

Chemie und das Leben

Autor(en): **Grob, E.C.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft in Bern**

Band (Jahr): **22 (1964)**

PDF erstellt am: **06.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-319533>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

E. C. Grob

Chemie und das Leben¹

1. Annäherung an das Problem

Für die Entwicklung der organischen Chemie ist das Jahr 1828 von ganz entscheidender Bedeutung gewesen.

In der Epoche vor 1828 herrschte allgemein die als unumstößlich geltende Meinung, organische Verbindungen seien ausschließlich Produkte der Lebewesen. Zu dieser Sonderleistung sollten die Lebewesen einzig dank der ihnen innewohnenden Lebenskraft, oder *vis vitalis*, befähigt sein. Von diesem Standpunkt aus betrachtet muß also zwischen der Chemie der Lebewesen, die damals organische Chemie genannt wurde, und der Chemie der leblosen Welt, d. h. der anorganischen Chemie ein *grundsätzlicher* Unterschied bestehen, indem in der organischen Chemie und in der anorganischen Chemie nicht die gleichen Gesetze Gültigkeit haben konnten. Dieser Ansicht huldigte man bis zum Jahre 1828. Damals erfuhr die scheinbar so festgefügte Theorie der Lebenskraft ihre erste tiefgreifende Erschütterung, da es zum ersten Male gelungen war, eine organische Verbindung außerhalb der Zelle, also ohne Mitwirkung der Lebenskraft, künstlich herzustellen. Wir denken dabei an die berühmt gewordene Harnstoffsynthese von F. WÖHLER. Seine Synthese, dieses normal auftretenden Stoffwechselproduktes der Säugetierorganismen, geht aus von der anorganischen Verbindung Ammoniumcyanat.



Dieser fundamentalen Entdeckung folgten sehr bald weitere; es ist den Chemikern gelungen eine immer größere Zahl organischer Verbindungen

¹ Antrittsvorlesung, gehalten am 2. Mai 1964 an der Universität Bern. Institut für organische Chemie der Universität Bern, Länggäßstraße 7.

außerhalb der Zelle, d. h. *in vitro*, herzustellen. Seit Wöhlers Zeiten hat die synthetische organische Chemie eine außergewöhnlich starke Entwicklung erlebt. Es wäre unschwer dies anhand zahlreicher Beispiele zu belegen. Doch wollen wir verzichten, hier auf Einzelheiten einzutreten und uns mit dem Hinweis auf zwei markante Beispiele der neueren Zeit beschränken. Unlängst gelang einer amerikanischen Forschungsgruppe um Woodward und gleichzeitig auch einer deutschen Gruppe um Strell die vollständige Synthese des kompliziert gebauten Chlorophylls, des grünen Blattfarbstoffes. Auch sind in den letzten Jahren Methoden entwickelt worden, die den Aufbau höhermolekularer Verbindungen, von eiweißähnlichem Charakter, erlauben. So gelang zum Beispiel die Synthese des Insulins. Wie die beiden angeführten Beispiele uns gezeigt haben, lassen sich tatsächlich auch komplizierte Moleküle losgelöst von der lebenden Zelle aufbauen. Daher dürfen wir heute ohne Bedenken die Behauptung wagen, daß alle je von einer lebenden Zelle geschaffenen, organischen Verbindungen, sich prinzipiell auch *in vitro* synthetisieren lassen. Die Bildung organischer Verbindungen ist demnach nicht an die Existenz einer *vis vitalis* gebunden. Und dies zwingt uns zur Schlußfolgerung, daß alle chemischen Vorgänge innerhalb einer Zelle ausschließlich den Gesetzen gehorchen, die auch außerhalb der Zelle Gültigkeit haben. In der Tat hat die Biochemie den Nachweis erbracht, daß die Zelle über die genau gleichen Reaktionstypen verfügt, die auch dem Chemiker zu Gebot stehen. Mit dieser Erkenntnis mußten nunmehr auch die Grenzen, welche die organische Chemie von der anorganischen Chemie getrennt haben, fallen, d. h. die organische Chemie an sich ist ebensowenig eine selbständige Wissenschaft wie die anorganische Chemie, erst beide zusammen bilden die Chemie. Freilich halten wir auch heute noch an dieser historisch begründeten Trennung fest, doch wird sie nicht aus *prinzipiellen* Gründen aufrecht erhalten, vielmehr sind es praktische und didaktische Überlegungen, welche eine solche Abgrenzung auch heute noch berechtigt erscheinen lassen.

Trotzdem, wie wir gesehen haben, Zelle und Chemiker gleichsam die gleiche Chemie betreiben, und auch die gleichen Reaktionstypen verwenden, bestehen doch in der Art und Weise wie die Reaktionen durchgeführt werden bedeutsame Unterschiede. So möchte ich im Folgenden kurz die hervorstechendsten Unterschiede in der rein chemischen und der biochemischen Reaktionsführung etwas herausheben. Ich wähle als ein Beispiel unter tausenden die chemische Totalsynthese und die Biosynthese des β -Carotins aus. Das β -Carotin ist ein in der Natur außer-

Die chemischen Synthesen des β -Carotins verläuft nach dem in Fig. 2 dargestellten Schema.

