *Southeastern Oklahoma State University*;
 Steve Rice, *Union College*;
 Todd Rimkus, *Marymount University*;
 Michael O. Rischbieter, *Presbyterian College*;
 Matt Ritter, *Cal Poly San Luis Obispo*;

Laurie Robbins, *Emporia State University*;
 Wayne C. Rosing, *Middle Tennessee State University*;
 Rowan F. Sage, *University of Toronto*;
 Thomas Sarro, *Mount Saint Mary College*;
 Neil Schanker, *College of the Siskiyous*;
 Rodney J. Scott, *Wheaton College*;
 Bruce Serlin, *Depauw University*;
 Harry Shealy, *University of South Carolina*;
 J. Kenneth Shull, *Appalachian State*;
 Susan Singer, *Carleton College*;
 Don W. Smith, *University of North Texas*;
 James Smith, *Boise State University*;
 Steven Smith, *University of Arizona*;
 Nancy Smith-Huerta, *Miami University*;
 Teresa Snyder-Leiby, *SUNY New Paltz*;
 Frederick Spiegel, *University of Arkansas*;
 Amy Sprinkle, *Jefferson Community College*
Southwest;
 William Stein, *Binghamton University*;
 Chuck Stinemetz, *Rhodes College*;
 Steve Stocking, *San Joaquin Delta College*;
 Fengjie Sun, *University of Illinois at*
Urbana-Champaign;
 Marshall D. Sundberg, *Emporia State University*;
 Walter Sundberg, *Southern Illinois*
University-Carbondale;
 Andrew Swanson, *University of Arkansas*;
 Daniel Taub, *Southwestern University*;
 David Winship Taylor, *Indiana University Southeast*;
 Josephine Taylor, *Stephen F. Austin State University*;
 David J. Thomas, *Lyon College*;
 Stephen Timme, *Pittsburg State University*;
 Leslie Towill, *Arizona State University*;
 Gary Upchurch, *Southwest Texas University*;
 Staria S. Vanderpool, *Arkansas State University*;
 C. Gerald Van Dyke, *North Carolina State University*;
 Susan Verhoek, *Lebanon Valley College*;
 Beth K. Vlad, *Elmhurst College*;
 Tracy Wacker, *University of Michigan Flint*;
 Charles Wade, *C. S. Mott Community College*;
 D. Alexander Wait, *Southwest Missouri State*
University;
 Tom Walk, *Pennsylvania State University*;
 Patrick Webber, *Michigan State University*;
 Richard Whitkus, *Sonoma State University*;
 Donald Williams, *Park University*;
 Paula Williamson, *Southwest Texas University*;
 Dwina Willis, *Freed-Hardeman University*;
 MaryJo A. Witz, *Monroe Community College*;

Jenny Xiang, *North Carolina State University*;
 Rebecca Zamora, *South Plains College*.

Testleser

David Aborne, *James Madison University*;
 Ellen Baker, *Santa Monica College*;
 Susan Barnum, *Miami University*;
 Dr. Tania Beliz, *San Mateo College*;
 Catherine Black, *Idaho State University*;
 Jorge Ferreira, *Southern Illinois University*;
 Patricia Gensel, *University of North Carolina*;
 Dr. Michael Hanson, *Bellevue Community College*;
 Kim Hakala, *St. John's River Community College*;
 Davide Lemke, *Southwest Texas State University*;
 Brett Reeves, *Colorado State University*;
 Michael Rischbieter, *Presbyterian College*;
 Pat Webber, *Michigan State University*;
 Gerald Van Dayke, *North Carolina State University*;
 Rebecca Zammoraee, *South Plains College*.

Danksagung

Danken möchte ich Elizabeth Fogarty für die Inspiration und Unterstützung bei der grundsätzlichen Konzeption dieses Buches. Den Lektoren und Herstellern bei Benjamin Cummings gilt meine Hochachtung für ihre Fähigkeiten und ihre Professionalität. Ganz besonders möchte ich den Lektoren danken, die mich beim Schreiben dieses Buches unterstützt haben. Die Manuskriptlektoren John Burner und Matt Lee bewiesen ihr hervorragendes Talent als Wortkünstler und kreative Berater. Beide besitzen die seltene Gabe, komplizierte Konzepte in eine verständliche Sprache zu überführen. Die Grafikerin Carla Simmons entwickelte nicht nur mit dem Text gut abgestimmte Grafiken in hoher Qualität, sondern steuerte auch exzellente Ideen bei, wie Grafiken eingesetzt werden können, um die Lehrinhalte der Botanik verständlicher und interessanter zu machen. Travis Amos danke ich für seine rastlosen Bemühungen, die besten Fotos zu finden, sowie für die Bereitstellung schöner und einzigartiger Fotos aus seinem unerschöpflichen Vorrat an Möglichkeiten. Chalon Bridges half dem Buch auf vielfältige Weise, zuletzt im Bereich Akquise. Susan Minarcin verdient als verantwortliche Lektorin tiefen Dank für den oft so undankbaren Job, unser Tun immer wieder auf die Vision eines fertigen Buches zu fokussieren, dabei auch noch den Terminplan einzuhalten und die vielen, miteinander in Beziehung

stehenden Facetten eines Buchprojekts im Blick zu behalten. Kay Ueno hielt das gesamte Projekt als Leiterin der Buchentwicklung auf dem richtigen Kurs zwischen Idealismus und Realismus.

Die Assistentinnen Alexandra Fellowes und Alissa Anderson lieferten wertvolle Hilfe, oft in Form kurzer Anmerkungen, um das Projekt am Laufen zu halten. Ebenfalls danken möchte ich der Cheflektorin Erin Gregg und der Herstellungsleiterin Corinne Benson, der Grafikleiterin Donna Kalal und dem Marketingleiter Josh Frost für ihre harte Arbeit und ihre zahlreichen Beiträge. Mark Ong bin ich für das elegante, von ihm entworfene Design dankbar. Frau Professor Victoria E. McMillan und Herrn Professor Robert M. Arnold gilt mein Dank für die Beisteuerung der grafisch zu lösenden Aufgabenstellungen und der Fragen zur Evolution; ihre Aufmerksamkeit für Details habe ich sehr geschätzt. Danken möchte ich auch den Autoren der exzellenten Ergänzungsmaterialien zu diesem Buch; ihre harte Arbeit hat in starkem Maße dazu beigetragen, dass dieses Buch zu einem brauchbaren Unterrichtswerkzeug geworden ist. Lazlo Hanzley von der Northern Illinois University und Deborah Cook von der Clark Atlanta University danke ich für ihre exzellente Arbeit am Leitfaden für Dozenten. Robert Arnold und Victoria McMil-

lan gilt mein Dank für ihre Arbeit an der Klausuren-sammlung.

Mehrere Angehörige der Fakultät haben mir auf meinem Weg mit Ratschlägen, Fotos und schnellen Antworten auf meine unablässigen Fragen beigestanden. Zu diesen Menschen gehören insbesondere Dr. Jennifer Clevinger, Mr. Curtis Clevinger von der James Madison University, Dr. Paul Kugrens, Paul Lee und Brett Reeves von der Colorado State University sowie Dr. Conley McMullen.

Besonders danken möchte ich Sarah Javaid, Rianna Barnes und Pauline Adams, seit Kurzem Absolventen der James Madison University, für ihre über mehrere Jahre andauernde Hilfe. An der James Madison University danke ich außerdem Molly Brett Hunter sowie Jacqueline Brunetti, Melissa Spitler, David Evans und Sarah Jones. An der Colorado State University danke ich Heather Stevinson, Callae Frazer, Hillary Ball, Tiffany Sarrafian und Nicola Bulled für ihre unermessliche und wertvolle Unterstützung. An beiden Universitäten trugen Studenten meiner Kurse durch zahlreiche Anregungen und Ratschläge für den Entwurf mehrerer Kapitel zum Gelingen des Buches bei, weshalb ich auch ihnen an dieser Stelle meinen Dank aussprechen will.

Über den Autor

Murray W. Nabors lehrt seit über 30 Jahren Botanik. Er begann seine Dozentenlaufbahn an der University of Oregon und wechselte dann an die University of Santa Clara. 1972 ging er an die Colorado State University, wo er 27 Jahre lehrte, das Graduiertenprogramm leitete und stellvertretender Vorsitzender des Departments für Biologie war. Anschließend leitete Nabors vier Jahre lang das Department für Biologie an der James Madison University. Gegenwärtig leitet er das Department für Biologie an der University of Mississippi in Oxford.

Die Forschungsinteressen von Nabors gelten vor allem dem Einsatz der Biotechnologie zur Verbesserung der Toleranzeigenschaften von Nutzpflanzen. Unter seiner Leitung wurde sein Labor das führende in den USA, in dem Pflanzen mit erhöhter Salztoleranz aus Gewebekulturen gezogen werden. Seine gegenwärtige Forschung konzentriert sich auf die Isolierung von Genen, die die Fähigkeit von Zellkulturen erhöhen, sich zu vollständigen Pflanzen zu entwickeln.

Sein Engagement für seine Studenten und seine langjährige Erfahrung als Lehrender haben die Entstehung dieses Buches geprägt. Nabors hat mehr als 50 begutachtete wissenschaftliche Artikel veröffentlicht und zahlreiche Reports und Abstracts verfasst. Sein großes Interesse an der Schriftstellerei im Allgemeinen zeigt sich auch in der Veröffentlichung von Short Stories und einem Buch mit Weihnachtsgeschichten.



Vorwort zur deutschen Ausgabe

Das vorliegende Lehrbuch ist die deutsche Übersetzung des Buches *Introduction to Botany* von Murray W. Nabors. Die Entscheidung, es in deutscher Sprache herauszubringen, fiel vor allem aufgrund seines klaren und kompakten Aufbaus und der anschaulichen Darstellung aller wesentlichen botanischen Lehrinhalte des ersten Studienabschnitts. Der Aufbau folgt den gängigen Strukturen botanischer Lehrbücher: Nach einem allgemeinen Überblick werden in jeweils fünf Kapiteln die wichtigsten Pflanzenstrukturen und ihre Funktionen umfassend behandelt (Teile I und II). In Teil III werden sodann die genetischen und molekularen Grundlagen der Botanik gelegt, bevor im ausführlichen IV. Teil ein Durchgang durch alle wichtigen Teilbereiche der Pflanzenwelt erfolgt. Teil V schließt das Buch mit einem Blick auf biogeografische und ökologische Aspekte der Botanik ab. Besonderen Wert wird auf die molekularen Grundlagen der Pflanzenbiologie sowie auf die Anschaulichkeit der Darstellungen gelegt – ihr dienen nicht nur die zahlreichen farbigen, ästhetisch wie didaktisch ansprechenden Grafiken und Fotos, sondern auch die Akzentuierung besonders wichtiger Anwendungen botanischer Inhalte in besonderen „Feature“-Kästen zu den Themen *Biotechnologie*, *Biodiversitätsforschung*, *Evolution*, *Pflanzen und Menschen* sowie *Die wunderbare Welt der Pflanzen*. Jedes Kapitel wird zudem durch einen motivierenden Einleitungstext eröffnet; am Kapitelende finden sich eine Zusammenfassung, Übungsaufgaben in unterschiedlichen Schwierigkeitsgraden sowie eine Liste mit Hinweisen zur weiterführenden Lektüre.

Bei der deutschen Bearbeitung konnten gegenüber dem Original einige Kürzungen vorgenommen werden. Diese betrafen vor allem Stellen mit spezifisch US-amerikanischen Inhalten (häufig ökologischer Natur), die in der Lehre im deutschsprachigen Raum kaum eine Rolle spielen. Viele Beispiele aus der Originalausgabe wurden für die deutsche Fassung durch solche ersetzt, die den hiesigen Lesern aus der europäischen Pflanzenwelt vertrauter sein mögen; die Originalbeispiele

wurden hingegen dort belassen, wo sie didaktisch besonders wertvoll bzw. von ausgezeichneter illustrativer Qualität sind. Die Literaturhinweise wurden ebenfalls in diesem Sinne einer moderaten Anpassung an das deutsche Lesepublikum überarbeitet: Wertvolle Verweise auf englischsprachige Literatur wurden belassen, Entlegenes gestrichen, Hinweise auf einschlägige deutschsprachige Literatur wurde ergänzt. Auf diese Weise ist ein Buch entstanden, das seine Herkunft vom US-amerikanischen Buchmarkt weder verleugnen will noch kann, das gleichwohl aber gut auf die Erfordernisse des Lehrbetriebs im Fach Biologie im deutschsprachigen Raum abgestimmt ist.

Die nachfolgend genannten Kolleginnen und Kollegen waren bei der Erarbeitung der deutschsprachigen Ausgabe besonders hilfreich – ihnen sei an dieser Stelle ausdrücklich für ihre Mitarbeit gedankt: Dominik Begerow (Max-Planck-Institut für Terrestrische Mikrobiologie, Marburg) hat das Fachlektorat von Kapitel 19 (Pilze) übernommen und wesentliche Verbesserungsvorschläge eingebracht. Mein Kollege Anselm Kratochwil (Osnabrück) hat mich bei der Ausgestaltung des ökologischen Teils für die Übersetzung beraten. Christoph Neinhuis (Technische Universität Dresden), Hermann Bothe (Universität Köln), Hansjörg Groenert (Universität Koblenz), Nikolai Friesen (Universität Osnabrück), Matthias Görtz (Erlangen) und Andreas Held (Eberbach) haben Fotos und Grafiken zur Verfügung gestellt.

Dieses Buch verfügt über eine Companion Website mit zusätzlichen Materialien in elektronischer Form. Unter <http://www.pearson-studium.de> finden Dozenten alle Abbildungen aus dem Buch elektronisch zum Download. Studierenden werden hier das Glossar, Lösungen zu den Übungsaufgaben, weitere Aufgaben und Links angeboten.

Verlag und Bearbeiterin der Übersetzung freuen sich über Anregungen, kritische Verbesserungsvorschläge oder auch Lob von Lesern.

Osnabrück

Renate Scheibe



Über die Bearbeiterin der deutschen Ausgabe

Renate Scheibe studierte Pharmazie in München und erhielt 1973 die Approbation als Apothekerin. Im Anschluss daran fertigte sie eine Dissertation im Bereich Pflanzenphysiologie an den Universitäten München und Bayreuth an. In Bayreuth habilitierte sie sich dann am Lehrstuhl von Prof. Dr. Erwin Beck und erhielt die Lehrbefugnis für das Fach Botanik. Ihrem breiten Interesse an der Welt der Pflanzen kam entgegen, dass sie an zahlreichen Exkursionen in viele Länder des Mittelmeerraums, nach Australien und mehrfach auch an Expeditionen nach Ostafrika teilnahm, wo sie sich auch intensiv an den ökophysiologischen Forschungsarbeiten und an den Kartierungen der Vegetation der hochalpinen Regionen von Mt. Kenya, Kilimandjaro und anderer Vulkane beteiligte. In ihren eigenen Arbeiten beschäftigt sie sich seit Beginn ihrer Promotion mit den Mechanismen der Regulation des Chloroplasten-Stoffwechsels, insbesondere mit Redox-Prozessen in der belichteten Zelle, was bis heute ihre wissenschaftlichen Arbeiten prägt. Bei einem einjährigen Aufenthalt als Postdoc an der University of Illinois in Chicago verstärkte sich ihr Interesse an der Licht-/Dunkelregulation von Enzymen. Es sind insbesondere die Anpassungsfähigkeit des pflanzlichen Grundstoffwechsels und die dabei eingesetzten Regulationsprinzipien, die sie bis heute faszinieren. Seit 1990 hat sie die Professur für Pflanzenphysiologie am Fachbereich Biologie/Chemie an der Universität Osnabrück inne, wo sie die Arbeitsgruppe Pflanzenphysiologie leitet und die Pflanzenphysiologie in der Lehre vertritt. Außerdem übernahm sie Aufgaben der Selbstverwaltung als Dekan des Fachbereichs und als Direktorin des Botanischen Gartens der Universität sowie in zahlreichen inner- und außeruniversitären Fachgremien.



Die Pflanzenwelt

1

1.1	Die Bedeutung der Pflanzen	3
1.2	Merkmale von Pflanzen und Pflanzendiversität	11
1.3	Botanik und wissenschaftliche Methodik	16
	Zusammenfassung	21
	Verständnisfragen	23
	Diskussionsfragen	24
	Zur Evolution	24
	Weiterführendes	25

ÜBERBLICK

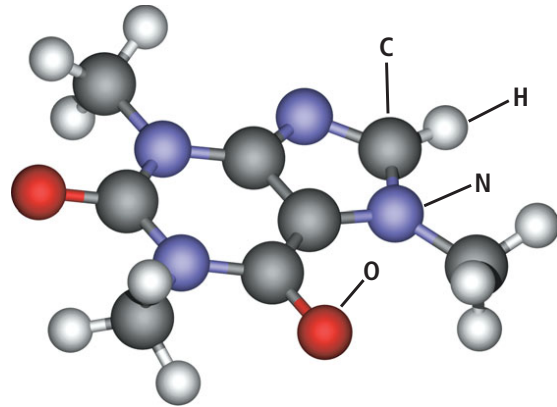


■ ■ In Seattle schlürft ein Börsenmakler eine Tasse Kaffee. In Tulsa trägt sich ein Raucher mit dem Gedanken, künftig die Finger von Zigaretten zu lassen. In einem Café in Denver erfreuen sich Studenten an Chips und Chilisauce. Im indonesischen Hochland schlucken Menschen Chinintabletten gegen Malaria, die in diesem Gebiet verbreitet ist. In einem Krankenhaus in Washington D.C. erhält ein Patient Vinblastin, ein starkes Medikament gegen Krebs. In New York City nimmt ein Allergiker ein Antihistamin, während ein paar Straßenzüge weiter die gleiche chemische Verbindung verwendet wird, um daraus Methamphetamin, eine gefährliche Straßendroge, herzustellen.

All diese Szenen haben eines gemeinsam: pflanzliche Verbindungen, die als Alkaloide bezeichnet werden. Es wurden über 12000 Alkaloide identifiziert, darunter so bekannte Substanzen wie Koffein, Nikotin, Kokain, Morphin, Strychnin, Chinin und Ephedrin. Alkaloide schrecken Fressfeinde der Pflanze ab, denn sie schmecken bitter oder sind giftig. In geringen Dosen wirken viele Alkaloide anregend auf das Nervensystem. Koffein zum Beispiel (dessen molekulare Struktur unten in der Grafik gezeigt wird) bewirkt, dass bestimmte Nervenimpulse andauern, die andernfalls inaktiv wären. Aber auch in diesem Fall macht die Dosis den Unterschied zwischen einem milden Stimulans und einem Gift. Beispielsweise können Insekten mit einer reichlichen Mahlzeit Kaffeeblätter eine letale Dosis Koffein aufnehmen. Ganz ähnlich kann eine kleine Menge Koffein eine wohltuende Wirkung auf einen Menschen haben, aber zu viel davon kann schädlich oder sogar tödlich sein.

Selbstverständlich sind Koffein und andere Alkaloide nur ein paar wenige Beispiele dafür, wie Pflanzen unser tägliches Leben beeinflussen. Koffein dient lediglich als Stimulans, doch wir alle sind in wirklich fundamentaler Weise von Pflanzen abhängig – ohne sie könnten wir nicht überleben. Wenn alle Pflanzen auf der Erde plötzlich sterben würden, dann würden ihnen sehr bald alle Tiere einschließlich des Menschen folgen. Würden dagegen alle Tiere aussterben, dann wären die Pflanzen ohne Weiteres überlebensfähig. Warum sind Menschen und Tiere derart abhängig von Pflanzen und warum ist dies umgekehrt nicht der Fall? Dieses Kapitel wird hierauf eine Antwort geben. Es bietet außerdem einen Überblick über die Vielfalt pflanzlichen Lebens und die Bedeutung der Botanik. ■ ■

Selbstverständlich sind Koffein und andere Alkaloide nur ein paar wenige Beispiele dafür, wie Pflanzen unser tägliches Leben beeinflussen. Koffein dient lediglich als Stimulans, doch wir alle sind in wirklich fundamentaler Weise von Pflanzen abhängig – ohne sie könnten wir nicht überleben. Wenn alle Pflanzen auf der Erde plötzlich sterben würden, dann würden ihnen sehr bald alle Tiere einschließlich des Menschen folgen. Würden dagegen alle Tiere aussterben, dann wären die Pflanzen ohne Weiteres überlebensfähig. Warum sind Menschen und Tiere derart abhängig von Pflanzen und warum ist dies umgekehrt nicht der Fall? Dieses Kapitel wird hierauf eine Antwort geben. Es bietet außerdem einen Überblick über die Vielfalt pflanzlichen Lebens und die Bedeutung der Botanik. ■ ■



Die Bedeutung der Pflanzen

1.1

Das Wort *Botanik* kommt von dem griechischen Wort für „Pflanze“. Woran denken Sie, wenn Sie das Wort *Pflanze* hören – vielleicht an Bäume, den Wald, Blätter, Blumen, Obst, Gemüse und Getreide? Wenn man Sie bitten würde zu definieren, was eine Pflanze ist, dann würden Sie vielleicht sagen, dass sie ein Lebewesen ist, das gewöhnlich grün aussieht, sich typischerweise nicht von anderen Lebewesen ernährt und zwar wächst, sich aber nicht von einem Ort zum anderen bewegt. Wie Sie sich denken können – und wie Sie in diesem Kapitel noch sehen werden – ist eine wissenschaftliche Definition formaler und nicht ganz so einfach. Dennoch können die genannten Merkmale als eine sehr allgemeine, grobe Definition des Begriffs der Pflanze dienen, sei es ein Strauch, Baum, Weinstock, Farn, Kaktus oder irgendeine andere Pflanze.

Weil Pflanzen ein sehr vertrauter Teil unserer Umgebung sind, denken wir nicht weiter darüber nach, was Pflanzen einzigartig macht oder warum sie von so vitaler Bedeutung für das menschliche Leben sind. Warum brauchen wir die Pflanzen, um zu überleben, und warum kommen sie ohne uns aus? Der Grund ist die Photosynthese. Die **Photosynthese** ist jener Prozess, bei dem Pflanzen und bestimmte andere Lebewesen die Energie der Sonne nutzen, um ihre eigene Nahrung herzustellen, indem sie Kohlendioxid und Wasser in Kohlenhydrate umwandeln, welche die Lichtenergie als chemische Energie speichern. Tiere und andere Lebewesen, die nicht in der Lage sind, ihre eigene Nahrung herzustellen, können nur existieren, weil Pflanzen ihnen direkt oder indirekt Nahrung liefern. Kapitel 8 behandelt die Photosynthese und beantwortet dabei auch die Frage, warum Pflanzen im Allgemeinen grün aussehen.

Die Bedeutung der Photosynthese für das Leben auf der Erde

Fast das gesamte Leben auf der Erde hängt vom Wasser und der Sonnenenergie ab. Allerdings können nur Pflanzen, Algen und bestimmte Bakterien diese Quellen unmittelbar für ihr Überleben nutzen. Aus Sonnenlicht, Kohlendioxid, Wasser und einigen wenigen Mineralien kann eine Pflanze selbst ihre Nahrung produzieren, aber kein Tier kann von diesen Stoffen leben.

Selbst mit einem unbegrenzten Vorrat an Wasser könnte ein Mensch nur ein paar Wochen überleben. Dagegen macht die Photosynthese Pflanzen und andere Photosynthese betreibende Organismen zu solargetriebenen Lebensmittelfabriken. Fast ein Viertel der rund 1,5 Millionen bekannten existierenden Arten führt Photosynthese durch. Die meisten davon sind Pflanzen, Algen und Bakterien, weshalb diese Organismen eine zentrale Rolle in der **Biosphäre** spielen, jener dünnen Schicht aus Luft, Land und Wasser, die von Lebewesen besiedelt ist. Pflanzen sind die wichtigsten Photosynthese betreibenden Landlebewesen. Algen, deren Vielfalt von mikroskopisch kleinen Lebewesen bis zu Seetang reicht, tragen zur Photosynthese im Wasser bei; daneben führen auch einige Bakterien Photosynthese durch.

Die Photosynthese hat für das Leben auf der Erde in dreierlei Hinsicht Bedeutung:

- 1 Wissenschaftler glauben heute, dass die Photosynthese fast den gesamten Sauerstoff der Erde produziert. Bei der Photosynthese spalten Pflanzen Wassermoleküle (H_2O) und erzeugen Sauerstoff (O_2). Die meisten Lebewesen einschließlich Pflanzen und Tieren benötigen Sauerstoff, um sich die in der Nahrung gespeicherte Energie verfügbar zu machen.
- 2 Fast alle Lebewesen erhalten ihre Energie direkt oder indirekt aus der Photosynthese. Tiere und die meisten anderen Lebewesen, die keine Photosynthese durchführen, erhalten ihre Energie, indem sie entweder Pflanzen oder andere Tiere fressen, die ihrerseits Pflanzen fressen. Daher ist eine Pflanze oder ein anderes Photosynthese betreibendes Lebewesen der Ausgangspunkt jeder **Nahrungskette**, d. h. jeder Folge von Nahrungstransporten von einem Lebewesen zu einem anderen, ausgehend von einem Lebewesen, das Nahrung produziert (► Abbildung 1.1). Ein Beispiel für eine Nahrungskette ist ein Puma, der ein Reh frisst, das seinerseits Gras gefressen hat. Als Organismen, die ihre eigene Nahrung produzieren, werden Pflanzen und andere Photosynthese betreibende Lebewesen als **Primärproduzenten** bezeichnet. Als direkte oder indirekte Grundlage auf allen Verbraucherebenen bilden Primärproduzenten die Ausgangsbasis jeder Nahrungskette. Auf dem Land sind Pflanzen die Primärproduzenten, im Wasser Algen und Photosynthese betreibende Bakterien.
- 3 Die durch die Photosynthese hergestellten Kohlenhydrate sind die Bausteine des Lebens. Pflanzen produzieren durch Photosynthese Zucker und ver-

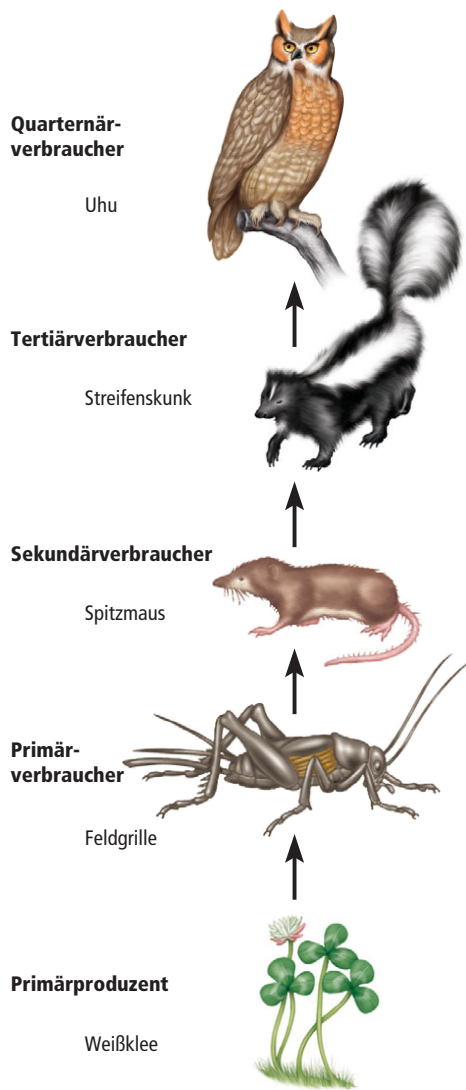


Abbildung 1.1: Nahrungskette. Dieses Beispiel einer Nahrungskette in einem terrestrischen Ökosystem umfasst vier Ebenen. Manche Nahrungsketten besitzen weniger Verbraucherebenen, doch in jedem Fall bilden Pflanzen das Fundament.

wandte Moleküle. Außer dem Kohlenstoff aus der Luft werden in diesen Prozessen auch Stickstoff und Schwefel sowie die anderen Bodenmineralien in eine Vielzahl von organischen Verbindungen eingebaut. Die Pflanze verwendet diese Verbindungen für ihren Aufbau und die in ihr ablaufenden physiologischen Vorgänge. Durch das Fressen von Pflanzen (oder Tieren, die Pflanzen fressen) führen sich Tiere jene Verbindungen zu, die ursprünglich durch Photosynthese erzeugt wurden, und verwenden sie für ihren eigenen Aufbau.

Da die Photosynthese den Sauerstoff liefert, den wir atmen, die Nahrung, die wir essen, und all die Moleküle,

aus denen wir bestehen, kann man sagen, dass wir alle solargetriebene Lebewesen sind. Ohne Photosynthese wäre Leben auf der Erde nur sehr eingeschränkt möglich, wenn nicht gar unmöglich.

Pflanzen als Nahrungsquelle

Die Menschen waren ursprünglich umherziehende Jäger und Sammler, die dem mit den Jahreszeiten wechselnden Angebot an Nahrung folgten. Sie aßen fast alles, was sie finden, aufspüren, ausgraben, pflücken oder töten konnten. Von diesem Erbe zeugt unser Gebiss mit seinen großen Backenzähnen zum Zermahlen und Kauen sowie den schärferen Eckzähnen zum Beißen und Abreißen. Vor ca. 14.000 bis 12.000 Jahren gingen einige Gruppen von Menschen dazu über, das ganze Jahr über am gleichen Ort zu leben, Getreide zu kultivieren und Tiere als Nahrungslieferanten zu halten, so dass sie nicht mehr allein vom wechselnden Angebot der Natur abhängig waren. Die Domestizierung von Pflanzen und Tieren geschah an vielen verschiedenen Orten und auf unterschiedliche Weise. Als in diesen Gebieten Städte entstanden, die von der Landwirtschaft abhängig waren, wurde diese zu einer Grundlage der menschlichen Zivilisation und ermöglichte die Entwicklung von Kultur, Kunst und staatlichen Organisationen (► Abbildung 1.2).

Frühe Bauern stellten fest, dass sich manche Nahrungspflanzen mit größerem Erfolg kultivieren ließen als andere. Durch Versuch und Irrtum lernten sie, wie man die Samen ernten und fürs nächste Jahr aufbewahren konnte, wann die beste Zeit zum Pflanzen war und wie die Pflanzen für eine möglichst gute Ernte gepflegt werden mussten. Sie beobachteten, dass bestimmte Individuen einer Pflanzenart besser wuchsen als andere. Im Lauf der Zeit gingen sie dazu über, die Samen dieser Pflanzen aufzubewahren und auszusäen, und wurden so zu den ersten Pflanzenzüchtern.

