

Über die Befruchtungssstoffe und geschlechtsbestimmenden Stoffe bei Pflanzen und Tieren*)

Von

Prof. Dr. RICHARD KUHN,

Kaiser Wilhelm-Institut

für medizinische Forschung,

Heidelberg

Inhalt: I. Befruchtung. — 1. Wesen und Bedeutung des Befruchtungsvorganges. 2. Forschungsrichtungen der Biologie und chemische Fragestellungen. 3. Isogamie und Anisogamie. 4. Chemotaxis zwischen Ei und Spermatozoon bei *Arbacia*. 5. Die Aktivierung der Gameten von *Chlamydomonas*. 6. Grenze der Wirksamkeit. 7. Die Kopulation zwischen ♂- und ♀-Gameten. 8. Relative Sexualität. — II. Geschlechtsbestimmung. — 1. Phänotypische und genotypische Bestimmung des Geschlechts. 2. Primäre und sekundäre Geschlechtsmerkmale. 3. Hormon, Gamon, Termon. 4. Die chemische Determinierung des Geschlechts bei der Grünalge *Chlamydomonas synoica*. 5. Das pikrocrocinspaltende Ferment. 6. Beziehungen zum Gen.

I. Befruchtung.

1. Wesen und Bedeutung des Befruchtungsvorganges.

Für jede Pflanze, jedes Tier und jeden Menschen ist die Dauer des Lebens verhältnismäßig eng begrenzt. Wenn dennoch die einzelnen Arten auf unserer Erde über sehr lange Zeiträume, über geologische Epochen hinaus, zu bestehen vermögen, dann liegt dies daran, daß dem einzelnen Lebewesen die Fähigkeit gegeben ist, Nachkommen zu erzeugen, sich zu vermehren. Die Möglichkeit der Fortpflanzung ist in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle gebunden an das Vorhandensein zweier Geschlechter, eines männlichen und eines weiblichen. Die Fortpflanzungsprodukte des weiblichen Organismus, die ♀-Gameten (z. B. Eizellen) vereinigen sich und verschmelzen mit den Fortpflanzungsprodukten des männlichen Organismus, den ♂-Gameten (z. B. Spermatozoen): es findet ein Befruchtungsakt statt. Aus der Zygote, dem Verschmelzungsprodukt der männlichen und weiblichen Gameten, entwickeln sich dann neue Individuen derselben Art. So pflanzt sich das Leben von Generation zu Generation fort¹⁾.

Die Tatsache, daß es männliche und weibliche Organismen gibt, und die Erkenntnis, daß die Fortpflanzung irgendwie mit dem Vorgang der Befruchtung zusammenhängt, hat von jeher dazu verlockt, Deutungs- und Erklärungsversuche anzustellen. Sind doch diese Erscheinungen für den einzelnen Menschen und die menschliche Gemeinschaft von der allergrößten Bedeutung; aber auch für die Zucht vieler Tiere und zahlloser Pflanzen, die der Mensch in seinen Dienst gestellt hat. So kommt es, daß im Laufe der Zeit nicht weniger als 400 verschiedene Hypothesen über das Wesen der Sexualität und der Befruchtung sich im wissenschaftlichen Schrifttum angehäuft haben. Die überwiegende Mehrzahl ist, wie M. Hartmann²⁾ ausgeführt hat, phantastischer Natur.

2. Forschungsrichtungen der Biologie und chemische Fragestellungen.

Die rein spekulativen Vorstellungen sind nach und nach verdrängt worden. Etwa seit der Mitte des vergangenen Jahrhunderts haben sich durch planmäßige Beobachtungen und zielbewußte Anstellung von Versuchen neue wichtige Einblicke gewinnen lassen. Den großen Fortschritt, der seither erzielt worden ist, verdankt die Wissenschaft im wesentlichen den folgenden drei biologischen Forschungsrichtungen: a) der vergleichenden mikroskopischen Untersuchung tierischer und pflanzlicher Geschlechtszellen, b) den experimentellen Feststellungen über die Vererbung des Geschlechts bei höheren Pflanzen und Tieren, c) physiologischen und genetischen Untersuchungen über die Vererbung und Geschlechtsbestimmung bei einzelligen Lebewesen³⁾.

In der Mitte des Bildes, das die Biologie heute vom Wesen der Geschlechter und des Befruchtungsvorganges entwirft, stehen die Vererbungsgesetze von Mendel und Correns sowie die in den Zellkernen vorkommenden Kernfäden (*Chromosomen*), die man als Träger bestimmter Erbfaktoren (*Gene*)

erkannt hat. Es ist begreiflich, daß fast alle modernen Hilfsmittel naturwissenschaftlicher Forschung herangezogen worden sind, um die stoffliche Natur und Wirkungsweise dieser Erbfaktoren zu entsleiern. Wir wissen darüber noch immer ganz außerordentlich wenig. Für den Chemiker ist es auch kaum verlockend, an diese Geheimnisse unmittelbar heranzugehen, einfach deshalb, weil es noch kein Verfahren gibt, die Chromosomen oder Teile derselben aus den Zellkernen in der für eine chemische Untersuchung erforderlichen Reinheit und Menge herauszupräparieren. Wenn eine Untersuchung, über die ich im folgenden berichten werde, uns dem Verständnis eines Gens und seiner chemischen Wirkungsweise nahegebracht hat, so war dies nur auf einem Umwege möglich: Es gibt Erscheinungen, wie die Determinierung des Geschlechts, die bei gewissen Lebewesen nicht nur auf dem Wege der Vererbung, sondern auch durch das Sekret anderer Zellen zustande kommen können. Wir haben uns daher bemüht, zunächst die chemische Natur der in diesen Sekreten vorkommenden Wirkstoffe aufzuklären und haben später erkannt, daß bei dem erbgelungenen, durch das Gen bedingten Vorgang etwas im Spiel ist, was denselben Stoff innerhalb der Zelle erzeugt.

Als Grundlage der hier aufgezeigten Forschungsrichtung ist es notwendig, die von männlichen und weiblichen Geschlechtszellen erzeugten spezifischen Stoffe zu kennen. Bis zu Beginn unserer Untersuchungen war hierüber nichts bekannt. Man konnte nur vermuten, daß bei einer biologisch so bedeutungsvollen Reaktion, wie sie die Verschmelzung eines weiblichen mit einem männlichen Gameten darstellt, von beiden Seiten höchst spezifische Stoffe in Reaktion treten werden. Die bisher gewonnenen Ergebnisse zeigen, daß der Vorgang der Befruchtung nicht, wie man zu sagen pflegt, ein Akt ist, sondern chemisch betrachtet ein großes Schauspiel darstellt, das sich aus vielen einzelnen Akten zusammensetzt, in denen die verschiedensten Wirkstoffe, „Anlockungsstoffe“, „Beweglichkeitsstoffe“, „Kopulationsstoffe“, „Agglutinierungsstoffe“ u. a. auf die Bühne treten.

Das interessanteste dieser Schauspiele in all seine Einzelheiten chemisch zergliedern zu können — ich meine die Reaktion einer menschlichen Eizelle mit einem menschlichen Samenfaden —, dürfen wir kaum erhoffen. Was der Forschung heute zugänglich ist, das sind einige wenige Teilvorgänge und auch diese nur an besonders ausgewählten, verhältnismäßig niederen Organismen.

