

akzent

Martin Nichelmann

Licht und Leben



Martin Nichelmann

Licht und Leben

Urania -Verlag Leipzig · Jena · Berlin

**Autor: Dozent Dr. habil. Martin Nichelmann
Humboldt-Universität zu Berlin**

Zeichnungen: Inge Brüx

1. Auflage 1982

1.–20. Tausend

© Urania-Verlag Leipzig/Jena/Berlin

Verlag für populärwissenschaftliche Literatur, 1982

VLN 212-475/24/82 LSV 1319

Lektoren: Brigitte Krumbiegel/Ewald Oetzel

Umschlagreihenentwurf: Helmut Selle

Typografie: Julia Strube

Fotos: Lothar Güthert (65); Prof. Dr. Ulrich Sedlag (58, Einband)

Printed in the German Democratic Republic

Gesamtherstellung: INTERDRUCK Graphischer Großbetrieb

Leipzig – III/18/97

Best.Nr.: 653 738 0

DDR 4,50 M

Inhalt

Sehen ohne Augen? 7

Wie entsteht das Licht? 12

Gespeicherte Sonnenenergie 17

Das Blatt – Hauptort der Photosynthese 20

Ablauf der Photosynthese 25

Was beeinflusst die Photosynthese? 29

Kann der Mensch die Photosynthese steuern? 35

Licht dringt auch unter die Haut 37

Vitamin D – ein Hormon? 38

Gelbsucht durch Licht heilen? 42

Sonnenbrand 44

Lichtüberempfindlichkeit 46

Photorezeption 48

Licht hemmt die Photorezeptoren 49

Verschiedene Tiere – verschiedene Augen 54

Das Linsenauge 63

Scharfe Bilder nur durch Akkommodation 64

Die Netzhaut – ein vorgelagerter Gehirnabschnitt 69

Wenn die Bilder flimmern 72

Adaptation an hell und dunkel 73

Farbsehen 76

Photorezeptoren nicht nur in der Netzhaut 82

Licht bestimmt den Lebensrhythmus 87

Periodik überall 88

Zirkadianer Rhythmus 93

Wo liegt der Schrittmacher? 95

Das Gehirn der Schmetterlingsraupen 97

Die Zirbeldrüse der Vögel 99

Rhythmusentstehung bei Säugetieren 100

Bald nicht mehr: dreimal täglich! 101

Reisen um den Erdball 102

Tageszeit und Geburt 104

Tagesrhythmus in Milchviehanlagen 108

Licht und Leistung in der Tierproduktion 110

Nochmals: die Zirbeldrüse 111

Mehr Hühnereier durch gute Beleuchtung 113

Enten und Gänse zu jeder Jahreszeit 116

Lämmer im Schnee 119

Weniger Fett durch mehr Licht 121

Leben braucht Licht 124

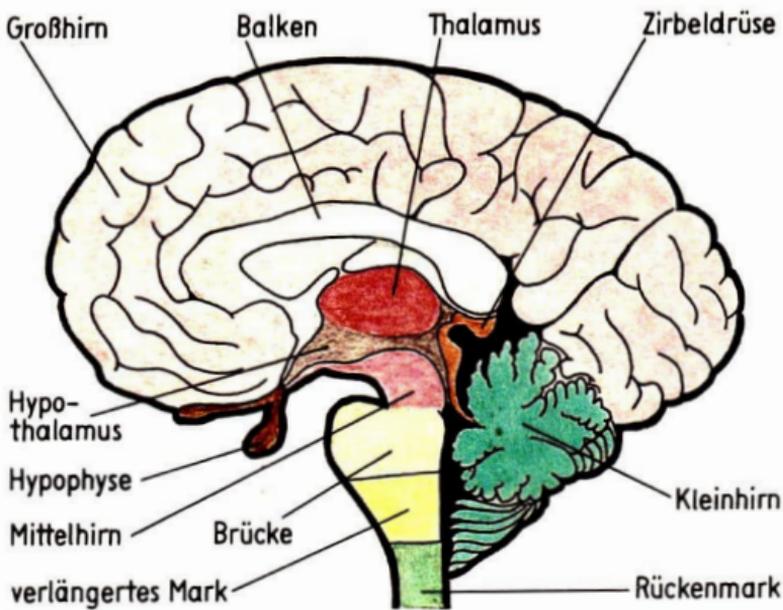
Sehen ohne Augen?

Es begann in den dreißiger Jahren in Südfrankreich. Eine Forschergruppe unter Leitung von Dr. Benoit beschäftigte sich mit Fragen der Fortpflanzung beim Wassergeflügel.

Enten legen im Frühjahr und im Frühsommer sowie in seltenen Fällen nach einer Legepause von zwei bis drei Monaten auch noch in den ersten Herbstwochen Eier. Nur in dieser Zeit erzeugen die Erpel befruchtungsfähige Spermien, umwerben sie die Enten und führen sie den Tretakt aus. Ihre Hoden liegen seitlich der Wirbelsäule im Bauchraum. Während der Fortpflanzungssaison sehen sie bohnen- bis walzenförmig aus und haben einen Längsdurchmesser von 3 bis 4 cm. Ihr Querdurchmesser beträgt etwa 1,5 cm. Außerhalb der Fortpflanzungssaison schrumpfen sie schnell auf etwa ein Drittel dieser Größe ein und beginnen erst wieder kurz vor dem Winterende zu wachsen.

Ziel der Untersuchungen von Dr. Benoit war es, die Fortpflanzungsfähigkeit der Tiere über den größten Teil des Jahres auszudehnen. Die Wissenschaftler erkannten schnell, daß das Licht die Legeperiode in entscheidendem Maße beeinflußt. Die ersten Eier fielen in den Versuchsherden des Instituts an, wenn die Tage länger wurden. Sobald sich aber die Tage verkürzten, oft auch schon, wenn sie im Juni täglich nur noch um Sekunden zunahmen, stagnierte die geschlechtliche Aktivität; ohne Licht war eine maximale Legeleistung nicht möglich.

Überrascht stellte Dr. Benoit fest, daß auch blinde Enten Eier legen – nicht weniger und nicht schlechtere als Enten mit vollem Sehvermögen. Zunächst glaubte er an eine Täuschung. Wie sollten Enten, die erblindet waren, das



Die verschiedenen Regionen im Gehirn

Licht wahrnehmen, wie sollten sie feststellen, ob die Tage länger oder kürzer werden?

Weitere Untersuchungen zeigten, daß auch Enten, denen die Augen operativ entfernt worden waren, in der Legeleistung nicht nachließen.

Damit aber erhob sich eine neue Frage: Wie, wenn nicht über die Augen, können die Enten das Licht wahrnehmen?

Nach einigen Überlegungen fiel der »Verdacht« auf den Hypothalamus. Der Hypothalamus ist Bestandteil des Zwischenhirns. Er befindet sich in unmittelbarer Nachbarschaft der Hypophyse, der Hirnanhangsdrüse, die im Organismus wichtige hormonelle Funktionen zu erfüllen hat und insbesondere das Fortpflanzungsgeschehen beeinflußt. Der Hypothalamus nimmt nur einen kleinen Raum ein; er ist bei der Ente kaum größer als 400 mm^3 . Das entspricht einem Würfel mit einer Kantenlänge von weniger als 8 mm.

Der Hypothalamus steuert zahlreiche Lebensfunktionen des tierischen und des menschlichen Organismus. Er ent-

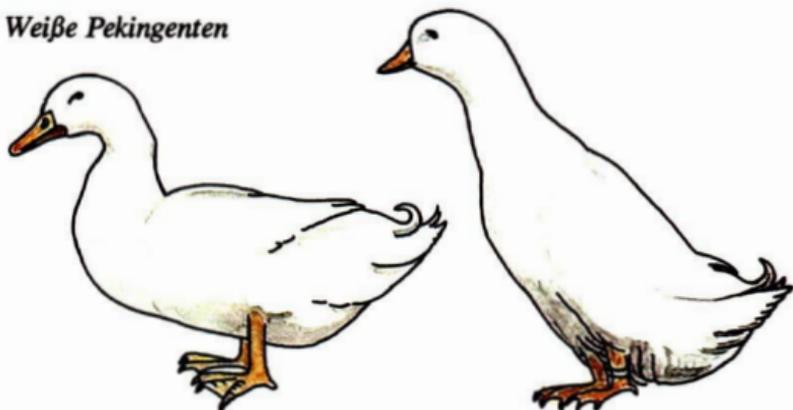
hält z. B. das Regelzentrum für die Körpertemperatur, für den osmotischen Druck des Blutes und der anderen Körperflüssigkeiten, das Hunger- und Sättigungszentrum, das Zentrum für die Regulation des Blutzuckerspiegels, das Durstzentrum und das Sexualzentrum. Er besitzt für alle Körperfunktionen, die von ihm gesteuert werden, Rezeptoren. Sie überprüfen als Meßfühler ständig die augenblickliche Höhe der zu regelnden Körperfunktion.

Ist es nicht denkbar, daß sich im Hypothalamus auch lichtempfindliche Zellen befinden? Dr. Benoit und seine Mitarbeiter kamen sehr früh zu dieser Meinung, obgleich anfangs der dreißiger Jahre die Funktionen des Hypothalamus noch weitgehend unbekannt waren. Gesichert war nur, daß er im Rahmen der Temperaturregulation eine gewisse Rolle spielt, denn eine Erwärmung dieses Gehirnabschnittes löste bei Katzen Hecheln und eine Abkühlung Muskelzittern aus.

In einer sehr originellen Versuchsdurchführung wurde nachgewiesen, daß zumindest beim Geflügel im Hypothalamus lichtempfindliche Zellen vorhanden sind, die bei der Steuerung der Fortpflanzung eine Rolle spielen.

Als Versuchstiere verwendete Dr. Benoit männliche geschlechtsreife Pekingenten. Seine Wahl fiel auf diese Tierart, weil die weißen Federn der Pekingenten wenig Licht absorbieren. Er vermutete daher, daß das Licht bei Pekingenten tiefer in den Schädel als bei dunklen Entenrassen eindringen kann. Über eine Röntgenanlage war es möglich, die Hodengröße der Tiere zu kontrollieren.

Weißer Pekingenten



vor der Beleuchtung				
nach vierwöchiger Beleuchtung				
Wellenlänge	ultra-violett (366 nm)	blau (460 nm)	rot (708 nm)	infrarot (786 nm)

Einfluß der Beleuchtung mit verschiedenen Wellenlängen auf die Hodengröße von geschlechtsreifen Erpeln

Wurden den Tieren die Augäpfel entfernt, so veränderte sich die Hodengröße nicht. Die Hoden begannen aber zu schrumpfen, sobald die leeren Augenhöhlen mit einem lichtundurchlässigen Stoff ausgekleidet wurden. Die gleiche Reaktion trat auf, wenn Enten mit gesunden Augen eine lichtundurchlässige Kopfkappe aufgesetzt bekamen. Die Hoden verkleinerten sich aber auch bei ausgekleideten Augenhöhlen nicht, wenn über Glasfaserstäbe Licht zum Hypothalamus geleitet wurde. Die Wellenlänge des verwendeten Lichtes spielte keine Rolle. Gleichgültig, ob Tageslicht, rotes oder blaues Licht benutzt wurde – stets blieb die Fortpflanzungsfähigkeit der Erpel erhalten. Damit hatte Dr. Benoit bewiesen: Die Augen sind nicht die einzigen Organe des tierischen Organismus, die Lichtimpulse empfangen, analysieren und weiterverarbeiten können.

Um es ganz deutlich zu sagen: Auch Enten können nicht ohne Augen sehen. Sehen bedeutet, durch elektromagnetische Wellen im Bereich des sichtbaren Lichtes Informationen über die Umwelt aufzunehmen. Nur die Netzhaut des Auges mit den anschließenden zentralnervalen Abschnitten des Sehapparates ist fähig, Informationen zu

identifizieren, die das Licht liefert, wenn es von einem Gegenstand reflektiert wird, und sie so zu verarbeiten, daß der reflektierte Gegenstand wahrgenommen wird. Informationen über die Beleuchtungsdauer und die Beleuchtungsstärke und in gewissem Grade auch über die Wellenlängenzusammensetzung des Lichtes werden aber auch von anderen nervalen Strukturen des Organismus aufgenommen und entschlüsselt.

Wie entsteht das Licht?

Allen direkten Vorfahren des Menschen ist gemeinsam, daß der Evolutionsprozeß wesentlich durch das Licht und durch den Tag-Nacht-Rhythmus beeinflußt wurde. Bereits vor vielen tausend Jahren lernte der Mensch das Feuer nutzen. Er durchbrach damit den natürlichen Hell-Dunkel-Zyklus, der durch die auf- und untergehende Sonne bestimmt wurde. Er merkte bald, daß die wichtigste Voraussetzung für die Erzeugung von Licht eine Lichtquelle ist. Brachte man eine Fackel in eine dunkle Höhle, so konnte man sehen, Freund und Feind voneinander unterscheiden und Gefahren erkennen. Im Laufe der Zeit veränderten sich die benutzten Lichtquellen. Die Fackel wurde durch die Öllampe der Antike, die Kerze und schließlich durch die Petroleumlampe abgelöst. Erst seit der Erfindung einer brauchbaren Glühlampe durch Edison war es möglich, auch in der Nacht Räume, Straßen und Plätze taghell zu beleuchten und in der ganzen Stadt eine Helligkeit zu erzeugen, wie sie im Mittelalter nur bei Feuersbrünsten denkbar war.

Obleich man Licht seit langem erzeugt, lieferten erst die Untersuchungen von Rutherford im Jahre 1911 und von Bohr im Jahre 1913 über den Atomaufbau die Grundlage dafür, daß man heute weiß, daß Licht seinen Ursprung in Vorgängen innerhalb der Atomhülle hat.

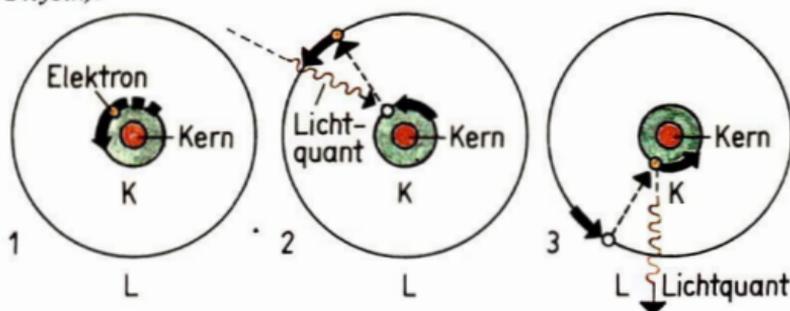
Nach Bohr besteht ein Atom aus dem Atomkern und den Elektronen, die den Kern umkreisen. Der Abstand zwischen dem Kern und einem Elektron ist variabel und wird durch den Anregungszustand des Elektrons bestimmt. Wird dem Elektron Energie zugeführt, so tritt es von einer kernnahen auf eine kernfernere Bahn über. Die Lage der

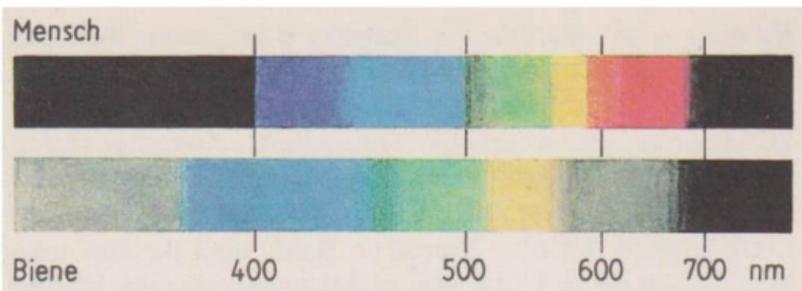
Bahnen – sie werden als Schalen bezeichnet, weil das Elektron sie nicht nur in einer Ebene umkreist – ist exakt festgelegt. Der Übergang von einer kernnahen auf eine kernfernere Bahn erfolgt sprunghaft. Zwischenstufen zwischen den Bahnen existieren nicht. Beim Übergang von einer energiereichen auf eine energiearme, also von einer kernferneren auf eine kernnahe Bahn wird die frei werdende Energie in Form von elektromagnetischen Wellen abgegeben. Die Wellenlänge der Strahlung wird von der Energiemenge bestimmt, die beim Elektronensprung frei wird. Der plötzliche Übergang von einer kernfernen auf eine kernnahe Bahn verursacht eine energiereiche und extrem kurzwellige Strahlung.

Am einfachsten sind die Verhältnisse beim Wasserstoffatom zu überschauen. Es besitzt nur ein Elektron, das entsprechend seinem Energiegehalt den Kern in sieben Schalen umkreisen kann. Dabei ist der Übergang von jeder beliebigen kernfernen auf eine kernnahe Bahn möglich. Die Übergänge auf eine bestimmte kernnahe Bahn werden als Serien bezeichnet. Die Lyman-Serie – das ist der Übergang auf die energieärmste Bahn – erzeugt elektromagnetische Wellen, die im ultravioletten Bereich liegen. Die Balmer-Serie liegt im sichtbaren Bereich, und die restlichen Serien befinden sich im infraroten Bereich des elektromagnetischen Spektrums.

Meistens werden die Elektronen durch Wärme angeregt.

Aufbau eines Wasserstoffatoms. 1 – energetischer Grundzustand; 2 – Energiezufuhr und Sprung zur nächstäußereren Schale, das Elektron ist angeregt; 3 – Sprung in den Grundzustand; das zugeführte »Energiepaket« (Lichtquant) wird wieder abgestrahlt. K und L sind Bahnen bzw. Schalen (nach Backe, Rund um die Physik).



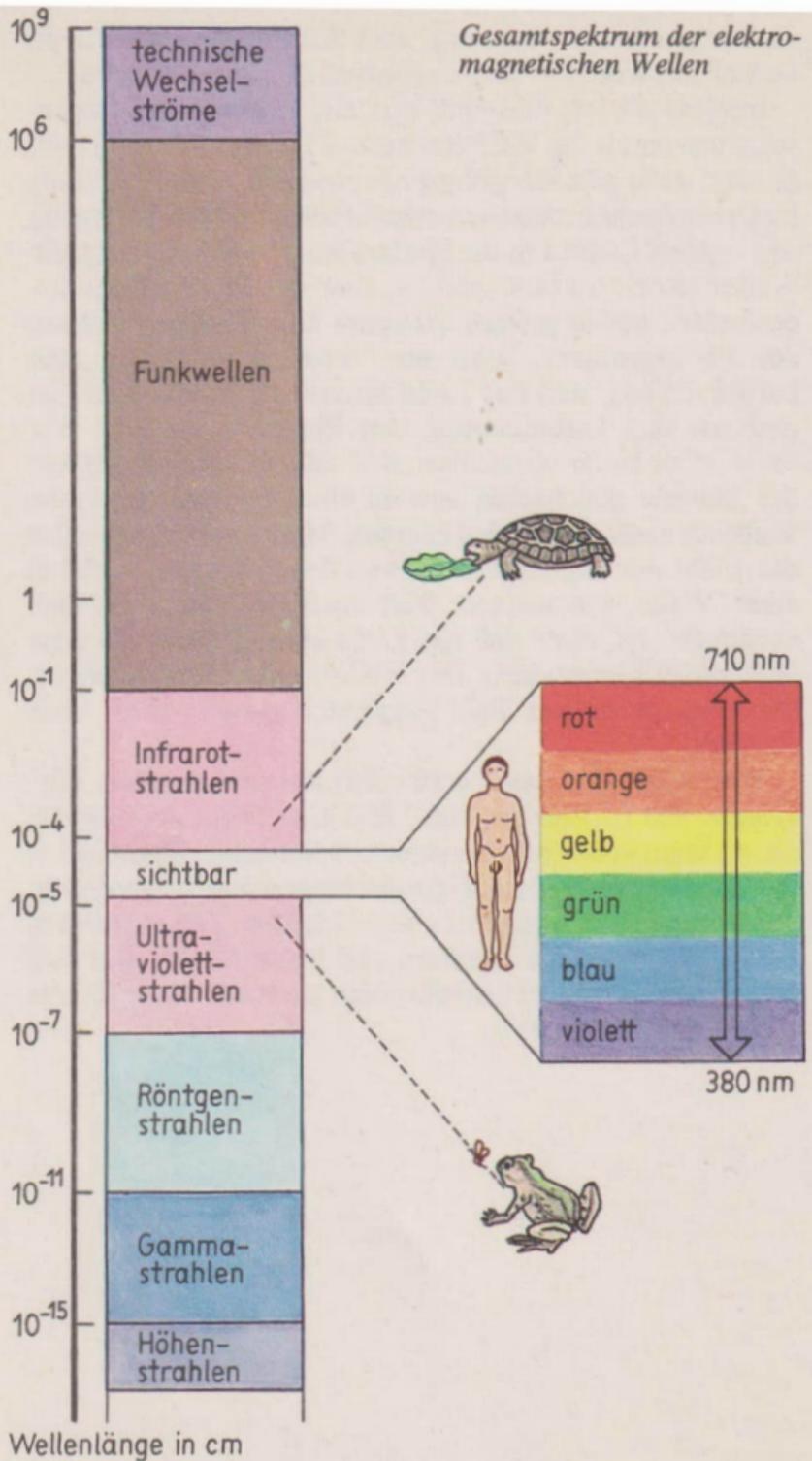


Während Menschen nur im Bereich zwischen 390 und 760 nm sehen, dehnt sich bei verschiedenen Tierarten der Bereich des sichtbaren Lichtes in den kurzwelligen ultravioletten oder den langwelligen infraroten Wellenlängenabschnitt aus.

Glühende Körper, die Licht aussenden, sind z. B. die Sonne, eine Kerze oder eine Lampe. Die Fluoreszenz entsteht durch Bestrahlung bestimmter Stoffe mit kurzwelliger elektromagnetischer Strahlung, z. B. mit ultraviolettem Licht oder mit Röntgenstrahlen. Chemolumineszenz ist nachzuweisen, wenn die Energiezufuhr durch chemische Umsetzungen entsteht. Das ist z. B. beim Glühwürmchen der Fall, das durch Chemolumineszenz im Dunkeln leuchtet. Bei Phosphoreszenz liegt zwischen der Anregung der Elektronen, also der Energiezufuhr, und der Aussendung der elektromagnetischen Wellen ein längerer Zeitraum; die elektromagnetischen Wellen entstehen erst nach einer bestimmten Latenzzeit. Thermolumineszenz schließlich tritt bei zusätzlicher Erwärmung des durch kurzwellige Strahlung angeregten Stoffes auf.

Das sichtbare Licht stellt nur einen kleinen Ausschnitt aus dem Gesamtspektrum der elektromagnetischen Wellen dar, das von den extrem energiereichen und kurzwelligen Röntgen- und Gammastrahlen auf der einen Seite bis zu den Rundfunkwellen auf der anderen Seite reicht. Menschen können im Wellenlängenbereich zwischen 390 und 760 nm sehen. Bei verschiedenen Tierarten dehnt sich der Bereich des sichtbaren Lichtes in den kurzwelligen ultravioletten oder in den langwelligen infraroten aus. So nehmen Frösche und Kröten auch noch ultraviolettes Licht wahr. Selbst bei reiner UV-Beleuchtung schnappen sie zielsicher nach ihrer Beute. Elektrophysiologische Unter-

Gesamtspektrum der elektromagnetischen Wellen



suchungen lassen vermuten, daß Schildkröten auch noch im tief infraroten Wellenlängenbereich sehen können.

Interessant ist, daß sich nur ein Teil der Lichteigenschaften durch die Wellennatur des Lichtes erklären läßt. So sind zwar alle Beugungsphänomene wie die Brechung an Grenzflächen zwischen zwei Medien und die Zerlegung des weißen Lichtes in die Spektralkomponenten durch die Wellentheorie zu beschreiben, aber der Photoeffekt, insbesondere die in grünen Pflanzen ablaufenden Prozesse der Photosynthese, wird nur verständlich, wenn man berücksichtigt, daß das Licht auch Partikelcharakter hat und aus den Lichtquanten, den Photonen, besteht. Für viele ist es kaum vorstellbar, daß eine Erscheinungsform der Materie gleichzeitig sowohl eine elektromagnetische Welle als auch ein Partikel sein soll. Möglicherweise besitzt das Licht nur Eigenschaften, von denen ein Teil auch bei einer Welle, ein anderer Teil auch bei einem Partikel vorhanden ist, ohne daß das Licht aber selbst Welle oder Partikel zu sein braucht. Der Wellen- oder Partikelcharakter wäre in diesem Fall lediglich Analogie, nicht aber Realität.

Wesentlich für das Verständnis der biologischen Wirkungen des Lichtes ist, daß Licht eine Form der Energie ist. Es kann in den pflanzlichen und tierischen Organismus bis zu einer bestimmten Tiefe eindringen und in den Zellen, insbesondere in spezifisch entwickelten Zellorganellen, chemische Prozesse auslösen und beeinflussen. Ein Teil dieser Reaktionen ist unabdingbare Voraussetzung für das Leben auf der Erde.

Gespeicherte Sonnenenergie

Pflanzen haben die Fähigkeit, unter Ausnutzung der Sonnenenergie, die über die elektromagnetischen Wellen zur Erde transportiert wird, hochmolekulare energiereiche Verbindungen aus den »energielosen« Verbindungen Kohlendioxid und Wasser zu bilden. Wir nennen diesen lebensnotwendigen Prozeß Photosynthese.

Die Pflanzen gewinnen aus der Sonnenenergie die Energie für ihre eigenen Stoffwechselprozesse und für ihr Wachstum. Gleichzeitig schaffen sie die Voraussetzungen für die Energieversorgung der Tiere und des Menschen. Indem sie aus Wasser und Kohlendioxid organische Substanzen bilden, erzeugen sie freien, nicht gebundenen Sauerstoff. In den 5 Milliarden Jahren der Erdentwicklung stieg dadurch der Sauerstoffgehalt der Atmosphäre von nahezu 0% vor 2 bis 5 Milliarden Jahren auf 20 bis 21% in der Gegenwart an. Noch vor 1 Milliarde Jahren betrug der Sauerstoffgehalt der Luft lediglich 1% des derzeitigen Wertes. Das sind weniger als 0,2% Sauerstoff in der Gesamtatmosphäre. In jener Zeit trugen vor allem die Grünalgen zur Sauerstoffanreicherung bei.

Vor 900 Millionen Jahren, mit Beginn des Paläozoikums, entwickelten sich höhere Pflanzen. Die Photosynthese wurde erheblich gesteigert und der Sauerstoffgehalt der Luft so erhöht, daß sich erste tierische Organismen bildeten. Bis zur Entstehung der Säugetiere vor etwa 100 Millionen Jahren war es aber noch ein langer Weg.

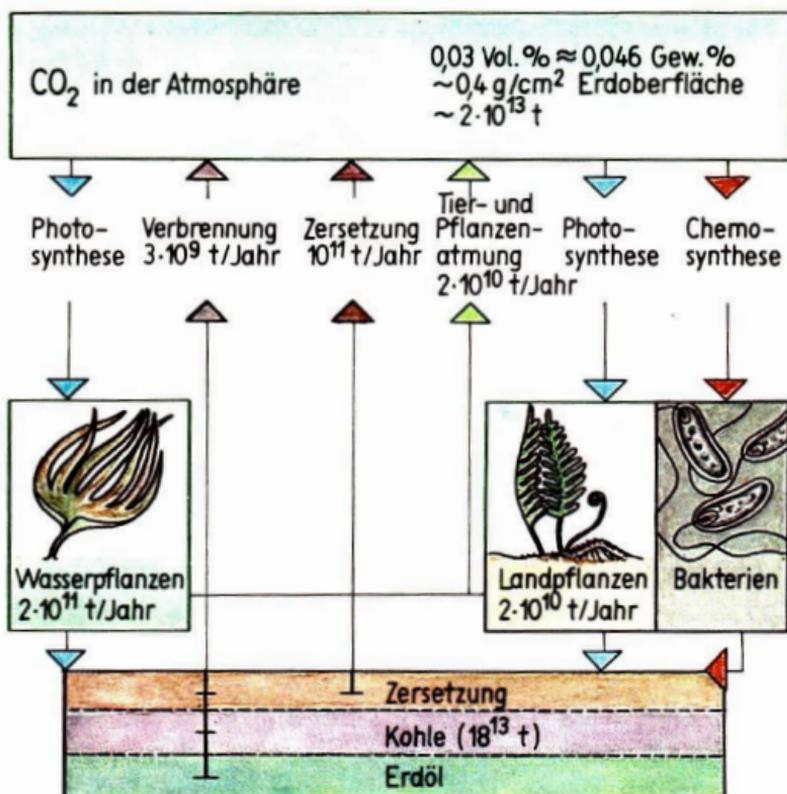
Die Pflanzen schufen zwei Voraussetzungen für die Entstehung tierischen Lebens; sie sorgten für die Bildung von molekularem Sauerstoff in der Atmosphäre, und sie lieferten die für das Tier notwendigen Nährstoffe.

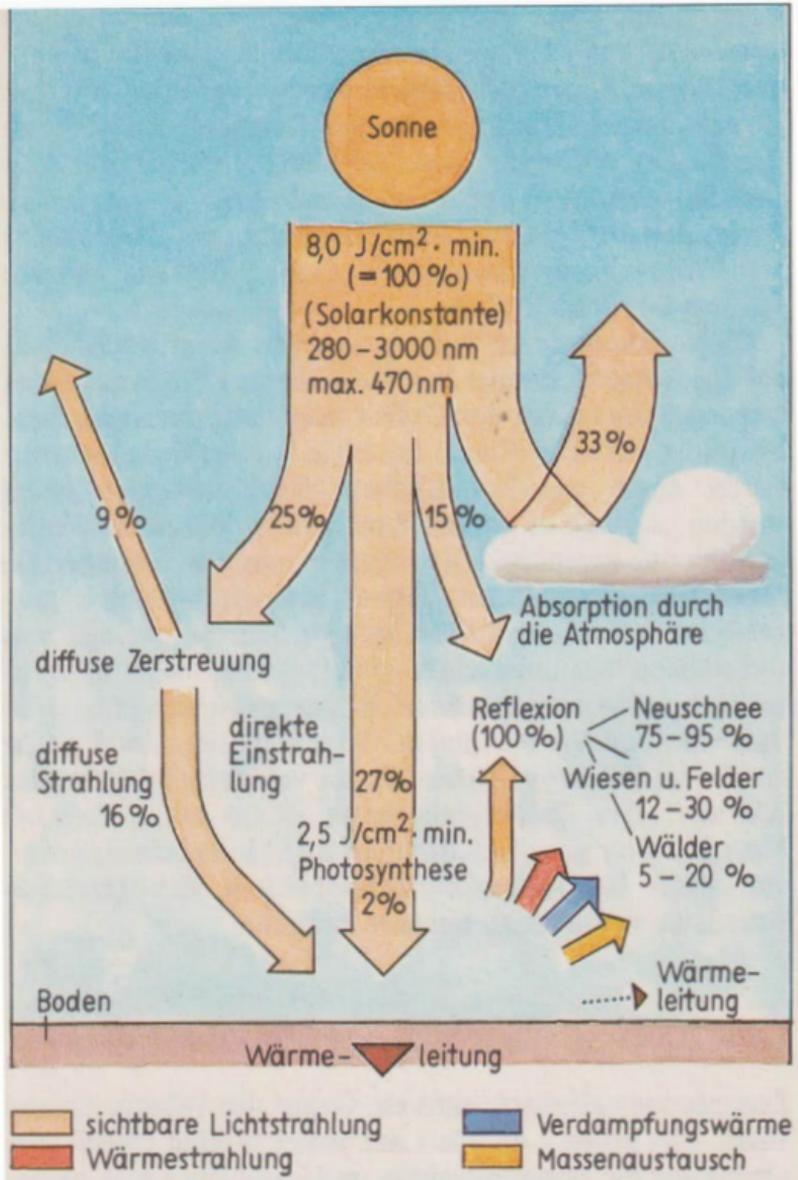
Um sich einen Begriff vom Umfang der gegenwärtig ablaufenden photosynthetischen Prozesse auf der Erde zu machen, sollen folgende Zahlen angeführt werden.

Die Wasserpflanzen bauen jährlich 20 bis 155 Milliarden Tonnen Kohlenstoff aus Kohlendioxid in organische Substanzen ein. Die Landpflanzen verwerten im gleichen Zeitraum 16 bis 24 Milliarden Tonnen. Davon werden durch den Menschen jährlich etwa 3,4 Milliarden Tonnen genutzt.

Die Ressourcen, die auf diesem Gebiet zur Verfügung stehen, sind groß. Es kommt darauf an, sie effektiv zu verwerten. Nicht zu übersehen ist, daß wir heute trotz der hohen Photosyntheserate und des relativ geringen Verbrauches von den Reserven zehren, die sich in den letzten 800 Millionen Jahren auf der Erde angehäuft haben. Nach wie vor bilden die fossilen Brennstoffe wie Braun- und

Kreislauf des Kohlendioxids in der Natur





Die Verwertung der Sonnenlichtstrahlung auf der Erde

Steinkohle, Erdöl und Erdgas die Hauptgrundlage für die Energiewirtschaft. Wasser- und Kernenergie spielen ungeachtet der steigenden Tendenz im Weltmaßstab immer noch eine untergeordnete Rolle.

Von der Größe des Brennstoffumsatzes erhält man eine

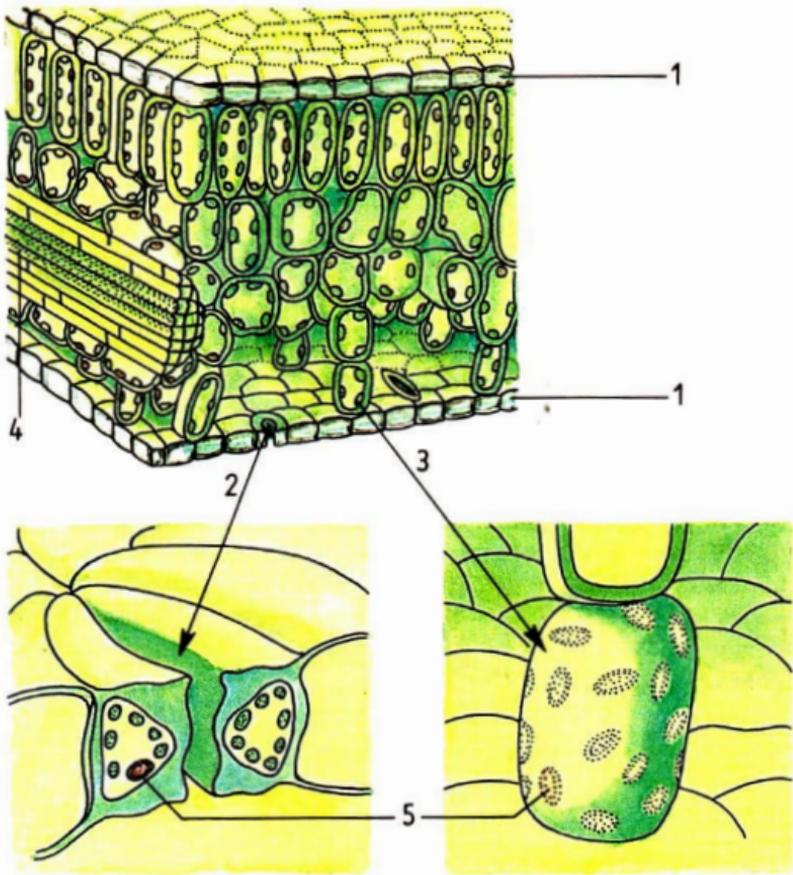
Vorstellung, wenn man sich verdeutlicht, daß durch die Photosynthese im Verlaufe eines Jahres etwa 100 Milliarden Tonnen Sauerstoff gebildet werden, daß aber trotzdem gegenwärtig ein jährliches Sauerstoffdefizit von 10 Milliarden Tonnen entsteht. Diese Zahl mag zunächst erschrecken. Sie wird aber sofort weniger bedrohlich, wenn man bedenkt, daß der Gesamtsauerstoffgehalt in der Atmosphäre eine Trillion Tonnen beträgt; er ist also 100 000mal so hoch wie das jährliche Defizit.