Die Pflanzenzüchtung ist heute ein anerkanntes Studienfach und Regierungen fördern Forschungsarbeiten zur Erhöhung von Ernteerträgen (► Abbildung 1.3). Pflanzenzüchter konzentrieren sich in der Regel darauf, eine bestimmte Nutzpflanze für ihre Region besser geeignet zu machen. Beispielsweise suchen Weizenzüchter aus den nördlichen Regionen nach Pflanzen, die möglichst schnell wachsen, da dort die Vegetationsperiode kurz ist. Außerdem sind sie an Pflanzen interessiert, die resistent sind gegen starke Winde, Trockenheit und häufig vorkommende Krankheiten.



Abbildung 1.2: Frühe Landwirtschaft. Dieses Wandgemälde aus einem ägyptischen Grab (ca. 1500 v. Chr.) zeigt Bauern, die Sicheln benutzen, um Getreide zu schneiden.



Abbildung 1.3: Moderne Pflanzenzucht. Reis ist eine besonders wichtige Nahrungsquelle. Deshalb wird intensiv daran geforscht, die Erträge, die Qualität der Nährstoffe und die Widerstandsfähigkeit gegen Krankheiten zu erhöhen.

Obwohl viele Wildpflanzen kultiviert wurden, stammt der größte Teil der menschlichen Nahrung von einigen wenigen Anbaufrüchten – vor allem Mais, Reis und Weizen. Mais, der vermutlich ursprünglich in Mexiko beheimatet war, wurde die wichtigste Nutzpflanze in Nord- und Südamerika, während Reis aus Asien stammt und dort die vorherrschende Nutzpflanze ist. Weizen

wurde zuerst in Zentralasien kultiviert und ist die wichtigste Nutzpflanze in Europa, Zentralasien, Teilen Nordamerikas und in Afrika. Die Körner von Mais, Reis und Weizen sind reich an Nährstoffen und in trockener Umgebung gut zu lagern. Insgesamt werden 80 Prozent der menschlichen Kalorienaufnahme durch nur sechs Nutzpflanzen abgedeckt: Weizen, Reis, Mais, Kartoffeln, Maniok und Süßkartoffeln. Weitere acht Nutzpflanzen tragen einen erheblichen Teil zu den verbleibenden 20 Prozent bei: Bananen, Bohnen, Sojabohnen, Hirse, Gerste, Kokosnüsse, Zuckerrohr und Zuckerrüben.

Pflanzen sind nicht nur unsere Hauptnahrungsquelle, sondern auch die Grundlage für viele Getränke. Alkoholische Getränke wie Wein und Bier werden aus zuckerhaltigen Pflanzenteilen hergestellt, Kaffee aus Kaffeebohnen, den Steinfrüchten der Kaffeepflanze (*Coffea arabica*), und Tee aus den Blättern der Tee-pflanze (siehe den Kasten *Pflanzen und Menschen* auf Seite 6). Aus Mais und anderen Pflanzen gewonnener Sirup mit hohem Fruchtzuckergehalt dient als Süßungsmittel für alkoholfreie Getränke.

Getrocknete Kräuter und Gewürze werden bei der Zubereitung von Speisen und als Arzneimittel verwendet. Der Begriff *Gewürz* bezieht sich meist auf getrocknete Teile tropischer oder subtropischer Pflanzen, z. B. Zimt, Nelken, Ingwer und Schwarzer Pfeffer (siehe den Kasten *Die wunderbare Welt der Pflanzen* auf

PFLANZEN UND MENSCHEN

■ Ein Schlückchen Teegeschichte

Tee ist reich an Koffein und macht in geringem Maße süchtig. Er ist das beliebteste Getränk der Welt. Er stammt ursprünglich aus China, wo er bereits vor 5000 Jahren getrunken wurde. Der Legende nach beobachtete der Kaiser Shennong, wie Teeblätter zufällig in kochendes Wasser fielen. Neugierig bat er darum, kosten zu dürfen – und der Tee war geboren.

Nachdem er in den 1580er-Jahren in Europa eingeführt worden war, wurde der Tee bald enorm populär. Mitte des 17. Jahrhunderts beherrschte Großbritannien, das damals eine überlegene Kriegsflotte besaß, den europäischen Teemarkt. Anfang des 19. Jahrhunderts war Tee so beliebt geworden, dass die Briten begannen, aus Indien Opium einzuführen, um es nach China zu verkaufen und dafür dort Tee und andere beliebte chinesische Produkte wie Seide und Porzellan einzukaufen.

Auch in den amerikanischen Kolonien war Tee sehr beliebt. Die Amerikaner umgingen das britische Monopol, indem sie in China Tee gegen Opium aus dem Osmanischen Reich tauschten. Mitte des 18. Jahrhunderts forcierte wegen der britischen Importsteuern der Teeschmuggel in den Kolonien. Um die Schmuggler zu demotivieren, senkte Großbritannien die Steuern. Allerdings behielten die Briten eine niedrige Steuer bei, um ihr Recht zu unterstreichen, dass sie von den Kolonisten Steuern erheben durften. Diese Entscheidung löste 1773 die als „Boston Tea Party“ in die Geschichte eingegangenen Proteste aus, eines der Ereignisse, die zum amerikanischen Unabhängigkeitskrieg führten. Britischer Tee wurde boykottiert, und schließlich wurde Kaffee zum beliebtesten Getränk der Amerikaner.

Jahrhundertlang gedieh die Teepflanze nur in China und wurde von den Chinesen sorgsam behütet. Dann aber, in den 1840er-Jahren, schmuggelte der schottische Botaniker Robert Fortune Samen der Teepflanze aus China heraus. Die Teepflanze (*Camellia sinensis*, oben im Bild), die nun in 25 Ländern wächst, benötigt ein feuchtwarmes Klima und sauren Boden, der reich an organischen Stoffen ist.



Da die Blätter von Hand gepflückt werden, ist die Ernte sehr arbeitsaufwändig.

Im frühen 20. Jahrhundert gab es zwei Neuheiten, was den Teekonsum anbelangt. Auf der Weltausstellung 1904 in St. Louis kam ein Teeplantagenbesitzer auf die Idee, Eis in seine Kostproben zu werfen, was angesichts des außergewöhnlich heißen Sommers sehr großen Anklang fand. Damit war der Eistee erfunden. Im Jahr 1908 wurden erstmals Teebeutel verwendet.

Heute ist der größte Teil des in der westlichen Welt verkauften Tees Schwarzer Tee, also Tee, bei dem die Blätter vor dem Rösten fermentiert werden. Beim Rösten wird der Feuchtigkeitsgehalt der Blätter von 45 auf 5 Prozent reduziert. Grüner Tee wird eher im asiatischen Raum bevorzugt, hält aber auch im Westen Einzug. Beim Grünen Tee werden die Blätter nicht fermentiert. Außerdem gibt es Kräuter- und Früchtetees, die aus Blüten, Beeren, Wurzeln, Samen oder Blättern anderer Pflanzen hergestellt werden. Diese Tees sind in der Regel koffeinfrei und weisen eine überraschende Vielfalt von Geschmacksrichtungen auf.



Seite 8). Zu den häufig verwendeten Kräutern gehören Majoran, Minze, Petersilie, Rosmarin, Salbei und Thymian.

Pflanzliche Arzneimittel

Schon im Altertum bemerkten die Menschen, dass Pflanzen die Symptome vieler Krankheiten lindern können. Beispielsweise kann ein Aufguss aus der Rinde der Weide gegen Kopfschmerzen helfen. Wie wir heute wis-

sen, enthält Weidenrinde Salicylsäure. Diese ist in ihrer chemischen Struktur der Acetylsalicylsäure – besser bekannt unter dem Markennamen Aspirin – sehr ähnlich. Über Jahrhunderte wurde Wissen dieser Art mündlich überliefert und von Naturforschern zusammengetragen, die Pflanzen sammelten. Im 16. Jahrhundert entstanden die ersten *Kräuterbücher*, in denen die Verwendungszwecke von Pflanzen aufgelistet waren und die den Versuch unternahmen, Pflanzen zu klassifizieren und wissenschaftlich zu benennen. Dies war ein nütz-

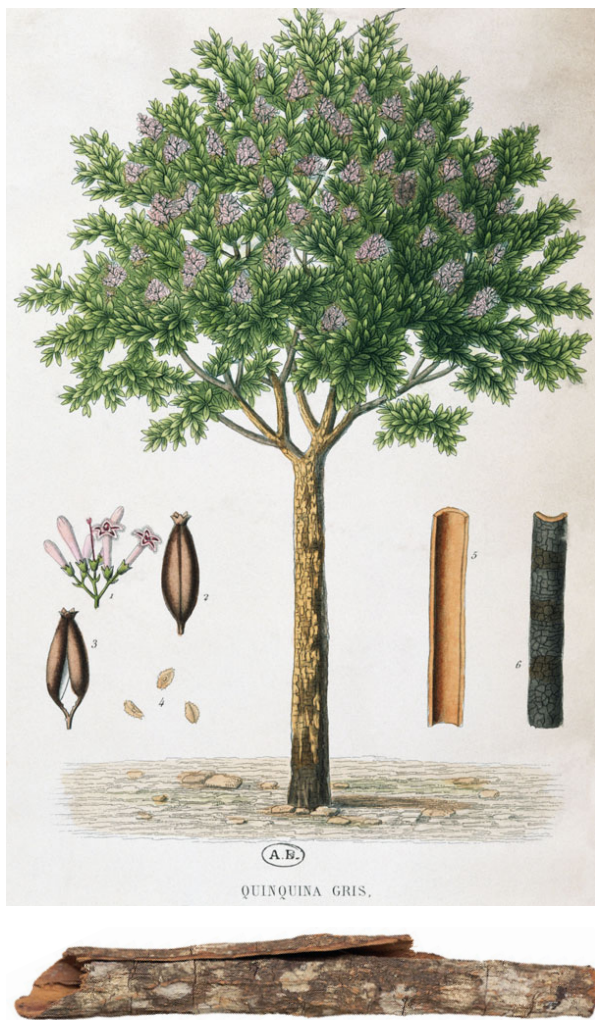


Abbildung 1.4: Der Chinarindenbaum und das Chinin. Chinarinde wurde von den Ureinwohnern der Anden gegen eine ganze Reihe von Krankheiten verwendet. Die spanischen Eroberer beobachteten dies, was zur Entdeckung des Chinins als Mittel gegen die Malaria führte.

liches Unterfangen, denn eine bestimmte Pflanze kann viele Trivialnamen haben.

Als sich im 18. und 19. Jahrhundert die moderne Chemie entwickelte, wurden Pflanzenextrakte, die Alkaloide und andere nützliche Verbindungen enthalten, leichter verfügbar. Eine besonders wichtige Rolle in der Geschichte der Menschheit spielte das Alkaloid Chinin. Im späten 17. Jahrhundert erkannten Ärzte, dass die Chinarinde und das aus ihr extrahierte weiße Chininpulver zur Behandlung von Malaria verwendet werden kann (► Abbildung 1.4). Trotz des weit verbreiteten Einsatzes von Chinin und verwandten Medikamenten gehört die Malaria auch heute noch zu den weltweit verheerendsten Krankheiten. In tropischen Ländern fallen ihr jedes Jahr zwischen einer und drei Millionen

Menschen zum Opfer, die meisten davon Kinder. Ein weiteres häufig verwendetes Alkaloid ist Ephedrin. Es wird aus den Sträuchern der Gattung *Ephedra* gewonnen und ist ein starkes Antihistamin. Alkaloide können auch die Physiologie von Tieren beeinflussen, indem sie die Zellteilung stören. Wissenschaftlern ist es gelungen, mithilfe zweier Alkaloide des Madagaskar-Immergrüns (*Catharantus roseus*), Vinblastin und Vincristin, die Teilung von Tumorzellen zu stören und Zellen abzutöten. Tausende weitere Pflanzenprodukte sind für die Humanmedizin von Bedeutung. In den USA enthalten etwa 25 Prozent aller ausgestellten Rezepte mindestens ein Produkt, das von Pflanzen stammt.

Pflanzen – Brennstoff, Baumaterial und Rohstoff für Papiererzeugnisse

Bei manchen mehrjährigen Pflanzen entwickeln sich die Stängel zu holzigen Stämmen, die viele Meter hoch werden können. Das, was wir als Holz bezeichnen, sind im Wesentlichen tote Zellen, die dafür sorgen, dass die Stämme bestimmter holziger Pflanzen sehr dick und hoch werden können.

Holz ist nach wie vor der wichtigste Brennstoff zum Kochen und Heizen, da ein großer Teil der Weltbevölkerung kaum mit Elektrizität und fossilen Brennstoffen wie Petroleum, Kohle und Erdgas versorgt ist. Fossile Brennstoffe sind selbst Pflanzenprodukte, die über Hunderte Millionen von Jahren aus fossilen Pflanzenüberresten gebildet wurden.

Holz ist auch noch immer das wichtigste Baumaterial; es wird u. a. bei den meisten Wohnhäusern und vielen anderen Gebäuden für den Dachstuhl verwendet. Selbst Stahlkonstruktionen beruhen indirekt auf Pflanzen, denn die Schmelzöfen, in denen aus Eisen Stahl hergestellt wird, werden vor allem mit fossilen Brennstoffen betrieben.

Ein weiteres wichtiges Pflanzenprodukt, das aus einer Reihe von Pflanzen hergestellt werden kann, ist Papier. Das meiste Papier, das wir verwenden, wird aus Zellstoff hergestellt, der aus holzigen Pflanzen wie Fichten und Kiefern gewonnen wird.

Dies sind nur einige wenige Beispiele für nützliche Pflanzenprodukte, abgesehen davon natürlich, dass sie unsere grundlegende Nahrungs- und Sauerstoffquelle sind. Überall in diesem Buch, im Haupttext sowie in den Kästen *Pflanzen und Menschen*, werden uns weitere Beispiele dafür begegnen, wie Pflanzen das Leben der Menschen beeinflussen.

DIE WUNDERBARE WELT DER PFLANZEN

■ Schwarzer Pfeffer: Die Rettung für verderbliches Fleisch

Es mag Sie überraschen zu hören, dass die Besiedlung Amerikas durch die Europäer ihre Ursache nicht zuletzt in der Suche nach Schwarzem Pfeffer und anderen Gewürzen hatte. Schwarzer Pfeffer entsteht aus den getrockneten Früchten des Strauches *Piper nigrum*, der an der Malabarküste im Südwesten Indiens heimisch ist. Die Früchte sind grün und im Inneren weiß. Der schwarze Belag der schwarzen Pfefferkörner wird durch Pilze bewirkt.

Warum war Pfeffer für die Europäer so wichtig? Als es noch keine Kühlschränke gab, wurde Salz zum Konservieren von Fleisch verwendet. Es hielt Bakterien und Pilze fern, doch leider machte es das Fleisch auch ziemlich ungenießbar. Das Hinzufügen von Gewürzen wie Schwarzem Pfeffer machte gesalzenes Fleisch schmackhaft, weshalb Seeleute oft ein kleines Säckchen mit Pfefferkörnern bei sich trugen.

Im Mittelalter brachten Kaufleute über die Handelsrouten Mittelasiens Gewürze aus Asien nach Europa.



1000 Jahre lang begaben sich Kamelkarawanen, beladen mit Schwarzem Pfeffer, Nelken, Zimt, Muskat, Ingwer und anderen Gewürzen, auf diese Reise. Seit dem Jahr 1470 jedoch blockierten die Türken die Handelswege auf dem Land, weshalb die Europäer auf See nach einer alternativen Route suchten, über die sie Asien erreichen könnten.

Christoph Kolumbus gelang es, am spanischen Hof finanzielle Unterstützung für die Suche nach einer neuen Route nach China und Indien zu bekommen. Als er die Karibik erreichte, war er der Meinung, dass es sich um Inseln vor der Küste Indiens handelte, und bezeichnete die Einwohner deshalb als „Indianer“. Zwar fand er keinen Schwarzen Pfeffer, dafür aber scharf schmeckende Früchte, die später „Spanischer Pfeffer“ oder Paprika genannt wurden. Die Pflanze ist allerdings nicht mit dem Schwarzen Pfeffer verwandt, sondern gehört zur Gattung *Capsicum*.

der verschwunden; an ihrer Stelle befinden sich Städte, landwirtschaftliche Nutzflächen oder andere Objekte für die Aktivitäten der Menschen. Große Teile des Regenwaldes werden durch Brandrodungen vernichtet. Der Wald wird abgeholzt, um das Land für ein paar Jahre als Anbaufläche zu nutzen, bis die Nährstoffe erschöpft sind. Dann wird das Land wieder aufgegeben. In Anbetracht der Bedeutung der Pflanzen für den Menschen ist es erschreckend, dass menschliche Aktivitäten, ganz besonders die Zerstörung der tropischen Regenwälder, das Aussterben einer großen Anzahl von Pflanzen- und Tierarten verursachen. Die Schätzungen des Ausmaßes des Artensterbens weisen eine erhebliche Schwankungsbreite auf. In seinem Buch *The Diversity of Life* (auf Deutsch erschienen unter dem Titel *Der Wert der Vielfalt*) gibt der Biologe Edward O. Wilson die konservative Schätzung von 2700 aussterbenden Arten pro Jahr an. Andere Wissenschaftler schätzen, dass zwischen 1990 und 2020 fünf bis 40 Prozent aller existierenden Arten aussterben, darunter auch viele Pflanzen, die für Arzneimittel wichtige Verbindungen von unschätzbarem Wert enthalten. 20 Prozent aller tropischen und subtropischen Pflanzenarten sind möglicherweise schon zwischen 1952 und 1992 ausgestorben. Das Thema Biodiversitätsforschung wird uns in diesem

Biodiversitätsforschung

Weil Pflanzen so vieles von dem liefern, was wir brauchen, müssen wir sicherstellen, dass es ausreichend viele von ihnen gibt und für uns wertvolle Pflanzen nicht aussterben. Wir sind die Pfleger und Verwalter der Ressourcen der Erde. Die **Biodiversitätsforschung** ist ein wichtiges interdisziplinäres Forschungsgebiet, das sich mit den Möglichkeiten befasst, der Auslöschung von Arten und dem Verlust von gefährdeten Lebensräumen entgegenzutreten. Sie untersucht den Einfluss menschlicher Aktivitäten auf alle Aspekte der Umwelt und sucht nach weniger umweltzerstörenden Alternativen für das Roden von Bäumen, den Bau von Städten und allgemein für den Umgang mit den biologischen Ressourcen der Biosphäre wie den Wäldern. Die große und immer schneller wachsende Weltbevölkerung hat wesentlich schneller Holz verbraucht, als nachwachsen kann. Es kommt daher nicht überraschend, dass Holz immer teurer wird, je mehr es dahinschwindet. In den USA wird etwa die Hälfte der jährlichen Holzernte für die Herstellung von Papier verwendet, das größtenteils nicht wiederverwendet wird.

Es existieren nur noch wenige Urwälder, die meisten davon in Nationalparks und privaten Naturparks. Weltweit ist etwa die Hälfte der ursprünglichen Wäl-

der verschwunden; an ihrer Stelle befinden sich Städte, landwirtschaftliche Nutzflächen oder andere Objekte für die Aktivitäten der Menschen. Große Teile des Regenwaldes werden durch Brandrodungen vernichtet. Der Wald wird abgeholzt, um das Land für ein paar Jahre als Anbaufläche zu nutzen, bis die Nährstoffe erschöpft sind. Dann wird das Land wieder aufgegeben. In Anbetracht der Bedeutung der Pflanzen für den Menschen ist es erschreckend, dass menschliche Aktivitäten, ganz besonders die Zerstörung der tropischen Regenwälder, das Aussterben einer großen Anzahl von Pflanzen- und Tierarten verursachen. Die Schätzungen des Ausmaßes des Artensterbens weisen eine erhebliche Schwankungsbreite auf. In seinem Buch *The Diversity of Life* (auf Deutsch erschienen unter dem Titel *Der Wert der Vielfalt*) gibt der Biologe Edward O. Wilson die konservative Schätzung von 2700 aussterbenden Arten pro Jahr an. Andere Wissenschaftler schätzen, dass zwischen 1990 und 2020 fünf bis 40 Prozent aller existierenden Arten aussterben, darunter auch viele Pflanzen, die für Arzneimittel wichtige Verbindungen von unschätzbarem Wert enthalten. 20 Prozent aller tropischen und subtropischen Pflanzenarten sind möglicherweise schon zwischen 1952 und 1992 ausgestorben. Das Thema Biodiversitätsforschung wird uns in diesem

Buch oft begegnen; ihm sind mehrere Kästen sowie der Abschnitt 25.4 gewidmet.

Grüne Biotechnologie

Bereits in vorgeschichtlicher Zeit haben Menschen nach besseren Pflanzen gesucht, um ihre Bedürfnisse besser befriedigen zu können. Die Botanik als Wissenschaft hat sich aus der grundlegenden Wissbegierde in Bezug auf jene Lebewesen entwickelt, die für unser Überleben so notwendig sind. In der **Pflanzenbiotechnologie** bemühen sich Forscher, mithilfe molekularbiologischer Methoden verbesserte Pflanzen und Pflanzenprodukte zu erhalten. In einem weiter gefassten Sinne haben derartige Bestrebungen eine lange Geschichte. Sie reicht zurück bis zu den ersten Bauern, die mit verschiedenen Samen experimentierten. Die moderne Biotechnologie ist ein interdisziplinäres Gebiet, das auf der Chemie und der Biologie fußt (siehe den Kasten *Biotechnologie* auf Seite 10).

Wie alle Lebewesen enthalten Pflanzen Erbinformationen in Form von **DNA (Desoxyribonucleinsäure)**. Spezifische DNA-Abschnitte, die Erbinformation tragen, werden als **Gene** bezeichnet. Die Gene bestimmen die körperlichen Merkmale eines Organismus. In den letzten Jahren ist es Wissenschaftlern gelungen, Gene zu übertragen und so zu verändern, dass Pflanzen mit erwünschten Eigenschaften entstehen. Diese relativ neue Methode der Biotechnologie heißt **Gentechnik**. Die Entwicklung gentechnisch veränderter Pflanzen ist einerseits revolutionär, andererseits hat sie heftige kontroverse Diskussionen ausgelöst, weshalb heute viele Menschen bei dem Begriff Biotechnologie ausschließlich an die Gentechnik denken. Im Folgenden werden einige Beispiele gentechnisch veränderter Pflanzen vorgestellt.

„Goldener Reis“

Wie andere bedeutende Nutzpflanzen enthält Reis bestimmte Nährstoffe nicht in ausreichenden Mengen, insbesondere ist er arm an Vitamin A. In Regionen, in denen Reis das Hauptnahrungsmittel ist, führt Vitamin-A-Mangel dazu, dass jedes Jahr fast eine halbe Million Kinder erblinden und zwischen einer und zwei Millionen Schwangere und Menschen mit geschwächtem Immunsystem sterben. Pflanzengenetiker aus der Schweiz haben sich dieses Problems angenommen und zwei



Abbildung 1.5: „Goldener Reis“. Ingo Potrykus von der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich hatte die Vision einer gentechnisch veränderten Reissorte, die dabei helfen könnte, Mangelernährungen von Kindern in Entwicklungsländern zu bekämpfen. Durch Transformation von Reismembranen mit Genen der Narzisse und des Bakteriums *Erwinia uredovora* gelang es Potrykus, den „Goldenen Reis“ zu entwickeln, der in der Lage ist, β -Carotin, eine Vorstufe des Vitamins A, zu bilden.

Gene der Narzisse sowie ein Bakteriengen zum Reiserbom hinzugefügt. Die neue Reisart, „Goldener Reis“ genannt, kann mithilfe dieser zusätzlichen Gene goldfarbendes β -Carotin herstellen, eine Vorstufe des Vitamins A (► Abbildung 1.5).

Schädlingsresistente Pflanzen

Das Hinzufügen des Bakteriengens *Bt* zum Genom von Nutzpflanzen bewirkt, dass diese resistent gegen bestimmte Insekten werden. Dadurch können Landwirte den Einsatz von Pestiziden vermeiden.

Essbare Impfstoffe

Menschen und andere Säugetiere töten eindringende Krankheitserreger, indem sie so genannte Antikörper produzieren, Moleküle, die das Immunsystem mobilisieren. Wenn ein Gen eines krankmachenden Organismus zum Genom einer Pflanze hinzugefügt wird, dann können Menschen, die diese Pflanze essen, Antikörper gegen die entsprechende Krankheit produzieren. Beispielsweise verursacht ein spezieller Stamm des Bakteriums *Escherichia coli* Durchfall, an dem jedes Jahr zwei Millionen Kinder sterben. Kartoffeln, die ein Gen dieses Bakteriums enthalten, haben eine Immunantwort ausgelöst, die die betreffenden Menschen resistent gegen die Krankheit gemacht hat. Das Gen könnte in Bananen oder andere Nutzpflanzen eingebaut werden, die in Entwicklungsländern verbreitete Grundnahrungsmittel sind.

BIOTECHNOLOGIE

■ Der Einsatz von Pflanzen im Kampf gegen Bakterien

Malen Sie sich diesen Albtraum aus: Bakterien haben eine vollständige Resistenz gegen Antibiotika entwickelt, die diese Bakterien früher mit Leichtigkeit besiegt haben. Krankheiten wie Tuberkulose, die einst mit Antibiotika behandelt wurden, erreichen fast epidemische Ausmaße. Erscheint Ihnen dieses Szenario unglaublich? Nun, was wie Science-Fiction klingt, könnte schnell zur unangenehmen Realität werden.

Als Antibiotika in den 1940er-Jahren allgemein verfügbar wurden, hielt man sie für Wunderdrogen mit geringen oder ganz ohne negative Nebenwirkungen für die infizierte Person. Doch Bakterien sind mehr und mehr resistent gegen Antibiotika geworden, oft eliminieren sie das Antibiotikum, noch bevor es die Bakterienzelle schädigen kann. Stämme von *Staphylokokken* und andere Bakterienarten, die lebensbedrohliche Krankheiten verursachen, sind bereits gegen mehr als 100 Antibiotika resistent.

Was können wir angesichts dieser Besorgnis erregenden Lage tun? Zu den Forschern, die nach Lösungen suchen, gehören Frank Stermitz von der Colorado State University und Kim Lewis von der Tufts University. Sie studieren die Chemie von Pflanzen, insbesondere medizinisch relevante Eigenschaften von



Alkaloiden wie Berberin. Berberin wurde seit Langem von den amerikanischen Ureinwohnern als Medizin genutzt und wird heute als Mittel gegen Arthritis, Durchfall, Fieber, Hepatitis und Rheuma verkauft. Stermitz und Lewis fanden Berberin in den Blättern und im Saft verschiedener Varietäten einer Mahonie, die in den USA unter dem Namen *Oregon Grape* bekannt ist, zur Gattung der *Berberitzen* gehört und bei uns auch in Anlagen und Gärten anzutreffen ist. Erste Versuche im Reagenzglas verliefen ent-

täuschend; es zeigte sich nur eine schwache antibiotische Aktivität, wenn man den reinen Extrakt verwendete. Doch in Kombination mit anderen Verbindungen der Pflanze stieg die antibiotische Aktivität enorm und war vergleichbar mit der der stärksten verfügbaren Antibiotika gegen *Staphylokokken*. Was genau macht Berberin so wirksam? Stermitz und Lewis

stellten fest, dass *Oregon Grape* eine weitere Verbindung produziert, nämlich 5'-Methoxyhydnocarpin. Diese Verbindung verhindert, dass die Bakterien das Berberin eliminieren, so dass das Antibiotikum die Bakterien töten kann. Die Forscher untersuchen nun, ob diese Kombination auch bei lebenden Tieren wirkt. Eines Tages könnten Impfstoffe und neue Antibiotika, vielleicht abgeleitet aus Pflanzen, diese gefährlichen Bakterien unter Kontrolle bringen.

Giftresistente Pflanzen

Mehr als 40 Prozent der landwirtschaftlich genutzten Böden enthalten freie toxische Ionen, welche die Erzeugung von Nutzpflanzen beeinträchtigen oder sogar unmöglich machen. Durch das Hinzufügen bestimmter Bakteriengene können Pflanzen resistent gegen toxische Ionen, wie z. B. Quecksilberverbindungen, Aluminiumsalze und Natriumchlorid, gemacht werden. In manchen Fällen ist es möglich, kontaminierte Böden zu reinigen, indem man Pflanzen wachsen lässt, die bestimmte toxische Ionen speichern, und sie dann entfernt (Phytoremediation).

Herbizidresistente Pflanzen

Unkräuter mindern die Erträge der Pflanzenproduktion, da sie mit den Nutzpflanzen um Licht, Nährstoffe, Wasser und Platz zum Wachsen konkurrieren. Wissenschaftler haben Gene zu den Genomen von Nutzpflanzen hinzugefügt, die diese resistent gegen Herbizide (Chemikalien zur Bekämpfung von Unkräutern) machen. Auf diese Weise können die Herbizide zum Ver-

nichten der Unkräuter verwendet werden, ohne den Nutzpflanzen zu schaden. Viele dieser Herbizide haben keine bekannten Wirkungen auf Tiere oder Menschen und können daher gefahrlos auf Nutzpflanzen angewendet werden.

In einigen Fällen spielen Pflanzen eine ungewöhnliche Rolle bei gentechnischen Experimenten mit Tieren. Bei Forschungen zum Schmerzempfinden beispielsweise haben Wissenschaftler mit der Reaktion von Mäusen auf Capsaicin experimentiert. (Capsaicin ist das Alkaloid, das für den scharfen Geschmack von Paprika verantwortlich ist.) Die Gene der untersuchten Mäuse wurden so modifiziert, dass die Mäuse scharfen Paprika nicht mehr mieden, sondern ihn freiwillig fraßen (► Abbildung 1.6). Mäuse so zu verändern, dass sie scharfe Chilisauce fressen, mag vielleicht nicht nach einem wissenschaftlichen Durchbruch aussehen. Entscheidend ist aber, dass die Zellrezeptoren, die Menschen für scharfen Paprika sensibilisieren, auch auf Hitze und andere schmerzauslösende Reize reagieren. Weitere Untersuchungen dieser Mäuse und ihrer verän-



Abbildung 1.6: Einsatz von Pflanzen zur Veränderung der Reaktion von Tieren. Diese Maus wurde genetisch so verändert, dass der Rezeptor für Capsaicin blockiert ist, jenes Alkaloid, das für den scharfen Geschmack von Chilischoten verantwortlich ist. Die Maus frisst scharfe Chilis und zeigt außerdem eine verminderte Sensitivität für Saures und Heißes. Die Erforschung der hohen Toleranz dieser Tiere gegenüber Chilis könnte Erkenntnisse liefern, die dabei helfen, das menschliche Schmerzempfinden zu beeinflussen.

dernten Reaktion auf Capsaicin könnten Hinweise darauf liefern, wie bestimmte Arten von Schmerz wahrgenommen werden.