Ich habe bewußt auf eine detaillierte Darstellung dieser Synthese verzichtet. Als Ausgangspunkt der Synthese erkennen wir eine Verbindung aus 3 C-Atomen. Die Kohlenstoffkette dieser Verbindung, Aceton, wird nun stufenweise derart verlängert, daß schlußendlich das Kohlenstoffgerüst der gewünschten C_{40} -Verbindung, d. h. des β -Carotins entsteht. Um vom kleinen Molekül des Acetons zum weit größeren Molekül des β -Carotins zu gelangen, sind 22 einzelne Reaktionsschritte notwendig. Auf Grund seiner Kenntnisse der Reaktionstypen und Reaktionsmöglichkeiten ist der Chemiker in der Lage, vorerst einmal eine solche Synthese auf dem Papier zu konzipieren. Darnach setzt nun die meist sehr langwierige und umfangreiche Laboratoriumstätigkeit ein. In unzähligen Versuchen müssen für jede einzelne der 22 Reaktionsstufen die günstigsten Bedingungen festgelegt werden und erst nach erfolgreichem Abschluß dieser Detail-Untersuchungen wird es möglich sein, die Synthese mit Erfolg durchzuführen.

Aus dem eben Gesagten erkennen wir, daß die Entdeckung einer solchen Reaktion keinesfalls auf Zufall beruhen kann. Vielmehr ist sie das Ergebnis einer intensiven und zielbewußten Zusammenarbeit einer ganzen Equipe wohl ausgebildeter Chemiker, die in ihrer Arbeit durch ein gutgeschultes Hilfspersonal unterstützt werden. Es wird uns damit auch klar, warum gerade die chemische Industrie einen derart hohen Bedarf an Forschungsschemikern hat.

Es kann keineswegs die Absicht der Industrie sein, Synthesen, wie etwa diejenige des β -Carotins, aus reiner Forscherfreude zu entwickeln, obwohl sie durch ihre Tätigkeit Wesentliches zur Erweiterung der Erkenntnisse beiträgt. Ihr Bestreben geht in erster Linie darauf aus, die Syntheseverfahren technisch auszuwerten. So hat auch die erwähnte β -Carotin-Synthese Eingang in die Technik gefunden. Um eine Laboratoriumsmethode in ein großtechnisches Verfahren umzugestalten, bedarf es wiederum großer Anstrengungen. An dieser Aufgabe beteiligen sich in enger Zusammenarbeit mit den Chemikern, Ingenieure und Techniker, welche die entsprechenden Apparaturen und Einrichtungen zu konstruieren haben. Wer je einen Blick in den Betrieb eines chemischen Großunternehmens getan hat, wird erstaunt gewesen sein über die imponierenden Ausmaße und Kompliziertheit der in einem solchen Betrieb eingesetzten, geheimnisvollen Apparaturen. So imponierend der Anblick eines chemi-

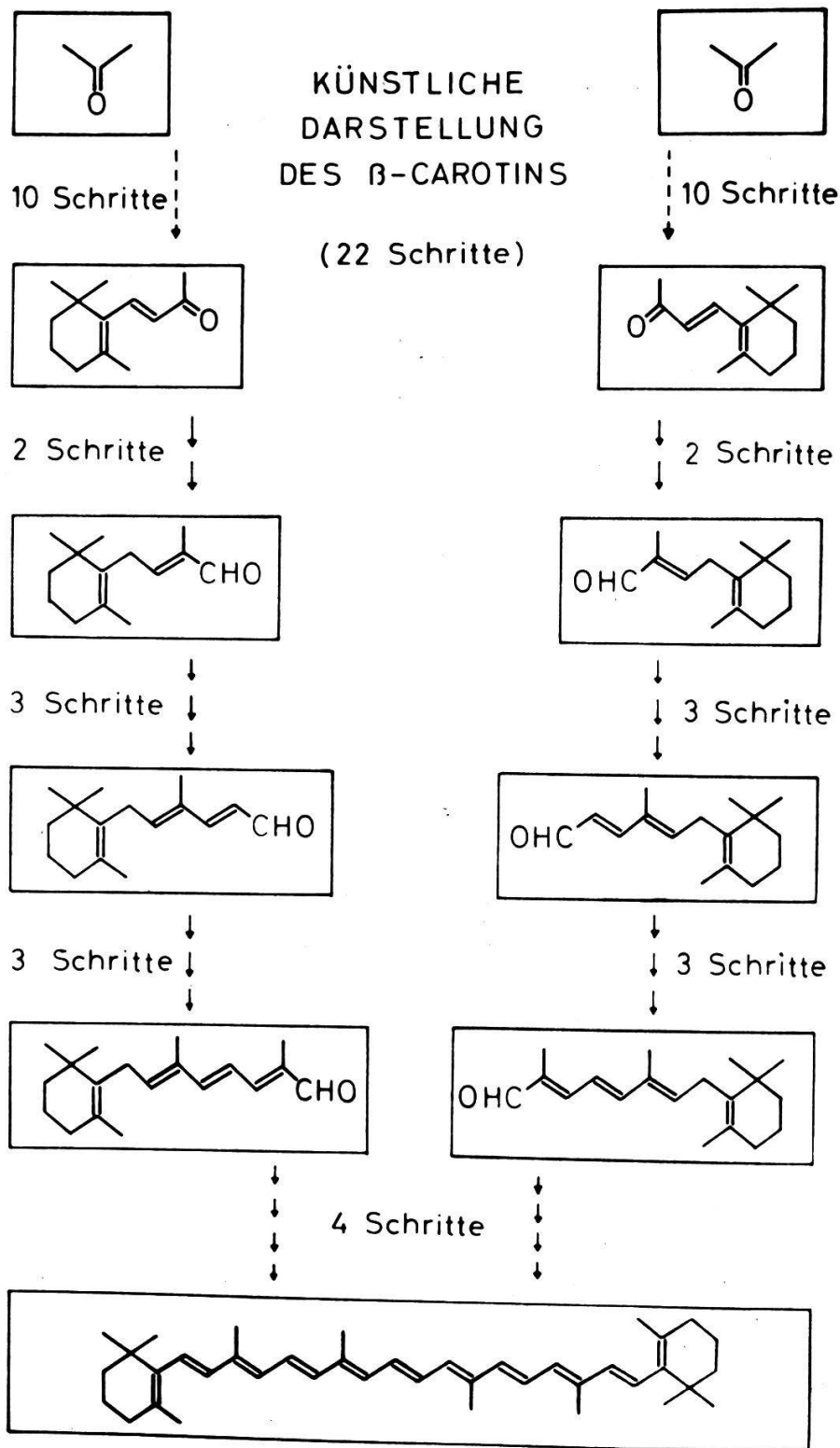


Fig. 2

schen Betriebes auch sein mag, er kann uns doch nicht über seine verhältnismäßig engen Leistungsgrenzen hinwegtäuschen.