Diese Erkenntnisse fordern aber mit allem Nachdruck, daß bei fortschreitender Industrialisierung Wege gefunden werden müssen, um das Defizit langfristig auszugleichen. Soviel ist klar: Das Energieproblem auf der Erde kann nur durch einen gesellschaftlichen Strukturwandel gelöst werden. Solange es auf der Welt, bedingt durch die Wolfsgesetze der kapitalistischen Ausbeutung, noch hungernde Menschen gibt, Bodenschätze sinn- und planlos ausgebeutet werden und die Ökologie bei der Anlage von Industriebauten unbeachtet bleibt, solange wird es nicht gelingen, eine ausgeglichene Bilanz zwischen Photosyntheserate und Verwertung der fixierten Sonnenenergie zu erreichen. Die angeführten Zahlen verdeutlichen mit aller Klarheit: Die Photosyntheserate ist so hoch, daß bei Nutzung aller gesellschaftlichen und biologischen Reserven auch bei weiter fortschreitendem Bevölkerungswachstum niemand zu hungern brauchte.

Das Blatt – Hauptort der Photosynthese

Das photosynthetisch aktivste Organ der Pflanze ist das Blatt. Das grüne Laubblatt mit seiner großen Oberfläche absorbiert die Sonnenstrahlen und leitet das Licht zu den photosynthetisch aktiven Zellorganellen. Es besitzt alle Strukturen und Enzymsysteme, die zur Photosynthese notwendig sind, in ausreichender Menge. Die Blätter der meisten Pflanzen werden jährlich neu gebildet. Sie sind frisch, wenig verholzt und dadurch besonders lichtdurchlässig.

Photosynthetische Prozesse laufen aber auch in anderen Pflanzenteilen ab. Die Sproßachsen der Luzerne sind z. B.



Aufbau eines Pflanzenblattes. 1 – obere und untere begrenzen-
 Zellschichten; 2 – Spaltöffnung mit durchgeschnittenen Schließ-
 zellen; 3 – Zelle des Blattinnern; 4 – Leitgefäße; 5 – Chloroplasten

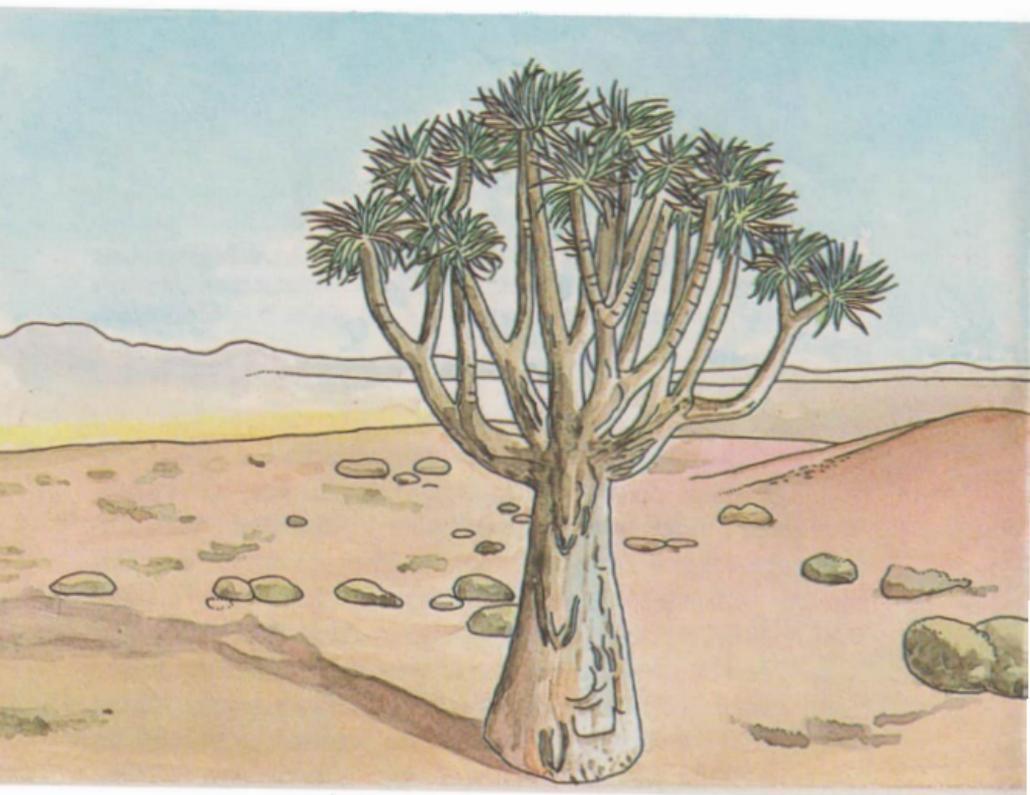
an der Photosynthese der Gesamtpflanze zu etwa 5% beteiligt. Der chlorophyllhaltige Stamm von *Cercidium floridum*, einem über viele Monate blätterlosen Wüstenbaum, beteiligt sich zu 40% an der Photosynthese der Gesamtpflanze, und seine in Entwicklung begriffenen Früchte sind ebenfalls photosynthetisch aktiv. Gerste bildet bis zu 50%, Weizen bis zu 45% der in den Körnern enthaltenen Substanzen in den photosynthetisch aktiven Ähren. Die in den Blättern gebildeten Substanzen werden entweder an Ort und Stelle weiterverarbeitet oder aber in den Stamm,

die Wurzeln oder die Früchte abtransportiert, dort umgebaut und abgelagert.

Das Blatt besitzt Hilfseinrichtungen, die die Photosynthese wirkungsvoll unterstützen. Im Innern des Blattes befindliche photosynthetisch aktive Zellen werden von lufthaltigen Hohlräumen umgeben. Über Spaltöffnungen auf der Unterseite des Blattes können sie mit Frischluft versorgt werden und den gebildeten Sauerstoff an die Umgebung abgeben.

Die Spaltöffnungen werden von Schließzellen umgeben, die über einen Regelmechanismus den Gasaustausch steuern. In der Nacht und bei Wassermangel sind sie geschlossen, am Tage öffnen sie sich durch Veränderungen

Südafrikanische Zwergstrauchwüste mit baumförmiger Aloe (Aloe pillansii). Die Aloe besitzt ähnlich wie die Kakteen der amerikanischen Somorrawüste ausgeprägte Wasserspeichermechanismen.

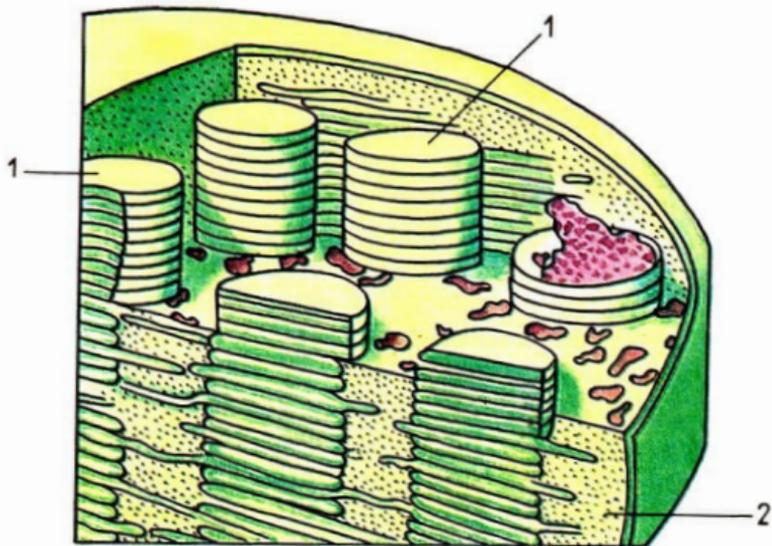


ihrer Struktur, und sie fördern somit den Gasaustausch. Werden die Spaltöffnungen bei Wassermangel geschlossen, so bremsen sie die Wasserabgabe der Pflanzen. Sie haben also in diesem Falle wassersparende Funktionen zu erfüllen. Gleichzeitig verringern sie aber die Photosyntheserate, weil sie den Kohlendioxidtransport zu den Zellen einschränken.

Einen besonderen Wassersparmechanismus findet man bei Pflanzen, die vorwiegend in wasserarmen Steppengebieten mit hohen Umgebungstemperaturen wachsen. Sie schließen die Spaltöffnungen am Tage und öffnen sie nachts. Im Dunkeln läuft zwar keine Photosynthese ab, die Pflanzen nehmen aber durch die geöffneten Spalte Kohlendioxid auf und lagern es an eine Eiweißverbindung im Zellinnern an. Das Kohlendioxid wird am Tage bei einsetzender Sonnenstrahlung frei und kann zur Photosynthese verwendet werden.

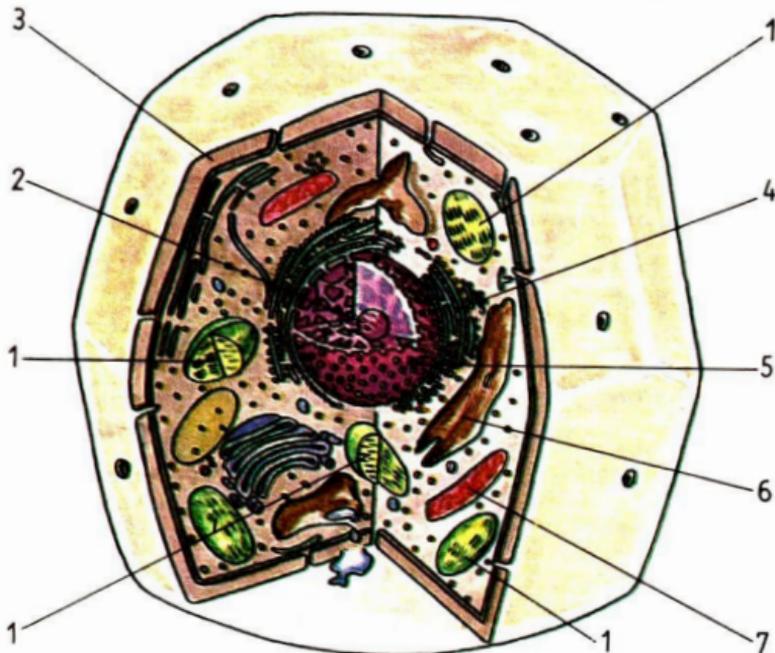
Die Prozesse der Photosynthese laufen in den Chloroplasten ab. Das sind längliche Körper im Zellplasma. Sie haben einen Durchmesser von 5 Mikrometern und bestehen aus einer doppelt strukturierten Membran. Im Innern des Chloroplasten bilden zahlreiche Septen, die durch Einstülpung der inneren Schicht der Doppelmembran entstanden sind, ein stark gekammertes System. Dabei entstehen blasenähnliche zusammengedrückte Gebilde, die als Thylakoide bezeichnet werden. Unter dem Elektronenmikroskop haben sie eine geldrollenförmige Gestalt. An der Innenfläche der Thylakoide sind das Chlorophyll und alle Enzymsysteme lokalisiert, die an der Photosynthese beteiligt sind. Auch in der farblosen Grundsubstanz der Chloroplasten, dem Stroma, sind die Enzymsysteme vorhanden.

Die Chloroplasten verdoppeln sich während der Zellteilung. Dadurch besitzen beide Tochterzellen, die aus einer geteilten Mutterzelle entstehen, die gleiche Chloroplastenanzahl. Interessant ist, daß im Chloroplasten die Träger der Erbsubstanz, die Desoxyribonukleinsäure (DNS), in relativ hoher Konzentration vorliegt. Der genetische Informationsgehalt ist so groß, daß durch die in einem Chloroplasten vorhandene DNS 1 400 Polypeptidketten kodiert werden können. Außerhalb des Zellkerns kommt DNS



Geöffneter Chloroplast. 1 – geldrollenförmige Thylakoide; 2 – doppelte Außenmembran (nach oben entfernt, so daß die innere Struktur erkennbar ist)

Lage der Chloroplasten in einer Pflanzenzelle. 1 – Chloroplast; 2 – Nukleolus; 3 – Zellmembran; 4 – endoplasmatisches Retikulum mit Ribosomen; 5 – Zellkern; 6 – Vakuole; 7 – Mitochondrium



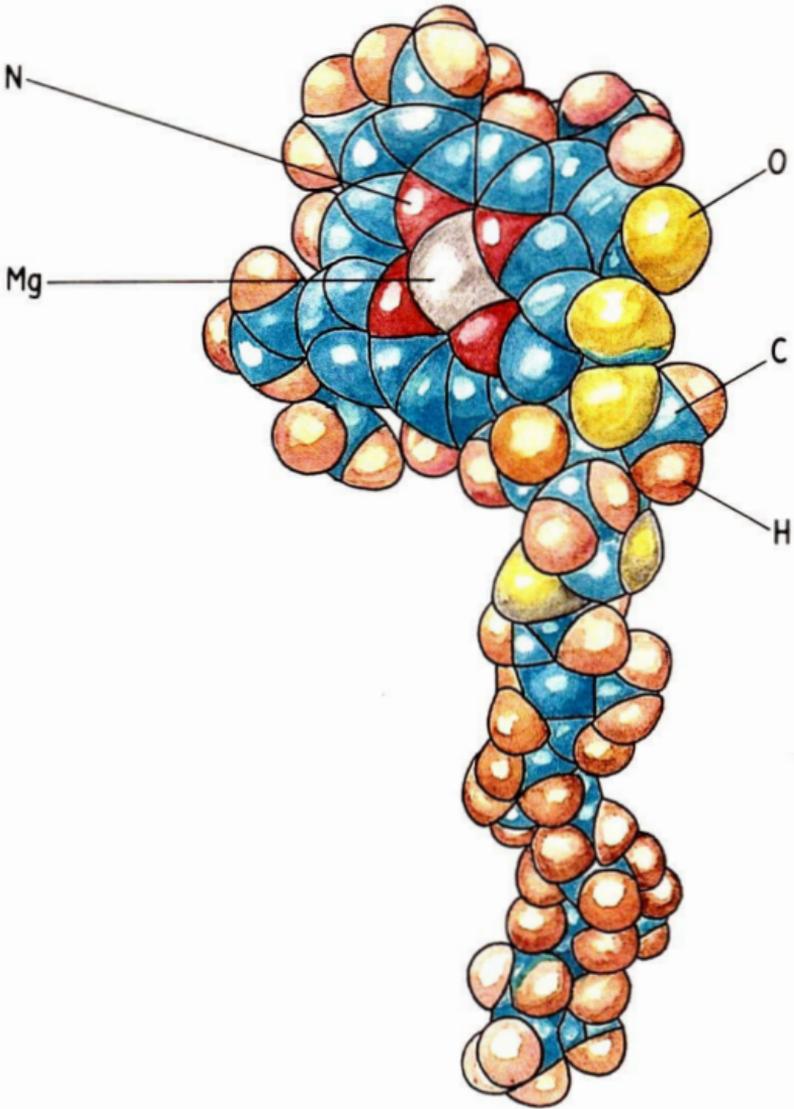
lediglich in noch zwei anderen Zellorganellen, den Mitochondrien und den Plasmiden, vor.

Eine Theorie über die Entstehung der Chloroplasten erklärt das Vorkommen von DNS in diesen Zellorganellen. Es wird angenommen, daß sich die Chloroplasten vor der Entstehung der eigentlichen Pflanzen aus im Mittelkambrium lebenden Blaualgen entwickelt haben, später mit den entstehenden Pflanzen eine Symbiose eingegangen sind und schließlich Bestandteile der Pflanzen wurden. Eine Reihe von Beobachtungen unterstützt diese Theorie. Bestimmte Kryptomonadales enthalten einen blaugrünen Symbionten, der bereits seine Zellwand verloren hat, sich parallel mit der Wirtszelle teilt und DNS enthält, die sich in ihrer Zusammensetzung nicht von der freilebender Arten unterscheidet. Im Laborversuch ist es sogar gelungen, eine funktionstüchtige Symbiose zwischen Chloroplasten von Spinatzellen und Bindegewebszellen von Mäusen herzustellen. Die Mäusezellen vermehrten sich über mehrere Zellgenerationen mit den in ihnen enthaltenen Chloroplasten und waren zur Photosynthese fähig. Vermutlich haben Tier- und Pflanzenzellen mehr Gemeinsamkeiten, als man gemeinhin annimmt.

Ablauf der Photosynthese

Die Photosynthese ist dadurch gekennzeichnet, daß ein Teil der Strahlungsenergie, die im sichtbaren Licht enthalten ist, in den Pflanzen in chemische Energie umgewandelt wird. Sie wird verwendet, um hochmolekulare Verbindungen aufzubauen, die die Energiegrundlage für den weiteren Stoffwechsel der Pflanzen sowie der Tiere und des Menschen darstellen.

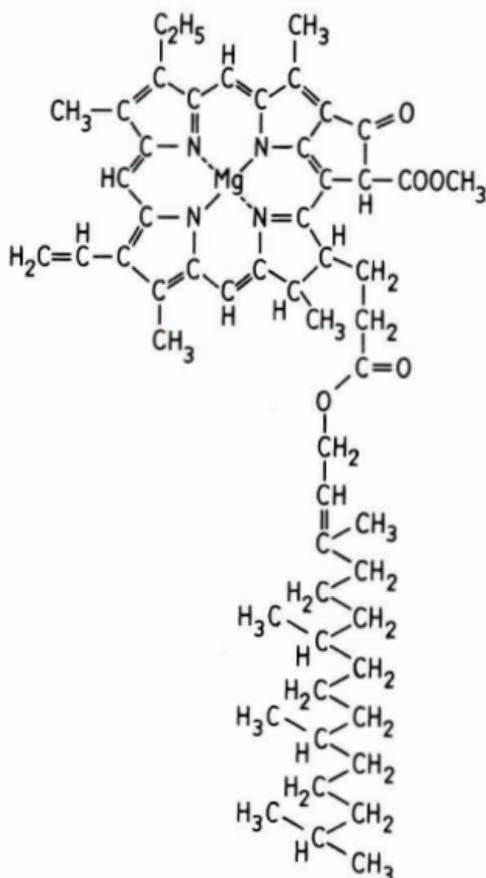
Die im Chloroplasten lokalisierten Farbstoffe resorbieren die einfallenden Lichtquanten. Jeder Farbstoff besitzt ein spezifisches Absorptionsspektrum. Das Absorptionsmaximum des Chlorophylls liegt bei einer Wellenlänge von 460 bis 680 nm. Lichtquanten in diesem Wellenlängenbereich werden besonders intensiv absorbiert. Es ist verständlich, daß blaues und rotes Licht daher am stärksten photosynthetisch wirksam sind.



Die einfallenden Lichtquanten werden entweder direkt vom aktiven Chlorophyll oder von anderen Chlorophyllformen bzw. von sogenannten Hilfspigmenten, die sich ebenfalls im Chloroplasten befinden, absorbiert. Die Hilfspigmente und die nichtaktiven Chlorophyllformen leiten die aufgenommene Energie zum aktiven Chlorophyll weiter. Die Energieleitung ist mit einem Energieverlust verbunden, Wärmeenergie wird frei.

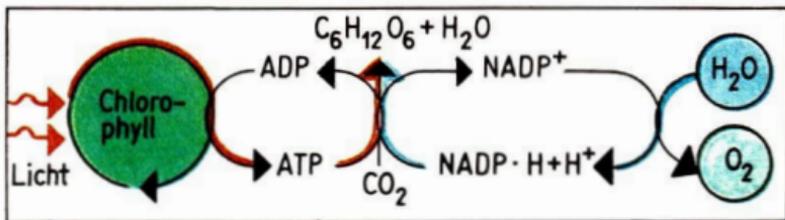
Durch die aufgenommene Strahlungsenergie wird das

*Formel und Modell
des Chlorophylls*



Chlorophyll aktiviert. Chlorophyll ist eine organische Verbindung mit zahlreichen Doppelbindungen. Diese Doppelbindungen sind dadurch gekennzeichnet, daß ihre Atome auf äußeren Schalen – wir sprechen von den pi-Schalen – von Elektronen, den pi-Elektronen, umkreist werden. Sie tragen zur chemischen Stabilisierung des Moleküls bei, indem sie gleichzeitig zwei oder mehrere Atomkerne umkreisen. Pi-Elektronen sind also nicht einem, sondern mehreren Atomkernen zugeordnet. Wird ein pi-Elektron von einem Lichtquant, einem Photon, getroffen, so wird es auf eine kernfernere Bahn gehoben; das Chlorophyll geht aus dem Grundzustand in den Anregungszustand über.

Das angeregte Chlorophyllmolekül gibt die aufgenommene Energie auf drei verschiedenen Wegen ab. Ein Teil



Schema der Photosynthese

wird als rotes Fluoreszenzlicht abgestrahlt, ein weiterer Teil wird in Wärmeenergie umgewandelt, der größte Teil aber wird in chemische Energie umgeformt.

Bei der Bildung der chemischen Energie laufen folgende, stark vereinfacht dargestellte Prozesse ab.

Nach der Energiezufuhr nimmt das Chlorophyllmolekül von einem Elektronenspender, wahrscheinlich einer Manganverbindung, zwei Elektronen auf und wird dadurch in den angeregten Zustand übergeführt. Die nun im Chlorophyllmolekül gespeicherte Energie wird schrittweise abgegeben, indem die aufgenommenen Elektronen auf andere Verbindungen übertragen werden und dabei einen Teil ihrer Energie verlieren. So wandern die Elektronen vom aktivierten Chlorophyll, das ein Absorptionsmaximum bei 682 nm hat, über den Farbstoff Cytochrom f zum Chlorophyll P₇₀₀. Vorher aber wird ein Teil der Energie genutzt, um die energiereiche Verbindung Adenosintri-phosphat (ATP) aufzubauen. Damit ist bereits ein Teil der Strahlungsenergie in chemische Energie umgewandelt worden. Nachdem das Chlorophyll P₇₀₀ die inzwischen energiearmen Elektronen übernommen hat, wird es erneut durch Aufnahme von Lichtenergie angeregt. Über verschiedene Zwischenstufen werden die Elektronen schließlich auf die Verbindung Nikotinsäureamid-Adenin-Dinukleotid-Phosphat (NADP) übertragen. Dadurch wird NADP in die Lage versetzt, Wasserstoffionen zu binden – es entsteht NADP-H₂, eine äußerst energiereiche Verbindung.

Mit der Entstehung des NADP-H₂ sind die Reaktionen in den Chloroplasten, die durch die Lichteinwirkung ausgelöst wurden, abgeschlossen. Alle folgenden chemischen

Umsetzungen laufen im Dunkeln ab, denn sie werden durch die entstandenen energiereichen Verbindungen ATP und NADP-H₂ stimuliert. Die chemische Energie dieser Verbindungen wird verwendet, um über vielfältige chemische Reaktionswege alle organischen Substanzen zu synthetisieren, die in den Pflanzen vorhanden sind. Der Aufbau der Substanzen beginnt bereits in den Chloroplasten. ATP und NADP-H₂ werden aber auch in das Zellplasma abgegeben und zum Zellkern transportiert, sie leiten hier ebenfalls chemische Reaktionen ein.

Was beeinflusst die Photosynthese?

Der die Photosynthese zweifellos am stärksten beeinflussende Umweltfaktor ist das *Licht*.

Nur ein Teil der zur Erde gestrahlten Sonnenenergie wird zur Photosynthese genutzt. Die Erde erhält im Jahr $6,3 \cdot 10^{20}$ kcal ($2,6 \cdot 10^{21}$ kJ) Strahlungsenergie von der Sonne. Davon werden lediglich $1,5 \cdot 10^{17}$ kcal ($6,2 \cdot 10^{17}$ kJ) photosynthetisch gebunden. Im Mittel werden nur 2% der gesamten Strahlungsenergie für die Photosynthese verwendet. Allerdings bestehen erhebliche artspezifische Unterschiede im Ausnutzungsgrad. Mais verwertet z. B. die Lichtenergie bis zu 5%. Unter Schwachlichtbedingungen wandeln verschiedene Algenarten sogar 20 bis 24% der aufgenommenen Strahlungsenergie in chemische Energie um.

Für die Genetiker im Pflanzenbau kommt es in Zukunft darauf an, Arten zu züchten, die die Lichtenergie in besonders hohem Maße ausnutzen können und bei denen gleichzeitig ein besonders großer Teil der gespeicherten Energie in die Ernteprodukte eingelagert wird. Gegenwärtig entfallen im Mittel 25% der gesamten gespeicherten Energie auf die Ernteprodukte. Es ist also eine lohnende Aufgabe, Pflanzen zu züchten, die ein Maximum von verwertbarer organischer Substanz bilden.

Bei allen Pflanzen erhöht sich die Photosyntheseintensität mit steigender Beleuchtungsstärke zunächst kontinuierlich. Wird das Beleuchtungsoptimum – es wird auch als Lichtsättigung bezeichnet – überschritten, so treten

Schädigungen des photosynthetischen Apparates in den Chloroplasten auf. Die Photosyntheseleistungen verringern sich. Das Lichtoptimum liegt bei den meisten Pflanzen unserer Breiten bei 20 000 Lux, Schattenpflanzen benötigen Beleuchtungsstärken von 2 000 bis 4 000 Lux.

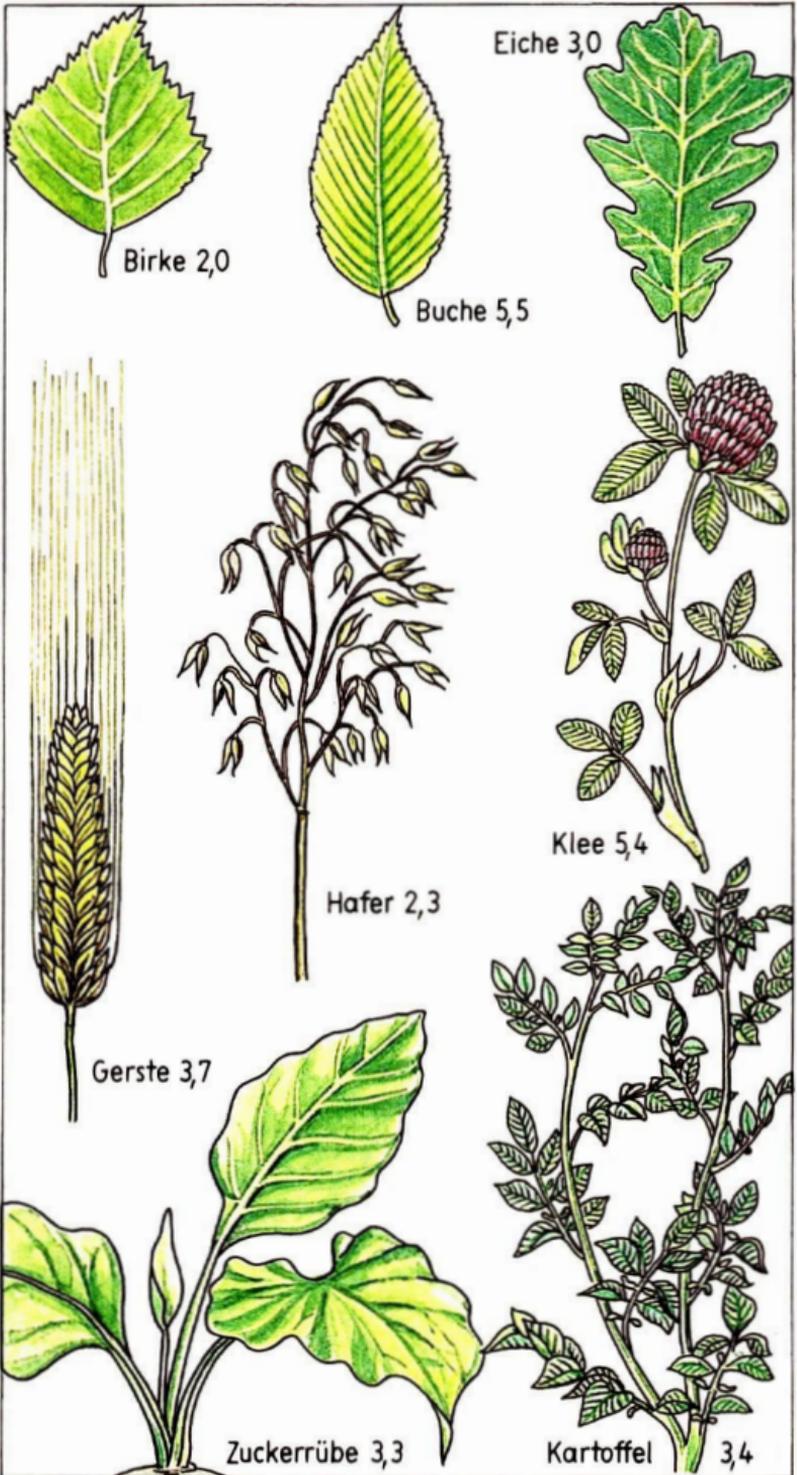
Für die Pflanzenproduktion ist ein weiterer Kennwert der Photosynthese von Bedeutung – der Kompensationspunkt.

Neben den synthetischen Vorgängen laufen in den Pflanzen ständig abbauende bzw. dissimilatorische Vorgänge ab. Darunter sind Prozesse zu verstehen, die zu einem Abbau der gebildeten organischen Substanzen führen. Bei einem bestimmten Beleuchtungsgrad – dem Kompensationspunkt – halten sich die aufbauenden – die assimilatorischen – und die abbauenden – die dissimilatorischen – Prozesse die Waage. Sinkt die Beleuchtungsstärke unter diesen Punkt ab, so beginnt die Pflanze, von ihren Reserven zu zehren. Erst oberhalb des Kompensationspunktes wird Substanz zusätzlich gebildet, und erst unter diesen Bedingungen ist überhaupt eine Pflanzenproduktion möglich.

In der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion ist weniger die Einzelpflanze als vielmehr der Pflanzenbestand von Interesse. Er verhält sich photosynthetisch anders als eine Einzelpflanze, da sich in einem Pflanzenbestand ein typisches Mikroklima herausbildet. Die unteren Blätter einer Pflanze erhalten z. B. weniger Licht als die oberen, und sie werden gewöhnlich von einer Atmosphäre umgeben, die mehr Wasserdampf und Kohlendioxid als die oberen Luftschichten enthält. Es kommt in der industriemäßigen Pflanzenproduktion darauf an, die Dichte des Pflanzenbestandes so zu wählen, daß eine optimale Photosynthese ablaufen kann.

Die Dichte des Pflanzenbestandes ist dann optimal, wenn das Gesamtprodukt am größten ist. Als Maß für die optimale Dichte dient der Blattindex. Er gibt das Verhältnis von Quadratmeter Blattoberfläche zu Quadratmeter Bodenoberfläche bei einer optimalen Zuwachsrates der Pflanze.

Blattindizes für verschiedene Pflanzenbestände



zen an. Ein Blattindex von 3,4 für Kartoffeln bedeutet z. B., daß die Kartoffelproduktion bei $3,4\text{m}^2$ Blattfläche je Quadratmeter Bodenoberfläche optimal ist.

Bei Lichteinwirkung wird ein Teil der in den Pflanzen synthetisierten organischen Substanzen wieder abgebaut. Diesen Vorgang bezeichnet man als Lichtatmung. Dabei werden insbesondere frühe Produkte der photosynthetischen Kohlendioxid-Assimilation verarbeitet.

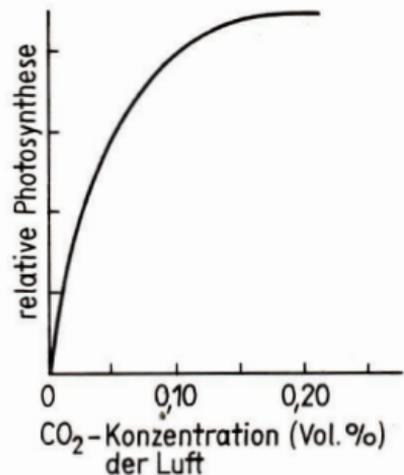
Die Effektivität der Photosynthese wird in entscheidendem Maße durch die Höhe der Lichtatmung bestimmt. Gelingt es, die Lichtatmung genetisch oder durch biologische Einflußnahme zu verringern, so steigt die Nettoproduktion der Photosynthese erheblich an.

Nicht alle Pflanzen weisen eine Lichtatmung auf. Sie ist bei den Kulturpflanzen vor allem beim Weizen am deutlichsten ausgeprägt und auch bei der Zuckerrübe und beim Tabak vorhanden. Mais und Zuckerrohr besitzen keine oder nur eine verschwindend geringe Lichtatmung.

Sowohl die Photosynthese als auch die Lichtatmung werden von der *Umgebungstemperatur* beeinflußt. Sie ist ein weiterer wichtiger Einflußfaktor. Mit steigender Umgebungstemperatur steigt die Brutto-Photosyntheseleistung der Pflanzen an; gleichzeitig aber wird noch stärker als diese die Lichtatmung erhöht, so daß die Nettoproduktion der Pflanzen absinkt.

Der Temperaturbereich zwischen 10 und 25°C beeinflußt die Nettoproduktion vieler Kulturpflanzen nur unwesentlich. Bei Temperaturen um 40°C ist ein Stoffgewinn kaum noch möglich, weil die Prozesse der Lichtatmung gegenüber den photosynthetischen Vorgängen überwiegen. Die untere Grenze, bei der Blattpflanzen noch eine Nettoassimilation aufweisen, liegt bei 0°C . Bei wintergrünen Pflanzen wie den Nadelgehölzen ist eine Assimilation auch noch bei Temperaturen um minus 7°C möglich. Weitere Faktoren, die die Photosynthese beeinflussen, sind der Kohlendioxid- und Sauerstoffgehalt der Luft.

Sinkt der *Kohlendioxidgehalt* (CO_2) der Luft unter einen Wert von 0,03 Vol.-% ab, so wird die Photosynthese eingestellt. Höhere CO_2 -Werte fördern die Photosynthese. Gegenwärtig wird in der Welt durch Verbrennungsvorgänge mehr CO_2 freigesetzt, als durch die Pflanzen wieder



Einfluß der Kohlendioxidkonzentration der Luft auf die Photosynthese bei optimaler Beleuchtung

assimiliert werden kann. Dadurch erhöht sich der CO₂-Gehalt der Atmosphäre jährlich um 0,7 Promille der gegenwärtig vorhandenen Konzentration. Die Steigerung führt in 100 Jahren zu einer Erhöhung der Assimilationsrate um 10 bis 20 %.

