

LIBRARY
NEW YORK
BOTANICAL
GARDEN

Untersuchungen

über

die Chemotaxis der Pteridophyten-Spermatozoiden.

Von

K. Shibata.

Mit 3 Textfiguren.

Teil 1.

Kapitel I. Einleitung und Methodisches.

Meine frühere Arbeit über die Chemotaxis der *Isoetes*-Spermatozoiden¹⁾, die ich im Anschluß an die klassischen Untersuchungen Pfeffers²⁾ über die Farn-Samenfäden ausführte, hat schon einige neue Gesichtspunkte bezüglich jener merkwürdigen chemischen Reizerscheinung eröffnet und den Wunsch gerechtfertigt, die betreffende Erforschung auf die übrigen Pteridophyten-Spermatozoiden auszu-dehnen. Die Samenfäden von *Salvinia* und *Equisetum* wurden sodann in den Kreis der Untersuchung gezogen und einige der damals gewonnenen, wichtigeren Ergebnisse habe ich bereits in einer Reihe von vorläufigen Mitteilungen³⁾ publiziert. Meine erste Absicht war, womöglich alle wichtigeren Repräsentanten der Gefäß-Kryptogamen-Klassen nach den chemotaktischen Eigenschaften ihrer Samenfäden zu durchforschen. Aber es hat sich bald herausgestellt,

1) K. Shibata, Studien über die Chemotaxis der *Isoetes*-Spermatozoiden. Jahrb. f. wiss. Bot., Bd. XLI, 1905, S. 561.

2) W. Pfeffer, Locomotorische Richtungsbewegungen durch chemische Reize. Unters. a. d. botan. Inst. Tübingen, Bd. I, 1884, S. 363.

3) K. Shibata, Studien über die Chemotaxis der *Salvinia*-Spermatozoiden. V. M. Bot. Mag. Tokyo, Vol. XIX, 1905, S. 39. — K. Shibata, Über die Chemotaxis der Spermatozoiden von *Equisetum*. V. M. Bot. Mag. Tokyo, Vol. XIX, 1905, S. 79. — K. Shibata, Weitere Mitteilung über die Chemotaxis der *Equisetum*-Spermatozoiden. Bot. Mag. Tokyo, Vol. XIX, 1905, S. 126.

AUG 7 - 1923

daß die chemische Reizbarkeit der Samenfäden viel kompliziertere Verhältnisse darbietet, als man bisher allgemein glaubte, was noch durch intensivere Beschäftigung mit den weniger zahlreichen Leitobjekten im näheren aufzuklären ist. Die Lösung dieser Aufgabe habe ich also jahrelang, freilich mit einigen Unterbrechungen, angestrebt und die Früchte dieser Untersuchungen sollen in der vorliegenden Arbeit zusammengetragen werden. Die experimentellen Materialien sind indes so stark angehäuft¹⁾, daß ich in der nachfolgenden Darstellung vielfach etwas summarisch verfahren mußte.

Seit dem Erscheinen meiner *Isoetes*-Arbeit, in welcher frühere Literatur zusammengestellt ist, wurden zwei Arbeiten veröffentlicht, die sich unmittelbar an unser Thema anschließen; nämlich, die vorläufige Mitteilung Lidforss²⁾ über die Chemotaxis der *Equisetum*-Samenfäden und die Arbeit von Bruchmann³⁾ über die *Lycopodium*-Spermatozoiden. Die erstere erschien fast gleichzeitig mit meinem vorläufigen Bericht, der sich auf das gleiche Objekt bezieht. Bruchmann hatte das Glück, über die schwer zugänglichen *Lycopodium*-Prothallien zu verfügen, und konstatierte in willkommener Weise, daß das spezifische Chemotaktikum für die *Lycopodium*-Samenfäden Zitronensäure ist. Unter den neueren die Chemotaxis der freibeweglichen Mikroorganismen behandelnden Arbeiten sind hier nur zu erwähnen die Kniepschen⁴⁾ Untersuchungen über die Bakterien, welche in der Fragestellung mancherlei Berührungspunkte mit den meinigen aufweisen.

Die Versuchsmethodik für die *Isoetes*-Spermatozoiden habe ich schon früher des näheren beschrieben⁵⁾. Die Lebensfähigkeit der gekeimten Mikrosporen resp. -Prothallien von *Isoetes* ist überraschend groß; die im späten Herbst gesammelten, reifen Mikrosporen mit Leitungswasser in einer Petri-Schale ausgesät und ruhig in eine reine Atmosphäre gestellt, lassen die Spermatozoiden nach anderthalb Jahren noch reichlich ausschwärmen. K. Fujii⁶⁾ hat inzwischen die interessante Entdeckung gemacht, daß die Mikro-

1) Die Protokoll-Nummern der Versuche betragen etwa 5000.

2) B. Lidforss, Über die Chemotaxis der *Equisetum*-Spermatozoiden. Ber. d. Deutsch. Bot. Ges., Bd. 23, 1905, S. 314.

3) H. Bruchmann, Von der Chemotaxis der *Lycopodium*-Spermatozoiden. Flora, Bd. 99, 1909, S. 193.

4) H. Kniep, Untersuchungen über die Chemotaxis von Bakterien. Jahrb. f. wiss. Bot., Bd. XLIII, 1906, S. 215.

5) K. Shibata, Jahrb. f. wiss. Bot., Bd. XLI, 1905, S. 563.

6) K. Fujii, Bot. Mag. Tokyo, Vol. XXIV, 1910, Nr. 278, S. 75.

prothallien von *Isoetes* unter Reizwirkung gewisser Bestandteile des Leuchtgases unfehlbar ihre Spermatozoiden entlassen. Die Nutzanwendung dieser merkwürdigen Tatsache hat die Versuche mit den *Isoetes*-Samenfäden wesentlich erleichtert. Man nimmt eine kleine Menge von den vorher gut ausgewaschenen *Isoetes*-Mikroprothallien¹⁾ in einem Tropfen destillierten Wassers auf dem Objektträger, der einige Sekunden auf die Mündung eines Kölbchens, das das mit Leuchtgas gesättigte Wasser enthält, gehalten wird. Hierauf sieht man nach kurzer Zeit die von Mikrosporen entlassenen Spermatozoiden sehr reichlich im Außenmedium umherschwärmen. Das Präparat wird mit der Kapillare beschickt, mit dem Deckglas bedeckt und ist dann zur Beobachtung fertig. Diese kurze Behandlung mit den flüchtigen Gasbestandteilen beeinflusst in keiner Weise die chemotaktische Sensibilität der Samenfäden, was aus der Schwellenbestimmung usw. deutlich hervorgeht.

Die im Herbst gesammelten, reifen Sporokarprien von *Salvinia natans* Hoffm., die im Wasser im kalten Raum aufbewahrt wurden, liefern während mehrerer Monate (November—Mai) reichliches Spermatozoiden-Material. Die Beschaffung des letzteren geschieht immer in sehr einfacher Weise. Man nimmt zu diesem Zweck eine Anzahl der männlichen Sporokarprien bzw. Sori in eine mit destilliertem Wasser beschickte Glasdose, die in den Thermostaten bei ca. 25°—30° C gestellt wird. Schon nach wenigen Tagen treten die Prothalliumschläuche durch die Wandung der Mikrosporangien hervor. Diese Inkubationszeit beträgt im Spät-Herbst, also bald nach dem Reifen der Sporokarprien, etwa 6 Tage, und verkürzt sich immer mehr gegen die Frühjahrsmonate. Eine kleine Menge dieser keimenden Mikrosporangien, auf den Objektträger gebracht, gut ausgewaschen²⁾ und mit einem Tropfen destillierten Wassers versetzt, läßt unter leisem Druck des Deckglases reichliche Spermatozoiden heraustreten. Der spiralig gewundene Körper dieser Samenfäden trägt am Vorderende zahlreiche Zilien und ist am hinteren Teile in einem zarten plasmatischen Bläschen eingeschlossen, welches mehrere winzige Stärkekörnchen enthält. Die Schwärmperiode der Samenfäden ist ziemlich lang und dauert in max. etwa 2½ Stunden. Die von Bläschen entblößten Samenfäden sind wesentlich kurzlebiger,

1) Bei den vorliegenden Untersuchungen wurden, außer *Isoetes japonica*, vielfach auch *I. echinospora* angewandt.

2) Durch wiederholtes Zusetzen und Absaugen des reinen Wassers.

aber sie erfahren dabei keine Veränderung der chemotaktischen Reizbarkeit.

Die frisch geernteten Sporen von *Equisetum arvense* L. wurden Ende März auf mit Leitungswasser durchtränkten Stückchen eines alten japanischen Dachziegels ausgesät, der sich in einer mit Deckel versehenen Kristallisierschale befand. Die Kulturen wurden ans Nordfenster des Laboratoriums gestellt. Die Substrate und die Gefäße wurden vorher im Dampftopf sterilisiert, um die störende Algen- und Pilzvegetation hintanzuhalten. Trotz aller Kautelen fallen jedoch die wachsenden Prothallien zuweilen der sich rasch verbreitenden Infektion der parasitären Pilze anheim. Deshalb ist es geboten, eine ganze Reihe der Kulturen gleichzeitig anzustellen. Die Dichtsaat der Sporen ist zumeist vorteilhaft, da sie kleine Prothallien hervorbringt, welche verhältnismäßig frühzeitig Antheridien tragen. Die ersten Spermatozoiden kommen dabei gewöhnlich nach $1\frac{1}{2}$ —2 Monaten zum Vorschein. In den sauber gehaltenen Kulturen zeigen die Prothallien öfters eine sehr lange Lebensdauer, die sich sogar über ein Jahr hinaus erstrecken kann. Bei der Ausführung der Versuche werden die Prothallien mittels feinen Pinsels oder kleiner Glasnadel vorsichtig von dem Substrat abgehoben, auf den Objektträger gebracht und durch Beträufeln mit destilliertem Wasser ausgewaschen. Bald nach sanftem Auflegen des Deckglases sieht man die Spermatozoiden aus reifen Antheridien hervortreten und im umgebenden Wasser flink umherschwärmen. Es muß hierbei darauf geachtet werden, daß die Prothallien bei dieser Manipulation keine Verletzung erleiden. Sonst sammeln sich die Samenfäden sehr leicht an verwundeten Stellen der Prothalliumzellen, welche anscheinend gewisse chemotaktisch wirksame Stoffe enthalten, und dadurch wird ihre chemotaktische Reaktion gegen die zugeschobene Kapillare öfters völlig aufgehoben.

Die Prothallien der Farne¹⁾ wurden auch durch die Aussaat der reifen Sporen gewonnen.

Bei den vorliegenden Untersuchungen kam überall die bekannte Pfeffersche Kapillarmethode zur Anwendung. Die Experimente mit den *Isoetes*-Samenfäden wurden gewöhnlich mit den Kapillaren von 50—100 μ Kaliber ausgeführt. Für die übrigen Samenfädenarten sind die etwas breiteren als die vorigen von Vorteil. Die Lösungen wurden in die an einem Ende zugeschmolzenen Kapillaren

1) *Gymnogramme sulfurea* Desv. und *Osmunda javanica* Bl.

wie gewöhnlich unter der Luftpumpe injiziert. Die benutzten reinen Chemikalien stammten zumeist aus den Firmen E. Merck und A. F. G. Kahlbaum und wurden zum Teil für meinen Zweck neu dargestellt. Die Herstellung der Lösungen geschah womöglich stets nach dem molaren System. Die sämtlichen Versuche wurden bei Zimmertemperatur angestellt.

Die der vorliegenden Arbeit zugrunde liegenden Experimente wurden teils in Tokyo, teils in Sapporo ausgeführt. Dem Vorstand des Tokyoer botanischen Instituts, den Herren Professoren J. Matsumura und M. Miyoshi bin ich für ihre wohlwollende Unterstützung tiefgefühlten Dank schuldig. Ferner den Herren Professoren K. Fujii und R. Majima, sowie meinem Bruder Priv.-Doz. Dr. Y. Shibata, die alle meine Arbeit durch Rat und Tat beförderten, spreche ich hier meinen verbindlichsten Dank aus.

Im vorliegenden 1. Teil will ich mich ausschließlich mit der positiven Chemotaxis der untersuchten Spermatozoiden beschäftigen, während im demnächst folgenden 2. Teil die Repulsionserscheinungen, Art und Weise der chemotaktischen Reaktionen, die Beeinflussung der chemotaktischen Sensibilität durch die indifferenten (d. h. chemotaktisch unwirksamen) Stoffe usw. näher behandelt werden. Einige allgemeine Betrachtungen sollen auch dort Platz finden.

Kapitel 2. Die Reizwirkung der organischen Säuren.

Die Spermatozoiden von den bisher untersuchten Pteridophyten, mit Ausnahme von *Marsilia*¹⁾ und *Lycopodium*²⁾, reagieren topochemotaktisch auf Äpfelsäure und deren Salze, oder genauer ausgedrückt, auf das Malat-Ion. Die hervorragenden Reizeffekte des letzteren hat man schon bei den Farnen³⁾, *Selaginella*⁴⁾ und *Isoetes*⁵⁾ sehr eingehend geschildert, und man kann sich hier für die übrigen Fälle bloß mit kurzem Hinweis auf die Reizschwelle usw. begnügen.

1) W. Pfeffer, Locomotorische Richtungsbewegungen durch chemische Reize. Unters. a. d. botan. Inst. Tübingen, Bd. I, 1884, S. 423.

2) H. Bruchmann, Von der Chemotaxis der *Lycopodium*-Spermatozoiden. Flora, Bd. 99, 1909, S. 193.

3) W. Pfeffer, a. a. O., S. 373.

4) W. Pfeffer, a. a. O., S. 422.

5) K. Shibata, Studien über Chemotaxis der *Isoetes*-Spermatozoiden. Jahrb. f. wiss. Bot., Bd. XLI, 1905, S. 566.

Die Spermatozoiden von *Salvinia*¹⁾ werden in typisch topotaktischer Weise von den Kapillaren angelockt, welche mit den K-, Na-, NH₄- und Ca-Malat sowie der freien Äpfelsäure beschickt sind. Die in eine 1/100 Mol-Lösung von äpfelsaurem Natron enthaltende Kapillare reichlich einschwärmenden Samenfäden haben in gewissen Fällen sogar 2 1/2 Stunden lang ihre rege Bewegungstätigkeit beibehalten. Freilich bei höheren Konzentrationen der Malate und der freien Äpfelsäure gesellt sich die Repulsivwirkung zu den anziehenden Kräften und es kommen an der Kapillarmündung mannigfaltige Spiele der tummelnden Samenfäden zustande. Das im einzelnen auszumalen, ist hier nicht angebracht. Eine schwache, eben merkliche Reaktion tritt überall bei einer 1/15 000 Mol-Konzentration des Malat-Ions ein, welche wohl als Schwellenwert gilt.

Wie Lidforss²⁾ und ich³⁾ fast gleichzeitig fanden, reagieren auch die Spermatozoiden von *Equisetum* ganz prompt auf das Malat-Ion und bei einer 1/10 000 Mol-Lösung des letzteren wird die Reizschwelle erzielt.

Hieraus ersieht man, daß die Sensibilität bei allen erwähnten Pteridophyten-Spermatozoiden für das Malat-Ion in beinahe gleichem Maße ausgebildet ist⁴⁾.

Es ist bereits bekannt, daß die Pteridophyten-Spermatozoiden auch von einzelnen anderen organischen Säuren (Anionen), welche in ihrem molekularen Aufbau der Äpfelsäure nahe stehen, topochemotaktisch gereizt werden. Es wurde dabei gefunden, daß die Spermatozoiden von *Salvinia*⁵⁾ sowie von Farnen⁶⁾ durch Maleinsäure angelockt werden, während die *Isoetes*-Spermatozoiden⁷⁾ nur auf Fumarsäure und ferner auf die ähnlich konfigurierten Dikarbonsäuren, i. e. Bernsteinsäure und d-Weinsäure, reagieren. Diese Beobachtungen führten mich seinerzeit zur Aufstellung des Begriffs

1) K. Shibata, Studien über Chemotaxis der *Salvinia*-Spermatozoiden. Bot. Mag. Tokyo, Vol. XIX, 1905, S. 39.

2) B. Lidforss, Über die Chemotaxis der *Equisetum*-Spermatozoiden. Ber. d. Deutsch. Bot. Ges., Bd. 23, 1905, S. 314.

3) K. Shibata, Über die Chemotaxis der Spermatozoiden von *Equisetum*. Bot. Mag. Tokyo, Vol. XIX, 1905, S. 79.

4) Bei den Farn- und *Selaginella*-Spermatozoiden wird bekanntlich die Reizschwelle durch 0,001 % Äpfelsäure erzielt.

5) K. Shibata, Bot. Mag. Tokyo, Vol. XIX, 1905, S. 40.

6) W. Pfeffer, Unters. a. d. botan. Inst. Tübingen, Bd. I, 1884, S. 382.

7) K. Shibata, Jahrb. f. wiss. Bot., Bd. XLI. 1905, S. 570.

von der „Maleinophilie“ und „Fumarophilie“ der Samenfäden. Beim Zustandekommen der chemotaktischen Reizwirkung muß also die sterische Konfiguration der betreffenden organischen Säure-Moleküle in erster Linie maßgebend sein¹⁾. Die weitere Verfolgung dieses Problems hat nun die volle Bestätigung des obigen Satzes erbracht, worüber ich nachstehend in aller Kürze berichten will.

Ich habe in diesen Jahren mit mehreren, vom besagten Gesichtspunkte aus wichtig erscheinenden, organischen Säuren experimentiert und die Ergebnisse unter möglichst variierten Versuchsbedingungen kontrolliert. Die Säuren wurden als neutrale Salze und z. T. auch frei angewandt. Die ersteren wurden durch die Kombination mit den Kationen hergestellt, welche auf die betreffenden Samenfäden keinen chemotaktischen Reiz ausüben; also kamen für *Isoetes* und *Salvinia* vornehmlich Na-, K-, NH₄-, für *Farne* Na-, NH₄- und für *Equisetum* nur NH₄-Salze in Betracht.

Vorausgeschickt sei es hier, daß die Anionen aller untersuchten monobasischen Säuren, welche Ameisen-, Essig-, Butter-, Milch-, Benzoe-, Salizyl- und Chinasäure umfassen, als $\frac{1}{10}$ — $\frac{1}{1000}$ Mol-Lösung appliziert, in keinem Falle die chemotaktische Anlockung der Samenfäden bewirkten.

Die Ergebnisse der Versuche mit den Di- und Trikarbonsäuren werden in der folgenden Tabelle zusammengestellt. Die Grade der Reaktion $a_3 - 0$ werden bloß nach Maßgabe der topotaktischen Anlockung beurteilt; die unter verschiedenen Umständen eintretenden Repulsivwirkungen, welche zweckmäßig in anderem Zusammenhang behandelt werden sollen, bleiben hier einstweilen unberücksichtigt.

Anion von	Konzentration in Mol ²⁾	<i>Equisetum</i>	<i>Isoetes</i>	<i>Salvinia</i>	<i>Osmunda</i>	<i>Gymnogramme</i>
Oxalsäure						
COOH	$\frac{1}{10}$	0	0	0	0	× ³⁾
	$\frac{1}{100}$					
COOH	$\frac{1}{1000}$					
Malonsäure						
CH ₂ \begin{matrix} \text{COOH} \\ \text{COOH} \end{matrix}	$\frac{1}{10}$	0	0	0	0	×
	$\frac{1}{100}$					
	$\frac{1}{1000}$					

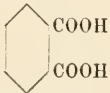
1) K. Shibata, a. a. O., S. 603. S. auch Bot. Mag. Tokyo, Vol. XIX, 1905, S. 40.

2) Sämtliche untersuchten Konzentrationen sind hier nicht angegeben, sondern nur diejenigen, welche zur Kennzeichnung der Reaktionsgrade unerlässlich sind.

3) Das Zeichen × bedeutet, daß kein einschlägiges Experiment vorliegt.

