

DIE NEUE BREHM - BÜCHEREI

PHOTOSYNTHESE GRÜNER PFLANZEN

von

Karl Heinz Richter

mit 27 Abbildungen



A. ZIEMSEN VERLAG · WITTENBERG LUTHERSTADT · 1958

Inhaltsverzeichnis

Kurze historische Betrachtungen	4
Der Chloroplast und seine Farbstoffe	6
1. Bau und Zusammensetzung der Chlorophyllkörner	6
2. Blattfarbstoffe	13
a) Die Chlorophylle	14
b) Die Carotinoide	18
Energetik der Photosynthese	28
1. Quantenfragen	28
2. Anregung des Chlorophylls	29
Sauerstoffzeugung mit Chloroplasten und deren Bruchstücke	31
Der CO ₂ -Assimilationsablauf in der Zelle	32
1. Bakterielle CO ₂ -Assimilation	32
2. Der Sauerstoff	33
3. Phosphor und Photosynthese	35
4. Vorgänge beim Kohlenhydrataufbau grüner Pflanzen	36
Assimilate	43
Versuch eines Gesamtschemas der Photosynthese	45
Ältere Auffassung	46
Neuere Auffassung	47
Wörterklärung	51
Literaturverzeichnis	55

Heft 206

Redaktionsschluß Januar 1957

Veröffentlicht unter der Lizenz-Nr. 251—510/38/58
Herstellung: W. Kolbe, Leipzig O 27

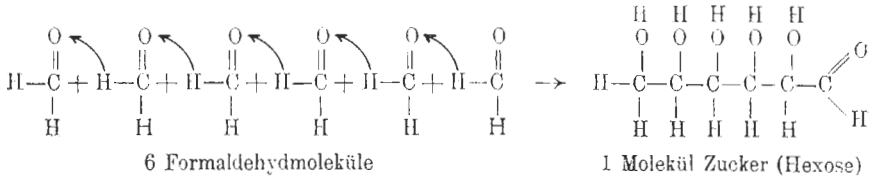
Kurze historische Betrachtungen

Die Größenzunahme einer höheren grünen Pflanze im Verlaufe ihrer Entwicklung läßt dem Menschen wahrscheinlich werden, daß die dazu erforderliche Stoffaufnahme mit dem Wurzelsystem geschieht. Dazu liefert ja auch der Augenschein den Beweis, daß die auf gut gedüngten Böden wachsenden Pflanzen kräftiger und „fetter“ erscheinen als die gleichen auf dürrtigen. Nun ist aber für die *Kormophyten* (Sproßpflanzen) die Differenzierung in Wurzel und Sproß charakteristisch, man sagt auch, die Pflanze zeige eine gewisse Polarität. Die Wurzel ist für Wasser- und Salzaufnahme sowie die Verankerung des pflanzlichen Organismus zuständig. Das war bisher eine „eingefahrene“ Denkgewohnheit in der Botanik. Prof. Dr. Mothes (1955)¹⁾ zeigte, daß dazu noch in beachtlichem Maße synthetische Fähigkeiten treten. Der grüne Sproß ist Träger der Assimilationsorgane und der Blüten (Fortpflanzungsorgane).

Der die lebenden pflanzlichen Organismen kennzeichnende Kohlenstoffgehalt stammt aus der Luft. Goethes Zeitgenossen glaubten als Kohlenstoffquelle die Humusstoffe des Bodens annehmen zu müssen (Ende des 18. Jahrhunderts). Joseph Priestley (1733—1804) machte im Jahre 1771 die Beobachtung, daß grüne Pflanzen Sauerstoff (O_2) abgeben. Ein Arzt, Jan Ingenhousz (1730—1799), fügte dieser Entdeckung eine weitere hinzu, nämlich, daß nur im Licht „Lebensluft“ (O_2), im Dunkeln jedoch „fixe Luft“ (= Kohlendioxyd) abgegeben werde. 1779 erschien seine Arbeit unter dem Titel: „Experiments upon vegetables, discovering their great power of purifying the common air in the sunshine and of injuring it in the shade and at night.“ („Experimente an Pflanzen, die ihr großes Vermögen zeigen, im Sonnenlicht die gewöhnliche Luft zu reinigen und sie im Schatten und in der Nacht zu schwächen.“) Infolge des Vorherrschens der Phlogistontheorie Georg Ernst Stahls (1660 bis 1734) deutete Ingenhousz die physiologischen Vorgänge falsch. Der große französische Chemiker Antoine Laurent Lavoisier (1743—1794) mußte erst das Verhältnis zwischen der „Lebensluft“ und der „fixen Luft“ — wie man damals den Sauerstoff und das Kohlendioxyd nannte — klären, daraufhin erkannte dann Ingenhousz den Gasaustausch der grünen Pflanzen in seiner richtigen Bedeutung. Er zeigte in einer 1796 veröffentlichten Schrift: „Über die Ernährung der Pflanzen und die Fruchtbarkeit des Bodens“, daß der Kohlenstoff des pflanzlichen Organismus aus dem Kohlendioxyd (CO_2) der Luft stammt und der Sauerstoff (O_2) wieder abgegeben wird. Das war eine der bedeutendsten Entdeckungen der Pflanzenphysiologie. Der eigentliche Assimilationsbegriff stammt von dem Botaniker und Physiologen Julius Sachs (1832—1897), dem wir wesentliche Fortschritte bei der