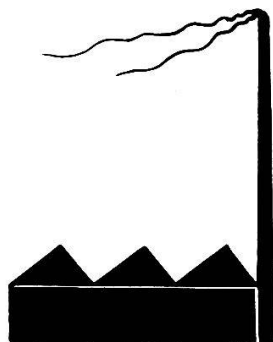
Bedenken wir, zu welchen chemischen Leistungen ein Lebewesen, und sei es nur ein einfacher Einzeller, befähigt ist, so müssen wir der lebenden Zelle in dieser Hinsicht eine unbedingte Überlegenheit zuerkennen. Denken wir uns etwa ein einfaches grünes Blatt. Dieses unscheinbare Gebilde, an dem wir meist achtlos vorübergehen, hat, wie auch die übrigen grünen Pflanzenteile, die Fähigkeit aus dem Kohlendioxyd der Luft, Wasser und einigen Mineralsalzen, unter Ausnutzung der Lichtenergie die Gesamtheit aller zum Leben notwendigen organischen Verbindungen aufzubauen. Einige der wichtigsten Verbindungsklassen, die zum Leben notwendig sind, seien hier erwähnt: Kohlenhydrate, Eiweißstoffe, Lipide (fettartige Verbindungen), Nucleinsäuren, Vitamine usw.

Trotz der enormen Entwicklung der chemischen Großindustrie, trifft es auch heute noch zu, daß der Großteil der organischen Verbindungen durch die grünen Pflanzen aufgebaut werden. Sollten die grünen Pflanzen ihre Tätigkeit aus irgend einem Grunde einstellen müssen, hätte dies für das Leben auf unserer Erde katastrophale Folgen.

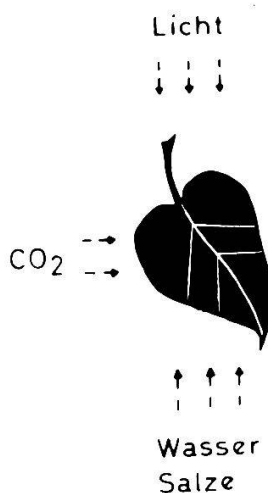
Wenn wir ein so unscheinbares grünes Blatt betrachten und dabei bedenken, zu welcher ungeheuren Leistungen es fähig ist, und uns andererseits an die komplizierten Einrichtungen erinnern, die der Mensch benötigt, um eine einzige, etwas komplizierter verlaufende Synthese, zu bewältigen, so müssen wir uns schon fragen: Ist ein pflanzliches Blatt eine wirklich so einfache und primitive Angelegenheit, wie es den Anschein hat? Wie kommt das Blatt zu dieser unaßlichen Leistungsfähigkeit?

Bevor wir auf diese Fragen eine Antwort suchen wollen, mögen an Hand des folgenden Bildes (Fig. 3) die chemischen Arbeitsweisen des Blattes (bzw. der Lebewesen überhaupt) und des Chemikers einander gegenübergestellt werden.

Die Einheiten der Lebewesen, in denen die chemischen Reaktionen sich abspielen, sind die Zellen. Eines der hervorstechendsten Merkmale der zellchemischen Vorgänge ist, daß eine einzelne Reaktion niemals unabhängig von den übrigen Reaktionen vor sich gehen kann. Während der ganzen Lebensdauer einer Zelle laufen ununterbrochen eine ungeheuer große Zahl verschiedenster chemischer Reaktionen gleichzeitig nebeneinander ab. Und zwischen all diesen tausenden gleichzeitig verlaufenden Reaktionen besteht eine sehr enge Wechselwirkung. Dies bedeutet, daß jede einzelne Reaktion sich in die Gesamtheit der Reaktionen ein-



Synthesen	gegenseitig kaum abhängig meist nicht eindeutig (Nebenprodukte)
Reaktions- bedingungen	weiter Bereich ($< 0^\circ$ bis $\infty 200^\circ$) meist keine spezifischen Katalysatoren
Produkte	Anzahl beschränkt



Synthesen	gegenseitig abhängig (Regulation) eindeutig (keine Nebenprodukte)
Reaktions- bedingungen	enger Bereich ($< 40^\circ$) spezifische Katalysatoren
Produkte	Anzahl heute noch <i>nicht</i> unübersehbar

Fig. 3

ordnen und sich unterordnen muß. Diese Gesamtheit aller Reaktionen bezeichnen wir gewöhnlich als Stoffwechsel der Zelle.

Der Zellstoffwechsel gehört zu den wichtigsten Lebensäußerungen der Zelle. Die Lebensfähigkeit einer Zelle hängt weitgehend vom störungsfreien Ablauf des Stoffwechsels ab. Treten solche Störungen ein, so wirken sie sich immer nachteilig für das Leben aus, vielfach führen sie zum Tod der Zelle. Für die Lebenserhaltung einer Zelle ist es somit wichtig, den normalen Ablauf der Stoffwechselreaktionen zu sichern. Diese Sicherheit ist nur so lange gewährleistet als die im Stoffwechsel integrierten Einzelreaktionen absolut eindeutig verlaufen; d. h. es dürfen bei diesen Reaktionen keinerlei Nebenprodukte anfallen. Jeder, der etwas Erfahrung im organisch-synthetischen Arbeiten besitzt, muß gestehen, daß diese Forderung nach eindeutiger Reaktionsführung in der organischen Chemie *in vitro* in den allermeisten Fällen nicht erfüllbar ist. Normalerweise bilden sich bei den organisch-chemischen Reaktionen

neben dem Hauptprodukt immer eine mehr oder weniger große Zahl von Nebenprodukten.