Während sich die Gentechnik rasant entwickelt, sind ihre gesellschaftlichen Implikationen noch immer unklar. Gentechnisch veränderte Pflanzen müssen getestet werden, es muss sichergestellt sein, dass sie für den menschlichen Verzehr unbedenklich sind und weder für Tiere noch für ihre Umgebung eine Gefahr darstellen. Es könnte z. B. sein, dass bestimmte Menschen allergisch gegen Genprodukte sind, die aus anderen Organismen stammen und auf Nutzpflanzen übertragen wurden. Herbizidresistenz hervorrufoende Gene könnten auf andere Pflanzen übergehen, wodurch so genannte Superunkräuter entstehen könnten. Pollen von insektenresistenten Nutzpflanzen könnten von harmlosen oder nützlichen Insekten gefressen werden und so ganze Insektenpopulationen töten.

In der Debatte über den Einsatz gentechnisch veränderter Pflanzen ist es wichtig zu verstehen, wie diese hergestellt werden und was sie leisten können. Berechtigte Bedenken sind zu unterscheiden von diffusen Ängsten, dass gentechnisch veränderte Pflanzen die botanische Variante von Franksteins Monster seien.

Pflanzenzüchter stellen seit Jahrhunderten mit traditionellen Methoden genetisch veränderte Nutzpflanzen her. Die Gentechnik beschleunigt diesen Prozess und gestattet zudem, dass auf Pflanzen Gene übertragen werden, die von den unterschiedlichsten, nicht mit Pflanzen verwandten Organismen stammen. Kapitel 14 behandelt die Biotechnologie im Allgemeinen und die Gentechnik im Besonderen. Außerdem wird uns die Biotechnologie an vielen Stellen im Haupttext des Buches und in mehreren Kästen begegnen.

WIEDERHOLUNGSFRAGEN

- 1 In welcher Weise unterstützt die Photosynthese das Leben auf der Erde?
- 2 Inwiefern befriedigen Pflanzen menschliche Grundbedürfnisse?
- 3 Was sind die wichtigsten Herausforderungen für die Biodiversitätsforschung?
- 4 Welche möglichen Vorteile bieten gentechnisch veränderte Pflanzen? Welche Probleme bringen sie mit sich?

Merkmale von Pflanzen und Pflanzendiversität

1.2

Von der griechischen Antike bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts wurden Lebewesen in Pflanzen und Tiere unterteilt. Ein Lebewesen wurde als Pflanze angesehen, wenn es sich nicht bewegte, grün aussah und sich nicht von anderen Lebewesen ernährte. Lebewesen, die sich bewegten und andere Organismen fraßen, wurden *Tiere* genannt. Gemäß diesen Kriterien umfasste die Kategorie *Pflanzen* nicht nur Lebewesen wie Moose, Farne, Nadelbäume und Blütenpflanzen, sondern auch Algen und Pilze. Algen wurden vor allem deshalb dazugezählt, weil sie grün sind, und Pilze vor allem, weil sie sich nicht bewegen. Heute jedoch betrachten Botaniker Pflanzen als grundlegend verschieden von Pilzen; außerdem werden Pflanzen und Algen gewöhnlich getrennt betrachtet.

Bei der Unterscheidung der Pflanzen von anderen Lebewesen stützen sich Wissenschaftler auf die **Evolution**, also all jene Veränderungen, die das Leben von den ersten Anfängen bis zur heutigen Vielfalt der Lebe-

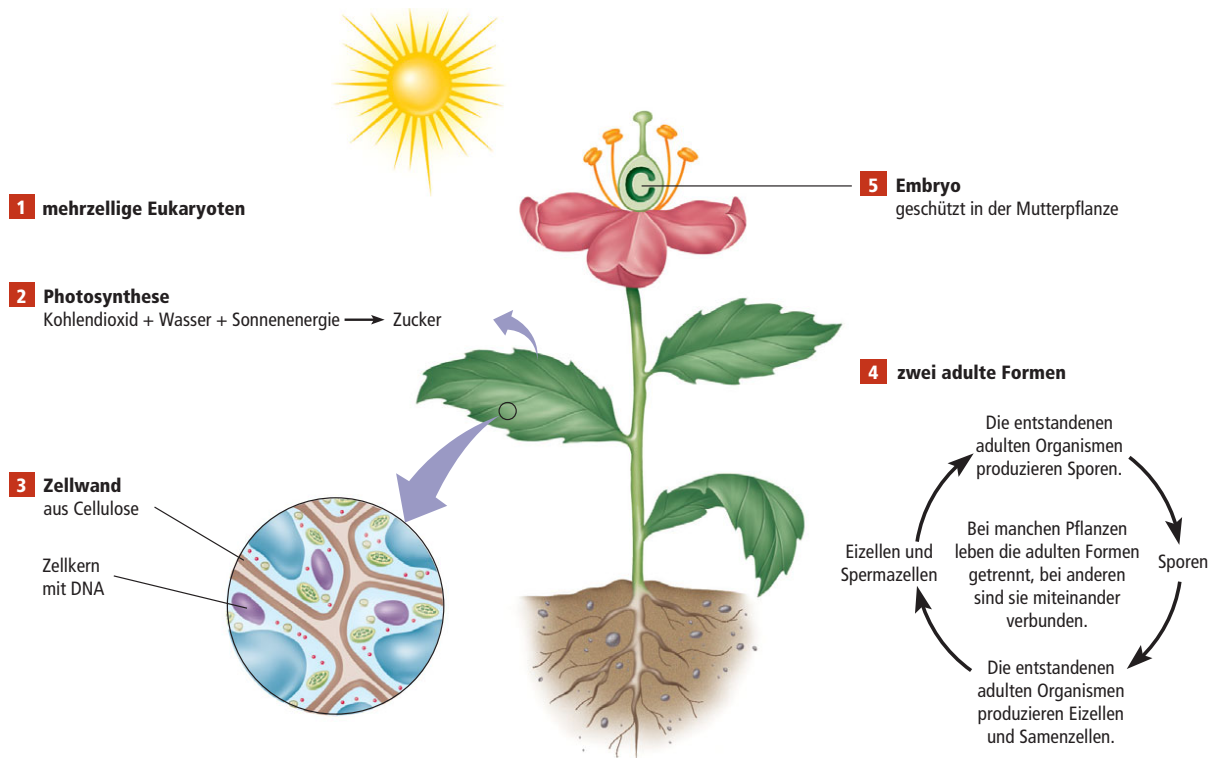


Abbildung 1.7: Merkmale einer typischen Pflanze. Die Ziffern beziehen sich auf die Erläuterungen im Text.

wesen durchlaufen hat. Im Verlauf der Evolution sind in den Genen der Lebewesen Unterschiede entstanden, die sich oft in körperlichen Merkmalen niedergeschlagen haben. Doch alle Versuche, Lebewesen anhand ihrer körperlichen Merkmale und ihres Verhaltens zu klassifizieren, verlieren sich in irgendwelchen Ausnahmen. Wir werden uns zunächst damit befassen, wie die meisten Botaniker Pflanzen definieren, und uns dann einige Beispiele für die Diversität der Pflanzen ansehen.

Die Merkmale der Pflanzen

Die folgenden fünf Merkmale, die in ► Abbildung 1.7 zusammengefasst sind, werden üblicherweise benutzt, um Pflanzen zu definieren und sie von anderen Lebewesen zu unterscheiden:

1 Pflanzen sind mehrzellige Eukaryoten. In der modernen Systematik wird die grundlegendste Unterscheidung zwischen Lebewesen auf der Ebene der Zelle getroffen – zwischen Eukaryoten und Prokaryoten. Pflanzen gehören zu den **Eukaryoten**, Lebewesen, deren Zellen einen **Zellkern** haben. Der Zellkern ist eine abgeschlossene Struktur, welche die DNA der Zelle enthält. Auch Tiere, Pilze und Protisten wie die Algen gehören zu den Eukaryoten.

Prokaryoten besitzen keinen abgeschlossenen Zellkern; zu ihnen gehören die Bakterien. Weiter hinten in diesem Buch werden Sie mehr über Prokaryoten, Protisten und Pilze finden.

2 Fast alle Pflanzen sind zur Photosynthese in der Lage. Da Pflanzen durch Photosynthese ihre eigene Nahrung herstellen können, werden sie als **autotroph** bezeichnet. Im Gegensatz dazu sind Tiere und Pilze **heterotroph**, was bedeutet, dass sie ihre Nahrung von anderen Lebewesen erhalten. Tiere fressen ihre Nahrung, während Pilze sie absorbieren.

3 Pflanzen besitzen Zellwände, die hauptsächlich aus Cellulose bestehen. **Cellulose** ist eine Kette aus Glucose-Molekülen. Cellulosehaltige Zellwände sind ein gutes Kriterium, um Pflanzen von anderen Eukaryoten zu unterscheiden, denn die Zellwände von Algen und Pilzen bestehen vorwiegend aus anderen Substanzen, während tierische Zellen überhaupt keine Zellwände haben.

4 Pflanzen haben zwei adulte Formen, die wechselseitig auseinander hervorgehen. Eine der beiden adulten Formen bildet **Sporen**, Fortpflanzungszellen, die sich zu adulten Organismen entwickeln können, ohne mit einer anderen Fortpflanzungszelle zu verschmelzen. Die andere adulte Form bildet ent-

	Bakterien 	Algen 	Pflanzen 	Pilze 	Tiere 
Zelltyp	prokaryotisch; einzellig, kann aber Kolonien bilden	eukaryotisch; ein- oder mehrzellig	eukaryotisch; mehrzellig	eukaryotisch; mehrzellig	eukaryotisch; mehrzellig
Zellwand	Zellwände enthalten keine Cellulose	Zellwände einiger Arten enthalten Cellulose	Zellwände bestehen hauptsächlich aus Cellulose	Zellwände bestehen hauptsächlich aus Chitin	keine Zellwände
Ernährungs- weise	unterschiedlich; einige Arten sind autotroph (Photosynthese)	autotroph (Photosynthese)	autotroph (Photosynthese)	heterotroph, absorbieren ihre Nahrung	heterotroph, fressen ihre Nahrung
Fort- pflanzung	größtenteils asexuell	sexuell und asexuell; einige Arten besitzen zwei adulte Formen: eine, die Sporen produziert, und eine, die Eizellen und Samenzellen produziert	sexuell und asexuell; zwei adulte Formen: eine, die Sporen produziert, und eine, die Eizellen und Samenzellen produziert; der Embryo ist im Mutter- organismus geschützt	sexuell und asexuell	größtenteils sexuell, einige Arten auch asexuell; der Embryo ist bei einigen Arten (darunter fast alle Säugetiere) im Mutter- organismus geschützt
Wachstum	unbegrenzt	unbegrenzt oder begrenzt	unbegrenzt oder begrenzt	unbegrenzt oder begrenzt	begrenzt

Abbildung 1.8: Vergleich von Pflanzen mit anderen Lebewesen. Wie Sie sehen, teilen Pflanzen mit jedem der anderen Typen von Lebewesen (Bakterien, Algen, Pilze, Tiere) mindestens ein Merkmal. Andererseits unterscheiden sie sich von diesen auch jeweils mindestens in einem Aspekt (Zellstruktur, Ernährung, Fortpflanzung, Wachstum).

weder **Spermazellen** (männliche Fortpflanzungszellen) oder **Eizellen** (weibliche Fortpflanzungszellen). Eine Spermazelle befruchtet eine Eizelle, wodurch ein **Embryo** entsteht, der sich zu einem adulten Organismus entwickelt. In Kapitel 6 werden Sie sehen, wie die beiden adulten pflanzlichen Lebensformen abwechselnd auseinander hervorgehen. An dieser Stelle sei lediglich erwähnt, dass Pflanzen ein faszinierendes Sexualleben haben.

- 5** Pflanzen haben mehrzellige Embryonen, die geschützt in den weiblichen Eltern liegen. Geschützte Embryonen entstanden im Lauf der Evolution als Anpassung an das Leben an Land, denn es musste verhindert werden, dass der Embryo austrocknet. Dieses Merkmal unterscheidet Pflanzen von Algen.

Jedes einzelne dieser Merkmale trifft nicht ausschließlich für Pflanzen zu, doch in ihrer Gesamtheit sind sie geeignet, um Pflanzen von allen anderen Lebewesen zu unterscheiden. Zwei weitere Merkmale unterscheiden Pflanzen speziell von den meisten Tieren. Im Gegensatz zu den meisten Tieren können sich Pflanzen auf zwei verschiedene Weisen fortpflanzen. Einmal geschlechtsreif, können sich die meisten Tiere nur **sexuell fortpflanzen**, d. h. eine Eizelle wird durch eine

Spermazelle befruchtet, wodurch ein Nachkomme entsteht, der von beiden Eltern genetisch verschieden ist. Pflanzen dagegen können sich sowohl sexuell als auch **asexuell fortpflanzen**. Asexuelle Fortpflanzung bedeutet, dass ein einzelner Elter Nachkommen erzeugt, die mit ihm genetisch identisch sind. Neben der Fortpflanzung ist auch das Wachstum der Pflanzen völlig anders als das der Tiere. Pflanzen sind in der Lage, während ihres gesamten Lebens weiterzuwachsen. Dieses Wachstum wird als **unbeschränkt** bezeichnet. Dagegen endet das Wachstum bei Tieren nach dem Erreichen der Geschlechtsreife, ein Wachstumsmuster, das als **beschränktes Wachstum** bezeichnet wird. ► Abbildung 1.8 stellt wesentliche Merkmale von Pflanzen, Tieren, Pilzen, Algen und Bakterien gegenüber.

Nachdem wir uns die allgemeinen Merkmale von Pflanzen angesehen haben, wollen wir eine kurze Reise durch die Evolution pflanzlichen Lebens unternehmen. Wenn die Geschichte der Erde zu einem Tag zusammengestaucht werden könnte, dann würden Pflanzen seit den letzten zweieinhalb Stunden existieren. Im Vergleich zum Menschen jedoch sind sie schon sehr alt, denn diese würden erst seit den letzten anderthalb Minuten existieren. Die meisten Menschen assoziieren Pflanzen sofort mit Blumen, doch Blütenpflanzen tra-



(a) Dieses Torfmoos (*Sphagnum*) produziert braune Sporangien, in denen die Sporen enthalten sind.



(b) Farne bilden die größte Gruppe unter den Gefäßsporenpflanzen.



(c) Koniferen bilden die größte Gruppe der Nacktsamer. Ihre Samen werden in Zapfen produziert. Nadelwälder sind vor allem in kühlen Klimazonen und in Bergregionen verbreitet.



(d) Blütenpflanzen (*Angiospermae/Magnoliophyta*) sind die bei weitem größte Gruppe der heutigen Pflanzen.

Abbildung 1.9: Die Diversität der Pflanzen. Diese Bilder zeigen Vertreter der vier Pflanzenabteilungen: Moose, Gefäßsporenpflanzen, Nacktsamer und Bedecktsamer.

ten erst relativ spät in der Evolution auf. Dies zeigt der folgende Überblick über die wichtigsten Pflanzenabteilungen: Moose, Farne, Nacktsamer, zu denen die Koniferen (Pflanzen mit Zapfen) gehören, und Bedecktsamer, die auch die Blütenpflanzen umfassen (► Abbildung 1.9).

Moose

Moose gehörten zu den ersten Pflanzen, die sich vor 450 bis 700 Millionen Jahren aus algenähnlichen Vorfahren entwickelten. Moose oder **Bryophyta** (von griech. *bryon* und *phyton*, „Pflanze“) sind kleine, nichtblühende Pflanzen, deren Struktur einfacher als die anderer Pflanzen ist. Sicher sind Ihnen die Moose vertraut, die auf Steinen wachsen, oder solche, die weiche Teppiche auf

dem Waldboden bilden. Sie werden nie größer als ein paar Zentimeter, weil sie keinen effizienten Mechanismus besitzen, mit dem sie Wasser innerhalb der Pflanze nach oben transportieren könnten. Auch können sie sich noch nicht vor Wasserverlust schützen und sind auf feuchte Lebensräume angewiesen.

Torfmoose, die in Sümpfen und Mooren wachsen, sind in vielen Regionen der Erde von wirtschaftlicher Bedeutung (► Abbildung 1.9a). Wenn sie sich zersetzen, entsteht Torf, der als Brennstoff, aber auch als Dünger verwendet werden kann. Außerdem absorbieren Torfmoose beträchtliche Mengen an Kohlendioxid, das sonst in der Atmosphäre verbleiben und so zur globalen Erwärmung beitragen würde. Kapitel 20 befasst sich mit der Evolution und den Merkmalen von Moosen.

Farne und andere Gefäßsporenpflanzen

Die überwältigende Mehrheit der Pflanzen gehört zu den **Gefäßpflanzen**, die sich etwa zur selben Zeit wie die Moose aus algenähnlichen Vorfahren entwickelt haben. Gefäßpflanzen besitzen ein hochorganisiertes und effizientes **Gefäßgewebe**, in dem Wasser und Nährstoffe über Leitungsbahnen durch die Pflanze transportiert werden. Da Gefäßpflanzen im Allgemeinen größer sind als Moose, fallen sie eher auf als diese; allerdings variiert ihre Größe von winzig bis turmhoch. Die einfachsten Gefäßpflanzen sind die **Gefäßsporenpflanzen**. Ihre Entwicklung begann vor etwa 450 bis 700 Millionen Jahren.

Wenn Sie 350 Millionen Jahre in die Vergangenheit reisen könnten, würden Sie eine einzige Landmasse vorfinden, die sich entlang des Äquators erstreckt und alle heute existierenden Kontinente vereinigt. Amphibien, einige davon riesengroß, würden das Tierreich beherrschen; es gäbe keine Reptilien, Vögel oder Säugetiere. Auch würden Sie keine Pflanzen mit Zapfen, Blüten oder Früchten vorfinden. Stattdessen würden Gefäßsporenpflanzen in großer Vielfalt die Landschaft dominieren, von denen einige unseren heutigen Farnen sehr ähnlich sähen. Es gäbe aber auch riesige Bäume, deren Äste an Farne erinnern und die keiner der uns vertrauten Pflanzen ähneln.

Die meisten der heute lebenden Gefäßsporenpflanzen sind Farne, die in feuchten Regionen leben. Ihre Spermazellen haben mikroskopisch kleine schwanzähnliche Strukturen, die durch eine Schicht Wasser zu den Eizellen schwimmen müssen (► Abbildung 1.9b). Kapitel 21 befasst sich mit der Evolution und den Merkmalen von Gefäßpflanzen.

Nacktsamer: Nichtblühende Samenpflanzen

Bei den meisten Gefäßpflanzen ist der Embryo in eine **Samenanlage** eingeschlossen, eine Struktur, die neben dem Embryo einen Nahrungsvorrat enthält. Je nachdem, ob die Samen offen auf dem Fruchtblatt liegen oder davon eingeschlossen sind, werden die Samenpflanzen in Nacktsamer und Bedecktsamer unterteilt.

Nacktsamer oder **Gymnospermae** (von griech. *gymnos*, nackt und *sperma*, Same) traten erstmals vor etwa 365 Millionen Jahren auf. Ihre engsten heute lebenden Verwandten sind die Koniferen (nach lat. *conifer*,

„Zapfen tragend“), deren Samen sich auf Zapfen entwickeln. Die Samen sind nur insofern „nackt“, als sie nicht vollständig in einer Schutzhülle verschlossen sind. Typische Koniferen wie Kiefern, Fichten und Mammutbäume sind immergrüne Bäume mit nadelförmigen Blättern (► Abbildung 1.9c). Mammutbäume sind mit bis zu 90 Metern Höhe die höchsten Pflanzen der Erde.

Im Mesozoikum (vor 245 bis 65 Millionen Jahren), als die Reptilien die dominierenden Tiere waren, waren Nacktsamer die vorherrschenden Pflanzen; sie umfassten damals Tausende von Arten. Heute dagegen besteht die Pflanzengruppe im Wesentlichen aus ein paar Hundert Arten von Koniferen, die vor allem in kälteren Regionen nahe den Polen und im Gebirge heimisch sind. Kapitel 22 behandelt die Evolution und die Merkmale von Nacktsamern.

Bedecktsamer: Blühende Samenpflanzen

Samenpflanzen, die Blüten ausbilden, werden als **Bedecktsamer** oder **Angiospermae** (nach griech. *angion*, „Behälter“, und *sperma*, „Same“) bezeichnet (► Abbildung 1.9d). Im Gegensatz zu den Samen der Nacktsamer sind die Samen der Bedecktsamer in Fruchtknoten eingeschlossen, die, wenn sie reifen, als **Früchte** bezeichnet werden. Obwohl Bedecktsamer erst vor 145 Millionen Jahren entstanden und damit entwicklungsgeschichtlich noch relativ jung sind, stellen sie die meisten der heute lebenden Pflanzenarten. Es gibt sogar etwa 20 Mal so viele Arten von Bedecktsamern wie Farne und Nacktsamer. Ein Grund, warum sich Bedecktsamer erfolgreicher an viele Lebensräume angepasst haben, besteht darin, dass sie ein effizienteres System zum Transport von Wasser besitzen (siehe Kapitel 3). Ein weiterer Grund, warum sie so weit verbreitet sind, ist der, dass ihre Samen in Früchten eingeschlossen sind, die einen zusätzlichen Schutz darstellen und zudem bei der Verbreitung der Samen hilfreich sind. Mehr über Bedecktsamer erfahren Sie in Kapitel 23.

Moose, Gefäßsporenpflanzen, Nacktsamer und Bedecktsamer spiegeln vier wichtige evolutionäre Entwicklungen wider: die Abstammung der Landpflanzen von den Algen, die Entstehung des Gefäßgewebes, die Entstehung der Samen und die Entstehung von Blüten und Früchten. Immer wieder werden wir uns im Haupttext des Buches sowie in den Kästen zur Evolution damit befassen, wie sich die Merkmale der verschiedenen Pflanzengruppen entwickelt haben.

WIEDERHOLUNGSFRAGEN

- 1 Beschreiben Sie die allgemeinen Merkmale einer Pflanze.
- 2 Beschreiben Sie die wichtigsten Pflanzengruppen.

Botanik und wissenschaftliche Methodik

1.3

Im 17. Jahrhundert begannen Forscher mit Experimenten, mit denen sie herausfinden wollten, wie Pflanzen wachsen. Sie stellten beispielsweise fest, dass eine Topfpflanze mit der Zeit erheblich an Gewicht gewinnt, obwohl die Menge an Erde, die sich im Topf befindet, etwa gleich bleibt. Sie folgerten daraus, dass Wasser in starkem Maße zum Wachstum der Pflanze beitragen musste. Das Studium von Pflanzen beinhaltet wie in anderen Wissenschaften immer die Beobachtung, das Formulieren von Fragen zum Beobachteten, das Ableiten möglicher Antworten und schließlich die Überprüfung, wie gut diese Antworten durch die Fakten gestützt werden. Dieses Vorgehen wird allgemein als **wissenschaftliche Methodik** bezeichnet, wobei es keine formale Prozedur gibt, der jeder Wissenschaftler in jedem Fall folgt.

Überprüfen von Hypothesen

Wissen im Sinne der Wissenschaft unterscheidet sich von anderen Formen des Wissens, insbesondere von Wissen auf der Basis des Glaubens. Wissenschaft ist das Streben nach Erkenntnis auf der Basis von direkten Beobachtungen der Natur und Experimenten zum Testen der aus ihnen gezogenen Schlussfolgerungen. Jede Schlussfolgerung, die aus der Beobachtung natürlicher Erscheinungen gezogen werden kann, gehört in den Bereich der Wissenschaft. Die Behauptung zum Beispiel, dass aus Eicheln Petunien wachsen, lässt sich dadurch überprüfen, dass man Eicheln in die Erde steckt und beobachtet, wie daraus Eichen wachsen. Aussagen dagegen, die sich nicht überprüfen lassen, liegen außerhalb des Bereichs der Wissenschaft. Ein Beispiel hierfür ist die Aussage, dass die Welt durch einen göttlichen Schöpfungsprozess entstanden ist, denn es ist nicht möglich, ein Experiment zu ersinnen, mit dem diese Aussage überprüft werden könnte. Beachten Sie jedoch,



Abbildung 1.10: Sir Francis Bacon. Bacon glaubte fest an die Kraft von Experimenten und die wissenschaftliche Methodik beim Aufdecken der Wahrheit.

dass die Wissenschaft selbst auf bestimmten nicht überprüfbar Annahmen basiert, zum Beispiel auf der Annahme, dass die Gesetze von Physik, Chemie und Biologie morgen noch die gleichen sind wie heute.

Betrachten wir ein Beispiel für die experimentelle Vorgehensweise. Wenn Sie wissen wollten, ob Sonnenlicht Gras zum Wachsen bringt, könnten Sie ein Stück Rasen mit einer Kiste abdecken, die das gesamte Sonnenlicht abblockt. Unter der Annahme, dass Sonnenlicht Gras zum Wachsen bringt, sagen Sie vorher, dass das Gras unter der Kiste weniger stark wachsen wird als der übrige Rasen. Nach einer Woche nehmen Sie die Kiste weg und stellen fest, dass das darunter liegende Gras stärker gewachsen ist als der Rest. Unter den gegebenen Umständen wächst das Gras anscheinend besser ohne Sonnenlicht. (Wir werden dieses überraschende Ergebnis in diesem Kapitel noch diskutieren.)

Ein früher Verfechter der experimentellen Vorgehensweise war Sir Francis Bacon (1561–1626, ► Abbildung 1.10). Er war der Meinung, dass sich die Forscher seiner Zeit zu sehr auf die Arbeiten des griechischen Philosophen Aristoteles (384–322 v. Chr.) stützten. Obwohl Aristoteles viel forschte und mehrere Abhandlungen zur Naturwissenschaft, insbesondere zur Zoologie



(a)



(b)

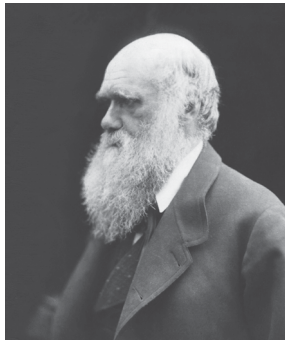


Abbildung 1.11: Der Versuch von Charles Darwin mit einem Spross, der Licht wahrnimmt. Außer seinen Arbeiten zur Evolution veröffentlichte Charles Darwin Ergebnisse verschiedener wissenschaftlicher Untersuchungen. Durch Experimente fand er heraus, dass die Sprossspitze für die Wahrnehmung des Lichts verantwortlich ist. (a) Wenn die Sprossspitze abgedeckt ist, wächst der Spross nicht zum Licht. (b) Die unbedeckte Sprossspitze biegt sich in die Richtung, aus der das Licht kommt.

schrrieb, war er nicht immer ein sorgfältiger Beobachter und führte nur selten Experimente durch, um seine Schlussfolgerungen zu überprüfen. Beispielsweise vertrat er die Ansicht, dass sich Pflanzen nicht sexuell fortpflanzen.

Viele Zeitgenossen Bacons akzeptierten die Schlussfolgerungen des Aristoteles, ohne sie zu überprüfen, und wendeten diese allgemeinen Schlussfolgerungen auf spezielle Fakten an. Das logische Schließen vom Allgemeinen auf das Spezielle wird als **Deduktion** bezeichnet. Ein Beispiel für die deduktive Schlussweise ist das folgende: Angenommen, Aristoteles hat eine Verallgemeinerung (auch *erste Prämisse* genannt) entwickelt, die besagt, dass sich Pflanzen nicht sexuell fortpflanzen. Dann identifiziert er ein bestimmtes Lebewesen als Pflanze (eine solche Aussage wird als *zweite Prämisse* bezeichnet). Ohne gründliche Beobachtung der Pflanze schließt er dann, dass sich diese Pflanze nicht sexuell fortpflanzt, da es sich um eine Pflanze handelt. Dies ist eine Schlussfolgerung durch Deduktion, nicht durch Beobachtung.

Bacon war der Meinung, dass es unsinnig ist, Daten zu sammeln und dann diese Daten nicht dazu zu benutzen, um aus ihnen Schlussfolgerungen zu ziehen. Noch weniger hielt er von Leuten, die Schlussfolgerungen zogen, ohne sich damit aufzuhalten, sie durch Da-

ten zu stützen. Er bezeichnete solche Leute als Spinnen, die ihre Netze weben; sie zögen Schlussfolgerungen, die nur in ihrem Geiste existierten, „Spinnengewebe der Weisheit, vortrefflich geeignet, um Gedanken auszuspinnen, aber ohne Inhalt oder Nutzen“. Stattdessen bewunderte Bacon Menschen, die Daten sammelten und analysierten, um Aussagen abzuleiten, die sie dann anwendeten. Er verglich sie mit Bienen, die viele Blüten besuchten und dann das, was sie gesammelt hatten, verwendeten, um etwas Nützliches daraus zu machen, nämlich Honig.

Bacon vertrat die Ansicht, dass Wissenschaftler bei ihrer Arbeit mit speziellen Beobachtungen beginnen und aus diesen Beobachtungen allgemeine Schlussfolgerungen ziehen sollten. Diese Vorgehensweise wird als **Induktion** bezeichnet. Betrachten wir zum Beispiel die Beobachtung, dass viele Pflanzen Pollen produzieren, den Bienen von den Blüten einer Pflanze zu den Blüten einer anderen Pflanze transportieren. Spätere Beobachtungen zeigen, dass sich ein Teil der bestäubten Blüte zu einer Frucht entwickelt, die Samen enthält. Aus diesen Samen entstehen die Pflanzen der nächsten Generation, unbefruchtete Blüten dagegen entwickeln weder Früchte noch Samen. Ein nahe liegender Schluss aus diesen Informationen ist, dass sich Pflanzen sexuell fortpflanzen.

Betrachten wir noch ein weiteres Beispiel aus der Botanik, das die induktive Vorgehensweise illustriert. Angenommen, wir beobachten, dass Blütenpflanzen zum Licht wachsen, und fragen uns, ob es vielleicht die Blätter sind, die das Licht wahrnehmen (► Abbildung 1.11).

Um dies zu überprüfen, bedecken wir die Blätter, so dass das Licht sie nicht erreicht. Wir stellen fest, dass die Pflanze trotzdem zum Licht wächst. Wir versuchen es nun damit, die Blüten abzudecken. Das Ergebnis bleibt das gleiche. Wenn wir jedoch die Sprossspitze bedecken, beobachten wir, dass die Pflanze tatsächlich nicht mehr zum Licht wächst. Aus diesen Beobachtungen schließen wir, dass die Sprossspitze für die Wahrnehmung des Lichts verantwortlich ist. In Wirklichkeit war es der berühmte britische Naturforscher Charles Darwin, der diese Entdeckung machte. Er veröffentlichte sie 1880 in dem Buch *The Power of Movement in Plants* (auf Deutsch erschienen unter dem Titel *Das Bewegungsvermögen der Pflanzen*). Später zeigte sich, dass die Sprossspitze spezifisch auf blaues Licht reagiert.