Anion von	Konzentration in Mol	Equi- setum	Isocetes	Sal- vinia	Os- munda	Gymno- gramme
Bernsteinsäure						
CH ₂ • COOH	1/10	0	a ₃	0	0	×
	1/100		a ₂			
CH ₂ • COOH	1/200		a ₁			
	1/1000		0			
Äpfelsäure						
CH(OH) • COOH	1/10	a ₃	a ₃	a ₃	a ₃	a ₃
	1/100	a ₃	a ₃	a ₃	a ₃	a ₃
CH ₂ • COOH	1/1000	a ₃	a ₃	a ₃	a ₃	a ₃
	1/10000	a ₁	a ₃ —a ₂	a ₂	a ₂	a ₂
	1/15000	?	a ₂	a ₁	a ₁	a ₁
	1/20000	0	a ₁	0	0	0
d-Weinsäure						
CH(OH) • COOH	1/10	0	a ₃	0	0	×
	1/100		a ₂ —a ₁			
CH(OH) • COOH	1/1000		0			
Traubensäure						
CH(OH) • COOH	1/10	0	a ₃	0	0	×
	1/20		a ₃			
CH(OH) • COOH	1/50		a ₂			
	1/100		a ₁			
	1/1000		0			
Mesoweinsäure						
CH(OH) • COOH	1/10	a ₃	a ₃	a ₃	a ₃	a ₃
	1/100	a ₃	a ₂ —a ₁	a ₃	a ₃	a ₂
CH(OH) • COOH	1/500	a ₃	0	a ₂	a ₂	a ₁
	1/1000	a ₃		a ₂	a ₁	0
	1/3000	a ₃		a ₁	0	
	1/5000	a ₂		0		
	1/10000	a ₁				
	1/20000	0				
Monobrombernsteinsäure						
CH • Br • COOH	1/10	0	a ₃	a ₃	a ₃	a ₃
	1/50		a ₃	a ₂	a ₂	a ₂
CH ₂ • COOH	1/100		a ₃	a ₂ —a ₁	a ₁	a ₁
	1/500		a ₂	0	0	0
	1/1000		a ₁			
	1/2000		0			
Dibrombernsteinsäure						
CH • Br • COOH	1/10	0	a ₃	0	0	×
	1/50		a ₃			
CH • Br • COOH	1/100		a ₂			
	1/200		a ₁			
	1/1000		0			
Isodibrombernsteinsäure						
CH • Br • COOH	1/10	0	a ₃	0	0	0
	1/100		a ₃			
CH • Br • COOH	1/200		a ₂			
	1/500		a ₁			
	1/1000		0			

Anion von	Konzentration in Mol	<i>Equisetum</i>	<i>Isoetes</i>	<i>Salvinia</i>	<i>Osmunda</i>	<i>Gymnogramme</i>
Fumarsäure $\begin{array}{c} \text{H} \cdot \text{C} \cdot \text{COOH} \\ \\ \text{COOH} \cdot \text{C} \cdot \text{H} \end{array}$	$\frac{1}{10}$ $\frac{1}{100}$ $\frac{1}{200}$ $\frac{1}{1000}$	0	a_3 a_2 a_1 0	0	0	0
Maleinsäure $\begin{array}{c} \text{H} \cdot \text{C} \cdot \text{COOH} \\ \\ \text{H} \cdot \text{C} \cdot \text{COOH} \end{array}$	$\frac{1}{10}$ $\frac{1}{100}$ $\frac{1}{500}$ $\frac{1}{1000}$ $\frac{1}{10000}$ $\frac{1}{15000}$ $\frac{1}{20000}$	0	0	a_3 a_3 a_3 a_3 a_2 a_1 ?	a_3 a_3 a_2 a_1 0	a_3 a_2 a_1 0
Mesakonsäure $\begin{array}{c} \text{CH}_3 \cdot \text{C} \cdot \text{COOH} \\ \\ \text{COOH} \cdot \text{C} \cdot \text{H} \end{array}$	$\frac{1}{10}$ $\frac{1}{50}$ $\frac{1}{100}$ $\frac{1}{200}$ $\frac{1}{1000}$	0	a_3 a_2 $a_2 - a_1$ $a_1 - ?$ 0	0	0	0
Zitronensäure $\begin{array}{c} \text{CH}_3 \cdot \text{C} \cdot \text{COOH} \\ \\ \text{H} \cdot \text{C} \cdot \text{COOH} \end{array}$	$\frac{1}{10}$ $\frac{1}{50}$ $\frac{1}{100}$ $\frac{1}{200}$ $\frac{1}{500}$ $\frac{1}{1000}$	0	0	a_3 a_3 a_2 $a_2 - a_1$ $a_1 - ?$ 0	a_3 a_2 a_1 0	×
Itakonsäure $\begin{array}{c} \text{CH}_2 \\ \\ \text{C} \cdot \text{COOH} \\ \\ \text{CH}_2 \cdot \text{COOH} \end{array}$	$\frac{1}{10}$ $\frac{1}{50}$ $\frac{1}{100}$ $\frac{1}{200}$ $\frac{1}{1000}$	0	a_3 a_2 $a_2 - a_1$? 0	0	0	×
Korksäure $\begin{array}{c} \text{CH}_2 \cdot \text{COOH} \\ \\ (\text{CH}_2)_4 \\ \\ \text{CH}_2 \cdot \text{COOH} \end{array}$	$\frac{1}{10}$ $\frac{1}{50}$ $\frac{1}{100}$ $\frac{1}{200}$ $\frac{1}{1000}$	0	a_3 a_2 a_1 ? 0	0	0	×
Sebazinsäure $\begin{array}{c} \text{CH}_2 \cdot \text{COOH} \\ \\ (\text{CH}_2)_6 \\ \\ \text{CH}_2 \cdot \text{COOH} \end{array}$	$\frac{1}{10}$ $\frac{1}{50}$ $\frac{1}{100}$ $\frac{1}{200}$ $\frac{1}{1000}$	0	a_3 a_3 a_2 a_1 0	0	0	×
Zuckersäure $\begin{array}{c} \text{CH} \cdot \text{OH} \cdot \text{COOH} \\ \\ (\text{CH} \cdot \text{OH})_2 \\ \\ \text{CH} \cdot \text{OH} \cdot \text{COOH} \end{array}$	$\frac{1}{10}$ $\frac{1}{100}$ $\frac{1}{1000}$	0	0	0	0	×

Anion von	Konzentration in Mol	<i>Equisetum</i>	<i>Isoetes</i>	<i>Salvinia</i>	<i>Osmunda</i>	<i>Gymnogramme</i>
Schleimsäure						
$\text{CH} \cdot \text{OH} \cdot \text{COOH}$	$\frac{1}{10}$	0	0	0	×	×
$\text{CH} \cdot \text{OH}_2$	$\frac{1}{100}$					
$\text{CH} \cdot \text{OH} \cdot \text{COOH}$	$\frac{1}{1000}$					
Glutarsäure						
$\text{CH}_2 \cdot \text{COOH}$	$\frac{1}{10}$	0	a_2	0	×	×
CH_2	$\frac{1}{50}$		a_3			
$\text{CH}_2 \cdot \text{COOH}$	$\frac{1}{100}$		a_2			
	$\frac{1}{200}$		a_1			
	$\frac{1}{1000}$		0			
Asparaginsäure						
$\text{CH} \cdot \text{NH}_2 \cdot \text{COOH}$	$\frac{1}{10}$	0	0	0	0	×
$\text{CH}_2 \cdot \text{COOH}$	$\frac{1}{100}$					
	$\frac{1}{1000}$					
Glutaminsäure						
$\text{CH} \cdot \text{NH}_2 \cdot \text{COOH}$	$\frac{1}{10}$	0	0	0	0	×
CH_2	$\frac{1}{100}$					
$\text{CH}_2 \cdot \text{COOH}$	$\frac{1}{1000}$					
d-Kampfersäure						
$\text{CH}_2 - \text{CH} \cdot \text{COOH}$	$\frac{1}{10}$	0	0	0	0	×
$\text{CH}_3 \cdot \text{C} \cdot \text{CH}_3$	$\frac{1}{100}$					
$\text{CH}_2 - \text{C} \cdot \text{CH}_3 \cdot \text{COOH}$	$\frac{1}{1000}$					
Isokampfersäure						
$\text{CH}_2 - \text{CH} \cdot \text{COOH}$	$\frac{1}{10}$	0	a_3	0	×	×
$\text{CH}_3 \cdot \text{C} \cdot \text{CH}_3$	$\frac{1}{50}$		a_2			
$\text{CH}_2 - \text{C} \cdot \text{CH}_3 \cdot \text{COOH}$	$\frac{1}{100}$		$a_2 - a_1$			
	$\frac{1}{200}$		$a_1 - ?$			
	$\frac{1}{500}$		0			
Phtalsäure						
	$\frac{1}{10}$	×	0	0	×	×
	$\frac{1}{100}$					
	$\frac{1}{1000}$					
Terephtalsäure						
	$\frac{1}{10}$	×	0	0	×	×
	$\frac{1}{100}$					
	$\frac{1}{1000}$					
α -Truxillsäure						
$\text{C}_6\text{H}_5 \cdot \text{CH} - \text{CH} \cdot \text{COOH}$	$\frac{1}{10}$	×	0	0	0	×
$\text{COOH} \cdot \text{CH} - \text{CH} \cdot \text{C}_6\text{H}_5$	$\frac{1}{100}$					
	$\frac{1}{1000}$					

Anion von	Konzentration in Mol	<i>Equisetum</i>	<i>Isoetes</i>	<i>Salvinia</i>	<i>Osmunda</i>	<i>Gymnogramme</i>
Äthyltrikarbonsäure $\begin{array}{c} \text{CH} \begin{array}{l} \diagup \text{COOH} \\ \diagdown \text{COOH} \end{array} \\ \\ \text{CH}_2 \cdot \text{COOH} \end{array}$	$\frac{1}{10}$ $\frac{1}{50}$ $\frac{1}{100}$ $\frac{1}{200}$	×	a_3 a_2 a_1 0	0	×	×
Zitronensäure $\begin{array}{c} \text{CH}_2 \cdot \text{COOH} \\ \\ \text{C}(\text{OH}) \cdot \text{COOH} \\ \\ \text{CH}_2 \cdot \text{COOH} \end{array}$	$\frac{1}{10}$ $\frac{1}{100}$ $\frac{1}{1000}$	0	0	0	×	×
Akonitsäure $\begin{array}{c} \text{CH}_2 \cdot \text{COOH} \\ \\ \text{C} \cdot \text{COOH} \\ \\ \text{CH} \cdot \text{COOH} \end{array}$	$\frac{1}{10}$ $\frac{1}{100}$ $\frac{1}{1000}$	0	0	0	×	×
Agarizinsäure $\begin{array}{c} \text{C}_{16}\text{H}_{38} \\ \\ \text{CH} \cdot \text{COOH} \\ \\ \text{C}(\text{OH}) \cdot \text{COOH} (?) \\ \\ \text{CH}_2 \cdot \text{COOH} \end{array}$	$\frac{1}{10}$ $\frac{1}{100}$ $\frac{1}{200}$ $\frac{1}{500}$ $\frac{1}{1000}$	0	a_3 a_2 a_1 ?—0	0	×	×

Ein Überblick obiger Tabelle erschließt in erster Linie die hochwichtige Tatsache, daß die Pteridophyten-Spermatozoiden aus differenten Verwandtschaftskreisen eine durchgehende Verschiedenheit bezüglich der chemotaktischen Reizbarkeit aufweisen. Man nimmt zunächst bei *Equisetum* wahr, daß seine Spermatozoiden nur von Äpfelsäure und Mesoweinsäure, und zwar in fast gleichem Grade, topotaktisch angelockt werden. Die Samenfäden von *Isoetes* einerseits, und die von *Salvinia* und Farnen andererseits, zeigen den schon erwähnten, merkwürdigen Gegensatz in ihrem Verhalten gegen die beiden geometrischen Isomere, Fumarsäure und Maleinsäure, i. e. die ersteren sind „fumarophil“ und die letzteren „maleinophil“¹⁾.

1) In meiner vorläufigen Mitteilung (Bot. Mag. Tokyo, Vol. XIX, 1905, S. 40) sind die interessanten Versuche beschrieben, wobei dem Gemenge der Samenfäden von *Isoetes* und *Salvinia* gleichzeitig zwei Glaskapillaren, je mit $\frac{1}{50}$ — $\frac{1}{100}$ Mol fumarsaurer resp. maleinsaurer Natriumlösung beschickt, zugeschoben wurden. „Es ist nun sehr fesselnd zu beobachten, daß hierauf das bunte Durcheinanderschießen beider Samenfädenarten sich löst, und die Spermatozoiden von *Salvinia* unfehlbar in die maleinsäurehaltige Kapillare hineineilen, während sich fast alle *Isoetes*-Samenfäden in der fumarsäurehaltigen ansammeln“.

Das Verhalten der Samenfäden gegen Mesakonsäure (Methylfumar-säure) und Zitrakonsäure (Methylmaleinsäure) entspricht, wie man sieht, genau diesem Schema. Es sei nur beiläufig bemerkt, daß bei *Salvinia* die Reizwirkung der Maleinsäure jener der Apfelsäure fast ebenbürtig ist, aber der Reizwert der Zitrakonsäure, die durch die Substitution eines H-Atoms in der Maleinsäure durch die CH_3 -Gruppe entsteht, schon nur etwa $\frac{1}{30}$ des letzteren, nach ihrem Schwellenwerte bemessen, beträgt.

Es liegt auf der Hand, anzunehmen, daß das ausschlaggebende Moment in jenem Gegensatz der Reizwirkung bei den genannten Stereoisomeren nichts anderes ist, als die räumliche Anordnung der Radikale, insbesondere der Karboxyl-Gruppen. Die voneinander entfernte Lage oder sogenannte Trans-Stellung der beiden Karboxylgruppen in Fumarsäure bedingt also ihre Wirksamkeit gegen die *Isoetes*-Samenfäden, während Maleinsäure mit den Karboxylgruppen in der Nachbar- oder Cis-Stellung die filicoiden Spermatozoiden topotaktisch reizen kann. Auch die Wirkungsweise der Kampfersäuren¹⁾ auf die *Isoetes*-Samenfäden findet eine treffende Erklärung in ihrer Cis-Trans-Isomerie.

Von diesem Gesichtspunkte aus betrachtet, erscheint es wohl verständlich, daß die *Isoetes*-Samenfäden von mehreren Dikarbonsäuren angelockt werden, welchen wahrscheinlich die fumaroide Konfiguration, d. h. die Trans-Stellung der Karboxylgruppen, zukommt. Was zunächst die Bernsteinsäure anlangt, so nimmt man nach Bethmann²⁾ allgemein an, daß ihm die Raumformel mit Trans-Stellung der Karboxylgruppen zuzuschreiben ist. Mit Hilfe der bekannten Van t'Hoff'schen Tetraedermodelle ist man hinlänglich zur Vorstellung gelangt, daß die freie Rotation um die die beiden Kohlenstoffatome verbindende Achse das ganze System in die einzige stabile Gleichgewichtslage bringt, oder höchstens oszillatorische Bewegungen um dieselbe zuläßt³⁾. Diese einzige fixierte Lagerung ist bei Bernsteinsäure, nach der Beweisführung Bethmanns, die Trans-Form (Fig. 1). Man kann mit gutem Grund annehmen, daß dies auch der Fall ist bei d-Weinsäure, Trauben-

1) d-Kampfersäure besitzt die Karboxyle in der Cis- und Isokampfersäure in der Trans-Stellung. Vgl. hierzu z. B. A. Stewart, Stereochemistry. London 1907, S. 145.

2) H. G. Bethmann, Über die Affinitätsgrößen einiger organischer Säuren und ihre Beziehungen zur Konstitution derselben. Zeitschr. f. physik. Chemie, 1890, S. 408.

3) J. Wislicenus, Über die räumliche Anordnung der Atome in organischen Molekülen. Abhandl. d. Kgl. sächs. Gesellsch. d. Wiss., Bd. XIV, 1887, S. 15.

säure¹⁾, Dibrombernsteinsäure, Isodibrombernsteinsäure²⁾, Itakonsäure³⁾, Korksäure³⁾, Sebazinsäure³⁾ und Glutarsäure³⁾, welche alle in der Tat auf die *Isoetes*-Samenfäden eine anlockende Wirkung ausüben. Die Länge der Kohlenstoffkette, wie man sieht, bleibt hier ohne wesentlichen Einfluß. Die Wirkungslosigkeit der übrigen, wahrscheinlich auch fumaroiden Dikarbonsäuren dürfte man vielleicht auf die größere Abweichung in struktureller Hinsicht zurückführen; so bei Zuckersäure und Schleimsäure auf die starke Anhäufung der OH-Gruppen, bei Asparaginsäure und Glutaminsäure auf die Anwesenheit der NH₂-Gruppe und die dadurch bedingte Eigenschaft als monobasische Säure, und ferner bei Terephthalsäure und

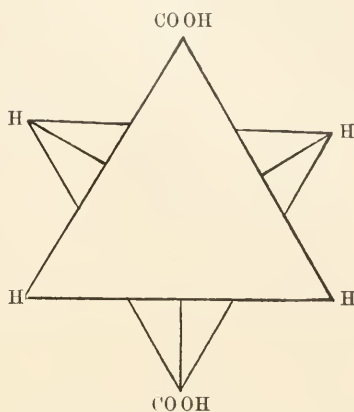


Fig. 1.

α -Truxillsäure auf ihren Besitz des Benzolkerns. Aus ähnlichem Grunde wirken auch einige maleinoide, d. h. die Karboxylgruppen in

1) Die die optische Isomerie bedingende Raumanordnung der Atome hat hierbei keine Bedeutung für die chemotaktische Wirkung, weil Traubensäure denselben Schwellenwert wie die d-Weinsäure aufweist.

2) Daß Isodibrombernsteinsäure, wenigstens in den wässerigen Lösungen, dieselbe Konfiguration bezüglich der Stellung der Karboxylgruppen wie Dibrombernsteinsäure zeigt, geht auch aus der Beobachtung P. Waldens hervor, daß die Bestimmung des Leitvermögens übereinstimmende Werte für beide Säuren ergibt. Vgl. hierzu P. Walden, Zeitschr. f. physik. Chemie, 1891, S. 471.

3) Die Trans-Stellung der Karboxyle in Molekülen von Itakonsäure, Korksäure, Sebazinsäure und Glutarsäure ergibt sich schon aus den kleinen Werten ihrer Affinitätskonstanten, wie es der Vergleich folgender Zahlen deutlich zeigt.

Die Trans-Säure	K	Die Cis-Säure	K
Bernsteinsäure	0,00665	Maleinsäure	1,17
Fumarsäure	0,093	Zitrakonsäure	0,340
Mesakonsäure	0,0794		
Itakonsäure	0,0120		
Korksäure	0,00311		
Sebazinsäure	0,00234		
Glutarsäure	0,00475		

Vgl. hierzu W. Ostwald, Über die Affinitätsgrößen organischer Säuren und ihre Beziehungen zur Zusammensetzung und Konstitution derselben. Zeitschr. f. physik. Chemie, 1889, S. 174; H. G. Bethmann, a. a. O., S. 401, 409; P. Walden, a. a. O., S. 502.

Cis-Stellung aufweisende Dikarbonsäuren nicht chemotaktisch auf die filicoiden Samenfäden; so z. B. d-Kampfersäure und Phthalsäure.

Eine sehr wichtige Frage erhebt sich nun: Wie und warum vermögen Äpfelsäure, Monobrombernsteinsäure und Mesoweinsäure auf die beiden Samenfäden-Arten, fumarophile sowohl wie maleinophile, einen chemotaktischen Reiz auszuüben? Unsere heutigen chemischen Kenntnisse über die Konfiguration der genannten Dikarbonsäuren sind noch nicht imstande, hierüber befriedigenden Aufschluß zu geben. Man könnte aber vielleicht die Schwierigkeit durch die Annahme mildern, daß bei Äpfelsäure die freie Rotation um die gemeinsame Achse beider Tetraeder eine beschränkte ist, und durch

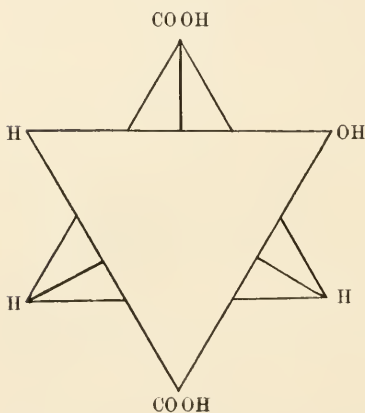


Fig. 2.

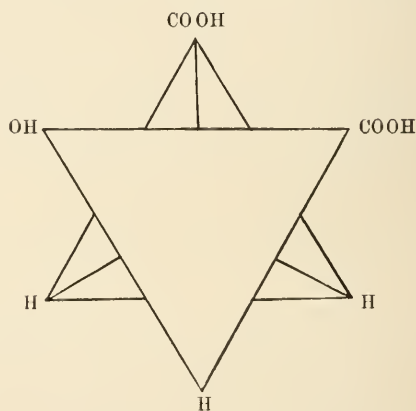


Fig. 3.

gegenseitige Beeinflussung der Radikale zweierlei Stabillage möglich sind, deren eine der Trans-Stellung (Fig. 2) und deren andere der Cis-Stellung der beiden Karboxylgruppen entspricht¹⁾. Wenigstens hat schon A b e r s o n²⁾ für die Crassulaceen-Äpfelsäure die beistehende Konfigurationsformel (Fig. 3) vorgeschlagen. Das Ebengesagte gilt ohne weiteres auch für Monobrombernsteinsäure, wobei Br an Stelle der OH-Gruppe in obiger Raumformel auftritt. Auch bei Mesoweinsäure erscheint die Feststellung der zwei stabilen Lagen, Trans- und Cis-Form, nicht unannehmbar, besonders nnter Zuhilfenahme

1) Es ist freilich nicht ausgeschlossen, daß diese oder jene Stabillage erst beim Kontakt mit der reizbaren Plasmastruktur der Samenfäden eingenommen wird.

2) J. H. Aberson, Ber. d. d. chem. Gesellsch., 1898, S. 1432.

der Bischoffschen dynamischen Theorie¹⁾. Wir wollen jedoch die hier aufgerollte Frage nicht weiter diskutieren und die gewünschte Aufklärung lieber der berufeneren Seite überlassen.

Nach vorliegender Tatsache kann man ferner darüber keine Entscheidung treffen, ob die *Equisetum*-Spermatozoiden den maleinophilen oder den fumarophilen anzureihen sind.

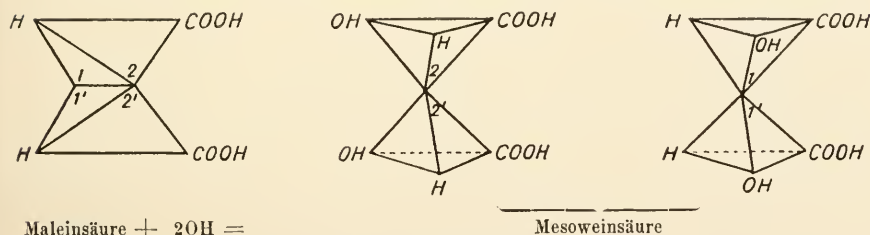
Von den Trikarbonsäuren sind Zitronensäure und Akonitsäure ohne jedwede Reizwirkung auf die untersuchten Spermatozoiden. Es ist indes sehr bemerkenswert, daß der Äthylen-trikarbonsäure, welche durch Substitution von einem H-Atom durch Karboxyl direkt von Bernsteinsäure ableitbar ist, noch eine chemotaktische Wirksamkeit auf die *Isoetes*-Samenfäden innewohnt.

Auf weitere biologische Schlußfolgerungen aus den in diesem Kapitel eruierten Verhältnissen werden wir noch später zurückkommen²⁾.

Kapitel 3. Die Reizwirkung der Metallionen.

Buller³⁾ fand, daß die Spermatozoiden einer Farnpflanze, *Gymnogramme Martensii*, positive Chemotaxis gegen verschiedene K- und Rb-Salze zeigen, und wußte als erster die Reizwirkung den

1) Die Oxydation der Maleinsäure zu Mesoweinsäure hat J. Wislicenus (Abh. d. Kgl. sächs. Gesells. d. Wiss. Bd. XIV, 1887, S. 35) im folgenden Bild dargestellt.