1) Mothes, K., Romeike, A., u. Schröder, H.-B. in Naturwiss. 42, 214, 1955; Literaturzusammenstellung in Wiss. Annalen, 1, 5. Jg., 1956: Die Wurzel der Pflanzen eine chemische Werkstatt besonderer Art. Vortrag von Akademiemitglied Prof. Dr. K. Mothes auf der Jahrestagung der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin am 30. März 1955.

Aufklärung des Assimilationsgeschehens verdanken (z. B. Licht und Chlorophyll, Stärke als Endprodukt u. a.). Teilweise hatte schon Daubeny (1836), Professor in Oxford, Vorarbeiten geleistet, der die Wirkung verschiedener Spektralbezirke auf die Assimilation studierte. Ein genaueres Ergebnis blieb ihm aber versagt. Gelehrte wie Draper (Chemiker und Physiker in New York 1811—1881), Wilhelm Friedrich Philipp Pfeffer (Botaniker in Leipzig 1845—1920), Kliment Arkadjewitsch Timirjasew (russischer Pflanzenphysiologie in Petersburg (1843—1920), Nathanael Pringsheim (Physiologe 1823—1894), Arthur Meyer (Pharmakologe und Botaniker 1850—1922) u. a. brachten weitere Teilergebnisse über das bis dahin immer noch völlig unbekanntes assimilatorische Geschehen ans Licht, bis 1870 die erste Theorie über den Chemismus der Kohlensäureassimilation Adolf von Baeyer (1835—1917) aufstellte, in der der Formaldehyd (HCHO) als Zwischenprodukt in der lebenden grünen Zelle gefordert wurde. Durch Aneinanderlagerung einzelner Formaldehydmoleküle (Polymerisation) sollten die Kohlenhydrate (Zucker, Stärke) in der Pflanze entstehen.



Die von Baeyer'sche Theorie hat heute lediglich noch historisches Interesse, wie auch eine von Richard Willstätter (1872—1942) und Stoll später (1918) gemeinsam verfaßte Arbeit über die Assimilation undiskutabel geworden ist (vgl. aber O. Warburg [* 1883] 1956, S. 49).

Die Photosynthese, wie wir die Kohlendioxydassimilation grüner Pflanzen nennen, stand stets im Zentrum der Stoffwechselphysiologie der Pflanzen. Von den ältesten Anfängen bis in unsere Tage zieht sich ein Pfad wahrhaft internationaler Forschertätigkeit. Früher waren die Arbeiten zur Aufklärung dieses Fundamentalvorganges im allgemeinen von indirekten Methoden, theoretischen Überlegungen getragen. Es machte daher den Eindruck, als habe sich die Natur ein für alle Male dieses bewunderungswürdige Geschehen pflanzlichen Lebens vorbehalten. Seit mehr als 15 Jahren aber sind ganze Forschergemeinschaften mit der Aufklärung dieses Vorganges beschäftigt. Die vergangene Stagnation wurde wohl überwunden durch die Anwendung moderner naturwissenschaftlicher Methoden, ohne die jeder Fortschritt stecken bleibt. So bedient sich der vorwiegend biochemisch tätige Photosyntheseforscher der sogenannten tracer-Methodik (= Isotopenmarkierung), die ihm ein völlig neuartiges Werkzeug in die Hände gab, mit der er den direkten Weg der aufgenommenen Atome und Moleküle im Pflanzenkörper verfolgen kann. Ferner kam ihm die analytische Mikrochemie zu Hilfe, die inzwischen ein Analysenverfahren aus-

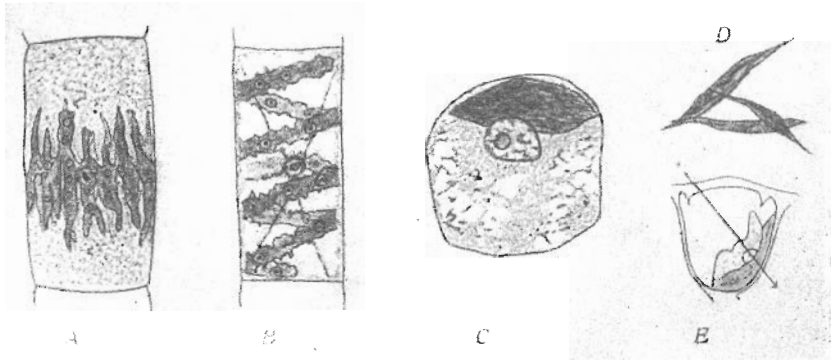


Abb. 2a. Flastidentypen. A *Draparnaldia*, B *Spirogyra*, C *Anthoceros*, D rote Chromoplasten von *Arisaema*, E Zelle von *Selaginella*. Stellung des Plastiden unter dem Einfluß des einfallenden Lichtes (Pfeil). A, B, C enthalten Stärkebildungszentren (Pyrenoide). Aus: Lester W. Sharp, Einführung in die Zytologie.