3. Isogamie und Anisogamie.

Die Gameten lassen, wenn man von den Einzellern über die Pflanzen zu den höheren Tieren fortschreitet, schon rein äußerlich, d. h. bei mikroskopischer Betrachtung, eine zunehmende Differenzierung erkennen. Bei vielen Grünalgen, von denen noch eingehender die Rede sein wird, zeigen die männlichen und weiblichen Geschlechtszellen ganz genau gleiche Gestalt. Man nennt sie daher morphologisch *isogam*. Daß dennoch zwei verschiedene Geschlechter vorkommen, konnte lange Zeit nur daraus gefolgert werden, daß die eine Sorte der Gameten niemals mit ihresgleichen, sondern stets nur mit Gameten der anderen Sorte zu kopulieren vermag. Heute sind wir in der Lage, ganz bestimmte chemische Unterschiede zwischen den männlichen und weiblichen Gameten,

*) Vorgetragen in München am 9. Dezember 1939 aus Anlaß der Akademischen Jahresfeier und XVIII. Tagung des Bundes der Freunde der Technischen Hochschule München.

¹⁾ R. Hertwig, Über Wesen und Bedeutung der Befruchtung, Sitzungsber. Akad. Wiss. München 32, 57 [1902]; M. Hartmann: Allgemeine Biologie, 2. Aufl., Jena 1933, G. Fischer, S. 411 ff.

²⁾ M. Hartmann: Geschlecht und Geschlechtsbestimmung im Tier- und Pflanzenreich, Berlin 1939, W. de Gruyter & Co.

auch wenn sich diese nicht mikroskopisch unterscheiden lassen, anzugeben.

In günstigen Fällen läßt sich die scharfe Trennung der Geschlechter bei bestehender Isogamie auch schön demonstrieren. So bei *Dunaliella viridis*. Wie schon der Name besagt, sind die Zellen dieses Phytoflagellaten normalerweise grün. Läßt man eine Kultur längere Zeit in einer stickstoff- und phosphorarmen Lösung, so schlägt die Farbe nach Rot um. Hat es sich um eine männliche (+) Kultur gehandelt und setzt man dann eine normale, chlorophyllführende, weibliche (—) Kultur zu, so sieht man unter dem Mikroskop, daß immer nur eine rote mit einer grünen Zelle kopuliert⁹⁾.

Bei vielen Braunalgen ist eine Differenzierung der Geschlechtszellen auch schon in morphologischer Hinsicht erkennbar. Man spricht von *Anisogamie* und meint damit, daß die weiblichen Gameten (*Gynogameten*) sehr viel größer sind als die männlichen (*Androgameten*). So geht die Differenzierung weiterbis schließlich bei den höheren Tieren einer verhältnismäßig großen Eizelle eine riesige Zahl von winzigen Spermatozoen gegenübersteht.

4. Chemotaxis zwischen Ei und Spermatozoon bei *Arbacia*.

Wie kommt nun die Reaktion zwischen Ei und Spermatozoon zustande? Ist sie, wenn sich die Befruchtung etwa im Meereswasser abspielt, dem Zufall überlassen oder gibt es irgendeinen Mechanismus, der dafür sorgt, daß das Spermatozoon seinen Weg zum Ei findet?

Der amerikanische Biologe F. R. Lillie⁴⁾ hat schon vor vielen Jahren gezeigt, daß die Eier des Seeigels an das Meerwasser einen Stoff absondern, der die Spermatozoen anzulocken vermag. Zu Beginn dieses Jahres ist es in einer gemeinsamen Untersuchung mit dem Kaiser Wilhelm-Institut für Biologie, die teils an der Zoologischen Station in Neapel, teils in Heidelberg ausgeführt wurde, gelungen, diesen Stoff zu isolieren und seine chemische Natur aufzuklären. Es handelt sich um einen roten, schön kristallisierenden Farbstoff der Formel $C_{12}H_{10}O_7$, den die Ovarien in erstaunlich großen Mengen produzieren und im Stadium der Geschlechtsreife an das umgebende Meerwasser abgeben. (Abb. 1.) Aus den Eierstöcken von 1000 Weibchen (*Arbacia pustulosa*) kann man über 1 g dieses Farbstoffs, der den Namen Echinochrom⁵⁾ trägt, gewinnen. Chemisch steht er dem Naphthalin nahe. Er ist ein Chinon des 1,3,4,5,6,7,8-Hepta-oxy-2-äthyl-naphthalins (I).

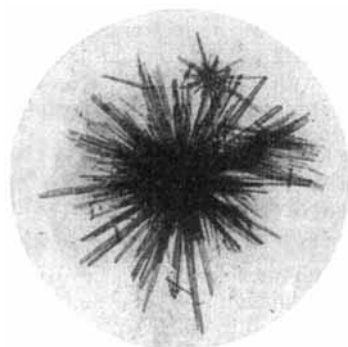
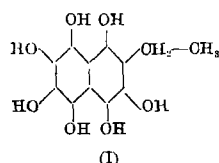


Abb. 1. Echinochrom.



Die physiologische Wirksamkeit des Echinochroms⁶⁾ ist noch in hohen Verdünnungen nachweisbar. Bringt man eine Spur des Farbstoffs zu einem Tropfen Meereswasser, in dem Spermatozoen suspendiert sind, so geraten diese in lebhaft Bewegung (*Aktivation*). Bringt man eine Capillare mit Echinochromlösung in die Spermiasuspension, so wandern die Spermatozoen in diese hinein (*Chemotaxis*). Die Grenze der Nachweisbarkeit liegt bei einer Verdünnung von 1:2000000000.

Der tierische Befruchtungstoff, den wir im Echinochrom vor uns haben, zeigt viele Eigenschaften, die für die Hormone der höheren Tiere als kennzeichnend gelten: Er wird in einem

spezifischen Organ, dem Ovar, gebildet und unter physiologischen Bedingungen in aktiver Form sezerniert; freilich nicht in die Blutbahn, sondern ins Meereswasser, in dem sich eben die Befruchtung abspielt; es ist ein echter chemischer Sendbote, den das reife Ei aussendet; der Empfänger, das Spermatozoon, reagiert darauf und schlägt alsbald den umgekehrten Weg ein, zurück zum Ei, von dem der Bote kam. Das Beweglichwerden der Spermatozoen zeigt, daß der Farbstoff die Eigenschaft besitzt, anzuregen (*éveiller*)⁷⁾.

Die Anlockung ist nur ein Teil des Befruchtungsvorgangs. In den Ovarien und im Sperma der Seeigel finden sich noch andere Stoffe, die weitere Teilvorgänge steuern. Die Reingewinnung und Charakterisierung derselben ist aber noch nicht geglückt.

5. Die Aktivierung der Gameten von *Chlamydomonas eugametos* f. *simplex*.

Wir wenden uns nun einer niederen Grünalge zu, deren männliche und weibliche Gameten gleichgestaltig, d. h. morphologisch isogam sind und je 2 Geißeln tragen. Die Ausbildung und das Beweglichwerden der Geißeln erfolgt, wenn die Alge belichtet wird⁸⁾. Dabei handelt es sich um einen chemischen Vorgang. Man kann nämlich die Wirkung des Lichtes dadurch ersetzen, daß man einen Teil der Gameten in wäßriger Aufschwemmung belichtet, abfiltriert und das Filtrat einem anderen im Dunkeln gehaltenen Teil der Gameten zusetzt. Diese werden dann — ohne daß Licht auf sie fällt — beweglich. Es wird also unter dem Einfluß des Lichtes ein Stoff erzeugt und an die umgebende Lösung abgegeben, der die Geißeln zum Schlagen bringt^{9, 10)}. Rein äußerlich ist diese Erscheinung dem Beweglichwerden der Spermatozoen unter der Einwirkung des Seeigelfarbstoffs nicht unähnlich. Chemisch ist aber der hier wirksame Stoff vom Echinochrom gänzlich verschieden.