Andererseits hat P. Walden bei seiner Untersuchung der Affinitätskonstanten organischer Säuren (Zeitschr. f. physikal. Chemie, 1891, S. 471) wahrscheinlich ein Präparat von Mesoweinsäure mit Trans-Stellung der Karboxyle in der Hand gehabt. Er hat für Traubensäure wie ihre Spaltungsprodukte $K = 0,097$, für Mesoweinsäure $K = 0,060$ gefunden und sagte: „Der für die Anti (Meso)-Weinsäure ermittelte geringe Wert ($K = 0,060$) steht daher in Widerspruch mit der Annahme der Karboxyle dieser Säure in benachbarter Stellung.“ (Vergl. hierzu ferner Ostwald, Zeitschr. f. physikal. Chemie, 1889, S. 372 und Berthelot, Ann. chim. phys. (8) 23, 1891, S. 90).

2) Vergl. hierzu auch meine früheren Aufsätze: Jahrb. f. wiss. Botan., Bd. XLI, 1905, S. 604; Bot. Mag. Tokyo, Vol. XIX, 1905, S. 40; ebenda S. 82.

3) R. Buller, Contributions to our Knowledge of the Physiology of the Spermatozoa of Ferns. Ann. of Bot., Vol. XIV, 1900, S. 543.

Metallionen K und Rb zuzuschreiben. Nachdem schon früher von Pfeffer¹⁾ die Anlockung einiger Spaltpilze und Flagellaten durch gewisse Metallsalze beschrieben worden war, konnte neulich Kniep²⁾ für seinen *Bacillus z* und *Spirillum rubrum* die chemotaktische Wirkung des NH_4 - resp. Ca-Jons nebst der einiger Anionen klarstellen. In einer allerneuesten Arbeit hat Åkerman³⁾ nachgewiesen, daß die Spermatozoiden von *Marchantia*, die nach Lidforss auf Proteinstoffe proschemotaktisch reagieren, auch von K-, Rb- und Cs-Jonen angelockt werden.

In meiner vorläufigen Mitteilung⁴⁾ wurde bereits angegeben, daß die *Salvinia*-Samenfäden von den Ca- und Sr-Jonen topotaktisch angelockt werden. Diesbezügliche Versuchsergebnisse sind in folgender Tabelle zusammengestellt.

Salz	Konzentration in Mol								
	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{2}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{200}$	$\frac{1}{500}$	$\frac{1}{1000}$	$\frac{1}{2000}$
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$				$a_3 r_1$	a_3	a_2	a_2	a_1	0
CaCl_2	$a_3 r_3$	$a_3 r_2$	$a_3 r_1$	$a_3 r_1$	a_3	a_2	a_2	a_1	0
$\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$	$a_3 r_3$	$a_3 r_2$	$a_3 r_1$	$a_3 r_1$	a_2	a_1	0	.	
SrCl_2				$a_3 r_1$	a_2	a_1	0		
$\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$				?	0				
BaCl_2				?	0				

Daß diese Reaktion auf typischer Topotaxis beruht, geht aus dem Verhalten der nach der Kapillarmündung hinsteuernenden Samenfäden unzweideutig hervor. In höheren Konzentrationen macht sich die Repulsion bemerklich, die in obiger Tabelle mit den Buchstaben r_3 — r_1 bezeichnet wird. Bei einer 1 Mol-Lösung von $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ usw. bleibt also ein lebhaftes Getümmel der Samenfäden um die Kapillarmündung lange Zeit bestehen, während das Einschwärmen in einer $\frac{1}{10}$ -Mol-Lösung schon nach einigem Hin- und Herschießen stattfindet. Bei $\frac{1}{50}$ — $\frac{1}{200}$ Mol- $\text{CaH}_4(\text{PO}_4)_2$ -Lö-

1) W. Pfeffer, Über die chemotaktischen Bewegungen von Bakterien, Flagellaten und Volvocineen. Unters. a. d. bot. Inst. Tübingen, Bd. II, 1888, S. 606 ff.

2) H. Kniep, Untersuchungen über die Chemotaxis von Bakterien. Jahrb. f. wiss. Bot., Bd. XLIII, 1906, S. 229, 249.

3) Å. Åkerman, Über die Chemotaxis der *Marchantia*-Spermatozoiden. Zeitschr. f. Bot., Bd. II, 1910, S. 94.

4) K. Shibata, Studien über die Chemotaxis der *Salvinia*-Spermatozoiden. V. M. Bot. Mag. Tokyo, Vol. XIX, 1905, S. 41.

sungen ist die Repulsion so stark, daß die reichlich angelockten Samenfäden nicht tiefer in die Kapillare einzudringen vermögen. Die gesättigte Lösung von CaSO_4 (ca. $\frac{1}{50}$ -Mol) bietet auch eine Attraktion nebst gewisser Repulsion. Immerhin stört die vorhandene Abstoßung in keiner Weise die Erkennung der positiven Reaktion.

Die Experimente mit den $\frac{1}{10}$ — $\frac{1}{1000}$ Mol-Lösungen der nachfolgend angegebenen Metallsalze fielen durchaus negativ aus, so daß man in vollem Maße berechtigt ist, für die besagte Reizwirkung Ca- und Sr-Ionen allein verantwortlich zu machen.

KCl, KBr, KI, K_2SO_4 , KNO_3 , RbCl, Rb_2SO_4 , CsCl, NaCl, NaF, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, Na_2SO_4 , Na_2HPO_4 , $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, NaOH, LiNO_3 , NH_4Cl , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, NH_4OH , MgSO_4 , BeSO_4 , ZnSO_4 , CdSO_4 , HgCl_2 , CuSO_4 , AgNO_3 , AuCl_3 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, $\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2$, MnSO_4 , FeSO_4 , CoCl_2 , NiSO_4 , PtCl_4 .

Ca- und Sr-Ionen üben ferner eine eigentümliche Einwirkung auf den Spermatozoidenkörper aus; nachdem die Samenfäden mehr oder minder tief in die Kapillare, die $\frac{1}{200}$ Mol- oder noch konzentriertere Lösungen von Ca- und Sr-Salzen enthalten, gegangen sind, werden sie plötzlich an der inneren Wandung des Röhrchens verklebt und an weiterer Ortsbewegung verhindert¹⁾, aber die lebhaften Zilienschwingungen pflegen noch mehrere Minuten lang fortzudauern. Es handelt sich hierbei sehr wahrscheinlich um eine chemische Veränderung der äußeren Plasmahaut der Samenfädenkörper. Im allgemeinen wirken einfache Salzlösungen nachteilig auf das Leben der Spermatozoiden, wie es neulich von Osterhout u. a. für verschiedene pflanzliche Objekte nachgewiesen wurde. Ich habe schon früher beobachtet, daß die schädliche Wirkung der einwertigen Kationen auf die *Isoetes*-Samenfäden durch die zweiwertigen Metallionen in gewissem Grade antagonisiert wird²⁾. Aber in vorliegendem Falle blieben die Versuche, die bewegungshemmende Wirkung der Ca- und Sr-Ionen durch Na-Zusatz aufzuheben, stets ohne Erfolg.

Während die Samenfäden von *Gymnogramme sulfurea* Desv. durch K- und Rb-Ionen, genau wie im Bullerschen Falle, an-

1) Eine ähnliche Erscheinung wurde von W. Rothert (Beobachtungen und Betrachtungen über taktische Reizerscheinungen. Flora, Bd. 88, 1901, S. 374) bei den *Saprolegnia*-Schwämmern beobachtet, welche in der Fleischextraktlösung mehr oder weniger schnell zur Ruhe kommen. Er erblickt darin eine besondere Reizbarkeit, die als Chemo-kinesis benannt wird.

2) K. Shibata, Jahrb. f. wiss. Bot., Bd. XLI, 1905, S. 599.

gelockt werden, reagieren die *Osmunda*-Spermatozoiden¹⁾, in Übereinstimmung mit *Salvinia*, anschließend auf Ca- und Sr-Ionen. Unter zahlreichen untersuchten Metallsalzen wurde die positive Reaktion nur bei Ca- und Sr-Salzen erzielt. Die Reizwirkung der Ba-Ionen bleibt auch hier zweifelhaft, wegen ausgesprochener Repulsion.

Salz	Konzentration in Mol				
	1/10	1/100	1/200	1/500	1/1000
CaCl ₂	a ₃ r ₁	a ₃	a ₂	a ₁	0
SrCl ₂	a ₃ r ₁	a ₂	a ₁	0	
Ba(NO ₃) ₂	?	0			

Die Sistierung der Lokomotion in der konzentrierteren Kapillarflüssigkeit tritt auch in diesen Fällen sehr bald ein.

Es ist sehr merkwürdig, daß den im periodischen System eng miteinander verknüpften Elementen, den sogen. homologen, dieselbe Reizwirkung zukommt, was sich im Verhalten von K und Rb gegen *Gymnogramme* und von Ca und Sr gegen *Osmunda* und *Salvinia* ganz deutlich offenbart.

Die eben besagten Verhältnisse treten auch beim Studium von positiver Chemotaxis der *Equisetum*-Spermatozoiden in schlagendster Weise hervor. Die nebenstehende Tabelle enthält die Ergebnisse diesbezüglicher Experimente.

In dieser Tabelle steht a₁ für die Schwellen-Reaktion und sind auch jeweilige Repulsivwirkungen mit den Buchstaben r₃—r₁ gekennzeichnet, um das Bild der chemotaktischen Reaktion zu vervollständigen. Je nach der Stärke der Repulsion entsteht ein mehr oder minder lang andauerndes lebhaftes Getümmel der angelockten Samenfäden außerhalb oder innerhalb der Kapillarmündung, und wenn es nur eine schwache Apochemotaxis (r₁) gibt, so finden die Samenfäden ihren Weg tiefer in die Kapillare ohne vieles Zögern. Bei einigen stark giftigen Schwermetallsalzlösungen ist die Erkennung der positiven Reaktion dadurch sehr erschwert, daß die sicherlich nach dem Kapillarmund zueilenden Samenfäden schon in einiger Entfernung vor demselben dem Tode erliegen.

Die nachfolgend angeführten Metallsalze wurden nach ihrer anlockenden Wirkung auf die *Equisetum*-Samenfäden ganz ohne Erfolg untersucht.

1) *Osmunda javanica* Bl.

Salz	Konzentration in Mol													
	1	1/2	1/10	1/10	1/20	1/50	1/100	1/200	1/500	1/1000	1/2000	1/5000	1/10000	1/20000
NaCl	a ₃ r ₃	a ₃ r ₃	a ₃ r ₂	a ₂ r ₁	a ₂ -1	a ₁	0							
NaBr			a ₃ r ₂	a ₂ r ₁	a ₂ -1	a ₁	0							
NaF				a ₂ r ₃		a ₁ r ₁	0							
Na ₂ SO ₄				a ₃ r ₃		a ₁	?	0						
LiCl				a ₃ r ₁	a ₂	a ₂ -1	a ₁	0						
LiNO ₃			a ₃ r ₂	a ₃ r ₁	a ₂	a ₂ -1	a ₁	0						
CaCl ₂				a ₃ r ₃			a ₃ r ₂			a ₃ r ₁		a ₂ -1	a ₁	0
CaSO ₄									a ₃ r ₂			a ₂ -1	a ₁	0
Ca(NO ₃) ₂		a ₃ r ₃	a ₃ r ₃	a ₃ r ₂			a ₃ r ₂	a ₃ r ₁		a ₃		a ₂	a ₁	0
CaH ₄ (PO ₄) ₂										a ₃ r ₂			a ₂ r ₁	
Ca(OH) ₂								a ₃ r ₃		a ₃ r ₃				
SrCl ₂				a ₃ r ₁			a ₃			a ₃				
Sr(NO ₃) ₂												a ₁	0	
BaCl ₂			a ₃ r ₃	a ₂ r ₃			a ₂ r ₃			a ₁ r ₂	0			
Ba(NO ₃) ₂										a ₁ r ₂	0			
MgCl ₂				a ₃ r ₃			a ₃ r ₂			a ₁ r ₁	0			
MgSO ₄						a ₃ r ₃	a ₃ r ₂			a ₁ r ₁	0			
BeCl ₂				a ₃ r ₃			a ₂ r ₂			?	0			
BeSO ₄					a ₃ r ₃			a ₂ r ₁	a ₂ -1	?	0			
ZnSO ₄				a ₂ r ₃		a ₂ r ₃	a ₁ r ₃	0						
CdSO ₄				a ₁ r ₃		a ₁ r ₃	?	0						
HgCl ₂							?	0						
CuSO ₄							a ₂ r ₃	a ₁ r ₃	0					
AgNO ₃							a ₁ r ₃	0						
AuCl ₃							a ₁ r ₃	0						

KCl, KI, KBr, K₂SO₄, KNO₃, K₃AsO₂, KCSN, RbCl, Rb₂SO₄, CsCl, NH₄Cl, (NH₄)₂SO₄, NH₄NO₃, (NH₄)₂HPO₄, NH₄OH, (NH₄)₂MoO₄, AlSO₄, SnCl₂, Pb(C₂H₃O₂)₂, UO₂(C₂H₃O₂)₂, MnSO₄, FeSO₄, CoCl₂, NiSO₄, PtCl₄.

Hieraus folgt ohne weiteres, daß es bei der topotaktischen Reizwirkung der in obiger Tabelle dargestellten Verbindungen allein auf die betreffenden Kationen ankommt. Die wirksamen Kationen gehören alles in allem der 1. und 2. Vertikalreihe des periodischen Systems an. Ordnet man nun dieselben nach ihrer natürlichen Verwandtschaft und in der Reihenfolge des Atomgewichts, so erhält man folgende Serien. Neben jedem Elemente sind die Schwellenwerte, ausgedrückt in Mol, angegeben.

(I)	Li (1/100)	Na (1/50)	
(II)	Cu (1/200)	Ag (1/100)	Au (1/100)

(III)	Ca ($1/10\,000$)	Sr ($1/5\,000$)	Ba ($1/1\,000$)
(IV)	Be ($1/1\,000?$)	Mg ($1/1\,000$)	
(V)	Zn ($1/100$)	Cd ($1/50$)	Hg (?)

Die homologen Elemente ähneln sich, wie man sieht, in ihrer Wirkung; so sind vor allem die hohen Reizwerte der Ca-Gruppe sehr auffallend. In jeder Serie bemerkt man, daß die anlockende Wirkung, nach den Schwellenwerten beurteilt, mit steigenden Atomgewichten abnimmt, dagegen ist die Repulsion immer ausgesprochener bei schwereren Elementen. Beachtenswert ist ferner das Verhalten der Elemente der sogen. 1. Nebenreihe, K, Rb und Cs, welche hier gar nicht anlockend wirken, sondern eine bedeutende Repulsivwirkung zeigen, wovon später noch die Rede sein werde. Vor allen Dingen ist der hier zutage tretende Zusammenhang zwischen den periodischen Eigenschaften und Reizwirkung der Elemente von bedeutendem physiologischem Interesse.

Die plötzliche Aufhebung der Ortsbewegung der Samenfäden durch das Verkleben an die Kapillarwandung wurde auch hier bei den über $1/100$ Mol-Lösungen von Ca- und Sr-Salzen beobachtet, wobei jedoch die andauernden Zilienschwingungen verraten, daß die Lösungen nicht so schnell tödlich wirken. Es scheint die besagte Wirkung den Ba-Salzlösungen abzugehen, weil die Spermatozoiden darin mehrere Minuten lang lebhaft beweglich bleiben. Im allgemeinen wirken die reinen Salzlösungen mehr oder minder toxisch auf die Samenfäden, die in Kapillarflüssigkeiten mit $1/10$ — $1/100$ Mol-Na-, Li- und Mg-Salze gewöhnlich nur 15—20 Minuten lang fortkommen können und sich dabei zu blasenartigem Gebilde verwandeln.

Kapitel 4. Die Reizwirkung der H- und OH-Ionen.

In meiner früheren Arbeit über die Chemotaxis der *Isoetes*-Samenfäden¹⁾ habe ich zuerst experimentell bewiesen, daß die H- und OH-Ionen auf die Spermatozoiden apochemotaktische Reizwirkung ausüben, wie es schon von Pfeffer vermutet wurde.

Bei Ausdehnung dieser Beobachtung auf die *Equisetum*-Spermatozoiden stieß ich auf die sehr interessante Tatsache, daß hierbei H-Ionen nicht nur abstoßend, sondern in bestimmten Konzentrationen

1) K. Shibata, Studien über die Chemotaxis der *Isoetes*-Spermatozoiden. Jahrb. f. wiss. Bot., Bd. XLI, 1905, S. 577.

auch topotaktisch anlockend wirken¹⁾). Bald darauf konnte ich bei *Salvinia*-Samenfäden dieselbe Erscheinung feststellen. Zwar kann man schon nach den Schriften von Jennings und Moore²⁾ u. a. schließen, daß bei Infusorien die Ansammlung im sauren Medium auf der Reizwirkung der H-Ionen beruht. Neuerdings hat Kusano³⁾ sehr eingehend begründet, daß die positive Chemotaxis der Myxomyceten-Schwärmsporen einzig und allein durch H-Ionen bewirkt wird. Doch geschieht in diesen genannten Fällen die Aufsuchung der optimalen Konzentrationen der H-Ionen seitens der Mikroorganismen durch eine wesentlich andere Reaktionsweise als bei den Samenfäden, i. e. durch Phobotaxis, wie man es heute nach Pfeffer allgemein heißt.

Zunächst soll hier die Zusammenstellung einiger diesbezüglicher Versuchsergebnisse Platz finden.

Säure	Konzentration in Mol	Spermatozoiden	
		<i>Equisetum</i>	<i>Salvinia</i>
HCl	$\frac{1}{100}$	$a_2 r_3$	
	$\frac{1}{200}$	$a_2 r_3$	$a_2 r_3$
	$\frac{1}{500}$	$a_1 r_3$	$a_{2-1} r_2$
	$\frac{1}{1000}$	0	$a_1 r_2$
	$\frac{1}{2000}$		0
HNO ₂	$\frac{1}{100}$	$a_2 r_3$	
	$\frac{1}{200}$	$a_2 r_3$	$a_2 r_3$
	$\frac{1}{500}$	$a_1 r_2$	$a_2 r_2$
	$\frac{1}{1000}$	0	$a_1 r_2$
	$\frac{1}{2000}$		0
H ₂ SO ₄	$\frac{1}{200}$	$a_2 r_3$	
	$\frac{1}{500}$	$a_2 r_3$	$a_2 r_3$
	$\frac{1}{1000}$	$a_1 r_2$	$a_{2-1} r_2$
	$\frac{1}{2000}$	0	$a_1 r_2$
	$\frac{1}{5000}$		0
COOH COOH	$\frac{1}{200}$	$a_{3-2} r_3$	
	$\frac{1}{500}$	$a_2 r_2$	$a_2 r_3$
	$\frac{1}{1000}$	$a_1 r_2$	$a_1 r_2$
	$\frac{1}{2000}$	0	$a_1 r_2$
	$\frac{1}{5000}$		0

1) K. Shibata, Weitere Mitteilung über die Chemotaxis der *Equisetum*-Spermatozoiden. Bot. Mag. Tokyo, Vol. XIX, 1905, S. 128.

2) H. C. Jennings and E. M. Moore, On the reactions of Infusoria to carbonic and other acids, with special reference to the causes of the gatherings spontaneously formed. Amer. Journ. Physiol., Vol. VI, 1902, S. 233.

3) S. Kusano, Studies of the chemotactic and other related reactions of the swarmspores of Myxomycetes. Journ. Coll. Agr. Imp. Univ. Tokyo, Vol. II, 1909, S. 27.

Da die Anionen Cl , NO_3 , SO_4 und $(\text{COO})_2$, wie wir schon sahen, keine Anlockung bewirken, so ist klar, daß man es hier mit der Reizwirkung der H -Ionen zu tun hat.

Die Erkennung der positiven Chemotaxis gegen die H -Ionen ist indes dadurch sehr erschwert, daß die Abstoßung an der Kapillarmündung schon bei den Schwellenkonzentrationen für die Anlockung ziemlich ansehnlich ist. Um einige konkrete Beispiele anzuführen, verläuft das Bild der Reaktion bei *Equisetum*-Samenfäden etwa folgendermaßen:

$1/100$ Mol- H_2SO_4 . Repulsion sehr stark. Weite Strecke vor dem Kapillarmund bleibt frei von Samenfäden.

$1/200$ Mol- H_2SO_4 . Die von Ferne angelockten Samenfäden prallen am Kapillarmund pünktlich zurück. Erst nach 5 Min. bilden sie dort eine Ansammlung.

$1/500$ Mol- H_2SO_4 . Baldige Ansammlung der Samenfäden um die Kapillarmündung; erst nach 15 Min. drängt sich das lebhafte Getümmel in die Kapillare hinein. Etwa 20 bis 30 Min. lang darin beweglich.

$1/1000$ Mol- H_2SO_4 . Eine sichtbare Anlockung. Eindringen in die Kapillare nach vielem Zögern. Bleiben lebendig ziemlich lang.

$1/2000$ Mol- H_2SO_4 . Keine positive Reaktion mehr bemerklich.

Noch einige weitere Beispiele zu erwähnen:

$1/10$ — $1/20$ Mol-Essigsäure: Zahlreiche Samenfäden steuern nach dem Kapillarmund hin, sterben aber vor demselben.

$1/100$ Milchsäure. Vielfaches Anprallen am Kapillarmund. Dort ein vorübergehendes Getümmel.

Die positive Chemotaxis der *Salvinia*-Samenfäden gegen die H -Ionen ist im allgemeinen minder auffallend als bei *Equisetum*, dennoch wurden die Schwellenwerte etwas niedriger gefunden.

Nicht bloß die freien Säuren, sondern auch jede Verbindung, die in wässriger Lösung H -Ionen abdissoziiert, wirkt anlockend auf diese Sämenfäden, und es ist dringend geboten, bei Untersuchung der chemotaktischen Wirksamkeit eines Körpers immer auf diesen Punkt Rücksicht zu nehmen.