Durch künstliche Erhöhung der CO₂-Konzentration in der die Pflanzen umgebenden Luft kann die Produktivität der Pflanzenproduktion gesteigert werden. Zahlreiche Untersuchungen, die allerdings noch nicht zu praxisreifen Ergebnissen geführt haben, wurden zur Frage der CO₂-Düngung angestellt. Dabei bringt man Substanzen, die langsam CO₂ absondern, wie z. B. Harnstoff, in oder auf den Boden. Bei entsprechendem Pflanzenwuchs steigt die CO₂-Konzentration der Luft in unmittelbarer Nachbarschaft der Pflanzen an, und die Photosyntheserate erhöht sich. Der Nachteil der bisher gewonnenen Ergebnisse besteht darin, daß nur ein geringer Teil des CO₂ verwertet und der größte Teil an die Gesamtatmosphäre abgegeben wird. Es ist aber durchaus möglich, in Gewächshausanlagen die CO₂-Konzentration in der Luft gezielt zu erhöhen und dadurch die Produktivität der Pflanzen zu steigern. Die so erreichten Erhöhungen in der Trockensubstanzproduktion beliefen sich immerhin auf Werte zwischen 40 und 120%. Die Produktionssteigerung

durch CO₂-Düngung in Maisbeständen betrug bis zu 45 %. Bei einer Konzentration von 0,1 bis 0,2 Vol.-% CO₂ in der Luft ist das Maximum der möglichen Produktionssteigerung erreicht. Eine weitere Erhöhung der CO₂-Konzentration steigert die Photosyntheserate nicht mehr.

Mit sinkendem *Sauerstoffgehalt* der Luft erhöht sich die Photosyntheserate. Das ist weniger auf eine direkte Förderung der Photosynthese als vielmehr auf eine Hemmung der Lichtatmung zurückzuführen. Bei gleichbleibender Photosynthese und absinkender Lichtatmung steigt folglich die *Nettoproduktion* an.

Nicht zuletzt ist es das *Wasser*, das die Produktivität der Pflanzen beeinflusst, und zwar über zwei Mechanismen.

Es wird einmal bei der Photosynthese benötigt, um die Elektronen und die Wasserstoffionen zu liefern, die für die Energieübertragung und für die Bildung der energiereichen Verbindung NADP-H₂ notwendig sind (s. S. 28). Außerdem entstammt der von den Pflanzen freigesetzte Sauerstoff dem Wasser.

Daneben ist eine erhebliche Wassermenge notwendig, um den Zellinnendruck in den Pflanzen – wir bezeichnen ihn als *Turgor* – konstant zu erhalten. Pflanzen besitzen im Gegensatz zu den Tieren nur ein mangelhaft ausgebildetes Stützgewebe. Blätter und Stengel behalten nur so lange ihre aufrechte Haltung bei, solange der Wasserdruck in den Zellen einen bestimmten Wert nicht unterschreitet. Pflanzen, die unter Wassermangel leiden, lassen die Blätter schlaff herabhängen, sie beginnen zu welken.

Die Spaltöffnungen der Blattunterseite werden bei Wassermangel geschlossen. Dadurch wird zwar die Verdunstungsrate herabgesetzt, gleichzeitig wird aber auch die CO₂-Aufnahme der Pflanzen aus der Umgebungsluft verhindert oder zumindest herabgesetzt. Die Pflanze stellt unter diesen Bedingungen die Photosynthese ein, da eine unabdingbare Voraussetzung der Photosynthese – die notwendige CO₂-Menge – nicht mehr zur Verfügung steht.

Eine richtige Wasserversorgung hilft, die Pflanzenproduktion wesentlich zu steigern.

Kann der Mensch die Photosynthese steuern?

Unser Wissen über die biologischen Einzelheiten der Photosynthese ist noch nicht so groß, daß wir in der Lage wären, planmäßig die einzelnen Prozeßabläufe zu steuern. Zum anderen fehlen uns gegenwärtig auch die technischen Voraussetzungen, um gezielte Eingriffe am Photosyntheseapparat der Pflanzen vornehmen zu können.

Unsere Kenntnisse vom Mechanismus der Photosynthese ermöglichen es jedoch, für die natürlich ablaufenden Photosyntheseprozesse optimale Bedingungen zu schaffen.

Durch die Nutzung photosynthetisch besonders aktiver Pflanzen, die außerdem nur eine geringe Lichtatmung haben, durch eine zweckmäßige Gestaltung der Umweltfaktoren, die in der Lage sind, die Photosyntheserate zu erhöhen – über einige dieser Faktoren ist auf den vorhergehenden Seiten berichtet worden – und durch die Neuzüchtung von hochproduktiven Pflanzen ist es möglich, das auf die Erde einfallende Licht besser als bisher zur chemischen Energiegewinnung zu nutzen. Es kommt darauf an, die mikroklimatischen Bedingungen an allen Standorten exakt zu analysieren und zu ermitteln, welche Pflanzen unter den gegebenen Bedingungen am besten gedeihen. Gleichzeitig muß überprüft werden, inwieweit sich die mikroklimatischen Bedingungen so verändern lassen, daß auch Pflanzen mit höherer Syntheserate gedeihen können.

Später wird man sicher soweit sein, die chemischen Vorgänge der Photosynthese zunächst im Reagenzglas und anschließend in großen Industrieanlagen nachzugestalten. Ob aber die Gewinnung von chemischer Energie für die Praxis der Nahrungsgüterwirtschaft bedeutungsvoll werden wird, ist letztlich ein energetisches und ein ökonomisches Problem, denn man müßte ja mit ökonomisch vertretbarem Aufwand Nährstoffe für den Menschen und für landwirtschaftliche Nutztiere unter Ausnutzung der Sonnenenergie ohne die Pflanzen als Zwischenstation schaffen. Aber selbst dann, wenn diese Frage positiv entschieden werden sollte – so hoffen wir jedenfalls –,

wird in bestimmtem Umfang Pflanzenproduktion weiter betrieben werden. Wer möchte schon auf einen Apfel, einen Pfirsich oder eine Banane zugunsten einer amorphen Substanz verzichten, die uns lediglich durch ihren Geruch und ihren Geschmack vorgaukelt, eine natürlich gewachsene und gereifte Frucht zu sein? Bis es uns aber gelingt, die Mechanismen der Photosynthese auch im Reagenzglas ablaufen zu lassen, wird noch eine gehörige Forschungs- und Entwicklungsarbeit zu leisten sein.

Licht dringt auch unter die Haut

Wir haben im vorigen Kapitel gesehen, daß die Reaktionen der Photosynthese direkt durch das Licht ausgelöst werden. Das Licht durchdringt die Zellmembranen der Pflanzenzellen und leitet an den Chloroplasten die entsprechenden Reaktionen ein.

Direkte Lichtwirkungen treten auch beim Menschen und bei den Tieren auf, spielen aber insgesamt eine geringere Rolle als die indirekten Wirkungen.

Das Licht löst dann eine indirekte Wirkung im Organismus aus, wenn es nicht am Wirkungsort angreift (vgl. auch S. 48). Zwischen der Lichtaufnahme und dem Reaktionsort ist das Nervensystem eingeschaltet. Durch das Licht werden spezifische Rezeptoren, die Photorezeptoren, erregt, die die aufgenommenen Informationen zum Gehirn weiterleiten. Dort werden sie verarbeitet und umgeschaltet. Das Ergebnis der zentralnervalen Informationsverarbeitung wird über absteigende Nervenbahnen zu den Organen weitergeleitet, an denen lichtspezifische Reaktionen auftreten.

Eine direkte Lichtwirkung liegt vor, wenn die Lichtquanten oder die elektromagnetischen Lichtwellen an bestimmten Organen, Zellen oder Zellorganellen eine Wirkung hervorrufen, ohne daß zwischen der Lichtaufnahme und dem Reaktionsort das Nervensystem eingeschaltet ist. Die Reaktion erfolgt unmittelbar am Einwirkungsort des Lichtes.

Obwohl die direkten Lichtwirkungen bei Mensch und Tier oft übersehen werden, haben sie doch für das Leben und die Gesundheit des Organismus in sehr vielen Fällen eine erhebliche Bedeutung.

Vitamin D – ein Hormon?

Jeder Säugling erhält in der DDR kurze Zeit nach der Geburt in der Säuglingsfürsorge Vitamin D₃. Seit langem ist bekannt, daß Vitamin D die Knochenbildung, insbesondere an den Extremitäten und am Brustkorb, beeinflußt. Bei Vitamin-D-Mangel tritt die Rachitis auf. Sie wurde bis vor wenigen Jahrzehnten als »Englische Krankheit« bezeichnet. Mit Beginn der Industrialisierung im 19. Jahrhundert hatte die Ausbeutung der Kinder in England extreme Formen angenommen. Die 14stündige tägliche Arbeit in staubigen und dunklen Fabrikhallen führte zusammen mit der mangelhaften Ernährung zu einem typischen Krankheitsbild. Bei den erkrankten Kindern fielen ein gewölbter Rücken, Auftreibungen an den Extremitäten und an den Rippenenden sowie X- und O-Beine auf.

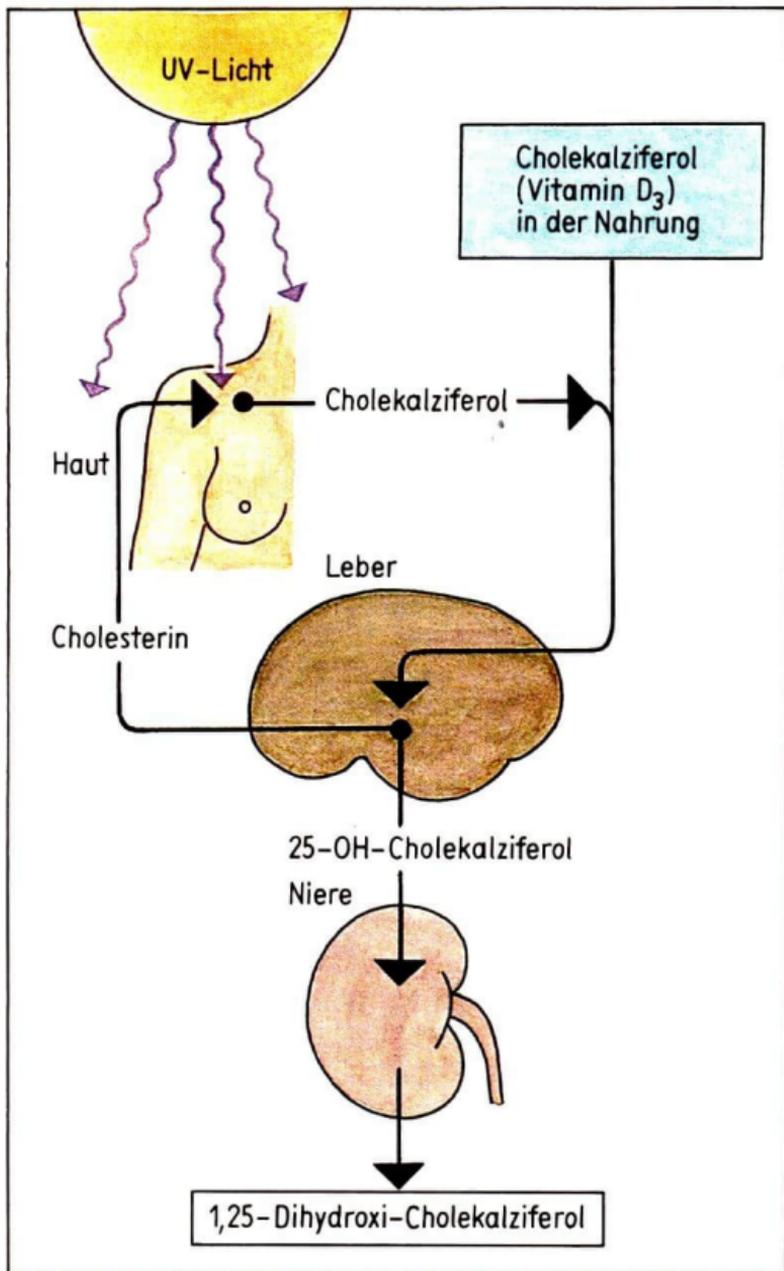
Übrigens: Die Rachitis kam nicht nur in England vor. Heinrich Zille hat auf den Hinterhöfen Berlins oft rachitische Kinder beobachtet und sie in seinen gesellschaftskritischen Zeichnungen dargestellt.

Ein täglicher Aufenthalt in Licht und frischer Luft verhinderte in jedem Fall die Rachitis, auch dann, wenn Vitamin D in der Nahrung fehlte.

Zunächst erschien es wenig glaubhaft, daß ein Vitamin entweder mit der Nahrung aufgenommen werden kann oder aber durch Lichteinwirkung im Organismus gebildet wird. Eine solche Substanz erfüllt nicht die Anforderungen, die seit der Prägung des Begriffes Vitamin durch Kasimir Funk im Jahre 1912 an ein Vitamin zu stellen sind: Vitamine sind Wirkstoffe, die außerhalb des Organismus gebildet werden und dem Organismus daher mit der Nahrung zugeführt werden müssen.

Manches war im Vitamin-D-Stoffwechsel bis vor wenigen Jahren unklar. Erst Ende der sechziger Jahre wurde begonnen, intensiv und unvoreingenommen auf diesem Gebiet zu forschen. Nachdem alte, ausgetretene Bahnen verlassen worden waren, konnte der Vitamin-D-Stoffwechsel aufgeklärt werden.

Das in der Nahrung enthaltene Vitamin D ist biologisch unwirksam. In den Nieren der Säugetiere und des Men-



Bildung des D-Hormons im menschlichen und tierischen Organismus

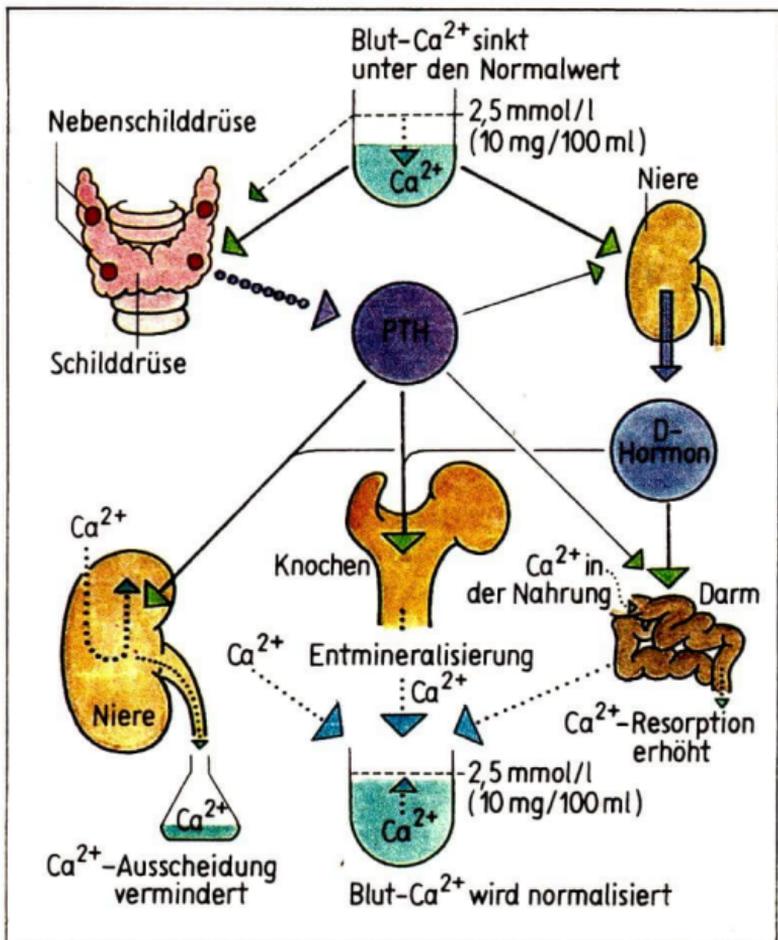
schen wird es in die Wirkform, das 1,25-Dihydroxycholekalziferol – wir wollen es als Dihydro-Vitamin D bezeichnen –, umgewandelt. Die Vorstufen dieser Verbindung entstehen in den Zellen der Epidermis, der obersten Hautschicht, bei Lichteinwirkung aus dem Cholesterin. Cholesterin ist im Zellstoffwechsel in einem solchen Maße verbreitet, daß es ständig in ausreichenden Mengen für die Vitaminsynthese zur Verfügung gestellt werden kann. Bereits 15 Minuten Sonneneinstrahlung genügen, um die notwendigen Vitamin-D-Mengen zu synthetisieren. Infolge der durch Luftverschmutzung verringerten Sonneneinstrahlung in industriellen Ballungsgebieten müssen Stadtbewohner stets Vitamin D mit der Nahrung aufnehmen.

Nachdem die Dihydro-Vitamin-D-Vorstufen im Magen-Darm-Kanal resorbiert oder in der Haut gebildet worden sind, werden sie mit dem Blutstrom zur Leber transportiert und in 25-Hydroxycholekalziferol umgewandelt. Diese Verbindung wird weiter zur Niere transportiert. Unter Einwirkung des Parathormons, eines Hormons, das in den Nebenschilddrüsen gebildet wird, entsteht endlich das Dihydro-Vitamin D, das in den Blutstrom abgegeben wird.

Die Nebenschilddrüsen produzieren das Parathormon, wenn der Kalziumspiegel im Blut absinkt. Die Reaktionskette, die zur Ausschüttung des Dihydro-Vitamins führt, verläuft über folgende Schritte: Abfall des Kalziumspiegels im Blut – Aktivierung der Nebenschilddrüsen – Ausschüttung des Parathormons – Bildung des 1,25-Dihydroxycholekalziferols – Abgabe des 1,25-Dihydroxycholekalziferols in das Blut.

Dihydro-Vitamin D fördert die Kalziumbereitstellung im Blut. Es erhöht die Kalziumresorption in der Darmschleimhaut, steigert die Kalziumrückresorption in den Nierentubuli und baut die kalziumhaltige Knochensubstanz ab. Kybernetisch betrachtet, fungiert das Dihydro-Vitamin D als Stellglied im Regelkreis »Kalziumkonzentration im Blut«. An der Verknöcherung des Skelettsystems wirkt es nur indirekt mit – es sichert die Kalziumbereitstellung für die Bildung der Knochensubstanz.

Dihydro-Vitamin D erfüllt alle Anforderungen, die an ein Hormon zu stellen sind. Es ist biologisch hochaktiv, wird



Regelung des Kalziumspiegels im Blut bei absinkender Kalziumkonzentration im Blutplasma

im Organismus gebildet, bei Bedarf an das Blut abgegeben, mit dem Blutkreislauf transportiert und wirkt schließlich an einer vom Bildungsort räumlich getrennten Stelle des Organismus. Daß ein Teil der Stoffwechselprozesse, die vom Cholesterin zum Vitamin D führen, durch äußere Einflüsse – eben durch die Lichtwellen – stimuliert werden muß, ist keine außergewöhnliche biologische Erscheinung. So wird beispielsweise das Schilddrüsenhormon – das Thyroxin – nur gebildet, wenn mit der Nahrung genügend Jod aufgenommen wird, und niemand denkt daran, den Hormoncharakter des Thyroxins anzuzweifeln.

Altes, eingefahrenes Gedankengut ist zählebig, und es dauert oft Jahre, bis biologische Erkenntnisse aus der Vergangenheit, die sich als falsch erwiesen haben, revidiert werden und bis diese Revision in das Allgemeinwissen eingegangen ist.

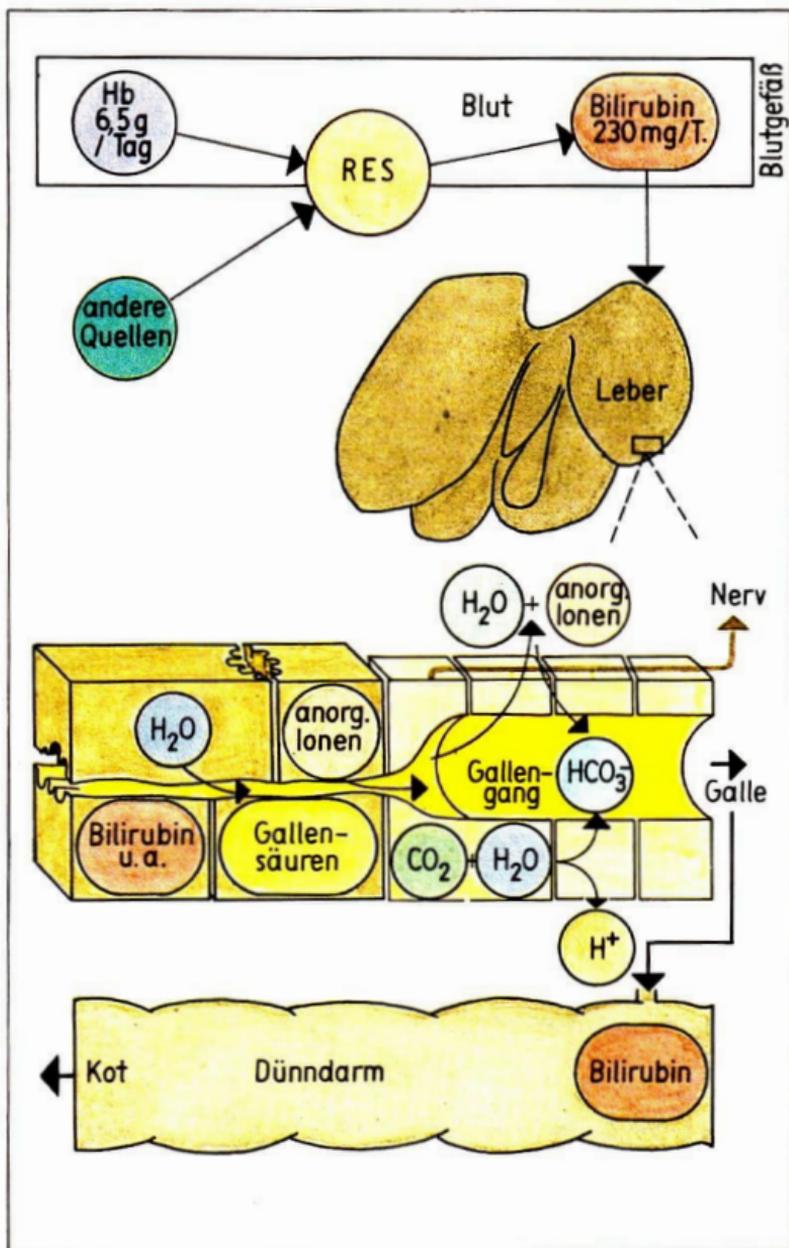
Gelbsucht durch Licht heilen?

Gelbsucht entsteht, wenn das beim Abbau der roten Blutkörperchen in den Zellen des retikulo-endothelialen Systems (RES) gebildete Bilirubin nicht in ausreichendem Maße über die Leberzellen und die Gallenflüssigkeit in den Dünndarm abgesondert werden kann, sondern im Organismus, insbesondere in der Haut und Schleimhaut, abgelagert wird. In den Leberzellen wird Bilirubin an Glukuronsäure gebunden und als sogenannte konjugierte Verbindung ausgeschieden.

Die Ursachen der Gelbsucht sind vielfältig und lassen sich in drei Gruppen einteilen. Gelbsucht kann entstehen, wenn a) der Abbau der roten Blutkörperchen so schnell und in so großen Mengen erfolgt, daß das entstehende Bilirubin nicht vollständig über die Leber mit der Galle ausgeschieden werden kann, wenn b) die Gallengänge der Leber blockiert sind, so daß die Galle nicht in den Dünndarm abgegeben werden kann und ein Teil des Bilirubins wieder von den Leberzellen rückresorbiert und in das Blut abgesondert wird und wenn c) Leberschädigungen vorliegen, die eine vollständige Konjugierung und damit Ausscheidung des Bilirubins verhindern.

Beim neugeborenen Säugling entsteht eine starke Gelbsucht, wenn der Abbau der roten Blutkörperchen durch Unverträglichkeitserscheinungen beschleunigt wird und gleichzeitig die Leberfunktionen noch nicht so entwickelt sind, daß sie die vollständige Ausscheidung des Bilirubins gewährleisten.

Die Unverträglichkeitserscheinungen treten auf, wenn das Neugeborene im Blut den Rhesusfaktor besitzt (rh-positiv), er aber bei der Mutter fehlt (rh-negativ). Das Bilirubin fällt durch den beschleunigten Blutabbau in großen Mengen an. Es kann nicht vollständig von der



Die Bilirubinbildung in der Leber und Ausscheidung in den Darm.
Hb – Hämoglobin, roter Blutfarbstoff; RES – retikulo-endotheliales System

Leber verarbeitet – konjugiert – werden, wird daher nicht mit der Galle ausgeschieden, sondern reichert sich in Organen mit hohem Fettgehalt an. Im Gehirn ist die Bilirubinkonzentration besonders hoch. Das Bilirubin wird beim Säugling im Körperinneren, dem Körperkern, abgelagert, und man bezeichnet infolgedessen diese Form der Gelbsucht als Kernikterus. Sie löst erhebliche Störungen im Allgemeinbefinden des Säuglings aus und zerstört im Gehirn Nervenzellen. Da Nervenzellen nicht neugebildet werden können, sind ohne sofortige Behandlung bei den Kindern auch im späteren Leben zentralnervale Minderleistungen zu erwarten.

Der Kernikterus des Säuglings wird durch Lichteinfall auf die gesamte Körperoberfläche in einem solchen Maße abgeschwächt, daß keine nervalen Störungen auftreten. Das Bilirubin wird durch die Lichtwellen ähnlich wie das Rhodopsin der Netzhaut entfärbt und in eine lösliche Form übergeführt. Anschließend kann es über die Nieren mit dem Urin ausgeschieden werden. Unklar ist zwar noch, welche biochemischen Reaktionen im einzelnen beim Lichteinfall am Bilirubin ablaufen, die Erfolge der angewandten Therapie aber sind verblüffend. Am wirksamsten ist blaues Licht, aber auch weißes Kunstlicht und normales Tageslicht besitzen einen hohen therapeutischen Effekt. Nach drei bis vier Tagen mit ganztägiger Beleuchtung verringert sich die Zerfallsquote der roten Blutkörperchen, und die Leberfunktionen haben sich soweit entwickelt, daß das anfallende Bilirubin vollständig ausgeschieden werden kann.

Sonnenbrand

Manche Urlauber legen sich im Sommer viel zu lange ungeschützt in die Sonne, und bereits am ersten Abend ist es nicht mehr zu übersehen: Die Haut hat sich rötlich gefärbt, die Unterhaut ist geschwollen, und leichte Berührungen werden als schmerzhaft empfunden – der »Sonnenbrand« ist perfekt. Die restlichen Urlaubstage müssen zumeist genutzt werden, um den Schaden wieder auszukurieren.

Sonnenbrand entsteht durch die im Sonnenlicht enthaltenen ultravioletten Strahlen. Am wirksamsten ist UV-Licht mit einer Wellenlänge zwischen 290 und 320 nm. Es durchdringt die oberflächlichen Hautschichten und zerstört innerhalb kurzer Zeit die Epidermiszellen. Dabei entstehen hochwirksame Substanzen wie das Serotonin und das Histamin, die zur Gruppe der biogenen Amine gerechnet werden, und das Polypeptid Bradykinin. Sie diffundieren in die Unterhaut und erweitern dort die Blutgefäße. Die Gefäßwand wird durchlässig, und das Blutplasma, später auch die weißen Blutkörperchen, dringen in das umgebende Gewebe ein. Die Hautbezirke röten sich und schwellen an. Gleichzeitig erregen die biogenen Amine die Schmerzrezeptoren der Haut – die Folge sind langanhaltende, dumpfe Schmerzempfindungen im betroffenen Hautbezirk. Hat der Entzündungsprozeß große Hautstellen erfaßt, so treten die biogenen Amine in das Blutgefäßsystem über und werden zum Gehirn, zum Herzen und zur Lunge transportiert. Sie rufen Störungen im Allgemeinbefinden, wie Übelkeit, Schwindelgefühl und Erbrechen, hervor. In den darauffolgenden Tagen stoßen sich die zerstörten Epithelschichten ab – die Haut beginnt sich zu pellen.

Soweit aber sollte man es auf keinen Fall kommen lassen. Bei vorsichtigem, dosiertem Aufenthalt in der Sonne kann die Haut einen Schutzmechanismus gegenüber den ultravioletten Strahlen einsetzen. In den Epidermiszellen befindet sich ein Schutzpigment, das Melanin, das die ultravioletten Strahlen absorbiert und somit verhindert, daß die Hautzellen geschädigt werden. Das Pigment wird von ebenfalls in der Haut befindlichen spezialisierten Zellen, den Melanozyten, gebildet und an die Epidermiszellen abgegeben. Die Anzahl der Melanozyten ist genetisch bedingt. Angehörige farbiger Rassen besitzen in der Haut das Vielfache der Melanozytenzahl der Europäer. Durch Sonneneinstrahlung erhöht sich die Melanozytenanzahl.

Unmittelbar nach Beginn der Sonneneinstrahlung nimmt der Melaningehalt der Haut zu, weil das Licht die farblosen Vorstufen des Melanins in Melanin umwandelt. Dieser Prozeß kann durch Licht im gesamten Wellenlängenspek-

trum ausgelöst werden. Nach ein oder zwei Tagen beginnen sich die Melanozyten der Haut zu vermehren, sie teilen sich und produzieren das Melanin in größeren Mengen. Jetzt entsteht eine Bräune, die für mehrere Wochen anhält und die auch ohne Lichteinwirkung zunächst bestehen bleibt. Sie verschwindet, sobald die Epidermiszellen abschilfern und durch neue, nur wenig Melanin enthaltende Zellen ersetzt werden.

Beim Aufenthalt am Meer entsteht eine besonders intensive Bräune, weil das Wasser die Lichtwellen reflektiert. Die Haut wird durch direkte Sonneneinstrahlung und durch die reflektierte Strahlung gereizt. Diese Bräune bleibt jedoch gewöhnlich kürzere Zeit bestehen als eine im Binnenland erworbene, weil sich die Epidermis unter dem extrem starken Lichteinfall zu verdicken beginnt. Die gewucherten Zellen werden besonders schnell abgestoßen.

Am offenen Meer entsteht sehr rasch ein Sonnenbrand, weil aus den genannten Gründen die Lichteinstrahlung besonders hoch ist und der ständige Wind den Körper abkühlt, so daß die Sonneneinstrahlung subjektiv als gering empfunden wird.

Lichtüberempfindlichkeit

Manche Personen und Tiere reagieren auf bestimmte chemische Substanzen allergisch. Sobald sie mit ihnen in Berührung kommen, entsteht eine lokale entzündliche Reaktion. Ein sehr eindrucksvolles Beispiel für eine solche Reaktion ist der akute Asthmaanfall. Dringt eine Substanz, auf die die Person allergisch reagiert, in die Lungen ein, so werden im Lungengewebe biogene Amine freigesetzt. Das Lungengewebe schwillt an. Die in den Lungen vorhandenen vegetativen Nervenfasern werden erregt und kontrahieren die die Lungenbläschen umgebenden Muskelfasern. Über beide Mechanismen wird die Luftzufuhr zur Lunge gedrosselt, und Erstickungsfälle sind die Folge.

Durch die Energie der elektromagnetischen Lichtwellen werden einige mit der Nahrung aufgenommene Stoffe und bestimmte im Zellstoffwechsel entstandene Verbindungen

umgebaut. Es entstehen dadurch nicht nur Substanzen, die vom Organismus verwertet und sogar benötigt werden, wie z. B. das Vitamin D, sondern auch solche, die entweder allenthalben oder nur bei einem bestimmten Personenkreis allergische Reaktionen auslösen. Manche Antibiotika, z. B. die Tetrazykline, werden in der Haut durch Lichtstrahlen abgebaut. Die Spaltprodukte entfalten bei einigen Menschen eine lokale allergische Wirkung. Dabei beginnen nach der Einnahme der Antibiotika die Hautpartien, die dem Sonnenlicht ausgesetzt sind, innerhalb kurzer Zeit anzuschwellen. Sie röten sich, und bald bilden sich alle typischen Zeichen einer beginnenden Entzündung heraus.

Von besonderer Bedeutung ist die Porphyrie des Menschen. Sie ist durch einen genetischen Defekt bedingt und äußert sich dadurch, daß Störungen im Porphyrinstoffwechsel auftreten. Porphyrine werden zur Bildung des roten Blutfarbstoffes, des Hämoglobins, benötigt und sind im gesunden Organismus ständig vorhanden. Es gibt aber auch Fälle, bei denen neben dem Hämoglobin weitere Porphyrine gebildet und teils mit dem Urin ausgeschieden, teils in der Haut abgelagert werden. Bei Lichteinfall entstehen aus den gespeicherten Porphyrinen Spaltprodukte, auf die der Organismus allergisch reagiert. Jede Sonneneinstrahlung löst heftige Hautentzündungen aus. Es entstehen Blasen, die unter Narbenbildung nur langsam abheilen. Die im Entzündungsgebiet gebildeten biogenen Amine und der erhebliche Gewebszerfall stören das Allgemeinbefinden – diese Menschen fühlen sich krank.

Die Porphyrinumwandlung erfolgt nur durch Licht im Wellenlängenbereich von 400 nm. Karotinoide – zu ihnen zählt auch das Vitamin A – schwächen die entzündliche Reaktion ab, weil sie sich mit den Porphyrinspaltprodukten verbinden und dadurch deren Wirkung aufheben können. Porphyriekranke Personen, die nicht dem Sonnenlicht ausgesetzt sind, zeigen keinerlei Störungen.

Photorezeption

Wie im vorhergehenden Abschnitt gezeigt wurde, sind die direkten Lichteinwirkungen bei Wirbeltieren zwar vorhanden, jedoch in Quantität und Qualität begrenzt. Dafür treten die indirekten Wirkungen in den Vordergrund. Eine indirekte Lichtwirkung liegt vor, wenn das Licht, das auf den Organismus einwirkt, bestimmte nervale Strukturen erregt. Die dabei aufgenommenen Informationen über die Lichtstärke, die Lichtdauer und eventuell die Polarisationsrichtung des Lichtes werden vom Nervensystem analysiert. Das Nervensystem entscheidet, ob und welche Reaktionen als Antwort auf die Lichteinwirkung einzuleiten sind. Es steht mit dem Organismus über die Nervenfasern des vegetativen Systems und über das Hormonsystem in Verbindung. Dadurch werden auch Organe durch das Licht beeinflusst, die sich im Körperinneren befinden oder die durch lichtundurchlässige Schichten vor einer direkten Lichteinwirkung geschützt sind.

Das Licht beeinflusst die Tätigkeit spezifischer nervaler Strukturen, der Photorezeptoren. Entweder befinden sie sich direkt an der Körperoberfläche, oder sie sind von lichtdurchlässigen Hüllen umgeben. Bei höherentwickelten Tieren bilden sie gemeinsam mit einer Reihe von Hilfseinrichtungen das Auge.

Die Lichtrezeption über das Auge dient vor allem der sinnlichen Wahrnehmung des Lichtes. Dadurch wird – nach entsprechender Verarbeitung der Information im zentralen Nervensystem – der Gegenstand wahrgenommen, der die Lichtwellen aussendet. Über die Photorezeption wird beim Menschen und beim Tier ein enger Kontakt zur Umwelt hergestellt.