Betrachten wir noch die Energieverhältnisse. Die meisten chemischen Reaktionen sind mit einem Energiewechsel verbunden, so wird bei gewissen Reaktionen Energie frei, bei andern aber besteht ein Bedarf an Energie. Die letztgenannten Reaktionen können überhaupt nicht in Gang geraten, wenn nicht ein bestimmter Energiebetrag zugeführt wird. Beide Reaktionsarten finden wir auch in der lebenden Zelle. Hat der Chemiker eine energiebedürftige Reaktion in Gang zu bringen, so führt er in den allermeisten Fällen die benötigte Energie in Form von Wärme zu. Dies ist der Grund, daß viele Reaktionen des Chemikers nur bei höheren Temperaturen durchgeführt werden können, und zwar in Temperaturbereichen, die der lebenden Zelle unerträglich sind. Der Temperaturbereich der lebenden Zelle, darf im allgemeinen ohne nachteilige Folgen 40°C nicht wesentlich übersteigen. Damit ist aber auch schon gesagt, daß die Zelle ihre energieerheischenden Reaktionen bei niedrigen Temperaturen durchzuführen hat. Wir wissen heute, daß dieses Ziel erreicht werden kann durch den Einsatz geeigneter Katalysatoren, die wir gewöhnlich als Fermente oder Enzyme bezeichnen. Die Aufgabe der Fermente besteht darin, die sogenannten Aktivierungsenergie herabzusetzen. Der Energiebedarf, der zur Durchführung von lebenswichtigen Reaktionen aufgewendet werden muß, wie etwa der Synthese organischer Verbindungen, bezieht die Zelle direkt aus den energieliefernden Abbau-Reaktionen. Durch diese sinnreiche, direkte Kopplung energieliefernder und energiebedürftiger Reaktionen, ist eine rationelle Ausnutzung der Energie gewährleistet. Durch diese Kopplung wird aber auch verhindert, daß größere Mengen an chemischer Energie in zu hohem Maße als Wärme abgegeben werden müssen.

2. Die Organisation der lebenden Zelle

Wir haben vorhin in knappen Zügen einige Gründe angeführt, die der Zelle eine rationelle Reaktionsführung erlauben. Diese Angaben allein reichen jedoch keineswegs aus, um das Zustandekommen der verwickelten Organisation des Stoffwechsels zu erklären.

Die folgenden Zeilen mögen uns einen ersten Eindruck vom Plan und der Zweckmäßigkeit der Zellorganisation im Hinblick auf die chemischen Stoffwechselforgänge vermitteln.

Wie schon erwähnt, spielen sich alle Lebensvorgänge in den Zellen, den kleinsten Lebenseinheiten, ab. Wohl den wichtigsten Anteil am chemischen Zellgeschehen hat das Protoplasma, denn in ihm spielen sich, wie wir heute wissen, die allermeisten chemischen Reaktionen ab. Den älteren Forschergenerationen, denen noch nicht die hochentwickelten, modernen Mikroskope, verschweige denn Elektronenmikroskope zur Verfügung standen, gab sich das Protoplasma als eine zähflüssige, trübe und unstrukturierte Lösung zu erkennen.

Vergegenwärtigen wir uns die Kompliziertheit der Stoffwechselfvorgänge, so will uns scheinen, das Protoplasma könne nicht ausschließlich eine gestaltlose Mischung verschiedenartiger Verbindungen darstellen. Wahrscheinlicher scheint uns, daß sich etwas von der strengen Ordnung, die den Stoffwechsel beherrscht, in irgendeiner Form dem Protoplasma mitgeteilt hat. Dank der wesentlichen Fortschritte, die in den letzten Jahren auf dem Gebiete des Mikroskop-Baues und der Mikroskopier-technik erzielt worden sind, konnten in der Erforschung des Protoplasmas bedeutsame Erkenntnisse erworben werden.

Als überragende Entdeckung auf diesem Gebiet, dürfen wir wohl die Einsicht in die Feinstruktur des Protoplasmas werten. Aus mikroskopischen und vor allem auch elektronenmikroskopischen Bildern geht hervor, daß das Protoplasma aus einer ganzen Reihe charakteristischer, feinstrukturierter «Partikeln» besteht. Einige der charakteristischsten Protoplasmabestandteile seien im Folgenden aufgeführt und ihre Bedeutung kurz gekennzeichnet:

Einige charakteristische Zellbestandteile

Membran	Stoffdurchtritt und Transport
Zellkern	Zellteilung, Vererbung
Mitochondrien	Multienzymsystem Energieproduktion (Atmungskette)
Ribosomen	Biosynthese der Eiweiße
Lysosomen	Sekretion spaltender Enzyme
Chloroplasten	Charakteristischer Bestandteil grüner Pflanzenzellen Photosynthese

Die elektronenmikroskopischen Aufnahmen sollen einen Eindruck von der Reichhaltigkeit dieser Zellstrukturen vermitteln (siehe Abbildungen 1 und 2).