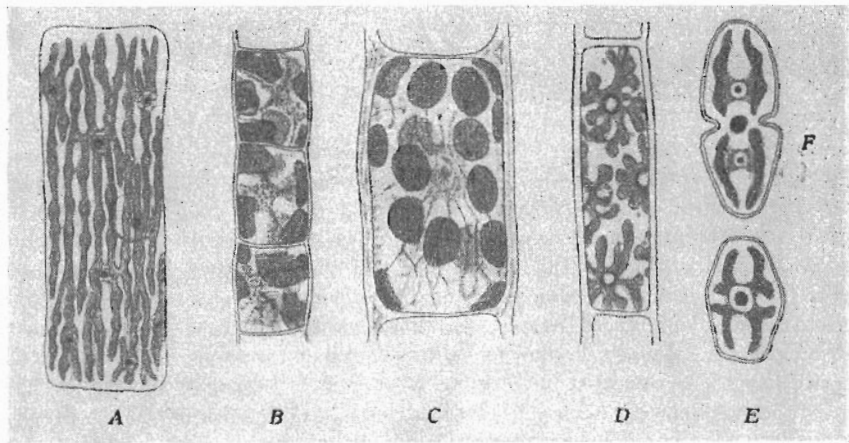


Abb. 2b. Plastidentypen. A *Oedogonium*. Pyrenoide und Stärke deutlich erkennbar, B *Leptonema jasciculatum*, C *Pilayella varia*, D *Rhodochorton floridulum*, E und F *Euastrum dubium*, Frontal- und Seitenansicht. Aus: Lester W. Sharp, Einführung in die Zytologie.

Gebilde (Plastiden) liegen im Cytoplasma und vermehren sich durch Teilung (Abb. 1 a u. b). Sie enthalten die für die Photosynthese unentbehrlichen Assimilationsfarbstoffe (Chlorophylle u. a.). Dieser Umstand führte zu ihrer Bezeichnung *Chromatophoren* (= Farbträger). Die grünen Chlorophyllkörner sind in allen Grünalgen, Jochalgen und in vielen Geißelalgen (Flagellaten) wie auch in den Moosen, Farnen und Samenpflanzen zu finden. Sie

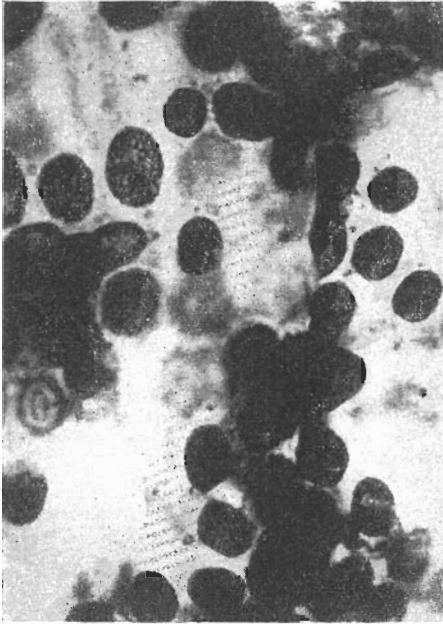


Abb. 3. Chloroplasten von *Gladiolus* nach Silbernitratbehandlung. Aus: *Protoplasma Monographien*. Bd. 16 S. 116.

stellen den Reaktionsort des Geschehens in den Pflanzenzellen dar, das wir als Photosynthese, d. h. Aufbau der Kohlenhydrate mit Hilfe des Lichtes, bezeichnen. Abb. 2 (a u. b) zeigt einige Chloroplastenformen. Es ist verständlich, daß wir an der Kenntnis des chemischen und physikalischen Baues der grünen Plastiden in bezug auf das zu erforschende Geschehen in ihnen stark interessiert sind. Die seit den letzten 25 Jahren bis in die neuere Zeit fortgesetzten Versuche, die Chlorophyllkörner chemisch zu analysieren, brachten keinen nennenswerten Fortschritt in Richtung auf eine Erfassung aller Bestandteile. Die Untersucher verwendeten sehr verschiedenartiges Pflanzenmaterial und unterschiedliche Präparationsverfahren. Daher weisen die hier angeführten Analysendaten starke Streuungen auf. Die Angaben in Tabelle 1 beziehen sich auf die als Chloroplastensubstanz bezeichnete chlorophyllführende Zellfraktion bzw. um Grana (= Körnchen, d. s. Bestandteile der Chlorophyllkörner).