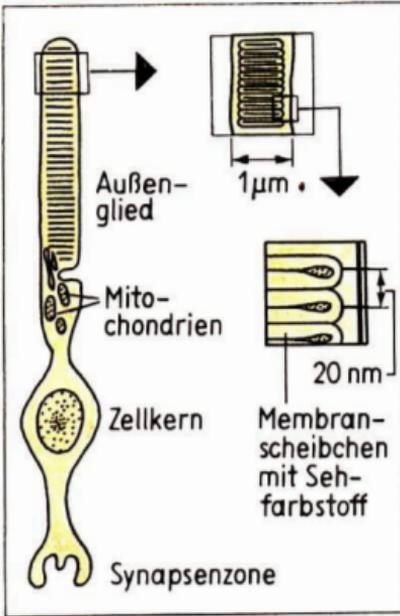
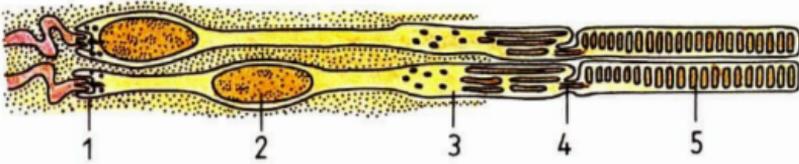
Bestimmte Insekten – diese Untersuchungen wurden erstmals bei Bienen durchgeführt – stellen mit den Augen den Polarisationsgrad des Lichtes fest. Sie erhalten dadurch eine zusätzliche Möglichkeit, sich im Raum zu orientieren.

Das Licht ist der Hauptzeitgeber für die von innen her gesteuerten rhythmischen Prozesse, die sogenannten zirkadianen Rhythmen. Es synchronisiert den inneren Rhythmus verschiedener Körperfunktionen und paßt sie den äußeren Notwendigkeiten an. Schließlich fördert das Licht sämtliche Lebensprozesse. Nicht alle Vorgänge, die dabei ablaufen, sind bisher zur Genüge erforscht worden. Auf einige Erkenntnisse wird an entsprechender Stelle eingegangen werden.

Licht hemmt die Photorezeptoren

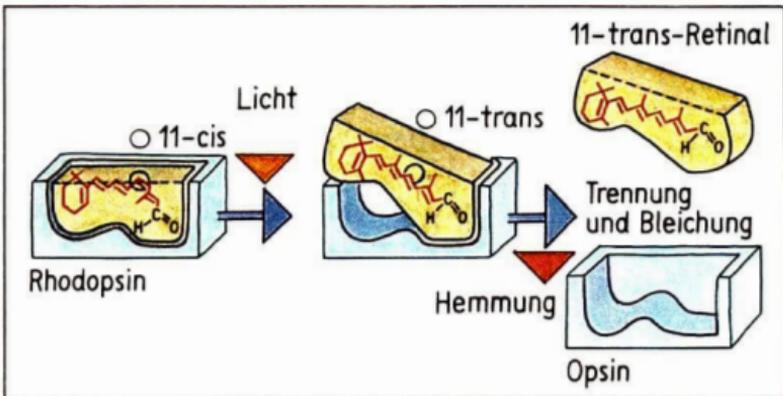
Die Photorezeptoren besitzen bei den verschiedenen Tierarten eine unterschiedliche Form. Sie können an verschiedenen Körperstellen lokalisiert sein. Immer funktionieren sie jedoch nach dem gleichen Prinzip, unabhängig davon, ob sie beim Menschen, bei anderen Säugern, bei Insekten oder bei Mollusken vorkommen. Sobald das Licht auf den Rezeptor auftrifft, leitet es eine chemische Reaktion ein, die am Rezeptor Erregungsprozesse auslöst. Die entstehenden Aktionspotentiale werden auf ableitende Nervenfasern übertragen, zum Gehirn geleitet und dort weiterverarbeitet.

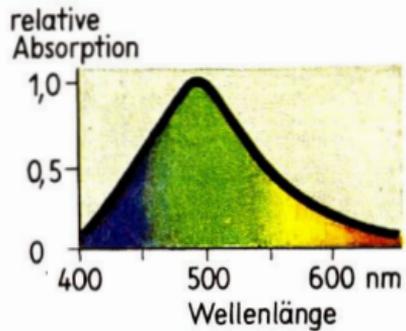
Bei den Wirbeltieren kommen zwei Rezeptorenformen vor – die Zapfen und die Stäbchen. Beide Photorezeptoren bestehen aus einer länglichen Zelle mit einem großen Zellkern, der an der Basis des Rezeptors liegt. Nach außen schließen sich das Innenglied, das bei der Informationsübertragung eine Rolle spielt, das Verbindungsstück und das Außenglied an. Die eigentlichen lichtempfindlichen Strukturen sind im Außenglied in den sogenannten Scheiben untergebracht. Die Rezeptoren stehen über Synapsen – das sind Verbindungen zwischen nervalen Strukturen – mit verarbeitenden und ableitenden Nervenzellen in Verbindung.



Aufbau eines Photorezeptors. 1 – Synapsen; 2 – Zellkern; 3 – Innenglied; 4 – Verbindungsstück; 5 – Außenglied mit »Scheibchen«

Reaktionen des Rhodopsins bei Lichteinfall auf die Außenglieder der Photorezeptoren





Absorptionsspektrum des Rhodopsins. Das Absorptionsmaximum liegt im grünen Bereich bei 500 nm.

Im Außenglied sind die Sehpigmente angeordnet. Sie bestehen aus zwei Teilen, die lose miteinander verbunden sind: aus einer Eiweißkomponente – bei den Wirbeltieren wird sie als Skotopsin bezeichnet – und aus einer Wirkgruppe, die zumeist ein Abkömmling des Vitamins A ist. Von allen Sehpigmenten ist das Rhodopsin am besten untersucht worden. Es wurde in den Photorezeptoren der Wirbeltiere, der Tintenfische, der Krebse und der Insekten nachgewiesen.

Rhodopsin besteht aus dem 11-cis-Retinal und der Eiweißkomponente, dem Skotopsin. Die Strukturformel des Retinals ist der Abbildung auf Seite 50 zu entnehmen. Wesentlich für die Lichtrezeption ist, daß sich zwischen dem elften und dem zwölften C-Atom eine Doppelbindung befindet und daß die Seitenkette, die von einem Sechsering abgeht, zwischen dem sechsten und dem zwölften C-Atom gerade verläuft, ab dem zwölften C-Atom aber einen Knick aufweist. Dieser Knick ist in eine Ausbuchtung des Skotopsinmoleküls eingelagert.

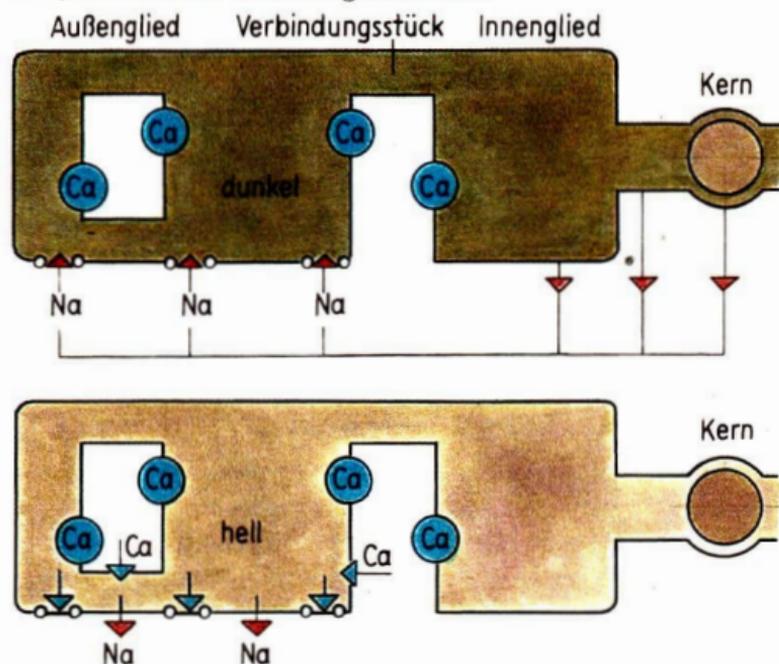
Das Licht, das auf die Photorezeptoren auftrifft, wird zunächst vom Rhodopsin absorbiert. Die Absorptionsstärke hängt von der Wellenlänge des einfallenden Lichtes ab. Am besten wird Licht mit einer Wellenlänge von 501 nm absorbiert. Mit sinkender oder steigender Wellenlänge verschlechtert sich die Absorptionsfähigkeit.

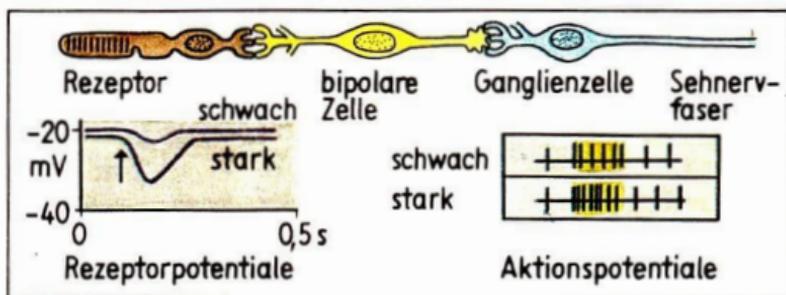
Das absorbierte energiereiche Licht ruft am Rhodopsin zwei Veränderungen hervor. Es löst einmal die Doppelbindung zwischen dem elften und dem zwölften C-Atom.

Dadurch entsteht aus dem 11-cis-Retinal das 11-trans-Retinal. Gleichzeitig verliert das farbige Rhodopsin dadurch seine Farbe und wandelt sich in das farblose Lumirhodopsin um. Mit der Auflösung der Doppelbindung verändert sich auch die Form des Retinals. Infolgedessen geht die Bindung zwischen der Wirkgruppe, dem Retinal, und der Eiweißkomponente, dem Skotopsin, verloren. Das Retinal kann anschließend weiter zum Vitamin A₁ reduziert werden. Die Neubildung des Rhodopsins erfolgt durch Umwandlung des 11-trans-Retinals in das 11-cis-Retinal, oder aber es entsteht 11-cis-Retinal aus dem in der Leber gebildeten und gespeicherten Vitamin A.

Alle bisherigen Untersuchungen deuten darauf hin, daß entscheidend für die Erregungsbildung in den Photorezeptoren die Umwandlung des Retinals aus der cis- in die trans-Form ist. Die Scheiben, die in den Außengliedern der Photorezeptoren angeordnet sind, bestehen aus rhodopsin-

Einfluß des Lichtes auf die molekularen Vorgänge an den Scheiben der Außenglieder von Photorezeptoren; im Dunkeln sind die Na-Kanäle geöffnet, im Hellen sind die Na-Kanäle durch die Kalziumionen der Scheiben geschlossen.





Reaktionen der Photorezeptoren auf die Ganglienzellen der Netzhaut bei Lichteinfall. Der Einfall des Lichtes führt zu einer Hyperpolarisation und damit zur Hemmung des Rezeptors.

haltigen Membranen. Im Inneren der Scheiben reichern sich im Dunkeln Kalziumionen an. Gleichzeitig strömen Natriumionen durch die Zellmembran in das Innere der Außensegmente ein. Eine Erhöhung der Natriumionenkonzentration an der Innenfläche einer erregbaren Membran aber ist identisch mit einer Erregung. Das bedeutet: Ein Photorezeptor wird im Dunkeln erregt. Trifft ein Lichtquant auf das Außensegment, so wird es vom Rhodopsin absorbiert. Durch die Überführung des cis-Retinals in die trans-Form verändert sich die Struktur der Scheibenmembran. Sie wird plötzlich für Kalziumionen durchlässig. Sie fließen in sehr kurzer Zeit aus den Scheiben in das Außensegment und schließen an der Zellmembran die Natriumkanäle. Dadurch kann kein Natrium mehr in das Zellinnere einströmen. Es erhöht sich folglich die Natriumkonzentration an der Außenfläche der Zellmembran. Die Folge ist eine Hyperpolarisation. Sie ist identisch mit einer Hemmung.

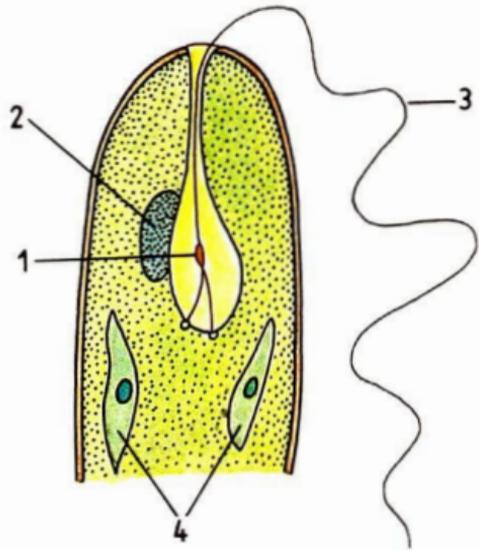
Der Vorgang erscheint im ersten Moment etwas paradox. Licht fördert nicht, sondern hemmt die Funktion der Photorezeptoren. Wie aber soll ein gehemmter Rezeptor eine Information an das Gehirn weiterleiten? Der Vorgang ist relativ einfach zu erklären, wenn man berücksichtigt, daß die Rezeptoren nicht die einzigen nervalen Strukturen in der Netzhaut des Auges sind. Sie sind unmittelbar mit den bipolaren Zellen verbunden, die ihrerseits mit den Ganglienzellen in Verbindung stehen, die die empfangenen Informationen zum Gehirn weiterleiten. Gehemmte Re-

zeptoren hemmen einen Teil der Bipolaren und erregen andere bipolare Neurone. In den Ganglienzellen aber entsteht immer eine Erregung, die an die Großhirnrinde weitergeleitet wird. Je stärker der Lichtreiz ist, der auf die Photorezeptoren trifft, um so mehr Rhodopsin wird gespalten, um so krasser wird die Membranstruktur der Scheiben gestört und um so mehr und schneller treten die Kalziumionen aus den Scheiben heraus und schließen an der Zellmembran die Natriumkanälchen. Durch Neubildung von Rhodopsin wird der alte Zustand wieder hergestellt. Das ist ein relativ zeitaufwendiger Prozeß. Seine Geschwindigkeit hängt von der Vitamin-A-Versorgung des Organismus – 11-cis-Retinal wird ja aus Vitamin A gebildet – sowie von der Zerfallsrate des neugebildeten Rhodopsins ab. Sie ist im Helien groß und im Dunkeln klein. Rhodopsin liegt also im Dunkeln in hoher Konzentration in der Zelle vor. Daher genügt im Dunkeln bereits eine geringe Lichtintensität, um eine Erregungsänderung an den Photorezeptoren auszulösen. Das Auge adaptiert an die Dunkelheit. Mit einem dunkel-adaptierten Auge können auch noch minimale Lichtintensitäten wahrgenommen werden. Die sogenannte Nachtblindheit einiger Menschen ist unter anderem darauf zurückzuführen, daß das Rhodopsin nach seinem Zerfall nicht in der notwendigen Menge nachgebildet werden kann.

Verschiedene Tiere – verschiedene Augen

Das am höchsten entwickelte und leistungsfähigste Auge ist zweifellos das Linsenauge. Es kommt bei einigen Medusenarten, bei Anneliden, Weichtieren, Spinnen und natürlich bei allen Wirbeltieren vor. Daneben gibt es aber eine Reihe von Augenformen, die den Ansprüchen der entsprechenden Tierart an die Lichtrezeption genügen.

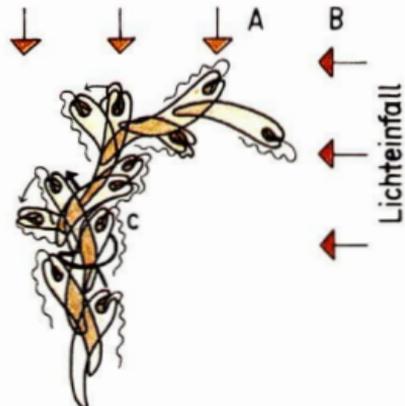
Bereits bei den einzelligen Tieren treten im Zellplasma umgrenzte lichtempfindliche Herde auf. An der Basis der Geißel des Geißeltierchens befindet sich z. B. ein lichtempfindliches Gebilde, ein »Photorezeptor«, der durch einen pigmentreichen Fleck, das Stigma, beschattet wird. Entsprechend der Bewegungsrichtung des Tieres zur

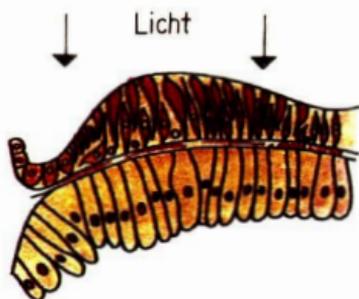


Aufbau eines Geißeltierchens. Das pigmentierte Stigma (2) beschattet das lichtempfindliche Gebilde, den »Photorezeptor« (1), an der Basis einer Geißel (3); 4 – Chromatophoren

Lichtquelle wird der Photorezeptor entweder belichtet oder beschattet. Bei Beschattung ändert das Geißeltierchen seine Bewegungsrichtung; es nähert sich der schattenspendenden Seite. Dadurch bewegt es sich in schlängelnder Linie auf die Lichtquelle zu. In dem Versuch, der

Geißeltierchen bewegen sich in schlängelnder Linie auf die Lichtquelle zu. Zum Zeitpunkt c wurde die Lichteinfallrichtung von A nach B geändert.





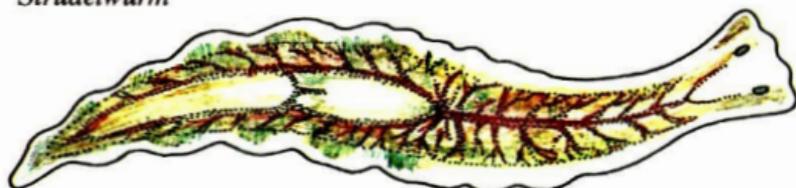
Der Augenfleck der Strudelwürmer ist eine Rezeptorenanhäufung; ein Richtungssehen ist möglich.

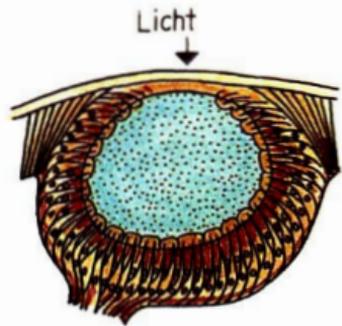
in der Abbildung auf Seite 55 dargestellt ist, wurde zum Zeitpunkt c die Richtung des Lichteinfalls von A nach B geändert. Innerhalb weniger Geißelschläge veränderte das Geißeltierchen seine Bewegungsrichtung um 90 Grad, so daß es sich wieder auf die Lichtquelle zu bewegte.

Photorezeptoren sind bei mehrzelligen Tieren entweder gleichmäßig über die Oberfläche verteilt, oder sie treten an bestimmten Körperstellen konzentriert auf. Der Regenwurm besitzt lichtempfindliche Zellen an allen Stellen der Hautoberfläche. In den vorderen und mittleren Körperabschnitten sind sie gehäuft nachzuweisen. Mit einzelnen Photorezeptoren kann nur festgestellt werden, ob Licht vorhanden ist. Ein Richtungssehen ist erst möglich, wenn ein Lichtstrahl, der von einer Lichtquelle ausgeht, mehrere Rezeptoren unter verschiedenen Einfallswinkeln trifft.

Die einfachste zum Richtungssehen geeignete Rezeptorenanhäufung ist der Augenfleck, der bei verschiedenen Strudelwurmarten vorkommt. Die Rezeptorzellen überragen die Körperoberfläche und werden dadurch unterschiedlich stark beleuchtet. Das Nervensystem der Tiere ermittelt aus der Reizintensität an den einzelnen Rezeptoren die Ausbreitungsrichtung des Lichtes.

Strudelwurm





Das Blasenauge läßt das Erkennen von Bildern zu.

Noch besser zum Richtungssehen ist das Grubenauge geeignet, das verschiedene Schneckenarten besitzen. Die Photorezeptoren sind so gegeneinander versetzt angeordnet, daß die Lichtrichtung zweifelsfrei bestimmt werden kann. Zwischen den Rezeptoren befinden sich Pigmentzellen. Sie absorbieren die Lichtwellen, die den Rezeptor durchdrungen haben, und bewirken damit, daß nicht gleichzeitig von einem Lichtstrahl mehrere Rezeptorzellen erregt werden können.

Das Grubenaug ist weit geöffnet. Verengt sich die Öffnung, so entsteht das Blasenauge. Tiere mit solchen Augen nehmen nicht nur die Lichtrichtung wahr, sondern erkennen auch in beschränktem Maße Gegenstände – das Blasenauge ist zum bildlichen Sehen geeignet.

In extremer Weise ist das Blasenauge beim Nautilus, einer primitiven Tintenfischart, ausgebildet. Der Durchmesser der Lichteinfallsoffnung kann ähnlich wie die Pupillenweite des Linsen Auges verändert werden. Je kleiner die Lichteinfallsoffnung ist, um so schärfer wird das Bild auf dem Augenhintergrund abgebildet, auf dem sich die Photorezeptoren befinden. Eine weite Öffnung erhöht zwar die einfallende Lichtmenge, verringert aber die Bildschärfe. Die Sehschärfe des Nautilusauges ist im Vergleich zum Linsenauge gering. Erst mit einem Augendurchmesser von 25 m bei einer Pupillenöffnung von 3 mm würde beim Blasenauge die gleiche Sehschärfe wie beim menschlichen Auge erreicht werden!

Eine besondere Augenform hat sich bei den Insekten herausgebildet. Ihre Facettenaugen setzen sich aus zahl-



Augen einer Bremse. Die Bedeutung der prächtigen, nach dem Tode schnell verblassenden Farben der Bremsenaugen ist unbekannt.

losen kleinen Augen, den Ommatidien, zusammen. Erst die Verarbeitung der Informationen aus den einzelnen Ommatidien, die jeweils nur einen bestimmten Bildausschnitt wahrnehmen können, ergibt ein Gesamtbild des im Blickfeld liegenden Gegenstandes. Das Auflösungsvermögen des Facettenauges ist um so größer, je kleiner die Ommatidien und je mehr in einem Auge vorhanden sind. Verkleinert sich der Ommatidienwinkel – das ist der Winkel zwischen den seitlichen Ommatidienwänden, gemessen an der Augenbasis –, so fällt weniger Licht auf die lichtempfindlichen Zellen des Ommatidiums. Die Bildhelligkeit wird geringer. Die Ommatidien sind halbkugelförmig angeordnet. Ein Facettenauge mit einem großen Durchmesser besitzt daher auch lange Ommatidien, die bei gleichem Ommatidienwinkel eine große

Ommatidienoberfläche haben und viel Licht aufnehmen. Insekten mit großen Augen haben mehr Ommatidien als Tiere mit kleinen Augen, ohne daß sich die Helligkeit des aufgenommenen Bildes verändert.

Das Auflösungsvermögen des Facettenauges ist gering, vermutlich wird die Umwelt in Rasterform wahrgenommen.

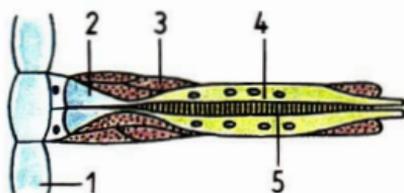
Facettenaugen verfügen aber über zwei Eigenschaften, die für die Insekten von unschätzbarem Vorteil sind. Insekten können die Polarisationsrichtung des Lichtes bestimmen, und sie nehmen auch Licht im ultravioletten Bereich wahr.

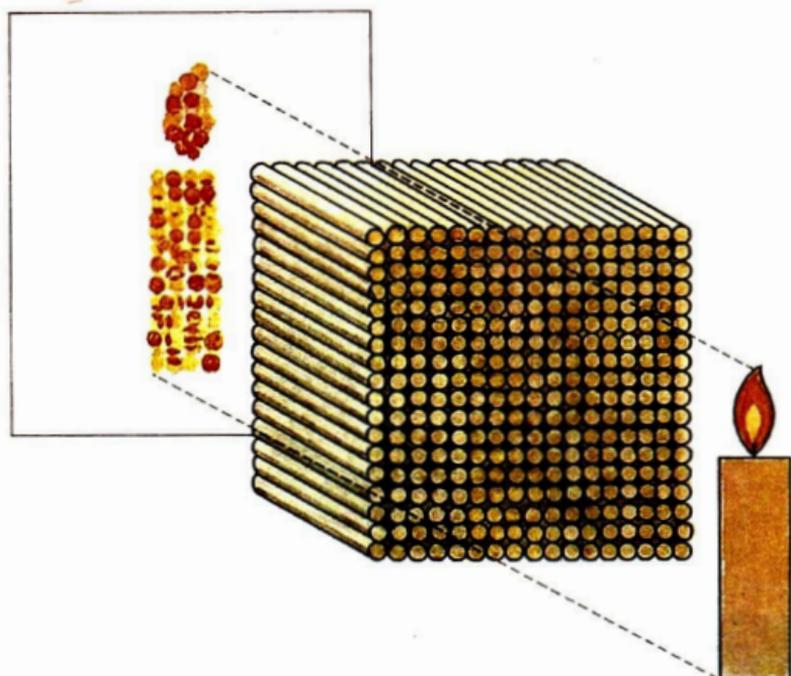
Vollständig polarisiertes Licht ist dadurch gekennzeichnet, daß die elektromagnetischen Wellen nur in eine Richtung schwingen. Das Sonnenlicht hat gewöhnlich verschiedene Schwingungsrichtungen, jedoch überwiegt, entsprechend dem tageszeitlich unterschiedlichen Sonnenstand, eine Schwingungsebene. Insekten ermitteln die Hauptpolarisationsrichtung und bestimmen aus dieser Information den Sonnenstand und die Himmelsrichtung.

Die ersten Untersuchungen zu dieser Fragestellung wurden an Bienen vorgenommen. Die dabei gewonnenen Ergebnisse sind so verblüffend, daß sie näher dargestellt werden sollen.

Bienen, die von der Nahrungssuche zurückkehren, zeigen den Stockbewohnern durch tänzelnde Bewegungen auf der senkrecht stehenden Wabe die Richtung an, in der die Nahrung zu finden ist. Sie tanzen doppelschleifige Figuren. Der Winkel zwischen der Senkrechten und dem Mittelstück ihrer Figur in Bewegungsrichtung ist identisch mit dem Winkel, den die Verbindungslinie Bienenstock –

Bau eines Ommatidiums. 1 – Linse; 2 – Kristallkegel; 3 – Pigmentzellen; 4 – Sehzellen; 5 – Rhabdom (Sehstäbchen)

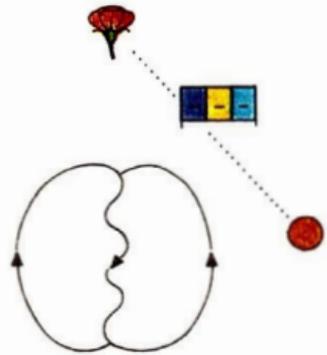
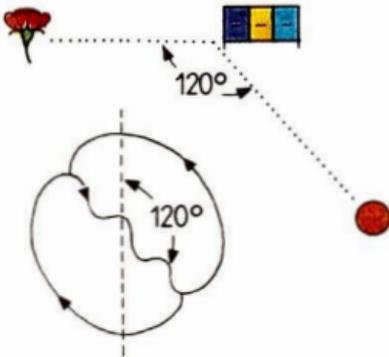
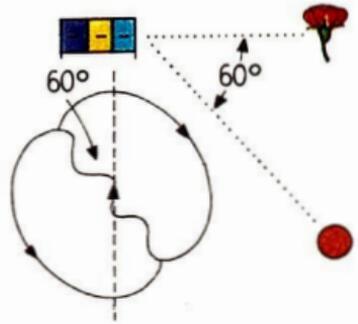
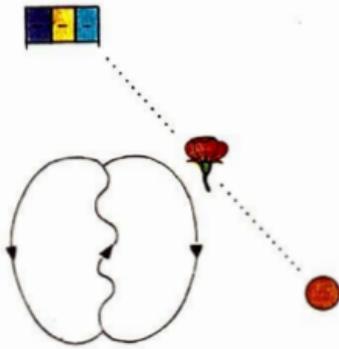
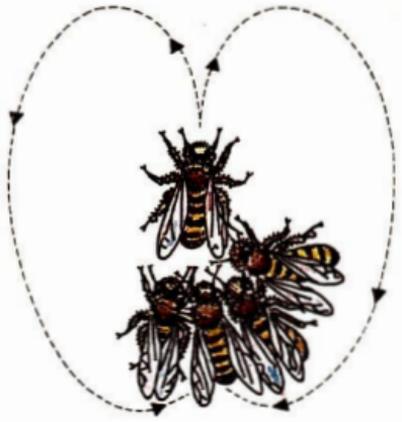




Vergleich zwischen dem Umweltbild beim Menschen (Kerze) und bei einem Insekt mit hochentwickelten Facettenaugen

Nahrungsquelle und Bienenstock – Sonne miteinander bilden. Liegen Sonne, Bienenstock und Nahrung in einer Linie, so wird die Figur nach oben durchlaufen, wenn sich die Nahrung auf der sonnenzugekehrten Seite des Bienenstockes befindet. Sie wird nach unten durchlaufen, wenn sich die Nahrungsquelle auf der sonnenabgekehrten Seite des Bienenstockes befindet.

Bienen verfügen über erstaunliche Fähigkeiten. Sie ermitteln den Winkel zwischen Sonne und Nahrungsquelle, registrieren ihn und geben die Information an andere Stockbewohner weiter. Sie bestimmen den Sonnenstand aus dem Polarisationsgrad des Lichtes auch bei nahezu bedecktem Himmel. Bereits ein blauer Streifen am sonst wolkenverhangenen Himmel genügt ihnen dazu. Ist der Himmel vollständig bedeckt, so ist das Sonnenlicht nicht mehr polarisiert. Unter diesen Bedingungen können sich die Bienen nicht mehr orientieren.



Mit dem Figurentanz zeigen die Bienen an, in welcher Richtung Nahrung zu finden ist.



Kolibri vor einer leuchtend roten Blüte

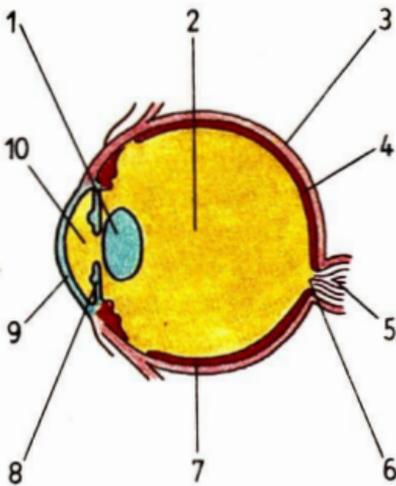
Insekten – diese Untersuchungen wurden ebenfalls an Bienen durchgeführt – besitzen in den lichtempfindlichen Zellen der Ommatidien einen Sehfarbstoff, der ultraviolettes Licht absorbieren kann und bei dem dann Reaktionen ablaufen, wie sie auf Seite 52 für das Rhodopsin beschrieben worden sind. Umfangreiche Dressurversuche haben gezeigt, daß Bienen ultraviolettes Licht als gesonderte Farbe identifizieren und es gegenüber anderen Farben vorziehen. Das erklärt, warum die Blüten vieler Obstbäume, die oft weiß, klein und unscheinbar sind, von den Bienen angefliegen und befruchtet werden. Weiße Obstbaumblüten sind für den Menschen, nicht aber für die Bienen weiß. Sie reflektieren in hohem Maße ultraviolette Strahlen, die von den Bienen wahrgenommen werden. Bienen sehen beispielsweise weiße Pflaumenblüten nicht weiß, sondern in der Farbe Ultraviolett, über deren Aussehen wir natürlich, da uns die entsprechenden Rezeptoren fehlen, keine Aussagen treffen können. Leuchtend rote Blüten fehlen zumeist bei den einheimischen Pflanzen. Wildwachsende Rosen und Nelkenarten zeigen einen mehr

fahlen Farbton — es ist anzunehmen, daß sie ebenfalls ultraviolette Strahlen reflektieren. In den Tropen überwiegen die Blütenfarben, die für das menschliche Auge — und auch für die Augen anderer Wirbeltiere — leuchtend erscheinen. Diese Blüten werden weniger durch Insekten als vielmehr durch Vögel, z. B. den Kolibri, befruchtet. Daß die leuchtenden Blütenfarben in den Tropen vorherrschen und die Kolibris überleben konnten, ist sicher in einem Anpassungsprozeß entstanden, bei dem heute Ursache und Wirkung nicht mehr zu unterscheiden sind. Sicherlich wurden vorrangig Blüten bevorzugt befruchtet, die eine leuchtende Farbe hatten, und sicherlich konnten nur solche Kolibris am Leben bleiben, die in der Lage waren, diese Farben zu erkennen. Wir gehen gewiß nicht fehl in der Annahme, daß beide Partner an der Herausbildung des gegenwärtigen Zustandes beteiligt waren. Pflanzen und Tiere haben sich so lange wechselseitig aneinander angepaßt, bis die heutigen Verhältnisse entstanden sind.

Das Linsenauge

Linsenaugen kommen bereits bei niederen Tieren wie Medusen und Mollusken vor. Bei den Wirbeltieren sind sie am höchsten entwickelt. Sie verfügen über einen leistungsfähigen lichtbrechenden Apparat, der über verschiedene Regelmechanismen so gesteuert wird, daß das Licht zielstrebig zu den Photorezeptoren, die sich im Augenhintergrund an der Netzhaut befinden, geleitet wird.

Der lichtbrechende Apparat — er wird auch als dioptischer Apparat bezeichnet — nimmt den größten Teil des Augapfels ein. Er besteht aus der Hornhaut, dem Kammerwasser, der Linse und dem Glaskörper. Durch Veränderung der Linsenstellung oder der Brechkraft der Linse wird ein Gegenstand, der sich vor dem Auge befindet, auf dem Augenhintergrund scharf abgebildet. Das ist die Voraussetzung dafür, daß die Rezeptoren der Netzhaut in der richtigen Stärke und an der richtigen Stelle gereizt werden und somit ein scharfes Bild wahrgenommen werden kann. Vor der Linse befindet sich die Regenbogenhaut. Sie ist lichtundurchlässig und besitzt eine zentrale Öffnung, die



Schnitt durch ein Linsenauge. 1 – Linse; 2 – Glaskörper; 3 – Lederhaut; 4 – Fovea centralis; 5 – Sehnerv; 6 – blinder Fleck; 7 – Netzhaut (Retina); 8 – Iris; 9 – Hornhaut (Kornea); 10 – Kammerwasser

Pupille. Nur über die Pupille kann Licht den Augenhintergrund erreichen. Durch Verstellen der Pupillenweite wird der Lichteinfall in das Auge variiert. Der Augenhintergrund besteht aus mehreren übereinandergelagerten Schichten. Es sind das von innen nach außen die Netzhaut, in der sich die lichtempfindlichen Zellen befinden, die Aderhaut, durch die die Netzhaut mit Sauerstoff und Nährstoffen versorgt wird, und die Sklera, die aus festem Bindegewebe besteht und das Auge vor äußeren Einflüssen schützt. Zwischen der Netzhaut und der Aderhaut liegen lichtabsorbierende Pigmente. Sie verhindern, daß die Lichtstrahlen, die die Netzhaut bereits passiert haben, in der Aderhaut reflektiert werden und auf ihrem Rückweg die Rezeptoren nochmals reizen.