Was die Gameten von *Chlamydomonas eugametos* im Lichte absondern, ist ein carotinähnlicher Farbstoff. Er wird in so ungeheuer kleinen Mengen gebildet, daß es noch nicht möglich war, ihn chemisch zu isolieren. Wir konnten ihn bisher nur spektroskopisch nachweisen und einige wenige Reaktionen damit anstellen. In 1000 l Zellfiltrat findet man nur etwa 1 mg dieses Farbstoffs. Immerhin ließ sich feststellen, daß das Absorptionsspektrum und sonstige Eigenschaften denjenigen eines schon lange bekannten pflanzlichen Farbstoffs entsprechen, nämlich dem Farbstoff des Safrans, dem *Crocin*, das sich in den Narben von Crocusarten (*Crocus sativus* u. a.) findet¹¹⁾. Die Prüfung des kristallisierten Crocins aus Safran⁸⁾ hat ergeben, daß dieser Stoff noch in einer Verdünnung von 1:250 000 000 000 000 die Gameten der Grünalge im Dunkeln beweglich macht.

Es ist gewiß nicht ein Zufall, daß die Geschlechtszellen von *Chlamydomonas* ausgerechnet auf den Farbstoff des Safrans ansprechen. Stellen doch die Narben von Crocus ebenfalls Geschlechtsorgane einer Pflanze, wenn auch einer sehr viel höher entwickelten, dar. Man darf daher vermuten, daß auch bei Blütenpflanzen dem Crocin eine Rolle beim Befruchtungsvorgang zufällt. Wir kennen nur noch keine botanische Versuchsanordnung, die das zu demonstrieren gestattet. In diesem Zusammenhang möchte ich erwähnen, daß die Dunkelgameten von *Chlamydomonas* einen unerhört empfindlichen Nachweis von Crocin gestatten und daß es uns so möglich geworden ist festzustellen, daß dieser Farbstoff auch in den Geschlechtsorganen der Lilien, Tulpen, Hyazinthen und vieler anderer unserer schönen Gartenpflanzen in bedeutenden Mengen vorkommt¹²⁾.

6. Grenze der Wirksamkeit.

Die Wirksamkeit des Crocins ist so groß und der biologische Nachweis so scharf, daß wir uns die Frage vorgelegt haben, wie viele Farbstoffmolekeln auf eine Zelle treffen müssen, damit sie beweglich wird. Wir sind in letzter Zeit in Dutzenden von sehr sorgfältig angelegten Versuchsreihen zu folgendem Ergebnis gekommen:

⁹⁾ W. Lerche, Arch. Protistenkunde 88, 296 [1937]; M. Hartmann, Fußnote 2, S. 21.

¹⁰⁾ Literatur bei M. Hartmann u. O. Scharlau, Fußnote 6.

¹¹⁾ MacMunn, Quart. J. Microscop. Sci. 25, 469 [1885]; Kristallisation und Bruttoformel: E. Lederer u. R. Glaser, O. B. hebd. Séances Acad. Sci. 207, 454 [1938]; Konstitution: R. Kuhn u. K. Wallenfels, Ber. dtsch. chem. Ges. 72, 1407 [1939].

¹²⁾ M. Hartmann, O. Scharlau, R. Kuhn u. K. Wallenfels, Naturwiss. 27, 433 [1939]; M. Hartmann, Vortrag auf dem Int. Genetiker-Kongreß in Edinburgh 1939; M. Hartmann u. O. Scharlau, Biol. Zbl. 1939 (im Druck).

⁷⁾ R. Kuhn u. K. Wallenfels, Ber. dtsch. chem. Ges. 72, 1407 [1939].

⁸⁾ F. Moewus, Arch. Protistenkunde 80, 469 [1933]; Zusammenfassend: Carotinoide als Sexualstoffe von Algen, Naturwiss. 27, 97 [1939].

⁹⁾ R. Kuhn, F. Moewus u. D. Jerchel, Ber. dtsch. chem. Ges. 71, 1541 [1938].

¹⁰⁾ F. Moewus, Jahrb. wiss. Botanik 86, 753 [1938].

¹¹⁾ Vgl. L. Zechmeister: Carotinoide, Berlin 1934, J. Springer, S. 251 ff.

¹²⁾ F. Moewus, Biol. Zbl. 60, im Druck [1940].

Unter den eingehaltenen Standardbedingungen wird die Grenze der Wirksamkeit erreicht, wenn 0,40 mg Crocin in 10^{11} cm³ (100 000 m³) Wasser gelöst sind. Dann werden noch immer etwa 95% der Gameten beweglich. Die Bruttoformel des Crocins ist C₄₄H₈₄O₂₁, sein Molekulargewicht dementsprechend 976,6, sagen wir rd. 1000. Da 1 mg Crocin in $2,5 \cdot 10^{11}$ cm³ wirkt, kann 1 Mol Crocin (1000 g) auf $2,5 \cdot 10^{17}$ cm³ verdünnt werden. Unter unseren Bedingungen befinden sich stets $2 \cdot 10^6$ Gameten in 1 cm³ Wasser. Man kann daher mit 1 Mol Crocin $2,5 \cdot 10^{17} \cdot 2 \cdot 10^6 = 5 \cdot 10^{23}$ Gameten beweglich machen^{9, 13)}.

Die Physik lehrt, daß bei jeder Substanz in 1 Mol $6,06 \cdot 10^{23}$ Molekeln vorhanden sind. Wir finden somit, daß man mit 5 Molekeln Crocin 4 Geschlechtszellen von *Chlamydomonas eugametos* reaktionsfähig machen kann.

7. Die Kopulation zwischen ♂- und ♀-Gameten.

Wenn die Gameten durch Belichtung (oder im Dunkeln durch Spuren von Crocin) beweglich geworden sind und die Geißeln schlagen, vermögen sie noch nicht zu kopulieren. Diese Fähigkeit erlangen sie erst, wenn man sie noch länger belichtet. Dieser zweite photochemische Vorgang⁹⁾ spielt sich nur ab, wenn blaues oder violettes Licht auf die Alge fällt. Das Beweglichwerden der Geißeln, also der erste photochemische Prozeß, findet dagegen auch schon in rotem, langwelligem Licht statt.

Die Wirkung des kurzwelligen Lichtes beim eigentlichen Kopulationsvorgang beruht nun wieder darauf, daß bestimmte chemische Stoffe während der Bestrahlung von der Zelle gebildet und an die umgebende Lösung abgegeben werden. Man kann sich davon dadurch überzeugen, daß man Gametensuspensionen eine geeignete Zeitlang belichtet, abfiltriert und das Filtrat den zugehörigen reaktionsunfähigen Dunkelgameten zusetzt. Dann kommt es auch ohne Belichtung zur Kopulation.

Bei solchen Versuchen darf man nicht zu lange belichten, weil sonst die Filtrate schließlich nicht nur den weiblichen, sondern auch den männlichen Gameten gegenüber ganz inaktiv werden. Diese Inaktivierung ist der dritte photochemische Teilvorgang⁹⁾, den es zu erklären gilt. Die Sexualstoffe werden im blauen und violetten Licht gebildet, aber durch dieses bei längerer Einwirkung auch wieder zerstört.