Auch wenn Wissenschaftler nicht ausnahmslos nach einer strengen Folge von Schritten vorgehen, beschreiben die nachfolgend aufgezählten Tätigkeiten das allgemeine Prinzip, nach dem wissenschaftliche Erkenntnisse gewonnen werden (► Abbildung 1.12):

1 Beobachtung und Sammlung von Daten. Wissenschaftler sammeln oft Informationen, ohne zunächst zu versuchen, sie zu erklären. Beispielsweise scheinen viele Arten von Pflanzen an unterschiedlichsten Standorten zum Licht zu wachsen. In Bezug auf unser Beispiel heißt das: Das Licht scheint auf viele Teile der Pflanze, mindestens einer davon muss also Licht wahrnehmen. Wir könnten nun verschiedene Teile der Pflanze beschatten, um zu sehen, ob die Pflanze immer noch zum Licht wächst.

Beobachtungen können jedoch ungenau sein, etwa weil sich die Umgebung ändert oder aus Gründen, die beim Beobachter oder im Versuchsaufbau liegen. Wie Sie wissen, handelt es sich bei einem See, den Sie in der Wüste in weiter Entfernung sehen, meist um eine optische Illusion, die als *Fata Morgana* bezeichnet wird. Es kommt auch vor, dass verschiedene Beobachter signifikant verschiedene Beschreibungen des gleichen Ereignisses abgeben.

2 Formulierung kritischer Fragen. Wissenschaftler stellen kritische Fragen, sowohl bevor als auch nachdem sie ihre Beobachtungen gemacht haben. In unserem Beispiel wäre eine kritische Frage die folgende: „Welcher Teil der Pflanze nimmt Licht wahr?“

3 Aufstellen einer Hypothese. Eine **Hypothese** ist eine vorläufige Antwort auf eine Frage; sie versucht, Daten in eine Ursache-Wirkung-Beziehung zu bringen.

Man könnte auch sagen, dass eine Hypothese eine fundierte, überprüfbare Vermutung ist. In unserem Beispiel war die erste Hypothese, dass die Blätter Licht wahrnehmen und dafür verantwortlich sind, dass die Pflanze zum Licht wächst.

Wenn ein Ereignis auf ein anderes folgt, weist dies nicht zwangsläufig auf eine Ursache-Wirkung-Beziehung hin. Angenommen, die Turmglocke schlägt jeden Morgen genau dann, wenn Sie aus dem Haus gehen – dies bedeutet nicht, dass Sie der Grund dafür sind, dass die Glocke schlägt. Ebenso wenig sind Hähne dafür verantwortlich, dass die Sonne aufgeht, auch wenn sie das vielleicht denken. Eine echte Ursache-Wirkung-Beziehung besteht dagegen zwischen dem Besuch einer Blüte durch eine Biene und dem Ausbilden von Samen. Bienen tragen Pollen von einer Pflanze zu einer anderen, was zur Befruchtung der Blüte und in der Folge zur Entwicklung eines Embryos führen kann. Doch auch um diese Ursache-Wirkung-Beziehung zu stützen bedurfte es einer Reihe von sorgfältigen Beobachtungen.

4 Überprüfung der Hypothese. Jede Hypothese wird kritischen Tests unterzogen, die die Hypothese stützen oder auch nicht. Außerdem muss die Hypothese zumindest prinzipiell falsifizierbar sein. Die Aussage „Blätter befähigen Pflanzen, Licht wahrzunehmen“ ist eine Hypothese, da sie überprüft werden kann. Um zu sehen, ob sie zutrifft, könnten wir zum Beispiel die Blätter entfernen oder sie mit Folie abdecken und beobachten, ob die Pflanze noch immer zum Licht wächst.

5 Akzeptieren, Modifizieren oder Verwerfen der Hypothese. Um herauszufinden, welcher Teil einer Pflanze Licht wahrnimmt, müssen wir möglicherweise mehrmals den Prozess des Aufstellens, Überprüfens und Verwerfens von Hypothesen durchlaufen. Beispielsweise zeigte sich, dass weder Blätter noch Sprosse diejenigen Teile der Pflanze sind, die Licht wahrnehmen. Erst als Darwin die Sprossspitze abdeckte, hörte die Pflanze auf, nach dem Licht zu wachsen.

Oft muss eine Hypothese unter unterschiedlichen Bedingungen oder über eine längere Zeit getestet werden. Ein Beispiel ist das Experiment, das scheinbar darauf hindeutete, dass Gras bei Dunkelheit schneller wächst als bei Licht. In Wirklichkeit gilt dies nämlich nur auf kurze Sicht. Wenn wir eine Kiste auf ein Stück Rasen stellen, so dass alles Licht

abgeblockt wird, dann wächst das darunter befindliche Gras für ein paar Tage schneller. Als Reaktion auf den Lichtmangel streckt sich das Gras dem Licht entgegen, doch nach ein paar Tagen stirbt es ab. Gras braucht Licht, um durch Photosynthese Nahrung für das längerfristige Wachstum zu produzieren, auch wenn das kurzfristige Wachstum im Licht langsamer ist als im Dunkeln.

Eine experimentell gestützte Hypothese kann neue Fragen aufwerfen, in unserem Beispiel etwa die folgenden: Wie bewirkt das Wahrnehmen von blauem Licht durch die Sprossspitze, dass eine Blütenpflanze nach dem Licht wächst? Welches ist der Rezeptor für blaues Licht in Blütenpflanzen und warum erkennt die Pflanze blaues Licht, aber kein grünes? Nehmen alle Pflanzen Licht auf die gleiche Weise wahr?

Wenn eine Hypothese alle Zweifel übersteht, dann ist sie möglicherweise die richtige Erklärung des betrachteten Phänomens, doch vielleicht ist ihre Anwendbarkeit begrenzt. Immerhin werden Hypothesen auf der Grundlage spezieller Experimente gebildet. Wenn zum Beispiel Experimente zur Lichtwahrnehmung mit bestimmten Blütenpflanzen durchgeführt werden, kann man dann schließen, dass die Ergebnisse für alle Pflanzen gelten? Wenn eine auf kleiner Skala (im Beispiel für Blütenpflanzen) gestützte Hypothese später auch auf einer breiteren Skala (im Beispiel für alle Pflanzen) gestützt wird, dann wird sie zu einer **Theorie**. Eine Theorie hat also einen wesentlich größeren Anwendungsbereich als eine fundierte Hypothese. Beispielsweise wird die Evolution als eine Theorie betrachtet, weil sie durch viele wiederholte Beobachtungen und Experimente gestützt wird, die sich auf viele verschiedene Typen von Lebewesen beziehen. Im wissenschaftstheoretischen Sinne ist eine Theorie demnach durch Indizien gut gestützt. Umgangssprachlich wird der Begriff Theorie dagegen oft benutzt, um anzudeuten, dass es sich um eine Annahme handelt, für die es keine Beweise gibt.

Die meisten wissenschaftlichen Hypothesen haben sicher eine kurze Lebenserwartung, weil sie ständig verfeinert und vielleicht irgendwann aufgrund eines Experiments verworfen werden. Obwohl Wissenschaftler idealerweise objektiv sein sollten, urteilen sie manchmal subjektiv, zum Beispiel indem sie zögern, eine favorisierte Hypothese aufzugeben, einfach weil sie selbst davon überzeugt sind, dass sie zutreffend ist. Gute wissenschaftliche Arbeit lässt sich oft mit dem Lösen eines Rätsels oder mit der Arbeit eines Detektivs verglei-

chen. Sie wissen nicht unbedingt, was am Ende herauskommt, aber wenn Sie logisch und sorgfältig vorgehen, werden Sie eine Menge lernen und Spaß dabei haben.

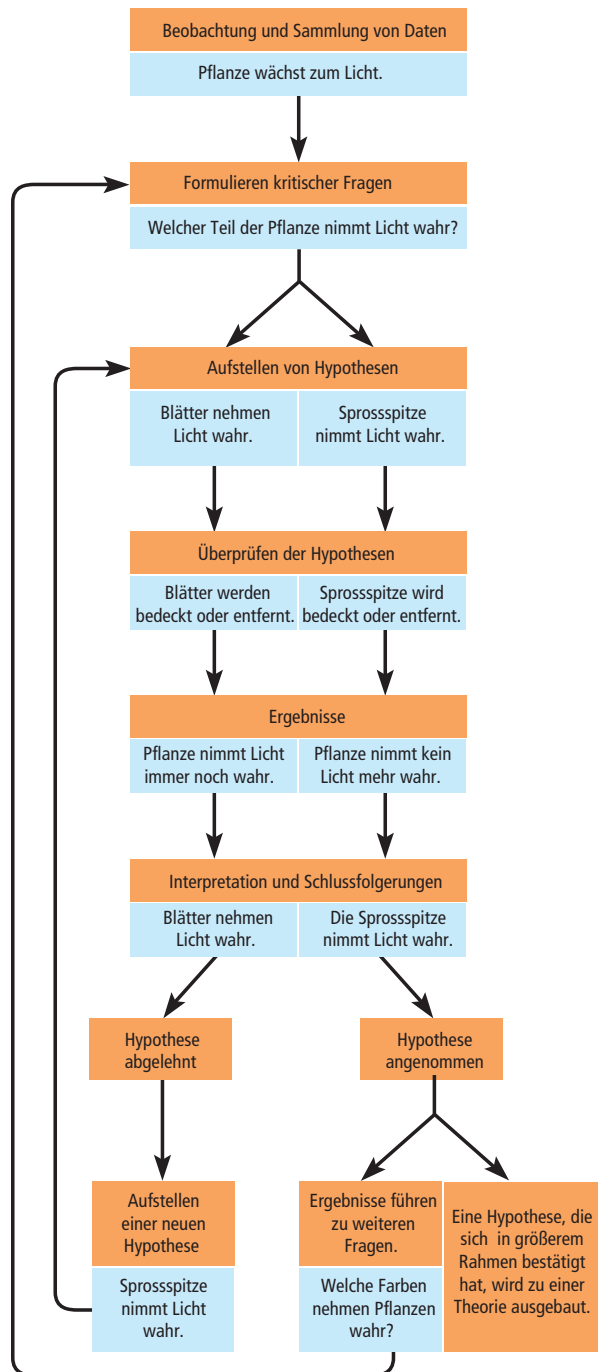


Abbildung 1.12: Aufstellen und Überprüfen von Hypothesen. Die wissenschaftliche Methode besteht in Beobachtungen, aus denen Fragen abgeleitet werden. Eine oder mehrere Hypothesen beantworten die Frage versuchsweise. Anschließend wird jede Hypothese durch Experimente überprüft, was die Hypothese entweder stützt oder nicht. Auf der Basis der Experimente wird die Hypothese entweder akzeptiert oder verworfen.

Teildisziplinen der Botanik

Heute beschäftigen sich Botaniker mit vielen Aspekten von Pflanzen (► Abbildung 1.13):

- Pflanzensystematiker untersuchen die Entstehungsgeschichte der Pflanzen. Sie geben neu entdeckten Pflanzen wissenschaftliche Namen und beteiligen sich an der Forschung zum Identifizieren und Erhalten gefährdeter und vom Aussterben bedrohter Arten.
- Pflanzenphysiologen untersuchen, wie Pflanzen funktionieren, wobei sie sich besonders auf Aspekte wie die Photosynthese, das Blühen oder die Wirkung von Phytohormonen konzentrieren. Physiologen interessieren sich für die Funktion von Genprodukten sowie für Methoden zu ihrer Isolierung und Charakterisierung.
- Pflanzenanatomen analysieren, in welcher Beziehung die Struktur von Pflanzen zu ihrer Funktion steht. Paläobotaniker studieren die Anatomie fossiler Pflanzen, um ihre Verwandtschaftsbeziehungen mit lebenden Pflanzen zu klären. Einige Anatomen suchen nach Genen, welche die Entwicklung bestimmter Strukturen und Zelltypen steuern.
- Pflanzenmorphologen interessieren sich für die Lebenszyklen von Pflanzen, insbesondere für ihre Fortpflanzung. Außerdem untersuchen sie die Evolution der Pflanzen und wie sich ihre Lebenszyklen und Anatomie im Lauf der Zeit verändert haben.
- Pflanzenökologen beschäftigen sich mit den Beziehungen zwischen Pflanzen und anderen Organismen aus ihrer Umgebung. Sie untersuchen, wie Pflanzen unter schwankenden Umweltparametern wie Temperatur und Niederschlagsmenge ihre Bedürfnisse befriedigen. Ökologen untersuchen auch die Auswirkungen menschlicher Aktivitäten auf die Umwelt, insbesondere den Beitrag des Menschen zur erhöhten Aussterberate von Pflanzenarten.
- Pflanzengenetiker erforschen die Übertragung der Erbinformation von einer Generation zur nächsten. Wie Sie gelesen haben, können Pflanzenbiotechnologie und Gentechnik zur Erhöhung landwirtschaftlicher Erträge beitragen.

In den letzten Jahren haben sich zwischen diesen klassischen Teilgebieten der Botanik Wechselbeziehungen ergeben. Wenn z.B. ein Pflanzenökologe ein Gen untersucht, das ein Alkaloid produziert, welches räuberische Insekten abschreckt, dann berühren seine Experimente



Abbildung 1.13: Ein Botaniker bei der Arbeit. Dieser Botaniker untersucht den Einfluss von Verbindungen, die das Wachstum und die Entwicklung von Pflanzen regulieren.

auch die Physiologie und die Genetik. Ein Morphologe benutzt unter Umständen physiologische und biochemische Techniken, um ein Enzym zu untersuchen, das die Entwicklung von Spermazellen aus den Pollen einer Blütenpflanze reguliert. Ein Anatom, ein Physiologe und ein Genetiker arbeiten vielleicht zusammen, um zu verstehen, wie eine Mutation die effiziente Wasseraufnahme durch eine Pflanze unterdrückt. Entdeckungen in einem Teilgebiet der Botanik haben oft Auswirkungen auf andere Teilgebiete.

Algen, Pilze und krankheitserregende Mikroorganismen

Außer mit dem Reich der Pflanzen beschäftigen sich Botaniker auch mit anderen Photosynthese betreibenden Organismen wie Algen (Kapitel 18) und Photosynthese betreibenden Bakterien. Die Untersuchung von Algen liefert Erkenntnisse über die Entwicklung der ersten Pflanzen aus algenähnlichen Vorfahren. Auch die Erforschung anderer Photosynthese betreibender Lebewesen führt zu einem besseren Verständnis der Mechanismen und der Bedeutung der Photosynthese. Immerhin sind Algen und Photosynthese betreibende Bakterien für ungefähr die Hälfte des weltweiten Gesamtumsatzes der Photosynthese verantwortlich.

Pilze führen keine Photosynthese durch und unterscheiden sich auf vielfältige Weise von Pflanzen (siehe Kapitel 19). Tatsächlich vertreten einige Wissenschaftler auf der Basis von DNA-Analysen die Ansicht, dass Pilze enger mit den Tieren als mit den Pflanzen ver-

wandt sind. Trotzdem befassen sich Botaniker häufig auch mit Pilzen, da sie Ähnlichkeiten mit Pflanzen haben und außerdem Pflanzen und Menschen beeinflussen können. Manche Pilze helfen den Wurzeln dabei, Mineralien zu absorbieren. Andere haben für den Menschen Bedeutung bei der Nahrungsmittelproduktion sowie für Antibiotika. Botaniker untersuchen auch, wie Pilze Pflanzen- und Tierkrankheiten verursachen. Außerdem erforschen sie, wie Bakterien und andere Mikroorganismen Pflanzenkrankheiten hervorrufen, und auch, wie Viren Pflanzen befallen und wie diese Resistenzen dagegen entwickeln (Kapitel 17).

Botaniker arbeiten in einer Vielzahl von Tätigkeitsfeldern. Im akademischen Bereich sind sie als Lehrer, Professoren und Forscher an Hochschulen beschäftigt. Sie arbeiten auch als Förster, Umweltberater und im Naturschutz. Gentechnik- und Pharmaunternehmen stellen Botaniker ein, um nützliche Pflanzen und Medikamente zu entwickeln. Botaniker arbeiten als Landwirte, Landschaftsarchitekten oder Gartenbautechniker, wobei sie sich auf Obst, Gemüse oder Zierpflanzen spezialisieren können. Manchmal sind sie auf bestimmte Typen von Pflanzen spezialisiert, z. B. Kräuter, Wein,

Schnittblumen, einheimische Gräser oder trockenheitstolerante Pflanzen für Rasenflächen und Gärten.

Wie Sie gesehen haben, befassen sich Botaniker mit vielen Gebieten der Forschung über eine erstaunliche Vielfalt von Pflanzen und ihnen nahe stehenden Organismen, die unser Leben auf vielfältige Weise berühren. Pflanzen sind für sich betrachtet faszinierende Lebensformen, doch man kann die Sache auch so sehen, dass wir Pflanzen studieren, weil unser Leben von ihnen abhängt.

WIEDERHOLUNGSFRAGEN

- 1 Was ist der Unterschied zwischen deduktiver und induktiver Schlussweise?
- 2 Beschreiben Sie allgemein, wie wissenschaftliche Erkenntnisse gewonnen werden.
- 3 Was ist der Unterschied zwischen einer stichhaltigen Hypothese und einer Theorie?
- 4 Nennen Sie einige Gebiete, auf denen Botaniker forschen.

Z U S A M M E N F A S S U N G

1.1 Die Bedeutung der Pflanzen

Photosynthese und das Leben auf der Erde

Die Photosynthese sichert das Leben auf der Erde auf drei Wegen: (1) Sie produziert Sauerstoff, den die meisten Lebewesen brauchen, um die in der Nahrung enthaltene Energie freizusetzen und zu nutzen; (2) sie liefert den Pflanzen direkt Energie und damit indirekt auch allen anderen Lebewesen innerhalb einer Nahrungskette; (3) sie produziert Zucker und andere Moleküle, welche die Grundbausteine des Lebens sind.

Pflanzen als Nahrungsquelle

Der Ackerbau ermöglichte es unseren Vorfahren, sesshaft zu werden. Frühe Bauern verbesserten Nutzpflanzen durch Züchtung. Moderne Pflanzenzüchter verbessern landwirtschaftliche Erträge, indem sie schneller wachsende oder krankheitsresistente Pflanzen entwickeln. Etwa 80 Prozent der Welternährung

basieren auf Weizen, Reis, Mais, Kartoffeln, Süßkartoffeln und Maniok. Pflanzen sind auch die Basis von Getränken wie Kaffee, Tee und Limonade; sie bereichern unser Essen in Form von getrockneten Kräutern und Gewürzen.

Pflanzliche Arzneimittel

Pflanzen werden seit Jahrhunderten zur Behandlung von Krankheiten verwendet. Durch die moderne Chemie sind mehr Pflanzenextrakte verfügbar geworden, die Alkaloide und andere hochwirksame Verbindungen enthalten. Viele Arzneimittel enthalten Pflanzenprodukte.

Pflanzen – Brennstoff, Baumaterial und Rohstoff für Papiererzeugnisse

Holz, das hauptsächlich aus toten Zellen der Baumstämme besteht, ist weltweit der wichtigste Brennstoff zum Kochen und Heizen. Fossile Brennstoffe

bestehen im Wesentlichen aus fossilisierten Pflanzenüberresten. Holz ist ein wichtiges Baumaterial und dient als Rohstoff zur Papierherstellung.

Biodiversitätsforschung

Die Biodiversitätsforschung sucht nach Möglichkeiten, wie die biologischen Ressourcen erhalten werden können. Weltweit existiert bereits etwa die Hälfte aller ursprünglichen Wälder nicht mehr. Die gegenwärtige Zerstörung der Regenwälder könnte zum Aussterben Tausender nützlicher Arten führen, die zum Teil noch nicht einmal bekannt sind.

Grüne Biotechnologie

Bemühungen, Pflanzen und Pflanzenprodukte zu verbessern, sind Gegenstand der Pflanzenbiotechnologie. Diese umfasst auch die Gentechnik, d. h. Verfahren zur Verbesserung von Pflanzen durch Übertragen und Verändern bestimmter Gene. Gentechnisch veränderte Pflanzen sind eine potenzielle Quelle für die Ernährung sowie für Impfstoffe. Sie können resistent gegen Pflanzenschädlinge, giftige Bodenminerale oder Herbizide sein. Berechtigte Bedenken bezüglich gentechnisch veränderten Pflanzen sind abzugrenzen von unbegründeten Ängsten.

1.2 Merkmale von Pflanzen und Pflanzendiversität

Die Merkmale der Pflanzen

Pflanzen sind mehrzellige Eukaryoten; sie besitzen Zellwände, die hauptsächlich aus Cellulose bestehen; fast alle Pflanzen führen Photosynthese durch; sie besitzen eine adulte Form, die Sporen produziert und eine weitere adulte Form, die Eizellen und Samenzellen produziert; sie haben einen mehrzelligen Embryo, der im weiblichen Elter geschützt liegt. In ihrer Gesamtheit sind diese Merkmale geeignet, Pflanzen von Tieren, Pilzen, Algen und Bakterien zu unterscheiden.

Moose

Bryophyten, d. h. Moose und verwandte kleine, nicht blühende Pflanzen, gehörten zu den ersten Landpflanzen.

Farne und andere Gefäßsporenpflanzen

Die meisten Pflanzen sind Gefäßpflanzen, d. h. sie besitzen ein Gefäßgewebe – aus Zellen bestehende Röhren, in denen Wasser und Nährstoffe transportiert werden. Farne sind die häufigsten Gefäßsporenpflanzen.

Nacktsamer: Nichtblühende Samenpflanzen

Die meisten Gefäßpflanzen besitzen Samen, Strukturen, die einen Embryo und einen Nahrungsvorrat enthalten. Nacktsamer (oder Gymnospermae) wie die Kiefern sind nichtblühende Gefäßpflanzen. Die Bezeichnung Nacktsamer rührt daher, dass die Samen nicht vollständig von Fruchtblatt eingeschlossen werden.

Bedecktsamer: Blühende Samenpflanzen

Blütenpflanzen, wissenschaftlich als *Bedecktsamer* (oder Angiospermae) bezeichnet, sind der häufigste Pflanzentyp. Bedecktsamer sind besser als andere Pflanzen in der Lage, sich an neue Umgebungen anzupassen, weil sie ein effizienteres System für den Wassertransport haben und weil ihre Samenanlagen in Früchten geschützt sind. In der Evolution des Pflanzenreichs gab es vier wichtige Entwicklungen: die Eroberung des Landes als Lebensraum, die Entstehung des Gefäßsystems, die Entstehung von Samen und die Entstehung von Blüten und Früchten.

1.3 Botanik und Wissenschaftsmethodik

Überprüfen von Hypothesen

Wissenschaftliche Erkenntnisse leiten sich aus der direkten Beobachtung und aus Experimenten ab, wobei Hypothesen überprüft werden. Das Vorgehen umfasst (1) die Beobachtung und die Sammlung von Daten, (2) die kritische Formulierung von Fragen, (3) das Aufstellen einer Hypothese, (4) das Überprüfen der Hypothese und (5) das Akzeptieren, Modifizieren oder Verwerfen der Hypothese. Eine Hypothese, die durch Beobachtungen oder Experimente gestützt wird, kann für einen breiteren Anwendungsbereich überprüft werden und wird dann gegebenenfalls zu einer Theorie.

Teildisziplinen der Botanik

Botaniker untersuchen viele Aspekte der Pflanzen, z. B. Evolution, Funktionen, Struktur, Lebenszyklen und Fortpflanzung, Ökologie und Genetik. Für Botaniker bietet sich ein vielfältiges Betätigungsgebiet, z. B. in der Lehre, im Management von Wäldern und Naturschutzgebieten, in der Ökologie, in der Pharmaindustrie, im Pflanzenschutz, in Landwirtschaft, Landschaftsgestaltung und im Gartenbau.

Algen, Pilze und krankheitserregende Mikroorganismen

Die Erforschung von Algen und anderen Photosynthese betreibende Organismen hilft den Botanikern beim Verständnis der Photosynthese. Botaniker untersuchen, wodurch Pilze für Pflanzen und Menschen nützlich oder schädlich sind und wie Mikroorganismen und Viren bei Pflanzen Krankheiten verursachen.

Z U S A M M E N F A S S U N G**Verständnisfragen**

- 1** Wie ermöglicht die Photosynthese das Leben auf der Erde?
- 2** Inwiefern ist die Landwirtschaft eine Grundlage der menschlichen Zivilisation?
- 3** Nennen Sie einige Beispiele, wie Pflanzen in der Medizin genutzt werden.
- 4** Erklären Sie, warum Pflanzen – direkt oder indirekt – die Quelle des größten Teils der Energie der Erde sind.
- 5** Woraus besteht Holz? Wofür werden Holz und Holzprodukte verwendet?
- 6** In welcher Beziehung stehen Pflanzen zur Biodiversitätsforschung?
- 7** Ist Biotechnologie das Gleiche wie Gentechnik? Erläutern Sie Ihre Antwort.
- 8** Warum entwickeln Botaniker gentechnisch veränderte Pflanzen? Welche potenziellen Probleme entstehen durch solche Pflanzen?
- 9** Anhand welcher fünf Merkmale werden Pflanzen gewöhnlich definiert?
- 10** Was waren die wichtigsten evolutionären Veränderungen in der stammesgeschichtlichen Entwicklung der Pflanzen?
- 11** Geben Sie jeweils eine kurze Beschreibung der folgenden vier Pflanzentypen: Bryophyten, Gefäßsporenpflanzen, Nacktsamer und Bedecktsamer.
- 12** Was ist die Basis wissenschaftlicher Erkenntnisse?
- 13** Welche Rolle spielt die induktive Schlussweise in der Wissenschaftsmethodik?
- 14** Nennen Sie einige Teilgebiete der Botanik.

Diskussionsfragen

- 1 Was ist Ihrer Meinung nach der Grund dafür, dass viele Menschen Pflanzen als selbstverständlich hinnehmen? Was würden Sie ihnen entgegenhalten?
- 2 Erläutern Sie die Aussage „Pflanzen brauchen uns nicht, aber wir brauchen die Pflanzen“.
- 3 In welchem Sinne könnte man sagen, dass Pflanzen uns brauchen?
- 4 Wählen Sie eine der in diesem Kapitel genannten gentechnisch veränderten Pflanzen und diskutieren Sie mögliche Vorteile und Probleme, die berücksichtigt werden müssen, wenn darüber entschieden wird, ob und wie diese Pflanze genutzt wird.
- 5 Manche Leute fordern, dass alle Nahrungsmittel dahingehend gekennzeichnet werden sollten, ob sie genetisch veränderte Zutaten enthalten. Stimmen Sie mit dieser Forderung überein? Erläutern Sie Ihre Antwort.
- 6 Warum muss eine Hypothese falsifizierbar sein?
- 7 Ist die Aussage „Ein Jungeselle ist ein unverheirateter Mann“ eine Hypothese? Erläutern Sie Ihre Antwort.
- 8 Gehen Sie noch einmal die Schritte durch, nach denen wissenschaftliche Erkenntnisse gewonnen werden. Was glauben Sie ist der Grund, warum Wissenschaftler nicht immer streng nach diesen Schritten vorgehen? Geben Sie einige Beispiele an.
- 9 Formulieren Sie eine Frage über Pflanzen und beschreiben Sie einen wissenschaftlichen Zugang zur Beantwortung dieser Frage. Eine geeignete Frage wäre z.B.: „Wie wirkt sich das Verschneiden von Ästen auf das Wachstum von Bäumen aus?“
- 10 Inwiefern illustriert die Aussage „Die Evolution ist nur eine Theorie“ ein grundlegendes Missverständnis bezüglich der wissenschaftlichen Bedeutung des Begriffs *Theorie*?
- 11 Skizzieren Sie eine aus Wasserlebewesen bestehende Nahrungskette, die mit einem Primärproduzenten beginnt und mindestens vier weitere Stufen hat (siehe Abbildung 1.1 als Beispiel).

Zur Evolution

Betrachten Sie folgende vier Pflanzentypen: Moose, Farne, Koniferen, Blütenpflanzen. Listen Sie, beginnend mit den Farnen und dann übergehend zu den Koniferen bzw. Blütenpflanzen, charakteristi-

sche Merkmale jeder Gruppe auf, die in der jeweils vorhergehenden Gruppe fehlen. Welche dieser Merkmale repräsentieren evolutionäre Trends innerhalb des Pflanzenreichs?

Weiterführendes



Weitere Informationen zu diesem Buchkapitel finden Sie auf der Companion Website unter <http://www.pearson-studium.de>.

Angel, Heather. Die Grüne Arche. Die einzigartige Welt der Pflanzen im Botanischen Garten Kew. Hildesheim: Gerstenberg Verlag, 1994.

Bacon, Francis und Peter Ubach. Novum Organum: With Other Parts of the Great Instauration. Chicago: Open Court, 1994. *Eine neue Studienausgabe von Bacons berühmter Arbeit aus dem Jahr 1620, in der er fordert, dass Wissenschaftler detaillierte Beobachtungen machen müssen, anstatt sich auf die Tradition zu verlassen.*

Balick, Michael J. und Paul Alan Cox. Drogen, Kräuter und Kulturen. Pflanzen und die Geschichte des Menschen. Heidelberg: Spektrum Akad. Verlag, 1996. *Ein Plädoyer für die Erhaltung der genetischen Vielfalt der Pflanzen und des Wissens vieler Völker über ihre Fähigkeiten.*

Brücher, Heinz. Die sieben Säulen der Welternährung. Senckenberg-Buch 59. Frankfurt am Main:

Kramer, 1982. *Stellt die kritische Frage, ob angesichts der wachsenden Weltbevölkerung die Nutzung nur weniger Hohertragsorten der Grundnahrungsmittel nicht ein Risiko darstellt. Der Autor gibt spannende Einblicke in die Entstehung der heutigen Nutzpflanzen aus Wildformen und frühen Landsorten.*

Hobhouse, Henry. Fünf Pflanzen verändern die Welt. München: DTV, 1996. *Enthält faszinierende Details und Geschichten, die erzählen, wie Pflanzen die Geschichte und Belange der Menschheit beeinflussen haben.*

Huxley, Anthony. Green Inheritance. The World Wildlife Fund Book of Plants. Mit einem Vorwort von David Attenborough. London: Harvill, 1984.