Ob auch den Farn-Samenfäden eine nennenswerte Reaktionsfähigkeit gegen H -Ionen zukomme, kann ich nicht mit Bestimmtheit sagen; die einschlägigen Versuche mit den *Osmunda*-Spermatozoiden ergaben zunächst nur ein negatives Resultat.

Dagegen kann ich entschieden behaupten, daß die Samenfäden von *Isoetes* von H-Ionen nicht im geringsten prochemotaktisch gereizt werden. An dessen Stelle tritt hier in ungeahnter Weise die positive Reaktion gegen die OH-Ionen auf, wovon in meiner früheren Publikation noch keine Erwähnung getan wurde. Die Grade der Anlockung durch verschiedene Laugen und alkalisch reagierende Lösungen sind in folgender Tabelle angegeben.

Stoff	Konzentration in Mol								
	1/100	1/200	1/500	1/1000	1/2000	1/5000	1/10000	1/20000	1/40000
KOH	a ₃ r ₂	a ₃ r ₁	a ₃ r ₁	a ₃ —2	a ₂	a ₂ —1	a ₁	0	
NaOH	a ₃ r ₂	a ₃ r ₁	a ₃ r ₁	a ₃ —2	a ₂	a ₁	a ₁ —?	0	
NH ₄ OH	a ₃ r ₃	a ₃ r ₂	a ₃ r ₁	a ₂	a ₁	0			
Ca(OH) ₂	a ₃ r ₂			a ₃ r ₁			a ₁	?	0
Ba(OH) ₂	a ₃ r ₂			a ₃ r ₁			a ₂ —1	a ₁	0
Na ₂ CO ₃	a ₃ r ₂	a ₃ r ₁		a ₂		a ₂ —1	a ₁	0	
K ₂ HPO ₄	a ₃ r ₂	a ₃ r ₁	a ₃	a ₂	a ₂	a ₁	0		
NaF	a ₂ r ₁	a ₁	0						
KCN	a ₃ r ₃			a ₁	?	0			

Wie aus obiger Zusammenstellung ersichtlich, ist die Reizwirkung der alkalischen Lösungen ziemlich ansehnlich. Da die Kationen überhaupt für *Isoetes*-Samenfäden wirkungslos sind¹⁾, so bleibt nichts übrig, als anzunehmen, daß die anlockende Wirkung nur auf Rechnung der OH-Ionen zu setzen ist. Die vier zuletzt angeführten Stoffe in der obigen Tabelle dissoziieren bekanntlich durch Hydrolyse reichlich OH-Ionen ab, die die besagten Reizeffekte hervorbringen. In den mit Laugen gefüllten Kapillaren sterben die Samenfäden ziemlich rasch mit aufgequollenen Körpern ab.

Die positive Chemotaxis gegen OH-Ionen beschränkt sich meines Erachtens bisher nur auf ein paar verdächtige Fälle; ich erinnere an die Beobachtung von Dewitz²⁾, daß die Samenfäden von der Küchenschabe, *Periplaneta orientalis*, durch die KOH-Lösung angelockt werden.

Immerhin sehr merkwürdig ist die Tatsache, daß die Samenfäden von *Isoetes* einerseits und von *Equisetum* und *Salvinia* andererseits in ihrem Verhalten gegen H- und OH-Ionen so schroff kontrastieren.

1) K. Shibata, Jahrb. f. wiss. Botan., Bd. XLI, 1905, S. 569.

2) Archiv f. ges. Physiol., Bd XXXVII, 1885, S. 222—223. Vgl. hierzu auch: O. Loew, Die Chemotaxis der Spermatozoen im weiblichen Genitaltrakt. Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wiss. Wien, math.-naturw. Kl., Bd. CXI, Abt. 3, 1902. (Säugetiere.)

Kapitel 5. Die Reizwirkung der Alkaloide und der anderen organischen Basen.

Den Pflanzenalkaloiden kommt bekanntlich eine eminente Bedeutung in pharmakologischer und toxikologischer Hinsicht zu, und ihre mannigfaltigen physiologischen Einwirkungen auf den Tierorganismus werden immer noch eifrig erforscht. In ganz unerwarteter Weise stellte sich nun beim Studium der Chemotaxis der Pteridophyten-Spermatozoiden heraus, daß auf dieselben die Alkaloide eine zum Teil hervorragende spezifische Reizwirkung ausüben. Die positive Chemotaxis gegen Alkaloide habe ich zuerst bei *Equisetum*¹⁾ beobachtet und bald darauf auch bei den übrigen, von mir untersuchten Gefäßkryptogamen. Die Experimente wurden fast ausschließlich mit den leicht löslichen Alkaloidsalzen ausgeführt. Reagierten die Lösungen sauer oder alkalisch, so mußten sie nötigenfalls durch Zusatz von Ammoniak resp. entsprechenden Säuren vorsichtig neutralisiert werden²⁾, womit man die Reizwirkung der H- oder OH-Ionen³⁾ ausschalten kann. Um vollkommene Sicherheit in diesem letzten Punkte zu erlangen, habe ich weiter die gewonnenen Resultate jedesmal bei geringem Überschuß von H-Ionen⁴⁾ für *Isoetes*-Samenfäden und von OH-Ionen⁵⁾ für *Salvinia*- und *Equisetum*-Spermatozoiden kontrolliert und immer bestätigt gefunden.

Zunächst sollen die diesbezüglichen Versuchsergebnisse tabellarisch zusammengestellt werden.

Alkaloidsalz	Konzentration in Mol	Spermatozoiden von		
		<i>Equisetum</i>	<i>Salvinia</i>	<i>Isoetes</i>
Koniinhydrochlorid	$\frac{1}{10}$		$a_2 r$	$a_2 r$
	$\frac{1}{20}$		a_2	a_1
	$\frac{1}{50}$	$a_2 r$	$a_2 - 1$	0
	$\frac{1}{100}$	a_1	?	
	$\frac{1}{200}$	?—0	0	

1) K. Shibata, Weitere Mitteilung über die Chemotaxis der *Equisetum*-Spermatozoiden. Bot. Mag. Tokyo, Vol XIX, 1905, S. 130.

2) Diese Prozedur machte bisweilen die Lösungen mehr oder minder trüb, wegen teilweiser Ausfällung der freien Basen. Dadurch aber entstand keine nennenswerte Störung des Versuchs bis auf einzelne Fälle.

3) d. h. die im vorhergehenden Kapitel erörterte, anlockende Wirkung der H-Ionen auf *Salvinia*- und *Equisetum*-Spermatozoiden und der OH-Ionen auf *Isoetes*-Spermatozoiden.

4) bezw. bei natürlicher Azidität der Lösungen.

5) bezw. bei natürlicher Alkalinität.

Alkaloidsalz ¹⁾	Konzentration in Mol	Spermatozoiden von		
		<i>Equisetum</i>	<i>Salvinia</i>	<i>Isoetes</i>
Piperin	Gesättigt in 10 Mol-Alkohol	0	0	a ₂ —1
Nikotinhydrochlorid	1/10	0	a ₁ —?	a ₃ r
	1/50		0	
	1/100			a ₂
	1/200			a ₁
	1/500			0
Sparteinsulfat	1/10	0	0	a ₃ r
	1/20			a ₃ r
	1/50			a ₃
	1/100			a ₂
	1/200			a ₁
	1/500			0
Atropinsulfat	1/10	a ₃ r ²⁾	a ₃ r	a ₃ r
	1/50		a ₂	a ₃
	1/100	a ₂	a ₂ —1	a ₃ —2
	1/200	a ₁	0	a ₂
	1/500	?		a ₁
	1/1000	0		0
Skopolaminsulfat	1/10	a ₂ r	a ₂ r	a ₃ r
	1/50	a ₁	a ₁ —?	a ₂
	1/100	?	0	a ₁
	1/200	0		0
Kokainhydrochlorid	1/10	a ₃	a ₃	0
	1/20		a ₂	
	1/50	a ₃ —2	a ₁	
	1/100	a ₂	?—0	
	1/200	a ₁	0	
	1/1000	0		
Pilokarpinhydrochlorid	1/10	0	0	0
	1/50			
	1/100			
Chininhydrochlorid	1/20	a ₃ r	a ₃ r	a ₃ r
	1/100	a ₃ —2	a ₃	a ₃
	1/200	a ₂	a ₃ —2	a ₂

1) Die mehr oder minder sicher gestellten Konstitutionsformeln der Alkaloide wurden hier, wegen des Raummangels, nicht angeführt. Vergl. dazu die bekannten Handbücher, z. B. Pictet-Wolfenstein, Die Pflanzenalkaloide (1900); Czapek, Biochemie d. Pflanzen, Bd. II (1905); Österle, Pharmakochemie (1909); Winterstein und Trier, Die Alkaloide (1910).

2) Die Repulsivwirkungen, welche hierbei im allgemeinen minder scharf hervortreten, sind überall mit dem Buchstaben r bezeichnet.

Alkaloidsalz	Konzentration in Mol	Spermatozoiden von		
		<i>Equisetum</i>	<i>Salvinia</i>	<i>Isoetes</i>
Chininhydrochlorid	$\frac{1}{500}$	a ₂	a ₂	a ₂
	$\frac{1}{1000}$	a ₁	a ₁	a ₁
	$\frac{1}{2000}$	0	0	?—0
Chinidinhydrochlorid	$\frac{1}{20}$	a ₃ r	a ₃ r	a ₃ r
	$\frac{1}{50}$	a ₃		
	$\frac{1}{100}$	a ₃ —2	a ₃	a ₃
	$\frac{1}{200}$	a ₂	a ₂	a ₂
	$\frac{1}{500}$	a ₂	a ₂	a ₂
	$\frac{1}{1000}$	a ₁	a ₁	a ₁
	$\frac{1}{2000}$	0	0	0
Cinchoninhydrochlorid	$\frac{1}{20}$	a ₃ r	a ₃ r	a ₃ r
	$\frac{1}{50}$	a ₃	a ₃	a ₂ —1
	$\frac{1}{100}$	a ₂	a ₂	?
	$\frac{1}{200}$	a ₂	a ₁ —?	0
	$\frac{1}{500}$	a ₁ —?	0	
	$\frac{1}{1000}$	0		
Strychninnitrat	$\frac{1}{20}$	a ₃	a ₃ r	a ₃ r
	$\frac{1}{50}$		a ₃	a ₂
	$\frac{1}{100}$	a ₃	a ₂	a ₁
	$\frac{1}{200}$	a ₂	a ₂ —1	0
	$\frac{1}{500}$	a ₁	a ₁ —?	
	$\frac{1}{1000}$	0	0	
Bruzinhydrochlorid	$\frac{1}{10}$	a ₃ r	a ₃ r	a ₃ r
	$\frac{1}{50}$	a ₂	a ₂	a ₃
	$\frac{1}{100}$	a ₁	a ₂ —1	a ₃
	$\frac{1}{200}$	0	a ₁ —?	a ₃
	$\frac{1}{500}$		0	a ₂
	$\frac{1}{1000}$			a ₁
	$\frac{1}{2000}$			0
Papaverinhydrochlorid	$\frac{1}{20}$	0	0	a ₃ r
	$\frac{1}{100}$			a ₂ r
	$\frac{1}{200}$			a ₁ —?
Narkotinhydrochlorid	$\frac{1}{50}$	0	0	a ₂ r
	$\frac{1}{100}$			a ₁
	$\frac{1}{200}$			0
Hydrastinhydrochlorid	$\frac{1}{10}$	0	0	a ₃ r
	$\frac{1}{50}$			a ₂
	$\frac{1}{100}$			a ₁
	$\frac{1}{200}$			0

Alkaloidsalz	Konzentration in Mol	Spermatozoiden von		
		<i>Equisetum</i>	<i>Salvinia</i>	<i>Isoetes</i>
Berberinsulfat	$\frac{1}{20}$	0	0	a ₂ r
	$\frac{1}{50}$			a ₂ r
	$\frac{1}{100}$			a ₂
	$\frac{1}{200}$			a ₁
	$\frac{1}{500}$			0
Narzeinhydrochlorid	$\frac{1}{20}$	0	0	0
	$\frac{1}{50}$			
	$\frac{1}{100}$			
Narzeinnatrium	$\frac{1}{20}$	×	0	0
	$\frac{1}{50}$			
	$\frac{1}{100}$			
Morphinhydrochlorid	$\frac{1}{10}$	a ₃ r	a ₃ r	a ₁ —?
	$\frac{1}{20}$	a ₃	a ₂	?
	$\frac{1}{50}$	a ₂	a ₁	0
	$\frac{1}{100}$	a ₂ —1	0	
	$\frac{1}{200}$	a ₁ —?		
	$\frac{1}{1000}$	0		
Kodeinphosphat	$\frac{1}{10}$	0	a ₁ r—?	a ₂ r
	$\frac{1}{20}$		0	
	$\frac{1}{50}$			a ₂ —1
	$\frac{1}{100}$			?
	$\frac{1}{200}$			0
Thebainhydrochlorid	$\frac{1}{50}$	0	0	a ₂ r
	$\frac{1}{100}$			a ₂
	$\frac{1}{200}$			a ₁
	$\frac{1}{1000}$			0
Apomorphinhydrochlorid	$\frac{1}{10}$	?	a ₃	0
	$\frac{1}{50}$	0	a ₂	
	$\frac{1}{100}$		a ₂	
	$\frac{1}{200}$		a ₁	
	$\frac{1}{500}$		0	
Diazetylmorphinhydrochlorid	$\frac{1}{10}$	a ₂	a ₃ r	a ₃ r
	$\frac{1}{20}$	a ₁	a ₂	a ₃
	$\frac{1}{50}$	0	a ₁	a ₂
	$\frac{1}{100}$		?	a ₂
	$\frac{1}{200}$		0	a ₁
	$\frac{1}{500}$			0
Äthylmorphinhydrochlorid	$\frac{1}{10}$	a ₂	a ₃ r	a ₃ r
	$\frac{1}{20}$	a ₁	a ₂	
	$\frac{1}{50}$	0	a ₁	a ₂
	$\frac{1}{100}$		?	a ₁
	$\frac{1}{200}$		0	0

Alkaloidsalz	Konzentration in Mol	Spermatozoiden von		
		<i>Equisetum</i>	<i>Salvinia</i>	<i>Isoetes</i>
Akonitinhydrochlorid	$\frac{1}{50}$	a ₃ -2	a ₂	a ₂
	$\frac{1}{100}$	a ₂ -1	a ₁	a ₁
	$\frac{1}{200}$	a ₁ -?	?	?
Chelidoninsulfat	$\frac{1}{20}$	0	0	0
	$\frac{1}{50}$			
	$\frac{1}{100}$			
Kolchizin	$\frac{1}{20}$	0	0	a ₂
	$\frac{1}{50}$			a ₁
	$\frac{1}{100}$			0
Delphininhydrochlorid	$\frac{1}{20}$	a ₃ r	a ₃ r	a ₂ r
	$\frac{1}{50}$	a ₁	a ₃	a ₂
	$\frac{1}{100}$	a ₂	a ₂	a ₁
	$\frac{1}{200}$	a ₂	a ₂	0
	$\frac{1}{500}$	a ₁	a ₁	
	$\frac{1}{1000}$	0	0	
Emetinhydrochlorid	$\frac{1}{20}$	a ₃ r	a ₃ r	a ₃ r
	$\frac{1}{50}$	a ₃ r	a ₃	a ₃
	$\frac{1}{100}$	a ₃ -2	a ₂	a ₃
	$\frac{1}{200}$	a ₂	a ₂ -1	a ₂
	$\frac{1}{500}$	a ₁	a ₁ -?	a ₂ -1
	$\frac{1}{1000}$	0	0	a ₁ -?
Ephedrinhydrochlorid	$\frac{1}{10}$	a ₃	a ₃	0
	$\frac{1}{20}$	a ₃	a ₂	
	$\frac{1}{50}$		a ₁	
	$\frac{1}{100}$	a ₂ -1	0	
	$\frac{1}{200}$	a ₁		
	$\frac{1}{1000}$	0		
Physostigminsulfat nnd -salizylat	$\frac{1}{10}$	0	0	0
	$\frac{1}{50}$			
	$\frac{1}{100}$			
Solannitrat	$\frac{1}{20}$	0	0	0
	$\frac{1}{50}$			
	$\frac{1}{100}$			
Veratrinhydrochlorid	$\frac{1}{20}$	a ₃	a ₃	a ₃
	$\frac{1}{50}$	a ₃ -2	a ₂	a ₂
	$\frac{1}{100}$	a ₂	a ₂ -1	a ₁
	$\frac{1}{200}$	a ₁	a ₁ -?	0
	$\frac{1}{500}$	0	0	
Yohimbinhydrochlorid	$\frac{1}{50}$	a ₃	a ₃	a ₃
	$\frac{1}{100}$	a ₃	a ₃	a ₂
	$\frac{1}{200}$	a ₂	a ₂	a ₁
	$\frac{1}{500}$	a ₁	a ₁	0
	$\frac{1}{1000}$	0	?	0

Die Reaktionsweise der Spermatozoiden ist hier auch typisch topotaktisch: die plötzliche Wendung der Körperachse und präzise Ablenkung der Bewegungsrichtung sind überall zu konstatieren.

Es bedarf keiner Erörterung, daß die durch die Alkaloidsalze bewirkte Anlockung auf die Reizwirkung der Alkaloidanteile (eventuell -Kationen) der Moleküle zurückzuführen ist. Daß auch die freie Alkaloidbase, falls sie in genügendem Grade wasserlöslich ist, Anlockung bewirken kann, geht aus dem Verhalten des Kolchizins¹⁾ hervor.

Überblickt man nun die Resultate der in obiger Tabelle zusammengestellten Experimente, so nimmt man zunächst wahr, daß alle Alkaloide keineswegs gleichmäßig auf alle Samenfäden wirken, sondern vielmehr spezifische Empfänglichkeit der den verschiedenen phyletischen Stämmen angehörigen Samenfäden sehr deutlich zutage tritt, wie es auch bereits in den vorhergehenden Kapiteln mit Nachdruck betont wurde. Um nur einige prägnantere Beispiele anzuführen, sind Kokain und Ephedrin ganz unwirksam für die *Isoetes*-Samenfäden, aber die beiden wirken ziemlich stark anlockend auf die Spermatozoiden von *Equisetum* und *Salvinia*. Nikotin, Spartein, Thebain und die Isochinolin-Alkaloide üben einen deutlich positiv-chemotaktischen Reiz auf die Samenfäden von *Isoetes*, nicht aber auf die von *Equisetum* und *Salvinia* aus²⁾). Ferner steht *Salvinia* einzig da in der Reizbarkeit durch Apomorphin. Die genannten Alkaloide besitzen daher sozusagen einen diagnostischen Wert für die betreffenden Samenfäden-Arten. Im großen und ganzen zeigt *Equisetum* im Verhalten der Spermatozoiden gegen Alkaloide vielmehr Anklänge mit *Salvinia* als mit *Isoetes*. Es ist auch sehr interessant zu bemerken, daß die Farn-Samenfäden in ihrer Sensibilität gegen Alkaloide, soweit meine Erfahrung reicht, mit den *Salvinia*-Spermatozoiden übereinstimmen, so z. B. reagieren die Samenfäden von *Gymnogramme* und *Osmunda* prompt auf die $\frac{1}{10}$ Mol-Lösungen von Kokain und Ephedrin.

Die nähere Betrachtung obiger Tabelle erschließt ferner manche bemerkenswerte Tatsache bezüglich des Zusammenhanges zwischen der chemischen Struktur der Alkaloide und deren Reizwirkung auf bestimmte Spermatozoiden; auf einige von denselben möchte ich hier kurz hinweisen.

1) Die wässrige Lösung des Kolchizins reagiert neutral.

2) Die Isochinolin-Alkaloide scheiden sich z. T. bei der Neutralisierung der sauer reagierenden Lösungen ab, trotzdem kann man deren Wirkungslosigkeit auf die *Equisetum*- und *Salvinia*-Spermatozoiden in überzeugender Weise nachweisen.

Auf alle untersuchten Samenfäden wirken am ausgiebigsten die Alkaloide der Chinolin-Gruppe, insbesondere Chinin und Chinidin, deren Schwellenwerte oft $1/1000$ Mol nach unten überschreiten. Die schwächere chemotaktische Reizwirkung des Cinchonins findet ihr Gegenstück in der bekannten Minderwertigkeit in Heil- und Giftwirkung dieses Alkaloids. Den Chinolin-Alkaloiden nähern sich in der Reizwirkung die beiden folgenden mit unbekannter Konstitution: Emetin und Yohimbin, deren chemische Verwandtschaft mit den Chinabasen doch wohl aus der systematischen Stellung ihrer Mutterpflanzen einigermaßen zu vermuten ist.

Die vier Isochinolin-Alkaloide, Hydrastin, Papaverin, Narkotin und Berberin, die bekanntlich in chemischer Konstitution große Analogie bieten, zeichnen sich durch die Tatsache aus, daß sie ausschließlich auf die *Isoetes*-Samenfäden anlockend wirken. Die Wirkungslosigkeit der letzten Isochinolin-Base, des Narzeins, kann man wohl durch die Anwesenheit der den Säurecharakter bedingenden COOH-Gruppe in seinem Molekül erklären¹⁾. Auf gleichem Grund beruht sehr wahrscheinlich das sonderbare Verhalten des Kokains, das, im Gegensatz zu anderen Pyrrolidin-Basen, keine Anlockung der *Isoetes*-Samenfäden bewirkt. Euchinin, ein Karbonsäureester des Chinins, zeigt ebenfalls keine chemotaktische Wirkung.

Unverkennbar ist bei den *Isoetes*-Samenfäden die begünstigende Wirkung der Methoxyl (OCH₃)-Gruppe in Alkaloid-Molekülen auf deren Reizwirkung, wie aus dem Vergleich der Schwellenwerte folgender Alkaloide hervorgeht.

Cinchonin $1/50$	$\xrightarrow{\text{OCH}_3}$	Chinin $1/1000$
Strychnin $1/100$	$\xrightarrow{2(\text{OCH}_3)}$	Bruzin $1/1000$
Morphin $1/10?$	$\xrightarrow{\text{OCH}_3}$	Kodein $1/50$ $\xrightarrow{\text{OCH}_3}$ Thebain $1/200$.