Es ist nun nicht notwendig für die Bildung der Kopulationsstoffe, die Geschlechtszellen selbst kurzzeitig zu bestrahlen. Man kann auch zunächst eine Suspension der Zellen mit rotem Licht bestrahlen, abfiltrieren und ein solches ganz unwirksames „Rotfiltrat“ der weiteren Einwirkung von blauem oder violettem Licht aussetzen¹⁰⁾. Auch unter diesen Bedingungen treten die Kopulationsstoffe auf. Dabei ist zeitlich z. B. folgendes zu beobachten. Nach einer Bestrahlungsdauer von 24–26 min nimmt, verhältnismäßig plötzlich, das Filtrat weibliche Eigenschaften an, d. h. es macht weibliche Dunkelzellen kopulationsfähig. Bei längerer Belichtung wird es wieder unwirksam. Nach 74–76 min erhält es die Eigenschaft, männliche Dunkelzellen kopulationsfähig zu machen. Strahlt man noch länger ein, dann wird das Filtrat für immer inaktiv.

All diese Erscheinungen lassen sich nun genau nachahmen, wenn man an Stelle des Rotfiltrats der Zellen einen von uns

1934 aus Safran isolierten lichtempfindlichen Farbstoff setzt, den cis-Crocetin-dimethylester¹⁴⁾. Dieser lagert sich, wie schon damals erkannt wurde, unter dem Einfluß von blauem oder violettem Licht in trans-Crocetin-dimethylester um. Es ist nur eine räumliche Umgruppierung zweier Atomreste, die sich dabei abspielt; im übrigen bleibt die Anordnung der Atome im Verband der Molekel erhalten. (Abb. 2 u. 3.)

Der geschilderte zeitliche Verlauf des Belichtungsversuchs hat folgende Erklärung⁹⁾ gefunden: Der die weiblichen Dunkelgameten kopulationsfähig machende „Stoff“ ist ein Gemisch von 3 Teilen cis- und 1 Teil trans-Crocetin-dimethylester; der die männlichen Dunkelgameten aktivierende ein Gemisch von 1 Teil cis- und 3 Teilen trans-Crocetin-dimethylester. Cis-Ester allein und trans-Ester allein sind ohne jede Wirkung. Mit den aus Safran kristallisiert gewonnenen Farbstoffen läßt sich, bei Einhaltung der angegebenen Mischungsverhältnisse, der gesamte Kopulationsvorgang unter Ausschluß von Licht getreulich nachahmen. Beide Ester sind so spezifisch — die freien Carbonsäuren und die Diäthylester sind bereits wirkungslos —, daß es recht wahrscheinlich ist, daß wir in den aus Safran isolierten Farbstoffen nicht nur Ersatzstoffe, sondern die von den Geschlechtszellen der Algen selbst gebildeten Befruchtungstoffe vor uns haben. Die Grenze der Wirksamkeit liegt bei einer Verdünnung von 1:33 000 000 000.

8. Relative Sexualität.

Es ist bekannt, daß eine Fortpflanzung auch zwischen männlichen und weiblichen Individuen verwandter Rassen und Arten in vielen Fällen stattfinden kann. Bei den einzelligen Grünalgen, deren Sexualstoffe wir eben kennengelernt haben, trifft das auch zu. Die bisher geschilderten Versuche sind mit *Chlamydomonas eugametos* f. *simplex* durchgeführt worden. Es gibt nun innerhalb der Eugametosgruppe noch eine Reihe von weiteren Stämmen, die sich durch ihr geschlechtliches Verhalten unterscheiden. Die Unterschiede der einzelnen Rassen sind erblich festgelegt¹⁵⁾. Sie hängen, wie sich gezeigt hat, mit charakteristischen Unterschieden des Verhältnisses cis-:trans-Crocetin-dimethylester zusammen, die unter dem Einfluß des Lichtes ausgeschieden werden¹⁶⁾. Das Verhältnis cis:trans = 1:3 bzw. 3:1 findet sich bisher nur bei *Chlamydomonas eugametos* f. *simplex*. Für andere Rassen haben sich die folgenden Verhältniszahlen ergeben:

<i>Chlamydomonas Braunii</i>	♀ ⁴	95%	cis	5%	trans
<i>Chlamydomonas dresdensis</i> , Chl. eug. f. <i>typica</i>	♀ ³	85%	cis	15%	trans
<i>Chlamydomonas eugametos</i> f. <i>simplex</i>	♀ ²	75%	cis	25%	trans
<i>Chlamydomonas eugametos</i> f. <i>synoica</i> , f. <i>subheteroica</i>	♀ ¹	65%	cis	35%	trans
<i>Chlamydomonas eugametos</i> f. <i>synoica</i> , f. <i>subheteroica</i>	♂ ¹	35%	cis	65%	trans
<i>Chlamydomonas eugametos</i> f. <i>simplex</i>	♂ ²	25%	cis	75%	trans
<i>Chlamydomonas dresdensis</i> , Chl. eug. f. <i>typica</i>	♂ ³	15%	cis	85%	trans
<i>Chlamydomonas Braunii</i>	♂ ⁴	5%	cis	95%	trans

Für rassenmäßig zugehörige ♂- und ♀-Gameten ist die chemische Zusammensetzung der Sexualstoffe in allen Fällen „spiegelbildlich“. Die Möglichkeit zu kopulieren ist aber nicht daran gebunden. Die Kopulationen finden vielmehr nach folgendem Schema statt:

	♀ ⁴	♀ ³	♀ ²	♀ ¹	♂ ¹	♂ ²	♂ ³	♂ ⁴
♀ ⁴	—	—	x!	x!	x	x	x	x
♀ ³	—	—	—	x!	x	x	x	x
♀ ²	x!	—	—	—	x	x	x	x
♀ ¹	x!	x!	—	—	x	x	x	x
♂ ¹	x	x	x	x	—	—	x!	x!
♂ ²	x	x	x	x	—	—	—	x!
♂ ³	x	x	x	x	x!	—	—	—
♂ ⁴	x	x	x	x	x!	x!	—	—

(— = keine Reaktion, x = Kopulation, x! = Fälle relativer Sexualität.)

Sie erkennen, daß in gewissen Fällen (x!) männliche mit männlichen und weibliche mit weiblichen Gameten zu kopulieren vermögen. Es muß nur in der Zusammensetzung des cis-:trans-Gemisches, das die beiden

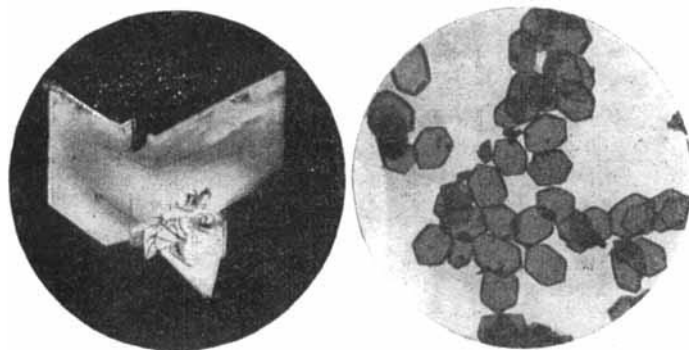


Abb. 2.
cis-Crocetin-dimethylester.