Bei Plastidenuntersuchungen sind zusammengesetzte Teilchen als „Grana“ (= Körnchen) bezeichnet worden, z. B. von W. Zedlitz (1944) u. a., denen dieser Begriff nach nunmehr genaueren Kenntnissen nicht zukommt. Wie Abb. 3 zeigt, lassen die Chlorophyllkörner nach Silbernitratbehandlung punktförmige Areale sichtbar werden, die Auskunft über die Lage der echten Grana geben.

Auf den hier angedeuteten Feinbau der Chloroplasten soll etwas näher eingegangen werden. Die ersten Beobachtungen liegen über 100 Jahre zurück

Tabelle 1. Analyse von Chloroplastensubstanz
(Fortschr. Bot. 1949); Werte in % des Trockengewichts

Autor	Eiweiß	Lipoide	Chlorophyll	Asche	P	Fe	Mn	Zn
Chibnall (1939)	39.6	25.1	—	16.9	—	—	—	—
Menke (1940)	54.8— 58.0	31.5— 32.0	5.3—7.9	8.5— 9.4	0.35— 0.37	—	—	—
Smith (1941)	46.5	—	7.86	—	—	—	—	—
Lieblich (1941)	—	—	—	4.3— 6.1	—	0.028 0.0442	—	—
Timm (1942)	56.2 ber.	—	—	4.18— 5.38	0.5	—	—	—
Comar (1942)	54	34	5	7	—	—	—	—
Bot (1942)	42— 54	26— 32	—	—	—	—	—	—
Warburg (1946)	—	—	9	3	0.3	0.1	0.016	0.0068

(Bem.: P = Phosphor; Fe = Eisen; Mn = Mangan; Zn = Zink)

(v. Mohl, Bot. Ztg. 13, 1815). Hugo v. Mohl (1805—1872) hat in seiner Dissertation (1837) den Unterschied zwischen einer Grundsubstanz und dem Farbstoff behandelt. Für die Grundsubstanz hat sich der Name *Stroma* eingebürgert. Seit der Wiederentdeckung der Granastruktur der grünen Plastiden durch Heitz, Doureline, Geitler u. a., hat sich der Umfang unserer Kenntnisse vom Feinbau der grünen Farbstoffträger erheblich erweitert. Auch hierbei sind moderne Methoden (Ultraviolett-, Elektronen-, Phasenkontrastmikroskopie) Voraussetzung gewesen. Die zur Assimilation nötigen Farbstoffe, über die hier noch zu sprechen sein wird, liegen in Form größerer oder kleinerer Grana im Chlorophyllkorn. Der Grana Durchmesser

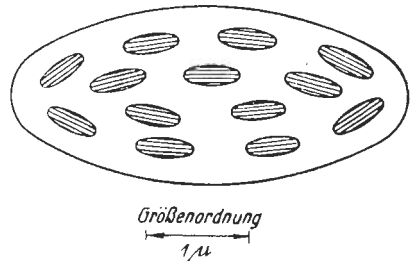


Abb. 4. Schema der Chloroplastenbeschaffenheit
(n. Frey-Wyssling, Protoplasma Monographien,
Bd. 16, S. 115).