Übrigens enthalten alle oben angeführten, chemotaktisch wirkenden Isochinolin-Basen die OCH₃-Gruppe. Die Wirksamkeit der beiden künstlichen Morphin-Derivate, Dionin und Heroin, auf die *Isoetes*-Samenfäden ist auch wohl in ähnlicher Weise auf die

1) Es ist hinlänglich bekannt, daß die medizinisch-physiologische Wirkung eines basischen Körpers durch Eintritt von Karboxyl-Gruppen in sein Molekül bedeutend geschwächt oder ganz aufgehoben wird. Um nur ein paar Beispiele anzuführen: Anilin ist stark giftig, aber m-Aminobenzoesäure wird nach Salkowsky in großer Menge vertragen. Pyrrol wirkt schwer lähmend, während α -Karbopyrrolsäure unwirksam ist. Vergleiche S. Fränkel: Die Arzneimittelsynthese, Berlin, 1906, S. 92.

Substitution des Hydroxyl-Wasserstoffs durch eine Äthyl- resp. 2 Azetyl-Gruppen zurückzuführen¹⁾).

Die beiden in pharmakologischer Hinsicht analogen Alkaloide, Pilokarpin und Physostigmin wirken in auffälliger Weise auf keine der untersuchten Samenfäden anlockend. Andererseits üben Veratrin, Aconitin und Delphinin, welche in ihrer physiologischen Einwirkung auf den Tierorganismus einander sehr ähnlich sind, gleichmäßig auf alle Samenfäden-Arten einen ziemlich starken chemotaktischen Reiz aus.

An dieser Stelle möchte ich die Giftwirkung der Alkaloide auf die Samenfäden, welche wiederum manche interessante Eigentümlichkeiten darbieten, kurz erwähnen.

Am schädlichsten wirkten auf alle Samenfäden die China-Alkaloide, Chinin und Chinidin; in den $\frac{1}{10}$ — $\frac{1}{200}$ Mol-Lösungen stellen die Samenfäden ihre Bewegung momentan ein, die Körper ziehen sich stark zusammen und zerfallen schließlich in eine körnige Masse; eine $\frac{1}{1000}$ Mol-Lösung ist aber schon ziemlich unschädlich. Cinchonin wirkt schon weit weniger toxisch; aber die *Salvinia*-Samenfäden zeigten in den $\frac{1}{20}$ — $\frac{1}{50}$ Mol-Lösungen dieses Alkaloids ein charakteristisches Agglutinationsphänomen, das sehr wahrscheinlich auf der chemischen Veränderung der Oberflächenbeschaffenheit der Plasmakörper beruht. Strychnin und Bruzin wirken nicht sofort tödlich selbst in $\frac{1}{20}$ — $\frac{1}{50}$ Mol-Lösungen. Eine chininähnliche Giftwirkung entfaltet auch Delphinin. Daß aber die chemotaktische Wirkung und Giftigkeit keinen Parallelismus aufweist, geht daraus deutlich hervor, daß das stark anlockende Yohimbin praktisch ungiftig ist, und die Samenfäden von *Equisetum* wurden in einer $\frac{1}{50}$ Mol-Lösung dieses Alkaloids auffallenderweise zu einer, sonst niemals beobachteten, sehr regen Bewegungstätigkeit angespornt. Die Giftigkeit des Emetins ist auch keine große. Andererseits ragt das nicht anlockend wirkende Solanin in der Giftwirkung über alle untersuchten Alkaloide hervor; $\frac{1}{2000}$ — $\frac{1}{5000}$ Mol-Lösungen dieses Alkaloids wurden erst ohne Schaden vertragen. Stark giftig auf die *Equisetum*- und *Salvinia*-Samenfäden wirkt ferner Apomorphin, das schon in $\frac{1}{200}$ — $\frac{1}{500}$ Mol-Lösungen tödend ist. Die übrigen Alkaloide sind minder toxisch, z. T. fast ungiftig, selbst in konzentrierten Lösungen. Erwähnen möchte ich hier noch die charakteristische Wirkung des

1) Diese Substitution bewirkt auch in pharmakologischer Hinsicht einen Umschlag in der Kodein-Wirkung. Es wird nämlich die narkotische Wirkung des Morphins vermindert, die tetanische Wirkung, die Wirkung auf die motorischen Nerven und auch die Giftigkeit dagegen gesteigert (Fränkel, a. a. O. S. 386).

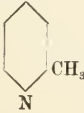
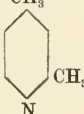
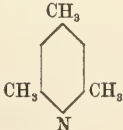
Berberins auf die *Isoetes*-Samenfäden; deren schraubig gewundene Körper in $\frac{1}{50}$ Mol-Lösung dieses Alkaloids kontrahieren sich zu einem gelb gefärbten, kurzstäbchenförmigen Gebilde, trotzdem hält ihre normale Beweglichkeit noch lange Zeit an.

Es liegt der Gedanke nahe, daß die oben besprochene chemotaktische Reizwirkung der Alkaloide wenigstens teilweise mit ihrem chemischen Charakter als substituierte Amine verknüpft ist. Es ist dabei zu bemerken, daß Stickstoff in den Molekülen keineswegs immer im Ringschluß zu stehen braucht. Das kann man schon daraus entnehmen, daß die *Equisetum*- und *Salvinia*-Samenfäden auf Ephedrin reagieren, dem nach neueren Untersuchungen sehr wahrscheinlich folgende Strukturformel zukommt: $\text{C}_6\text{H}_5 \cdot \text{CH} \cdot \text{OH} \cdot \text{CH} \cdot \text{CH}_3$
 $\quad \quad \quad |$
 $\quad \quad \quad \text{NH} \cdot \text{CH}_3$.

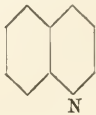
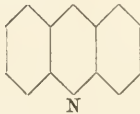
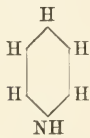
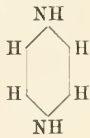
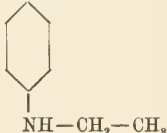
Die verschiedenen Stickstoffbasen mit einfacherer Struktur wurden sodann auf ihre chemotaktische Wirkung näher geprüft. Daß für *Equisetum*- und *Salvinia*-Samenfäden obige Voraussetzung annähernd zutrifft, ist aus nachfolgenden Resultaten ersichtlich. Es muß aber gleich angegeben werden, daß die *Isoetes*-Samenfäden auf keine der untersuchten Verbindungen, mit einziger Ausnahme von Piperidin, positiv chemotaktisch reagierten.

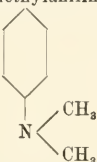
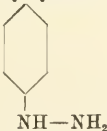
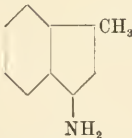
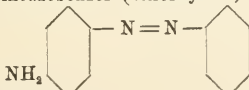
Stoff	Konzentration in Mol	Spermatozoiden	
		<i>Equisetum</i>	<i>Salvinia</i>
Aliphatische Verbindungen ¹⁾ :			
Tetramethyldiamin	$\frac{1}{10}$	a ₃ r	a ₂ r
CH ₂ —CH ₂ —NH ₂	$\frac{1}{50}$	a ₂ r	a ₁ r
	$\frac{1}{100}$	a ₁ r	0
CH ₂ —CH ₂ —NH ₂	$\frac{1}{200}$	?	
	$\frac{1}{500}$	0	
Trimethyldiamin	$\frac{1}{10}$	a ₃ r	a ₂ r
CH ₂ —NH ₂	$\frac{1}{50}$	a ₂ r	a ₁ r
	$\frac{1}{100}$	a ₁ r	0
CH ₂	$\frac{1}{200}$	?	
	$\frac{1}{500}$	0	
CH ₂ —NH ₂			
Allylamin	$\frac{1}{10}$	a ₃ r	0
CH ₂ =CH—CH ₂ —NH ₂	$\frac{1}{20}$	a ₂ r	
	$\frac{1}{50}$	a ₁ r	
	$\frac{1}{100}$	?	
	$\frac{1}{200}$	0	

1) Sämtlich als neutrale salzsaure Salze.

Stoff	Konzentration in Mol	Spermatozoiden	
		<i>Equisetum</i>	<i>Salvinia</i>
Propylamin $\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{NH}_2$	$\frac{1}{10}$ $\frac{1}{50}$ $\frac{1}{100}$	a_2 r a_1 r 0	0
Äthylamin $\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{NH}_2$	$\frac{2}{10}$ $\frac{1}{10}$ $\frac{1}{20}$ $\frac{1}{50}$	a_2 r a_1 r ? 0	0
Methylamin CH_3-NH_2	$\frac{2}{10}$ $\frac{1}{10}$ $\frac{1}{50}$	0	0
Trimethylamin $\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \text{CH}_3 \end{array} \rangle \text{N}$ CH_3	$\frac{2}{10}$ $\frac{1}{10}$	0	0
Guanidin $\text{NH}=\text{C} \begin{array}{l} \searrow \text{NH}_2 \\ \searrow \text{NH}_2 \end{array}$	$\frac{1}{10}$ $\frac{1}{50}$	0	0
Zyklische Verbindungen ¹⁾ :			
Pyridin 	$\frac{1}{10}$ $\frac{1}{50}$ $\frac{1}{100}$	a_1 r ? 0	0
α -Pikolin 	$\frac{1}{10}$ $\frac{1}{50}$ $\frac{1}{100}$	0	0
α, γ -Lutidin 	$\frac{1}{10}$ $\frac{1}{50}$ $\frac{1}{100}$	0	0
Kollidin 	$\frac{1}{10}$ $\frac{1}{50}$ $\frac{1}{100}$	0	0

1) Die Lösungen reagierten schwach alkalisch oder neutral.

Stoff	Konzentration in Mol	Spermatozoiden	
		<i>Equisetum</i>	<i>Salvinia</i>
Chinolin 	Tröpfchen suspendiert in Wasser	a_1	a_1 —?
Akridin 	Kriställchen in Wasser	0	0
Piperidin (Chlorhydrat) 	$\frac{1}{10}$ $\frac{1}{20}$ $\frac{1}{50}$ $\frac{1}{100}$	a_2 r a_1 r ? 0	a_1 ? 0
Piperazin (Chlorhydrat) 	$\frac{1}{10}$ $\frac{1}{20}$ $\frac{1}{50}$	a_1 r ? 0	0
Anilin 	$\frac{1}{10}$ $\frac{1}{20}$ $\frac{1}{50}$ $\frac{1}{100}$	a_2 a_1 ? 0	a_2 a_1 0
p-Toluidin 	Gesättigte Lösung Do. 1 : 2	a_2 a_1	a_2 a_1 —?
Äthylanilin 	Gesättigte Lösung	a_1	a_1

Stoff	Konzentration in Mol	Spermatozoiden	
		<i>Equisetum</i>	<i>Salvinia</i>
Dimethylanilin 	Gesättigte Lösung	a ₁	a ₁
p-Phenylendiamin ¹⁾ (Chlorhydrat) 	$\frac{1}{10}$ $\frac{1}{50}$	(?)	(?)
m-Phenylendiamin ¹⁾ (Chlorhydrat) 	$\frac{1}{10}$ $\frac{1}{50}$	(?)	(?)
Phenylhydrazin 	Gesättigte Lösung Do. 1 : 2 Do. 1 : 5	a ₂ a ₁ ?	a ₂ a ₁ ?
Naphthylamin ¹⁾ (Chlorhydrat) 	$\frac{1}{50}$	a ₁ r (?)	a ₁ r (?)
Skatol 	Gesättigte Lösung (ca. $\frac{1}{50}$ Mol)	a ₁	0
Aminoazobenzol (Chlorhydrat) 	$\frac{1}{50}$	a ₁ r (?)	0

1) Die Lösungen reagierten sauer, so daß die positive Reaktion nicht eindeutig sein kann.

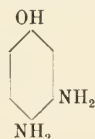
Hieraus ersieht man, daß in der Tat auf die Samenfäden von *Equisetum* und *Salvinia* auch die primären, sekundären sowie tertiären Basen mit einfacherer Struktur anlockend wirken, aber sie stehen in ihren Reizwerten weit hinter denen der natürlichen Alkaloide zurück. Es muß wohl angenommen werden, daß die im komplizierten molekularen Aufbau der Alkaloide dargebotenen Atomverkettungen in irgend einer Weise die Begünstigung der Reizwirkung bedingen. Bei *Isoetes*-Samenfäden mußte das eben besprochene Moment allein bestimmend sein für das Zustandekommen der anlockenden Wirkung, weil, wie gesagt, dieselben auf keinen der untersuchten einfacheren Stoffe reagieren, mit einziger Ausnahme von Piperidin, das schon wesentlich dem Alkaloid-Koniin nahe steht. Die Reihe der aliphatischen Amine in der obigen Tabelle läßt ferner klar erkennen, daß die Reizwirkung mit der abnehmenden Länge der Kohlenstoffkette herabsinkt, schließlich bis zu Null. In diesem Falle kann man sich die Funktion der Kohlenstoffkette etwa so vorstellen, daß sie das ganze Molekül an die reizbare Plasmastruktur der Samenfäden näher heranbringt oder an diese verankert¹⁾, so daß die eigentlich wirkende basische Gruppe erst in voller Aktion treten kann. Diese Voraussetzung müßte gerade bei gut anlockenden Alkaloiden, wie oben angedeutet, in besonders günstiger Weise erfüllt sein.

Durch die Anlagerung bestimmter Atomgruppe im Moleküle der Stickstoff-Basen wird die chemotaktische Reizwirkung abgeschwächt oder gänzlich vernichtet. Wir sahen schon oben die Wirkungslosigkeit der höheren Homologe des Pyridins. Weiter sind alle Phenolderivate ohne Reizwerte, so z. B.

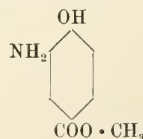
p-Aminophenol



Diaminophenol



Aminooxybenzoesäureester



Die Aminosäuren, Glykokoll, Alanin, Leucin, Asparaginsäure, Glutaminsäure und Asparagin, und ferner die sämtlichen untersuchten Eiweißkörper wirken freilich gar nicht anlockend.

¹⁾ Analoges findet man n. a. bei Enzymwirkungen; so zum Beispiel spalten Maltase, nach Emil Fischerschen bekannten Untersuchungen, wohl α -Glukoside, aber nicht entsprechende Pentoside.

Die Säureamide, Anilid und Hydrazid, mit der Bindung $\text{NH}_2\text{—CO}$, sind auch gänzlich wirkungslos. Ich habe mit folgenden Substanzen experimentiert, durchaus mit negativem Erfolg:

Harnstoff, Azetamid, Propionamid, Oxamid, Succinamid, Succinimid, Benzamid, Salizylamid, Azetanilid, m-Nitrobenzhydrazid.

Verschiedene Harnstoffderivate sind ebenfalls unwirksam, so z. B.: Alloxan, Methyluracil, Xanthin, Theobromin, Koffein usw.¹⁾.

Der positive Erfolg mit den Alkaloiden und gewissen substituierten Aminbasen bewogte mich, auch eine Anzahl der Farbstoffbasen im Bereich meiner Untersuchung zu ziehen. Ich täuschte mich nicht in meiner Erwartung, wie folgende Tabelle zeigt.

Stoff	Konzentration in Mol .	Spermatozoiden		
		<i>Equisetum</i>	<i>Salvinia</i>	<i>Isoetes</i>
Methyleneblau $\begin{array}{c} \text{C}_6\text{H}_5\text{—N(CH}_3)_2 \\ \diagup \quad \diagdown \\ \text{N} \quad \text{S} \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{C}_6\text{H}_5\text{—N(CH}_3)_2 \\ \quad \quad \quad \text{Cl} \end{array}$	$\frac{1}{10}$ $\frac{1}{100}$ $\frac{1}{200}$ $\frac{1}{500}$ $\frac{1}{1000}$ $\frac{1}{2000}$	a_2 a_2 a_1 0 	a_3 a_3 a_2 a_1 0	a_3 a_3 a_2 a_1 0
Thionin $\begin{array}{c} \text{C}_6\text{H}_5\text{—NH}_2 \\ \diagup \quad \diagdown \\ \text{N} \quad \text{S} \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{C}_6\text{H}_5\text{—NH} \cdot \text{HCl} \end{array}$	$\frac{1}{10}$ $\frac{1}{100}$ $\frac{1}{200}$ $\frac{1}{500}$ $\frac{1}{1000}$ $\frac{1}{2000}$	a_2 a_1 0 	a_3 a_3 a_2 a_1 0	a_3 a_3 a_2 a_1 0
Neutralrot $\begin{array}{c} \text{C}_6\text{H}_5\text{—N(CH}_3)_2\text{Cl} \\ \diagup \quad \diagdown \\ \text{N} \quad \text{N} \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{C}_6\text{H}_2\text{—NH}_2 \\ \quad \quad \quad \text{CH}_3 \end{array}$	$\frac{1}{50}$ $\frac{1}{100}$ $\frac{1}{200}$ $\frac{1}{500}$ $\frac{1}{1000}$	a_2 $a_2\text{—}a_1$ $a_1\text{—}?$ 0	a_3 $a_3\text{—}a_2$ a_2 a_2 0	a_2 a_2 a_1 0
Safranin $\begin{array}{c} \text{C}_6\text{H}_2\text{—CH}_3 \cdot \text{NH}_2 \\ \diagup \quad \diagdown \\ \text{N} \quad \text{N—C}_6\text{H}_5 \cdot \text{Cl} \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{C}_6\text{H}_2\text{—CH}_3\text{NH}_2 \end{array}$	$\frac{1}{20}$ $\frac{1}{100}$ $\frac{1}{200}$ $\frac{1}{1000}$ $\frac{1}{2000}$ $\frac{1}{5000}$	? 	a_3 a_3 a_2 a_1 ? 0	a_3 a_3 a_2 a_1 0
Indulin $\begin{array}{c} \text{C}_6\text{H}_5\text{HN} \quad \text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2 \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{C}_6\text{H}_5\text{N} \quad \text{C}_6\text{H}_5 \\ \diagup \quad \diagdown \\ \text{N} \quad \text{N} \end{array}$	$\frac{1}{50}$ $\frac{1}{100}$ $\frac{1}{200}$	? a_1 0	$a_2\text{—}a_1$ 0	$a_2\text{—}a_1$ a_1 0

¹⁾ Auf die Unwirksamkeit des Glyoxalinrings kann man übrigens schon nach dem oben erwähnten Verhalten des Alkaloids Pilokarpins schließen. Die Pyrimidin- und Pyrazolonderivate stellten sich durchgehends als wirkungslos heraus.

Die oben angeführten Experimente zeigen, daß gewisse basische Farbstoffe in ihrer anlockenden Wirkung wohl mit stark reizenden Alkaloiden konkurrieren können¹⁾. Durch die hochkomplizierte Molekular-Struktur dürfte hier auch die Verankerung an den reizaufnehmenden Plasmakörper der Samenfäden irgendwie begünstigt worden sein. Die Reaktion besteht hier, wie bei anderen Fällen, in erster Linie aus topischer Anlockung, aber die starke Anhäufung der Samenfäden an der Kapillarmündung wird auch dadurch herbeigeführt, daß die konzentrierten Lösungen der oben erwähnten Farbstoffe auf die Samenfäden in hohem Maße agglutinierend und bewegungshemmend wirken²⁾. In verdünnteren Lösungen wirken sie minder schädlich und die Samenfäden behielten, nach plötzlicher vorübergehender Inaktivierung beim Eintritt in die Diffusionssphäre, noch mehrere Minuten lang ihre Beweglichkeit, oder wenigstens rege Zilienbewegung bei. Es ist gewiß ein fesselnder Anblick, die zierlich vitalgefärbten Samenfäden in den Kapillarlösungen lebhaft umherwimmeln zu sehen³⁾. Besonders schön fällt es aus, wenn die lebenden Samenfäden sich in Thioninlösungen am Kern blau, am Plasmateile rot tingiert zeigen.

Die Experimente mit *Equisetum*-Samenfäden haben ergeben, daß Aurantia, Auramin, Methylviolett und Fuchsin eine schwache Anlockung bewirken, dagegen sind Oxazin⁴⁾- und Akridinderivate⁵⁾ für alle untersuchten Samenfäden wirkungslos. Erwähnt sei hier noch, daß wasserlösliches Nigrosin, Sulfosäure-Derivat des Indulins, im Gegensatz zur Mutterbase, keinen Reizwert besitzt⁶⁾.

1) Die spezifisch-physiologischen Wirkungen der organischen Farbstoffe sind schon mehrmals Gegenstand der pharmakologischen Forschung geworden. Methylenblau, um nur ein Beispiel anzuführen, wirkt nach Guttman und Ehrlich vernichtend auf die Malaria-Erreger, sogar viel energischer als Chinin.

2) Dieser Umstand hat in einigen Fällen (z. B. Versuche mit Safranin und Indulin bei *Equisetum*-Samenfäden), sichere Entscheidung des Ausfalls der Experimente fast unmöglich gemacht. Die temporäre Bewegungshemmung ist sehr wahrscheinlich auf eine besondere Reizbarkeit, die nach Rothert (Flora, Bd. 88, 1901, S. 374) als Chemokinesis zu bezeichnen ist, zurückzuführen. Eine ähnliche Reizerscheinung begegnet man vielfach auch bei verschiedenen Alkaloiden.

3) Die *Isoetes*-Samenfäden zeigten in Methylenblaulösungen eine intensive Vitalfärbung am vorderen Drittel des Körpers, während der Blepharoplast völlig farblos bleibt.

4) z. B. Gallocyanin, Cyanamin.

5) Phosphin, Akridinrot, Akridinorange.

6) Wir sahen bereits oben vielfach die Fälle, daß Eintritt von Säure-Gruppen im Moleküle die Reizwirkung des basischen Körpers vernichtet. (Siehe S. 30.)

Kapitel 6. Relation zwischen Reiz- und Reaktionsgröße.