Scharfe Bilder nur durch Akkommodation

Gegenstände werden scharf wahrgenommen, wenn sie auf der Netzhaut scharf abgebildet werden. Für das Verständnis der dabei herrschenden Gesetzmäßigkeiten sind einige physikalische Erläuterungen notwendig.



Augen einer Erdkröte (Bufo bufo)

Auf der Seite 66 ist der Strahlengang einer Sammellinse dargestellt. Der Punkt F_2 ist der Brennpunkt der Linse. Durch ihn verlaufen alle vom Gegenstand A–B ausgehenden Lichtstrahlen, die parallel zur Linsenachse auf die Linse auftreffen und durch die Linse gebrochen werden. Der Abstand zwischen der Linsenmitte und dem Brennpunkt ist identisch mit dem Krümmungsradius der Linse sowie der Brennweite f , wenn die Linse aus Kugelflächen gleicher Krümmung besteht. Bei allen anderen Sammellinsen errechnet sich die Brennweite aus dem Krümmungsradius beider Linsenflächen und aus dem Brechungsindex des Linsenmaterials. Der reziproke Wert der Brennweite der Linse ist die Brechkraft. Eine flache Linse besitzt einen großen Krümmungsradius und damit eine große Brennweite. Ihre Brechkraft ist gering, und ein Gegenstand A–B, der sich vor der Linse befindet, wird erst weit hinter der Linie A'–B' abgebildet. Stark gekrümmte kugelförmige Linsen haben dagegen eine geringe Brennweite und somit eine große Brechkraft. Der Gegenstand wird in geringer Entfernung hinter der Linse abgebildet.

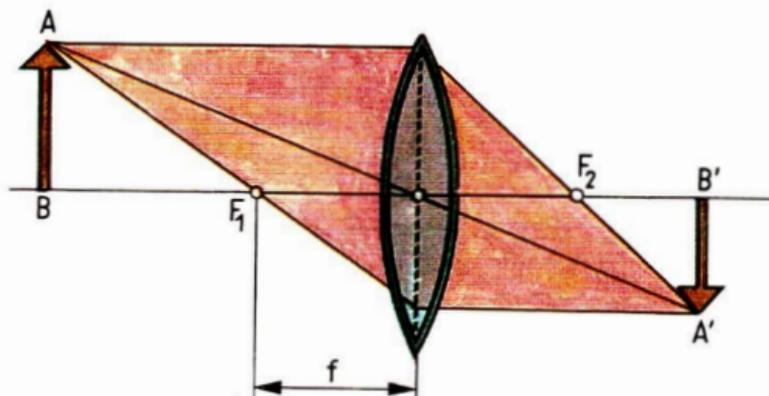
Die Brechkraft wird in Dioptrien angegeben. Eine Linse mit einer Brennweite von 1 m hat eine Brechkraft von einer Dioptrie. Die Gesamtbrechkraft des menschlichen Auges beträgt bei Jugendlichen etwa 58 Dioptrien. Davon ent-

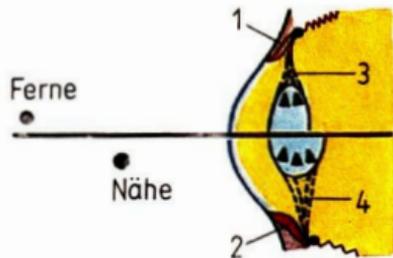
fallen 16 Dioptrien auf die Linse und 42 Dioptrien auf die übrigen Anteile des lichtbrechenden Systems. Nur die Brechkraft der Linse ist variabel. Sie kann beim Menschen um 14 bis 15 Dioptrien erhöht werden, so daß die Brechkraft des Auges bis auf maximal 73 Dioptrien ansteigen kann. Im Ruhezustand ist das Auge des Menschen und der Säugetiere auf die Ferne eingestellt. Nähert sich ein Gegenstand bis auf 5 m dem Auge, so wird er nur noch scharf wahrgenommen, wenn sich die Brechkraft des dioptrischen Apparates erhöht. Die Gesamtheit der Vorgänge, die im Auge bei der Einstellung einer scharfen Abbildung auf der Netzhaut ablaufen, bezeichnet man als Akkommodation.

Die Brechkraft des Auges wird vergrößert, wenn sich die Linse durch die Kontraktion bestimmter Muskelgruppen abrundet. Die Linse ist an ihren Polen durch die sogenannten Zonulafasern fixiert. Sie gehen vom Ziliarkörper aus, der die Linse kreisförmig umgibt. Im Ziliarkörper sind radiär verlaufende Muskelstränge eingelagert. Sobald sie sich kontrahieren, verkleinern sie den Zilierring. Dadurch läßt die Spannung, die die Zonulafasern auf die Linse ausüben, nach, und die Linse fällt zusammen. Sie rundet sich ab und erhöht dadurch ihre Brechkraft.

Der Krümmungsradius der Augenlinse ist an der Innen- und Außenfläche unterschiedlich groß. Am menschlichen Auge beträgt der Außenradius im Ruhezustand 10 cm und

Strahlengang an einer Sammellinse. A-B – Gegenstand; A'-B' – abgebildeter Gegenstand; f – Brennweite; F_1 , F_2 – Brennpunkte





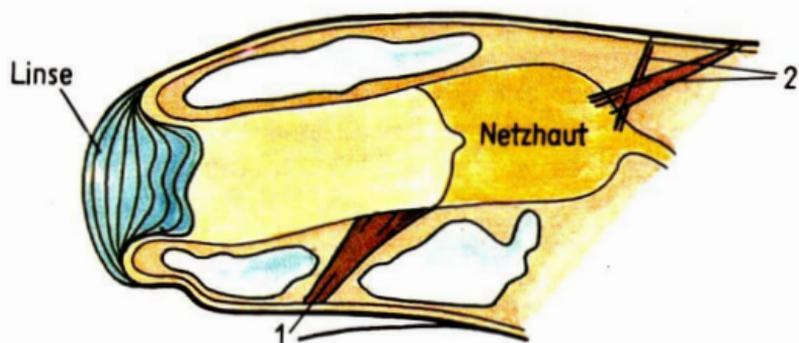
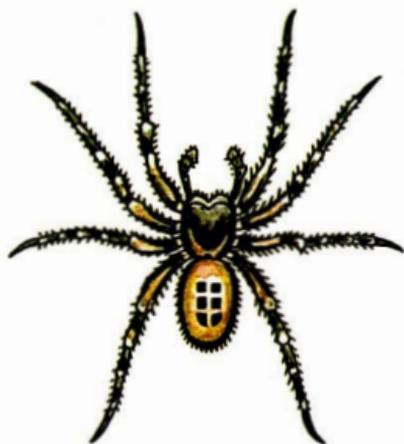
Akkommodation am Linsenauge des Menschen und der Säugetiere. 1 – Ziliarmuskel entspannt; 2 – Ziliarmuskel angespannt; 3 – Zonulafasern gespannt; 4 – Zonulafasern entspannt

verringert sich nach der Akkommodation auf 5,3 cm. Das ist gleichbedeutend mit einer Zunahme der Brechkraft um 10 Dioptrien. Der Innenradius verringert sich bei Akkommodation nur von 6,0 cm auf 5,5 cm; die Brechkraft steigt um eine Dioptrie an. Die übrigen drei bis vier Dioptrien, die bei der maximalen Akkommodation nachzuweisen sind, entstehen durch Strukturveränderungen im Linsenkörper.

Die Akkommodationsbreite ist tierartsspezifisch. Sie beträgt beim Pferd, beim Hund und bei der Katze zwei bis vier und beim Geflügel acht bis zwölf Dioptrien. Kaninchen können nicht akkommodieren.

Jedem Amateurfotografen ist bekannt, daß in der Kamera die Bilder nach einem anderen Prinzip scharf eingestellt werden. Da es nicht möglich ist, die Brechkraft der Glaslinse des Fotoapparates zu verändern, wird bei der Scharfeinstellung des Bildes der Abstand zwischen Linse und Film variiert. Vergrößert sich der Abstand, so ist das gleichbedeutend mit Akkommodation auf Nähe, verringert er sich, so werden entferntere Gegenstände scharf abgebildet. Eine ganze Reihe von Tieren akkommodiert nach dem gleichen Prinzip. Nicht die Brechkraft der Linse, sondern die Entfernung zwischen Linse und Netzhaut wird verändert.

Das Auge des Frosches ist im Ruhezustand auf die Ferne eingestellt. Durch Kontraktion eines Muskels, der zwischen dem Ziliarkörper und der Hornhaut des Auges gelegen ist, wird die Linse nach vorn, in Richtung der Hornhaut, gezogen – das Auge ist auf Nahsehen akkommodiert.



Spinnentiere akkomodieren, indem sie die Netzhaut zum Augenhintergrund ziehen und dadurch den Abstand zwischen der Linse und den Photorezeptoren vergrößern. 1 – Muskel, der die Netzhaut nach vorn zieht; 2 – Muskeln, die die Netzhaut nach hinten ziehen und dadurch den Abstand zwischen Linse und Netzhaut vergrößern

Einen außergewöhnlichen Akkommodationsmechanismus besitzen die Spinnen. Ihre Augen – meistens haben Spinnen sechs – sind langgestreckt und am Augenhintergrund mit mehreren Muskeln versehen. Kontrahieren diese Muskeln, so wird der Augenhintergrund in Richtung Gehirn gezogen und auf diese Weise die Entfernung zwischen Linse und Netzhaut vergrößert.

Wir stellen fest: Spinnen akkomodieren, indem sie die Entfernung zwischen Linse und Netzhaut nicht durch eine Bewegung der Linse, sondern durch eine Bewegung der Netzhaut verändern.

Die Netzhaut – ein vorgelagerter Gehirnabschnitt

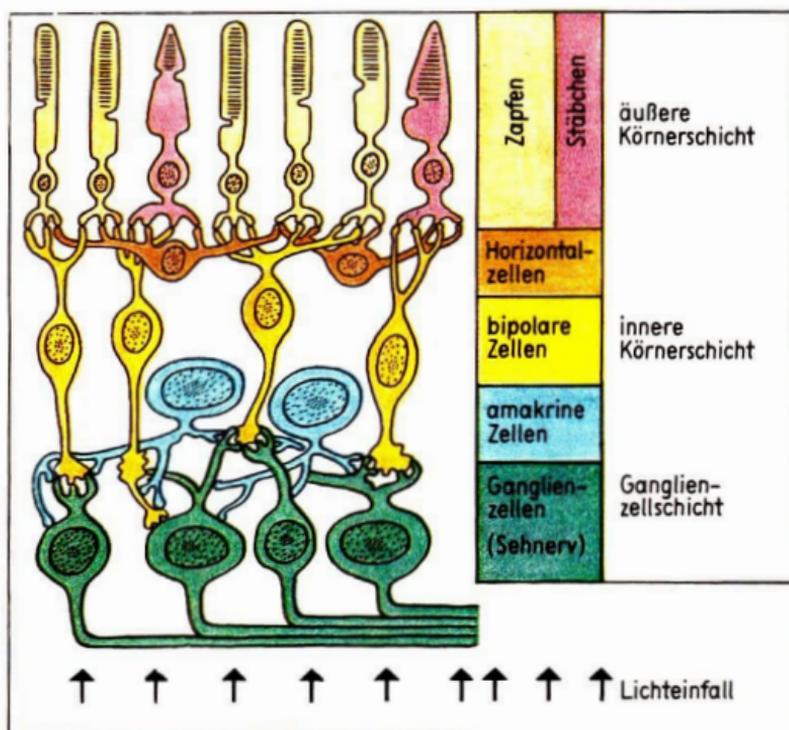
Die Netzhaut des Auges ist nicht nur eine Anhäufung von Rezeptoren, sondern sie enthält bereits nervale Elemente, die die von den Rezeptoren aufgenommenen Informationen zu verarbeiten beginnen.

Die Rezeptoren des Wirbeltierauges befinden sich auf der Seite der Netzhaut, die dem einfallenden Licht abgekehrt ist. Das Licht muß sämtliche Netzhautschichten durchdringen, bevor es an den Rezeptoren angreifen kann. Im Gegensatz dazu liegen die lichtempfindlichen Zellen im Auge der Tintenfische an der dem einfallenden Licht zugewandten Seite der Netzhaut.

Prinzipiell sind an der Netzhaut des Wirbeltierauges drei Schichten zu unterscheiden.

Unmittelbar unter der Pigmentschicht, die sich an die

Aufbau der Netzhaut



Aderhaut anschließt, befindet sich die äußere Körnerschicht. Sie besteht aus den Zellkernen der Photorezeptoren. Es existieren in der Netzhaut zwei Rezeptorenformen. Entsprechend ihrer morphologischen Struktur werden sie als Zapfen und Stäbchen bezeichnet. Sie besitzen wesentliche funktionelle Unterschiede.

Die Stäbchen sind extrem lichtempfindlich. Bereits durch die Einwirkung eines einzelnen Lichtquants wird ihr Erregungsmuster verändert – es kommt zu einer Hyperpolarisation der Zellmembran.

Die Gesamtheit aller nervalen Strukturen, die die Informationen von den Stäbchen weiterleiten und verarbeiten, wird als *skotopisches* System¹ bezeichnet. Es ist für das Hell-Dunkel-Sehen verantwortlich. Seine Absolutschwelle liegt bei 10^{-6} bis 10^{-5} Lux. Bis zu einer Beleuchtungsstärke von 10^{-1} Lux wird ausschließlich das skotopische System aktiviert. Im Intensitätsbereich zwischen 10^{-1} und 10 Lux arbeitet neben dem skotopischen auch das *photopische* System², und bei einer Beleuchtungsstärke von 10 Lux bis zur Schwelle der maximalen Blendung – sie liegt bei 10^6 Lux – ist nur das photopische System tätig.

Zum photopischen System gehören die Zapfen und die nachgeordneten nervalen Strukturen. Die Zapfen vermitteln das Farbsehen. Bei Lichtintensitäten unter 10^{-1} Lux werden sie nicht aktiviert; Farben können nicht erkannt werden. Das Formsehen ist unter diesen Bedingungen nur über die Bestimmung von Helligkeitsunterschieden möglich. So sagt man, daß im Dunkeln alle Katzen grau sind.

Die Zapfen- und Stäbchenkonzentration ist an verschiedenen Netzhautstellen unterschiedlich hoch. Im sogenannten gelben Fleck – er wird auch als Fovea centralis bezeichnet – ist die Zapfendichte am größten, sie kann bis

1 skotos (griech.): Dunkelheit, Dämmerung; skotopisch: zur Dämmerung gehörig; System, das das Hell-Dunkel-Sehen vermittelt.

2 photos (griech.): Licht; photopisch: zum Licht gehörig; System, das das Farbsehen vermittelt und erst oberhalb einer bestimmten Beleuchtungsstärke aktiviert wird.

zu 2 000 Zapfen je $\frac{1}{10}$ mm² betragen. Stäbchen fehlen in der Fovea centralis. Mit zunehmender Entfernung vom gelben Fleck verringert sich die Zapfenanzahl. Gleichzeitig steigt die Stäbchenkonzentration an. Im Bereich des blinden Flecks existieren weder Zapfen noch Stäbchen. Hier passiert der Sehnerv die Netzhaut.

Die innere Körnerschicht schließt sich der äußeren Körnerschicht an. Sie besteht aus Horizontalzellen und den Bipolaren. Die Bipolaren sind längliche Nervenzellen, die mit mehreren Photorezeptoren verbunden sind und dabei Informationen von mehreren Lichtrezeptoren erhalten. Erst wenn der Informationsfluß, der sie erreicht, eine bestimmte Stärke überschreitet, werden sie aktiv und leiten die Information weiter. Sie haben zwei für das Sehen wesentliche Aufgaben zu erfüllen.

Es ist bereits dargestellt worden, daß die Photorezeptoren durch den lichtbedingten Rhodopsinzerfall ihren Erregungszustand ändern. Rhodopsin zerfällt in geringen Mengen auch spontan. Die Zerfallsrate ist extrem niedrig. Die Wahrscheinlichkeit, daß in einer bestimmten Stäbchenzelle ein Molekül zerfällt, beträgt nur 1:100 Milliarden. Da aber in einer Stäbchenzelle 30 Millionen Rhodopsinmoleküle vorhanden sind, wird alle fünf Minuten in jeder Zelle ein Impuls ausgelöst. Das menschliche Auge besitzt 125 Millionen Stäbchen! Würde jeder Sehimpuls zum Gehirn weitergeleitet werden, so würden wir ständig ein gewaltiges Feuerwerk vor Augen haben. Die Bipolaren sprechen aber nur dann auf Erregungen an, wenn sie gleichzeitig von mehreren Stäbchen Informationen erhalten. Die Informationen, die die Bipolaren von den Stäbchen erhalten, wenn das Rhodopsin spontan zerfällt, werden dadurch abgeblockt. Es ist wenig wahrscheinlich, daß in allen Stäbchen, die mit einer bipolaren Zelle verbunden sind, gleichzeitig Rhodopsin zerfällt.

Die Horizontalzellen der äußeren Körnerschicht nehmen Verbindung zu den Synapsen auf, die sich zwischen den Rezeptoren und den Bipolaren ausgebildet haben. Das hat folgende Bedeutung:

Ein Lichtreiz, der einen begrenzten Netzhautbezirk trifft, erregt ein kleines Kollektiv von Rezeptoren maximal. Die in der Nachbarschaft befindlichen Rezeptoren werden



Eule

nur minimal aktiviert. Dadurch werden die Horizontalzellen im Erregungszentrum maximal stimuliert und hemmen die Bipolaren in der Nachbarschaft. Dieser Vorgang wird als laterale Hemmung bezeichnet. Er ist entscheidend für ein kontrastreiches Sehen. Nur die Informationen von den maximal erregten Lichtrezeptoren werden weitergeleitet und ausgewertet.

An die innere Körnerschicht schließt sich die Schicht der Ganglienzellen an. Sie empfangen die bereits vorverarbeiteten Informationen von den Bipolaren und leiten sie zum Gehirn weiter.

Bei einigen Tierarten, insbesondere bei nachtaktiven Wirbeltieren – dazu gehören z. B. die Katze und verschiedene Eulenarten –, sind in der Pigmentschicht der Netzhaut Farbstoffe eingelagert, die das einfallende Licht nicht resorbieren, sondern reflektieren. Dadurch trifft es zweimal auf die Rezeptoren. Nachttiere sehen dadurch auch noch bei geringen Beleuchtungsintensitäten – die Sehschärfe ist allerdings herabgesetzt.

Wenn die Bilder flimmern

Lichtreize, die in kurzen zeitlichen Abständen auf die Rezeptoren einwirken, werden nicht getrennt, sondern als kontinuierliche Beleuchtung wahrgenommen. Die Ursachen für diese Erscheinung sind komplex. Sie liegen in der relativen Trägheit der Rezeptoren und in der komplizierten Verarbeitung der Informationen in der Großhirnrinde. Der Sinneseindruck, der über die Nervenbahnen

vermittelt worden ist, bleibt längere Zeit erhalten, so daß die nächste Information eintrifft, ohne daß die vorhergehende bereits abgeklungen ist.

Verkürzt man den zeitlichen Abstand zwischen den einwirkenden Lichtreizen, so wird das Licht zunächst flimmernd wahrgenommen. Bei weiterer Steigerung der Reizfrequenz kommt es zu einer völligen Verschmelzung der Lichtimpulse, so daß der diskontinuierliche Lichtreiz kontinuierlich gesehen wird.

Die Höhe der Flimmerverschmelzungsfrequenz hängt von der Beleuchtungsstärke ab. Bei Dämmerlicht, bei dem nur das skotopische System erregt ist, liegt sie bei drei bis zwölf Reizen je Sekunde. Bei hellerem Licht, bei dem vorwiegend das photopische System aktiviert ist, kann sie bis auf Werte um 95 Hz ansteigen. In den Lichtspieltheatern liegt die Verschmelzungsfrequenz – das hängt mit den dort üblichen Beleuchtungsbedingungen zusammen – meistens bei 60 Hz. Im Kinofilm werden aber 24 Bilder je Sekunde gezeigt, so daß ein Hell-Dunkel-Wechsel mit einer Frequenz von 48 Hz vorhanden ist. Um Flimmererscheinungen zu vermeiden, wird zusätzlich eine Dunkelblende verwendet. Dadurch wird jedes Bild zweimal hintereinander gezeigt; die Flimmerverschmelzungsfrequenz ist überschritten.

Der Wechselstrom hat eine Frequenz von 50 Hz, so daß in der Sekunde 100 Hell-Dunkel-Wechsel auftreten. Bei sehr heller Beleuchtung liegt dieser Wert nahe der Flimmerverschmelzungsfrequenz. Flimmern kann insbesondere bei Leuchtstoffröhren auftreten, da bei ihnen das Licht in den Dunkelpausen vollständig erlischt, während bei Glühlampen die Lichtintensität nur um 25% abnimmt.

Adaptation an hell und dunkel

Treten wir aus einem hellerleuchteten Haus in die dunkle Nacht hinaus, so sehen wir zunächst nichts. Nur langsam gewöhnen wir uns an die Dunkelheit, und nach 20 bis 30 Minuten ist eine Dunkeladaptation, d. h. eine Anpassung an die geringe Beleuchtungsintensität, erreicht, die für

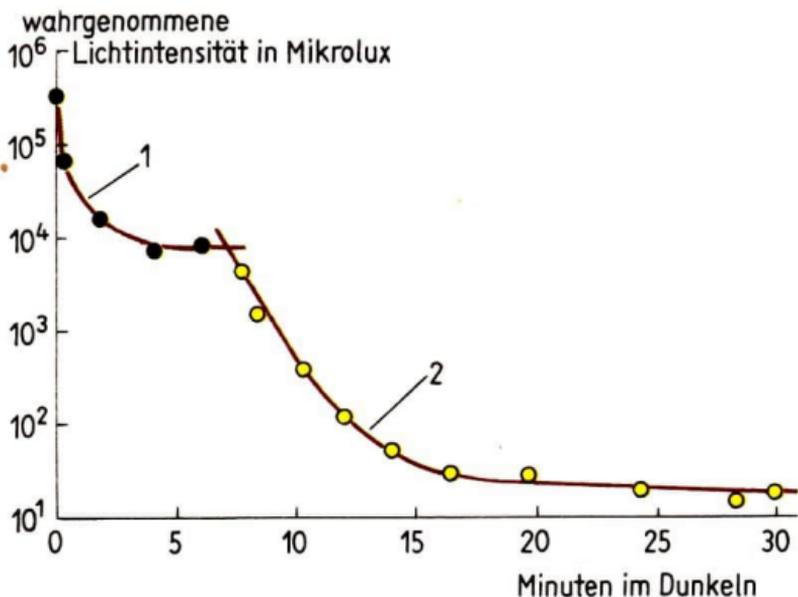
praktische Belange ausreicht. Umgekehrt sind wir zunächst geblendet, wenn wir aus einem dämmerigen Raum in helles Sonnenlicht treten; innerhalb weniger Minuten gewöhnen wir uns aber an das helle Licht. Die Helladaptation erfolgt offensichtlich schneller als die Dunkeladaptation.

Durch die Hell- und Dunkeladaptation wird die gesamte Breite der möglichen Beleuchtungsskala ausgenutzt. Unser Auge kann auch noch unter extremen Beleuchtungsbedingungen bildlich und räumlich sehen.

Die Hell- und Dunkeladaptation erfolgen bei den Säugetieren und den Vögeln grundsätzlich über zwei Mechanismen.

Der Hauptweg der Adaptation ist die Rezeptorenadaptation. Ein Lichtreiz löst am Rezeptor eine Reaktion aus, wenn in den Rezeptorzellen Sehfärbstoff vorhanden ist. Je mehr Sehfärbstoff vorliegt, um so geringer ist die notwendige Lichtintensität, die gerade noch zu einer Lichtwahrnehmung führt. Hohe Lichtintensitäten zerstören den Sehfärbstoff. Erst nach Ablauf einer bestimmten Zeit wird er zurückgebildet. Da der Zeitbedarf der Neubildung der Zapfenfarbstoffe gering ist, ist die Dunkeladaptation der Zapfen innerhalb von sechs bis acht Minuten abgeschlossen. Die Dunkeladaptation der Stäbchen aber ist erst nach acht Stunden beendet.

In der folgenden Abb. ist der Adaptationsverlauf am menschlichen Auge dargestellt. Die Versuchsperson wurde zunächst einem hellen Licht ausgesetzt und anschließend ins Dunkle gebracht. Danach wurde durch farbiges Licht überprüft, welche Lichtintensität gerade noch wahrgenommen werden kann. Der erste Teil der erhaltenen Kurve ist auf die Adaptation der Zapfen zurückzuführen. Mit zunehmender Aufenthaltsdauer im Dunkeln nimmt die Schwellenintensität für farbige Lichtblitze ab. Nach acht Minuten fällt die Schwellenintensität steil ab, jedoch wird der Lichtblitz jetzt nicht mehr farbig gesehen. Offensichtlich ist die Dunkeladaptation des skotopischen Systems zu diesem Zeitpunkt bereits so weit fortgeschritten, daß es den Lichtreiz rezipiert. Mit zunehmender Aufenthaltsdauer im Dunkeln sinkt die Schwellenintensität weiter ab und erreicht nach acht Stunden das Minimum.



Der Adaptationsverlauf am menschlichen Auge. 1 – Wahrnehmen von farbigen Lichtblitzen im Dunkeln durch Adaptation der Zapfen; 2 – Lichtblitze werden nicht mehr farbig gesehen infolge Adaptation der Stäbchen

Schlechte Adaptationsfähigkeit der Stäbchen verursacht die Nachtblindheit. Eine Ursache der Nachtblindheit ist Vitamin-A-Mangel, denn Vitamin A wird zur Synthese des Sehfärbstoffes benötigt.

Die unterschiedliche Adaptationsfähigkeit der Zapfen und der Stäbchen bewirkt z. B., daß beim Blick auf den nächtlichen Himmel die Sterne zu flimmern scheinen. Der Augapfel steht nie still, sondern führt ständig kleine seitliche Bewegungen aus. Fällt das Licht der Sterne auf die Fovea centralis (den gelben Fleck) – das ist der Teil der Netzhaut, auf dem sich die Zapfen in größter Dichte befinden –, so wird es nicht wahrgenommen, weil in der Nacht die Schwellenintensität der Zapfen nicht erreicht wird. Im nächsten Moment fällt das Licht, bedingt durch die schnellen Augenbewegungen, aber auf parafoveale Netzhautgebiete, in denen sich auch Stäbchen befinden. Es wird rezipiert und wahrgenommen. Die Frequenz der Augenbewegungen überschreitet aber die Flimmerverschmelzungsfrequenz nicht, so daß das Licht flimmert.

Die Rezeptorenadaptation wird durch die Pupillenreaktionen wirkungsvoll unterstützt. Eine Pupillenverengung verringert den Lichteinfall auf das Auge. In einem bestimmten Beleuchtungsbereich kann daher – unabhängig von der Beleuchtungsintensität – der Lichteinfall auf die Netzhaut konstant gehalten werden. Die Reizung der Netzhautrezeptoren führt in bestimmten Nervenzentren des Gehirnstammes zu einer Aktivierung vegetativer Nervenfasern. Sie ziehen zu den Muskeln, die sich in der Regenbogenhaut befinden, und lösen entweder am ringförmigen oder am radiär angeordneten Pupillenmuskel eine Kontraktion aus. Kontrahiert der Ringmuskel, so verengt sich die Pupille; zieht sich der radiäre Muskel zusammen, so erweitert sie sich. Die Pupille wird durch das sympathische Nervensystem vergrößert und durch das parasympathische System verkleinert.

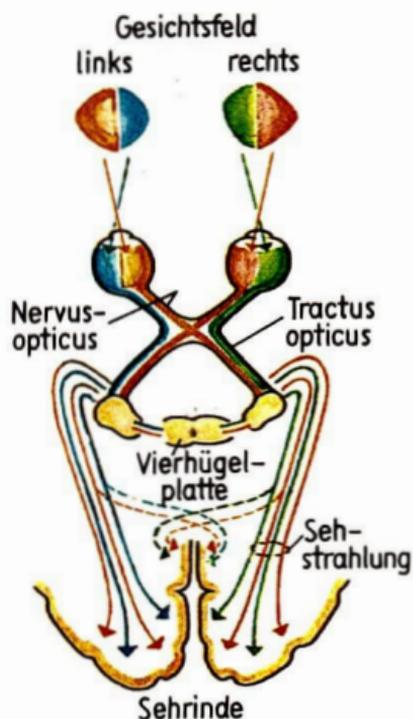
Typisch für das vegetative Nervensystem ist, daß es nach einer Aktivierung nicht nur gezielt Reaktionen an einem Organ, sondern gleichzeitig an verschiedenen Körperstellen auslöst. Jede vegetative Reaktion verändert die Pupillenweite. So verengen z. B. unlustbetonte Affektreaktionen die Pupille. Extrem weit wird sie bei allen akuten Belastungsreaktionen wie beim Schmerz und bei heftigem Erschrecken. Es stimmt also: Bei einem überraschenden Ereignis reißt man die Augen auf.

Farbsehen

Der optische Analysator der Wirbeltiere besteht aus dem Auge, den Sehnerven sowie den zentralnervalen Abschnitten einschließlich der Sehrinde. Er ist in der Lage, elektromagnetische Wellen unterschiedlicher Wellenlänge zu differenzieren. Die verschiedenen Wellenlängen werden subjektiv als Farben wahrgenommen.

Spektralfarben sind elektromagnetische Wellen mit einer definierten Wellenlänge. Weißes Licht kann durch Brechung an einem Prisma in seine Spektralfarben zerlegt werden.

Die gleiche Farbempfindung, die durch Spektralfarben ausgelöst wird, kann auch durch Mischfarben entstehen.

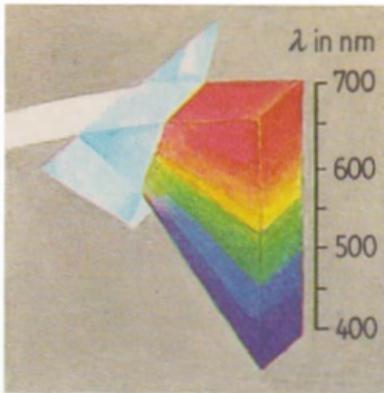


Aufbau des optischen Analysators. Die durch das einfallende Licht erzeugte Erregung in der Netzhaut wird über den Nervus opticus und den Tractus opticus zur Vierhügelplatte des Mittelhirns und über die Sehstrahlung zur Sehrinde des Großhirns geleitet und dort verarbeitet.

Durch Mischung von Licht verschiedener Wellenlängen entstehen Farben, die sich subjektiv nicht von Spektralfarben unterscheiden lassen. Durch die Mischung der Grundfarben Blau, Grün und Rot ist es möglich, alle übrigen Farbtöne herzustellen.

Sehr einfach lassen sich Mischfarben am Farbkreisler erzeugen. Dazu werden auf einem senkrecht stehenden Rotor zwei verschiedenfarbige Papptafeln so befestigt, daß jede Tafel den halben Rotor ausfüllt. Wird der Kreisler über den Rotor in Bewegung gesetzt, so sind bei langsamen Drehbewegungen zunächst beide Farbtafeln noch gut voneinander zu unterscheiden. Bewegt sich der Rotor aber so schnell, daß die Flimmerverschmelzungsfrequenz überschritten wird, so verschmelzen beide Farben zu der entsprechenden Mischfarbe.

Spektralfarben des Sonnenlichtes



Farben sind durch drei Eigenschaften gekennzeichnet: den Farbton, die Sättigung und die Helligkeit.

Der Farbton charakterisiert die psychologisch-physiologische Farbwirkung einer Strahlung, die Sättigung gibt Auskunft über den Weißanteil, und die Helligkeit beschreibt die Strahlungsintensität und die Leuchtdichte.

Die Anzahl der vom Menschen zu unterscheidenden Farbtöne hängt von der Leuchtdichte ab. Wird die Schwelle des photopischen Systems gerade überschritten, so können zunächst nur die Farbtöne Rot, Grün und Blauviolett erkannt werden. Im Bereich des rein photopischen Sehens sind bis zu 200 Farbtöne zu unterscheiden. Berücksichtigt man weiterhin alle denkbaren Unterschiede in der Sättigung und in der Helligkeit, so sind bis zu 60 000 Farbarten zu differenzieren. Mit weiter steigender Leuchtdichte nimmt die Anzahl der Farbtöne wieder ab. Bei maximaler Blendung werden schließlich nur noch Gelb und Blauviolett wahrgenommen.

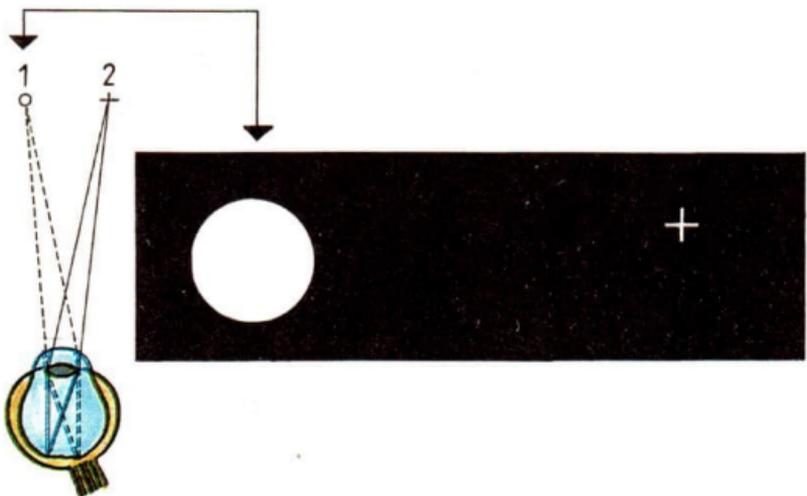
Weißes Licht entsteht, wenn elektromagnetische Wellen verschiedener Wellenlängen gemischt werden. Dazu ist es nicht notwendig, sämtliche Wellenlängen zu verwenden. Bereits durch die Mischung von zwei ausgewählten Spektralfarben kann Weiß entstehen. Die beiden Farben, die sich gegenseitig zu Weiß ergänzen, werden als Gegenfarben bezeichnet.

Ein farbiger Gegenstand, der auf einer hellbeleuchteten Fläche dargestellt ist, wird gleichzeitig – man spricht dann von Simultankontrast – oder, nachdem er von der Fläche

entfernt worden ist – in diesem Falle handelt es sich um einen Sukzessivkontrast –, in der Gegenfarbe wahrgenommen. Goethe, der sich sehr intensiv mit der Farbenlehre beschäftigte, hat diese Erscheinung bereits vor nahezu 200 Jahren beschrieben. »Als ein schöngewachsenes Mädchen mit blendend weißem Gesicht, schwarzen Haaren und einem schwach roten Mieder zu mir ... trat, blickte ich sie ... in der Halbdämmerung scharf an. Indem sie sich nun darauf hinwegbewegte, sah ich auf der mir entgegenstehenden Wand ein schwarzes Gesicht, mit einem hellen Schein umgeben, und die übrige Bekleidung der völlig deutlichen Figur erschien von einem schwachen Meergrün.«

Die analytischen Fähigkeiten des Auges sind geringer als die anderer Sinnesorgane, z. B. des Ohres, ausgebildet. Während man mit dem Ohr die Teiltöne eines Klages heraushören kann – bei einem Akkord sind mühelos Grundton, Terz und Quint zu unterscheiden –, unterscheidet das Auge nicht, aus welchen Komponenten eine Mischfarbe zusammengesetzt ist. Sie ist, unabhängig von den verwendeten Wellenlängenkomponenten, nicht von der entsprechenden Spektralfarbe zu unterscheiden.