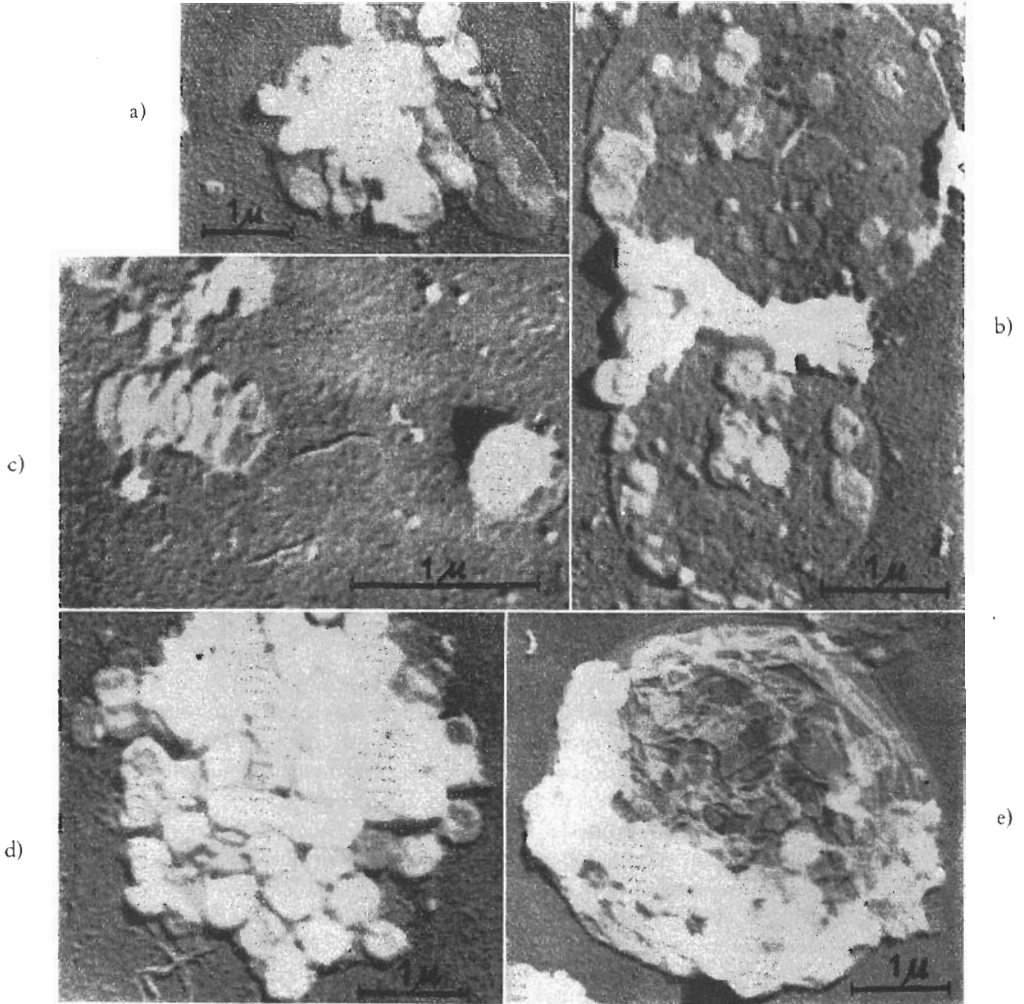


Abb. 5a—e: Elektronenoptische Aufnahmen von Chloroplasten bzw. Grana (Frey-Wyssling u. Mühlethaler). Erklärung siehe Text S. 11. (Vierteljahresschrift der Naturforschenden Gesellschaft Zürich, 94./Heft 3 v. 30. 9. 49)

kann $0,34 \mu$ oder $0,5-0,8 \mu$ betragen, beim Moosfarn *Selaginella* sogar 2μ ($1 \mu = 0,001 \text{ mm}$). Abb. 4 zeigt ein Schema von der Chloroplastenbeschaffenheit (Frey-Wyssling, Protoplasma Monographien, 16. Bd., S. 115). Diese Abbildung stellt ein grünes Chlorophyllkorn im Durchschnitt dar, das ellipsoide Verdickungen enthält, die in einer lamelligen (nicht sichtbaren) Grund-

substanz, dem Stroma, eingebettet sind. Diese Verdickungen sind nach Frey-Wyssling u. a. ebenfalls von scheibchenförmiger Struktur. Arbeiten von Strugger lieferten den exakten Beweis der geldrollenartig übereinanderliegenden Grana in den Chlorophyllkörnern. In glänzend gelungenen elektronenoptischen Aufnahmen waren die hier dargestellten Ergebnisse 1948/49 von Frey-Wyssling und Mühlethaler sichtbar gemacht worden (Abb. 5a—e). Abb. 5a zeigt einen geborstenen Chloroplasten und die Bildung von sogenannten Myelinscheiben aus dem Stroma. In der nach rechts unten auslaufenden „Zunge“ liegen einige graue Scheibchen, die Grana darstellen. Abb. 5b zeigt Myelinscheiben und Grana, die auf der Objektträgerfolie liegen. Ihre Körnelung wird sicher durch kugelförmige Eiweißriesenmoleküle hervorgerufen. Abb. 5c zeigt rechts ein Granum intakt, links dasselbe in einzelne Lamellen zerlegt, die wie ein Satz Teller ineinander liegen. Die Abb. 5d und e lassen die Grana bei Tabak erkennen (weiß-graue Scheiben), die in Abb. 5c innerhalb einer gefalteten Chloroplastenhaut liegen. Die Dicke dieser Gebilde liegt bei 80 Å, berechnet aus der Schattenlänge und dem Beschattungswinkel. Die Grana zeigen Rotfluoreszenz (Metzner, 1937), die ausreicht, um in fünf Minuten eine Spezialphotoplatte an den entsprechenden Stellen zu schwärzen. Die hellen Punkte in den Chloroplasten (= rot fluoreszierende