Bekanntlich hat Pfeffer ¹⁾ zum ersten Male festgestellt, daß bei Chemotaxis von Farn-Samenfäden und Bakterien ein dem Weberschen Gesetz analoges Verhältnis zwischen Reiz- und Reaktionsgröße sich konstatieren läßt. Man braucht nur die subjektive Empfindung der menschlichen Sinne durch die objektive Größe der chemotaktischen Reaktion zu ersetzen, um die von Pfeffer aufgedeckte Relation im Wortlaut des Weber-Fechnerschen Gesetzes auszudrücken: „Bei Zunahme des Reizes in geometrischer Progression wächst die Reaktion in arithmetischer Progression und dementsprechend ist die Reaktion proportional dem Logarithmus des Reizes“.

Zur Erkennung dieser Gesetzmäßigkeit kann man sich, nach Pfeffer, der Ermittlung der Unterschiedsschwelle bedienen, d. h. des Reizzuwachses, welcher einem schon wirkenden Reiz hinzugefügt werden muß, um eine ebenmerkliche Schwellenreaktion zu erzielen, die immer dieselbe konstante Größe darstellt. Befinden sich also die Farnsamenfäden in einer homogenen Lösung der Äpfelsäure, so wird ihre Sensibilität gegen dieselbe soweit abgestumpft, daß innerhalb gewisser Grenzen immer eine 30 mal konzentriertere Kapillarflüssigkeit erst eine eben merkliche neue Reaktion hervorruft. Dann kann man hierbei, um einen kurzen Ausdruck zu gebrauchen, davon sprechen, daß die Unterschiedsschwelle 30 beträgt. Ich habe auch nachgewiesen, daß die Unterschiedsempfindung der *Isoetes*-Samenfäden gegen Äpfelsäure eine viel größere als die vorige ist; die Schwellenreaktion tritt hier stets dann ein, wenn die Kapillarflüssigkeit 400 mal so konzentriert ist als das Außenmedium ²⁾.

Die Feststellung der gesetzmäßigen Relation zwischen Reiz- und Reaktionsgröße stellt nicht nur an sich eine wichtige physiologische Erkenntnis dar, sondern in anderer Richtung hat sie dadurch eine große Bedeutung gewonnen, daß die genaue Ermittlung der Unterschiedsschwelle, wie es im folgenden Kapitel näher darzutun ist, zur Erörterung der Frage, ob eine einzige oder mehrere differente Sensibilitäten vorliegen, geradezu unerlässlich ist.

Die Ausführung der Versuche ist immer dieselbe. Das Prothallenmaterial wird nach Auswaschen mit destilliertem Wasser

1) W. Pfeffer, Locomotorische Richtungsbewegungen durch chemische Reize. Unters. a. d. botan. Inst. Tübingen, Bd. I, 1884, S. 395.

2) K. Shibata, Studien über die Chemotaxis der *Isoetes*-Spermatozoiden. Jahrb. f. wiss. Botan., Bd. XLI, 1905, S. 374.

und äußerlichem Abtrocknen mittels Fließpapier in einen Tropfen der Versuchslösung gebracht, welche noch einige Male durch Absaugen erneuert wird. Den in dieses Medium herauschwärmenden Samenfäden werden die Kapillaren mit den konzentrierteren Lösungen hinzugeschoben. Der Ausfall des Versuchs muß, in Rücksicht auf die Diffusion der Lösung, stets möglichst bald nach Zuschieben der Kapillaren entschieden werden. Die Experimente erstrecken sich auf alle wichtigeren Repräsentanten der chemotaktisch wirksamen Verbindungen und die gewonnenen Resultate werden in folgenden Zeilen dargestellt.

A. Die *Equisetum*-Spermatozoiden.

Die Versuche mit äpfelsaurem und mesoweinsaurem Natron ergaben zunächst folgende Resultate.

Die Kapillarflüssigkeit enthält (Mol)	Die Außenflüssigkeit besitzt die				
	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{20}$	$\frac{1}{30}$	$\frac{1}{40}$	$\frac{1}{50}$ -fache
	Konzentration und enthält (Mol)				
Äpfelsaures Natrium $\frac{1}{100}$	$\frac{1}{1000}$	$\frac{1}{2000}$	$\frac{1}{3000}$	$\frac{1}{4000}$	$\frac{1}{5000}$
	0	0	?	a_1	a_2
	$\frac{1}{2000}$	$\frac{1}{4000}$	$\frac{1}{6000}$	$\frac{1}{8000}$	$\frac{1}{10\,000}$
	0	0	?	a_1	a_2
$\frac{1}{200}$			$\frac{1}{30\,000}$	$\frac{1}{40\,000}$	$\frac{1}{50\,000}$
			0	a_1	a_2
$\frac{1}{1000}$					
Mesoweinsaures Natrium $\frac{1}{100}$		$\frac{1}{2000}$	$\frac{1}{3000}$	$\frac{1}{4000}$	$\frac{1}{5000}$
		0	?	a_1	a_2

Hieraus folgt, daß das oben besprochene Gesetz hier auch seine Gültigkeit bewährt und die Unterschiedsschwelle eben erreicht wird, wenn die Konzentration der Malat- resp. Mesotartrat-Ionen in der Kapillarflüssigkeit 40 mal größer ist als das Außenmedium, was nahezu mit dem schon für Farnsamenfäden konstatierten Sachverhältnis übereinstimmt.

Dasselbe gilt auch für die Reizwirkung der Metall-, H- und Alkaloid-Ionen, wie es aus folgender Zusammenstellung deutlich hervorgeht.

Die Kapillarflüssigkeit enthält (Mol)		Die Außenflüssigkeit besitzt die				
		$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{20}$	$\frac{1}{30}$	$\frac{1}{40}$	$\frac{1}{50}$
		fache Konzentration u. enthält an gleichnam. Stoff (Mol)				
Ca Cl ₂	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{1000}$ 0		$\frac{1}{3000}$ 2— a_1		$\frac{1}{5000}$ a_2
Sr(NO ₃) ₂	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{1000}$ 0		$\frac{1}{3000}$ a_1		$\frac{1}{5000}$ a_2
Mg Cl ₂	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{500}$ 0	$\frac{1}{1000}$ 0			$\frac{1}{2500}$ a_2
Mg Cl ₂	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{1000}$ 0	$\frac{1}{2000}$ 0			$\frac{1}{5000}$ a_2
H ₂ SO ₄	$\frac{1}{500}$	$\frac{1}{5000}$ 0	$\frac{1}{10\,000}$ 0		$\frac{1}{20\,000}$ a_1	
Atropinsulfat	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{100}$ 0		$\frac{1}{300}$ a_1		$\frac{1}{500}$ a_2
Kokainhydrochlorid	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{100}$ 0		$\frac{1}{300}$ a_1		$\frac{1}{500}$ a_2
Chininhydrochlorid	$\frac{1}{20}$	$\frac{1}{200}$ ¹⁾ 0		$\frac{1}{600}$ a_1		$\frac{1}{1000}$ a_2
Strychninnitrat	$\frac{1}{20}$	$\frac{1}{200}$ 0		$\frac{1}{600}$ a_1		$\frac{1}{1000}$ a_2

Also bei den anlockend wirkenden Kationen, Ca, Sr, Mg und H, und Alkaloiden beträgt die Unterschiedsschwelle überall 30—40.

B. Die *Salvinia*-Samenfäden.

Es wurden zunächst mit den chemotaktisch wirksamen Malaten und Maleinaten folgende Experimente (obere Tab. S. 42) angestellt.

Die Versuche ergaben übereinstimmend, daß für die Reizwirkung der Malat- und Maleinat-Ionen die Unterschiedsschwelle 50 gilt. Dieses relative Maß der Abstumpfung durch die vorhergehende Reizung wurde aber bei der positiven Chemotaxis gegen Ca-, Sr- und H-Ionen sowie Alkaloide etwas niedriger gefunden, wie das die folgende Zusammenstellung (untere Tabelle S. 42) zeigt.

1) Die $\frac{1}{200}$ Mol-Chininhydrochloridlösung wirkt stark schädigend auf die Samenfäden und der Ausfall des Versuchs konnte nur nach dem Verhalten der Samenfäden, die sich in unmittelbarer Nähe der Kapillarmündung befanden, beurteilt werden. Es wurde im allgemeinen konstatiert, daß dieselbe Lösung, als Außenmedium angewandt, weniger toxisch wirkt als in den Kapillaren. In den letzteren wirken vielleicht gewisse Nebenumstände nachteilig auf die Resistenz der Samenfäden,

Die Außen- flüssigkeit enthält (Mol)	Die Kapillarflüssigkeit besitzt					
	20	30	40	50	60	70 -
	fache Konzentration und enthält an gleichnamigem Stoff (Mol)					
Äpfel- saures	$\frac{1}{10\,000}$	$\frac{2}{1000} (0)$	$\frac{3}{1000} (0)$	$\frac{4}{1000} (?)$	$\frac{5}{1000} (a_1)$	$\frac{6}{1000} (a_2)$
	$\frac{1}{20\,000}$	$\frac{2}{2000} (0)$	$\frac{3}{2000} (0)$	$\frac{4}{2000} (?)$	$\frac{5}{2000} (a_1)$	$\frac{6}{2000} (a_2)$
Natrium	$\frac{1}{100\,000}$	$\frac{2}{10000} (0)$	$\frac{3}{10000} (0)$	$\frac{4}{10000} (?)$	$\frac{5}{10000} (a_1)$	$\frac{6}{10000} (a_2)$
Maleins.	$\frac{1}{20\,000}$	$\frac{2}{2000} (0)$	$\frac{3}{2000} (0)$		$\frac{5}{2000} (a_1)$	$\frac{7}{2000} (a_2)$
Kalium	$\frac{1}{50\,000}$	$\frac{2}{5000} (0)$	$\frac{3}{5000} (0)$		$\frac{5}{5000} (a_1)$	$\frac{7}{5000} (a_2)$

Die Kapillarflüssigkeit enthält (Mol)	Die Außenflüssigkeit besitzt				
	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{20}$	$\frac{1}{30}$	$\frac{1}{40}$	$\frac{1}{50}$ -
	fache Konzentration und enthält an gleichnam. Stoff (Mol)				
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{100}$ 0	$\frac{1}{200}$?	$\frac{1}{300}$ a_1	$\frac{1}{400}$ a_2
	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{1000}$ 0	$\frac{1}{2000}$?	$\frac{1}{2000}$ $a_1 - a_2$	$\frac{1}{4000}$ a_3
	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{100}$ 0	$\frac{1}{200}$ 0	$\frac{1}{300}$ a_1	$\frac{1}{400}$ a_2
SrCl_2	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{1000}$ 0	$\frac{1}{2000}$ 0—?	$\frac{1}{3000}$ $a_1 - a_2$	$\frac{1}{4000}$ a_3
	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{1000}$ 0	$\frac{1}{2000}$ 0—?	$\frac{1}{3000}$ $a_1 - a_2$	$\frac{1}{4000}$ a_3
	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{1000}$ 0	$\frac{1}{2000}$ 0—?	$\frac{1}{3000}$ $a_1 - a_2$	$\frac{1}{4000}$ a_3
HCl	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{1000}$ 0		$\frac{1}{8000}$?— a_1	$\frac{1}{5000}$ a_2
	$\frac{1}{500}$	$\frac{1}{5000}$ 0		$\frac{1}{15\,000}$ a_1	$\frac{1}{25\,000}$ a_2
	$\frac{1}{500}$	$\frac{1}{5000}$ 0		$\frac{1}{15\,000}$ a_1	$\frac{1}{25\,000}$ a_2
Chininhydrochlorid	$\frac{1}{50}$		$\frac{1}{1000}$ 0—?	$\frac{1}{1500}$ $a_1 - a_2$	$\frac{1}{2000}$ a_3
	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{1000}$ 0	$\frac{1}{2000}$ a_1	$\frac{1}{3000}$ $a_2 - a_3$	$\frac{1}{4000}$ a_3
	$\frac{1}{200}$	$\frac{1}{2000}$ 0	$\frac{1}{4000}$ a_1	$\frac{1}{6000}$ $a_2 - a_3$	$\frac{1}{8000}$ a_3
	$\frac{1}{200}$	$\frac{1}{2000}$ 0	$\frac{1}{4000}$ a_1	$\frac{1}{6000}$ $a_2 - a_3$	$\frac{1}{8000}$ a_3

Die Unterschiedsschwelle beträgt hier also für die Reizung von Ca-, Sr- und H-Ionen 30, und für die des Chinins 20—30.

C. Die *Isoetes*-Samenfäden.

Die Unterschiedsempfindlichkeit der *Isoetes*-Samenfäden für die Malat- und verwandten chemotaktisch wirksamen Dikarbonsäure-

Anionen ist, wie ich schon früher festgestellt habe, eine viel größere als die der Farnsamenfäden und auch der vorhergehenden Fälle; die Unterschiedsschwelle wird hierbei erst durch 400mal stärkere Konzentration der Kapillarflüssigkeit erreicht. Es ist sehr beachtenswert, daß auch bei der positiven Chemotaxis gegen OH-Ionen ein ganz ähnliches Verhältnis obwaltet. Die Versuche mit NaOH ergaben folgendes Resultat.

Die Kapillarflüssigkeit enthält (Mol)		Die Außenflüssigkeit besitzt				
		$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{300}$	$\frac{1}{400}$	$\frac{1}{500}$	$\frac{1}{700}$ -
		fache Konzentration und enthält an Na OH (Mol)				
Na OH	$\frac{1}{10000}$	$\frac{1}{100\ 000}$ 0	$\frac{1}{300\ 000}$ 0	$\frac{1}{400\ 000}$?	$\frac{1}{500\ 000}$ a ₁	$\frac{1}{700\ 000}$ a ₂
	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{10\ 000}$ 0	$\frac{1}{30\ 000}$ 0	$\frac{1}{40\ 000}$ 0—?	$\frac{1}{50\ 000}$ a ₁	$\frac{1}{70\ 000}$ a ₂

Die Unterschiedsschwelle beträgt hier also ebenfalls 400—500.

Die Versuche mit einigen chemotaktisch wirksamen Alkaloiden ergaben aber einen wesentlich kleineren Wert der Unterschiedsschwelle.

Die Kapillarflüssigkeit enthält (Mol)		Die Außenflüssigkeit besitzt					
		$\frac{1}{80}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{60}$	$\frac{1}{81}$	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{200}$ -
		fache Konzentration u. enthält an gleichnam. Stoff (Mol)					
Bruzinhydrochlorid	$\frac{1}{500}$	$\frac{1}{15\ 000}$ 0	$\frac{1}{25\ 000}$?	$\frac{1}{30\ 000}$ a ₁	$\frac{1}{40\ 000}$ a ₂	$\frac{1}{50\ 000}$ a ₂	$\frac{1}{100\ 000}$ a ₃
	$\frac{1}{200}$	$\frac{1}{6000}$ 0	$\frac{1}{10\ 000}$ a ₁	$\frac{1}{12\ 000}$ a ₂			
Chininhydrochlorid	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{3000}$ 0	$\frac{1}{5000}$ a ₁	$\frac{1}{6000}$ a ₂	$\frac{1}{8000}$ a ₂	$\frac{1}{10\ 000}$ a ₂	$\frac{1}{20\ 000}$ a ₃
	$\frac{1}{200}$	$\frac{1}{6000}$ 0	$\frac{1}{10\ 000}$ a ₁	$\frac{1}{12\ 000}$ a ₂	$\frac{1}{15\ 000}$ a ₂	$\frac{1}{20\ 000}$ a ₂	

Hier ist also ein 50fach größerer Gehalt der Kapillarflüssigkeit an Reizstoff als das Außenmedium schon ausreichend, um eine Schwellenreaktion zu erzielen.

Rekapitulierend möchte ich hier hervorheben, daß für die chemotaktische Reizwirkung aller in Betracht kommender Stoffe auf die Pteridophyten Spermatozoiden die eingangs erwähnte Gesetz-

mäßigkeit im Verhältnis zwischen der Reiz- und Reaktionsgröße ihre allgemeine Gültigkeit bewährt. Auf die Frage nach der Kausalität der hier eruierten Tatsache werde ich später nochmals zurückkommen¹⁾.

Die in diesem Kapitel angegebenen Werte der Unterschiedsschwelle werden, übersichtlichkeitshalber, in folgender Tabelle zusammengestellt.

Reizstoff	Die Spermatozoiden von		
	<i>Equisetum</i>	<i>Salvinia</i>	<i>Isoetes</i>
Malat- und andere Dikarbonsäure-Ionen .	40	50	400
OH-Ionen	—	—	400
Ca-, Sr- und andere Metallionen . . .	30	30	—
H-Ionen	30—40	30	—
Alkaloide	30	20	50

Kapitel 7. Die Vielheit der chemotaktischen Sensibilitäten und deren Beziehungen untereinander.

Die Frage, ob die chemotaktische Reaktion der Organismen für verschiedene Stoffe auf eine einzige Reizbarkeit zurückzuführen ist oder doch verschiedene separate Sensibilitäten anzunehmen sind, wurde zuerst von Rothert²⁾ berührt. Da bei seinem *Amylobacter* die zwei chemotaktisch wirksamen Körper, Äther und Fleischextrakt, keine gegenseitige Abstumpfung der Reizbarkeit bewirken, so schloß er, daß man es hier mit zwei getrennten Sensibilitäten zu tun habe. Andererseits hat Pfeffer³⁾ schon früher festgestellt, daß 0,05 % Maleinsäure im Außenmedium die positive Reaktion der Farnsam-

1) Es sei hier darauf hingewiesen, daß neulich A. H. Blaauw eine abfällige kritische Bemerkung über die Anwendung des Weberschen Gesetzes auf die tropistische Krümmungsreaktion gemacht hat (Die Perzeption des Lichtes. Extr. d. Rec. d. trav. bot. néerlandaise Vol. V, 1909, S. 141).

2) W. Rothert, Beobachtungen und Betrachtungen über taktische Reizerscheinungen. Flora, Bd. 88, 1901, S. 383. Vergl. ferner hierzu Pfeffer, Über chemotaktische Bewegungen von Bakterien, Flagellaten und Volvocineen. Unters. a. d. bot. Inst. Tübingen, Bd. II, 1888, S. 648—9.

3) W. Pfeffer, Locomotorische Richtungsbewegungen durch chemische Reize. Unters. a. d. bot. Inst. Tübingen. Bd. I, 1884, S. 399.

fäden gegen 0,04% Äpfelsäure verhindert. Es schien somit annehmbar zu sein, daß hierbei eine gemeinsame Reizbarkeit für zwei genannte Stoffe vorliegt. Leider vermißt man in beiden eben angegebenen Fällen die exakte quantitative Bestimmung über den Umfang der gegenseitigen Beeinflussung oder Nichtbeeinflussung zweier Reizstoffe, so daß die daraus gezogenen Schlüsse nicht ganz zwingend erscheinen. Ich habe dann in meinen Studien über die *Isoetes*-Samenfäden gezeigt, daß bei der Abstumpfung der Sensibilität gegen Äpfelsäure durch dieselbe sowie Fumar-, Bernstein- und d-Weinsäure überall dasselbe relative Maß der Unterschiedsschwelle festzustellen ist¹⁾. Daraus habe ich schon dort den Schluß gezogen, daß die Reizwirkung der Äpfelsäure und ihr nahe verwandten Dikarbonsäuren auf einem und demselben Reizvorgang beruht. Als ich später bei den *Salvinia*-Samenfäden die positive Chemotaxis gegen Ca- und Sr-Ionen und bei *Equisetum*-Spermatozoiden gegen diese und noch andere Metall-Ionen aufgedeckt habe, drängte sich mir die Frage auf, ob es sich hier nicht um besondere Reizbarkeiten als die durch Äpfelsäure handle. Die darauf gerichteten Untersuchungen über die gegenseitige Beeinflussung der Reizstoffe, unter der Berücksichtigung der relativen Reizwerte, erlaubten mir schon damals den Schluß zu ziehen, daß die Sensibilitäten der Samenfäden für die Äpfelsäure-Anionen und die für die Kationen auf verschiedenen, voneinander unabhängigen Perzeptionsvorgängen beruhen²⁾. Aber die Sensibilitäten für die verschiedenen Kationen konnten nicht in dieser Weise voneinander unterschieden werden, weil die Kationen gegenseitig und zwar vielfach mit demselben Wert der Unterschiedsschwelle abstumpfend wirken. Kniep³⁾ hat indes in seiner interessanten Arbeit gezeigt, daß bei den von ihm untersuchten Bakterien eine gesonderte Sensibilität für jeden einfachen Reizstoff anzunehmen ist.

Die nachfolgende Darstellung bezweckt in erster Linie zu meinen obigen Behauptungen detaillierte experimentelle Belege zu beschaffen. Die inzwischen aufgedeckten Sensibilitäten für H-,

1) K. Shibata, Studien über die Chemotaxis der *Isoetes*-Spermatozoiden. Jahrb. f. wiss. Bot., Bd. XLI, 1905, S. 576.

2) K. Shibata. Bot. Mag. Tokyo, Vol. XIX, 1905, S. 41 (*Salvinia*); ebenda S. 81 (*Equisetum*).

3) H. Kniep, Untersuchungen über die Chemotaxis von Bakterien. Jahrb. f. wiss. Bot., Bd. XLIII, 1906, S. 265. Neulich hat auch Å. Åkerman dargetan, daß bei den *Marchantia*-Spermatozoiden getrennte Sensibilitäten für Proteinstoffe und Kaliumsalz(-Ionen) vorliegen (Zeitschr. f. Botanik, 2. Jahrg., 1910, S. 100).

OH- und Alkaloid-Ionen werden auch im Rahmen der Untersuchung aufgenommen, um die Beziehungen zwischen verschiedenen Reizbarkeiten möglichst allseitig zu erforschen und aufzuklären. Dieselbe Versuchsmethodik wie im vorigen Kapitel wurde überall angewandt. Es ist zu bemerken, daß bei topotaktisch reagierenden Spermatozoiden es gewöhnlich von keinem Nutzen ist, die als Außenmedium benutzten Stoffe auch der Kapillarflüssigkeit hinzufügen, wie man bald sehen wird. Doch habe ich es nicht unterlassen, von Zeit zu Zeit die Kontrollversuche in besagter Weise anzustellen.

A. Die Anionen der Apfelsäure und verwandten Dikarbonsäuren.

Es kommt zunächst darauf an, die Malat- und anderen chemotaktisch wirksamen Dikarbonsäure-Anionen auf ihre gegenseitige abstumpfende Wirkung zu prüfen. Die Versuche mit den *Salvinia*-Spermatozoiden ergaben folgende Resultate.