Abb. 3.
trans-Crocetin-dimethylester.

¹⁰⁾ F. Moewus, Arch. Protistankunde 92, 485 [1939].

¹⁴⁾ R. Kuhn u. A. Winterstein, Ber. dtsch. chem. Ges. 66, 209 [1933].

¹⁵⁾ F. Moewus, Biol. Zbl. 58, 516 [1938].

¹⁶⁾ F. Moewus, ebenda 59, 40 [1939].

Partner ausscheiden, ein Unterschied von mindestens 20% bestehen. Dann verhält sich der schwache weibliche Gamet einem starken weiblichen Gameten gegenüber wie ein Männchen, der schwache männliche Gamet gegenüber einem starken männlichen Gameten wie ein Weibchen. Wir haben es hier mit Erscheinungen der relativen Sexualität im Sinne von M. Hartmann¹⁷⁾ zu tun. Dieser hat bereits vor 30 Jahren auf Grund biologischer Versuche die folgende Vorstellung entwickelt, die nunmehr auch dem Chemiker verständlich geworden ist: „Jede Geschlechtszelle ist bisexuell. Die weiblichen und männlichen Gameten sind nicht rein absolut weiblich oder männlich, sondern nur relativ. Es wird sich dabei vermutlich um quantitative Verschiedenheiten der beiden Geschlechtstaktoren oder ihrer Wirkungen handeln. In Quantitätsunterschieden liegt mithin die Sexualität begründet.“ Ein schönes Beispiel von relativer Sexualität war von M. Hartmann¹⁸⁾ an *Ectocarpus siliculosus* 1925 eingehend beschrieben worden. Um welche Wirkstoffe es sich bei dieser Braunalge handelt, ist aber noch unbekannt.

II. Geschlechtsbestimmung.

1. Phänotypische und genotypische Bestimmung des Geschlechts.

Ob eine Zelle bzw. ein Organismus zu einem Männchen oder Weibchen wird, ist im allgemeinen mit dem Vererbungsvorgang festgelegt und eindeutig bestimmt. Wir sprechen von einer durch das Gen bedingten (*genotypischen*) Geschlechtsbestimmung.

Bei gemischt-geschlechtlichen Organismen kann jedoch die Geschlechtsbestimmung auch noch auf andere Weise zustande kommen. Die Erscheinung der Gemischt-Geschlechtlichkeit ist gar nicht selten. Man findet sie bei zahlreichen

Protisten und Thallophyten sowie bei höheren Pflanzen und wirbellosen Metazoen. Sie kommt nicht nur bei Lebewesen mit morphologisch isogamen Geschlechtszellen vor, sondern auch bei Organismen, deren männliche und weibliche Gameten bereits weit differenziert sind. Die Biologie lehrt, daß in fast allen Fällen dieser Art die Bestimmung des Geschlechts modifikatorisch erfolgt (*phänotypische* Geschlechtsbestimmung), d. h. durch sog. „Außenfaktoren“. Diese entscheiden darüber, ob die genetisch gleichartigen Zellen mit ihrer bisexuellen Potenz männliche oder weibliche Eigenschaften annehmen. Was haben wir uns unter diesen „Außenfaktoren“ vorzustellen?

Innerhalb der Eugametosgruppe kommt auch eine gemischt-geschlechtliche Grünalge vor, *Chlamydomonas eugametos* f. *synoica*¹⁹⁾. Versetzt man diese mit dem Filtrat von ♀-Gameten der getrennt-geschlechtlichen Rasse, so werden alle Zellen weiblich; gibt man das Filtrat von ♂-Gameten der getrennt-geschlechtlichen Rasse zu, so werden alle Zellen männlich. Dieser Grundversuch zeigt, daß die Gameten geschlechts-determinierende Stoffe abgeben. Es ist gelungen, die chemische Natur auch dieser Sexualstoffe aufzuklären¹⁹⁾.

2. Primäre und sekundäre Geschlechtsmerkmale.

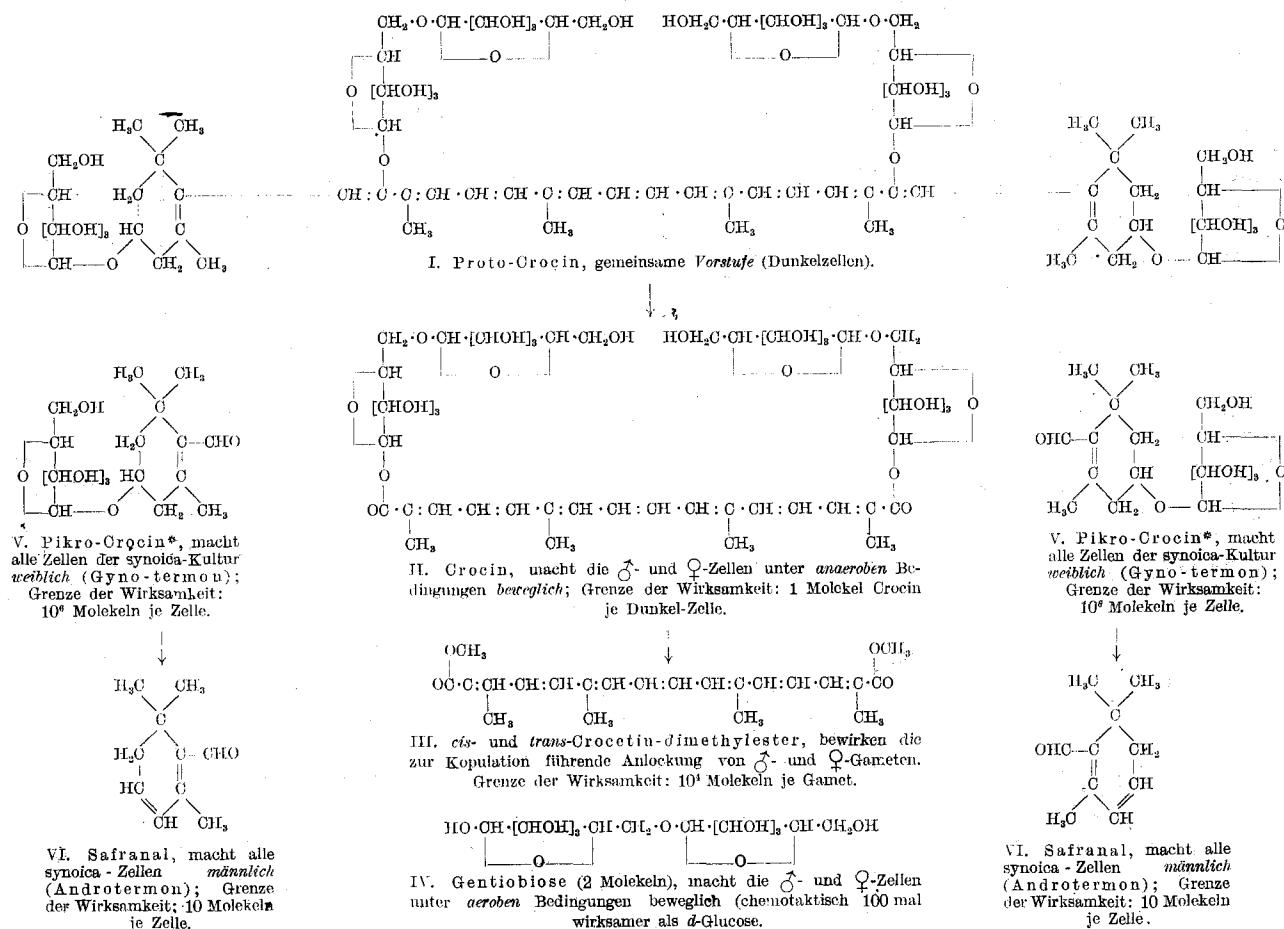
Bevor ich dies schildere, erscheint es nützlich, im Hinblick auf die große Zahl von Sexualstoffen, die bereits bekannt sind, eine Abgrenzung vorzunehmen. Sie wissen, daß in meisterhaften Untersuchungen von A. Butenandt und anderen Forschern aus dem Corpus luteum, den Follikeln und aus den Hoden höherer Tiere eine ganze Reihe von Sexualhormonen isoliert und in ihrer chemischen Konstitution aufgeklärt worden ist. Bei diesen Hormonen handelt es sich durchweg um Stoffe, die für die Ausbildung der sog. sekundären Geschlechtsmerkmale nötig sind, z. B. für das Wachstum des