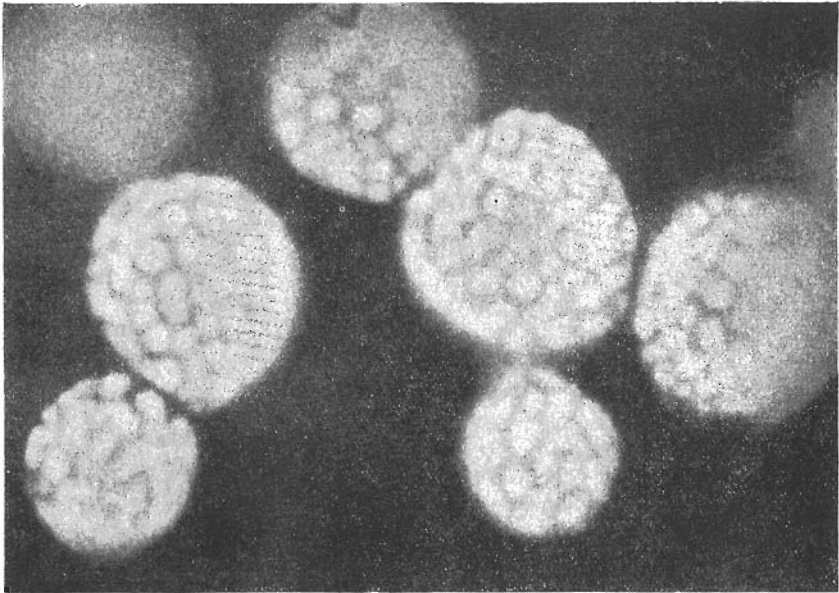


Abb. 6. Fluoreszierende Chromoplasten von *Dracaena deremensis* (Drachenbaum) mit den Granen (helle Punkte). Aus: Die Naturwissenschaften, 1/1952, Jg. 39. Originalmitteilung von D. Düvel und W. Mevius jr.

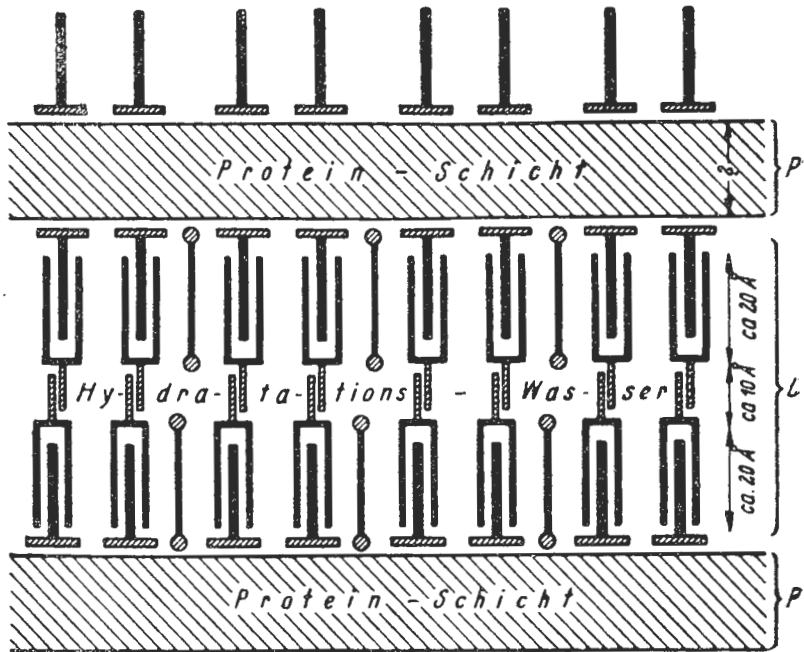


Abb. 7. Schema der gegenseitigen Beziehung der Chloroplastenbausteine (n. Hubert). Aus: Protoplasma Monographien, Bd. 16 S. 115. Näheres im Text S. 12.

Grana) liegen in dem dunklen Stroma (Abb. 6). Die Konzentration an grünen Blattfarbstoffen ist in den Grana beachtlich, nämlich 25⁰/₀. Also fast $\frac{1}{4}$ des Granums besteht aus Pigment. Es lohnt sich hier der Vergleich mit dem chemisch verwandten roten Blutfarbstoff (Hämoglobin) in den roten Blutkörperchen (Erythrozyten).

Über die Art und Weise der Anordnung der Farbstoffmoleküle, Chlorophylle u. a., machte man sich folgendes Bild, Abb. 7 (Hubert). Es ist sicher, daß die Blattfarbstoffe in den Grana angeordnet sind. Das Schema zeigt die Beschaffenheit der Schichten, die die Chlorophyllscheiben bilden. Die Chlorophyllmoleküle sind als „T“, die des Lecithin als Gabel L und die Xanthophylle (gelbe Farbstoffe) als Hanteln ! dargestellt, durch zwei wasserliebende (hydrophile) Atomgruppen gekennzeichnet (Schraffur der Molekelteile). Frey-Wyssling nahm für die Eiweißschicht (P) eine Dicke von ca. 250 Å, für die fettartige Lipoidschicht (L) eine solche von ca. 50 Å an.