Die Außenflüssigkeit enthält an malein- saurem Kalium (Mol)	Die Kapillarflüssigkeit enthält an äpfelsaurem Natrium (Mol)													
$\frac{1}{100\,000}$	$\frac{1}{10\,000}$	(0)	$\frac{2}{10\,000}$	(0)	$\frac{3}{10\,000}$	(0)	$\frac{4}{10\,000}$	(a ₁)	$\frac{5}{10\,000}$	(a ₂)	$\frac{6}{10\,000}$	(a ₃)	$\frac{7}{10\,000}$	(a ₄)
$\frac{1}{10\,000}$	$\frac{1}{1000}$	(0)	$\frac{2}{1000}$	(0)	$\frac{3}{1000}$	(0)	$\frac{4}{1000}$	(a ₁)	$\frac{5}{1000}$	(a ₂)	$\frac{6}{1000}$	(a ₃)		

Die Unterschiedsschwelle beträgt hier also 40, da der relative Reizwert dieser beiden Säure-Anionen, nach dem Schwellenwert bemessen, beinahe 1 : 1 ist. Daraus ist zu entnehmen, daß Maleinat-Ionen auf die Sensibilität der Samenfäden für Malat-Ionen in fast gleichem Maße abstumpfend wirken, wie die letzteren selbst.

Es wurde ferner festgestellt, daß Zitronensäure, gegen Apfelsäure und Maleinsäure geprüft, einen ebensogroßen Wert der Unterschiedsschwelle aufweist, wie in folgenden Tabellen dargestellt ist.

Die Kapillarflüssigkeit enthält (Mol)		Die Außenflüssigkeit enthält an zitronensaurem Kalium (Mol)						
		$\frac{1}{10\,000}$	$\frac{1}{20\,000}$	$\frac{1}{30\,000}$	$\frac{1}{40\,000}$	$\frac{1}{50\,000}$	$\frac{1}{60\,000}$	$\frac{1}{70\,000}$
Äpfelsaures Natrium	$\frac{1}{1000}$	0	0	0	?	a ₁	a ₂	a ₃
Maleinsaures Kalium	$\frac{1}{1000}$	$\frac{1}{10\,000}$	$\frac{1}{20\,000}$	$\frac{1}{30\,000}$	$\frac{1}{40\,000}$	$\frac{1}{50\,000}$	$\frac{1}{60\,000}$	$\frac{1}{70\,000}$
		0	0	0	?	a ₁	a ₂	a ₃

Die Außenflüssigkeit enthält an zitrakonsaurem Kalium (Mol)	Die Kapillarflüssigkeit enthält an maleinsaurem Kalium (Mol)			
$\frac{1}{20\,000}$	$\frac{2}{2000}$ (0)	$\frac{3}{2000}$ (0)	$\frac{5}{2000}$ (a ₁)	$\frac{7}{2000}$ (a ₃)
$\frac{1}{50\,000}$	$\frac{2}{5000}$ (0)	$\frac{3}{5000}$ (0)	$\frac{5}{5000}$ (a ₁)	$\frac{7}{5000}$ (a ₃)

Diese zwei Versuchsreihen zeigen übereinstimmend, daß Zitronensäure gleich stark abstumpfend gegen Äpfelsäure und Maleinsäure wirkt, wie die letzteren selbst, trotzdem die anlockende Wirkung der Zitronensäure (Methylmaleinsäure) nur etwa $\frac{1}{30}$, bemessen nach dem Schwellenwert, der Äpfel- und Maleinsäure beträgt. Die geringfügige Abweichung in Molekularstruktur, d. h. Eintritt einer CH₃-Gruppe, läßt also hier zu, den ersten Akt der Chemoperzeption der *Salvinia*-Samenfäden noch in vollem Maße zu beeinflussen, obzwar die darauf folgende Reizkette irgendwie modifiziert wird und nur eine schwächere Reaktion zur Folge hat.

Im Gegensatz zu den eben angeführten maleinoiden Verbindungen wirken bei den *Salvinia*-Samenfäden die Trans-Dikarbonsäuren gar nicht abstumpfend gegen Äpfelsäure; die Samenfäden reagieren nämlich ganz prompt auf $\frac{1}{1000}$ Natriummalat-Lösung, als die Außenflüssigkeit einen der folgenden Stoffe enthielt: $\frac{1}{100}$ — $\frac{1}{1000}$ Mol-Kaliumtartrat, -Natriumfumarat und -Ammoniumsuccinat.

Eine weitere Versuchsreihe wurde bei den *Equisetum*-Samenfäden mit zwei für diese fast gleich stark anlockend wirkenden Stoffen, Äpfelsäure und Mesoweinsäure, ausgeführt.

Die Kapillarflüssigkeit enthält an Natriummesotarat ¹⁾ (Mol)	Die Außenflüssigkeit enthält an Natriummalat (Mol)				
$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{1000}$ 0	$\frac{1}{2000}$ 0	$\frac{1}{3000}$ 0	$\frac{1}{4000}$ a ₁	$\frac{1}{5000}$ a ₂

Hier auch bewährt der bereits für Äpfelsäure allein aufgefundene Wert der Unterschiedsschwelle, d. h. 40, seine Gültigkeit.

Das Vorhandensein von chemotaktisch unwirksamen Dikarbonsäuren im Außenmedium beeinträchtigt in keiner Weise die positive Reaktion der *Equisetum*-Samenfäden gegen Äpfelsäure- und Mesoweinsäure-Anionen. Es wurde z. B. festgestellt, daß $\frac{1}{100}$ Mol-Fumarat-,

1) Die Reizwirkung der Na-Ionen wird hier in fast demselben Verhältnis durch die gleichnamigen im Außenmedium, wie wir schon sahen, abgestumpft.

Maleinat-, Mesakonat-, Zitratkonat- und Tartrat-Ionen gar nicht abstumpfend gegen $\frac{1}{100}$ Mol-Malat-Ionen wirken.

B. Metall- und H-Ionen.

Es wurden zunächst bei den *Salvinia*-Samenfäden verschiedene Metall-Ionen auf ihre gegenseitige Abstumpfung untersucht.

Die Kapillarflüssigkeit enthält (Mol)		Die Außenflüssigkeit enthält (Mol)				
Ca(NO ₃) ₂	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{1000}$ 0	$\frac{1}{2000}$?—a ₁	$\frac{1}{3000}$ a ₂	$\frac{1}{4000}$ a ₃	SrCl ₂
	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{100}$ 0	$\frac{1}{200}$ 0	$\frac{1}{300}$ a ₁	$\frac{1}{400}$ a ₂	
SrCl ₂	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{1000}$ 0	$\frac{1}{2000}$ 0	$\frac{1}{3000}$ a ₁	$\frac{1}{4000}$ a ₃	Ca(NO ₃) ₂
	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{100}$ 0	$\frac{1}{200}$ 0	$\frac{1}{300}$?	$\frac{1}{400}$ a ₁ —a ₂	

Hieraus ersieht man, daß Ca- und Sr-Ionen gegeneinander fast gleich stark abstumpfend wirken und die Unterschiedsschwelle immer durch 30fache absolute Konzentrationssteigerung erreicht wird, ungeachtet der bedeutenden Differenz in der relativen Stärke der Reizwirkung, welche, bemessen nach Schwellenwerten, sich wie Ca : Sr = 5 : 1 verhält. Hier liegt also ein analoges Sachverhältnis vor, wie das gleich oben bei Maleinsäure und Zitronensäure gesehene. Die dort gegebene Erklärung muß auch bei diesen beiden homologen Elementen, Ca und Sr, gültig sein.

Eine dem oben Gesagten entsprechende Beobachtung habe ich auch bei den *Equisetum*-Spermatozoiden gemacht.

Die Kapillarflüssigkeit enthält (Mol)		Die Außenflüssigkeit enthält (Mol)			Relative Reizwerte ¹⁾
CaCl ₂	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{5000}$ a ₃	$\frac{1}{3000}$ a ₁	$\frac{1}{1000}$ 0	SrCl ₂ Ca : Sr = 2 : 1
	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{3000}$ a ₃	$\frac{1}{1000}$ a ₁	$\frac{1}{500}$ 0	Ba(NO ₃) ₂ Ca : Ba = 10 : 1
Sr(NO ₃) ₂	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{5000}$ a ₃	$\frac{1}{3000}$ a ₁ —?	$\frac{1}{1000}$ 0	CaCl ₂
	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{3000}$ a ₃	$\frac{1}{1000}$ a ₁ —?	$\frac{1}{500}$ 0	Ba(NO ₃) ₂ Sr : Ba = 5 : 1

1) Bemessen nach den Reizschwellenwerten. Nach diesen Verhältniszahlen gerechnet, ist z. B. $\frac{1}{100}$ Mol-SrCl₂-Lösung mit $\frac{1}{300}$ Mol-CaCl₂-Lösung gleichwertig.

Das zur gegenseitigen Unterschiedempfindung nötige Konzentrationsverhältnis zwischen Ca- und Sr-Ionen beträgt also immer noch 1:30, obgleich die ersteren doppelt so stark reizend wie die letzteren wirken. Nur Ba-Ionen wirken ihrer schwächeren Reizwirkung gemäß minder stark abstumpfend gegen Ca- und Sr-Ionen.

Die Metallionen, die den verschiedenen natürlichen (periodischen) Gruppen angehören, wirken auch gegeneinander abstumpfend; dennoch kann man hierbei den konstanten Wert der Unterschiedsschwelle erst mit Bezugnahme auf die relativen Größen der chemotaktischen Reizwerte auffinden. Diese umgerechneten Werte der Unterschiedsschwelle wollen wir nunmehr als die „relative Unterschiedsschwelle“ bezeichnen. Die folgende Zusammenstellung der Versuche mit den *Equisetum*-Samenfäden illustriert das Ebengesagte.

Die Kapillarflüssigkeit enthält (Mol)		Die Außenflüssigkeit enthält (Mol)						Relative Reizwerte
Ca(NO ₃) ₂	1/100	1/100	1/500	1/1000	1/2500		MgCl ₂	Ca : Mg = 10 : 1
		0	a ₂	a ₃	a ₃			
MgCl ₂	1/100	1/1000	1/5000	1/10000	1/25000		Ca(NO ₃) ₂	
		0	0	0	?—a ₁			
Ca(NO ₃) ₂	1/100	1/20	1/50	1/100			LiCl	Ca : Li = 100 : 1
		0	a ₁ —a ₂	a ₃				
LiCl	1/10	1/100	1/1000				Ca(NO ₃) ₂	
		0	0					
Ca(NO ₃) ₂	1/100	1/20	1/50	1/100	1/300		NaCl	Ca : Na = 200 : 1
		?—a ₁	a ₂	a ₃	a ₃			
LiCl	1/10	1/500	1/1000	1/5000	1/10000		MgCl ₂	Mg : Li = 10 : 1
		0	0	a ₁ —a ₂	a ₂			
MgCl ₂	1/100	1/100	1/500	1/1000			LiCl	
		0	a ₁	a ₂				
LiCl	1/10	1/20	1/50	1/100	1/300	1/500	NaCl	Li : Na = 2 : 1
		0	0	0	a ₁ —a ₂	a ₂		

Diese Ergebnisse lassen klar erkennen, daß verschiedene chemotaktisch wirksame Kationen gegeneinander nach Maßgabe der relativen Größe der Reizwirkung abstumpfend wirken, wobei nach entsprechender Umrechnung überall die relative Unterschiedsschwelle 30—50 festzustellen ist.

Dasselbe gilt auch für die gegenseitige Beziehung zwischen Metall-Ionen und H-Ionen. Die Experimente mit den *Equisetum*-Samenfäden ergaben folgendes.

Die Kapillarflüssigkeit enthält ¹⁾ (Mol)		Die Außenflüssigkeit enthält (Mol)			Relative Reizwerte
Ca (NO ₃) ₂	$\frac{1}{500}$	$\frac{1}{500}$	$\frac{1}{2000}$	HNO ₃	Ca : H = 20 : 1
		0	0		
Mg Cl ₂	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{1000}$	$\frac{1}{5000}$	H ₂ SO ₄	Mg : H ₂ = 1 : 1
		0	a ₁		
Mg Cl ₂	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{1000}$	$\frac{1}{5000}$	H ₂ SO ₄	
		0	a ₂ — a ₃		
H ₂ SO ₄	$\frac{1}{500}$	$\frac{1}{500}$	$\frac{1}{5000}$	Mg Cl ₂	
		0	?		
COOH		$\frac{1}{500}$	$\frac{1}{5000}$	Mg Cl ₂	
COOH	$\frac{1}{200}$	0	?		
HCl	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{500}$	$\frac{1}{5000}$	Mg Cl ₂	Mg : H = 2 : 1
		0	0		
Li Cl	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{1000}$	$\frac{1}{5000}$	H ₂ SO ₄	
		0	a ₁		
H ₂ SO ₄	$\frac{1}{500}$	$\frac{1}{500}$		Li Cl	H ₂ : Li = 10 : 1
		0			
COOH		$\frac{1}{500}$		Li Cl	
COOH	$\frac{1}{200}$	0			
HNO ₃	$\frac{1}{200}$	$\frac{1}{500}$		Li Cl	H : Li = 5 : 1
		0			

Eine weitere Versuchsreihe mit den *Salvinia*-Samenfäden wird hier angeführt.

Die Kapillarflüssigkeit enthält (Mol)		Die Außenflüssigkeit enthält (Mol)				Relative Reizwerte
Ca (NO ₃) ₂	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{1000}$	$\frac{1}{3000}$	$\frac{1}{5000}$	HCl	Ca : H = 1 : 1
		0	a ₁	a ₂		
Ca (NO ₃) ₂	$\frac{1}{500}$	$\frac{1}{5000}$	$\frac{1}{15000}$	$\frac{1}{25000}$	HCl	
		0	? — a ₁	a ₂		

Daraus ist ersichtlich, daß die relative Unterschiedsschwelle zwischen H-Ionen und Metallionen etwa 50 bei den *Equisetum*-Samenfäden und 30 bei den *Salvinia*-Spermatozoiden beträgt.

1) In dieser Versuchsreihe wurde in der Kapillarflüssigkeit jedesmal derselbe Stoff wie das Außenmedium in gleicher Konzentration hinzugefügt, um die Repulsivwirkung der H-Ionen auszugleichen.

Beiläufig sei bemerkt, daß die Sensibilität der Samenfäden für Metall- und H-Ionen durch chemotaktisch unwirksame Kationen in keinem Verhältnis abgestumpft wird¹⁾.

C. Die Alkaloide.

Die verschiedenen chemotaktisch wirksamen Alkaloidsalze wurden auf ihre gegenseitige Abstumpfung auf die Sensibilität der *Equisetum*-Samenfäden untersucht.

Die Kapillarflüssigkeit enthält (Mol)	Die Außenflüssigkeit enthält (Mol)			Relative Reizwerte
Chininhydrochlorid $\frac{1}{25}$	$\frac{1}{100}$?	$\frac{1}{300}$ a_2	$\frac{1}{500}$ a_3	Atropinsulfat Chin in ²⁾ : Atropin = 5 : 1
Chininhydrochlorid $\frac{1}{20}$	$\frac{1}{100}$ 0—?	$\frac{1}{500}$ a_3		Kokainhydrochlorid Chinin : Kokain = 5 : 1
Koniinhydrochlorid $\frac{1}{10}$	$\frac{1}{2000}$ 0	$\frac{1}{8000}$ a_1	$\frac{1}{4000}$ a_2	Chininhydrochlorid Koniin : Chinin = 1 : 10
Kokainhydrochlorid $\frac{1}{10}$	$\frac{1}{100}$ 0	$\frac{1}{300}$ a_1	$\frac{1}{500}$ a_2	Atropinsulfat Kokain : Atropin = 1 : 1
Skopolaminsulfat $\frac{1}{10}$	$\frac{1}{2000}$ 0	$\frac{1}{3000}$ a_1	$\frac{1}{4000}$ a_2	Chininhydrochlorid Skopolamin : Chinin = 1 : 10
Strychninnitrat $\frac{1}{20}$	$\frac{1}{100}$ 0	$\frac{1}{800}$ a_1	$\frac{1}{500}$ a_3	Atropinsulfat Strychnin : Atropin = 5 : 2
Strychninnitrat $\frac{1}{20}$	$\frac{1}{100}$ 0	$\frac{1}{800}$ a_1	$\frac{1}{500}$ a_3	Kokainhydrochlorid Strychnin : Kokain = 5 : 2
Morphinhydrochlorid $\frac{1}{10}$	$\frac{1}{100}$ 0	$\frac{1}{300}$?	$\frac{1}{500}$ a_2	Atropinsulfat Morphin : Atropin = 1 : 1
Ephedrinhydrochlorid $\frac{1}{10}$	$\frac{1}{1000}$ 0—?	$\frac{1}{1500}$ $a_1—a_2$	$\frac{1}{2000}$ a_2	Chininhydrochlorid Ephedrin : Chinin = 1 : 5
Emetinhydrochlorid $\frac{1}{20}$	$\frac{1}{1000}$ a_2	$\frac{1}{1500}$ a_1	$\frac{1}{2000}$ a_2	Chininhydrochlorid Emetin : Chinin = 1 : 2
Yohimbinhydrochlorid $\frac{1}{50}$	$\frac{1}{2000}$ 0	$\frac{1}{3000}$ a_1	$\frac{1}{4000}$ a_2	Chininhydrochlorid Yohimbin : Chinin = 1 : 2

Einige diesbezügliche Versuche mit den *Salvinia*- und *Isoetes*-Samenfäden werden in folgender Tabelle zusammengestellt.

1) Über die Wirkung der stark konzentrierten Lösungen vergl. man den II. Teil.

2) Der Kürze halber sind diese Bezeichnungen immer für die betreffenden Alkaloidsalze gebraucht.

Spermato- zoiden	Die Kapillarflüssigkeit enthält (Mol)		Die Außenflüssigkeit enthält (Mol)			Relative Reizwerte
<i>Sal- vinia</i>	Atropinsulfat	$\frac{1}{20}$	$\frac{1}{4000}$?	$\frac{1}{6000}$ a_1	$\frac{1}{8000}$ a_2	Chininhydrochlorid Atropin : Chinin = 1 : 10
	Chininhydrochlorid	$\frac{1}{200}$	$\frac{1}{500}$ 0	$\frac{1}{1000}$ a_1	$\frac{1}{2000}$ a_2	Bruzinhydrochlorid Chinin : Bruzin = 5 : 1
<i>Iso- etes</i>	Chininhydrochlorid	$\frac{1}{200}$	$\frac{1}{6000}$ 0	$\frac{1}{10000}$ a_1	$\frac{1}{12000}$ a_2	Bruzinhydrochlorid Chinin : Bruzin = 1 : 1
	Bruzinhydrochlorid	$\frac{1}{200}$	$\frac{1}{6000}$ 0	$\frac{1}{8000}$ a_1	$\frac{1}{10000}$ a_2	Chininhydrochlorid
	Chininhydrochlorid	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{20}$?	$\frac{1}{50}$ a_2	$\frac{1}{100}$ $a_2 - a_3$	Morphinhydrochlorid Chinin : Morphin = 100 : 1
	"	$\frac{1}{100}$	0	a_1	a_2	
	"	$\frac{1}{200}$	0	0	a_1	
	"	$\frac{1}{1000}$	0	0	0	
	Bruzinhydrochlorid	$\frac{1}{50}$	?	a_2	a_3	Bruzin : Morphin = 100 : 1
	"	$\frac{1}{100}$	0	a_1	a_3	
	"	$\frac{1}{200}$	0	?	a_2	

Die oben angeführten Versuchsreihen zeigen sehr deutlich, daß jedes beliebige chemotaktisch wirksame Alkaloid die Sensibilität der Samenfäden für ein anderes Alkaloid abstumpft und die dabei sich ergebenden Werte der relativen Unterschiedsschwelle etwa 30 bei *Equisetum*-, 20 bei *Salvinia*- und 50 bei *Isoetes*-Samenfäden betragen, was wohl mit den schon im vorigen Kapitel angegebenen Resultaten übereinstimmt.

Die chemotaktisch wirksamen Amine wirken auch gegen Alkaloide abstumpfend und vice versa, wie es die folgenden Versuchsreihen mit den *Equisetum*-Samenfäden zeigen.

Die Kapillarflüssigkeit enthält (Mol)		Die Außenflüssigkeit enthält (Mol)			Relative Reizwerte
Äthylaminhydrochlorid	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{3000}$ 0	$\frac{1}{4000}$ a_1	$\frac{1}{6000}$ a_2	Äthylamin : Chinin = 1 : 50
Allylaminhydrochlorid	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{2000}$ 0	$\frac{1}{3000}$ a_1	$\frac{1}{4000}$ a_2	Allylamin : Chinin = 1 : 20
Tetramethylen- diaminhydrochlorid	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{1000}$ 0	$\frac{1}{1500}$ a_1	$\frac{1}{2300}$ a_2	Tetramethylen- diamin : Chinin = 1 : 10
Chininhydrochlorid	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{100}$ 0			Trimethylen- diaminhydrochlorid Chinin : Trimethyl- diamin = 10 : 1
"	$\frac{1}{30}$	a_1			
"	$\frac{1}{20}$	$a_2 - a_3$			

Hierbei beträgt aber die relative Unterschiedsschwelle etwa 15. Es ist beiläufig zu bemerken, daß die nicht anlockend wirkenden Alkaloide und Stickstoffbasen keine solche abstumpfende Wirkung auf die Sensibilität der Samenfäden ausüben, so daß z. B. $\frac{1}{50}$ Mol Physostigminsulfat, Pilokarpinhydrochlorid, Propylaminhydrochlorid, $\frac{1}{10}$ Mol Pyridin usw. als Aufenthaltflüssigkeit der *Isoetes*-Samenfäden benutzt, die positive Reaktion der letzteren gegen $\frac{1}{1000}$ Mol Chininhydrochlorid, Bruzinhydrochlorid usw. nicht hemmen.