Der blinde Fleck. Man schaut mit dem linken Auge (rechtes Auge geschlossen halten!) auf das weiße Kreuz und bewegt das Buch so lange auf das Gesicht zu, bis der Kreis auf der linken Seite nicht mehr zu erkennen ist.



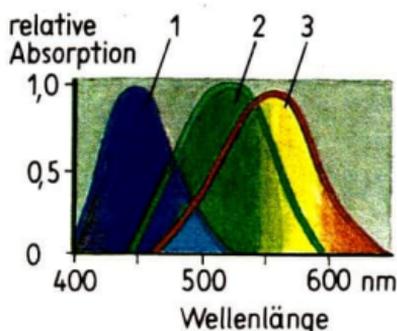
Die synthetischen Eigenschaften des Auges sind dagegen extrem gut entwickelt. Selbst Teile eines Gegenstandes, die auf dem blinden Fleck abgebildet sind, werden noch erkannt.

Um den blinden Fleck nachzuweisen, muß man sich besonderer Methoden bedienen.

Das Farbsehen wird, wie gesagt, ausschließlich durch die Zapfen vermittelt. In den letzten Jahren konnten drei verschiedene Zapfentypen nachgewiesen werden. Sie unterscheiden sich durch die in ihnen enthaltenen Substanzen. Diese Farbsehsubstanzen bestehen, ähnlich wie das Rhodopsin, aus dem 11-cis-Retinal und einer Eiweißkomponente, die für alle Farbsehsubstanzen und das Rhodopsin spezifisch ist. Entsprechend den drei Grundfarben gibt es Rot-, Grün- und Blauzapfen. Das Absorptionsmaximum des Sehfärbstoffes in den Rotzapfen liegt bei 570 nm, in den Grünzapfen bei 525 nm und in den Blauzapfen bei 440 nm. Die Absorptionsspektren der Zapfentypen überschneiden sich. Licht mit einer Wellenlänge von 500 nm beeinflusst den Erregungsvorgang an allen drei Zapfentypen. Der optische Analysator der Großhirnrinde bestimmt aus den Informationen, die ihm aus den drei Zapfenpopulationen zugeteilt werden, die Wellenlänge des einfallenden Lichtes.

Nun wird auch verständlich, warum Mischfarben und Spektralfarben nicht voneinander zu unterscheiden sind. Licht wird immer dann als Licht mit einer bestimmten

Lichtabsorption der Blau-, Grün- und Rotzapfen; 1 – blau- bis violett empfindlich; 2 – grünempfindlich; 3 – rot- bis gelbempfindlich



Farbe analysiert, wenn die kodierte Informationen, die von den Zapfenkollektiven in der Sehrinde der Großhirnrinde eintreffen, eine bestimmte Anordnung und Struktur haben. Dabei ist es gleichgültig, ob der Erregungsgrad der ableitenden Nervenzellen durch elektromagnetische Wellen einer Wellenlänge oder durch Wellengemische mit unterschiedlicher Wellenlänge zustande kommt.

Die Fähigkeit zum Farbsehen ist sowohl für den Menschen als auch für das Tier von erheblicher, z. T. von lebenswichtiger Bedeutung. Tagtiere können sich in der freien Wildbahn nach der Farbe besser als nach Hell-Dunkel-Werten orientieren.

Auch in der industriemäßigen Tierproduktion gewinnt die Farbgestaltung immer mehr an Bedeutung. Ähnlich wie der Mensch bevorzugt das Rind bestimmte Farben. Werden in einer Milchviehanlage, in der 2 000 Kühe stehen, die täglich zweimal zum Melken getrieben werden müssen, Triftwege farbig markiert, so finden die Tiere schneller den Weg aus den Boxen zum Melkstand.

Rinder unterscheiden Spektralfarben, die eine Wellenlängendifferenz von 5 nm haben, mühelos voneinander.

In der modernen Gesellschaft erleichtern Farben die Orientierung. Nicht mehr fortzudenken sind die Verkehrsampeln, die allerdings von Personen mit Farbstörungen nur schwer genutzt werden können. Die häufigste Farbsehstörung des Menschen ist die Rotblindheit. Dabei fallen die Rotzapfen aus. Die Farbtüchtigkeit kann mit Farbtafeln oder mit dem sogenannten Anomaloskop geprüft werden. Dabei muß die Versuchsperson aus Rot und Grün ein bestimmtes Gelb mischen. Ein Rotschwacher benötigt dazu eine zu hohe Rotintensität, ein Grünschwacher zu viel Grün. Ein Rotblinder bezeichnet alle Farben mit einer Wellenlänge von mehr als 520 nm als gelb.

Nicht zuletzt ist zu berücksichtigen, daß Farben eine ästhetische Komponente enthalten. Verschiedene Farbzusammenstellungen werden als harmonisch empfunden und steigern die Lebensfreude. Mehr als bisher sollte diese Tatsache in allen Lebensbereichen berücksichtigt werden. Die Lieblingsfarbe am Arbeitsplatz kann die Stimmung und die Arbeitsfreude – und damit auch die Arbeitsleistung – steigern.

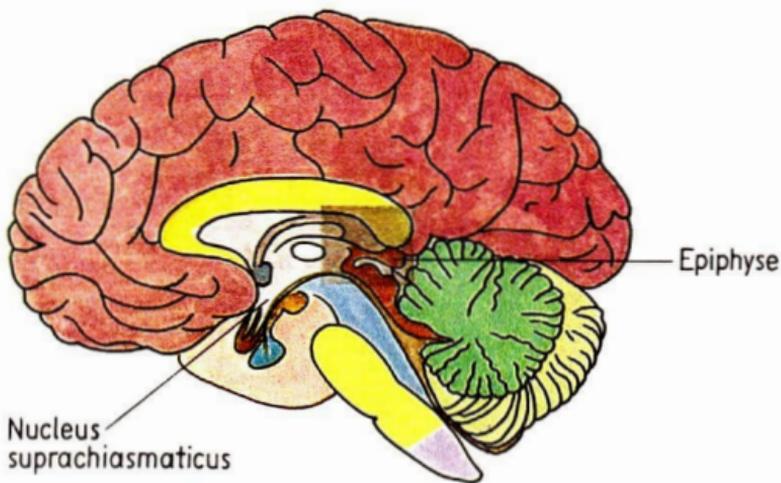
Photorezeptoren nicht nur in der Netzhaut

Bereits im ersten Kapitel wurde dargestellt, daß sich lichtempfindliche Zellen beim Geflügel im Hypothalamus, einem Gehirnteil an der Basis des zentralen Nervensystems, befinden. Diese Rezeptoren haben beim Wassergeflügel und bei allen Vogelarten, die sich zu einer bestimmten Jahreszeit fortpflanzen, eine Bedeutung bei der Steuerung des Fortpflanzungsrhythmus.

Wenn noch verständlich ist, daß beim Geflügel mit der relativ dünnen Schädeldecke die Lichtwellen die Haut des Kopfes und die knöcherne Schädeldecke durchdringen und bis zum Hypothalamus gelangen, so erscheint die Annahme, daß auch bei den Säugetieren der Hypothalamus direkt durch das Licht beeinflußt wird, zumindest etwas fragwürdig. Untersuchungen, die an Schafböcken mit einem guten Wollwachstum durchgeführt wurden, haben jedoch zweifelsfrei bewiesen: Auch bei großen Säugetieren, die einen extrem stark behaarten Kopf besitzen, durchdringt das Licht die Kopfhaut, die Schädeldecke und die Gehirnhäute.

Beim Wassergeflügel leiten bestimmte Teile des Auges die Lichtwellen direkt zum Hypothalamus. Die elektromagnetischen Wellen werden zum großen Teil, nachdem sie die Pigmentepithelschicht, die sich unter der Netzhaut befindet, absorbiert. Am blinden Fleck der Netzhaut tritt der Sehnerv durch die Pigmentzellen hindurch. An dieser Stelle befinden sich keine Pigmentzellen. Die Lichtstrahlen, die auf den blinden Fleck treffen, werden im Sehnerv – ähnlich wie in einem Glasfaserstab – weitergeleitet und bis zur Sehnervenkreuzung unterhalb des Hypothalamus transportiert. Bis zu den lichtempfindlichen Zellen des Hypothalamus ist nur noch ein Weg von wenigen Millimetern zu überwinden.

Die Wirbeltiere besitzen ein weiteres Organ, das lichtempfindliche Zellen enthält – die Zirbeldrüse. Sie wird auch als Corpus pineale oder Epiphyse bezeichnet. Die Drüse liegt am Dach des dritten Gehirnvencrikels und wird nach vorn durch die beiden Großhirnhälften und nach hinten durch das Kleinhirn begrenzt. Sie spielt bei allen

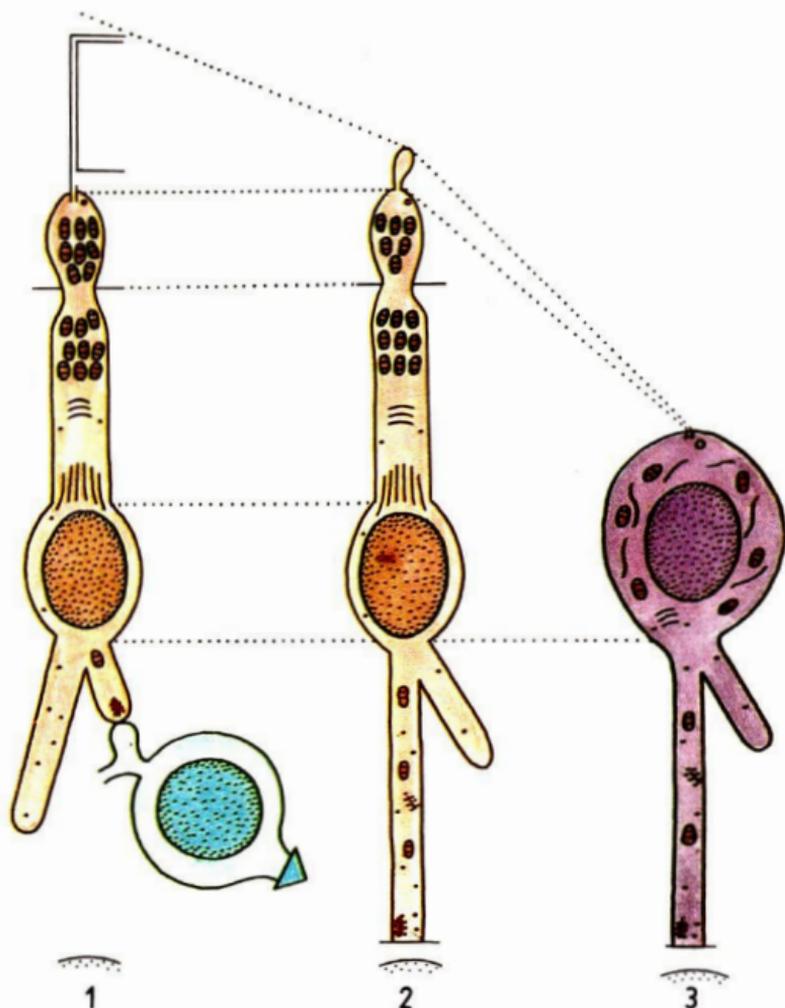


Lage der Zirbeldrüse und des Nucleus suprachiasmaticus

Wirbeltieren bei der Auslösung der Reaktionen auf Lichtreize eine ganz entscheidende Rolle. Im Verlaufe der phylogenetischen Entwicklung ist jedoch ein Funktionswechsel eingetreten. Während sie bei niederen Wirbeltieren, wie beim Neunauge, bei Fischen und Amphibien, photorezeptive Eigenschaften hat, ist sie bei den Säugtieren völlig in eine Hormondrüse umgewandelt worden.

Die Pinealzellen der Fische und der Frösche erfüllen alle Eigenschaften, die an echte Photorezeptoren zu stellen sind. Sie haben einen Rezeptorfortsatz, der sich in ein Innen- und Außenglied unterteilen läßt und in dem sich ein lichtempfindlicher Farbstoff befindet. Der Farbstoff konnte in den letzten Jahren beim Frosch analysiert und isoliert werden. Sein Absorptionsspektrum stimmt weitgehend mit dem Absorptionsspektrum des Rhodopsins überein. Durch die lichtbedingten Strukturänderungen des Rhodopsins wird der Erregungszustand der Rezeptormembran verändert. Die Information wird frequenzmoduliert weitergeleitet. Die Pinealzellen unterhalten nervale Verbindungen mit ableitenden Zellen, so daß die von der Epiphyse aufgenommenen Informationen weitergegeben werden können.

Die Pinealzellen verlieren im Verlaufe der Evolution die Fähigkeit zur Photorezeption. Zunächst bildet sich der Rezeptorfortsatz zurück, bzw. er wird so umgebildet, daß



Zelltypen der Zirbeldrüse. 1 – reiner Photorezeptor (vergleiche Photorezeptoren des Auges in der Abbildung auf S. 69); 2 – zurückgebildeter Rezeptor; 3 – reine sekretorische Pinealzelle

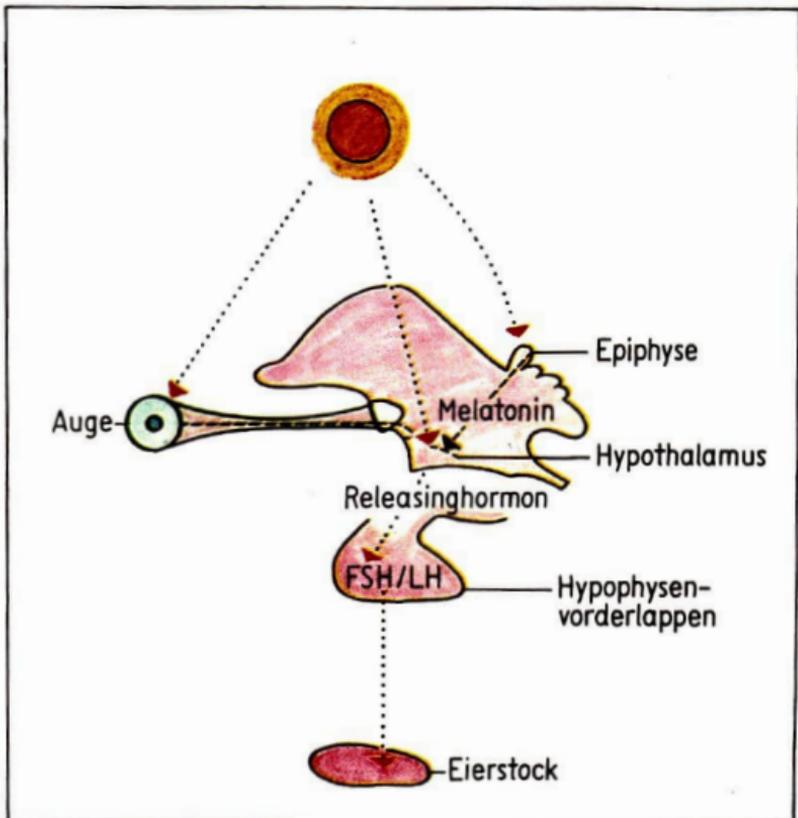
er seine Funktionen nicht mehr erfüllen kann. Schließlich degenerieren die Synapsen. Von der Epiphyse können jetzt keine Informationen mehr fortgeleitet werden.

Prinzipiell sind drei verschiedene Pinealzellformen zu unterscheiden, die in unserer Abbildung oben dargestellt sind. Der erste Typ ist der reine Rezeptor (1). Der zweite Typ hat einen großen Teil seiner Rezeptoreigenschaften verloren (2). Er ist insbesondere nicht mehr in der Lage, empfangene Informationen weiterzuleiten, da er

keine synaptischen Verbindungen zu anderen Zellen besitzt. Pinealzellen dieser Art sind noch in geringem Maße lichtempfindlich. Gleichzeitig haben sie innersekretorische Eigenschaften und bilden das Hormon Melatonin. Der dritte Zelltyp ist die rein sekretorische Pinealzelle, der Pinealozyt (3), er spricht auf direkte Lichtwirkung nicht mehr an.

Während bei den Fischen und Reptilien der erste Typ vorkommt, sind bei den Vögeln Zellen des ersten und des dritten Typs in geringer und des zweiten Typs in großer Anzahl vorhanden. Vögel besitzen eine lichtempfindliche Zirbeldrüse, die die empfangenen Informationen z. T. zum Gehirn leitet und die vor allem aber das Hormon Melatonin

*Möglichkeiten der Hypothalamusbeeinflussung durch das Licht.
FSH – follikelstimulierendes Hormon; LH – luteotropes Hormon*



bildet. Offensichtlich bestehen im Ausbildungsgrad der epiphysären Lichtrezeption bei den verschiedenen Vogelarten erhebliche Unterschiede. Während beim Sperling eine wirksame direkte Lichteinwirkung auf die Epiphyse auszuschließen ist und die Untersuchungsergebnisse bei der Wachtel zumindest zweifelhaft sind, wird die Epiphyse der Entenvögel in bedeutendem Maße durch das Licht beeinflusst. Eine direkte Beleuchtung der Epiphyse von Enten und Erpeln, die ansonsten vollständig im Dunkeln gehalten wurden, regt die Geschlechtsfunktion an.

Bei Säugetieren tritt ausschließlich der dritte Pinealzelltyp auf. Seine hormonelle Funktion wird nicht mehr direkt über das Licht, sondern nur indirekt über nervale Verbindungen, die vom optischen Teil der Großhirnrinde oder vom Hypothalamus ausgehen, beeinflusst. Einzelheiten werden im Kapitel »Licht und Leistung in der Tierproduktion« beschrieben.

Licht bestimmt den Lebensrhythmus

Wenn wir unter Rhythmen Vorgänge verstehen wollen, die sich in bestimmten Zeitabständen wiederholen – die Dauer eines solchen Zeitabstandes wird als Periodendauer bezeichnet –, so ist eine Einteilung anhand der Periodendauer möglich.

Alle Lebensvorgänge im Organismus verlaufen, wie gesagt, rhythmisch. Diese Rhythmen werden als Biorhythmen bezeichnet.

Jedem ist bekannt, daß die Körpertemperatur am Morgen niedriger ist als am Abend. Aber auch die Herzfrequenz, die Atemtätigkeit und nicht zuletzt die Verdauungsvorgänge sind solchen tagesrhythmischen Schwankungen unterworfen. Daraus ergibt sich: Eine Körperfunktion ist nur ausreichend zu beurteilen, wenn neben ihrer absoluten Höhe auch ihr zeitlicher Verlauf bekannt ist. Einen exakt feststehenden Normwert für eine Körperfunktion kann man deshalb nicht angeben.

Die Rhythmizität der Lebensfunktionen ist für den Organismus vorteilhaft. Verändern sich die Umweltbedingungen, so können die Lebensfunktionen nur aufrechterhalten werden, wenn sich der Organismus den neuen Bedingungen anpaßt. Dafür müssen aber bestimmte Körperfunktionen umgestellt werden. Die Umstellung erfolgt um so schneller, je leichter die betreffende Funktion in ihrer Größe verändert werden kann. Sie ist am besten zu beeinflussen, wenn sie sich bereits bei Einwirkung eines Reizes in Bewegung befindet. Die Bewegung ist lediglich zu beschleunigen, um den gewünschten Anpassungseffekt zu erreichen. Rhythmisch schwingende Körperfunktionen befinden sich immer in Bewegung.

Ein Beispiel soll das erläutern.

Ein Wildkaninchen, das von einem Fuchs aufgeschreckt wird, ergreift die Flucht. Die notwendige Muskeltätigkeit erfordert eine erhebliche Umstellung des Kreislaufes. Die Herztätigkeit steigt an, die Blutgefäße in der tätigen Muskulatur erweitern sich, und die Gefäße in den nicht-aktiven Organen beginnen sich zu verengen. Dadurch wird die Muskulatur ausreichend mit Nährstoffen und Sauerstoff versorgt. Die anfallenden Stoffwechselprodukte können abtransportiert werden. Sowohl die Herztätigkeit als auch die Gefäßweite sind extrem schnell zu verändern, weil beide Funktionen rhythmisch mit einer Periodendauer von einigen Minuten fluktuieren. Durch die rhythmischen Änderungen werden die Körperfunktionen ständig trainiert; durch sie befinden sie sich stets in einer Startstellung; sie sind bereit, auf einwirkende Reize unmittelbar und schnell zu reagieren.

In den letzten Jahren hat sich eine eigene Wissenschaftsdisziplin, die Chronobiologie¹, herausgebildet, die sich mit der Entstehung, dem Ablauf, den Folgen sowie der Bedeutung der Biorhythmen für den Organismus beschäftigt. Das Licht beeinflusst den Ablauf der meisten Rhythmusformen, die Ursachen der Rhythmusbildung sind aber direkt im Organismus zu suchen.

Periodik überall

Rhythmen *mit sehr kurzer Periodendauer*, wie die Herzfrequenz und die Atemtätigkeit, werden entweder direkt im entsprechenden Organ oder im übergeordneten Regelzentrum gebildet. Ein isoliertes Froschherz schlägt auch außerhalb des Körpers stundenlang weiter, wenn es feucht gehalten wird. Der Herzrhythmus wird durch die spezifische Herzmuskulatur ausgelöst. Darunter sind Herzmuskelfasern zu verstehen, die sich an der Einmündungsstelle der großen Venen in die rechte Herzvorkammer zu einem Knoten – dem Sinusknoten – verdichtet haben und die

¹ Siehe auch Mletzko/Mletzko: Die Uhr des Lebens. akzent-Reihe, Bd. 62, Leipzig 1982

auch an anderer Stelle des Herzens, wie an der Scheidewand zwischen Kammern und den Vorkammern sowie im Septum, das die beiden Kammern voneinander trennt, vorhanden sind.

Die Zellen des Sinusknotens sind spontan erregbar. Ohne äußere Einflüsse entsteht eine Erregung, die über mehrere Stufen schließlich zur normalen Herzmuskulatur weitergeleitet wird und hier eine Kontraktion auslöst. Die Herzmuskulatur zieht sich zusammen und pumpt das Blut aus den Herzkammern in die Aorta bzw. in die Lungengefäße. Die Stärke und die Schnelligkeit der Erregungsbildung wird zwar nerval über das vegetative Nervensystem und über Hormone beeinflusst, die Erregung entsteht aber prinzipiell ohne äußere Einflüsse.

Interessant ist, daß die rhythmischen Kontraktionen der Herzmuskelzellen nicht zu einem bestimmten Zeitpunkt der embryonalen Entwicklung beginnen, sondern bereits vorhanden sind, sobald sich die ersten Herzmuskelzellen herausgebildet haben. Eine wesentliche Eigenschaft der Herzmuskelzellen ist es, rhythmisch zu kontrahieren – und das schon zu einem Zeitpunkt, zu dem das Herz noch nicht voll entwickelt ist. Die Zellen kontrahieren bereits, wenn die Herzanlage noch ein kompakter Zellknoten ist, wenn also weder Herzkammern noch Blutgefäße am Herzen vorhanden sind. Damit ist die alte Frage nach dem ersten Herzschlag als dem Beginn des Lebens, die in den vergangenen Jahrhunderten sowohl von Naturwissenschaftlern als auch von Philosophen immer wieder gestellt wurde, gegenstandslos geworden. Es gibt keinen ersten Herzschlag.

Rhythmen mit einer Periodenlänge der Herzfrequenz können durch das Licht nicht direkt beeinflusst werden.

Es gibt außer diesen Rhythmen mit sehr kurzer Periodendauer noch mehrere Rhythmusformen, die für die lebenden Organismen von besonderer Bedeutung sind.

Die meisten Körperfunktionen verändern sich rhythmisch mit einer Periodendauer von mehreren Minuten – wir sprechen von den *Minutenrhythmen*. Am bekanntesten sind die Mayer-Wellen. Darunter sind rhythmische Blutdruckschwankungen mit einer Periodendauer von einigen Minuten zu verstehen. Ähnliche Rhythmen treten aber

auch an den Nieren, an verschiedenen endokrinen Drüsen und in der Großhirnrinde auf.

Belastungssituationen verändern bei Mensch und Tier die Rhythmizität. Dadurch werden biologische Rhythmen im Minutenbereich zu empfindlichen Indikatoren für die Beurteilung von funktionellen Zuständen, insbesondere von Belastungssituationen des Organismus. Es ist zu erwarten, daß diese Zusammenhänge, die gegenwärtig intensiv erforscht werden, in den nächsten Jahren in die Praxis von Psychologie und Psychiatrie übergeführt werden können.

Das Licht beeinflusst die Minutenrhythmen nicht direkt. Es übt aber einen wesentlichen Einfluß auf eine andere Rhythmusform, den *zirkadianen Rhythmus*, aus. Zirkadiane Rhythmen sind Prozesse mit einer Periodendauer von etwa 24 Stunden (lat. circa, ungefähr; lat. dies, der Tag). Sie sind für alle Organismen von entscheidender Bedeutung und werden daher in einem gesonderten Kapitel besprochen.

Unter *Lunarrhythmen* faßt man Rhythmen mit einer Periodendauer von etwa einem Monat zusammen. Hierzu gehören der Sexualzyklus des Menschen und der Säugetiere.

Bei weiblichen geschlechtsreifen Säugern wechseln Phasen der Unfruchtbarkeit und der Paarungsbereitschaft rhythmisch mit einer Periodendauer von 21 bis 28 Tagen ab. Dieser Rhythmus wird durch ein im Hypothalamus gelegenes Regelzentrum gesteuert.

Das Sexualzentrum besteht aus zwei Teilen, dem Erotisierungszentrum und dem tonischen Sexualzentrum. Das Erotisierungszentrum ruft bei den Tieren die artspezifischen typischen Erotisierungserscheinungen hervor. Es löst z. B. bei der Kuh die Deckbereitschaft aus und fördert beim Bullen die Libido, und es beeinflusst die Tätigkeit des tonischen Sexualzentrums.

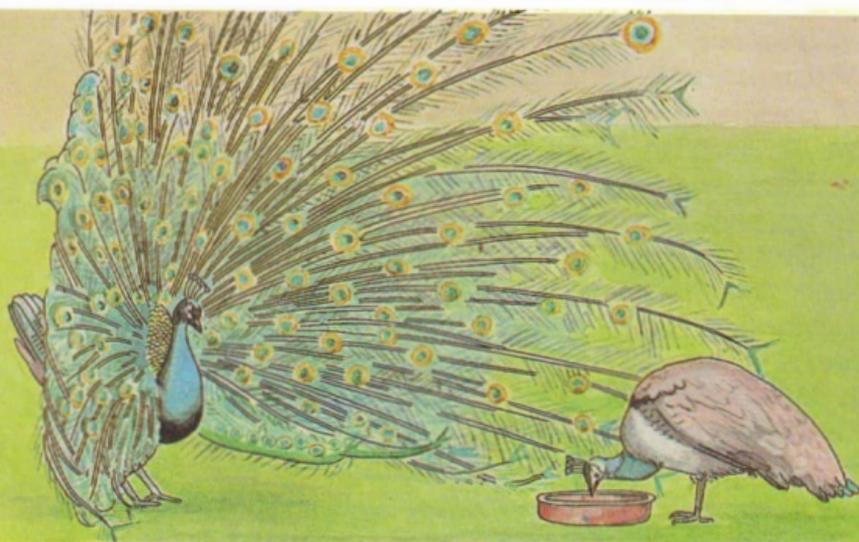
Das tonische Sexualzentrum steht über mehrere Zwischenstufen mit den peripheren Geschlechtsorganen in Verbindung und fördert in den Eierstöcken bzw. in den Hoden die Bildung der weiblichen und männlichen Geschlechtshormone.

Typisch für weibliche Tiere ist, daß das Erotisierungs-

zentrum zyklisch arbeitet. Dadurch treten Erotisierungserscheinungen nur zu bestimmten Zeiten auf. Gleichzeitig wird die Tätigkeit des tonischen Zentrums rhythmisch gesteuert, so daß auch die Hormonbildung in den Keimdrüsen rhythmisch beeinflußt wird. Männliche Tiere besitzen ein kontinuierlich tätiges Erotisierungszentrum.

In der ersten Phase der embryonalen Entwicklung ist das Zentrum noch nicht geschlechtsspezifisch ausgebildet. Erst in einem bestimmten Entwicklungszeitraum – er wird als Determinationsperiode bezeichnet – entscheidet es sich, ob das Zentrum männlich oder weiblich geprägt wird. Unter dem Einfluß der Geschlechtschromosomen differenzieren sich zu diesem Zeitpunkt beim männlichen Tier Zellen heraus, die die männlichen Geschlechtshormone, die Androgene, bilden. Sind zum Determinationszeitpunkt androgene Hormone vorhanden, so wird das Erotisierungszentrum männlich geprägt, fehlen sie, so entsteht ein weibliches Erotisierungszentrum. Experimentell ist es möglich, das Erotisierungszentrum weiblicher Tiere männlich und das männlicher Tiere weiblich zu determinieren. Nach der Pubertät entsprechen dann die Sexualverhaltensweisen der Tiere dem Determinierungsmodus des Ero-

Balzender Pfauenhahn



tisierungszentrums. Männliche Tiere verhalten sich weiblich, weibliche Tiere männlich. Gegenwärtig liegen zahlreiche Beweise dafür vor, daß die menschliche Homosexualität vorwiegend auf eine Fehldeterminierung des Sexualzentrums während der embryonalen Entwicklung zurückzuführen ist.

Der Ablauf des Sexualzyklus läßt sich durch Licht beeinflussen.

Biologische Rhythmen mit einer Periodendauer von einem Jahr werden als *zirkannuale* Rhythmen (lat. annus, das Jahr) bezeichnet. Sie treten besonders deutlich in der Fortpflanzungsperiodik der meisten Wildtiere, aber auch bei einigen Haustieren, wie z. B. beim Wassergeflügel, auf. Auch Jahresrhythmen sind endogen bedingt, werden aber durch das Licht in entscheidendem Maße beeinflußt.

Tiere mit einem Jahresrhythmus der Sexualfunktion werden gewöhnlich zu einem Zeitpunkt sexuell aktiv, der bei den Säugetieren von der Trächtigkeitsdauer und bei den Vögeln von der Brutzeit bestimmt wird.

Bei den Vögeln setzt ausgangs des Winters oder im zeitigen Frühjahr die Fortpflanzungssaison ein. Bei den männlichen Tieren beginnen die Hoden zu wachsen, und bei den weiblichen Tieren vergrößern sich die Follikel in den Eierstöcken. Der Stoffwechsel wird angeregt, und Dottersubstanzen werden in verstärktem Maße in die Eizellen eingelagert. Die weiblichen Tiere sind jetzt paarungsbereit und beginnen schließlich mit der Eiablage.

Meistens endet die Legeperiode bereits ausgangs des Frühjahrs, also zu einem Zeitpunkt, an dem die Tage entweder noch zunehmen oder zumindest noch nicht deutlich abgenommen haben.

Enten haben, obwohl sie bereits seit 2000 Jahren domestiziert sind, ein ähnliches Paarungsschema wie die wildlebende Stammform, die Stockente. Sie eignen sich daher hervorragend zu Modellversuchen über den Einfluß der Jahreszeit und des Lichtes auf die Fortpflanzungstätigkeit der Vögel.

Dr. Benoit – über ihn wurde von uns bereits im ersten Kapitel berichtet – hielt eine Erpelgruppe über mehrere Jahre unter natürlichen Lichtbedingungen und eine andere bei vollständiger Dunkelheit. Lediglich während der Fut-

terzeiten wurde blaues Licht eingeschaltet, von dem bekannt ist, daß es die Fortpflanzung nicht beeinflußt, wenn es nur über die Augen und nicht direkt auf den Hypothalamus einwirkt. In Abständen von einer Woche wurde die Hodengröße der Tiere als Maß für die Fortpflanzungsfähigkeit röntgenologisch bestimmt.

Es zeigte sich, daß bei beiden Tiergruppen die Hodengröße durch die Jahreszeit beeinflußt werden kann. Während aber bei der in Freilandhaltung lebenden Erpelgruppe das Hodenwachstum in jedem Jahr zum gleichen Zeitpunkt eingeleitet wurde, also synchron mit den Jahreszeiten verlief, verschob sich bei der im Dunkeln gehaltenen Tiergruppe der Zeitpunkt des maximalen Hodenwachstums von Jahr zu Jahr. Außerdem bildete sich im Verlaufe von drei Jahren eine zweigipflige Hodenwachstumskurve heraus. Nachdem der Hodendurchmesser ein Maximum erreicht hatte, verkleinerte sich der Hoden wieder und begann nach einigen Monaten, sich zum zweitenmal zu vergrößern. Die Periodendauer betrug etwa 150 Tage.

Diese Untersuchungen zeigen mit aller Deutlichkeit, daß bei den Enten ein deutlicher endogen bedingter Jahresrhythmus der Fortpflanzung vorhanden ist, auch dann, wenn die Tiere nicht in der Lage sind, die Jahreszeit festzustellen. Durch das Licht, insbesondere durch die absolute Beleuchtungsdauer, aber auch durch die zunehmende und abnehmende Tageslänge wird der endogene Rhythmus mit dem natürlichen Jahreszeitenrhythmus synchronisiert. Ein Wegfall des Zeitgebers Licht führt zur Desynchronisation, so daß nach mehreren Perioden schließlich eine Phasenverschiebung zwischen beiden Schwingungen auftritt. Die Lichtwirkung ist bei Enten so stark, daß der endogene Rhythmus mit einer Periodendauer von 150 Tagen in eine Schwingung mit einer Periodendauer von 365 Tagen umgewandelt werden kann.

Zirkadianer Rhythmus

Die meisten Körperfunktionen des tierischen und menschlichen Organismus, z. T. auch der Pflanzen, schwingen in einem Rhythmus mit einer Periodendauer von 24 Stunden.

Dieser Rhythmus ist wie der Minuten- und der Jahresrhythmus endogen bedingt. Umweltfaktoren wirken als Zeitgeber. Sie synchronisieren die verschiedenen im Organismus nebeneinander schwingenden Rhythmen und stimmen die Maxima und Minima der Körperfunktionen aufeinander ab. Gleichzeitig stellen sie die Periodendauer der Rhythmen auf exakt 24 Stunden ein. Hauptzeitgeber ist das Licht. Bereits geringe Helligkeitsänderungen, die rhythmisch wiederkehren, sind als Zeitgeber ausreichend wirksam. So hielten sich Versuchspersonen mehrere Wochen lang ohne Verbindung zur Außenwelt in einem schalldichten Bunker auf. Sie konnten sich den Tagesablauf selbständig einteilen; allerdings mußten sie bei Dauerbeleuchtung leben. Man erwartete eine Desynchronisation aller Körperfunktionen nach Ausschaltung des Hauptzeitgebers. Erstaunt stellte der Versuchsleiter fest, daß bei allen Testpersonen die Körperfunktionen, die telemetrisch über Sender gemessen und registriert wurden, weiter synchronisiert im 24-Stunden-Rhythmus schwangen. Eine Überprüfung der Beleuchtungsanlage ergab, daß die Spannung im Stromnetz während der abendlichen Spitzenbelastungszeiten um 25 Volt abfiel. Die damit verbundene Verringerung der Beleuchtungsstärke in den Versuchsräumen löste bereits die Synchronisation aus. Nach Einschaltung eines Spannungskonstanthalters in das Stromnetz erreichte man die erwartete Desynchronisation. Jede gemessene Körperfunktion stellte sich auf eine für die betreffende Funktion typische Periodendauer von 23,4 bis 24,5 Stunden ein. Im Verlaufe von wenigen Tagen entstanden dadurch erhebliche Phasenverschiebungen zwischen den Funktionen. In den Untersuchungen wurden unter anderem die Körpertemperatur und die motorische Aktivität gemessen – zwei Größen, die scheinbar ursächlich miteinander gekoppelt sind. Unter natürlichen Lebensbedingungen ist die Körpertemperatur zum Zeitpunkt der höchsten motorischen Aktivität am größten. Bei Ausschluß aller Zeitgeber traten so große Phasenverschiebungen auf, daß bereits nach wenigen Tagen die Körpertemperatur während der minimalen motorischen Aktivität am höchsten war.