¹⁷⁾ M. Hartmann, Relative Sexualität und ihre Bedeutung für eine allgemeine Sexualitäts- und eine allgemeine Befruchtungstheorie, Naturwiss. 19, 8, 31 [1931].

¹⁸⁾ M. Hartmann, Biol. Zbl. 45 [1925] und Fußnote 17.

¹⁹⁾ R. Kuhn, F. Moewus u. G. Wendt, Ber. dtsch. chem. Ges. 72, 1702 [1939].

Chemischer Zusammenhang
zwischen den Befruchtungsfstoffen (Gametonen) und Determinierungsfstoffen (Termonen) bei *Chlamydomonas*.



¹⁹⁾ Das Gynotermion von *Chlamydomonas* ist ein dem Pikro-crocin verwandtes Terpenglykosid, das sich von dem formulierten, krist. Bitterstoff des Safrans durch die Natur des Zuckerrestes unterscheidet¹⁹⁾.

Kammes beim Hahn oder die Entwicklung der Brustdrüsen bei einem Säugetier. Die Sexualstoffe, von denen im folgenden die Rede ist, sind demgegenüber dadurch gekennzeichnet, daß sie die sog. primären Geschlechtsmerkmale bestimmen. Sie entscheiden darüber, ob die einzelne Geschlechtszelle männliche oder weibliche Eigenschaften annimmt.

3. Hormon, Gamon, Termon.

Den bestehenden Unterschieden trägt der folgende Sprachgebrauch Rechnung. *Hormone* des Sexuallebens sind diejenigen Stoffe, die in spezifischen Drüsen erzeugt und an die Blutbahn abgegeben werden, um die Ausprägung der sekundären Geschlechtsmerkmale zu bewirken. Die von den Geschlechtszellen selbst erzeugten Stoffe, die über den Ablauf des Befruchtungsvorganges entscheiden, nennen wir *Gamone* (Befruchtungsfstoffe; Hochzeitsstoffe, von $\gamma\acute{\alpha}\mu\mu\omicron\varsigma$ = Hochzeit). Die zur Determinierung des Geschlechts bei gemischt-geschlechtlichen Organismen und damit zur Festlegung der primären Geschlechtsmerkmale dienenden Sexualstoffe werden *Termone* genannt.

4. Die chemische Determinierung des Geschlechts bei der Grünalge *Chlamydomonas synoica*.

Bei der gemischt-geschlechtlichen Alge *Chlamydomonas eugametos* f. *synoica* kann man, wie erwähnt, durch ein Filtrat von männlichen \mathfrak{J}^1 -Gameten alle Zellen männlich machen, während unter der Einwirkung eines Filtrats von weiblichen \mathfrak{J}^1 -Gameten alle Zellen weiblich werden. Die in den wirksamen Filtraten enthaltenen Termone konnten noch nicht isoliert werden. Ihre Konzentration ist von derselben Größenordnung wie diejenige der Beweglichkeits- und Kopulationsgamone, von denen sich rd. 1 mg in 1000 l Zellfiltrat spektroskopisch hatte nachweisen lassen. Immerhin konnten einige bemerkenswerte Eigenschaften dieser Stoffe festgestellt werden: Das männliche Termon ist ätherlöslich und mit Wasserdampf flüchtig. Das weibliche Termon löst sich nicht in Äther und ist nicht flüchtig. Durch Erhitzen mit verd. Säure oder Lauge geht das weibliche Termon in das männliche Termon über¹⁹⁾.

Diese und weitere Versuche haben schließlich zu der Vermutung geführt, daß der das männliche Geschlecht determinierende Stoff identisch sein könne mit dem Riechstoff des Safrans, dem Safranal, und der das weibliche Geschlecht determinierende mit dem Bitterstoff des Safrans, dem Pikrocrocine. In der Tat: Bringt man *synoica*-Zellen in eine Lösung, die 0,02 γ oder mehr krist. Pikrocrocine aus Safran in 1 cm³ Wasser enthält, so sind nach 10 min alle Zellen gegenüber \mathfrak{J}^1 -Gameten kopulationsfähig, d. h. sie sind weiblich geworden. Erhitzt man zuvor die Pikrocrocine mit etwas Säure, so werden unter dem Einfluß des gebildeten Safranals alle Zellen männlich.

Wir haben berechnet, daß etwa 10 Molekeln Safranal genügen, um 1 Zelle männlich zu machen. Vom weiblichen Termon sind gegen 1000 Molekeln je Zelle erforderlich.

Die Safranfarbstoffe stehen nun in einer sehr nahen chemischen Beziehung zum Bitterstoff und zum Riechstoff des Safrans. Sie leiten sich, wie wir schon 1934 erkannt haben, von einer gemeinsamen Vorstufe, dem sog. Protocrocine²⁰⁾ ab. Wenn wir die chemischen Formeln betrachten, so werden wir bewundernd erkennen, mit welcher Vielseitigkeit und Vollständigkeit die Natur alle physiologisch auftretenden Spaltstücke dieses einen Carotinoids in den Dienst der verschiedensten Geschlechtsfunktionen der Grünalge gestellt hat. Aus dem Formelbild des Protocrocins leiten sich alle bisher bekannten Sexualstoffe von *Chlamydomonas* ab: Der Beweglichkeitsstoff, die Anlockungs- und Kopulationsstoffe sowie die geschlechtsbestimmenden Stoffe.

Halten wir folgendes fest: Bei der Kopulation unterscheiden sich männlicher und weiblicher Wirkstoff nur durch die räumliche Anordnung einzelner Atome bei im übrigen identischem Bau der Molekeln. Bei der Geschlechtsbestimmung unterscheidet sich der weibliche Wirkstoff vom männlichen durch den Mehrgehalt eines Zuckerrestes.