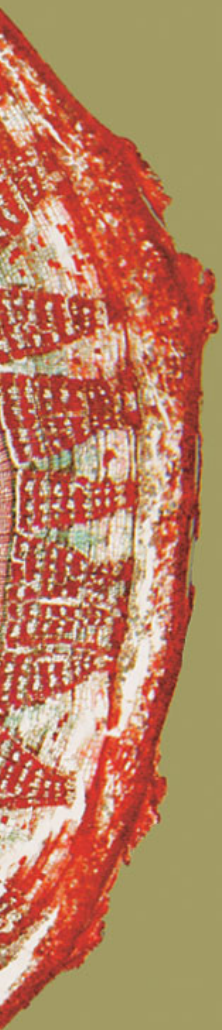
Simpson, B.B. und M. Conner-Ogorzaly. Economic Botany: Plants in Our World, 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1995. *Enthält viele Beispiele für Pflanzen, die in der einen oder anderen Weise für den Menschen wichtig sind.*



TEIL I

Strukturen

2	Zellstruktur und Zellzyklus	29
3	Einführung in die Pflanzenstruktur	57
4	Wurzeln, Sprosse und Blätter: Der primäre Pflanzenkörper	83
5	Sekundäres Wachstum	117
6	Lebenszyklen und Fortpflanzungsstrukturen	143



Zellstruktur und Zellzyklus

2

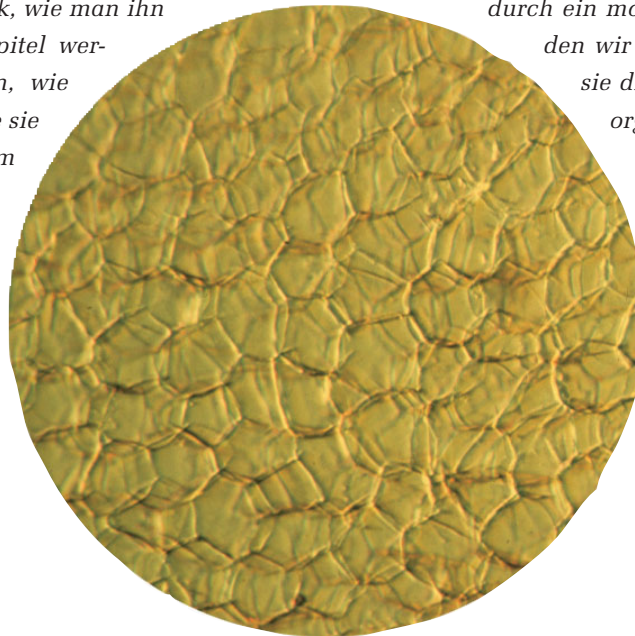
2.1	Ein Überblick über Zellen	31
2.2	Wichtige Zellorganellen	35
2.3	Das Cytoskelett	41
2.4	Membranen und Zellwände	43
2.5	Zellzyklus und Zellteilung	46
	Zusammenfassung	51
	Verständnisfragen	54
	Diskussionsfragen	55
	Zur Evolution	55
	Weiterführendes	56

ÜBERBLICK

■ ■ Vor dem 17. Jahrhundert wusste niemand, dass große Organismen aus vielen kleinen lebendigen Einheiten bestehen, die wir als Zellen bezeichnen. Da die meisten Zellen mikroskopisch klein sind, können wir sie mit bloßem Auge nicht erkennen. Zellen haben typischerweise Durchmesser zwischen 1 und 300 Mikrometern (μm). Ein Mikrometer ist ein Millionstel eines Meters. Um die Relationen zu verdeutlichen: Ein Durchmesser von 300 μm ist nur etwa ein Drittel eines Millimeters. Die Erfindung des ersten Mikroskops am Ende des 16. Jahrhunderts eröffnete der Wissenschaft daher neue Möglichkeiten.

Der englische Wissenschaftler Robert Hooke (1635–1703) war der Erste, der eine Zelle beobachtete (siehe den Kasten Pflanzen und Menschen auf Seite 32). Im Jahr 1665 beobachtet er mithilfe eines selbst entwickelten und konstruierten mehrlinsigen Mikroskops Pflanzenzellen in einem Rindenschnitt einer Eiche. In diesem Jahr veröffentlichte er *Micrographia* („Kleine Zeichnungen“) – ein Buch, das seine Illustrationen seiner mikroskopischen Entdeckungen enthielt. Hooke benutzte den Begriff Zelle für die winzigen Abteile innerhalb der Eichenrinde, weil sie ihn an Mönchszellen erinnerten. Das Wort Zelle an sich stammt aus dem Lateinischen (*cella*) und bedeutet „kleiner Raum“.

Über die Jahre hinweg haben neue Entdeckungen das Interesse von Wissenschaftlern und Laien gleichermaßen erregt. Es ist wirklich wunderbar und spannend, Zellen zu beobachten, wie etwa die hier abgebildete Darstellung von Kork, wie man ihn durch ein modernes Lichtmikroskop wahrnimmt. In diesem Kapitel werden wir die Welt der Zellen im Hinblick darauf behandeln, wie sie die Grundlage der lebewesen bilden, wie sie organisiert sind und wie sie durch Teilung Wachstum und Fortpflanzung ermöglichen. ■ ■



Ein Überblick über Zellen 2.1

Alle lebenden Organismen bestehen aus einer oder mehreren Zellen. Die meisten Zellen sind mikroskopisch klein und mit bloßem Auge entweder kaum oder gar nicht sichtbar. Warum sind Zellen so klein? Das hat wesentlich mit dem Verhältnis des Oberflächeninhalts der Zelle zu ihrem Volumen zu tun. Wenn Zellen größer werden, dann wachsen mit dem Radius (r) auch das Volumen und der Oberflächeninhalt. Doch wächst ihr Volumen (r^3) stärker als ihre Oberfläche (r^2), ein Verhältnis, das unabhängig von der Zellform gilt. Eine Zelle muss relativ klein bleiben, damit durch ihre Oberfläche, die den Eintritt von Sauerstoff, Wasser und Nährstoffen reguliert, der Bedarf im Zellinneren gedeckt werden kann. Wenn eine Zelle zu groß wird, kann ihr genetisches Material Informationen nicht mehr hinreichend schnell transportieren, um den Bedürfnissen der Zelle gerecht zu werden.

Trotz ihrer geringen Größe sind Zellen alles andere als einfach. Sie führen eine große Vielfalt von Funktionen aus, die das Leben von Organismen aufrechterhalten. Zum Verständnis der Welt der Pflanzen, oder jedes anderen Organismus, gehört zunächst die Untersuchung der Struktur und der Funktion von Zellen.

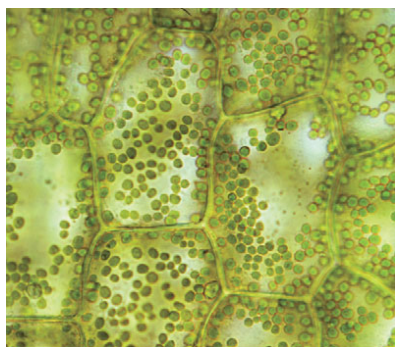
Mikroskopie

Mikroskope dienen uns als Fenster in die Zelle. Das Auflösungsvermögen von Lichtmikroskopen hat sich

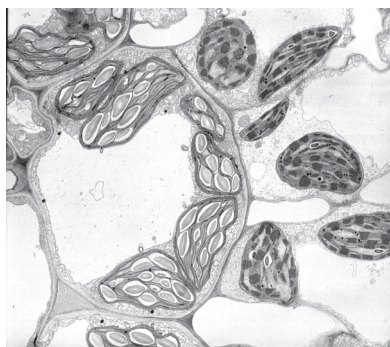
über die Jahre hinweg beachtlich verbessert, doch das grundlegende Prinzip ist dasselbe geblieben. Alle **Mikroskope** lenken die Strahlen des sichtbaren Lichts mit Glaslinsen ab, wodurch ein vergrößertes Bild erzeugt wird (► Abbildung 2.1). Ein modernes **Lichtmikroskop** kann Objekte auflösen, die nur 200 Nanometer (nm) voneinander entfernt sind. Anders ausgedrückt: Ihr Auflösungsvermögen ist 1000 Mal besser als das des menschlichen Auges.

Die Entwicklung des **Elektronenmikroskops** im Jahr 1939, bei dem Elektronen durch magnetische statt durch optische Linsen fokussiert werden, ermöglichte eine Fülle von Entdeckungen in Zellen. Das **Transmissionselektronenmikroskop (TEM)** enthüllt Zellstrukturen, indem Elektronen einen dünnen Gewebequerschnitt vollständig durchdringen (► Abbildung 2.1b). Ein TEM kann Objekte bis zu 100.000-fach vergrößern, wodurch Wissenschaftler Zellstrukturen in der Größenordnung von 2 nm betrachten können. Das ist gegenüber dem Lichtmikroskop ein großer Fortschritt. Bei einer zweiten Art Elektronenmikroskop, dem **Rasterelektronenmikroskop (REM)**, lässt man Elektronen an einer Probe abprallen, um die Oberflächenstruktur zu erfassen. Häufig ergibt sich dadurch eine detaillierte dreidimensionale Sicht (► Abbildung 2.1c). Ein REM kann Objekte bis zu 20.000-fach vergrößern, wobei man detaillierte Ansichten von Zellen, Zellgruppen und kleinen Organismen oder Organismenteilen erhält.

Insgesamt gesehen sind Lichtmikroskope und Rasterelektronenmikroskope äußerst nützlich, um Strukturen zu betrachten, die sich unterhalb des Auflösungsvermögens des menschlichen Auges befinden. Transmissi-



(a) Lichtmikroskopaufnahme von Zellen mit Chloroplasten.



(b) Transmissionselektronenmikroskopaufnahme von Zellen mit Chloroplasten.



(c) Eingefärbte Rasterelektronenmikroskopaufnahme von Pollen.

Abbildung 2.1: Verschiedene Mikroskopieverfahren und ihre Vergrößerungsbereiche. (a) Diese Aufnahme stammt von einem modernen Lichtmikroskop, in dem zunächst eine Linse das Objekt vergrößert, das durch die Okularlinse wiederum vergrößert und umgekehrt wird. (b) Diese Aufnahme stammt von einem Transmissionselektronenmikroskop, das denselben Grundaufbau wie das Lichtmikroskop hat. Die Glaslinsen sind jedoch durch magnetische Linsen ersetzt. (c) Diese Aufnahme stammt von einem Rasterelektronenmikroskop, bei dem Elektronen an der Oberfläche des Objekts abprallen. Ein Computer erstellt aus den Trajektorien der Elektronen ein Bild.

PFLANZEN UND MENSCHEN

■ Pioniere der Mikroskopie

Robert Hooke war ein wissenschaftlicher Virtuose, der Entdeckungen auf so verschiedenartigen Gebieten wie der Biologie, der Physik und der Astronomie machte. Laut einer Biographie aus dem Jahre 1705 war Hooke „ein aktiver, ruhelooser, unermüdlicher Genius ... , der bis zu seinem Tode wenig schlief und selten vor zwei, drei oder vier Uhr morgens zu Bett ging.“

Hooke unterhielt eine Verbindung zu dem niederländischen Amateurforscher Antonie van Leeuwenhoek (1632–1723). Van Leeuwenhoek baute Hunderte winzige, einlin-sige Mikroskope, die nur einige Zentimeter lang waren. Aus heutiger Sicht ähneln sie eher Miniaturausgaben von Violinen als Mikroskopen (im Bild links). Doch lieferten sie eine bis zu 500-fache Vergrößerung mit minimaler Verzerrung. Diese Mikroskope unterschieden sich grundlegend von den damals üblichen Instrumenten, bei denen es sich um bis zu einen Meter lange Röhren handelte (im Bild rechts). Solche Röhren enthielten mindestens zwei Linsen, die gewöhnlich hergestellt wurden, indem man Glas zunächst in verschiedene Formen blies und es dann mutwillig in der Hoffnung zerschlug, dadurch Bruchstücke mit linsenartigen optischen Eigenschaften zu erhalten. Diese Linsen hatten tatsächlich einen Vergrößerungseffekt, sie führten aber auch

zu Verzerrungen. Durch Hinzunahme einer zweiten Linse wurde die Verzerrung einfach nur verstärkt. In Anbetracht dessen wurde van Leeuwenhoek eine bedeutende Persönlichkeit in der Mikroskopie, dem Einsatzgebiet von Mikroskopen, weil er der Erste war, der einlin-sige Mikroskope baute, die den Beobachtungsgegenstand nicht verzerrten.

Van Leeuwenhoek fand Mikroben nahezu überall, wo er hinsah. „Es gibt“, sagte er, „mehr Tierchen, die im Belag auf den Zähnen im Mund eines Mannes leben, als Männer im ganzen Königreich.“ Im November 1677 bestätigte Hooke van Leeuwenhoeks aufsehenerregende Behauptung, dass viele winzige Tierchen in einem Teichwassertropfen lebten. Van Leeuwenhoek war nicht überrascht, dass viele Leute seine Beobachtungen anzweifeln. „Ich kann mich darüber nicht wundern“, schrieb er, „weil es schwierig ist, solche Dinge nachzuvollziehen, ohne es selbst gesehen zu haben.“ In seiner Bestätigung schrieb Hooke, dass die Tierchen „perfekt gestaltet“ seien und „so seltsame Bewegungsorgane“ hätten, „durch die sie sich flink bewegen konnten, um nach Belieben zu wenden, stehen zu bleiben, zu beschleunigen und abzubrem-sen“. Van Leeuwenhoeks und Hookes Beiträge zur Mikroskopie eröffneten tatsächlich eine neue Dimension der Wissenschaft.



onselektronenmikroskope sind am besten geeignet, um sehr hohe Vergrößerungen von Strukturen innerhalb einer Zelle zu erhalten. In diesem Buch wird neben jeder Mikroskopaufnahme eine Skala zum Größenvergleich angegeben sein. Die Legende wird das Foto als Lichtmikroskopaufnahme (LM), Transmissionselektronenmikroskopaufnahme (TEM) oder als Rasterelektronenmikroskopaufnahme (REM) kennzeichnen und darauf hinweisen, ob es sich um eine eingefärbte Aufnahme handelt, da bei REM und TEM eigentlich keine Farben sichtbar werden. ► Abbildung 2.2 liefert eine Übersicht, welche Objekte mit welchem Mikroskop beobachtet werden können.

Zelltheorie

Zwischen dem 17. und 18. Jahrhundert, als Wissenschaftler die Details von Organismen mit Lichtmikroskopen beobachteten, entwickelten sich die Vorstellungen von der Zelle weiter. Aber erst Mitte des 19. Jahrhunderts bildete sich eine Theorie über die Natur und die Bedeutung von Zellen heraus. Im Jahr 1838 zog der deutsche Botaniker Matthias Schleiden aus mikroskopischen Beobachtungen der Pflanzenstruktur den Schluss, dass alle Pflanzenteile aus Zellen bestehen. Tatsächlich machen die Zellwände die Grenzen zwischen Zellen leicht sichtbar, selbst bei Beobachtung

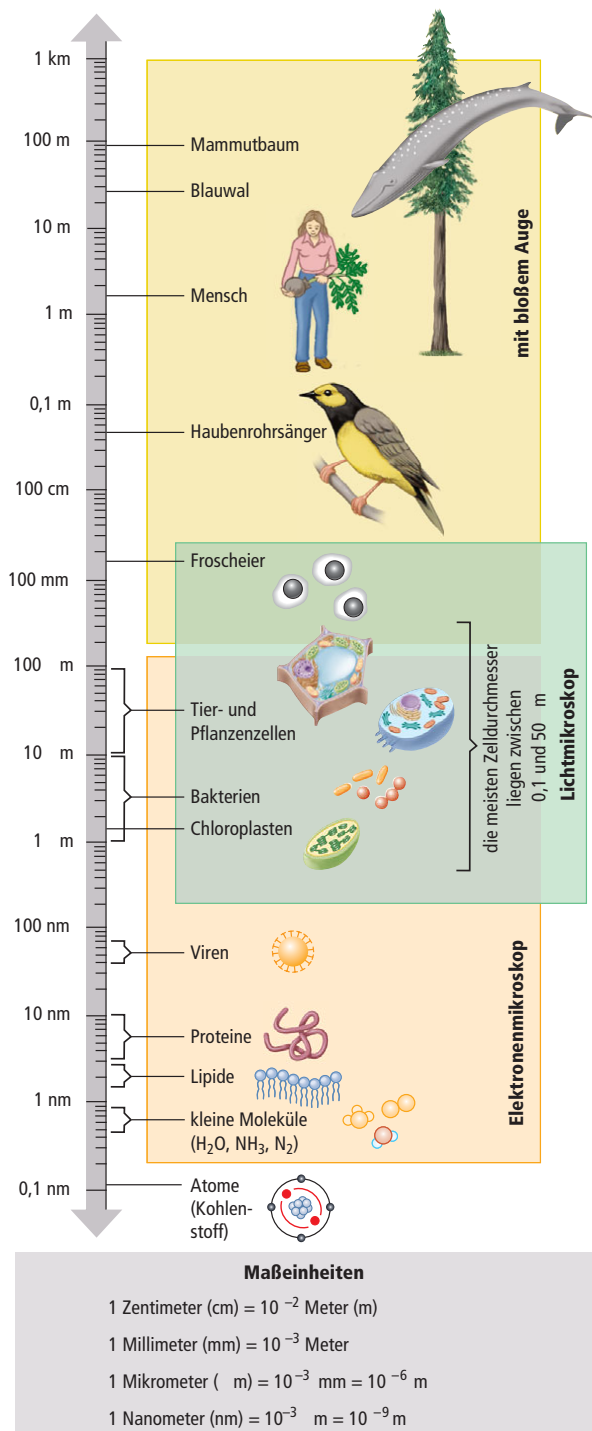


Abbildung 2.2: Mikroskopaufnahmen. Dieses Diagramm zeigt einige typische Objekte, mit bloßem Auge oder mithilfe eines Licht- oder Elektronenmikroskops betrachtet. Die angegebene Skala ist exponentiell. Jede Einheit ist also 10 Mal größer als die vorhergehende.

durch einfache Lichtmikroskope. Tierzellen, die keine Zellwände besitzen, konnten nicht so genau unterschieden werden. Dennoch bestätigte der deutsche Biologe Theodor Schwann im Jahr 1839, dass Tiere ebenfalls

aus Zellen bestehen. Im Jahr 1855 kam ein anderer deutscher Biologe, Rudolf Virchow, zu einem weiteren Schluss – dass sich Zellen nämlich nur aus bereits existierenden Zellen bilden können. Insgesamt wurden diese Beobachtungen unter dem Namen **Zelltheorie** bekannt, die in Form von drei wesentlichen Aussagen zusammengefasst werden kann:

- 1 Alle Organismen bestehen aus einer oder mehreren Zellen.
- 2 Die Zelle ist der Grundbaustein aller Organismen.
- 3 Alle Zellen stammen von bereits existierenden Zellen ab.

Kurz, die Zelltheorie besagt, dass die Zelle die Grundlage für die Struktur und die Fortpflanzung eines Organismus ist. Nehmen Sie sich einen Moment Zeit, um die erstaunlichen Folgerungen aus dieser einfachen Theorie zu betrachten. Mikroskopisch kleine Zellen bilden Organismen, deren Größe von der einer einzelligen Alge bis hin zu hoch aufragenden Mammutbäumen reicht. Durch den Prozess der Zellteilung kann sich eine einzelne Zelle zu einem mehrzelligen Organismus mit Billionen von Zellen entwickeln. Die Zelltheorie revolutionierte unser Wissen über Lebewesen.

Prokaryotische und eukaryotische Zellen

Wie Sie aus Kapitel 1 wissen, lassen sich alle Organismen in Abhängigkeit von ihrem Zelltyp in prokaryotische und eukaryotische unterteilen. Prokaryoten waren die ersten Lebensformen auf der Erde, die es bereits vor mindestens 3,5 Milliarden Jahren gab. Etwa 1,4 Milliarden Jahre lang existierten keine anderen Organismen, bis sich die Eukaryoten aus den Prokaryoten entwickelten. Eukaryotische Zellen sind komplexer und im Allgemeinen größer als prokaryotische Zellen. Anders als bei prokaryotischen Zellen befindet sich außerdem die DNA in einer eukaryotischen Zelle in einem abgeschlossenen Kern. Die Begriffe *prokaryotisch* (von griechisch *pro karyon*, „vor dem Kern“) und *eukaryotisch* (von griechisch *eu karyon*, „guter Kern“) spiegeln die evolutionäre Veränderung wider. Darüber hinaus hat eine eukaryotische Zelle mindestens 1000 Mal so viel DNA wie eine typische prokaryotische Zelle. In einem Prokaryoten ist die DNA als ein ringförmiges Chromosom angeordnet, während die DNA in einem Eukaryoten in Form eines oder mehrerer linearer Chromosomen erscheint.

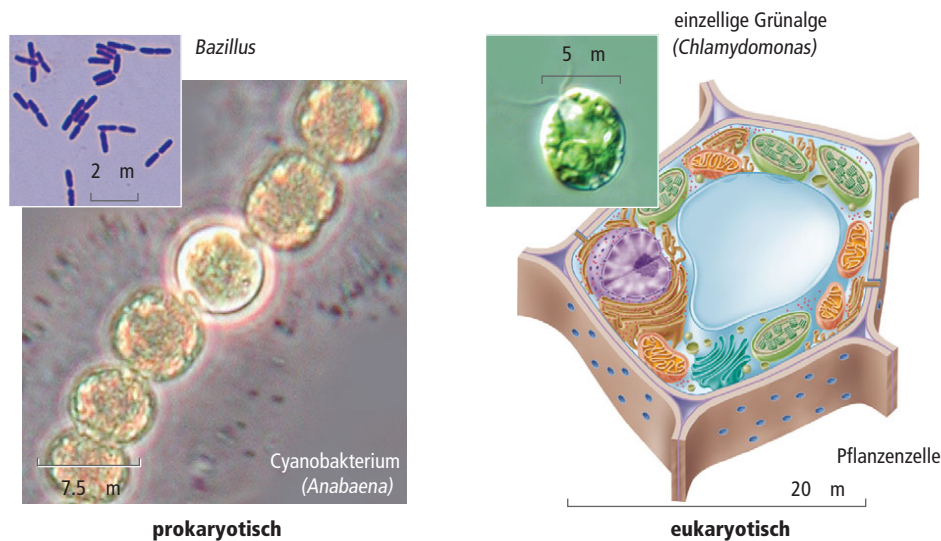


Abbildung 2.3: Vergleich zwischen prokaryotischen und eukaryotischen Zellen. Obwohl sich die Größenbereiche prokaryotischer und eukaryotischer Zellen überlappen, sind eukaryotische Zellen gewöhnlich größer.

Eukaryotische Zellen sind mit einem Durchmesser zwischen 5 und 300 µm im Allgemeinen größer als prokaryotische Zellen. Der Durchmesser einer typischen prokaryotischen Zelle liegt gewöhnlich zwischen 1 und 10 µm (► Abbildung 2.3). Man müsste 1000 der kleinsten prokaryotischen Zellen aneinander legen, um die Länge von einem Millimeter zu erreichen. Die bekanntesten Prokaryoten sind einzellige Organismen, die man als *Bakterien* bezeichnet. Bei einem Bakterium oder einem einzelligen Eukaryoten ist die Zelle bereits der Organismus, wobei aber viele Eukaryoten mehrzellig sind.

Ein wichtiger, grundlegender Unterschied zwischen Prokaryoten und Eukaryoten besteht in ihrem Umgang mit den vielen Funktionen, die zur Lebenserhaltung der Zelle notwendig sind. Alle Zellen sind von einer flexiblen, schützenden Hülle umgeben, die als **Plasmamembran** oder **Zellmembran** (von lateinisch *membrana*, „Haut“) bezeichnet wird, mitunter auch **Plasmalemma** (von griechisch *lemma*, „Hülle“) genannt. Die Plasmamembran steuert die Bewegung von Wasser, Gasen und Molekülen in die Zelle hinein und aus der Zelle heraus. Bei Prokaryoten übernehmen die Plasmamembran oder Erweiterungen der Plasmamembran die grundlegenden Zellfunktionen. Bei Eukaryoten wird dieser Prozess jedoch durch **Organellen** („kleine Organe“) bewältigt, bei denen es sich um separate Zellstrukturen handelt, die fast immer selbst ein oder zwei Membranen haben.

Wie bildeten sich die Organellen heraus, als eukaryotische Zellen aus prokaryotischen Zellen entstanden?

In den 1970er-Jahren entwickelte die amerikanische Wissenschaftlerin Lynn Margulis ein starkes Argument für die **Endosymbiontentheorie**. Nach der ursprünglich von einem russischen Wissenschaftler Anfang des 20. Jahrhunderts vorgeschlagenen Theorie entwickelten sich die Vorläufer der Organellen dadurch, dass prokaryotische Zellen andere prokaryotische Zellen aufnahmen. Vor etwa zwei Milliarden Jahren blieben offenbar einige dieser aufgenommenen Zellen erhalten, weil dies beiden Zellen beim Überleben half (► Abbildung 2.4). Wenn beispielsweise ein Bakterium, das effizient und schnell Energie erzeugte, von einer Zelle aufgenommen wurde, die sich durch Zellteilung effizient und schnell fortpflanzte, dann war die Verbindung bei-

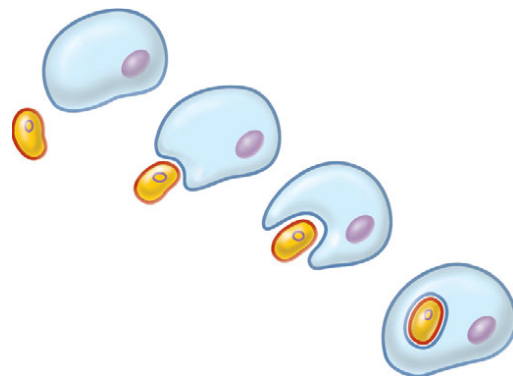


Abbildung 2.4: Endosymbiose. Organellen, wie Mitochondrien und Chloroplasten, haben vermutlich Doppelmembranen, weil sie sich aus Prokaryoten entwickelten, die in eine andere Zelle eindrangten. Neueste Forschungen weisen darauf hin, dass auch der Kern durch Endosymbiose entstand.

der Zellen erfolgreicher als jede Zelle für sich. Der Begriff *Endosymbiose* bedeutet wörtlich „ineinander zusammenlebend“.

Die Endosymbiontentheorie erklärt, warum einige Organellen, über die Sie bald etwas lesen werden, wie Mitochondrien und Chloroplasten, zwei Membranen haben, ein Merkmal, das Wissenschaftler lange verwundert hat. Die innere Membran könnte die ursprüngliche Membran des aufgenommenen Bakteriums sein, während die äußere Membran durch das Wirtsbakterium gebildet wurde, als es das andere Bakterium verschlang. Die Theorie erklärt auch, warum einige Organellen Chromosomen besitzen, die der gewundenen DNA in Bakterien ähneln und nicht der linearen DNA im Kern, und die Ribosomen in Organellen denen von Bakterien näher stehen als denen im Cytosol derselben Zelle.

Zellprodukte

Trotz der Unterschiede in Größe und Struktur ähneln sich prokaryotische und eukaryotische Zellen in ihrem grundlegenden **Stoffwechsel** oder in ihren dabei ablaufenden chemischen Reaktionen. Beide Zelltypen produzieren vier Arten von **Makromolekülen** (große Moleküle, die sich aus kleineren Molekülen zusammensetzen), die Organismen zum Überleben brauchen: Nucleinsäuren, Proteine, Kohlenhydrate und Lipide. Doch nur Zellen autotropher Organismen („Selbsternährer“), wie Pflanzen oder andere Photosynthese betreibende Organismen, können diese Makromoleküle ohne die Nährstoffzufuhr durch andere Organismen synthetisieren. Die Zellen heterotropher Organismen, wie die von Tieren und Pilzen, müssen die Bausteine direkt oder indirekt aus Pflanzen aufnehmen. In Kapitel 7 werden die chemischen Reaktionen in Zellen detaillierter diskutiert. Im Moment werden wir nur kurz die Strukturen und Funktionen von Nucleinsäuren, Proteinen, Kohlenhydraten und Lipiden betrachten.

Nucleinsäuren beinhalten die genetische Information der Zelle. Wie Sie aus Kapitel 1 wissen, speichert die **DNA (Desoxyribonucleinsäure)** Sequenzen der genetischen Information, die man als *Gene* bezeichnet. Die andere Art der Nucleinsäure ist **RNA (Ribonucleinsäure)**, die von der DNA kopiert und zur Steuerung der Zellfunktionen benutzt wird. In Kapitel 13 wird verdeutlicht, wie die genetische Information gespeichert und benutzt wird.

Die genetische Information in Form von RNA steuert die Synthese von **Proteinen**, die aus Aminosäureketten

bestehen. Es gibt 20 verschiedene Aminosäuren, und man kann daraus unzählige Proteine bauen. Im menschlichen Körper gibt es beispielsweise Zehntausende verschiedene Proteine, die jeweils aus einer einzigartigen Sequenz von Aminosäuren bestehen. Einige Proteine sind strukturelle Bausteine, während andere, als **Enzyme** bezeichnet, beim Ablauf chemischer Reaktionen helfen, indem sie als Katalysatoren wirken. Außerdem speichern Proteine Aminosäuren, sie reagieren auf Signale, transportieren Substanzen, schützen vor Krankheiten und führen zahlreiche weitere Funktionen aus. Die Proteine eines Organismus definieren auch seine physischen Merkmale. Schon die Bezeichnung *Protein*, vom griechischen Wort *proteios*, „den ersten Platz einnehmend“, spiegelt die Schlüsselrolle dieser Makromoleküle wider.

Kohlenhydrate, wie Zucker und Stärke, sind Makromoleküle, die sich aus Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff zusammensetzen. Kohlenhydrate liefern und speichern Energie, beispielsweise als Stärke, und können als Bausteine von Molekülen dienen, wie beispielsweise von Cellulose in der Zellwand einer Pflanzenzelle.

Lipide (von griechisch *lipos*, „Fett“) sind wasserunlösliche Makromoleküle, wie beispielsweise Fette. Neutralfette speichern hauptsächlich Energie, während Phospholipide wichtige Bausteine von Membranen sind.

WIEDERHOLUNGSFRAGEN

- 1 Welche Haupttypen von Mikroskopen gibt es, und worin unterscheiden sie sich?
- 2 Worin unterscheiden sich eukaryotische Zellen von prokaryotischen Zellen?
- 3 Beschreiben Sie die grundlegenden Funktionen von Nucleinsäuren, Proteinen, Kohlenhydraten und Lipiden.