Charakteristisch für diese reich strukturierten Gebilde des Protoplasmas sind die zahlreichen intracellulären Membrane. Durch die Ausbildung dieser intracellulären Membrane kommen verschiedene Phasengrenzflächen (lipophil-hydrophil) zu Stande. Es besteht kein Zweifel, daß die enzymatischen Reaktionen, die sich in einem solchen Milieu abspielen, sich in bezug auf Spielraum und Richtung wesentlich anders verhalten müssen als enzymatische Reaktionen die wir in einer wässrigen Phase oder auch in einem andern einphasigen Milieu studieren. Deshalb ist nicht von der Hand zu weisen, daß die Zellstrukturen in direktem Zusammenhang mit der «Zellaktivität» stehen. Inwiefern diese Anschauungen den Realitäten entsprechen, soll im folgenden an einem Beispiel untersucht werden. Als solches wählen wir die pflanzlichen Plastiden.

Die *Chloroplasten* sind an ihrer, durch Chlorophyll bedingten grünen Farbe leicht erkenntlich. Im Gegensatz zu den Chloroplasten enthalten die *Chromoplasten* kein Chlorophyll mehr; ihre gelbe bis rote Färbung wird durch die anwesenden Carotinoide hervorgerufen. Es ist eine altbekannte Tatsache, daß die Chloroplasten sich in Chromoplasten umwandeln können. Durch das Verschwinden der Chlorophylle aus den Chloroplasten geht die Fähigkeit der Photosynthese verloren. Für die Pflanze ist dies insofern bedeutungsvoll, als daß sie vom autotrophen Zustand in den heterotrophen übergeht. Autotrophe Organismen unterscheiden sich von den heterotrophen durch ihren Stoffwechsel. Die Plastenumwandlung bringt daher eine wesentliche Umstellung des Stoffwechsels mit sich.

Die Umwandlung der Chloroplasten in die Chromoplasten ist von einer tiefgreifenden Änderung der Feinstruktur begleitet. Der künftigen Forschung bleibt es vorbehalten, nachzusehen auf welche Weise sich diese Strukturumwandlung vollzieht. Wir haben schon darauf hingewiesen, daß in pflanzlichen Geweben, nach erfolgter Plastenumwandlung, Veränderungen im Stoffwechsel zu erwarten sind. Sehr schön lassen sich diese Stoffwechseländerungen, die ausschließlich eine Folge der andersartigen chemischen Potenzen sind, bei reifenden Früchten verfolgen. Zur Demonstration dieses Phänomens mag ein Beispiel genügen. Vergleichen wir beispielsweise die Pigmentzusammensetzung der unreifen grünen Früchte der Eibe (*Taxus baccata*), so stellen wir fest, daß qualitativ und quantitativ die Pigmente der grünen Früchte dieselben sind, die auch in den Blättern vorkommen. Dies ist soweit nicht verwunderlich, da ja die Blätter und die Früchte Chloroplasten der gleichen Art enthalten, welche natürlich dieselben chemischen Fähigkeiten haben. Mit eintretender Rei-