Neben dem Hauptzeitgeber Licht synchronisieren auch

andere Umweltfaktoren die zirkadianen Rhythmen. Werden blinde Ratten täglich zum gleichen Zeitpunkt gefüttert, so schwingen ihre Rhythmen synchron. Erfolgt die Fütterung jedoch aus Vorratsbehältern, die innerhalb von drei Wochen nur einmal gefüllt werden, so schwingen sämtliche Rhythmen mit einer Eigenfrequenz; es sind freischwingende Rhythmen entstanden. Tiere und Menschen mit frei schwingenden Rhythmen sind weniger belastungsfähig, weil ihre Körperfunktionen nicht aufeinander abgestimmt sind.

Unter natürlichen Bedingungen ist kaum mit einer Desynchronisation der Rhythmen zu rechnen. In vergangenen Jahren ist von langen Höhlenaufenthalten ohne Kontakt zur Umwelt berichtet worden. Ein solcher Aufenthalt ist für den Forscher nicht nur deshalb strapaziös, weil er keinen Kontakt zu anderen Menschen aufnehmen kann, sondern auch, weil seine endogenen zirkadianen Rhythmen vollständig desynchronisiert werden. Das Zeitgefühl geht verloren. Bei Aufenthalten in der Orbitalstation Salut wird die Desynchronisation unter anderem auch dadurch verhindert, daß die Besatzung regelmäßig und pünktlich Kontakt zur Bodenstation aufnimmt und täglich zum gleichen Zeitpunkt das umfangreiche Arbeitsprogramm absolviert.

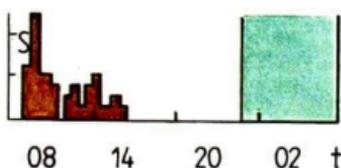
Wo liegt der Schrittmacher?

Nachdem als gesichert gelten konnte, daß die zirkadianen Rhythmen endogen entstehen, gewann die Frage nach dem Ort der Rhythmusbildung zunehmend an Bedeutung. Bisher ist es nicht möglich, ein umfassendes und zusammenhängendes Bild über dieses Problem zu geben. Soviel ist sicher: Der Organismus verfügt über zahlreiche Schwingungssysteme. Er ist ein multi-oszillatorisches System, das über das Licht synchronisiert wird. Es sind Vorstellungen entwickelt worden, aus denen hervorgeht, daß alle Körperfunktionen stark gedämpfte Schwingungssysteme darstellen, die ständig durch einen Schrittmacher angestoßen werden müssen. Bleibt der Anstoß aus, so nimmt die Amplitude der Schwingungen innerhalb weniger

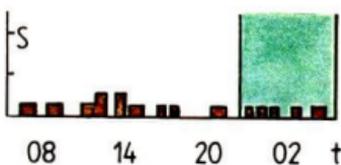


Die Schlupfzeiten der Schmetterlingsarten *Hyalophora cecropia* (links) und *Antheraea pernyi* (rechts) sind durch Manipulation am Gehirn beeinflussbar. S – Anzahl der Schlupfe je Stunde; t – Tageszeit

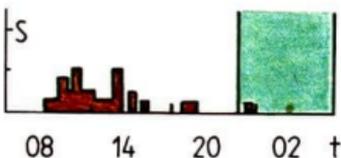
unbehandelt



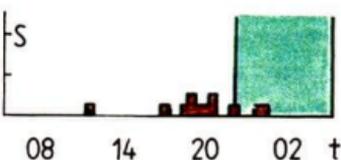
gehirnlos



nach Gehirnplantation
in die Bauchregion



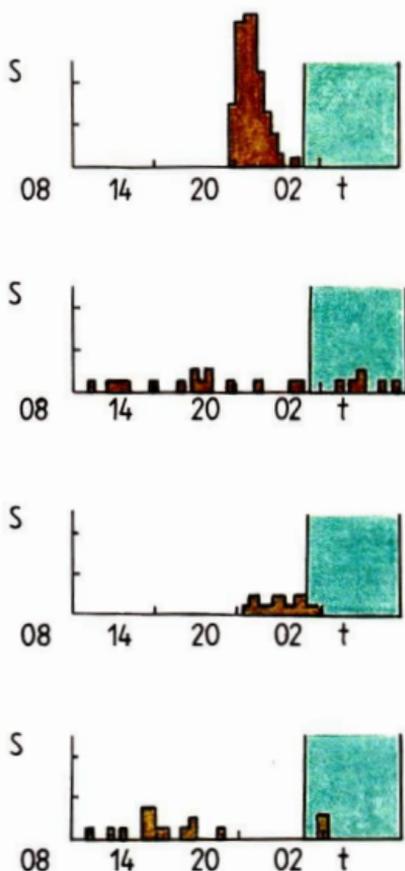
nach Gehirnaustausch
zwischen beiden Arten



Tage ab, bis sich die Körperfunktion schließlich nicht mehr rhythmisch verändert. Strukturen, die als Hauptschrittmacher in diesem Prozeß fungieren können, sind bei den verschiedenen Tierklassen an verschiedenen Körperstellen nachgewiesen worden. Ihre exakte Bedeutung für die Ausbildung der Rhythmen ist nicht in allen Fällen klar.

Das Gehirn der Schmetterlingsraupen

Raupen verschiedener exotischer Schmetterlingsarten sind robuste Tiere, die auch extreme operative Eingriffe gut vertragen. Gehirntransplantationen sind ohne weiteres möglich. Die Gehirne wachsen an der Einpflanzungsstelle gut ein, bilden aber keine Nervenverbindungen zu den Organen heraus. Das Gehirn tritt über



hormonelle Mechanismen mit der Körperperipherie in Verbindung.

Die ausgewachsenen Schmetterlinge schlüpfen zu einer bestimmten Tageszeit aus den Puppen. Die zirkadiane Schlupfrhythmik ist streng artspezifisch. Während bei einem Hell-Dunkel-Verhältnis von 17H:7D *Hyalophora cecropia* in den Morgenstunden – wenige Stunden nach Beleuchtungsbeginn – schlüpft, schlüpfen die Vertreter der Art *Antheraea pernyi* in den späten Nachmittagsstunden. Der Zeitgeber für den Schlupf befindet sich im Gehirn der Raupen. Entfernt man den Tieren nach der Kokonbildung das Gehirn, so bleiben sie am Leben, schlüpfen aber ohne erkennbaren Rhythmus. Wird das Gehirn aus dem Vorderende der Tiere entfernt und im Bauchbereich implantiert, so beeinflusst diese Operation den Schlupfrhythmus nicht. Vertauscht man die Gehirne beider Arten untereinander, so bestimmt der Gehirnsponder den Schlupfzeitpunkt. Zekropia-Tiere schlüpfen in den Abendstunden, wenn sie ein Pernyi-Gehirn implantiert erhalten haben.

Ein Schrittmacher für den zirkadianen Rhythmus ist aber nicht nur dadurch gekennzeichnet, daß er in einem Eigenrhythmus schwingt – er muß auch in seiner Aktivität durch das Licht beeinflussbar sein. Der Schrittmacher im Gehirn der Seidenraupen erfüllt diese Anforderungen.

Bei einer Zekropia-Versuchsgruppe wurde das Gehirn in den hinteren Bauchbereich transplantiert. Die zweite Gruppe blieb als Kontrollgruppe unbehandelt. Die Tiere beider Gruppen wurden so fixiert, daß Vorder- und Hinterende unabhängig voneinander beleuchtet werden konnten. In den Untersuchungen stand das Vorderende zwischen 9 und 21 Uhr, das Hinterende zwischen 21 und 9 Uhr unter Lichteinwirkung. Befand sich das Gehirn im Vorderende der Raupen, so schlüpfen die Tiere gegen 14 Uhr, also einige Stunden nach Beginn der Beleuchtungsperiode. Tiere, denen das Gehirn in den Bauchbereich übertragen worden war, schlüpfen ebenfalls einige Stunden nach Beginn der Beleuchtung des hinteren Kokonendes, also gegen 2 Uhr.

Das Gehirn der Schmetterlingsraupen hat bei der Steuerung des Schlupfes drei Aufgaben zu erfüllen. Es besitzt

Photorezeptoren, die den Beleuchtungszustand analysieren, und es enthält den endogenen Zeitgeber, dessen Tätigkeit durch die Photorezeptoren beeinflusst wird. Schließlich sind im Gehirn hormonbildende Zellen vorhanden, die unter dem Einfluß des Schrittmachers das Schlupfhormon produzieren und es in den Organismus absondern.

Die Zirbeldrüse der Vögel

Die Zirbeldrüse ist ein wesentlicher Bestandteil des Schrittmachersystems bei den Vögeln. Entfernt man sie und hält man die Tiere im Dunkeln, so entsteht innerhalb von sieben und acht Tagen eine Arrhythmie. So wird z. B. der Rhythmus der motorischen Aktivität von Tag zu Tag schwächer, bis er schließlich ganz verschwindet. Werden Vögel ohne Zirbeldrüse im Hellen gehalten, so reagieren sie entsprechend dem Lichtregime. Diese Versuchsergebnisse können zwanglos erklärt werden, wenn man annimmt, daß die Vögel an anderen Stellen des Organismus – wahrscheinlich im Gehirn – gedämpfte Oszillatoren besitzen, die entweder durch den Schrittmacher oder durch das Licht angetrieben werden. Werden das Licht und der endogene Schrittmacher ausgeschaltet, so schwingen die Oszillatoren so lange, bis sie vollständig gedämpft sind. Bleibt einer der beiden Antriebe erhalten, so treten weiterhin zirkadiane Rhythmen auf.

Wird die Zirbeldrüse denerviert, so bilden sich bei den Vögeln frei schwingende Rhythmen aus. Offensichtlich kann die Zirbeldrüse nicht mehr ausreichend über den Beleuchtungszustand des Organismus informiert werden, stimuliert aber die Oszillatoren noch durch das von ihr gebildete Hormon Melatonin.

Der nachfolgend beschriebene Versuch verdeutlicht, daß sich in der Zirbeldrüse ein Schrittmacher des zirkadianen Systems befindet. Entfernt man die Zirbeldrüse und hält man die Vögel im Dunkeln, so bildet sich innerhalb weniger Tage eine Arrhythmie heraus. Transplantiert man jedoch diesen Tieren die Zirbeldrüse anderer Vögel in die vordere Augenkammer, so treten innerhalb von 48 Stunden erneut frei schwingende Rhythmen auf. Sie bleiben meh-

rere Monate lang erhalten und verschwinden innerhalb einiger Tage, wenn die Augen entfernt werden.

Die Enzymaktivität in der denervierten und transplantierten Zirbeldrüse zeigt einen ausgeprägten zirkadianen Rhythmus. Auch der Melatoninspiegel des Blutes schwankt im Sinne einer 24-Stunden-Periodik. Die Verbindung zwischen der Zirbeldrüse und dem übrigen Organismus wird über dieses Hormon aufrechterhalten. Durch Melatonininjektionen kann bei arhythmischen Tieren ein zirkadianer Rhythmus erzeugt werden.

Die Beweislast der angeführten Untersuchungsergebnisse ist so groß, daß keine andere¹ Schlußfolgerung möglich ist – der Schrittmacher oder, vorsichtiger ausgedrückt, der Hauptschrittmacher der zirkadianen Periodik der Vögel befindet sich in der Zirbeldrüse.

Rhythmusentstehung bei Säugetieren

Ein kleines, eng umschriebenes Kerngebiet, das sich in unmittelbarer Nachbarschaft der Sehnervenkreuzung im Hypothalamus befindet (s. Seite 8), scheint das Zentrum für die Auslösung der zirkadianen Rhythmen bei Säugetieren zu sein. Bei der Ratte hat es einen Querdurchmesser von 300 bis 350 μm und einen Längsdurchmesser von 600 μm . Das Kerngebiet enthält etwa 10 000 kleine, dicht an dicht liegende Nervenzellen. Sie sind durch kurze Querfortsätze miteinander verbunden. Das Kerngebiet erhält über drei Nervenbahnen Informationen über den Lichtrhythmus in der Außenwelt. Es steht über eine direkte Bahn mit der Netzhaut des Auges in Verbindung und wird außerdem vom optischen Teil der Großhirnrinde sowie von bestimmten Abschnitten des subkortikalen Gebietes des Großhirns beeinflußt. Zerstört man das Kerngebiet durch Elektrokoagulation, so erlöschen bei den meisten Säugetieren die zirkadianen Rhythmen. Bleiben Teile des Kerngebietes erhalten, so entstehen Restrhythmen mit einer Periodendauer von acht bis zwölf Stunden. Wird die Verbindung zwischen der Netzhaut und dem Kerngebiet zerstört, so bleiben die zirkadianen Rhythmen zwar desynchronisiert, trotzdem aber frei schwingend erhalten.

Die Untersuchungen über die Ursachen und die Auslösung der zirkadianen Rhythmen befinden sich erst im Anfangsstadium. Es muß noch viel Forschungsarbeit geleistet werden, um endgültige Aussagen über den Entstehungsmechanismus der Rhythmen treffen zu können. Der gegenwärtige Forschungsstand ist durch einen Vergleich zu charakterisieren: Wir wissen heutzutage über den Entstehungsmechanismus der zirkadianen Rhythmen etwa soviel, wie jemand über die Funktionsweise eines elektronischen Rechners ermitteln kann, wenn er sie mit Zange, Hammer und Schraubenzieher ergründen will.

Noch ist eine intensive und zielgerichtete Grundlagenforschung auf diesem Gebiet zu leisten, um einen entsprechenden wissenschaftlichen Vorlauf für die Praxis zu schaffen.

Bald nicht mehr: dreimal täglich!

Von entscheidender Bedeutung für die Behandlung erkrankter Menschen und Tiere ist es, daß auch die Empfindlichkeit des Organismus gegenüber Medikamenten und Giften tagesrhythmischen Schwankungen unterworfen ist. Untersuchungen zu dieser Fragestellung wurden erstmals an Mäusen durchgeführt. Man ermittelte bei den Tieren diejenige Dosis eines Arzneimittels oder Giftes, die bei 50% der behandelten Tiere tödlich wirkt. Diese Dosis wird in der Pharmakologie und in der Toxikologie LD_{50} genannt.

Wurde die gleiche Alkoholmenge, die in den Mittagsstunden bei 50% der Versuchstierpopulation den Tod verursacht, jedoch Mäusen des gleichen Stammes in den Abendstunden eingegeben, so überlebten nahezu alle Tiere die Alkoholvergiftung. Bei einer Wiederholung des Versuches in den frühen Morgenstunden starben alle Tiere. In weiteren Untersuchungen wurde dann bewiesen, daß der Organismus gegenüber allen Medikamenten eine tagesrhythmisch schwankende Empfindlichkeit aufweist.

Diese Untersuchungsergebnisse veranlaßten zu Überlegungen über die effektivste Dosierungsweise von Me-

dikamenten. Noch ist es jedem geläufig: Auf dem Rezept schreibt der Arzt auf, daß ein Medikament zwei- oder dreimal täglich in der gleichen Dosierung zu nehmen ist. Dabei werden die tagesrhythmischen Unterschiede in der Medikamentenverträglichkeit nicht berücksichtigt. Viel effektiver wäre es, Medikamente zu den Tageszeiten einzunehmen, zu denen der Organismus besonders empfindlich auf die Arzneimittel anspricht. Diese Tageszeit ist für die einzelnen Medikamente verschieden, so daß es einige Mühe bereitet, die optimale Einnahmezeit für alle Medikamente zu ermitteln. Bei Prednisolon, einem Derivat der Hormone der Nebennierenrinde, hat sich die rhythmusabhängige Dosierung bereits weitgehend durchgesetzt – es wird nur in den Morgenstunden verabreicht. Mit dieser Applikationsform wird der gleiche therapeutische Effekt erreicht wie bei dreimaligem Verabreichen am Tag im Abstand von acht Stunden. Gleichzeitig wird ein Teil der Nebenwirkungen ausgeschaltet, die sich bei langzeitiger Einnahme einstellen. Die einmalige Medikamenteneinnahme zum gleichen Tageszeitpunkt – vielleicht vor oder nach dem Frühstück – ist für den Patienten angenehmer und kann wohl kaum vergessen werden.

Nicht zu übersehen ist, daß auch die Chronopharmakologie, wie alle Gebiete der Chronobiologie, noch in den Kinderschuhen steckt.

Reisen um den Erdball

Wir wollen uns erinnern: Zirkadiane Rhythmen sind endogen bedingt. Der innere Schrittmacher bestimmt die Amplitude des Rhythmus – durch exogene Zeitgeber wird lediglich die Periodendauer auf exakt 24 Stunden eingestellt. Die verschiedenen zirkadianen Rhythmen des Organismus werden aufeinander abgestimmt – sie werden synchronisiert.

Unternehmen wir eine weite Reise mit der Bahn, dem Flugzeug oder dem Schiff, so ändert sich der Lichtrhythmus mit zunehmender Entfernung erheblich. Innerhalb kurzer Zeit wird die Phasendifferenz zwischen der Schwingung des Hell-Dunkel-Rhythmus und der endoge-

nen zirkadianen Schwingung ausgeglichen. Besonders ein-drucksvoll lassen sich diese Phasenverschiebungen dar-stellen, wenn die täglichen Veränderungen im Hell-Dunkel-Wechsel nur langsam erfolgen, etwa bei einer Reise mit der Transsibirischen Eisenbahn von Moskau nach Wladiwostok. Untersuchungen zu dieser Fragestellung sind von sowjetischen Physiologen bereits in den dreißiger Jahren durchgeführt worden. Sie wählten zirkadiane Rhythmen der Körpertemperatur als Modell für andere biologische Rhythmen. Die Körperkerntemperatur hatte zwischen 4 und 6 Uhr ein Minimum. Gleichzeitig war zu diesem Zeitpunkt der Energieumsatz der Versuchspersonen am geringsten. Mit Beginn der Reise von Westen nach Osten begann sich das Minimum der Körperkerntempe-ratur zu verlagern. Während es am ersten Reisetag noch bei 4 Uhr Moskauer Zeit lag, hatte es sich am siebten Reisetag bereits um viele Stunden zurück auf 22 Uhr verlagert. Nimmt man als Bezugszeit die Ortszeit, so ver-änderte sich die Lage des Minimums der Körperkerntem-peratur nicht – die Versuchspersonen hatten stets zwis-chen 4 und 6 Uhr Ortszeit die tiefste Körpertemperatur.

Die kurzfristige Synchronisation von exogenem Hell-Dunkel- und endogenem Körpertemperatur-Rhythmus war unter den Bedingungen dieser Eisenbahnreise nur dadurch möglich, daß sich nicht nur der Hauptzeitgeber Licht, sondern auch alle anderen Zeitgeber, wie z. B. Essens-zeiten, Aktivität der Bevölkerung auf den Bahnstationen, Empfang der örtlichen Rundfunkprogramme usw., mit zunehmender Entfernung von Moskau veränderten.

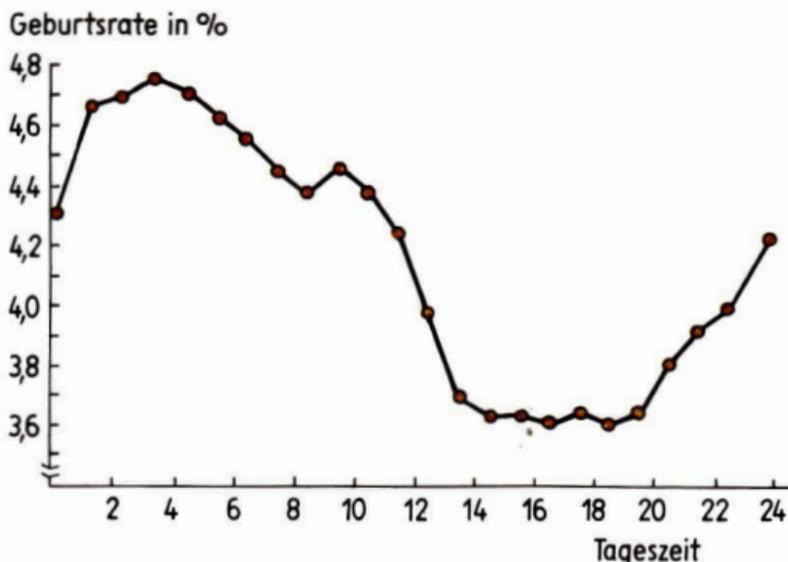
Wird eine Entfernung innerhalb weniger Stunden in einem Überschallflugzeug überbrückt, so können bei den Reisenden Anpassungsschwierigkeiten an den neuen Le-bensrhythmus auftreten. Sie werden zwar meist innerhalb weniger Tage überwunden, aber erst dann, wenn endogene Rhythmen und Zeitgeber wieder synchron zueinander verlaufen, ist der Organismus maximal belastungsfähig. Nicht umsonst reisen Sportler zu Wettkämpfen, die weit östlich oder westlich unseres Staates stattfinden, mehrere Tage vor Beginn der Veranstaltung an. Dadurch können sich die Rhythmen bis zum Wettkampfbeginn synchroni-sieren. Daß dann hohe Leistungen zu erwarten sind, haben

unsere Spitzensportler in den letzten Jahren in Japan, Mexiko, Kanada und nicht zuletzt bei den Olympischen Winterspielen in Lake Placid bewiesen.

Wird der Hauptzeitgeber, der Hell-Dunkel-Wechsel, nur unvollkommen und werden einige Nebenzzeitgeber nicht verändert, so verbleiben die endogenen zirkadianen Rhythmen des Organismus in der alten Phasenlage, obwohl die Umwelt andere Anforderungen an die Reaktionsweise des Organismus stellt. Eine solche Situation tritt z. B. bei Nachtarbeit auf. Der häusliche soziale Lebensrhythmus des Nachtarbeiters, die nur unvollkommene Verdunklung der Wohnung während der Schlafenszeit am Tage, die in die Wohnung eindringenden Geräusche von der Straße und aus den Nachbarwohnungen sowie eine Palette weiterer Umweltfaktoren bewirken, daß die Körperfunktionen trotz der Nachtarbeit in der alten Phasenlage weiter-schwingen. Dadurch stellt sich der Organismus schwer oder unvollkommen auf die körperliche Belastung während der Nachtarbeit ein, und die Leistungsfähigkeit ist herabgesetzt. Nachtarbeit belastet den Menschen, auch wenn man sich in langen Jahren scheinbar daran gewöhnt hat. Unsere Regierung hat diese Tatsache in der Gesetzgebung berücksichtigt und u. a. den Grundurlaub für Schichtarbeiter verlängert.

Tageszeit und Geburt

Die Geburten verteilen sich nicht gleichmäßig über den Tag. Menschliche Säuglinge werden zumeist in den frühen Morgenstunden geboren. Ein ähnlicher Zeitpunkt der Geburten scheint bei der Katze und beim Schaf vorzuliegen. Das Alpaca, eine Kamelidenart, die unter extremen, unwirtschaftlichen Bedingungen in den Anden Südamerikas lebt, bringt seine Jungen ausschließlich zwischen 6 und 11 Uhr zur Welt. Alpacas verzögern aber die Geburt bis um 48 Stunden, wenn Neuschnee oder Regen fällt. Sie erleichtern damit über einen bisher unbekanntem Mechanismus den Neugeborenen das Überleben. An Ratten, die am Tage ihre Jungen zur Welt bringen, wurde nachgewiesen, daß der Geburtszeitpunkt durch das Licht bestimmt wird



Zirkadianer Rhythmus der Geburtenverteilung beim Menschen

und den Gesetzmäßigkeiten eines zirkadianen Rhythmus gehorcht.

Von einer größeren Rattenpopulation, die bis zum zwölften Trächtigkeitstag in England gehalten wurde, wurden Tiere mit dem Flugzeug innerhalb weniger Stunden nach Teheran, Kalkutta, Peking oder Seattle gebracht, also nach Orten, die rund um den Erdball verteilt sind, deren Zeitregimes sich von denen des Ausgangsortes bis um minus acht oder plus acht Stunden unterscheiden. Der Geburtszeitpunkt wurde durch das Lichtregime am Geburtsort bestimmt. In jedem Fall erfolgten die meisten Geburten während des Tages. Die Trächtigkeitsdauer der Ratten war in Peking um etwa 16 Stunden gegenüber Seattle in den USA verlängert. Zwischen beiden Orten besteht eine Zeitdifferenz von ebenfalls 16 Stunden!

Der zirkadiane Rhythmus der Geburt entsteht dadurch, daß an der Auslösung der Geburt eine Reihe von inneren Faktoren – meistens handelt es sich dabei um Hormone – beteiligt ist, die ebenfalls entsprechend den Gesetzmäßigkeiten der zirkadianen Periodik zu bestimmten Tageszeiten in unterschiedlicher Konzentration im Blutplasma vorliegen.

Der Geburtsvorgang wird nicht vom Muttertier, sondern vom Feten eingeleitet. Sobald der erste auslösende Schritt getan ist, laufen die hormonellen Mechanismen lawinenmäßig an und sind nicht mehr aufzuhalten. Neben den lokalen Vorgängen an der Gebärmutter wird auch das mütterliche Verhalten so verändert, daß sich das Muttertier vollkommen auf die Pflege des Neugeborenen einstellt. Der Auslösemechanismus der Geburt läßt sich in vier Stufen einteilen.

1. Die fetale Nebenniere wird aktiv.

In den letzten Stunden der Trächtigkeit ist der Fetus verschiedenen Belastungen ausgesetzt. Von besonderer Bedeutung für die Auslösung der Geburt ist die ansteigende Wärmebelastung des Feten in der Gebärmutter. Die Körpertemperatur des Feten ist 0,5 bis 1,0 Kelvin höher als die Temperatur des mütterlichen Organismus. Der Fetus lebt in der Gebärmutter ständig in Hyperthermie. Solange das hypothalamische Temperaturregulationszentrum nur unvollkommen ausgebildet ist, nimmt er die hohe Temperatur nicht wahr. Unmittelbar vor dem Geburtstermin ist die Reifung des Hypothalamus abgeschlossen. Die Hyperthermie wird nun festgestellt, und der Fetus aktiviert die Nebennierenrinde. Ihre Hormone werden in den Blutkreislauf abgegeben und zur Plazenta, die sich aus den Eihäuten und der Gebärmutterschleimhaut zusammensetzt, transportiert.

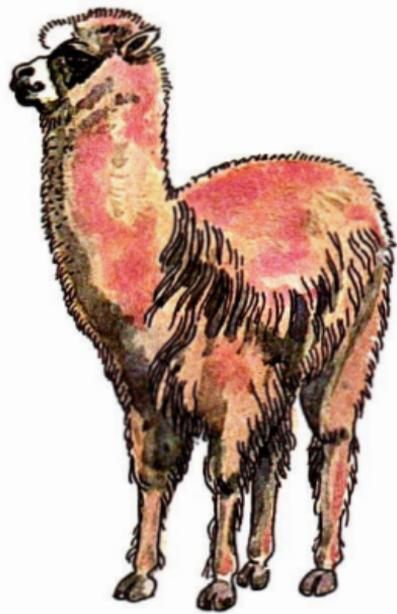
2. Die Hormonproduktion der Plazenta ändert sich.

Während der Trächtigkeit bildet die Plazenta vorrangig das Hormon Progesteron. Es beruhigt die Gebärmuttermuskulatur, weil es die Bindung der Kalziumionen in den Muskelzellen der Gebärmutter an bestimmte Zellorganellen – die Mitochondrien – fördert. Damit steht nicht genügend Kalzium für die Auslösung der Muskelkontraktion zur Verfügung.

Die Nebennierenrindenhormone wandeln in der Plazenta den größten Teil des Progesterons in das Geschlechtshormon Östrogen um. Unmittelbar vor der Geburt steigt die Östrogenkonzentration in der Gebärmuttermuskulatur an, gleichzeitig fällt die Progesteronkonzentration ab.

3. In der Gebärmutter wird Prostaglandin gebildet.

Prostaglandine sind biologisch hochaktive Substanzen, die



Das Alpaca lebt in den Anden Südamerikas und bringt seine Jungen ausschließlich zwischen 6 und 11 Uhr zur Welt.

im Stoffwechsel des tierischen Organismus aus bestimmten Fettsäuren, insbesondere aus der Arachidonsäure, gebildet werden und die im Stoffwechsel eine Reihe von Aufgaben zu erfüllen haben. Die Gebärmutter Schleimhaut bildet Prostaglandin $F_{2\alpha}$, sobald die Östrogenkonzentration ansteigt. Es ist ein Gegenspieler des Progesterons, denn es setzt in den Muskelzellen der Gebärmutter das an die Mitochondrien gebundene Kalzium frei. Dadurch kontrahiert sich die Gebärmuttermuskulatur spontan.

4. Die Wehen setzen ein.

Ausgelöst durch die Freisetzung des Kalziums, beginnt sich die Gebärmuttermuskulatur zusammenzuziehen. Die Kontraktionswellen werden weiter verstärkt, weil das in hoher Konzentration gebildete Östrogen am Hypophysenhinterlappen das Hormon Oxytozin freisetzt. Oxytozin greift ebenfalls an der Uterusmuskulatur an und verstärkt die Wehen. Sobald Teile der Frucht in den Gebärmutterhals oder in die Scheide eingetreten sind, reizen sie die dort befindlichen Dehnungsrezeptoren. Sie unterstützen auf nervalem Weg die Freisetzung des Oxytozins. In der letz-

ten Phase der Geburt wird die Austreibung der Frucht durch starke Kontraktionen der Bauchmuskulatur gefördert.

Für die industriemäßige Tierproduktion mit ihrer hohen Tierkonzentration ist es aus arbeitsökonomischen Gründen ungünstig, den Geburtsvorgang spontan ablaufen zu lassen. So ist beispielsweise beim Schwein, das in einem Wurf bis zu 16 Ferkel zur Welt bringen kann und bei dem die Austreibung der Früchte mehrere Stunden dauert, die spontan verlaufende Geburt mit einem hohen Aufwand an Arbeitszeit und Arbeitskräften verbunden. Hinzu kommt noch, daß die meisten Geburten in den Nachtstunden beginnen. Aus diesen Gründen suchen die Wissenschaftler nach Wegen, um die Geburt künstlich einzuleiten und den Geburtstermin exakt festzulegen. Durch die Injektion von Prostaglandin ist es möglich, den Geburtsablauf in einem Stallabteil zu synchronisieren und auf eine bestimmte Tageszeit zu konzentrieren.

Tagesrhythmus in Milchviehanlagen

Es ist kompliziert, in den industriemäßig produzierenden Milchviehanlagen einen Tagesrhythmus zu gestalten, der die endogen festgelegten Biorhythmen unterstützt. Gegenwärtig ist man noch ein gutes Stück von diesem Ziel entfernt und betrachtet es bereits als einen Erfolg, wenn der Arbeitsrhythmus in der Anlage dem Biorhythmus des Tieres nicht direkt entgegenwirkt.

In der Milchviehanlage werden mitunter 2000 Rinder unter einem Dach gehalten. Die Arbeitsvorgänge, die mit dem Melken, der Pflege sowie der gesundheitlichen Betreuung der Tiere und mit der Instandhaltung der umfangreichen Technik verbunden sind, sind in der Regel nur im Dreischichtsystem, in Ausnahmefällen auch im Zweischichtsystem zu bewältigen. Die Kühe sind entsprechend ihrer Leistung und ihres Laktationsstadiums in kleinere Gruppen eingeteilt. Der Melkstand ist praktisch rund um die Uhr in Betrieb. Die Körperfunktionen der Tiere, die während der Nachtstunden zum Melkstand getrieben werden, haben die gleiche endogene zirkadiane Rhythmik

wie die Tiere, die am Tage gemolken werden. Das kann auch nicht anders sein, weil die Zeitgeber bei allen Tieren der Anlage gleich sind; die Körperfunktionen sind mit dem natürlich auftretenden Tag-Nacht-Rhythmus gekoppelt. Dadurch nimmt ein großer Teil der Kühe das Futter zu einer biologisch ungünstigen Zeit auf, wenn die Verdauungsdrüsen kaum aktiv und die Verdauungs- und Stoffwechselleistungen daher nur gering sind. Die Kühe werden zu Tageszeiten beansprucht, zu denen der Biorhythmus der motorischen Aktivität ein Minimum aufweist.

Die ständige Unruhe im Stall und die Ganztagsbeleuchtung schränken die Ruhe- und Wiederkauzeiten der Kühe ein. Der normale Schlaf-Wach-Rhythmus kann nicht mehr oder nur unvollständig realisiert werden.

Alle diese Störfaktoren belasten die Milchkühe und verursachen Leistungsdepressionen. Das zeigt sich darin, daß die Erfolge, die bisher in der industriemäßigen Milchproduktion erreicht werden konnten, geringer sind als die Ergebnisse in anderen Tierproduktionseinrichtungen. Auf jeden Fall ist noch eine erhebliche Forschungs- und Überprüfungsarbeit zu leisten, bevor die Haltungsbedingungen in den industriemäßigen Milchproduktionsanlagen befriedigen können.

Licht und Leistung in der Tierproduktion

Industriemäßige Tierproduktion bedeutet nicht nur, daß die Tiere in hoher Konzentration gehalten und unter Einsatz einer umfangreichen modernen Technik betreut werden. Es wird vielmehr notwendig, Verfahren und Haltungsbedingungen zu schaffen, die die Leistungen der Tiere maximal fördern. Dabei müssen oftmals Wege beschritten werden, die unnatürlich erscheinen – wenn man als Maßstab des Natürlichen die bisherige Haltungsform ansieht. Wir müssen uns von dem Gedanken lösen, daß alles, was als »natürlich« gilt, auch maximal die Leistung der Tiere fördert.

Diesen Gedanken in die Tat umzusetzen ist nicht leicht. Die jahrhundertealten Traditionen der Tierproduktion sind in der Landwirtschaft fest verwurzelt – und auch ein Städter kann sich meist nicht vorstellen, daß sich eine Legehennen in einer industriemäßigen Produktionsanlage wohl fühlen soll. Wenn wir als Maßstab für das Wohlbefinden die Legeleistung nehmen, dann fühlen sich Hennen nirgends so wohl wie im Käfig. Eine Legehennen mit einer Leistung von 235 Eiern im Jahr ist in der Käfighaltung nichts besonderes, Freilandhennen aber legen im Jahr nur selten 200 Eier. Auf keinen Fall darf man die landwirtschaftlichen Nutztiere »vermenschlichen« – ein Trend, der von westlichen Massenmedien fleißig gefördert wird. Wer die industriemäßige Tierproduktion als Tierquälerei bezeichnet, berücksichtigt nicht die biologischen Besonderheiten der Nutztiere, sondern schließt vom Menschen auf das Tier, und er bedenkt nicht, daß eine Versorgung der Bevölkerung mit Eiern, Milch, Fleisch und Fleischprodukten nur möglich ist, wenn alle Reserven

genutzt werden. Ein Faktor, durch dessen Variation die Leistung aller landwirtschaftlichen Nutztiere in erheblichem Maße beeinflusst werden kann, ist das Licht.