Wichtige Zellorganellen 2.2

Fast alle Organellen einer typischen Pflanzenzelle finden sich auch in den Zellen anderer Eukaryoten. Die Ausnahmen bilden Chloroplasten und eine große zentrale Vakuole, die man gewöhnlich bei prokaryotischen

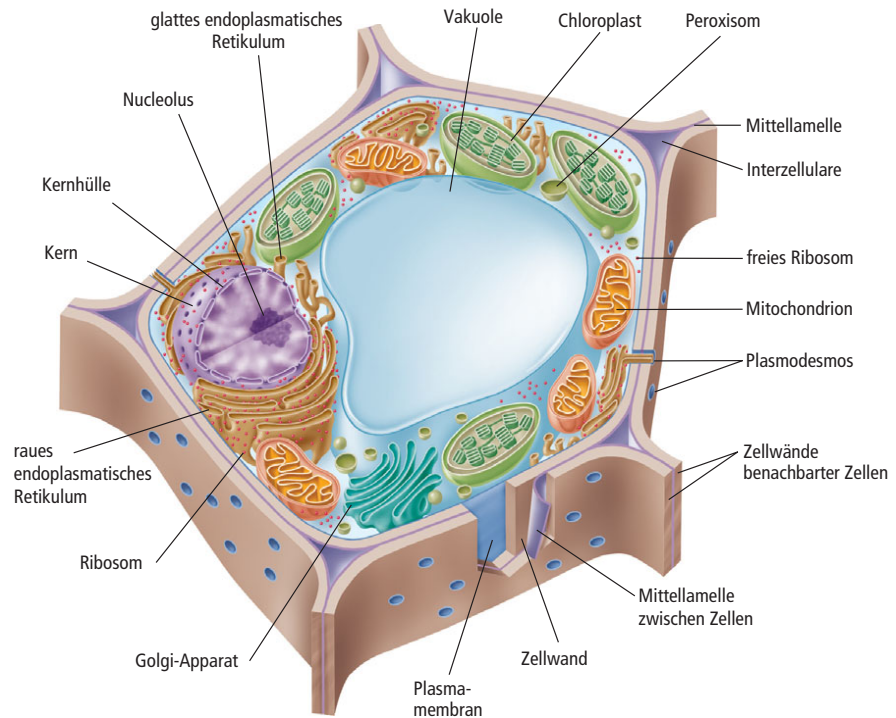


Abbildung 2.5: Struktur einer typischen Pflanzenzelle. Dieses Bild einer verallgemeinerten Pflanzenzelle zeigt die für Eukaryoten charakteristischen Merkmale (nicht maßstabsgetreu).

Photosynthese betreibenden Organismen, bei Pilzen oder bei Tieren, nicht findet.

Das Innere einer Pflanzenzelle – also alles außer der Zellwand – bezeichnet man als **Protoplast**. Der Protoplast besteht aus dem Kern und dem **Cytoplasma** – allen Zellbestandteilen innerhalb der Plasmamembran außer dem Kern. (*Cyto* bezieht sich auf die Zelle und *plasma* bedeutet „gebildetes Material“.) Zur Visualisierung der Organellen einer Pflanzenzelle und ihrer Funktionen stellen Sie sich am besten das Innere als eine Miniaturfabrik vor, wobei der Kern als „Oberaufsicht“ die Arbeit koordiniert, die im Cytoplasma vor sich geht. ► Abbildung 2.5 gibt einen Überblick über eine typische Pflanzenzelle.

Zellkern

Wie bei anderen eukaryotischen Zellen ist die DNA bei Pflanzenzellen im Kern in komplexe, fadenförmige Strukturen untergliedert, die man als **Chromosomen** bezeichnet. Jedes Chromosom besteht aus vielen Genen, wobei jedes Gen der „Bauplan“ zur Synthese eines speziellen Proteins ist. Sie heißen *Chromosomen* (von griechisch *chroma*, „Farbe“, und *soma*, „Körper“), weil sie eingefärbt werden können, um später mit einem Lichtmikroskop zu beobachten, wie sie sich vor der Zellteilung verkürzen und verdicken. Eine Vielzahl von

Proteinen, die an die DNA in den Chromosomen gekoppelt sind, spielt eine Rolle, wenn es um die Entscheidung geht, ob ein bestimmtes Gen in einer speziellen Zelle aktiv oder inaktiv ist.

Der Kern enthält auch **Nucleoli** (Singular: Nucleolus), die als runde Strukturen erscheinen, die an Chromosomen gekoppelt sind. Der typische Kern besitzt ein oder zwei Nucleoli. Sie synthetisieren die Untereinheiten, aus denen sich dann im Cytoplasma Ribosomen bilden. Die Rolle von Ribosomen wird in Kürze beschrieben.

Der Kern wird von Membranen umgeben, die insgesamt als **Kernhülle** bezeichnet werden (► Abbildung 2.6). Die Poren in der Kernhülle steuern den Transport von Substanzen in den Kern hinein und aus ihm heraus. Viele Jahre haben Wissenschaftler über den Ursprung des Kerns diskutiert. Vor Kurzem haben Wissenschaftler, die sich mit der Struktur der DNA befassen, die These aufgestellt, dass der Kern aus der Endosymbiose zweier verschiedener Arten von Prokaryoten entstand. Obwohl die Details dieses Vorgangs noch untersucht werden müssen, scheint es so, als seien zwei Bakterienarten in eine andere Zelle eingedrungen, und ihr genetisches Material wurde im Kern vereint. Wie bei allen endosymbiontischen Vorgängen entwickelte sich die innere Kernmembran aus der Membran der aufgenommenen Zelle, während sich die äußere Membran

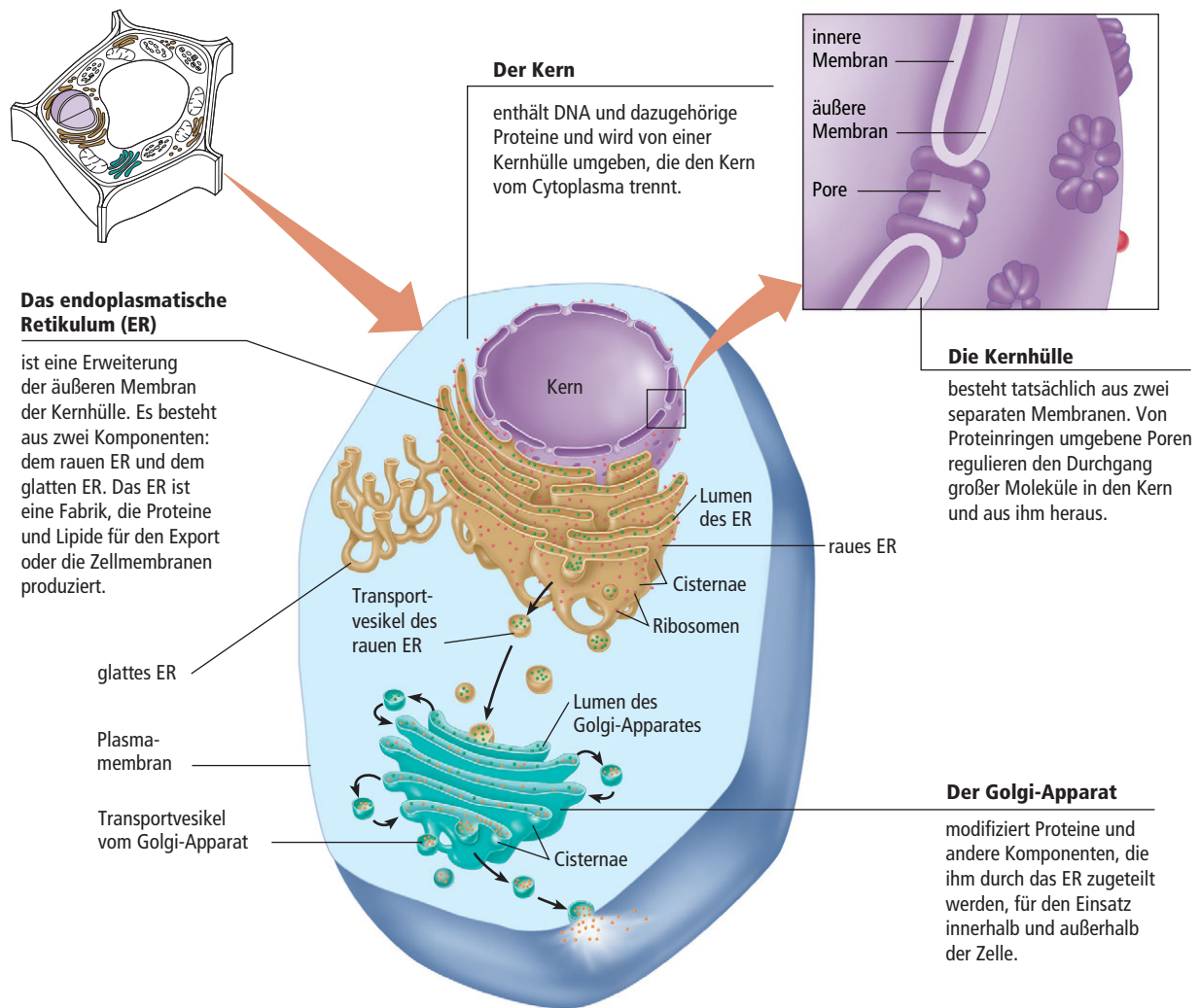


Abbildung 2.6: Der Kern, das endoplasmatische Retikulum und der Golgi-Apparat. Wie Sie auf diesem Querschnitt erkennen können, ist der Kern mit dem endoplasmatischen Retikulum (ER) verbunden, und das glatte ER setzt sich aus dem rauen ER fort. Die genetischen „Baupläne“ der Zelle befinden sich in der DNA des Kerns. Ribosomen, die mit dem rauen ER verbunden sind, benutzen die kopierte genetische Information der Boten-RNA (mRNA von englisch *messenger*, „Bote“) zur Steuerung der Proteinsynthese. Transportvesikel bringen dann Proteine, Lipide und andere Produkte (grüne Punkte) vom ER zum Golgi-Apparat, von wo aus sie zugeschnitten und versandt werden. Anders als die Cisternae des rauen ER sind die Cisternae des Golgi-Apparates nicht verbunden. Transportvesikel bewegen Produkte von einer Cisternae des Golgi-Apparates zur nächsten und schließlich in Vesikeln zur Plasmamembran, um sie aus der Zelle zu exportieren. Die Farb- und Größenveränderungen der Punkte kennzeichnen, dass die Produkte im Golgi-Apparat modifiziert werden.

wahrscheinlich aus der Plasmamembran des umgebenden Wirts entwickelte.

Ribosomen

Ribosomen sind Organellen, die im Cytoplasma gebildet werden und die Proteinsynthese steuern, indem sie auf genetische Anweisungen in Form von Boten-RNA (Ribonucleinsäure, daher die Bezeichnung *Ribosomen*) zurückgreifen. Einige Wissenschaftler ziehen es vor, Ribosomen nicht als Zellorganellen zu bezeichnen, weil sie viel kleiner als andere Organellen sind, keine

Membranen haben und auch in prokaryotischen Zellen vorkommen. Jedoch unterscheiden sich eukaryotische Ribosomen merklich von prokaryotischen Ribosomen, weil sie im Allgemeinen größer sind und verschiedene Arten von RNA haben. In Kapitel 13 werden Sie mehr darüber lesen, wie Ribosomen Proteine bilden.

Endoplasmatisches Retikulum

Innerhalb des gesamten Cytoplasmas gibt es ein Netzwerk von verbundenen Membranen, das als **endoplasmatisches Retikulum (ER)** bezeichnet wird (► Abbil-

dung 2.6). Die Bezeichnung ist ein kleiner Zungenbrecher, lässt sich aber leicht erklären: Das Wort *endoplasmatisch* bezieht sich auf den Ort der Organelle („innerhalb des Plasmas“) und *reticulum* ist das lateinische Wort für „kleines Netzwerk“. Das ER, das aus der äußeren Kernhülle gebildet wird und sich aus dieser fortsetzt, ist ein Ort, an dem Proteine, Lipide und andere Moleküle synthetisiert werden, die entweder aus der Zelle exportiert oder zum Aufbau der Zellmembran benutzt werden. Zellen, die Substanzen für den Export in andere Zellen produzieren, haben wesentlich mehr ER als nicht exportierende Zellen.

Das ER besteht aus zwei Teilen, einem glatten ER und einem rauen ER, die ihre Bezeichnungen dadurch erhalten haben, wie sie unter dem Mikroskop erscheinen. Das **glatte ER**, das von der Form her im Wesentlichen flach ist, produziert Lipide und modifiziert die Struktur einiger Kohlenhydrate. Die Oberfläche des **rauen ER** ist mit Proteinsynthese betreibenden Ribosomen übersät, was zu dem rauen Erscheinungsbild seines Äußeren führt. Es besteht typischerweise aus abgeflachten, verbundenen Säcken, die als **Cisternae** bezeichnet werden (Singular: Cisterna). Der Raum innerhalb der Cisternae und Röhren des ER wird als Lumen bezeichnet.

Golgi-Apparat

Die im ER gebildeten Lipide, Proteine und anderen Substanzen werden in membranumgebene Strukturen gepackt, die man als **Transportvesikel** bezeichnet. Die Transportvesikel lösen sich anschließend vom ER und bewegen sich zum **Golgi-Apparat**, der auch als **Golgi-Komplex** bezeichnet wird (benannt nach seinem Entdecker, dem italienischen Wissenschaftler Camillo Golgi). Der Golgi-Apparat besteht aus etlichen separaten Membranstapeln, den Golgi-Stapeln, die aus den im ER erzeugten Membranen stammen (siehe Abbildung 2.6). Der Golgi-Apparat einer Zelle kann einige wenige bis Hunderte solcher Golgi-Stapel enthalten. Anders als die Cisternae des ER sind die Cisternae der Golgi-Stapel nicht miteinander verbunden. Die Seite eines Golgi-Stapels, die sich zum ER hin befindet, nimmt Transportvesikel vom ER auf. An der gegenüberliegenden Seite eines Golgi-Stapels werden neue Transportvesikel gebildet. Diese Transportvesikel bewegen sich zur Zellmembran, verschmelzen mit ihr und geben ihren Inhalt an das Äußere der Zelle oder zum Einbau in die Zellmembran, beispielsweise in den Zellwandraum, ab. Bei Pflanzenzellen werden die Golgi-Stapel auch

als Dictyosomen bezeichnet (von griechisch *diktyon*, „werfen“), eine Bezeichnung, die ihre Rolle bei der Bewegung von Zellprodukten widerspiegelt.

Sie können sich die Stapel der Golgi-Apparate als Orte vorstellen, die mit gefertigten Waren beliefert werden, die sie speichern, modifizieren, packen und an das Zelläußere oder an verschiedene Orte in Membranen verschicken. Die Arten der am Golgi-Apparat eingehenden und von ihm freigesetzten Waren hängen von der einzelnen Zelle ab. Beispielsweise können die Waren bei einigen Zellen Komponenten der Zellwand sein, bei anderen sind es vielleicht Proteine.

Chloroplasten

Die so genannten **Chloroplasten** enthalten grüne Chlorophyllpigmente. Diese Organellen sind der Ort, an dem in Pflanzenzellen die Photosynthese stattfindet (► Abbildung 2.7). Der Begriff selbst stammt von dem griechischen Wort *chloros*, was so viel bedeutet wie „grünlich gelb“. Aber nicht alle Pflanzenzellen betreiben Photosynthese. Die Chloroplasten findet man in den Zellen der grünen Pflanzenteile, wie in den grünen Sprossachsen und insbesondere in den Laubblättern. Chloroplasten haben einen Durchmesser von etwa 5 µm und können kugelförmig oder recht langgestreckt sein. Einige Photosynthese betreibende Zellen haben nur einen Chloroplasten, während andere Dutzende davon haben.

Mit der Endosymbiontentheorie kann man den Ursprung der Chloroplasten erklären, die zwei äußere Membranen und ein kleines ringförmiges Chromosom besitzen. Bakterien, die Sonnenenergie einfingen, könnten eine nützliche endosymbiontische Verbindung mit Zellen eingegangen sein, denen die Photosynthese fehlte. Schließlich entwickelten sich über Millionen Jahre aus einem solchen Ereignis die Chloroplasten. Die Struktur der Chloroplasten spiegelt ihre Funktion wider, das Einfangen von Sonnenenergie. Neben den beiden äußeren (nichtgrünen) Membranen haben Chloroplasten eine Reihe von Membraneinstülpungen, die man als **Thylakoide** bezeichnet. Thylakoidstapel werden als **Grana** (Singular: Granum) bezeichnet. Der Teil der Photosynthese, bei dem Sonnenenergie in chemische Energie umgewandelt wird, findet in den Membranen der Thylakoide statt. Das Fluid um die Thylakoide, das so genannte **Stroma**, ist der Ort, an dem Zucker gebildet und als Stärke zwischengelagert wird.

Chloroplasten sind spezielle **Plastiden**. Das ist die allgemeine Bezeichnung für Pflanzenorganellen, die

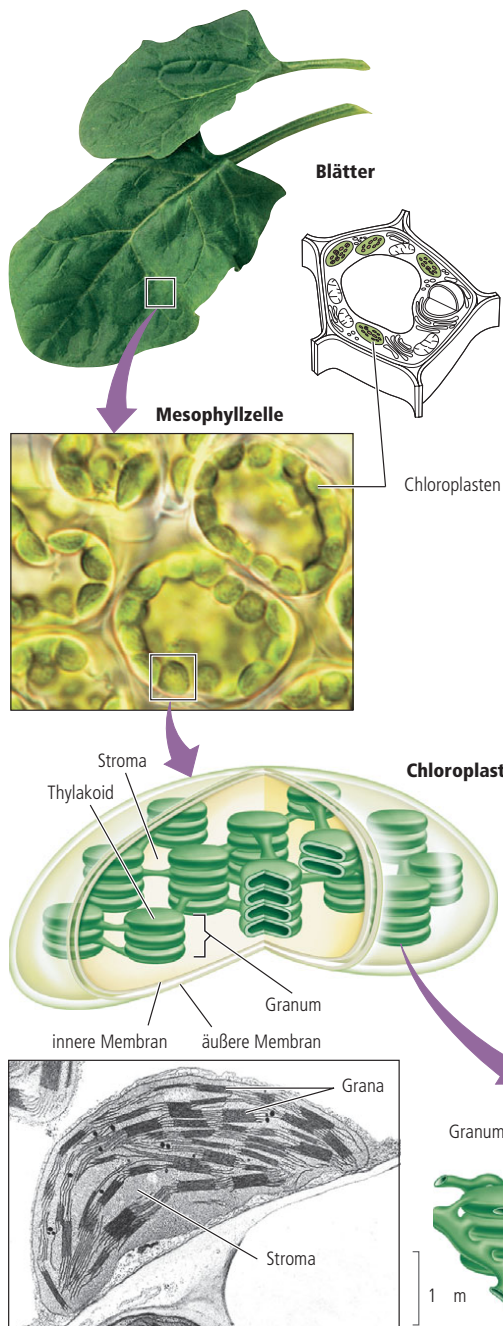


Abbildung 2.7: Chloroplasten. Chloroplasten sind die Organellen, die Photosynthese betreiben. Bei Mesophyllzellen finden sich die für die Photosynthese verantwortlichen Chlorophyllpigmente in den Membranstrukturen, den *Thylakoiden*, die wie Münzen übereinandergestapelt sind. Diese als *Grana* bezeichneten Stapel sind der einzige grüne Teil der Pflanzenzelle. Im Fluid um die Thylakoide, dem *Stroma*, wird der Zucker gebildet und als transitorische Stärke zwischengelagert. Das Organell wird von zwei Hüllmembranen umgeben.

entweder an der Produktion oder der Speicherung von Nahrung oder Pigmenten beteiligt sind. Außer den Chloroplasten gibt es noch zwei weitere Haupttypen von Plastiden: Leukoplasten und Chromoplasten. **Leu-**

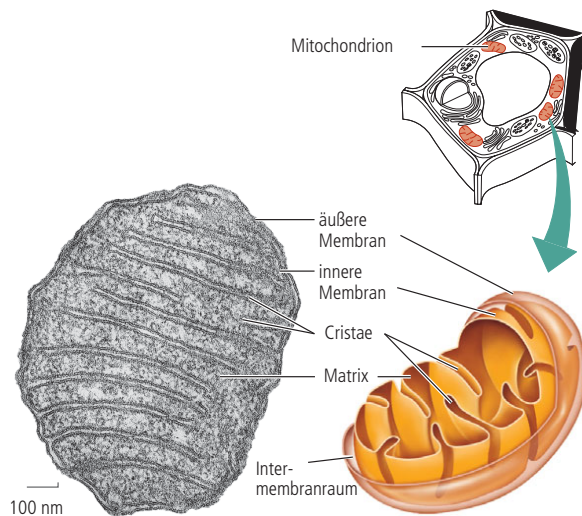


Abbildung 2.8: Mitochondrien. Mitochondrien sind die Organellen, in denen die in Form von Zucker gespeicherte Energie schließlich zur Produktion von ATP benutzt wird. Eukaryoten produzieren den für viele energieabhängige Prozesse benötigten Energieträger ATP in ihren Mitochondrien. Mitochondrien haben zwei Membranen, wobei die innere Membran Cristae genannte Einstülpungen besitzt, die Enzyme der Atmungskette enthalten.

koplasten (von griechisch *leukos*, „weiß“) sind pigmentlose Plastiden. Dazu gehören die Stärke speichernden Amyloplasten. **Chromoplasten** (von griechisch *chroma*, „Farbe“) enthalten Pigmente, die für die gelbe, orange oder rote Farbe vieler Blätter, Blüten und Früchte verantwortlich sind. In Abhängigkeit von den Lichtverhältnissen und den Bedürfnissen der Pflanze kann sich jeder Plastidentyp in einen der beiden anderen Typen umwandeln.

Mitochondrien

Nachdem Chloroplasten die Sonnenenergie in chemisch gespeicherte Energie umgewandelt haben, muss die Pflanzenzelle die gespeicherte Energie in eine Energieform umwandeln, die ihre eigenen Aktivitäten außerhalb der Chloroplasten antreibt. Diese Rolle wird von den „Kraftwerken“ der Zellfabrik übernommen – den **Mitochondrien** (Singular: Mitochondrion, ► Abbildung 2.8). Eine Pflanzenzelle kann ein einziges Mitochondrion enthalten oder tausende, typischerweise sind es jedoch um die hundert. Die Mitochondrien bauen Zucker ab, um dessen chemische Energie in **ATP (Adenosintriphosphat)** umzuwandeln, ein organisches Molekül, das die Hauptenergiequelle von Zellen ist. Mehr über ATP erfahren Sie in Kapitel 9.

Abgesehen von einigen Protisten haben fast alle Eukaryoten Mitochondrien, die zwei Membranen und ein kleines ringförmiges Chromosom besitzen, was auf ihren endosymbiontischen Ursprung hinweist. Ein typisches Mitochondrion ist mit etwa 1 bis 5 µm Länge und etwa 0,1 bis 1 µm Durchmesser kleiner als ein Chloroplast. Mitochondrien enthalten ihre eigenen Ribosomen, die einige der Mitochondrienproteine selbst bilden. Die Einstülpung eines Teils der inneren Mitochondrienmembran, als **Crista** (Plural: Cristae) bezeichnet, vergrößert die Oberfläche der inneren Membran erheblich, was den Enzymen der Atmungskette viel Platz bietet. Die innere Membran und der davon umschlossene Raum, die **Matrix**, enthalten die eigentliche Stoffwechselmaschinerie, welche die im Zucker enthaltene Energie zu ATP weiterverarbeitet.

Microbodies

Microbodies sind kleine, kugelförmige Zellkompartimente mit etwa 1 µm Durchmesser, die Enzyme enthalten und von einer Membran umgeben sind. Sie wurden so benannt, weil ihre Funktion zunächst unbekannt war. Später entdeckten Wissenschaftler, dass bestimmte Microbodies Wasserstoffperoxid (H_2O_2) erzeugen und anschließend abbauen konnten. H_2O_2 wird gebildet, wenn Wasserstoff auf Sauerstoff übertragen wird. Da Wasserstoffperoxid für andere Zellteile potenziell giftig ist, wird der Rest der Zelle geschützt, wenn diese chemischen Reaktionen auf abgegrenzte Orte beschränkt sind. Dementsprechend wurden diese Microbodies **Peroxisomen** getauft („Peroxydkörperchen“), eine Bezeichnung, die manche Wissenschaftler für alle Microbodies benutzen.

Ein anderer Microbodytyp, als **Glyoxisomen** bezeichnet, enthält Enzyme, welche die Umwandlung gespeicherter Fette in Zucker unterstützen. Diese Reaktionen, die bei Tieren nicht auftreten, sind besonders wichtig in Samen, die Fette als Nahrungsgrundlage speichern, während der Keimung aber Zucker benötigen.

Microbodies haben nur eine Membranhülle und entstanden daher nicht durch Endosymbiose. Ursprünglich könnten sie aus den Membranen des endoplasmatischen Retikulums stammen. Sie replizieren sich, verfügen jedoch nicht über Chromosomen und stellen auch keine eigenen Proteine her.

Vakuolen

Bei vielen ausdifferenzierten Pflanzenzellen werden bis zu 90 Prozent des Volumens von einer großen **Zentralvakuole** eingenommen. Die Bezeichnung stammt vom lateinischen Wort *vacuum* ab, was so viel bedeutet wie „leer“, weil Vakuolen unter dem Mikroskop leer erscheinen (► Abbildung 2.9). In Wirklichkeit ist die Zentralvakuole mit Wasser und gelösten Stoffen gefüllt und übernimmt viele wichtige Rollen, von denen einige mit dem Zellstoffwechsel zu tun haben. Zum Beispiel entfernt sie Salz aus dem Cytoplasma und reguliert den Wasserhaushalt der Zelle. Sie dient auch als Entgiftungsstation für schädliche Substanzen, wirkt beim Aufbrechen großer Makromoleküle mit und hilft bei der Regulation der Salzkonzentrationen. Die Vakuole kann auch giftige Ionen und solche Ionen aufnehmen, die nur zu bestimmten Zeiten für spezielle chemische Reaktionen benötigt werden. Außerdem hilft sie bei der Erhaltung der Zellform, indem sie das Cytoplasma gegen die Zellwand drückt.

Tierzellen enthalten zwar kleine Vakuolen, doch die große Zentralvakuole ist ein unverwechselbares Charakteristikum erwachsener Pflanzenzellen. Sie entwi-

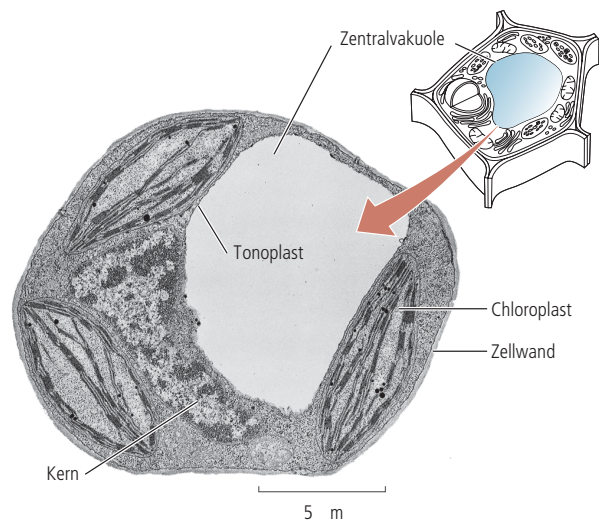


Abbildung 2.9: Vakuolen. Besonders große Vakuolen, die bis zu 90 Prozent des Volumens einer Pflanzenzelle einnehmen, finden sich in ausdifferenzierten Pflanzenzellen. Vakuolen dienen als Lagerungsstätten für unerwünschte Moleküle und Zellteile, sie regulieren den Wasserhaushalt und die Salzbalance in der Zelle und enthalten mitunter Pigmente, die zur roten und blauen Färbung von Früchten und Blüten beitragen. Diejenige Membran, welche die Vakuole einer Pflanzenzelle umgibt, heißt *Tonoplast*.

ckelt sich aus kleinen Vakuolen, die vom ER mit Proteinen aus dem Golgi-Apparat gebildet werden. Diese kleinen Vakuolen verschmelzen allmählich zu einer größeren Vakuole, die von einer Membran, dem **Tonoplasten**, umgeben ist.

WIEDERHOLUNGSFRAGEN

- 1 Welche Rolle spielt der Kern?
- 2 Welche Organellen sind an der Proteinsynthese beteiligt und in welcher Form?
- 3 Worin besteht die Hauptfunktion des Golgi-Apparates?
- 4 Warum sind bei einer Pflanzenzelle sowohl Chloroplasten als auch Mitochondrien für die Energiebereitstellung wesentlich?
- 5 Welchen Funktionen dient die große Zentralvakuole?

Das Cytoskelett

2.3

Wie Sie aus dem Überblick über die Zellorganellen entnehmen konnten, sind Zellen dynamische Gebilde. Ein Großteil des Zellinhalts ist ununterbrochen in Bewegung, wenn zum Beispiel Proteine und andere Moleküle vom ER zum Golgi-Apparat transportiert werden. Eine Hauptstruktur der Zelle, das **Cytoskelett** („Zellskelett“), unterstützt die dynamischen Aktivitäten und die Form der Zelle. Jahrhundertlang konnten Wissenschaftler die Komponenten des Cytoskeletts nicht identifizieren, weil die Präparationsmethoden zur Betrachtung der Zelle diese im Allgemeinen zerstörten und den Mikroskopen eine ausreichende Vergrößerung fehlte. Die Einführung der Elektronenmikroskope und die Entwicklung neuer Präparationsmethoden halfen den Wissenschaftlern, die Struktur des Cytoskeletts aufzudecken.

Das Cytoskelett besteht aus drei Arten von fadenförmigen Proteinen: Mikrotubuli, Mikrofilamenten und Intermediärfilamenten. Diese Proteine erstrecken sich durch das gesamte **Cytosol**, den flüssigen Teil des Cytoplasmas, wo sie als Strukturbausteine dienen, welche die Form der Zelle und ihrer Komponenten aufrechterhalten. Sie können sich die Proteine als Schienen angeordnet vorstellen, welche die Bewegung der verschiede-

nen Zellkomponenten zu ihrem Zielort leiten, während sie die Form der Zelle kontrollieren. Sie helfen bei der Verankerung vieler Zellorganellen, so dass viele Organellen nicht völlig frei durch das Cytoplasma treiben.

Mikrotubuli

Mikrotubuli sind lange, röhrenförmige Filamente im Cytoskelett, die Zellkomponenten wie Moleküle, Organellen und Chromosomen gleich einem zellulären Postdienst von einem Ort zum anderen bewegen. Sie bewegen auch Zellen und mitunter sogar mehrzellige Organismen durchs Wasser.