Abb. 1 Struktur der Mitochondrien

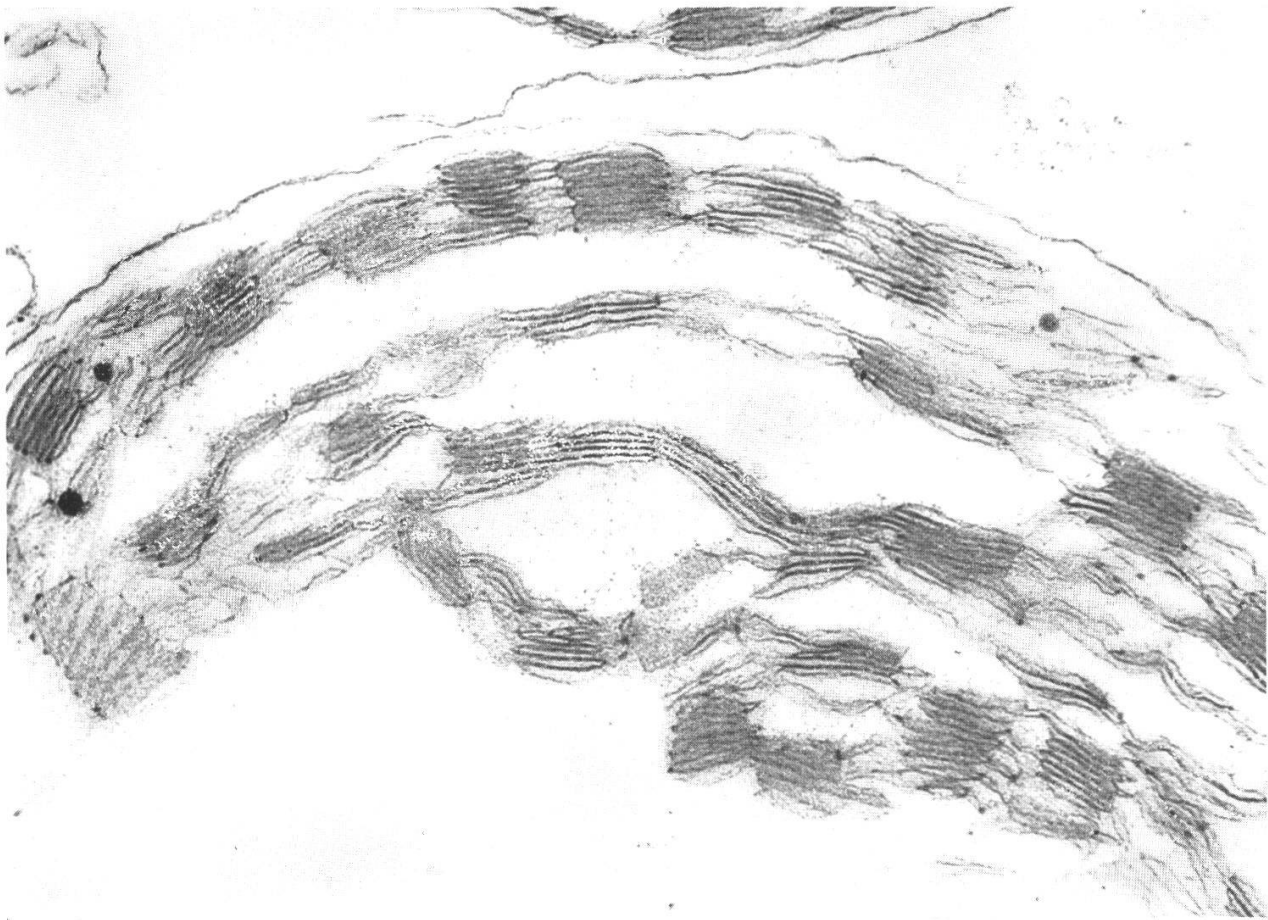


Abb. 2 Chloroplastenstruktur von *Spirodela oligorhiza*
(Aufnahme von J. Rufener.) Vergrößerung 25 000fach.

fung der Früchte, die sich in einer Gelbfärbung der Fruchtscheitel zeigt, beginnt sich auch der ursprüngliche Pigmentbestand zu verändern. Während des Reifeprozesses findet eine Umwandlung der Chloroplasten in Chromoplasten statt. In den nicht voll ausgereiften Früchten sind, neben noch unveränderten Chloroplasten, vollständig ausgebildete Chromoplasten vorhanden. Da die Chromoplasten sich in den chemischen Potenzen von den Chloroplasten wesentlich unterscheiden, ist zu erwarten, daß die halbreifen Früchte außer den Produkten der Chloroplastentätigkeit auch noch diejenigen der Chromoplasten enthalten. Beschränken wir uns wiederum auf die Untersuchung der Pigmente, können wir feststellen,

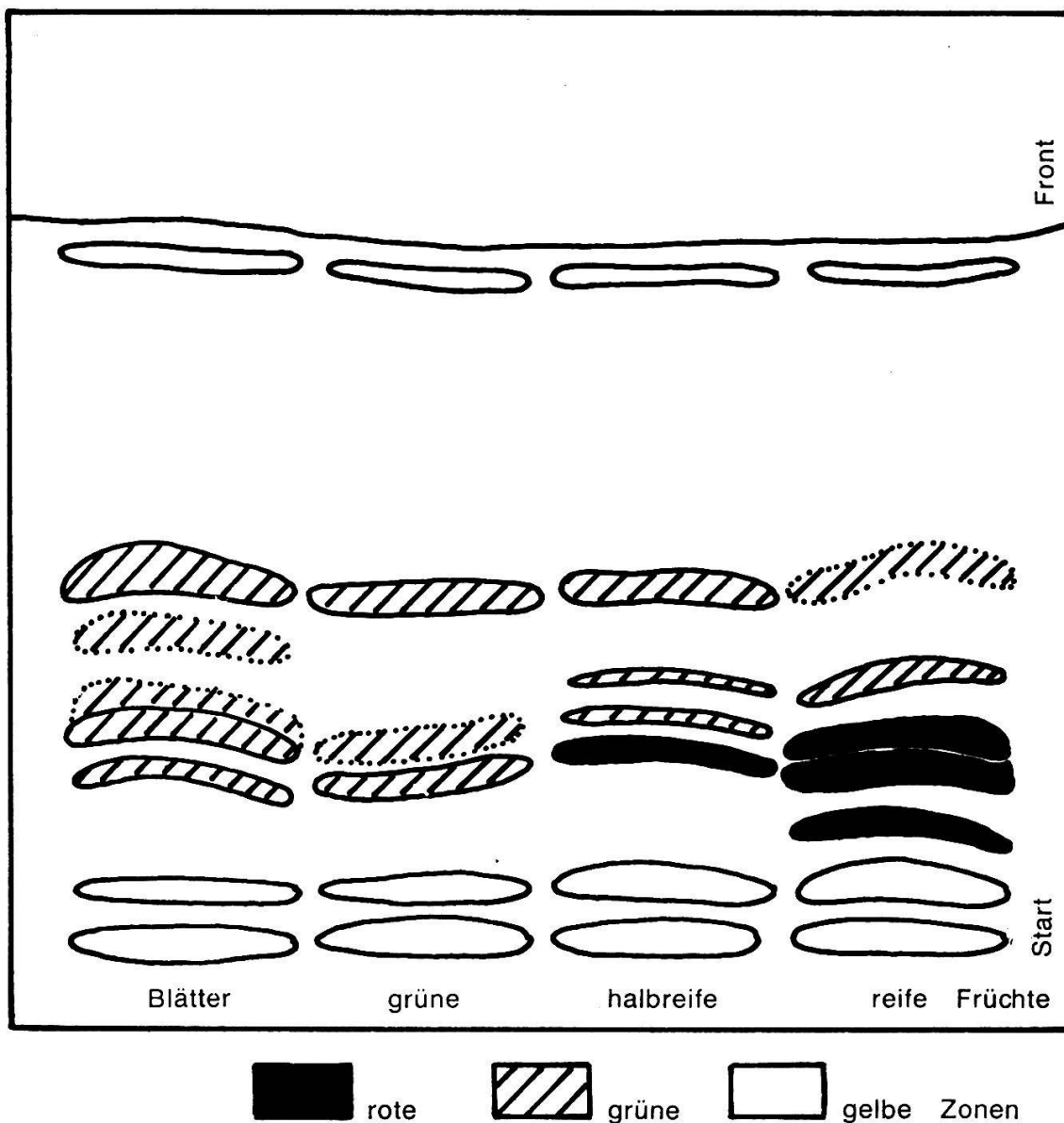


Fig. 4 Dünnschichtchromatogramm von *Taxus baccata*

daß neben noch vorhandenen Chloroplasten-Pigmenten, neuartige Vertreter vorhanden sind, die von den Chromoplasten herkommen. Bei den vollausgereiften Früchten, mit leuchtend rotem Fruchtbecher, sind die Chloroplasten vollständig verschwunden. Deshalb fehlen in den vollausgereiften Früchten die Chloroplastenpigmente vollständig, an ihrer Stelle stehen nur noch die von den Chromoplasten synthetisierten Farbstoffe.