Das eben angeführte Modell der Anordnung der Blattfarbstoffe im Chlorophyllkorn ist nicht ohne Kritik geblieben. Zur Zeit sind wir wohl noch etwas

davon entfernt, ein genaues Strukturbild für die Pigmentverteilung im Chloroplasten zu geben. Auf der 99. Tagung der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte im September 1956 in Hamburg zeigte Herr Prof. Dr. Mühlenthaler ein verbessertes Schema vom Lamellenbau des Chlorophyllkorns.¹⁾

Früher dachten besonders die Chemiker, der photosynthetische Vorgang sei an das Chlorophyllmolekül gebunden (Stoll), (vgl. jetzt O. Warburg 1956, S. 49), während die Physiologen den Naturfarbstoff nur als Energiefänger (Sonnenlicht!) betrachteten. Dies wurde vor allem aus einer Feststellung geschlossen, wonach für die Reduktion von einem CO₂-Molekül eine sogenannte Assimilationseinheit von rund 2500 Chlorophyllmolekülen notwendig sei. Andere errechneten für diese „Einheit“ etwa 1000 Moleküle. Sei dem wie es sei, wenn solche Aggregate von Teilchen vorkommen, ist wohl zu erwarten, daß sich das auch morphologisch irgendwie äußert (Frey-Wyssling).

Interessant ist die Mitteilung Metzners (1951), wonach „die Grana — und anscheinend ebenso die Trägerlamellen — sich sowohl gegenüber proteolytischen (eiweißauflösenden) Fermenten als auch gegenüber basischen Farbstoffen anders verhalten als das Plastidenstroma mit seiner Membran“. Die Grana sollen danach „je eine Nukleinsäure vom Ribose- und Desoxyribosetyp enthalten“, während im Stroma geringe Mengen von Ribonukleinsäure zu finden seien. Damit ist mit Recht an den Chromosomenfeinbau erinnert (K. Egle). In letzter Zeit entdeckte man in den Chlorophyllkörnern neue wichtige Fermente (Polyphenoloxydase; Molybdän; ein neues Cytochrom „f“ [Hill]), ohne die der Aufbau der Pflanze nicht vonstatten geht, so daß es wahrscheinlich ist, daß die grünen Plastiden enzymatisch komplette Gebilde der Photosynthese sind.

2. Blattfarbstoffe

Das Lebensgetriebe auf unserer Erde ist in ganz außerordentlich bedeutungsvoller Weise an das Vorhandensein von Naturfarbstoffen besonderer Art geknüpft. Gemeint sind hier diejenigen Substanzen, die die Aufnahme des Kohlendioxyds (CO₂) und Verwandlung in andere Pflanzenstoffe in den grünen Sproßteilen maßgeblich betreiben helfen. Die im vorigen Abschnitt behandelten Chlorophyllkörner sind die Träger dieser *Photopigmente*, an erster Stelle das Blattgrün (Chlorophyll). Bei der Betrachtung einer im frischen Grün des Frühjahrs stehenden Wiese kommt es uns wohl selten in den Sinn, nach dem Warum und Wie zu fragen. Die Natur hat uns aber in der grünen Farbe ein Werkzeug geschenkt, mit dem sie sich und damit auch uns Menschen erhält.

Bei der Untersuchung der grünen Plastidenfarbstoffe stellt sich heraus, daß

¹⁾ Verhandlungen der Gesellschaft Deutscher Naturforscher u. Ärzte, 99. Vers. in Hamburg. K. Mühlenthaler, Gegenwärtiger Stand der elektronenmikroskopischen Erforschung der Pflanzenzelle. 1957.

die meisten grünen Pflanzen in den „chemischen Assimilationswerkstätten“ (Chloroplasten) folgende Pigmente besitzen:

1. Chlorophylle,
2. Carotinoidfarbstoffe.

a) Die Chlorophylle

Diese grünen Blattfarbstoffe wurden 1872 von Gregor Kraus (1841 bis 1915) aus Rübenblättern mit Alkohol extrahiert¹⁾. Die sogenannte Konstitutionsaufklärung der Farbstoffmoleküle besorgten in mühevoller Weise Willstätter (1872—1942) und Hans Fischer (1881—1945). Der für nicht einheitlich befundene Farbstoff besteht aus zwei Komponenten: 1. Chlorophyll a von blau-grüner, 2. Chlorophyll b von mehr gelb-grüner Farbe. Beide enthalten das Metall Magnesium chemisch gebunden und haben — wie der Chemiker sagt — den Charakter von Diestern (= Doppellester). Alkalien spalten sie in zwei verschiedene Alkoholmoleküle, nämlich in den Alkohol Phytol, $C_{20}H_{39}OH$, und den bekannteren Methanol (Methylalkohol), CH_3OH , sowie in die Säuren Chlorophyllin a bzw. b:

1) Zuerst scheint Berzelius (1779—1848) 1838 Chlorophyll aus grünen Blättern extrahiert und isoliert zu haben. Den Namen gaben zuerst die Chemiker Pelletier (1788—1842) und Caventou (1795—1877).