Mikrotubuli sind Röhren mit einem Durchmesser von etwa 25 nm, deren Länge in Abhängigkeit von ihrer Funktion zwischen etwa 200 bis 150.000 nm variiert. Jeder Faden besteht aus kugelförmigen Proteinen, als α - und β -**Tubulin** bezeichnet, die in 13 Reihen spiralförmig um die hohle Mitte angeordnet sind. Wie ► Abbildung 2.10 zeigt, sieht die Struktur eines Mikrotubulus weniger kompliziert aus, als es sich anhört. Individuelle Mikrotubuli dienen häufig als Schienen, um die Bewegung innerhalb der Zelle zu steuern.

Bei einigen Zellen sind Mikrotubuli nicht nur ein Teil des Cytoskeletts, sondern können auch einen Teil der externen Antriebsfortsätze bilden, die man als **Flimmerhärchen** und **Geißeln** bezeichnet. Sowohl Flimmerhärchen als auch Geißeln bestehen aus neun Mikrotubulipaaaren, die kreisförmig um zwei Mikrotubuli im Zentrum angeordnet sind. Dieses so genannte 9 + 2-Muster kommt bei allen Eukaryoten vor. Flimmerhärchen und Geißeln haben dieselbe Grundstruktur, abgesehen davon, dass Flimmerhärchen kurz und Geißeln lang sind (siehe Abbildung 2.10). Flimmerhärchen bewegen sich wie Ruder vor und zurück, während sich Geißeln in einer schlangenartigen Bewegung winden. Obwohl Flimmerhärchen und Geißeln bei Protisten und Tierzellen häufiger vorkommen als bei Pflanzenzellen, findet man sie doch bei einigen beweglichen pflanzlichen Fortpflanzungszellen, wie beispielsweise den Spermatozoiden von Moosen und Farnen.

Neben der Bewegungssteuerung von Organellen und anderen Strukturen innerhalb von Zellen helfen Mikrotubuli auch bei der Aufrechterhaltung der Zellform. In einer typischen Pflanzenzelle bewegen sich beispielsweise die Enzyme, die in den Zellwandbereich hinein Cellulose produzieren, in der Plasmamembran entlang der Mikrotubulistränge, sehr ähnlich wie bei einer Einschienenbahn (siehe Abbildung 2.11). An allen Be-

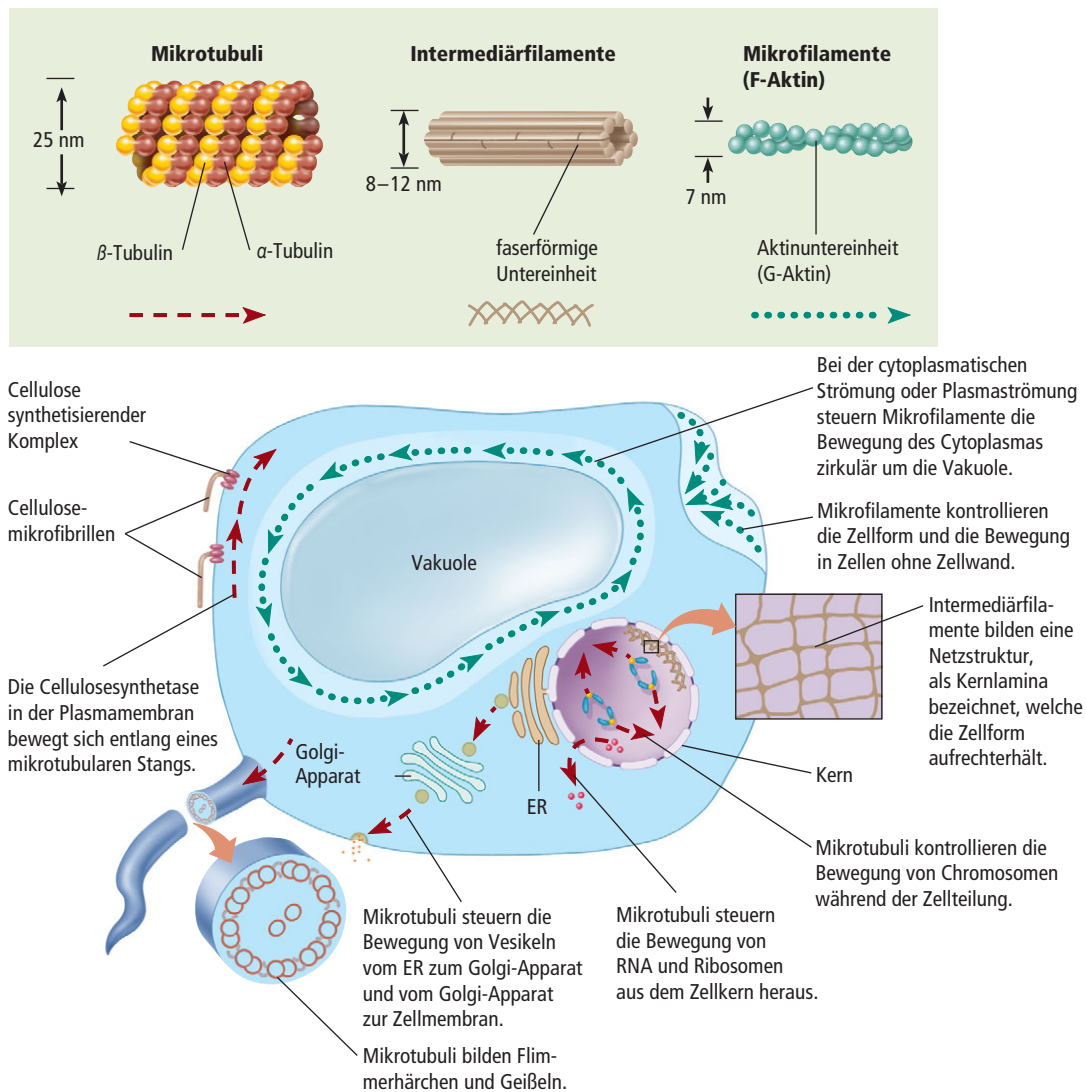


Abbildung 2.10: Das Cytoskelett. Diese Skizze zeigt verschiedene Aspekte des Cytoskeletts in einer typischen Pflanzenzelle. Das Cytoskelett, das sich aus Mikrotubuli, Mikrofilamenten und Intermediärfilamenten zusammensetzt, reguliert die Zellform bei Zellen ohne Zellwand, die Zellbewegung bei frei beweglichen Zellen und die Bewegung des Zellinhalts in allen Zellen. Mikrofilamente bestehen aus Aktin, Mikrotubuli bestehen aus Tubulin und Intermediärfilamente bestehen aus verschiedenen faserförmigen Proteinen.

wegungen, die durch Mikrotubuli kontrolliert werden, sind „laufende Moleküle“ beteiligt, mit denen wir uns später in diesem Kapitel befassen werden.

Mikrofilamente

Mikrofilamente sind eine weitere Gruppe langer Filamente im Cytoskelett, die Zellen oder Zellinhalte bewegen und bei der Bestimmung der Zellform helfen. Mikrofilamente sind aus globulären Proteinen, den **Aktinen**, aufgebaut, die in zwei spiralförmigen, sich umeinander windenden Ketten angeordnet sind (siehe Abbildung 2.10). Mikrofilamente sind mit ih-

rem Durchmesser von etwa 7 nm viel dünner als Mikrotubuli. Viele Biologiestudenten sind mit Mikrofilamenten vertraut, weil sie einen Teil der Muskelstruktur von Wirbeltieren bilden. Aktin bewirkt Bewegung oder Änderungen der Zellform, indem es andere Moleküle anlagert, die auf ihm entlanglaufen, wie wir später näher erläutern werden. Bei Pflanzenzellen bestimmen die Muster für die Zellstreckung und für die Bildung der Zellwand die Zellform. Bei Pflanzen helfen auch Mikrofilamente beim Transport von Zellinhalten um die Zentralvakuole herum in einer zirkularen Bewegung, die man als **Plasmaströmung** bezeichnet.

Motorproteine

Mikrotubuli und Mikrofilamente erreichen eine Bewegung, indem sie verschiedene Arten von **Motorproteinen** anlagern, die auch als „laufende Moleküle“ bezeichnet werden (► Abbildung 2.11). Diese Proteine brauchen Energie in Form von ATP, um sich von einer Stelle zur nächsten und wieder zurück zu bewegen. Die Art, wie sie das tun, erinnert an laufende Beine. Im Allgemeinen bilden Mikrotubuli und Mikrofilamente Schienen, die Motorproteine zu speziellen Zielorten leiten. Die Motorproteine heften sich an die zu bewegenden Moleküle, wenn beispielsweise ein Transportvesikel vom ER zum Golgi-Apparat bewegt wird. Ein Motorprotein kann sich auch an zwei Mikrotubuli anheften und einen Mikrotubulus gegen den anderen bewegen.

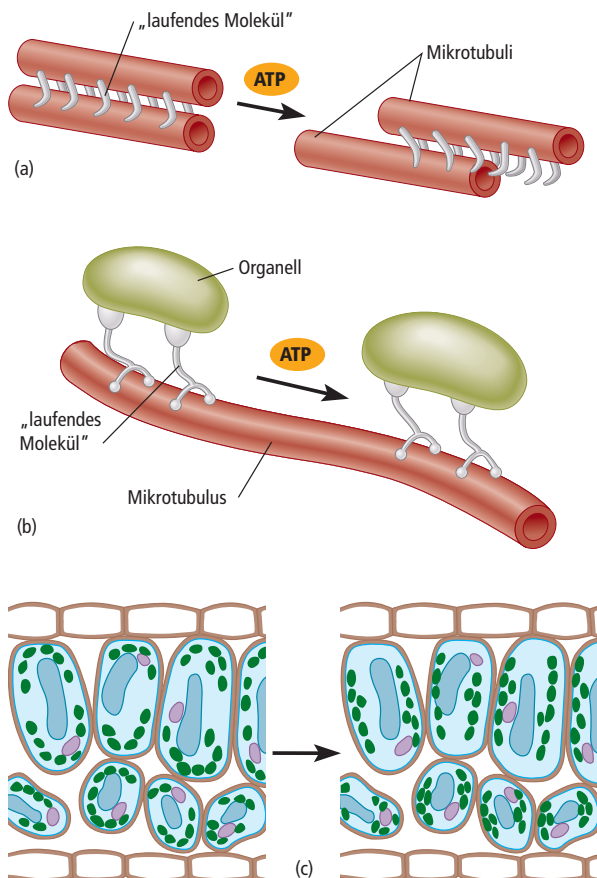


Abbildung 2.11: Motorproteine („laufende Moleküle“). (a) „Laufende Moleküle“ bewegen einen Mikrotubulus nach dem anderen, um die Bewegung von Geißeln oder Flimmerhärchen auszulösen. (b) „Laufende Moleküle“ bewegen sich mit einem Organell entlang eines Mikrotubulus. (c) Als Reaktion auf helles Licht bewegen „laufende Moleküle“ Chloroplasten in einen Zellbereich, an dem sie weniger Licht empfangen.

Motorproteine sind an vielen Bewegungsarten in Zellen beteiligt. Dazu gehören: (1) die Bewegung von Vesikeln vom ER zum Golgi-Apparat entlang von Mikrotubulisträngen; (2) die Bewegung von Chloroplasten entlang von Mikrotubuli vom Inneren an den Rand der Zelle; (3) die Plasmaströmung, bei der sich Myosin entlang von Mikrofilamenten bewegt und so eine Strömung im Cytoplasma erzeugt; und (4) die Zellwandsynthese, bei der ein Enzymkomplex, der Cellulose-Mikrofibrillen erzeugt, entlang eines Mikrotubulus läuft. Alle Motorproteine greifen zur Bewegung auf Energie aus ATP zurück.

Intermediärfilamente

Intermediärfilamente, die dritte Komponente des Cytoskeletts, tragen ihren Namen, weil sie mit ihren rund 10 nm Durchmesser dicker als Mikrofilamente, aber dünner als Mikrotubuli sind (siehe Abbildung 2.10). Etliche Arten von linearen Proteinen bilden Intermediärfilamente. Bei Tieren bilden Intermediärfilamente Haare, Nägel, Federn und Schuppen und kommen auch bei Muskeln und Neuronen vor. Wenig ist über ihre Rolle in Pflanzenzellen bekannt, wo sie an der Aufrechterhaltung einer festeren, permanenten Art innerer Zellstruktur beteiligt zu sein scheinen. Beispielsweise sind sie mit dafür verantwortlich, den Kern an seiner permanenten Position in der Zelle zu halten und die Form des Kerns an sich zu regulieren.

WIEDERHOLUNGSFRAGEN

- 1 Wozu dient das Cytoskelett?
- 2 Welche Rollen spielen Mikrotubuli und Mikrofilamente?
- 3 Was sind Intermediärfilamente?

Membranen und Zellwände

2.4

Sie haben die Funktionen der Organellen innerhalb der Zelle kennengelernt und die Art, wie sie durch das Cytoskelett miteinander verbunden sind. An dieser Stelle werden wir die Rolle der Plasmamembran und der die Organellen umgebenden Membranen untersuchen. Danach werden wir uns die Struktur und die Funktion der

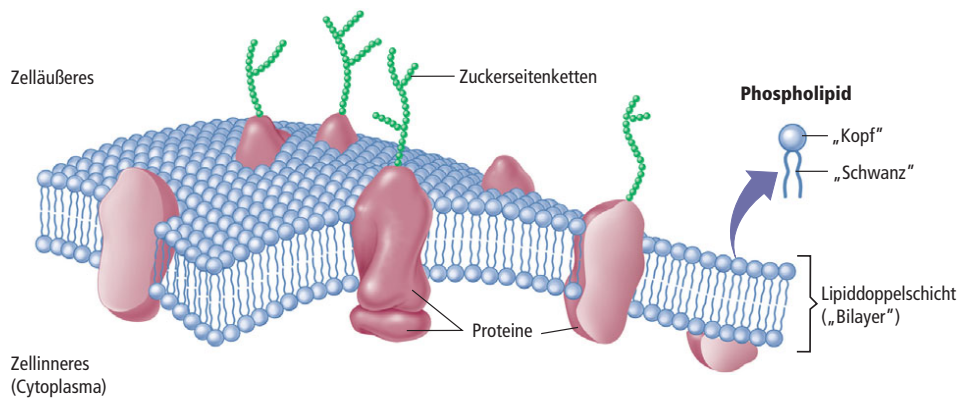


Abbildung 2.12: Membranstruktur. Zellmembranen bestehen in erster Linie aus Phospholipiden, die so ausgerichtet sind, dass ihre wasserabweisenden Fettsäureschwänze zueinander zeigen und ihre wasserliebenden Phosphatköpfe an den beiden Membranoberflächen liegen. Proteine sind an verschiedenen Stellen eingebettet.

Zellwände von Pflanzenzellen ansehen, welche die Zellen voneinander und von der Außenwelt trennen.

Membranen

Membranen sind Barrieren, die kontrollieren, was in die Zelle gelangt und diese wieder verlässt. Biologen haben ein Modell der Membranstruktur entwickelt, das als **Flüssig-Mosaik-Modell** bezeichnet wird (► Abbildung 2.12). Nach dem Modell ist es eine Doppelschicht aus Membranlipiden, unter anderem *Phospholipiden*, welche die Grundstruktur der Plasmamembran und der die Organellen umgebenden Membranen bildet. Die Membranstruktur ist insofern flüssig, als die Phospholipidmoleküle recht beweglich und biegsam sind. Ein Phospholipid hat einen wasserliebenden (hydrophilen) und einen wasserabweisenden (hydrophoben) Teil. Der hydrophile Teil, als „Kopf“ bezeichnet, enthält eine Phosphatgruppe, die mit weiteren hydrophilen Molekülen verknüpft ist. Der hydrophobe Teil besteht aus zwei Fettsäuren, die als „Schwänze“ bezeichnet werden. Illustrationen stellen ein Phospholipidmolekül typischerweise als ein rundes Kügelchen dar (den Phosphatkopf), an dem zwei lange Schwänze hängen. Bei einer Biomembran bilden die hydrophilen Phosphatköpfe die an wässrige Kompartimente grenzenden Oberflächen der Membran, während die hydrophoben Schwänze in das Innere der Biomembran ragen.

Viele Proteine lagern sich an eine Biomembran an oder dringen in diese unterschiedlich weit ein und ordnen sich patchwork- oder mosaikartig an. Einige Proteine reichen nicht durch die gesamte Membranschicht, häufig binden sie Moleküle, die an der Membran an-

kommen. Andere Proteine oder Proteinkomplexe reichen durch die gesamte Membranschicht hindurch. Sie führen Funktionen aus wie:

- Bereitstellung von Kanälen, durch die verschiedene Moleküle in die Zelle gelangen oder diese verlassen können;
- Kontrolle des Transports von Wasser und anderen Substanzen durch die Membran;
- Rezeptorfunktion für Moleküle, die transportiert werden, oder sogar für andere Zellen;
- Identifikation von anderen Zellen und sogar von Krankheitserregern; und
- Bereitstellung von Andockstellen für Moleküle, welche die Struktur und die Funktion der Zelle steuern.

Durch die Proteine und die Phospholipiddoppelschicht wird die Membran **selektiv permeabel** oder halbdurchlässig. Dies bedeutet, dass diese Strukturen einige Moleküle durch die Plasmamembran transportieren, andere Moleküle dagegen nicht. Kapitel 10 diskutiert die Mechanismen, durch die Moleküle selektiv durch Membranen transportiert werden.

Zellwände

Anders als Tierzellen haben Pflanzenzellen eine Zellwand, welche außerhalb des Protoplasten liegt und verhindert, dass zu viel Wasser in die Zelle eindringt. Wasser durchdringt die Plasmamembran in einem Prozess, den man als *Osmose* bezeichnet. Damit befassen wir uns in Kapitel 10. Verfügt eine Pflanzenzelle über ausreichend Wasser, dann umgibt sie die Zellwand wie eine eng anliegende Hülle. Diese Hülle besteht aus ein oder

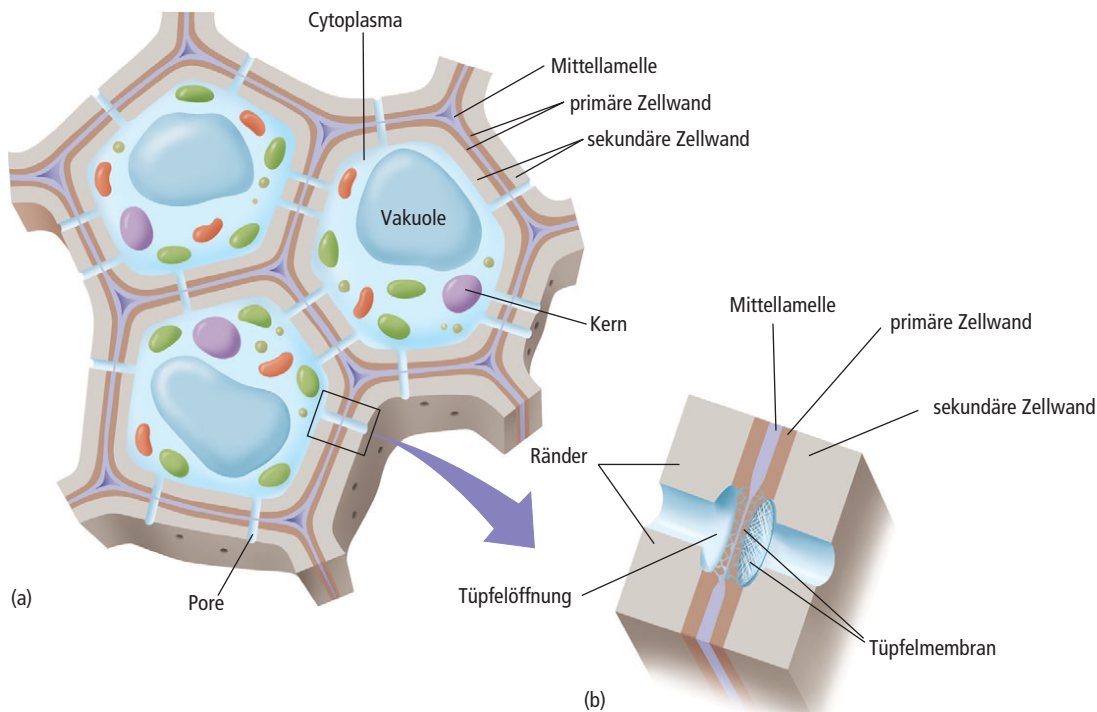


Abbildung 2.13: Primäre und sekundäre Zellwände. (a) Pflanzenzellen bilden außerhalb der Plasmamembran eine primäre Zellwand aus. Später bilden viele Zellen eine sekundäre Zellwand zwischen der primären Zellwand und der Plasmamembran. (b) Häufig sind die sekundären Zellwände im Vergleich zu den primären Zellwänden recht dick. In den sekundären Wänden gibt es Bereiche, die Tüpfel, in denen die sekundäre Wand dünn ist oder fehlt. Diese beschleunigen den Transfer von Wasser und gelösten Stoffen von einer Zelle zur anderen. Die Zellwände bestehen in erster Linie aus Cellulose, wobei viele Cellulosemoleküle eine Mikrofibrille und viele Mikrofibrillen eine Makrofibrille bilden. Andere Bestandteile wie Pektine, Hemicellulosen und Proteine verbinden die Makrofibrillen miteinander. Verholzende Zellen lagern schließlich noch Lignin ein.

zwei Komponenten. Pflanzenzellen produzieren eine **primäre Zellwand**, die dicker als die Plasmamembran ist und außerhalb dieser liegt (► Abbildung 2.13). Viele ausdifferenzierte Pflanzenzellen, insbesondere die von holzigen Pflanzen, bilden eine dickere **sekundäre Zellwand** zwischen der primären Wand und der Plasmamembran. An einigen Stellen ist die sekundäre Zellwand dünner oder fehlt, so dass sich Poren (so genannte Tüpfel) bilden, die den schnellen Transfer von Wasser und Mineralien von Zelle zu Zelle ermöglichen. Die sekundären Wände machen den Großteil des Strukturgerüsts von holzigen Pflanzen aus. Sie tragen zu 90 Prozent zum Gewicht großer Bäume bei.

Pflanzenzellwände bestehen hauptsächlich aus Cellulose, einem Kohlenhydrat, das aus vielen kettenförmig miteinander verknüpften Glucosemolekülen besteht. Viele lange Cellulosemoleküle liegen nebeneinander und bilden zylindrische **Mikrofibrillen** (Durchmesser von 10 bis 20 nm). Die Cellulosemoleküle in Mikrofibrillen sind an einigen Stellen als kristalline Strukturen organisiert, die man als **Mizellen** bezeichnet. Diese Verbindung kommt durch saure Kohlen-

hydrate, geleeartige Substanzen, die **Pektine**, und leim- oder gummiartige Kohlenhydrate, die **Hemicellulosen**, zustande. Die Mikrofibrillen werden dann zu Makrofibrillen zusammengedreht, die einen Durchmesser von bis zu 0,5 μm und eine Länge von 4 μm erreichen können. Sie können sich Mikrofibrillen als kleinere Fasern vorstellen, die ineinander verdreht sind, um größere Fasern, die Makrofibrillen, zu bilden. Andere Fasern von Pektinen und Hemicellulosen durchdringen die Makrofibrillen, wodurch schließlich Zellwandgewebe entsteht, das an bestimmten Stellen durch Proteine verstärkt wird. Mehr über die Cellulosestruktur finden Sie in Kapitel 7.

Bei Gefäßpflanzen werden die Zellwände durch starre Moleküle, die **Lignine**, verstärkt, die Wasser ersetzen und die Cellulose überkrusten, ähnlich wie Teer. Die anderen Pflanzen, wie beispielsweise Moose, haben kein Lignin.

Die Zellwände von Algen und Pilzen unterscheiden sich gewöhnlich strukturell von denen der Pflanzen. Die Zellwände der meisten Algen enthalten Cellulose, aber auch viele verschiedene Arten zusätzlicher Kom-

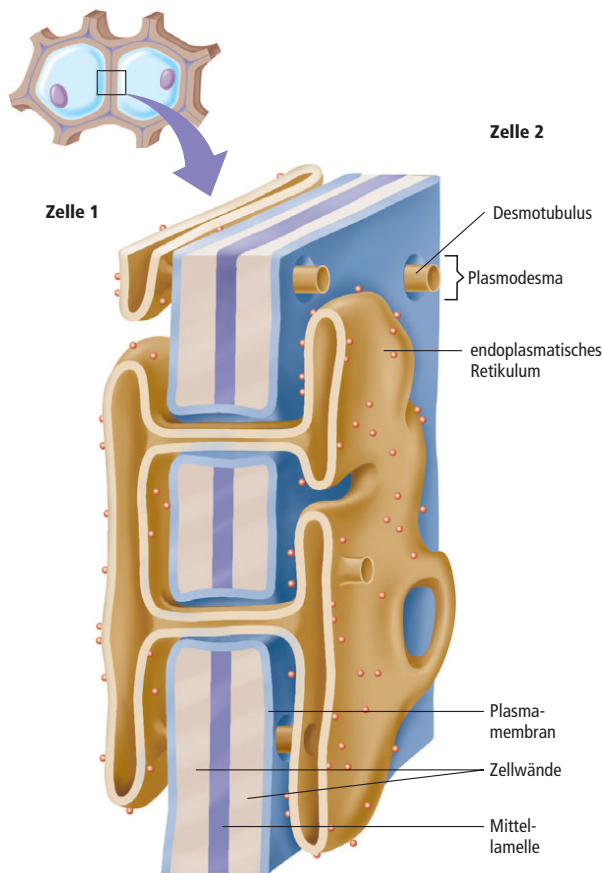


Abbildung 2.14: Plasmodesmen. In dieser schematischen Darstellung von Plasmodesmen erkennt man die Verbindung des endoplasmatischen Retikulums zwischen zwei Zellen durch Desmotubuli.

ponenten, die in der Pflanzenzellwand nicht vorkommen. Einige Algen haben auch glasähnliche Zellwände, bei denen Silikat die Hauptkomponente ist. Die Zellwände von Pilzen bestehen hauptsächlich aus **Chitin**, einem Kohlenhydrat (aus Aminosucker aufgebaut), das von seiner Struktur her Cellulose ähnelt.

Zwischen den primären Zellwänden benachbarter Zellen befindet sich eine dünne Schicht, die **Mittellamelle** (von lateinisch *lamina*, „dünne Platte“). Die Mittellamelle besteht hauptsächlich aus Pektinen, wodurch die Zellen zusammengehalten werden. Pektine werden beim Kochen zum Andicken von Gelee und Marmelade verwendet.

Plasmodesmen

Pflanzenzellwände stellen Grenzen zwischen Zellen dar, zur Bildung eines mehrzelligen Organismus sind jedoch Verbindungen zwischen den Protoplasten benachbarter Zellen notwendig. Deshalb halten zahlreiche

Kanäle, die **Plasmodesmen** (Singular: Plasmodesma oder Plasmodesmos, von griechisch *desmos*, „Band“), den direkten Kontakt zwischen Zellen aufrecht (► Abbildung 2.14). Dünne Zellinhaltsstränge fließen durch diese Plasmodesmen. Jedes Plasmodesma ist von einer Plasmamembran umgeben und enthält gewöhnlich eine Verbindung, den **Desmotubulus**, zwischen den Zellen. Plasmodesmen ermöglichen den Austausch von kleinen Molekülen und sogar Makromolekülen zwischen den Zellen.

WIEDERHOLUNGSFRAGEN

- 1 Erläutern Sie, wodurch die Plasmamembran selektiv permeabel wird.
- 2 Warum ist es für eine Pflanzenzelle wichtig, eine Zellwand zu haben?
- 3 Beschreiben Sie die grundlegende Struktur von Pflanzenzellwänden.
- 4 Wie sind Pflanzenzellen miteinander verbunden?

Zellzyklus und Zellteilung

2.5

Bisher haben wir uns in diesem Kapitel die Struktur einer typischen Pflanzenzelle in ihrer Hauptlebensphase angesehen. Wie alle Organismen haben Zellen einen Lebenszyklus, zu dem die Jugend, die Reife und das Alter gehören. Am Ende ihres Lebenszyklus können sich Zellen entweder teilen oder absterben. Bei Pflanzenzellen bedeutet der Tod nicht unbedingt das Ende ihrer Nützlichkeit, weil die Zellwände abgestorbener Zellen zu festen Bestandteilen des Pflanzenkörpers werden. Bei großen Bäumen sind beispielsweise mehr als 99 Prozent der Zellen im Stamm abgestorben. Diese Zellen dienen etlichen nützlichen Funktionen, darunter die Weiterleitung von Wasser und die Bereitstellung der Struktur, die gebraucht wird, um die Blätterkrone in das Sonnenlicht zu heben.

Obwohl tote Zellen wichtige Rollen übernehmen können, hängt das Wachstum mehrzelliger Organismen von der Zellteilung ab. Wie Sie wissen, beginnt jeder mehrzellige Organismus, unabhängig von seiner Größe, als einzelne Zelle. Eine relativ kleine Anzahl von aufeinanderfolgenden Zellteilungen kann schließlich eine einzelne Zelle in einen Organismus mit Milliarden Zel-

len umwandeln. Wenn eine Zelle und ihre Nachkommenschaft 50 aufeinanderfolgende Zellteilungen ausführen, dann bilden sich dabei mehr als eine Billiarde (10^{15}) Zellen. In diesem Abschnitt werden wir uns ansehen, wie die Zellteilung am Wachstum und an der Fortpflanzung eukaryotischer Organismen beteiligt ist.

Der Zellzyklus

Als **Zellzyklus** bezeichnet man die Folge von Ereignissen von dem Zeitpunkt an, an dem die Zelle infolge der Zellteilung erstmalig erscheint, bis zu dem Zeitpunkt, an dem sich die Zelle selbst teilt. Bei Eukaryoten folgt die Zelle einem Zellzyklus, der aus Wachstumsperioden, DNA-Replikation, Vorbereitung zur Teilung und schließlich der Teilung selbst besteht. Die aus dieser Teilung hervorgehenden Zellen beginnen den Zyklus von Neuem.

Ungefähr 90 Prozent der Lebenszeit einer Zelle nimmt eine Periode ein, die man als **Interphase** bezeichnet, in der die Zelle nicht mit der Zellteilung beschäftigt ist. Die Bezeichnung deutet darauf hin, dass es sich dabei um die Periode zwischen Zellteilungen handelt. Der erste Teil der Interphase ist die relativ lange **G₁-Phase** (G von englisch *gap*, „Lücke“), in der die Zelle wächst, sich entwickelt und als ein spezieller Zelltyp fungiert. Damit sich die Zelle teilen kann und dabei immer noch einen vollständigen Chromosomensatz besitzt, muss die DNA der Chromosomen repliziert oder kopiert werden. Bei reifen eukaryotischen Zellen wird die DNA jedes Chromosoms während einer kurzen **S-Phase** repliziert (S von *DNA-Synthese*). Dabei werden zwei Geschwisterstränge von DNA gebildet, die **Chromatiden**. (In Kapitel 13 wird der Prozess der DNA-Replikation beschrieben.) Auf die S-Phase folgt die **G₂-Phase**, in der die Zelle weiterhin normal funktioniert und beginnt, sich auf die Zellteilung vorzubereiten.