Fig. 4 stellt die Aufnahme von Dünnschichtchromatogrammen dar, die aus Extrakten grüner Blätter, grüner, halbreifer und vollausgereifter Früchte hergestellt wurden. Durch die Methode der Dünnschichtchromatographie lassen sich die Farbstoffgemische der Pflanzenextrakte in die einzelnen Farbstoffkomponenten auftrennen. Da die Chromatographie eine sehr schonende Methode ist, können die einzelnen Farbstoffe isoliert und quantitativ bestimmt werden.

Ganz ähnliche Vorgänge wie bei der Fruchtreifung, spielen sich auch in der alljährlich wiederkehrenden Herbstverfärbung grüner Blätter ab. Die grünen Blätter verschiedenartiger Pflanzen weisen während der Vegetationsperiode im großen und ganzen dieselben Carotinoide auf. Auch die Mengenverhältnisse bleiben bis zum Eintritt der Vergilbung konstant. Mit eintretender Herbstfärbung sinkt zum Beispiel der Carotinoidgehalt plötzlich um rund 25 % ab. Die Zusammensetzung der Carotinoide in den gelben Blättern hat sich ebenfalls grundlegend verändert. So zum Beispiel ist eine Hauptkomponente der Sommerblätter, das β -Carotin, vollständig verschwunden. In den Sommerblättern liegen die «Hydroxyl-Gruppen»-tragenden Carotinoide (Xantophylle) als freie Verbindungen vor; in den Herbstblättern hingegen sind solche freie Xanthophylle nicht mehr anzutreffen, sie sind nunmehr mit Fettsäuren (insbesondere Linolensäure) verestert worden. Außerdem lassen sich in den Herbstblättern eine große Menge von fettlöslichen Verbindungen nachweisen, die in den Sommerblättern vollständig fehlen. Das heißt das grüne Sommerblatt und das gelbe Herbstblatt haben verschiedene chemische Fähigkeiten.

Die Umstellung vom Sommerblatt zum Herbstblatt erfolgt in recht kurzer Zeit. In dieser Zeitspanne vollzieht sich, wie bei der Reifung der Früchte eine Umwandlung der Chloroplasten, in diesem Falle zu Gebilden, die zurzeit noch kaum untersucht wurden, die wir vorderhand als «Herbstchromoplasten» bezeichnet haben.

Anhand der diskutierten Beispiele konnten wir zeigen, daß die Strukturumwandlung der Plasten mit einer Umstellung der chemischen Akti-

vitäten einhergeht. Die Fähigkeit, Strukturen umzubauen und damit eine Umstellung in den chemischen Aktivitäten zu bewirken, erlaubt es der Zelle ihren Stoffwechsel an besondere Lebensumstände anzupassen.

Wir haben experimentell versucht, durch Änderung der normalen Lebensbedingungen eine künstliche Plastenumwandlung zu provozieren. Als Versuchspflanze für die von J. Rufener durchgeführten Untersuchungen diente eine Wasserlinse (*Spirodela obliquorhiza*). *Spirodela* ist eine grüne, photosynthetisierende Pflanze, deren Zellen Chloroplasten enthalten. Setzt man zu der sterilen, mineralischen Nährlösung eine Kohlenhydratquelle zu (zum Beispiel Glucose), so läßt sich leicht feststellen, daß die Pflanze, die sich in der Nährlösung befindende Glucose aufnimmt und verwertet. Damit wird aber die Photosynthese eigentlich überflüssig. Wird die Versuchspflanze während einiger Zeit mit Zucker gefüttert, so beobachtet man eine Umwandlung der Chloroplasten in Chromoplasten, was sich äußerlich durch Vergilbung äußert. Bringt man jedoch diese vergilbten Pflanzen zurück in eine Nährlösung ohne Kohlenhydrate, so muß die Pflanze, um am Leben zu bleiben, diese fehlenden Nährstoffe wiederum selbst herstellen, d. h. die Möglichkeiten der Photosynthese sollten sich wiederum einstellen. Dies tritt nun tatsächlich ein, indem die Chromoplasten sich in die Chloroplasten zurückverwandeln.

Diese Versuche, die erst im Anfangsstadium stehen, geben uns jedoch keinen Aufschluß über die Faktoren, welche direkt die Plastenumwandlung hervorrufen.

3. Das Leben

Die vorangehenden Ausführungen haben uns tatsächlich eine enge Beziehung zwischen Feinstruktur und chemischer Leistung erkennen lassen. Um den ursächlichen Zusammenhang zwischen Struktur und chemischer Leistung zu verstehen, müßte man allerdings die Anordnung der aktiven Moleküle innerhalb der Strukturen kennen. Die Erforschung der molekularen Architektur der Zellstrukturen ist daher heute zu einem der wichtigsten Anliegen der Biochemie geworden. Es soll aber nicht verschwiegen werden, daß diese modernste Forschungsrichtung ungeheuer großen Schwierigkeiten begegnet.