Nochmals: die Zirbeldrüse

Das Licht beeinflusst über die Zirbeldrüse beim Menschen und bei allen landwirtschaftlichen Nutztieren das Hormonsystem und damit die Leistung. Besonders intensiv sind die Beziehungen der Zirbeldrüsentätigkeit und der Fortpflanzungsleistung untersucht worden, aber es liegen auch Hinweise vor, daß das Licht das Wachstum und die Infektionsabwehrmöglichkeiten der Tiere über die Zirbeldrüse fördert. Die Zirbeldrüse ist ein Organ, das unter herkömmlichen Haltungsbedingungen und bei Tieren in freier Wildbahn die Fortpflanzungsleistungen auf die herrschende Jahreszeit abstimmt und so garantiert, daß bei den Nachkommen die Aufzuchtergebnisse gesichert sind.

Das Licht hemmt die Zirbeldrüse. Während beim Geflügel ein Teil der Zirbeldrüsenzellen – die Pinealozysten – direkt lichtempfindlich ist und durch Lichtstrahlen, die die Schädeldecke durchdringen, beeinflusst wird, wird bei den Säugetieren und beim Menschen die Zirbeldrüsentätigkeit ausschließlich über Nervenbahnen gesteuert. Der optische Kortex, der alle Informationen aufnimmt, die aus den Photorezeptoren der Netzhaut stammen, ist über Fasern des sympathischen Nervensystems mit der Zirbeldrüse verbunden. Gesichert ist, daß das Hormon Melatonin, das in der Zirbeldrüse über mehrere Zwischenstufen aus der Aminosäure Tryptophan aufgebaut wird, in entscheidendem Maße die Fortpflanzungstätigkeit steuert.

Die Zellen der Zirbeldrüse stehen in engem Kontakt zum Blutgefäßsystem. Dadurch gelangt das Hormon leicht in das Blut und wird mit dem Blutstrom zu allen Organen transportiert. Melatonin hat im Gehirn zwei Aufgaben zu erfüllen, es hemmt die Tätigkeit des Sexualzentrums und dämpft das Nervensystem.

Das Sexualzentrum befindet sich im Hypothalamus; je

größer die Melatoninsekretion ist, um so stärker ist die Hemmung. Die Sekretionsrate des Melatonins hängt von der Dauer der Lichteinwirkung auf den Organismus ab. Die größte Melatoninmenge wird bei vollständiger Dunkelheit gebildet. Bei einer täglichen Beleuchtungsdauer von 14 bis 16 Stunden wird die Zirbeldrüsentätigkeit eingestellt. Daraus folgt, daß bei zunehmender Beleuchtungsdauer weniger Melatonin ausgeschüttet wird, bis schließlich bei einer Beleuchtungsdauer von 14 bis 16 Stunden die Melatoninbildung stagniert. Unter diesen Bedingungen hemmt die Zirbeldrüse das hypothalamische Sexualzentrum nicht mehr, so daß die Sexualfunktionen maximal ablaufen.

Bei Säugetieren mit saisonaler Sexualtätigkeit – z. B. beim Hamster – wird der Fortpflanzungsrhythmus über die Zirbeldrüse gesteuert. Nehmen die Tage ab, so kommt es zu einer Stimulation der Zirbeldrüsentätigkeit. Bedingt durch die gesteigerte Melatoninbildung und -ausschüttung in das Blut, beginnt die Sexualtätigkeit abzunehmen. Sie erreicht kurze Zeit nach der Tag- und Nachtgleiche im Herbst (Herbst-Äquinoktium) ihren absoluten Tiefpunkt. Im Frühjahr wird die Tätigkeit der Epiphyse durch die zunehmende Tageslänge erneut gehemmt, so daß die Fortpflanzungsorgane wieder aktiviert werden.

Die hemmende Wirkung des Melatonins ist nicht allein auf das Sexualzentrum beschränkt, sondern auch in anderen Gehirnabschnitten nachweisbar. Es dämpft unter anderem auch den Erregungszustand der Großhirnrinde. Bei Versuchstieren, denen operativ die Zirbeldrüse entfernt wurde, kann kaum eine Narkose eingeleitet werden. Epilepsie und Parkinsonismus des Menschen sind durch Melatonin erfolgreich zu behandeln. Durch Melatonininjektionen werden beim Huhn Schlafzustände mit einer Dauer von 45 Minuten ausgelöst.

Da auch die Wachstumsleistungen beim Ferkel und beim Kalb unter ausreichender Beleuchtungsdauer ansteigen, muß angenommen werden, daß Melatonin die Bildung aller Hormone, die am Wachstumsprozeß beteiligt sind, unterdrückt.

Mehr Hühnereier durch gute Beleuchtung

Solange es keine industriemäßige Geflügelhaltung gab, war es um die kontinuierliche Eierversorgung schlecht bestellt. Im Frühjahr gab es zumeist eine Eierschwemme, im Herbst wurden die Frischeier knapp, und im Winter konnte man – wenn überhaupt – nur Kühlhauseier kaufen. Durch die industriemäßige Eierproduktion werden Frischeier in gleicher Menge und Qualität zu jeder Jahreszeit produziert. Dabei ist es gleichgültig, ob die Hühner im Herbst, im Frühjahr oder im Sommer geschlechtsreif werden, sie produzieren bei entsprechendem Lichtregime unabhängig von der Jahreszeit die gleiche Eiermenge.

Entscheidend für die Höhe der Legeleistung ist die tägliche Beleuchtungsdauer und deren tägliche Zunahme. Es hat sich gezeigt, daß die Legeleistung über einen langen Zeitraum konstant gehalten werden kann, wenn die Beleuchtungsdauer mit zunehmendem Alter der Hennen erhöht wird, bis sie schließlich in der 50. Lebenswoche 16 Stunden erreicht.

Auch Hühner, die ständig im Dunkeln gehalten werden, legen Eier. Die Legeleistung ist aber deutlich geringer als bei den Hennen, die unter optimalen Bedingungen gehalten werden – und die Eier fallen während des gesamten Tages an. Wird dagegen die Beleuchtung richtig dosiert, so legen sie die Eier fast ausschließlich während dieser Stunden.

Hühner legen die Eier in sogenannten Sequenzen oder Serien. Der Sequenz schließt sich eine Legepause an, die im günstigsten Fall nur einen Tag, bei schlechten Legern aber mehrere Tage dauert. Das erste Ei einer Serie legen die Hennen unmittelbar nach Beleuchtungsbeginn. Das zweite Ei wird am nächsten Tag mit einer mehr oder weniger großen Verzögerung gegenüber dem Vortag gelegt. Bei Hochleistungshennen ist die Verzögerung gering. Eine Legeserie wird von den Hennen beendet, wenn das Ei gegen 15 Uhr gelegt wird. Hennen mit einer kurzen Verzögerung haben daher lange Legeserien und können in einem Jahr mehr Eier produzieren als solche mit kurzer Legeserie. Hochleistungshennen legen in einer Sequenz bis zu 50 Eier. Schlechte Hennen machen oft bereits nach zwei bis drei Eiern eine Pause.

Die Legesequenzen werden über die Beleuchtungsdauer gesteuert. Um den Mechanismus zu verstehen, sind zunächst einige Vorbemerkungen notwendig.

Der Legedarm des Huhnes ist einseitig angelegt. Nur der linke Legedarm mit Eierstock bleibt erhalten, während sich der rechte Teil bereits embryonal zurückbildet. Im Eierstock einer geschlechtsreifen Henne wachsen die Eizellen zu großen kugeligen Gebilden heran, die einen Durchmesser bis zu 35 mm erreichen. Sie bilden später das Eidotter. Der Eierstock enthält Follikel verschiedener Größe, die nacheinander ausgebildet werden. Die Freisetzung der Eizelle aus dem Eierstock wird als Ovulation bezeichnet. Der Zeitraum zwischen der Ovulation und der Eiablage beträgt etwa 25 Stunden. Die Ovulation wird durch ein Hormon der Hypophyse, das Luteinisierungshormon (LH), ausgelöst. LH entsteht in größeren Mengen, wenn im Eierstock die Geschlechtshormone Östrogen und Progesteron gebildet werden. Diese Hormone wirken zunächst auf das hypothalamische Sexualzentrum und setzen hier die Releasing-Hormone frei, die über das Pfortadersystem zur Hypophyse transportiert werden. Die Ansprechbarkeit des Sexualzentrums auf die Geschlechtshormonkonzentration im Blut weist zirkadiane Schwankungen auf.

Bedingt durch den zirkadianen Rhythmus der Empfindlichkeit des Sexualzentrums gegenüber den Geschlechtshormonen des Eierstocks, wird zu einer bestimmten Tageszeit der Zeitpunkt erreicht, an dem die Hormonbildung des Eierstocks nicht ausreicht, um eine solche hohe LH-Produktion zu veranlassen, die zur Ovulation führt. An diesem Tage ovulieren die Hühner nicht – dadurch setzt am folgenden Tag die Legepause ein. Nach Beendigung der Legepause wird das erste Ei der neuen Serie wieder in den frühen Morgenstunden gelegt.

Die Beleuchtung synchronisiert den Empfindlichkeitsrhythmus des Sexualzentrums mit dem Hell-Dunkel-Rhythmus im Stall. Beide Rhythmen schwingen in der gleichen Phase. Die Eier werden dadurch nur im Hellen gelegt. Wird der Hauptzeitgeber Licht ausgeschaltet, so schwingt der endogene zirkadiane Rhythmus frei; die Legepause kann zu jeder beliebigen Tageszeit einsetzen.

Durch Verlagerung der Beleuchtungszeit in die Nachtstunden wird erreicht, daß in einem Eiproduktionsbetrieb in einem Teil der Produktionshallen die Eier am Tag, in dem anderen Teil während der Nacht gelegt werden. Die Eier werden maschinell sortiert, und die besondere Lichtregimegestaltung ermöglicht es, die kostenaufwendigen Eiersortiermaschinen in mehreren Schichten auszunutzen.

Nachdem es gelungen war, durch die Verlagerung der Beleuchtungszeit den Eieranfall über den ganzen Tag auszudehnen, begann die Frage interessant zu werden, ob Lichtrhythmen, deren Gesamtdauer länger oder kürzer als 24 Stunden ist, die Legeleistung beeinflussen. Es zeigte sich, daß Lichtrhythmen mit einer Periodendauer von mehr als 24 Stunden die Eierzahl nur unwesentlich erhöhen. Sie rufen aber eine andere, gänzlich unerwartete Reaktion hervor. Sie erhöhen bei Junghennen die Eimasse. Das ist besonders in Vermehrungsbetrieben von großer praktischer Bedeutung.

Unter industriemäßigen Produktionsbedingungen beginnen die Junghennen sehr frühzeitig mit dem Legen. Die ersten Eier fallen bereits im Alter von 20 Wochen an, und mit 22 Wochen legen mehr als 50% der Hennen. Die Junghenneneier – im Volksmund werden sie Kükeneier genannt – sind so klein, daß sie nicht zur Brut verwendbar sind. Erhöht man bei den Junghennen den Hell-Dunkel-Rhythmus auf mehr als 24 Stunden, so steigt die Masse der gelegten Eier innerhalb weniger Tage an. Bereits nach einer Behandlungszeit von sieben bis zehn Tagen sind die Eier so groß, daß sie für Brutzwecke genutzt werden können. Sobald das Lichtregime auf einen normalen 24-Stunden-Zyklus umgestellt wird, wird die Eimasse wieder geringer. Die Eier dieser Tiere sind aber immer noch schwerer als die Eier der gleichaltrigen Hennen, die ständig einem Lichtregime mit einer Periodendauer von 24 Stunden ausgesetzt waren.

Es zeigt sich deutlich: Nicht die dümmsten, sondern die klügsten Bauern produzieren die größten Eier.

Enten und Gänse zu jeder Jahreszeit

Seit Jahrhunderten ist es in der Landwirtschaft üblich gewesen – und beim Kleintierzüchter ist es auch heute noch so –, daß Enten- und Gänseküken im Frühjahr aus den Eiern schlüpfen. Sobald die Tage länger werden, beginnen die Enten und Gänse zu legen. Tag für Tag kommt zum Gelege ein Ei dazu, bis die Tiere nach drei oder vier Wochen zu brüten beginnen. Die Gössel schlüpfen nach einer Brutdauer von 28 Tagen. Mit der Aufzucht der Jungtiere gibt es wenig Arbeit. In den ersten Lebenstagen werden die Tiere mit Brennesseln und hartgekochten Eiern gefüttert. Bald nimmt das Muttertier sie unter ihre Fittiche und schützt sie vor Wind und Regen. Im Laufe des Sommers wachsen die Gänse auf der Weide heran, ohne daß sich der Besitzer sonderlich um sie zu kümmern braucht. Im späten Herbst werden sie gemästet und später geschlachtet.

Diese Aufzuchtmethode ist für industriemäßige Produktionsbedingungen nicht geeignet. Beim Übergang zu derartigen Produktionsverfahren in der Wassergeflügelzucht waren zwei grundlegende Aufgaben zu lösen. Einmal mußte die Legeleistung der Gänse gesteigert werden, und zum anderen mußte man versuchen, den Bruteieranfall über das ganze Jahr auszudehnen.

Durch zweckmäßige Gestaltung des Lichtregimes ist es möglich, daß Enten und Gänse ähnlich wie Hühner Eier zu jeder Jahreszeit legen. Die künstlich erbrüteten Gössel werden im Winter in beheizten und beleuchteten Stallungen aufgezogen. Der Vorteil dieses Verfahrens ist offensichtlich: Auch zum Weihnachtsfest gibt es junge Gänse.

Die Fortpflanzungsleistungen des Wassergeflügels werden durch einen endogenen zirkannualen Rhythmus sowie durch den Lichteinfluß gesteuert. Der zirkannuale Rhythmus ist am deutlichsten bei Gänsen und Moschusenten ausgeprägt, aber auch bei weitgehend domestizierten Entenrassen wie der Pekingente nachweisbar.

Der Sexualzyklus des Wassergeflügels beginnt im Dezember mit dem Wachstum der Gonaden. Die Hoden der Erpel erreichen im April ihre größte Masse und beginnen,

sich bereits in den letzten Maitagen zurückzubilden, und im September ist die Rückbildung abgeschlossen.

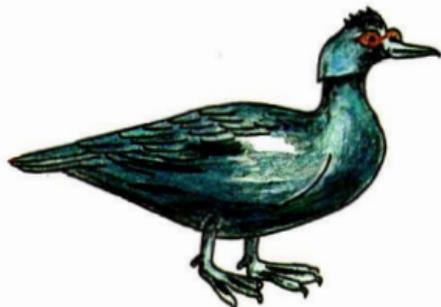
Der zirkannuale Rhythmus der Fortpflanzung ist endogen bedingt – er ist auch dann nachzuweisen, wenn die Tiere vollständig im Dunkeln gehalten werden. Ähnlich wie ein zirkadianer Rhythmus bei Ausschaltung aller Zeitgeber frei schwingend wird, so verändert sich auch die Periodendauer des zirkannualen Fortpflanzungszyklus, wenn die Tiere über Jahre im Dunkeln gehalten werden. Die Maxima der Fortpflanzungsleistung verschieben sich von Jahr zu Jahr.

Für die industriemäßige Tierproduktion ist es notwendig, mit geeigneter Veränderung der Beleuchtung den endogenen Jahresrhythmus zu durchbrechen, um zu erreichen, daß Enten und Gänse zu allen Jahreszeiten fortpflanzungsaktiv sind.

Erfolge sind zu erwarten, wenn man berücksichtigt, daß der Fortpflanzungszyklus des Wassergeflügels in drei Phasen abläuft.

Zuerst setzt die präparatorische Phase unter natürlichen Haltungsbedingungen im Spätsommer und im Herbst ein. Sie ist durch einen kurzen Lichttag gekennzeichnet und stellt die Voraussetzung für die zweite, die progressive, Phase dar, die in den letzten Wintermonaten beginnt und sich bis in das späte Frühjahr fortsetzt. Die Tiere haben in dieser Phase eine hohe geschlechtliche Aktivität. Sie

Die Moschusente gehört zu den bisher nicht intensiv domestizierten Entenarten. Sie wird aber von Kleintierzüchtlern wegen ihres exotischen Aussehens, ihres schmackhaften Fleisches und ihrer großen Brutfreudigkeit gern gehalten.



endet zu einem Zeitpunkt, an dem die Dauer der täglichen Lichteinwirkung auf den Organismus hoch ist.

Ihr schließt sich die regressive Phase an, in der es nicht mehr möglich ist, durch weitere Lichteinwirkung die Fortpflanzungsfähigkeit des Wassergeflügels zu erhalten oder neu zu beleben.

Der Übergang in die neue progressive Phase erfolgt nur, wenn die präparatorische Phase durch einen Lichttag, in dem die tägliche Beleuchtungsdauer weniger als sechs Stunden beträgt, eingeleitet wird. Wird der kurze Lichttag, der die präparatorische Phase auslöst, sechs Wochen lang beibehalten und anschließend die tägliche Beleuchtungsdauer verlängert, so treten alle behandelten Tiere in die progressive Phase über – die weiblichen Tiere legen innerhalb von 14 Tagen das erste Ei. Da bei den männlichen Tieren das Hodenwachstum gefördert und die Spermaproduktion angeregt wird, ist die Gewähr gegeben, daß die gelegten Eier auch befruchtet sind.

Durch gezielte Variationen der Aufeinanderfolge von Lang- und Kurztag ist es möglich, das Fortpflanzungsgeschehen nahezu beliebig zu manipulieren.

Durch kontinuierlichen Wechsel von Kurz- und Langtagsperioden – die Perioden müssen mindestens acht Wochen dauern – können die Fortpflanzungsorgane mehrmals im Jahr aktiviert werden. Im umgekehrten Fall kann die Fortpflanzungsleistung der Tiere über mehr als ein Jahr blockiert werden, wenn der Kurztag nach Beendigung der präparatorischen Phase nicht durch einen Langtag ersetzt wird. Durch Einführung eines Lichtregimes von zwölf Stunden Helligkeit und zwölf Stunden Dunkel je Tag während der progressiven Phase ist es schließlich möglich, das Fortpflanzungsgeschehen über einen langen Zeitraum konstant aktiv zu halten. Bei einem täglichen Hell-Dunkel-Verhältnis von 12:12 wird ein Teil der Tage von den Tieren als Kurz- und der andere Teil als Langtag identifiziert. Offensichtlich wird die Fortpflanzungstätigkeit ständig stimuliert, weil sich unter diesen Bedingungen keine Regressionsphase herausbilden kann.

Lämmer im Schnee

Die Schafzucht gewinnt international immer mehr an Bedeutung. Obwohl Textilien in zunehmendem Maße aus synthetischen Fasern hergestellt werden, steigt der Wollbedarf kontinuierlich. Schonbezüge aus Lammfell in so manchem Auto zeugen davon, daß Schaffelle vielseitig zu verwenden sind. Schließlich erhöht sich auch die Nachfrage nach Hammelfleisch. Eine Hammel- oder Lammkeule als Festtagsbraten ist ein Leckerbissen, den immer mehr Familien zu schätzen wissen.

Mit herkömmlichen Produktionsmethoden ist die gestiegene Nachfrage schon lange nicht mehr zu befriedigen. Vor einigen Jahren wurde deshalb begonnen, Schaffleisch industriemäßig zu produzieren.

Die Effektivität der Schafproduktion wird wesentlich gesteigert, wenn es gelingt, die Wurffolge der Mutterschafe zu erhöhen.

Unter herkömmlichen Haltungsbedingungen nehmen die Mutterschafe den Bock nur im Herbst an, zu einer Jahreszeit, in der die Tage bereits merklich kürzer geworden sind. Für die Erhaltung der Art hat diese Form des Sexualverhaltens viele Vorteile. Die Lämmer werden geboren, wenn die Tage bereits länger und wärmer geworden sind, und bald nach der Geburt beginnt auf der Weide das erste, sehr eiweißreiche Grün zu wachsen.

Das Schaf ist das einzige landwirtschaftliche Nutztier, dessen Zuchtsaison im Herbst beginnt. Rinder und Schweine werden zu allen Jahreszeiten brünstig und können belegt werden, Stuten rossen ebenfalls zu allen Jahreszeiten, zeigen aber im Frühjahr verstärkte Brunsterscheinungen. Katzen haben ihre Ranzzeit im Frühjahr, und das Wassergeflügel beginnt ausschließlich im Frühjahr mit dem Eierlegen. Beim Schaf fördert die abnehmende Tageslänge die sexuelle Aktivität. Verständlich wird diese Besonderheit, wenn man die hormonellen Mechanismen berücksichtigt, die den Sexualzyklus der Tiere steuern. Das hypothalamische Sexualzentrum bildet ein Sexualhormon, das als Gonadotropin-Releasing-Hormon bezeichnet wird. Über den Pfortaderkreislauf, der den Hypothalamus mit der Hypophyse verbindet, wird das Hormon zu den Zellen

des Hypophysenvorderlappens transportiert. Hier regt es die Bildung der beiden gonadotropen Hormone FSH (follikelstimulierendes Hormon) und LH (Luteinisierungshormon) an. Das FSH fördert am Eierstock die Follikelbildung, und das LH setzt die Eizelle aus dem Follikel frei und leitet die Gelbkörperbildung ein. Brunsterscheinungen treten auf, wenn beide Hormone in genügend hoher Konzentration und im richtigen Verhältnis zueinander produziert werden. Mit zunehmender Beleuchtungsdauer erhöht sich bei allen Tierarten die Gonadotropinbildung, auch beim Schaf steigt die Gesamtmenge der gebildeten Gonadotropine an. Während sich bei allen anderen landwirtschaftlichen Nutztieren LH und FSH proportional zueinander erhöhen, wird beim Schaf vor allem FSH gebildet. Brunsterscheinungen treten nicht auf, weil das Verhältnis zwischen FSH und LH ungünstig ist. Im Herbst, wenn die Tage kürzer werden, fällt die FSH-Sekretion ab. Das FSH-LH-Verhältnis normalisiert sich, und die Schafe werden brünstig. Die Brunst setzt ein, obwohl sich mit abnehmender täglicher Beleuchtungsdauer die Gesamtgonadotropinmenge verringert.

Durch Veränderung der Beleuchtungsdauer gelang es, beim Schaf die Ablammrate zu erhöhen.

Schafe werden zweimal im Jahr trächtig, wenn sie in einem fensterlosen Raum bei einem Lichtprogramm gehalten werden, in dem sich jeweils drei Monate lang ansteigende und abfallende Tageslänge abwechseln. Nachteilig dabei ist, daß die Säugezeit der Lämmer extrem kurz gehalten werden muß. Die Lämmer müssen bereits nach vier bis sechs Wochen abgesetzt werden, um bei den Muttertieren im laufenden Jahr eine zweite Trächtigkeit erreichen zu können.

Mit einem anderen Lichtprogramm, das technisch einfach zu gestalten ist, können Ablammungen im Abstand von sieben bis acht Monaten erzielt werden. Dabei wird nach Beginn der ersten Trächtigkeit die Lichtdauer für zwei Monate auf 18 Stunden täglich erhöht. Während der nächsten vier Monate wird die Beleuchtungsdauer schrittweise bis auf sechs Stunden je Tag gesenkt und auch nach dem Ablammen auf diesem Niveau konstant gehalten, bis die ersten Brunsterscheinungen auftreten. Die Muttertiere

lammern bei diesem Verfahren stets unter den Bedingungen des Kurztages ab. Sobald die Tiere wieder trächtig geworden sind, wird erneut ein 18-Stunden-Lichttag eingeführt; die Schafe werden zwei bis drei Monate nach dem Ablammen wieder brünstig und können belegt werden.

Beide Methoden haben den Nachteil, daß die Tiere ständig bei künstlicher Beleuchtung im Stall gehalten werden müssen. Sie werden auch im Stall gefüttert, da der Einfluß des Tageslichtes unbedingt vermieden werden muß. Die Schafzucht wird aber erst rentabel, wenn Futtermittelreserven genutzt werden, die für andere Tierarten nicht zu verwerten sind. Daher wurde ein Verfahren entwickelt, bei dem die Tiere auf der Weide bleiben und trotzdem die Fortpflanzung durch künstliche Beleuchtung stimuliert werden kann. Es geht davon aus, daß es weniger die absolute Tageslänge als vielmehr die tägliche Änderung der Tagesdauer ist, die das Fortpflanzungsgeschehen der Schafe beeinflußt. Daher wird, sobald die Schafe trächtig geworden sind, die Beleuchtungsdauer auf 22 Stunden am Tag erhöht. Nach zwei Monaten wird sie wieder auf 17 bis 18 Stunden gesenkt. Dieser Abfall der täglichen Beleuchtungsdauer genügt, um innerhalb von drei Monaten nach dem Ablammen Brunsterscheinungen auszulösen.

Die Vorteile dieses Verfahrens liegen auf der Hand.

Die Beleuchtungsdauer von 18 Stunden übertrifft den unter natürlichen Bedingungen vorkommenden längsten Tag noch um eine Stunde. Daher kann die Herde in allen Phasen des Lichtzyklus die Weide aufsuchen. Nach dem abendlichen Aufstallen sowie vor dem morgendlichen Austreiben werden die Schafe im Stall zusätzlich beleuchtet. Unter den Bedingungen des 22stündigen Langtages liegt die Dunkelphase zwischen 23 Uhr und 1 Uhr, während des 18stündigen Kurztages zwischen 21.30 Uhr und 3.30 Uhr.

Weniger Fett durch mehr Licht

Für die Mast von Schweinen und Rindern wurde in den fünfziger Jahren der Dunkelstall proklamiert. Er sollte im Vergleich zu den Ställen mit Fenstern verschiedene Vor-

teile haben. Besonders ein Vorzug stach ins Auge: Die fensterlosen, gut isolierten Stallwände gaben eine hervorragende Wärmedämmung in den Wintermonaten, was sich positiv auf die Stalltemperatur auswirkte und Heizkosten sparte.

Daneben versprach man sich einen zweiten Vorteil. In den Ställen wurden die Tiere im Dunkeln gehalten, nur während der Fütterung und während der Servicearbeiten – einmal am Tage – wurde die Beleuchtung für einen kurzen Zeitraum eingeschaltet. Alle landwirtschaftlichen Nutztiere sind tagaktive Tiere. Ihre motorische Aktivität sinkt innerhalb von 20 bis 30 Minuten nach Einbruch der Dunkelheit erheblich ab. Motorische Aktivität aber ist immer mit einer Steigerung des Energieumsatzes verbunden. Nur etwa 23% der für die Muskelkontraktion benötigten Energie wird in mechanische Arbeit umgesetzt; der Rest von 77% wird in Wärmeenergie umgewandelt und muß an die Umgebung abgegeben werden. Diese Energie ist für die Tierproduktion verloren. Gesteigerte Aktivität bedeutet bei gleichem Futteraufwand verringerte Leistung. Die gleiche Leistung kann nur unter Einsatz zusätzlichen Futters erzielt werden. Durch die Haltung der Masttiere im Dunkeln versprach man sich eine erhöhte Masttagszunahme, weil die motorische Aktivität eingeschränkt wird.

Die Gesamtrechnung ging nicht auf. Zwar erwies es sich als richtig, daß fensterlose Ställe besser zu klimatisieren sind, die erwarteten Mehrzunahmen aber konnten nicht erreicht werden. Im Gegenteil, die tägliche Zunahme bei den Rindern und Schweinen begann nach kurzer Zeit abzusinken. Es traten Mineralstoffstörungen auf, die Tiere bekamen ein struppiges, langhaariges Fell und begannen zu verfetten. Das war übrigens der stärkste Effekt: Tiere, die im Dunkeln gehalten wurden, setzten erheblich mehr Fett als Kontrolltiere an. Der verstärkte Fettansatz ist auf eine Umstellung in der Funktionsweise der Hormondrüsen zurückzuführen, die am Zwischenstoffwechsel der Tiere beteiligt sind.

Eine gesunde Ernährung des Menschen erfordert jedoch die Senkung des Fettverbrauches. Wer will schon fettes Schweine- oder Rindfleisch kaufen! Gegenwärtig kommt

es daher darauf an, Haltungsbedingungen zu schaffen, die eine optimale Fleischqualität der Schlachttiere sichern. Wird der Maststall täglich 12 bis 16 Stunden lang beleuchtet, so ist die motorische Aktivität der Tiere erhöht. Sie nehmen besser Futter auf, setzen weniger Fett an und zeigen eine bessere Zuwachsleistung. Durch die gesteigerte motorische Aktivität wird außerdem die Muskulatur der Tiere trainiert. Solche Tiere überstehen den anstrengenden Transport zum Schlachthof gut, und ihr Fleisch besitzt eine hohe Qualität. Besonders günstig scheint sich Licht mit hoher Wellenlänge auf die Massenzunahme auszuwirken. Mastschweine, die bei rotem Licht gehalten werden, nahmen täglich um 123 Gramm mehr zu als bei Tageslicht gehaltene Tiere. Die Mehrzunahme scheint aber vorrangig auf einen verstärkten Fettansatz zurückzuführen zu sein. Da gleichzeitig bei diesen Schweinen gehäuft Kannibalismus auftrat — die Schweine begannen, sich gegenseitig die Schwänze und die Ohren zu benagen —, hat die Anwendung des roten Lichtes in der Tierproduktion keinen Eingang gefunden.

Die heutigen modernen industriemäßigen Produktionsbetriebe der Geflügel-, Schweine- und Rinderproduktion sind aus Klimatisierungsgründen oft fensterlos. Durch künstliche Beleuchtung ist aber gewährleistet, daß die Wachstumsrate der Tiere maximal gefördert wird.

Leben braucht Licht

Leben braucht Licht. Zu dieser Feststellung gelangt man zwangsläufig, wenn man die vielfältigen Lebensäußerungen der Pflanzen und der Tiere betrachtet, die durch das Licht beeinflußt, gesteuert oder verursacht werden.

Das Sonnenlicht ist komplex zusammengesetzt. Neben der elektromagnetischen Strahlung im Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichtes enthält es die besonders energiereichen ultravioletten und die wärmenden Infrarotstrahlen. Dadurch wird das Licht neben der Temperatur zum wichtigsten Umweltfaktor für die Pflanzen und die Tiere.

Das Licht ist für das Leben auf der Erde von zweierlei Bedeutung; es überträgt Energie, und es vermittelt Informationen.

Wir haben im Kapitel »Gespeicherte Sonnenenergie« gesehen, daß die Pflanzen die zum Wachstum notwendige Energie direkt der Strahlungsenergie des Sonnenlichtes entnehmen und sie in chemische Energie umwandeln, die die Grundlage des Lebens für die gesamte Tierwelt einschließlich der Menschheit ist. Industriemäßige Pflanzenproduktion ist vor allem bewußte Ausnutzung der chemischen, physikalischen und biologischen Gesetzmäßigkeiten der Photosynthese. Je besser diese Prozesse bekannt sind, umso effektiver wird die Pflanzenproduktion und umso günstiger sind die Ernährungsbedingungen für die Weltbevölkerung zu gestalten. Mehr denn je wird es notwendig, dabei Natur- und Gesellschaftswissenschaften eng miteinander zu verknüpfen.

Wenn auch die Lichtenergie für das pflanzliche Leben die direkte und für das tierische Leben lediglich die in-

direkte Voraussetzung ist, so ist doch nicht zu übersehen, daß auch im tierischen Organismus bestimmte Stoffwechselprozesse durch das Licht unmittelbar gefördert werden können. Im Kapitel »Licht dringt auch unter die Haut« wurde gezeigt, daß die Vitamin-D-Bildung durch das Sonnenlicht in der Haut des Menschen und der Säugetiere eingeleitet wird und daß bestimmte Stoffwechselschlacken, wie die Porphyrine, durch das Licht entgiftet werden können. So gewinnt die Lichtenergie insbesondere unter ungünstigen Lebensbedingungen für den tierischen Organismus an Bedeutung.

Die Informationen, die den Tieren über das Licht vermittelt werden, sind für die Lebensvorgänge ebenso bedeutungsvoll wie die Energieaufnahme mit der Nahrung. Durch das Licht ist über den optischen Analysator nicht nur eine Orientierung in der Umwelt möglich – 40% aller Informationen werden vom Menschen über das Auge aufgenommen –, sondern es werden auch Stoffwechselprozesse und Organfunktionen im Organismus aufeinander abgestimmt und mit der Umwelt synchronisiert. Dadurch ist das Tier in der Lage, sich den verschiedenen Jahreszeiten anzupassen.

Im vorliegenden Band konnten nur die wichtigsten und interessantesten Reaktionen dieser Art dargestellt werden. Andere Reaktionen sind gegenwärtig noch schwer verständlich oder auch für den Spezialisten noch unklar. Zu vermuten ist, daß bestimmte lebenswichtige Prozesse, die mit der Lichtwirkung im Zusammenhang stehen, derzeit noch unbekannt sind.

In den letzten Jahren aber ist der Kenntnisstand auf dem Gebiet der vergleichenden Sinnesphysiologie der Tiere erheblich gestiegen.

Dazu zwei Beispiele.

Verschiedene Fischarten verfügen über einen elektrischen Sinn. Tropische Raubfische orten z. B. ihre Beute aus einer Entfernung von mehr als 10 m, weil sie die Bioströme, die bei der Kontraktion der Kiemendeckelmuskulatur der Beutefische entstehen, aus dieser Distanz wahrnehmen können.

Tauben können sich im Magnetfeld der Erde orientieren und rezipieren Infraschallwellen mit einer Frequenz von

0,5 bis 2 Hz aus einer Entfernung von mehreren tausend Kilometern.

Diese wenigen Beispiele lassen erkennen, daß auf dem Gebiet der Sinnesphysiologie in den kommenden Jahren noch weitere Überraschungen zu erwarten sind und daß manche Lichtreaktionen erst in späteren Jahren voll verständlich werden.

Soviel ist sicher: Menschen, Tiere und Pflanzen brauchen das Licht, weil es Wärme und Helligkeit liefert und die Orientierung ermöglicht. Nicht ohne Grund werden seit Jahrtausenden in der Kunst das Gute, Hoffnungsvolle und Zukunftsweisende als hell und farbig, das Böse, Grausame und Hoffnungslose aber immer als grau und dunkel dargestellt.

»akzent« – die Taschenbuchreihe
mit vielseitiger Thematik:
Mensch und Gesellschaft,
Leben und Umwelt, Naturwissenschaft
und Technik. – Lebendiges Wissen
für jedermann, anregend und aktuell,
konkret und bildhaft.

Weitere Bände:

Scheikov, Leben und Symmetrie

Mletzko/Mletzko, Die Uhr des Lebens

Kehnscherper, Hünengrab und Bannkreis

Müller/Pötsch, Vom Schneckenpurpur
zum Jeansblau

Marcinek, Droht eine nächste Kaltzeit?

Lányi, Erstaunliches über Tiere

Brentjes, Libyens Weg durch die
Jahrtausende