5. Das pikrocrocinspaltende Ferment.

Diesen Zuckerrest kann man durch verdünnte Säure oder Lauge in der Hitze abspalten. Es war aus den angegebenen Formelbildern zu schließen, daß die männlichen Gameten diese Abspaltung auch unter physiologischen Bedingungen zu bewerkstelligen vermögen. Wir konnten nun vor kurzem den Nachweis erbringen, daß in den männlichen Gameten ein pikrocrocinspaltendes Ferment vorkommt, das unter geeigneten Bedingungen in Lösung gebracht und nach allen Regeln der Fermentkinetik untersucht werden kann²¹⁾. Es ist recht hitzeempfindlich, das Temperaturoptimum liegt schon bei 26°. Das pH-Optimum der Wirksamkeit ist scharf ausgeprägt und liegt bei pH = 7,0. Auch die Abhängigkeit des Umsatzes von der Substratkonzentration haben wir quantitativ gemessen. Auffallend ist die geringe absolute Wirksamkeit. Unter den günstigsten Bedingungen von Temperatur, pH und Substratkonzentration spaltet eine männliche Zelle von *Chlamydomonas* in 1 s rund 1 Molekel Pikrocrocine. Zum Vergleich führe ich an, daß nach Versuchen von H. von Euler und O. Svanberg²²⁾ sowie nach eigenen noch in München ausgeführten Versuchen eine Hefezelle — gleichfalls unter optimalen Bedingungen — in 1 s rund 10¹⁰ Molekeln Rohrzucker spaltet. Dieser außerordentliche Unterschied läßt vermuten, daß es sich nicht nur um einen Unterschied des spezifischen Wirkungsvermögens handelt, daß vielmehr die Zahl der Molekeln an pikrocrocinspaltendem Ferment je Zelle ganz ungewöhnlich klein ist. Das Interessante an diesem neuen Ferment ist die Tatsache, daß es nur in den männlichen Geschlechtszellen vorkommt und in den weiblichen fehlt.

Im Juli 1926 habe ich hier an dieser Hochschule in einer Sitzung der chemischen Gesellschaft meine Abschiedsvorlesung als Münchener Privatdozent gehalten. Ich hatte den Vorsatz gefaßt, die damaligen Untersuchungen über glykosidspaltende Enzyme endgültig aufzugeben und ein ganz und gar verschiedenes, neues Arbeitsziel zu verfolgen. Das begann mit der Synthese von Kohlenwasserstoffen, die eine möglichst große Zahl von konjugierten Kohlenstoffdoppelbindungen in offener Kette enthalten. Dabei hat sich dann herausgestellt, daß Verbindungen dieser Art in der Natur vorkommen und daß seltsamerweise eines von diesen Carotinoiden an den beiden Enden der Molekel glykosidisch verknüpfte Zuckerreste trägt. So kommt es, daß mein seinerzeitiger Vorsatz zunichte geworden ist und ich heute, nach 13 Jahren, in München stehe, um wiederum über ein glykosidspaltendes Enzym zu berichten. Die Problemstellung, physikalisch-chemisch betrachtet, hat sich in der Zwischenzeit kaum nennenswert verlagert. Es handelt sich nach wie vor um den Mechanismus des hydrolytischen Vorgangs. Was sich gewaltig geändert hat, ist die Methodik. Damals waren es 100-cm³-Meßkölbchen, in denen eine z. B. 5%ige Lösung des Glykosids mit dem Enzym versetzt wurde. Heute sind es Tropfen unglaublich verdünnter Lösungen auf Objektträgern, die wir unter dem Mikroskop betrachten, um festzustellen, ob Zellen Gruppen bilden oder nicht.

Man hat gesagt, daß Fortschritte der Wissenschaft von Fortschritten der Methoden bedingt werden. Im vorliegenden Fall hat sich die Meßtechnik um mindestens 15 Zehnerpotenzen verfeinert. Wir sind vorgedrungen in ein Gebiet der Biochemie, wo einzelne Molekeln auf einzelne Zellen wirken.

6. Beziehungen zum Gen.

Die Entdeckung des pikrocrocinspaltenden Ferments in den männlichen Gameten von *Chlamydomonas* und der Nachweis, daß dieses Ferment in den weiblichen Gameten fehlt, regt zu zahlreichen neuen Versuchen und Betrachtungen an. Von besonderem Interesse ist die Frage nach der Lokalisierung des Ferments innerhalb der Zelle. Wir können sagen, daß es nicht im Zellsaft gelöst ist. Denn wenn man die männlichen Gameten bei der Temperatur der flüssigen Luft mechanisch zerreißt und anschließend scharf zentrifugiert, so findet man alle Aktivität in den Zellrückständen und nichts davon im Zellsaft. Noch in Gang befindliche weitere Versuche sprechen dafür, daß auch die Geißeln und die Zellwandung

¹⁹⁾ R. Kuhn u. A. Winterstein, Ber. dtsch. chem. Ges. **67**, 844 [1934]. Zucker des Crocins: P. Karrer u. K. Müll, Helv. chim. Acta **12**, 985 [1929]; Konstitution von Pikrocrocine und Safranin: R. Kuhn u. A. Winterstein, Naturwiss. **21**, 527 [1933]; Synthese des Safranals: R. Kuhn u. G. Wendt, Ber. dtsch. chem. Ges. **69**, 1549 [1936].

²¹⁾ Unveröffentlicht.

²²⁾ H. v. Euler u. O. Svanberg, Hoppe-Seyler's Z. physiol. Chem. **106**, 201 [1919]; H. v. Euler: Chemie der Enzyme, 3. Aufl., München 1928, J. F. Bergmann, II. Teil, 1. Abchn., S. 207.

nicht Träger des Ferments sein können. Es ist somit recht wahrscheinlich, daß das pikrocrocinspaltende Ferment im Kern lokalisiert ist, und es erhebt sich die Frage, ob dieses Ferment nicht gar Baustein eines Chromosoms ist.

Dazu läßt sich folgendes sagen: Die Verknüpfung von Gen und Merkmal gehört zu den interessantesten Problemen der Biologie überhaupt, nicht nur auf dem Gebiet der Sexualität und der Geschlechtsbestimmung. Wenn man in einem Chromosom einen Erbfaktor, d. h. ein Gen, ausfindig gemacht hat, das dafür verantwortlich ist, daß z. B. die Augen blaue oder braune Farbe annehmen, so ist es klar, daß diese Wirkung des Gens keine ganz unmittelbare sein kann, sondern daß auf dem Wege bis zum sichtbaren Merkmal, z. B. der Augenfarbe, irgendwelche Mechanismen eingeschaltet werden. Im Laufe der letzten Jahre hat man erkannt — es handelt sich um Arbeiten von A. Kühn, Becker, Piepho und anderen Forschern²³⁾ —, daß es genabhängige Wirkstoffe gibt, die auf dem Weg vom Gen zum Merkmal liegen. Man kann, um beim angeführten Beispiel zu bleiben, an geeigneten Organismen auch mit Hilfe von wirksamen Extrakten, in denen diese genabhängigen Stoffe enthalten sind, erreichen, daß die Augen entweder schwarze oder rote Farbe annehmen.

Das Safranal gehört ganz offenbar in die Reihe dieser genabhängigen Wirkstoffe. Es ist eine niedrigmolekulare Verbindung. Es wird nur von Zellen, die ein bestimmtes Gen tragen, gebildet. Das Merkmal, das es bestimmt, ist das der Männlichkeit.