Bei diesen molekularen Anordnungen handelt es sich um ganz reale, materielle Dinge, so daß es durchaus möglich sein wird, sie mit Hilfe na-

turwissenschaftlicher Methoden zu erkennen. Wenn wir aber in einer ferneren Zukunft einmal Einsicht in die molekulare Struktur der Zellpartikel haben werden, wird es prinzipiell möglich sein eine vollkommene Zelle künstlich aufzubauen. Nehmen wir an, dieses Unterfangen könnte trotz der ungeheuer großen praktischen Schwierigkeiten, realisiert werden, so stellt sich die Frage, ob eine solche künstliche Zelle auch die typischen Lebensmerkmale aufweisen wird. Zu einer definitiv bejahenden Antwort dürfen wir uns jedoch erst dann entschließen, wenn wir uns überzeugt haben, daß das Leben eine rein materielle Angelegenheit ist. Nur wenn dies zutrifft, ist das Leben physikalisch-chemisch erklärbar.

Eine der bemerkenswertesten Eigenschaften der lebenden Zelle ist ihre außerordentliche Stabilität gegenüber jeglichem Zerfall. Die Aufrechterhaltung dieser bemerkenswerten Stabilität wird durch die hohe Ordnung, mit der sich die Lebensvorgänge abspielen (zum Beispiel Stoffwechselfvorgänge) gewährleistet. Diese hohe Ordnung, die einen lebenden Organismus beherrscht, weist auf eine sehr kleine Entropie hin, die während der ganzen Lebensdauer aufrechterhalten wird. Die Herstellung solch eines ungeheuer komplizierten, geordneten Systems, das aus zahllosen, reaktiven Molekülen besteht, ist an sich schon ein Rätsel. Noch schwieriger zu beantworten erscheint mir die Frage nach den Kräften, welche der Entropie so wirksam entgegenreten.

Um einen lebenden Organismus abzutöten, genügt ein kleiner Eingriff an kritischer Stelle, der das molekulare Gefüge kaum wesentlich verändert. Dieser Eingriff beschränkt sich auf einen sehr engen Zellbezirk und dennoch können wir feststellen, daß fernerliegende, vom Eingriff ganz unbetroffene Zellen ebenfalls absterben. Vom materiellen Standpunkt aus betrachtet, ist diese Erscheinung kaum verständlich.

Charakteristisch für die tote Zelle ist, daß die herrschende Ordnung plötzlich zusammenbricht. Das heißt Koordination und Regulation der Lebensvorgänge sind aufgehoben und an ihre Stelle tritt Anarchie. In diesem Zustande entfaltet jedes Enzym eine Tätigkeit, die sich um das übrige Geschehen nicht mehr kümmert. Dies hat sehr bald Selbstauflösung, oder Autolyse der Zelle zur Folge. Mit andern Worten, der tote Körper strebt sofort einer größeren Entropie zu. Beim Absterben verliert die Zelle die Kraft, die der Entropie entgegenwirkt. Der Besitz dieser Widerstandskraft, die den ganzen Organismus erfüllt, unterscheidet das Lebende vom Nicht-Lebenden.

Ein weiteres wichtiges Lebensmerkmal ist Gestalt und Größe eines Lebewesens. Vergewährtigen wir uns etwa das Bild irgend eines natür-

lich gewachsenen Baumes. Schon das Erkennen der Form genügt meist, um ihn klassieren zu können. Noch genauere Klassifikation erreichen wir auf Grund der Bestimmung seiner bis in alle Einzelheiten genau festgelegten Formen der Blätter. Bei näherer Betrachtung der Blätter stellen wir fest, daß ihre Größe, insofern es sich um eine gesunde Pflanze handelt, innerhalb nur sehr kleiner Grenzen schwankt. Ganz allgemein können wir sagen, daß Größe und Gestalt, eines unter normalen Lebensbedingungen stehenden Organismus, über Generationen hinweg erhalten bleibt, wir sprechen von der Vererbbarkeit dieser Eigenschaften. Und dies bedeutet, daß Gestalt und Größe des Lebewesens schon in seiner Keimzelle festgelegt sein müssen.

Der ausgewachsene Organismus entsteht aus einer einzigen Keimzelle durch millionenfache Zellteilung. Ist im Verlaufe dieses Wachstums die vorbestimmte Gestalt und Größe einmal erreicht, so wird das Wachstum eingestellt. Wie ist es möglich, daß gerade im richtigen Augenblick das Wachstum eingestellt wird? Wir können sagen, die Keimzelle enthalte eben die entsprechenden Informationen. Diese Feststellung gibt aber keine Erklärung des Phänomens, denn wir können schließlich nach der Herkunft dieser Information weiterfragen. Ist die beschriebene Erscheinung überhaupt physikalisch-chemisch erklärbar?

Die Physiker lehren uns, daß alle physikalischen Gesetze differentiell sind. Dies bedeutet, daß die physikalischen Gesetze ihre Gültigkeit nur so lange behalten, als sie auf ihre unmittelbare Nachbarschaft und zeitlich nicht in die Ferne wirken. Diesen physikalischen Forderungen widerspricht aber das Wachstumsphänomen ganz und gar, da der Abschluß des Wachstums schon in der Keimzelle, also vor dem Beginn des Prozesses, festgelegt ist. Eine physikalische Erklärung dieser Lebenserscheinung wird daher nicht möglich sein.

Wir können aus unseren Betrachtungen folgende Schlußfolgerungen ziehen: Die materiellen Vorgänge in der Zelle gehorchen den physikalisch-chemischen Gesetzen. Die Erforschung dieser Lebensäußerungen gehören in den Aufgabenbereich des Naturforschers. Die Erklärung des Lebens an sich entzieht sich der naturwissenschaftlichen Betrachtungsweise, da sie nicht den physikalisch-chemischen Gesetzen gehorcht. Der Naturwissenschaftler ist daher außerstande, mit Hilfe seiner Methoden eine Erklärung für das Wesen des Lebens zu finden.