Der Zustand der Zellteilung wird als **mitotische Phase** oder **M-Phase** bezeichnet, was sich auf die Art der Teilung des Kerns bezieht, die als *Mitose* bezeichnet wird. **Mitose** ist die Teilung eines einzelnen Kerns in zwei genetisch identische Tochterkerne. Dieser Prozess wird in Kürze beschrieben. Zur Teilung einer einzelnen Zelle in neue Zellen, oder **Tochterzellen**, gehören zwei Prozesse. Ein Prozess ist die Teilung des Kerns. Der andere ist die Trennung des Cytoplasmas und die Aufteilung der neuen Kerne in zwei Tochterzellen. Diesen Prozess bezeichnet man als **Cytokinese** (was eigentlich so

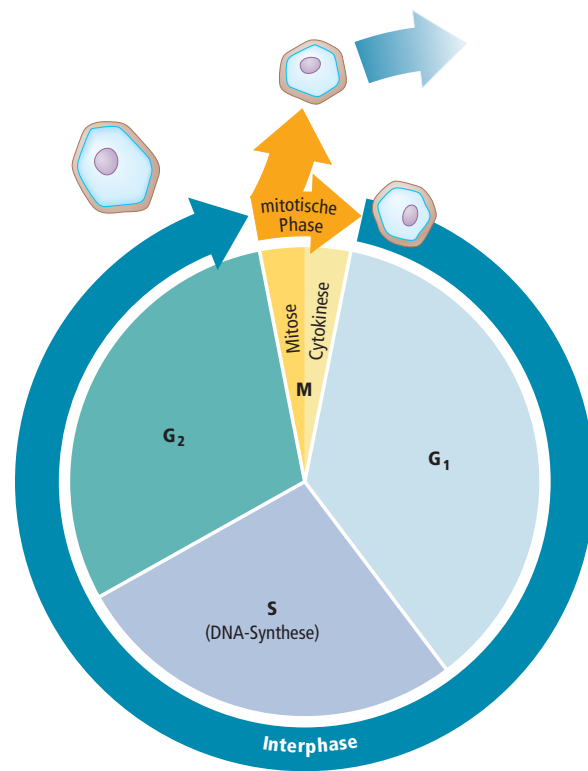


Abbildung 2.15: Der eukaryotische Zellzyklus. Die Interphase, die Periode zwischen Zellteilungen, unterteilt sich in das frühe Zellwachstum und die Entwicklung (G₁-Phase), die DNA-Replikation (S-Phase) und das fortgesetzte Wachstum und die Vorbereitung auf die Zellteilung (G₂-Phase). Die tatsächliche Kernteilung und Zellteilung, die M-Phase oder mitotische Phase, macht nur etwa 10 Prozent der Lebenszeit einer typischen Zelle aus.

viel bedeutet wie „Zellbewegung“). ► Abbildung 2.15 gibt einen Überblick über den Zellzyklus.

Wachstum und Fortpflanzung

Die an der Zellteilung beteiligte Mitose spielt beim Wachstum aller Eukaryoten eine Rolle. Sie kann auch an der Fortpflanzung beteiligt sein. Mitose kommt vor:

- beim Wachstum und bei der Entwicklung eines Embryos und anschließend des Erwachsenen;
- beim Ersetzen von Zellen eines erwachsenen Organismus;
- bei der asexuellen Fortpflanzung verschiedener Arten (asexuelle Fortpflanzung ist die Bildung neuer Organismen, die genetisch mit dem Elter identisch sind);
- bei einigen Phasen der sexuellen Fortpflanzung in Pflanzen (sexuelle Fortpflanzung ist die Bildung neuer Organismen, die sich genetisch von den beiden beteiligten Eltern unterscheiden).

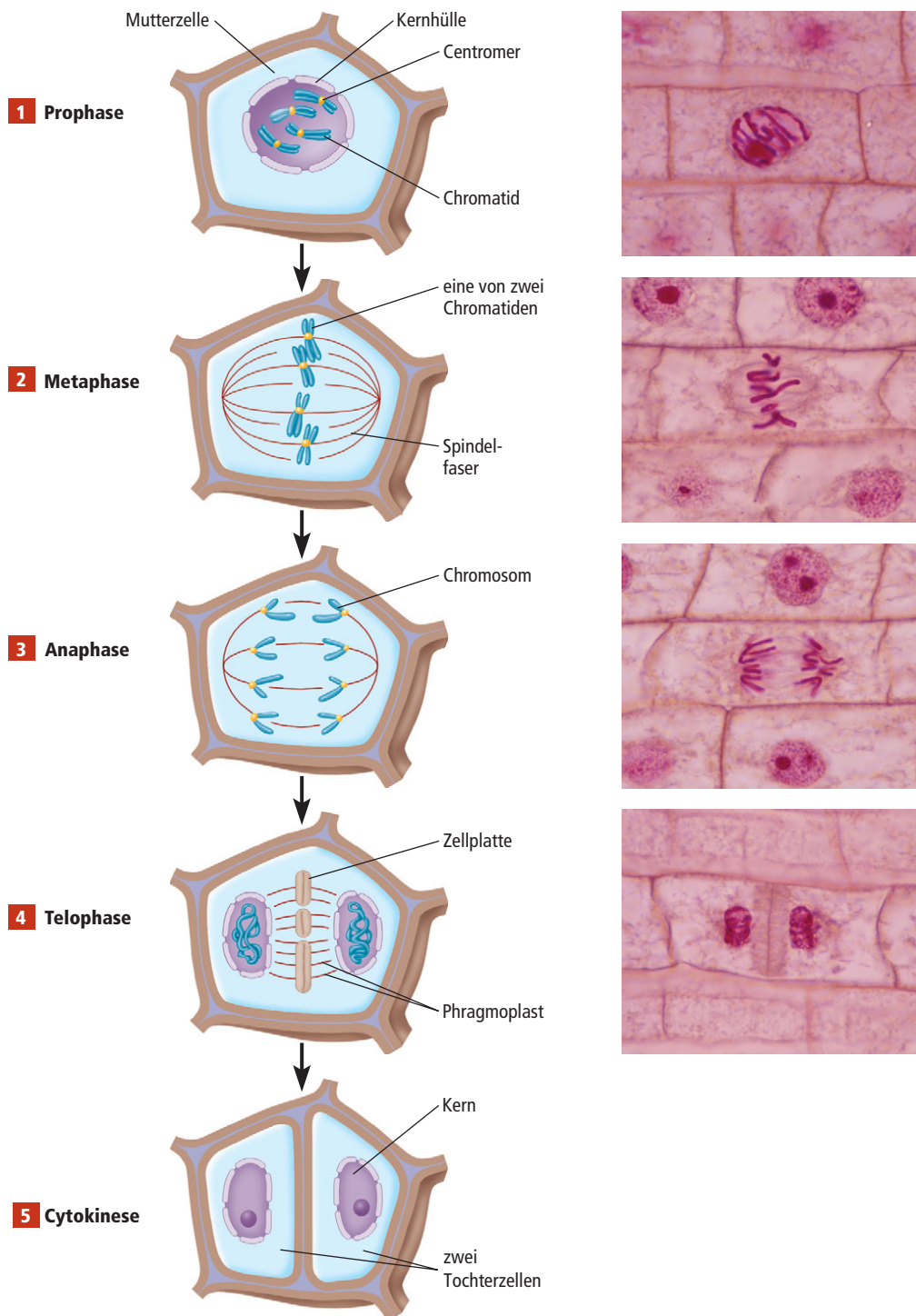


Abbildung 2.16: Mitose. Der Prozess der Mitose wird typischerweise so beschrieben, als würde es vier Hauptzustände geben: Prophase, Metaphase, Anaphase und Telophase. Die wesentlichen Veränderungen sind die Verkürzung und Verdickung der Chromosomen während der Prophase, die Chromosomenausrichtung während der Metaphase, die Chromosomenmigration zu entgegengesetzten Polen während der Anaphase sowie die Bildung der Kernhülle und die Abwicklung der Chromosomen während der Telophase. Die Cytokinese, die Teilung des Zellplasmas, beginnt gewöhnlich während der späten Anaphase oder der frühen Telophase. Bei Pflanzenzellen bildet ein Zylinder aus Mikrotubuli, der Phragmoplast, die Zellplatte, welche die Zelle in zwei Tochterzellen teilt.

In den Kapiteln 4 und 5 werden Sie sehen, in welcher Art Mitose am pflanzlichen Wachstum beteiligt ist. Kapitel 6 wird die Rolle der Mitose bei der Fortpflanzung

von Pflanzen erklären und die Mitose mit der Meiose vergleichen, eine Art Kernteilung, die nur bei der Fortpflanzung auftritt.

Mitose

Mitose tritt nach der G₂-Phase des Zellzyklus auf. Obwohl es sich um einen kontinuierlichen Prozess handelt, kann man die Mitose in vier Hauptphasen unterteilen: Prophase, Metaphase, Anaphase und Telophase.

► Abbildung 2.16 zeigt die wesentlichen Charakteristiken jeder Phase.

- 1 Das Hauptkennzeichen der **Prophase** ist, dass sich die Chromosomen so stark verkürzt und verdickt haben, dass sie unter dem Lichtmikroskop sichtbar sind. Jedes Chromosom erscheint als zwei Schwesterchromatiden, das sind die während der S-Phase replizierten DNA-Stränge. Die Chromatiden werden durch einen eingeschnürten Chromosombereich, das **Centromer**, zusammengehalten. Währenddessen verschwinden die Nucleoli. An zwei Stellen bilden sich allmählich Spindeln aus Mikrotubuli (in Abbildung zur Prophase nicht dargestellt) heraus, die man als **Centrosomen** oder Mikrotubuli-Organisationszentren bezeichnet. Sie bewegen sich zu gegenüberliegenden Seiten der Zelle. Bei Tierzellen enthält jedes Centrosom zwei Centriolen, die aus Mikrotubuli zusammengesetzt sind, bei Pflanzenzellen kommen diese jedoch nicht vor. Am Ende der Prophase, auch als *Prometaphase* bezeichnet, löst sich die Kernhülle auf. Die Spindelmikrotubuli fangen damit an, die Chromosomen zum Zentrum der Zelle zu bewegen. An seinem Centromer bildet jedes Chromatid eine komplexe Proteinstruktur, einen **Kinetochor**, an den sich einige Mikrotubuli anheften.
- 2 Während der **Metaphase** bewegen sich die Chromosomen zu einer gedachten Ebene, als **Äquatorialebene** bezeichnet, die sich über den gesamten Durchmesser der Zelle erstreckt und von den beiden Polen der nun vollständig gebildeten Spindel gleich weit entfernt ist. Die Bewegung wird durch die mit den Kinetochoren verbundenen Mikrotubuli gesteuert.
- 3 In der **Anaphase** entfernen sich die Schwesterchromatide jedes Chromosoms voneinander, so dass nun jedes Chromatid ein separates Chromosom bildet. Motorproteine schieben die Chromosomen zu den gegenüberliegenden Polen der Zelle. Die zu den Kinetochoren gehörenden Mikrotubuli verkürzen sich, während sich die anderen Mikrotubuli strecken, wodurch die Pole der Zelle weiter auseinandergedrückt werden.

- 4 Die **Telophase**, die letzte Phase der Mitose, beginnt, wenn die beiden Chromosomengruppen die gegenüberliegenden Pole der Zelle erreichen. In der Telophase laufen die Prozesse umgekehrt wie in der Prophase ab. In jeder Zelle bildet sich also wieder eine Kernhülle, die Chromosomen entwinden sich (dekondensieren) und der Spindelapparat löst sich auf.
- 5 Die **Cytokinese**, die Teilung des Cytoplasma, beginnt gewöhnlich am Ende der Anaphase oder während der frühen Telophase. Bei Tierzellen, die keine Zellwände besitzen, gehört zur Cytokinese eine Art Auseinanderdrücken des Cytoplasmas. Das „Mittelstück“, als *Teilungsfurche* bezeichnet, wird immer schmaler, bis sich schließlich eine Zelle in zwei geteilt hat. Bei Pflanzen und bei einigen Algen läuft die Cytokinese mithilfe eines Phragmoplasts ab, der die Zellplatte bildet. Der **Phragmoplast** ist ein Zylinder, der aus Mikrotubuli besteht, die aus der Kernspindel stammen und sich zwischen den Tochterkernen ausrichten. Die **Zellplatte**, die aus zwei neuen Plasmamembranen und Zellwänden besteht, bildet sich zwischen den Kernen und im Zentrum des Phragmoplasten. Die Zellplatte verstärkt sich allmählich, bis sie die Zelle in zwei Tochterzellen teilt.

Zellspezialisierung

Sie wissen, dass Mitose für die Bildung neuer Pflanzen notwendig ist. Von sich aus würde die Mitose aber einfach das vorhandene Zellmaterial in immer kleinere Einheiten teilen. Damit ein funktionsfähiger, mehrzelliger Organismus entsteht, muss auf die Mitose ein Zellwachstum und die Entwicklung von spezialisierten Zellen folgen, die bestimmten Aufgaben dienen. Neue Zellen differenzieren gewöhnlich zu verschiedenen Arten von Zellen, die ihrem Ort und ihrer Funktion im Organismus entsprechen. Im nächsten Kapitel sehen wir uns an, wie sich Pflanzenzellen auf verschiedene Aufgaben spezialisieren.

WIEDERHOLUNGSFRAGEN

- 1 Geben Sie alle Phasen des Zellzyklus an und beschreiben Sie, was während jeder Phase passiert.
- 2 Wozu dienen Mitose und Zellteilung?
- 3 Beschreiben Sie allgemein, was bei der Mitose passiert.

BIOTECHNOLOGIE

■ Die Verwendung von Pflanzenzellkulturen

Jede Pflanzenzelle enthält gewöhnlich das gesamte genetische Material und den gesamten genetischen Code der Pflanze. Jede Zelle in einer Pflanze besitzt also das Potenzial, die gesamte Pflanze zu bilden. Wir bezeichnen solche Zellen als totipotent. Ein wirklich interessantes Merkmal von Pflanzenzellen ist: Werden sie in einem Medium mit Nährstoffen in einem Reagenzglas kultiviert, können wir die Offenbarung der Totipotenz leicht anregen. Diese Fähigkeit von Pflanzenzellen, ganze Pflanzen zu bilden, hat viele Anwendungen.

Außer der Bildung ganzer Pflanzen können individuelle Pflanzenzellen auch individuelle Pflanzenmerkmale zeigen. Zum Beispiel können einzigartige Verbindungen, die gewöhnlich von ganzen Pflanzen gebildet werden, durch Pflanzenzellkulturen synthetisiert werden, die als chemische Fabriken arbeiten. Dies ist wichtig, weil spezifische Verbindungen, wie Alkaloide, die Pflanzen vor Krankheiten und Feinden schützen, auch für Menschen gefährliche Krankheitserreger töten können – einige zerstören sogar Krebszellen.

Trotz ihrer Nützlichkeit sind viele Pflanzenverbindungen in ihrer Beschaffung sehr teuer, wenn dazu ganze Pflanzen benutzt werden. Das Madagaskar-Immergrün (*Catharanthus roseus*) bildet die Alkaloide Vinblastin und Vincristin, die als Krebsmedikamente benutzt werden. Diese Alkaloide tragen nur zu 0,0005 Prozent zum Pflanzengewicht bei. Bei Verwendung ganzer Pflanzen als Quelle kostet Vinblastin gegenwärtig 1 Million Dollar pro Kilogramm, während Vincristin 3,5 Millionen Dollar kostet. Bei dieser

Beschaffungsmethode kostet die Behandlung eines Patienten mit einem von beiden Stoffen weit über 10.000-Dollar. Und beide Moleküle sind zu komplex, um sie außerhalb der Pflanze ökonomisch synthetisieren zu können.

Wissenschaftler führen Experimente mit Zellkulturen durch, um solche Alkaloide zu gewinnen, doch haben sich die Produktionskosten gegenüber der Verwendung ganzer Pflanzen nicht wesentlich verringert. Dennoch gibt es einige viel versprechende Methoden. Eine Methode ist, die Produktion durch Pflanzenhormone zu stimulieren. Bei einer anderen Methode manipulieren Wissenschaftler Zellen so, dass sie zusätzliche Kopien von Genen anfertigen, welche die Syntheseleistung erhöhen. Man kann auch mutierte Zellen selektieren, die hohe Konzentrationen der Alkaloide bilden. Schließlich können Wissenschaftler nach Zellen suchen, welche das gewünschte Alkaloid außerhalb der Zelle absondern, so dass die Zelle kontinuierlich produzieren kann. Nachfolgende Tabelle führt einige nützliche Verbindungen auf, die man aus Pflanzen gewinnt. Gegenwärtig können nur einige ökonomischer in Zellkulturen produziert werden, doch ist die Zukunft der Pflanzenzellkulturen viel versprechend. Wenn Wissenschaftler mehr darüber lernen, wie Zellen Verbindungen bilden, speichern und freisetzen, werden sich die Erträge aus Zellkulturen verbessern, was zu neuen Medikamenten mit angemessenen Kosten führt, ohne bei der Produktion die Umwelt zu zerstören.



Beispiele für medizinisch bedeutsame pflanzliche Verbindungen

Wissenschaftlicher Name	Gebräuchlicher Name	Verbindung	Einsatz der Verbindung
<i>Atropa belladonna</i>	Tollkirsche	Atropin, Scopolamin und Hyoscyamin	betäubende und krampflösende Medikamente
<i>Catharanthus roseus</i>	Madagaskar-Immergrün	Vinblastin und Vincristin	gegen Leukämie
<i>Curcuma longa</i>	Kurkuma	Verb. im Wurzelextrakt	cholesterinsenkend
<i>Datura stramonium</i>	Stechapfel	Atropin, Hyoscyamin und Scopolamin	betäubende und krampflösende Medikamente
<i>Digitalis purpurea</i>	Fingerhut	Digitalis-Glycoside	herzstimulierend
<i>Ephedra distachya</i>	Meerträubel	Ephedrin	blutdrucksenkend
<i>Ginkgo biloba</i>	Ginkgo	Flavonoide im Blätterextrakt	verbessert Gedächtnis
<i>Lobelia inflata</i>	Lobelia	Lobelin	lindert Bronchialleiden
<i>Papaver somniferum</i>	Schlafmohn	Morphin und Codein	Schmerzbehandlung
<i>Podophyllum peltatum</i>	Maiapfel	Podophyllotoxin	Tumorbekämpfung
<i>Psychotria ipecacuanha</i>	Brechwurzel	Emetin in der Wurzel	löst Brechreiz aus
<i>Rauwolfia serpentina</i>	Schlangenzurzel	Reserpin	psychische Krankheiten, Antihypertonikum
<i>Taxus brevifolia</i>	pazifische Eibe	Taxol	Krebsbekämpfung

Z U S A M M E N F A S S U N G

2.1 Ein Überblick über Zellen

Zellen sind mikroskopisch klein. Sie ermöglichen die ausreichende Aufnahme von Sauerstoff, Wasser und Nährstoffen über die Zelloberfläche, um die Bedürfnisse ihres Inhalts zu befriedigen.

Mikroskopie

Lichtmikroskope beugen Licht, um vergrößerte Abbilder zu erzeugen. Elektronenmikroskope fokussieren Elektronen mithilfe magnetischer Linsen, um Bilder zu erzeugen. Das Transmissionselektronenmikroskop (TEM) durchleuchtet eine Probe mit Elektronen, um elektronische Abbilder zu erzeugen. Beim Rasterelektronenmikroskop (REM) prallen Elektronen an einer Probe ab, was zu einem räumlichen Bild führt.

Zelltheorie

Die Zelltheorie besagt, dass alle Organismen aus einer oder mehreren Zellen bestehen, dass die Zelle die grundlegende strukturelle Einheit ist und dass alle Zellen aus bereits existierenden Zellen entstehen.

Prokaryotische und eukaryotische Zellen

Eukaryotische Zellen entwickelten sich aus prokaryotischen Zellen. Sie sind im Allgemeinen größer und komplexer, sie besitzen einen Kern und andere, von Membranen umgebene Organellen. Die bekanntesten Prokaryoten sind Bakterien, bei denen es sich um einzellige Organismen handelt. Eukaryoten können einzellig sein, die meisten sind jedoch mehrzellig. Viele zelluläre Funktionen in Eukaryoten laufen in Organellen ab. Nach der Endosymbiontentheorie haben sich einige Organellen daraus entwickelt, dass prokaryotische Zellen andere prokaryotische Zellen in sich aufnahmen.

Zellprodukte

Gene und ihre Transkripte bestehen aus Nucleinsäuren (DNA und RNA). Die genetischen Anweisungen

in der RNA steuern die Synthese von Proteinen, die aus Aminosäuren aufgebaut sind und die physischen Merkmale eines Organismus definieren. Einige Proteine sind strukturelle Komponenten, während andere, die *Enzyme*, chemische Reaktionen steuern. Proteine sind auch am Transport und bei der Reaktion auf Reize beteiligt. Kohlenhydrate, wie Zucker und Cellulose, sind Energiequellen und strukturelle Bausteine. Lipide, wie Neutralfette und Phospholipide, dienen als Energiequellen und Membranbestandteile.

2.2 Wichtige Zellorganellen

Die Zellen von Pflanzen, Algen, Pilzen und Tieren haben im Wesentlichen dieselben Arten von Zellorganellen. Das Innere einer Pflanzenzelle (die Gesamtheit innerhalb der Zellwände) wird als *Protoplast* bezeichnet. Das Innere besteht aus zwei Teilen: dem Kern und dem Cytoplasma.

Zellkern

Die DNA im Kern ist in komplexen, fadenförmigen Chromosomen angeordnet. Jedes Chromosom besteht aus vielen Genen, die jeweils ein spezifisches Protein codieren. Nucleoli sind runde Strukturen in einigen Chromosomen, die Untereinheiten für Ribosomen synthetisieren. Die Kernhülle besitzt Poren, die den Transport von Substanzen ins Cytosol und zurück in den Kern ermöglichen.

Ribosomen

Ribosomen sind winzige Teilchen, die mithilfe von RNA Proteine synthetisieren. Im Gegensatz zu anderen Organellen fehlt Ribosomen eine Membran und sie sind auch in prokaryotischen Zellen vorhanden.

Endoplasmatisches Retikulum

Das endoplasmatische Retikulum (ER), ein mit der Kernmembran verbundenes Netzwerk aus Membranen, ist ein Ort zur Bildung und zum Export von Lipiden (im glatten ER) und der Proteinsynthese (am rauen ER).

Golgi-Apparat

Dieses Organell wird auch Golgi-Komplex genannt. Der Golgi-Apparat besteht aus Stapeln membranbegrenzter Hohlräume, die man als *Cisternae* bezeichnet. Sie speichern und verändern Produkte aus dem ER, bevor sie mithilfe von Transportvesikeln aus der Zelle exportiert werden.

Chloroplasten

Chloroplasten sind Photosynthese betreibende Organellen in den Zellen der grünen Pflanzenteile. Sonnenenergie wird in den Thylakoiden in chemische Energie umgewandelt, während sich die Zuckerproduktion und die Speicherung in dem umgebenden Fluid, dem *Stroma*, vollziehen. Chloroplasten gehören zu den Plastiden. Das sind Organellen, die Nahrung oder Pigmente für Pflanzenzellen bereitstellen und speichern. Farblose Plastiden, die *Leukoplasten*, enthalten oft Stärke, und Chromoplasten enthalten gelbe, orangefarbene oder rote Pigmente.

Mitochondrien

Mitochondrien sind Organellen, die man als „Kraftwerke“ der Zelle bezeichnen kann. Sie wandeln gespeicherte chemische Energie in ATP um. Das ist das organische Molekül, das die Zellaktivitäten antreibt.

Microbodies

Microbodies sind kleine, kugelförmige Organellen, die Enzyme enthalten. Peroxisomen sind Microbodies, die ein hohes Potenzial zur Beseitigung des bei den Oxidationen entstehenden Wasserstoffperoxids besitzen. In Pflanzen gibt es Blattperoxisomen in Photosynthese betreibenden Geweben und *Glyoxysomen*, die an der Umwandlung von Speicherlipiden in Zucker beteiligt sind.

Vakuolen

Der Großteil des Volumens voll entwickelter Pflanzenzellen wird von einer großen Zentralvakuole eingenommen, die Wasser und Stoffwechselprodukte speichert, die Salzkonzentration reguliert und bei der

Aufrechterhaltung der Zellform hilft. Die Membran der Vakuole wird als *Tonoplast* bezeichnet.

2.3 Das Cytoskelett steuert Zellform und -bewegung

Das Cytoskelett („Zellskelett“) hält die Zellform aufrecht und organisiert die Bewegung der Organellen im Cytoplasma. Zum Cytoskelett gehören drei verschiedene Arten von fadenförmigen Zellstrukturen: Mikrotubuli, Mikrofilamente und Intermediärfilamente, die sich wie Schienen durch das Cytosol oder Cytoplasma ziehen.

Mikrotubuli

Mikrotubuli, die längsten Proteinfäden im Cytoskelett, steuern die Bewegung von Molekülen, Organellen und Chromosomen innerhalb der Zelle. Mikrotubuli können auch Flimmerhärchen und Geißeln bilden. Das sind die Fortbewegungsorganellen, die man bei vielen Tierzellen und bei mobilen, reproduktiven Pflanzenzellen findet.

Mikrofilamente

Mikrofilamente sind die dünnsten Proteinfäden im Cytoskelett. Sie bestehen aus dem Protein Aktin. Sie bewirken Bewegungen oder Formveränderungen. In Pflanzenzellen bewegen sie die Zellinhalte zirkular um die Zentralvakuole, ein Prozess, der auch als Plasmaströmung bezeichnet wird.

Motorproteine

Mikrotubuli und Mikrofilamente bilden Schienen, die Motorproteine („laufende Moleküle“) leiten, die sich an Strukturen anheften, um sie an bestimmte Zielorte innerhalb der Zelle zu transportieren.

Intermediärfilamente

Intermediärfilamente sind dicker als Mikrofilamente, aber dünner als Mikrotubuli. Bei Pflanzenzellen können sie die Aufrechterhaltung der Zellstruktur unterstützen. Innerhalb der Zelle werden die Kompartimente der Organellen, des Kerns und der Vakuole durch Membranen vom Cytosol abgegrenzt.

2.4 Membranen und Zellwände

Membranen

Zellen sind von einer Plasmamembran umgeben (Zellmembran), die kontrolliert, was in die Zelle gelangt oder diese verlässt. Das Flüssig-Mosaik-Modell beschreibt die Struktur der Plasmamembran als eine Phospholipiddoppelschicht, welche die Membran selektiv durchlässig macht.

Zellwände

Im Gegensatz zu tierischen Zellen haben Pflanzenzellen außerhalb der Plasmamembran eine Zellwand. Neben einer primären Zellwand, die alle Pflanzenzellen ausbilden, bilden einige Zellen von holzigen Pflanzen eine dickere sekundäre Zellwand, die eine Struktur zwischen der primären Zellwand und der Plasmamembran darstellt. Pflanzenzellwände bestehen hauptsächlich aus langen Cellulosemolekülen. Starre Moleküle, die *Lignine*, stärken die Zellwände von Gefäßpflanzen. Eine dünne Schicht, die man als *Mittellamelle* bezeichnet, hält die Zellwände benachbarter Zellen zusammen.

Plasmodesmen

Über Plasmodesmen können größere Moleküle direkt von einer Zelle zur anderen transportiert werden.

2.5 Zellzyklus und Zellteilung

Am Ende ihres Lebenszyklus teilen sich Zellen oder sterben ab. Abgestorbene Zellen liefern oft einen strukturellen Halt und leiten Wasser. Das Wachstum und die Fortpflanzung mehrzelliger Organismen hängen von der Zellteilung ab.

Der Zellzyklus

Der Zellzyklus lässt sich in zwei Hauptphasen unterteilen: die Interphase und die mitotische Phase. Die Interphase nimmt 90 Prozent des Zellzyklus ein. Sie umfasst auch die G₁-Phase, die DNA-Replikation (S-Phase) und die G₂-Phase. Während der S-Phase wird die DNA jedes Chromosoms dupliziert, so dass

zwei Geschwisterstränge entstehen, die als Chromatide bezeichnet werden. Die mitotische Phase, oder M-Phase, besteht aus der Zellteilung, bei der die Chromatide zu getrennten Chromosomen werden und sich der Kern und das Cytoplasma teilen, so dass zwei getrennte Zellen entstehen. Die Zellteilung unterteilt sich in die Teilung des Kerns und die Cytokinese, bei der das Cytoplasma und die beiden neuen Kerne in die zwei Tochterzellen aufgeteilt werden.

Wachstum und Fortpflanzung

Die Mitose ist am Wachstum, am Ersetzen von Zellen bei ausgewachsenen Organismen, an der Fortpflanzung bei Pflanzen und der asexuellen Vermehrung beteiligt.

Mitose

Im Detail besteht die Mitose aus der Prophase (dem Erscheinen der Chromosomen als ein Paar von Schwesterchromatiden und dem Beginn der Bildung einer Spindel aus Mikrotubuli, dem Auflösen der Kernhülle und der Bewegung der Chromatiden zum Zellzentrum), der Metaphase (bei der sich die Chromatide an der Äquatorialebene ausrichten), der Anaphase (Trennung der Chromatide zur Bildung individueller Chromosomen, die sich zu den gegenüberliegenden Polen bewegen) und der Telophase (der Umkehrung der Prophase, bei der sich die Kernhülle in jeder Tochterzelle neu bildet). Die Cytokinese beginnt gewöhnlich während der späten Anaphase oder der frühen Telophase. Bei der Cytokinese von Pflanzenzellen breitet sich eine Zellplatte so lange aus, bis sie die Zelle in zwei Tochterzellen unterteilt.

Zellspezialisierung

Die Zellteilung unterteilt den verfügbaren zellulären Raum, führt aber zu keinem Wachstum. Damit sich ein mehrzelliger Organismus entwickeln kann, muss auf die Zellteilung ein Zellwachstum und eine Zelldifferenzierung folgen. Dies ist die Bildung der verschiedensten differenzierten Zellen, die auf die unterschiedlichsten Aufgaben spezialisiert sind.

Z U S A M M E N F A S S U N G