D. Äpfelsäure-Anionen gegen verschiedene Kationen und Alkaloide.

Der schon oben ausgesprochene Satz, daß die Reizbarkeit der Samenfäden durch Äpfelsäure- (und verwandte Dikarbonsäure-) Anionen auf einem ganz anderen Vorgang als die durch Kationen und Alkaloide erzeugte beruht, ergibt sich zunächst daraus, daß die beiden Kategorien angehörenden Stoffe, d. h. die genannten Anionen und Kationen, gegeneinander keine Abstumpfung der Sensibilität bedingen, wie aus folgender Versuchsreihe mit den *Salvinia*-Samenfäden deutlich hervorgeht.

Die Außenflüssigkeit enthält (Mol)		Die Kapillarflüssigkeit enthält (Mol)		Relative Reizwerte
Natriummalat	$\frac{1}{1000}$	$\frac{1}{10}$ CaCl ₂ (neben $\frac{1}{1000}$ Natriummalat)	a ₁ ¹⁾	Malat : Ca =
"	$\frac{1}{1000}$	$\frac{1}{100}$ " (" $\frac{1}{1000}$ ")	a ₃	10 : 1
"	$\frac{1}{1000}$	$\frac{1}{10}$ SrCl ₂ (" $\frac{1}{1000}$ ")	a ₃	Malat : Sr =
"	$\frac{1}{1000}$	$\frac{1}{100}$ " (" $\frac{1}{1000}$ ")	a ₂	50 : 1
Ca(NO ₃) ₂	$\frac{1}{100}$ ²⁾	$\frac{1}{1000}$ Natriummalat	a ₃	
SrCl ₂	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{1000}$ "	a ₃	

Hieraus ist ersichtlich, daß die sich in der Malatlösung befindlichen Samenfäden noch ganz prompt auf die Reizwirkung der Ca- oder Sr-haltigen Kapillarflüssigkeit reagieren, und vice versa. Das ist nur durch die Annahme erklärlich, daß die Reize von Malat- und Metallionen voneinander ganz unabhängig perzipiert werden, sonst müssen sie, wie wir bereits anderswo sahen, gegeneinander mit bestimmten relativen Unterschiedsschwellen abstumpfend wirken. Es sei ferner darauf hinzuweisen, daß hierbei die der diffusen

1) Die nebenbei auftretende Repulsivwirkung ist hier nicht berücksichtigt.

2) Diese Lösung, als Außenmedium angewandt, hemmt die Bewegungstätigkeit der Spermatozoiden nicht so stark wie in der Kapillare.

Reizwirkung der $\frac{1}{1000}$ Mol-Malatlösung ausgesetzten Samenfäden ganz gut den einseitigen topotaktischen Reiz der Ca- oder Sr-salzhaltigen Kapillarflüssigkeit perzipieren, die den gleichen oder sogar weitaus geringeren Reizwert wie das Außenmedium besitzt. Die vermeintliche Kompensation¹⁾ der anziehenden Wirkung der Außen- und Kapillarflüssigkeit besteht also bei der topotaktischen Reaktion in Wirklichkeit nicht. Daher ist es hierbei, wie schon gesagt, nicht unbedingt nötig, der Kapillarflüssigkeit denselben Stoff wie das Außenmedium hinzuzufügen.

Die dem obigen entsprechenden Versuche wurden mit den *Equisetum*-Samenfäden unter Benutzung der Malate und der verschiedenen chemotaktisch wirksamen Kationen ausgeführt. Es ergaben folgende Resultate.

Die Außenflüssigkeit enthält (Mol)	Die Kapillarflüssigkeit enthält (Mol)		Relative Reizwerte
Ammoniummalat	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{100}$ Ca Cl ₂	a ₃
		$\frac{1}{100}$ Ca (NO ₃) ₂	a ₃
		$\frac{1}{200}$ "	a ₃
		$\frac{1}{500}$ "	a ₂ ²⁾
		$\frac{1}{1000}$ "	a ₂
Natriummalat	$\frac{1}{500}$	$\frac{1}{100}$ "	a ₃
		$\frac{1}{500}$ "	a ₃
		$\frac{1}{1000}$ "	a ₂
Ca Cl ₂	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{100}$ Natriummalat	a ₃
Ca (NO ₃) ₂	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{200}$ "	a ₃
"	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{500}$ "	a ₃
"	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{1000}$ "	a ₃
Ammoniummalat	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{10}$ Li Cl (neben $\frac{1}{100}$ Ammoniummalat)	a ₂
"	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{100}$ Mg Cl ₂ (" $\frac{1}{100}$ ")	a ₂
Mg Cl ₂	$\frac{1}{500}$	$\frac{1}{100}$ Natriummalat	a ₃
"	$\frac{1}{500}$	$\frac{1}{200}$ "	a ₃
Na Cl	$\frac{1}{20}$	$\frac{1}{100}$ "	a ₃
"	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{100}$ "	a ₃

1) W. Rothert, Beobachtungen und Betrachtungen über taktische Reizerscheinungen. Flora, Bd. 88, 1901, S. 387. Eine solche Kompensation ist aber wohl bei der positiven Phobotaxis möglich. Vergl. hierzu auch H. Kniep, Untersuchungen über die Chemotaxis der Bakterien. Jahrb. f. wiss. Bot., Bd. XLIII, 1906, S. 230.

2) Die positive Topotaxis ist ganz sicher zu beobachten, aber wegen der am Kapillarmund stattfindenden positiven Phobotaxis gegen die Außenlösung (Malat) unterbleibt bisweilen die dauernde Ansammlung.

Hieraus muß man schließen, daß auch bei den *Equisetum*-Samenfäden die positive Reaktion gegen Malat-Ionen auf einem ganz anderen Reizvorgang als die gegen Metall-Ionen beruht. Dasselbe gilt auch der Beziehung zwischen den Reizbarkeiten durch Malat- und H-Ionen, wie aus nachfolgenden Resultaten ersichtlich ist.

Spermatozoiden von	Die Außenflüssigkeit enthält (Mol)	Die Kapillarflüssigkeit enthält (Mol)	Relative Reizwerte
<i>Equisetum</i>	Natriummalat $\frac{1}{2000}$	$\frac{1}{100}$ HCl	a_2 Malat : H
	" $\frac{1}{2000}$	" $\frac{1}{500}$	a_1 = 20 : 1
	" $\frac{1}{5000}$	$\frac{1}{100}$ HNO ₃	a_3
	" $\frac{1}{5000}$	$\frac{1}{200}$ "	a_2
	" $\frac{1}{5000}$	$\frac{1}{500}$ "	a_1
	H ₂ SO ₄ $\frac{1}{1000}$	$\frac{1}{100}$ Natriummalat (neben $\frac{1}{1000}$ H ₂ SO ₄)	a_3
	" $\frac{1}{5000}$	$\frac{1}{100}$ " (" $\frac{1}{1000}$ ")	a_3
<i>Salvinia</i>	Natriummalat $\frac{1}{500}$	$\frac{1}{200}$ HCl	a_2 Malat : H
	" $\frac{1}{500}$	$\frac{1}{400}$ COOH	a_2 = 15 : 1
	HCl $\frac{1}{500}$	$\frac{1}{100}$ Natriummalat	a_3
	" $\frac{1}{1000}$	$\frac{1}{100}$ "	a_3

Es erübrigt noch zu zeigen, daß die Reizbarkeit der Samenfäden durch Malat-Ionen auch von den durch Alkaloide hervorgerufenen, ganz unabhängig ist. Die experimentellen Belege dazu sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Spermatozoiden von	Die Außenflüssigkeit enthält (Mol)	Die Kapillarflüssigkeit enthält (Mol)	Relative Reizwerte
<i>Equisetum</i>	Ammoniummalat $\frac{1}{100}$	$\frac{1}{20}$ Chininhydrochlorid	a_3 Malat : Chinin = 10 : 1
	" $\frac{1}{100}$	$\frac{1}{10}$ Kokainhydrochlorid	a_3 Malat : Kokain = 50 : 1
	" $\frac{1}{100}$	$\frac{1}{20}$ Strychninnitrat	a_3 Mal. : Strychn. = 20 : 1
	" $\frac{1}{100}$	$\frac{1}{10}$ Atropinsulfat	a_3 Mal. : Atropin = 50 : 1
<i>Salvinia</i>	Natriummalat $\frac{1}{100}$	$\frac{1}{100}$ Chininhydrochlorid	a_3 Malat : Chinin = 15 : 1
	" $\frac{1}{500}$	$\frac{1}{100}$ "	a_3
	Bruzinhydrochlorid $\frac{1}{500}$	$\frac{1}{1000}$ Natriummalat	a_3 Mal. : Bruzin = 100 : 1
	" $\frac{1}{500}$	$\frac{1}{5000}$ "	a_2
<i>Isoetes</i>	Chininhydrochlorid $\frac{1}{1000}$	$\frac{1}{5000}$ "	a_2 Malat : Chinin = 10 : 1
	" $\frac{1}{1000}$	$\frac{1}{1000}$ "	a_3 Malat : Bruzin = 20 : 1
	Bruzinhydrochlorid $\frac{1}{500}$	$\frac{1}{5000}$ "	a_2
	" $\frac{1}{500}$	$\frac{1}{5000}$ "	a_2

Die obigen Versuche zeigen u. a. wiederum ganz klar, daß die schon von Malat-Ionen diffus gereizten Spermatozoiden noch ganz prompt auf die einseitige Reizung durch die weit schwächer wirkenden Alkaloid-Lösungen reagieren.

E. Metall- und H-Ionen gegen Alkaloide.

Es ist sehr interessant zu bemerken, daß die chemotaktische Reizbarkeit der Samenfäden durch die Kationen (d. h. Metall- und H-Ionen) durch Alkaloide abgestumpft wird und vice versa, so daß die Stoffe beider Kategorien einen gewissermaßen gemeinsamen Reizvorgang auslösen. Der Beweis dafür wird zunächst durch folgende Experimente mit den *Equisetum*-Samenfäden geliefert.

Die Außenflüssigkeit enthält	Die Kapillarflüssigkeit enthält		Relative Reizwerte
Kokainhydrochlorid $\frac{1}{50}$	$\frac{1}{1000}$ CaCl	0	Ca : Kokain = 50 : 1
CaCl ₂ $\frac{1}{1000}$	$\frac{1}{10}$ Morphinhydrochlorid	0	Ca : Morphin = 50 : 1
Morphinhydrochlorid $\frac{1}{50}$	$\frac{1}{1000}$ CaCl ₂	0	
MgCl ₂ $\frac{1}{500}$	$\frac{1}{50}$ Atropinsulfat (neben $\frac{1}{500}$ MgCl ₂)	0	Mg : Atropin = 5 : 1
" $\frac{1}{500}$	$\frac{1}{50}$ Morphinhydrochl. (neb. $\frac{1}{500}$ MgCl ₂)	0	Mg : Morphin = 5 : 1
Strychninnitrat $\frac{1}{200}$	$\frac{1}{100}$ HCl	0	Strychnin : H = 1 : 1
" $\frac{1}{200}$	$\frac{1}{200}$ "	0	
" $\frac{1}{200}$	$\frac{1}{500}$ "	0	

In welcher Weise hierbei sich die quantitativen Verhältnisse der gegenseitigen Abstumpfung gestalten, habe ich nicht näher untersucht. Einige orientierende Versuche ergaben aber außerordentlich kleine Werte der relativen Unterschiedsschwellen. Die Frage findet aber eine bestimmtere Beantwortung in nachfolgenden Versuchen mit den *Salvinia*-Samenfäden.

Die Außenflüssigkeit enthält (Mol)	Die Kapillarflüssigkeit enthält (Mol)		Relative Reizwerte
CaCl ₂ $\frac{1}{2000}$	$\frac{1}{100}$ Chininhydrochlorid	0	Ca : Chinin = 1 : 1
" $\frac{1}{2000}$	$\frac{1}{50}$ "	a ₁	
" $\frac{1}{2000}$	$\frac{1}{20}$ "	a ₂ —a ₃	
" $\frac{1}{1000}$	$\frac{1}{100}$ "	0	
" $\frac{1}{1000}$	$\frac{1}{50}$ "	0—?	

Die Außenflüssigkeit enthält (Mol)		Die Kapillarflüssigkeit enthält (Mol)		Relative Reizwerte
Ca Cl ₂	$\frac{1}{1000}$	$\frac{1}{20}$	Chininhydrochlorid a ₂ —a ₃	Ca : Chinin = 1 : 1
"	$\frac{1}{500}$	$\frac{1}{100}$	" 0	
"	$\frac{1}{500}$	$\frac{1}{50}$	" 0	
"	$\frac{1}{500}$	$\frac{1}{20}$	" 0	
Sr Cl ₂	$\frac{1}{2000}$	$\frac{1}{100}$	Chininhydrochlorid a ₃	Sr : Chinin = 1 : 5
"	$\frac{1}{2000}$	$\frac{1}{50}$	" a ₃	
"	$\frac{1}{2000}$	$\frac{1}{20}$	" a ₃	
"	$\frac{1}{1000}$	$\frac{1}{100}$	" a ₂	
"	$\frac{1}{1000}$	$\frac{1}{50}$	" a ₃	
"	$\frac{1}{1000}$	$\frac{1}{20}$	" a ₃	
"	$\frac{1}{500}$	$\frac{1}{100}$	" ()	
"	$\frac{1}{500}$	$\frac{1}{50}$	" a ₂	
"	$\frac{1}{500}$	$\frac{1}{20}$	" a ₃	
"	$\frac{1}{200}$	$\frac{1}{100}$	" 0	
"	$\frac{1}{200}$	$\frac{1}{50}$	" 0	
"	$\frac{1}{200}$	$\frac{1}{20}$	" a ₂	
"	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{100}$	" 0	
"	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{50}$	" 0	
"	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{20}$	" 0	
"	$\frac{1}{600}$	$\frac{1}{100}$	" a ₁	
"	$\frac{1}{300}$	$\frac{1}{50}$	" a ₁	
"	$\frac{1}{120}$	$\frac{1}{20}$	" a ₁	
HCl	$\frac{1}{5000}$	$\frac{1}{100}$	Chininhydrochlorid a ₂	Chinin : H = 1 : 1
"	$\frac{1}{5000}$	$\frac{1}{500}$	" 0	
"	$\frac{1}{3000}$	$\frac{1}{100}$	" ?	
"	$\frac{1}{1000}$	$\frac{1}{100}$	" 0	

Aus obigem geht ganz klar hervor, daß hierbei die relative Unterschiedsschwelle zwischen Metall-Kationen und Alkaloiden 30 beträgt.

F. OH-Ionen gegen Malat-Ionen und Alkaloide.

Die *Isoetes*-Samenfäden weisen, wie oben angegeben, eine wohl ausgebildete Reaktionsfähigkeit gegen die OH-Ionen auf. Es fragt sich nun, ob man es hierbei mit einer besonderen, von anderen unabhängigen Sensibilität zu tun hat oder nicht. Diesbezügliche Experimente sind in folgender Tabelle zusammengestellt.

Die Außenflüssigkeit enthält (Mol)	Die Kapillarflüssigkeit enthält (Mol)				Relative Reizwerte
Natriummalat $\frac{1}{10\,000}$	$\frac{1}{2000}$	Na OH (neben	$\frac{1}{10\,000}$	Natriummalat) a_3	Malat : OH = 2 : 1
" $\frac{1}{5000}$	$\frac{1}{2000}$	" ("	$\frac{1}{5000}$	") a_3	
" $\frac{1}{1000}$	$\frac{1}{2000}$	" ("	$\frac{1}{1000}$	") a_3	
NaOH $\frac{1}{10\,000}$	$\frac{1}{10\,000}$	Natriummalat			a_2
" $\frac{1}{10\,000}$	$\frac{1}{5000}$	"			a_2
" $\frac{1}{10\,000}$	$\frac{1}{1000}$	"			a_3
" $\frac{1}{2000}$	$\frac{1}{10\,000}$	Natriummalat (neben $\frac{1}{2000}$ Na OH)			a_2
" $\frac{1}{2000}$	$\frac{1}{5000}$	" ("	$\frac{1}{2000}$	") a_2	
" $\frac{1}{2000}$	$\frac{1}{1000}$	" ("	$\frac{1}{1000}$	") a_3	

Die obigen Versuche zeigen, daß Malat- und OH-Ionen keine gegenseitige Abstumpfung der Sensibilität der Samenfäden bedingen. Daraus muß man schließen, daß diese beiden Anionen differente, voneinander unabhängige Reizvorgänge auslösen. Dasselbe gilt freilich für die Beziehung zwischen der Reizwirkung der OH-Ionen und der chemotaktisch wirksamen Alkaloide.

Die Außenflüssigkeit enthält (Mol)	Die Kapillarflüssigkeit enthält (Mol)				Relative Reizwerte
NaOH $\frac{1}{2000}$	$\frac{1}{500}$	Atropinsulfat (neben $\frac{1}{2000}$ NaOH)	a_2		OH : Atropin = 20 : 1
" $\frac{1}{2000}$	$\frac{1}{200}$	" (" $\frac{1}{2000}$ ")	$a_2 - a_3$		
" $\frac{1}{2000}$	$\frac{1}{1000}$	Bruzinhydrochlorid (neb. $\frac{1}{2000}$ NaOH)	a_2		OH : Bruzin
" $\frac{1}{2000}$	$\frac{1}{200}$	" (" $\frac{1}{2000}$ ")	a_3		= 10 : 1
" $\frac{1}{2000}$	$\frac{1}{1000}$	Chininhydrochlorid (" $\frac{1}{2000}$ ")	a_2		OH : Chinin
" $\frac{1}{2000}$	$\frac{1}{200}$	" (" $\frac{1}{2000}$ ")	a_3		= 10 : 1
Atropinsulfat $\frac{1}{200}$	$\frac{1}{2000}$	Na OH (neben $\frac{1}{200}$ Atropinsulfat)	a_2		
Chininhydrochlorid $\frac{1}{1000}$	$\frac{1}{2000}$	" (neb. $\frac{1}{1000}$ Chininhydrochlorid)	a_2		

Hieraus ist ersichtlich, daß die in einer $\frac{1}{2000}$ Mol-NaOH-Lösung befindlichen Samenfäden ganz gut auf den einseitigen Reiz der Kapillarflüssigkeiten reagieren, welche einen gleichen oder sogar weit geringeren Reizwert wie die Außenlösung besitzen.

Faßt man die in diesem Kapitel angeführten Versuchsergebnisse zusammen, so ist vor allem klar, daß man bei den Pteridophyten-Samenfäden wenigstens 3 Kategorien von chemotaktischen Sensibilitäten unterscheiden muß, nämlich:

1. Die Sensibilitäten für die Anionen der Äpfelsäure und der verwandten chemotaktisch wirksamen Dikarbonsäuren.
2. Diejenige für OH-Ionen (nur bei *Isoetes*).
3. Diejenigen für die Kationen (Metall- und H-Ionen) und Alkaloide.

Die chemotaktischen Sensibilitäten der obigen drei Kategorien sind voneinander gänzlich unabhängig, wie der Mangel der gegenseitigen Beeinflussung kundgibt. Innerhalb jeder Kategorie weisen aber die Sensibilitäten der Samenfäden mehr oder minder gemeinsame Züge auf. Wenn nun ein Stoff (a) gegen einen anderen (b), ungeachtet der Differenz in den relativen Reizwerten, ebenso stark wie der gleichnamige (b) abstumpfend wirkt, so kann man mit größter Wahrscheinlichkeit schließen, daß die Reizwirkung dieser beiden Stoffe bereits im allerersten Vorgang der Chemoperzeption koinzidiert. Das ist in der Tat der Fall, wie wir schon sahen, bei der abstumpfenden Wirkung der Zitronensäure gegen Maleinsäure (*Salvinia*) und die der Sr-Ionen gegen Ca-Ionen (*Salvinia* und *Equisetum*). In den meisten übrigen Fällen konnten die konstanten Werte der Unterschiedsschwelle zwischen zwei beliebigen Reizstoffen, die natürlich innerhalb einer und derselben Kategorie liegen müssen, erst durch Bezugnahme auf die relative Größe der chemotaktischen Reizwerte aufgestellt werden; oder in anderen Worten: der Grad der abstumpfenden Wirkung geht mit der Stärke der anlockenden Wirkung Hand in Hand. Die hierbei sich ergebenden Werte der „relativen“ Unterschiedsschwelle stimmen aber gewöhnlich mit denen, welche die Versuche mit einer und derselben Reizstofflösung als Außen- und Kapillarflüssigkeit ergeben, beinahe überein. Unter Umständen fallen jedoch jene Werte sehr verschieden von diesen aus (wie z. B. bei den Versuchen mit Metallionen gegen Alkaloide bei *Equisetum*). Besonders in diesen zuletzt angeführten Fällen konnte freilich der Schluß auf die Identität der Sensibilitäten nicht mehr zwingend sein. Dennoch, glaube ich, kann man mit gewissem Recht betonen, daß im allgemeinen die Reizvorgänge, die durch zwei beliebige, einer und derselben der oben angestellten Kategorien angehörende Stoffe ausgelöst werden, miteinander, wenn auch nicht im allerersten Perzeptionsakt, doch schon in den darauf unmittelbar folgenden Gliedern der Reizkette zusammenfallen, so daß die Interferenz der Reizprozesse beider Stoffe die gegenseitige Abstumpfung zur Folge haben muß. Oder in anderen Worten: die chemisch verwandten oder die in chemischen Wirkungen nahe stehenden

Körper lösen, wenn auch nicht immer genau dieselben, doch beinahe gleichartigen Reizvorgänge aus. Eine total gesonderte Sensibilität für jeden einfachen Reizstoff, was nach Kniep¹⁾ den von ihm untersuchten Bakterien zukommen soll, konnte hier nicht nachgewiesen werden.

1) Hans Kniep, Unters. üb. d. Chemotaxis von Bakterien. Jahrb. f. wiss. Bot., Bd. XLIII, 1906, S. 265.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Jahrbücher für wissenschaftliche Botanik](#)

Jahr/Year: 1911

Band/Volume: [49](#)

Autor(en)/Author(s): Shibata Keita

Artikel/Article: [Untersuchungen über die Chemotaxis der Pteridophyten-Spermatozoiden. 1-60](#)