Was ist nun genetisch über die Chromosomen und Gene von *Chlamydomonas* bekannt? Wir wissen, daß diese Chromosomen mindestens 42 Erbfaktoren (Gene) enthalten, darunter F (bestimmt weibliches Geschlecht), M (bestimmt männliches Geschlecht), S (den Augenfleck bedingend), t' (Subheterozie hervorruhend) usw.²⁴⁾

Die Frage, vor der wir stehen, lautet jetzt genauer: Ist das pikrocrocinspaltende Ferment mit dem Gen M identisch oder liegt es nur auf dem Weg zwischen M und dem Merkmal? Eine endgültige Beantwortung dieser Frage dürfen Sie von mir nicht erwarten. Aber viele Eigenschaften des Ferments stimmen mit denjenigen überein, die

man für ein Gen annehmen darf. Es ist eine sehr hochmolekulare, hitzeempfindliche organische Verbindung; es ist äußerst fest, offenbar im Kern, verankert; es kommt, wie ich schon sagte, in der Zelle in Konzentrationen vor, die — verglichen mit derjenigen von Stoffwechselermenten — ungeheuer klein erscheinen; es ist schließlich nur in jenen Zellen nachweisbar, die genetisch eindeutig als männliche festgelegt sind.

Die Vorstellung, daß ein Gen die Eigenschaften eines Ferments besitze, ist, neben Dutzenden von anderen Hypothesen²⁵⁾, rein spekulativ schon öfters ausgesprochen worden. In keinem Falle konnte gesagt werden, welche speziellen Wirkungen ein solches Ferment haben sollte. Es hat den Anschein, daß die Untersuchungen über die Geschlechtsbestimmung bei *Chlamydomonas* zum ersten Male die chemische Wirkungsweise eines Gens verständlich machen. Es handelt sich um ein Ferment, das ein Terpenglykosid spaltet; mag nun dieses Ferment mit dem Gen M bereits identisch sein oder zwischen beiden noch immer ein unbekanntes Etwas liegen.

Die Erkenntnisse, von denen ich heute berichtet habe, stützen sich auf ein Pionierwerk deutscher Biologen, das in jahrzehntelanger, mühevoller Arbeit geleistet worden ist. Ohne diese Grundlagen wäre es kaum möglich gewesen, in einem Zeitraum von knapp zwei Jahren die chemische Natur von Befruchtungstoffen und geschlechtsbestimmenden Stoffen, wenn auch nur an vereinzelten, dafür besonders günstigen Organismen, aufzuklären. Besonders verbunden fühle ich mich dem Kaiser Wilhelm-Institut für Biologie in Berlin-Dahlem, an dem seit 1929 Herr Dr. Franz Moewus sich fast ausschließlich mit dem biologischen Studium der verschiedenen *Chlamydomonas* gameten befaßt hat, das er jetzt in Heidelberg fortführt, sowie dem Direktor dieses Instituts, Herrn Prof. Dr. Max Hartmann, mit dem die gemeinsame Untersuchung der tierischen Befruchtungstoffe am Beispiel der Seeigel begonnen worden ist. Diesen beiden Forschern ist es gelungen, das Wesen der Sexualität biologisch so weit aufzuklären, daß das Problem an einzelnen Punkten chemisch angreifbar wurde. Es ist mehr als Dank, was ich mit diesen Worten ausdrücken will. Es ist der Glaube, daß auch auf anderen Gebieten eine unverbrüchliche Zusammenarbeit unserer Hochschul- und Forschungsinstitute die Zukunft der Wissenschaft gestalten wird.

Eingeg. 15. Dezember 1939. [A. 106.]

²³⁾ A. Kühn, Die Auslösung von Entwicklungsvorgängen durch Wirkstoffe, diese Ztschr. 52, 399 [1939]; E. Becker, Naturwiss. 26, 433 [1938]; E. Plagge u. E. Becker, Biol. Zbl. 58, 231 [1938]; A. Butenandt, Neue Probleme der biologischen Chemie, diese Ztschr. 51, 617 [1938].

²⁴⁾ F. Moewus, unveröffentlicht.

²⁵⁾ H. Stubbe, Genmutation, I. Teil, Handb. Vererbungswissenschaften, Bd. II F, Berlin 1938, „Über die Natur des Gens“, S. 300 ff.

Die Chemie des Siliciums

Von Professor Dr. ROBERT SCHWARZ, Chemisches Institut der Universität Königsberg (Pr)

Im Reigen der chemischen Elemente darf das Silicium ein besonderes Interesse beanspruchen. Nächste dem Sauerstoff ist es in Form der Silicate als häufigstes Element am Aufbau der Erdrinde beteiligt. Diese Silicate sind aber nicht nur als Bausteine der Erde von geochemischer Bedeutung, sondern auch in Form künstlich geschaffener Produkte — Ziegel, Töpferware, Glas, Steinzeug, Porzellan, Zement — von hervorragendem praktischen und kulturellen Wert.

Das Element selbst ist infolge seiner metallähnlichen Eigenschaften ebenfalls von technischer, und zwar hauptsächlich metallurgischer Bedeutung. Die Verbindungen des Siliciums mit Metallen, die Silicide, spielen als Legierungsbestandteile eine zunehmend wichtige Rolle in der Metallurgie der Schwer- und Leichtmetalle.

Auch in rein wissenschaftlichem Sinne verdient das Silicium dank der Zahl und Art seiner Verbindungen besondere Aufmerksamkeit. Als das homologe Element des Kohlenstoffs bildet es Verbindungen, die der großen und überaus wichtigen Klasse der organischen Verbindungen formal gleichen und ähnlich wie diese zu vielseitigen und durchaus eigenartigen Reaktionen befähigt sind.

Die seit über einem Jahrhundert betriebene Bearbeitung der Siliciumchemie hat ein sehr umfangreiches Material ergeben und ein abgerundetes Bild dieses wichtigen Teilgebietes geschaffen. Was an neueren Erkenntnissen in den letzten

Jahren, insbes. auch durch eigene Arbeiten¹⁾, gewonnen wurde, soll in Kürze in den folgenden Kapiteln dargestellt werden.

Das Element wurde von Berzelius entdeckt, der es im Jahre 1822 durch Reduktion des Siliciumfluorids mit metallischem Kalium darstellte. Besser gelingt die Darstellung nach Wöhler (1856) auf aluminothermischem Wege durch Reduktion des Kaliumfluorsilicats $K_2[SiF_6]$, wobei das Aluminium in geschmolzenem Zustande als Lösungsmittel wirkt, aus dem das Silicium beim Abkühlen auskristallisiert. Technisch wird Silicium durch Reduktion des Siliciumdioxids in Form von Quarzpulver mittels Kohle im elektrischen Ofen bei Gegenwart von Eisen dargestellt. Das Eisen verhindert die Bildung des Carbid, führt aber gleichzeitig zur Bildung einer Ferro-Silicium-Legierung, so daß bei diesem Verfahren kein völlig reines Silicium entsteht. Das technische Produkt enthält meistens 3—5% Eisen, man stellt aber oft auch absichtlich Legierungen mit 20 und mehr Prozent Eisen dar. Die Umsetzung erfolgt fast ausschließlich im elektrischen Ofen, da die stark negative Wärmetönung der Reaktion $SiO_2 + 2C = Si + 2CO - 135 \text{ Cal}$ eine Reaktionstemperatur von etwa 1900° bedingt. Auch mit SiC kann man SiO_2 nach $2SiC +$

¹⁾ Der Verfasser hat in den letzten 25 Jahren über 50 Einzelabhandlungen über das Gebiet der Siliciumverbindungen veröffentlicht. In dem vorliegenden Aufsatz hat er seine Forschungsergebnisse zusammenfassend in gedrängter Kürze dargestellt. Dem entsprechend stellt diese Zusammenfassung keine Monographie des Siliciums dar, die ja wesentlich umfangreicher ausfallen müßte. Sie berücksichtigt deshalb auch nur in bescheidenem Maße die Arbeiten anderer Autoren.