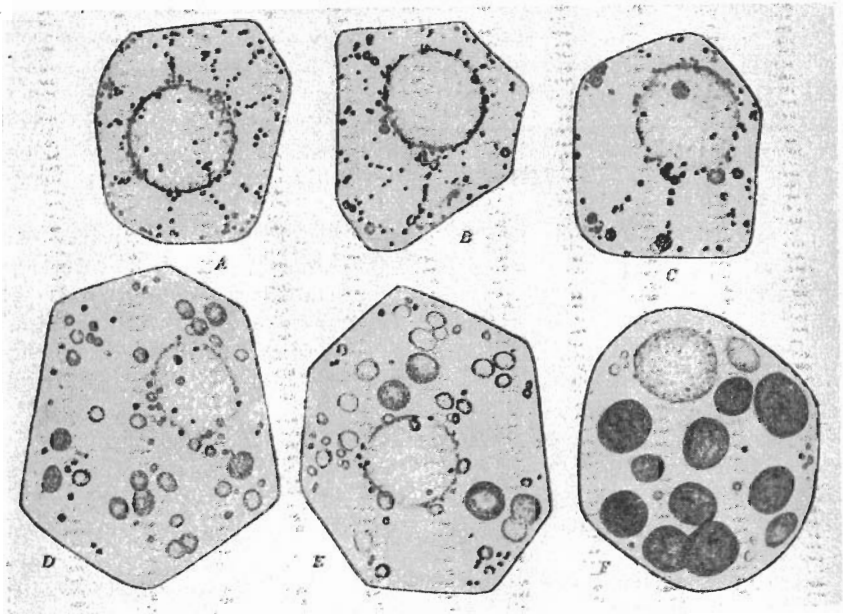


Abb. 8. Entwicklung von Chromoplasten aus ihren Vorstufen (Proplastiden) im Gewebe von Mais (*Zea mays*). Proplastiden dunkle Punkte (protodchlorophyllhaltig). Aus: W. Sharp, Einführung in die Zyologie.

gearbeitet hatte, das dem Gelehrten gestattete, Stoffmengen bis „hinunter“ zu wenigen Gamma ($1 \gamma = 0,000001 \text{ g}$) und u.U. noch weniger zu „wiegen“: die Papierchromatographie. Zu diesen Verfahren kamen noch die Entdeckung von Abarten der Photosynthese bei Bakterien (Purpurbakterien) und besonders bei Grünalgen (van Niel, Gaffron u. a.) sowie die Feststellung photochemischer Reaktionsfähigkeit von aus Pflanzen abgetrennten Chlorophyllkörnern (Hill, Warburg, Franck, Aronoff, French u. a.) hinzu.

Wie bereits im Vorwort erwähnt, ist die Problemlage durch eine Fülle von Veröffentlichungen gekennzeichnet. Eine erwünschte Vollständigkeit in der Aufführung und Verarbeitung des Schrifttums kann in diesem Rahmen nicht eingehalten werden. Es kommt vielmehr zunächst darauf an, unter Verzicht auf manche Einzelheit zu versuchen, einen Überblick über das Gebiet zu geben.

Der Chloroplast und seine Farbstoffe

1. Bau und Zusammensetzung der Chlorophyllkörner

Neben dem Protoplasma und dem Zellkern liegt in den Pflanzenzellen noch eine weitere Form lebender Substanz, die Plastiden. Bakterien, Cyanophyceen, Myxomyceten und Pilze sind frei von ihnen. Diese scharf umrissenen

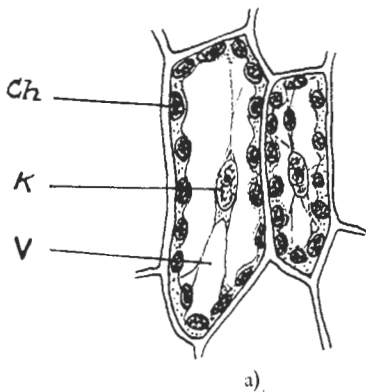
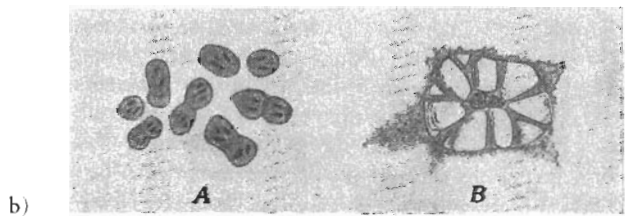


Abb. 1. a) Zellen mit Chloroplasten (Ch) aus dem Blatt des Laubmooses *Funaria*. V = Vakuole, K = Zellkern, (300 \times).

b) A sich teilende Chloroplasten von *Funaria* (Moos) mit Stärkekörnern. B Chloroplast von *Zygnema* mit einigen großen Stärkekörnern um ein zentrales Bildungsgebiet (Pyrenoid). Aus: Lester W. Sharp, Einführung in die Zytologie. Aus dem Englischen übersetzt von R. Jaretsky.



Chlorophyll b besitzt zwei Wasserstoffatome weniger und ein Sauerstoffatom mehr als „a“ ($C_{32}H_{28}O_2N_4Mg =$). Nach Frey-Wyssling besitzt das Farbstoffmolekül eine nagelförmige Struktur:

Das gelbgrüne Chlorophyll b unterscheidet sich nur in der Aldehydgruppe vom Chlorophyll a mit seiner Methylgruppe CH_3- am Pyrroling C.

