Über eine physiologische Kationenreihe.

Von

N. K. Koltzoff,

Professor an der Stadtuniversität-Chaniavsky und an der Frauenhochschule Moskau.

(Mit 3 Textfiguren und Tafel IV.)

I. Einleitung.

Neulich habe ich in einer Arbeit, welche im Archiv für Zellforschung¹⁾ erschien, die Wirkung von verschiedenen Salzlösungen auf die Lebensfähigkeit und die Kontraktilität eines marinen Infusoriums (*Zoothamnium alternans*) beschrieben. Da dieses Objekt in mehreren Beziehungen sehr günstig für verschiedene besonders physiko-chemische Experimente erschien, so führte ich seitdem meine Untersuchungen weiter. Hier will ich einige Resultate meiner neueren Experimente, welche in den zoologischen Laboratorien von Neapel und Villafranca ausgeführt wurden, veröffentlichen. Um meine Darstellung auch für den Leser, welcher meine frühere Arbeit nicht kennt, verständlich zu machen, will ich die Hauptresultate dieser Arbeit im folgenden kurz zusammenstellen.

Meiner Ansicht nach bildet jede Zelle einen mehr oder weniger komplizierten Mechanismus, welcher aus verschiedenen Kolloiden, und zwar sowohl aus den Solen wie auch aus den Gelen besteht. Die Hauptmasse des Protoplasmas bilden leichtflüssige Solen, in denen die meisten Lebensprozesse — der Stoffwechsel, die Bewegung und die Reizleitung — vor sich gehen. Den protoplasmatischen Körper einer Amöbe dürfen wir uns aus solchen dünnflüssigen Solen allein bestehend vorstellen. In allen anderen Fällen aber, wo eine Zelle oder irgendein Teil der Zelle eine bestimmte äussere Gestalt hat, ist es unbedingt notwendig, besondere aus Gelen bestehende Zell-

1) N. Koltzoff, Studien über die Gestalt der Zelle. Teil III. Untersuchungen über Kontraktilität des Stammes von *Zoothamnium alternans*. Arch. f. Zellforschung Bd. 7. 1911.

skelette zu suchen, welche dem flüssigen Protoplasma eine beständige Gestalt verleihen und die Richtung verschiedener Strömungen, sowohl der geordneten Bewegungen, wie auch der Reizleitung in den Nerven, bestimmen. Diese festen Gelskelette finden wir zuweilen in der Form einer ununterbrochenen Zellmembran — das ist der Fall bei den meisten Pflanzenzellen — oder es sind feste Fibrillen, sehr oft Spiralfibrillen, eventuell Netze, die auf der Oberfläche der Zelle, des Kerns oder irgendeiner Plasmaschicht liegen und nach dem Plateau'schen Prinzip die Gestalt der betreffenden flüssigen Tropfen bestimmen, ohne ihre Bewegungsfähigkeit zu stören. Nach dieser letzteren Art ist besonders die merkwürdige Mischung von Beständigkeit und Veränderlichkeit, das heisst der Merkmale der festen und flüssigen Aggregatzustände, die wir bei einer Muskelzelle, einer Zilie, einer Nervenfaser, einer Chromosome usw. bemerken, zu erklären¹⁾.

Auf dieselbe Weise versuche ich auch die Struktur des Vortizellidenstieles, welcher das Objekt meiner nachfolgenden Untersuchungen ist, zu verstehen. *Zoothamnium alternans* ist ein koloniales festsitzendes Infusorium, dessen Kolonie das Aussehen einer ca. 1 mm langen Feder hat und aus dem mit dem proximalen Ende festangeklebten Hauptstamm und zwei alternierenden Reihen mit glockenartigen Individuen bedeckten Seitenzweigen besteht. Der Hauptstamm wie die Seitenzweige sind kontraktile und werden von Zeit zu Zeit plötzlich korkenzieherartig zusammengezogen und dann wieder langsam ausgebreitet. Der ganzen Länge nach werden sie aus folgenden Teilen zusammengesetzt (Fig. 1). Die äussere hohle zylindrische Hülle (*e*) schliesst einen Kanal ein, in welchem der Achsenfaden oder das sogenannte Myonem frei hängt. Das letztere stellt ein kompliziertes Gebilde dar und besteht seinerseits aus der inneren Hülle (*i*), die von Protoplasma angefüllt wird, welches in zwei Schichten differenziert ist: die äussere körnige Plasmaschicht bezeichne ich als Thekoplasma (*t*), den stark lichtbrechenden Achsialstrang als Kinoplasma (*k*). An der Grenze zwischen Theko- und Kinoplasma fassen feine Längsfibrillen (*f*) Stellung. Die beiden Hüllen,

1) Die Darlegung dieser Theorie siehe ausser der oben angeführten Arbeit besonders im ersten Teil meiner „Studien über die Gestalt der Zelle“ (Arch. f. mikrosk. Anat. Bd. 67 S. 365—572, 1905), auch in einem Artikel „Zur Frage über Zellgestalt“ (Anat. Anzeiger Bd. 41 S. 183—203, 1912). Ich benutze hier die Gelegenheit, um einige Druckfehler im letzten Artikel zu verbessern: auf S. 198 Zeile 23, 29 und 37, und auf S. 200 Zeile 3, ist statt „kg/cm“ — „kg“ zu lesen.

die äussere und die innere, bilden zusammen mit den Fibrillen das feste Gelskelett, während das Theko- und Kinoplasma sich in flüssigem Aggregatzustande befinden, das heisst mehr oder weniger dünnflüssige Solen sind.

Die flüssige Kino- und Thekoplasmasäule strebt immer danach, sich der Kugelgestalt zu nähern oder in kugelige Tropfen zu zerfallen; die elastischen Teile dagegen streben ihrem natürlichen, namentlich gestrecktem Zustande zu. Durch verschiedene Experimente versuche ich zu beweisen, dass die varrierende Grösse, welche diesen oder einen anderen Gleichgewichtszustand bedingt, die Oberflächenspannung auf der Grenze Kinoplasma - Thekoplasma ist. Wird die Oberflächenspannung erhöht, so nähert sich die Kinoplasmasäule der Kugelgestalt, und diese „ungeordnete“ Bewegung wird wegen des Anteils des formbestimmenden festen Skeletts in eine „geordnete“ korkenzieherartige Kontraktion des Stieles übergeführt, bei der Erniedrigung der Oberflächenspannung dagegen wird der Stiel ausgestreckt.

Was die Ursache der Veränderung der Oberflächenspannung anbetrifft, so spreche ich die Vermutung aus, dass hier die Wanderung der Ca-Ionen die Hauptrolle spielt. Durch Adsorption der

Fig. 1.

Ca-Ionen aus Seewasser wird die Oberflächenspannung Kinoplasma-Thekoplasma erniedrigt und der Stiel ausgestreckt. Durch irgendwelche chemische Prozesse können freie Ca-Ionen extrahiert, d. h. in eine unlösliche oder undissoziierbare Verbindung übergeführt werden; dann wird die Oberflächenspannung erhöht, und der Stiel kontrahiert sich.

Die grosse Bedeutung der Ca-Ionen für das Leben des Stieles habe ich durch mehrere Experimente bewiesen. Wenn ich eine Kolonie von *Z. alternans* aus Seewasser in eine isotonische Lösung von NaCl überführe, so stirbt die Kolonie in wenigen (15—26) Minuten ab. Der Zusatz einer kleinsten Menge von CaCl_2 (bis 0,0005 no) genügt, um die giftige Wirkung von NaCl abzuschwächen. Kaliumchlorid und Ammoniumchlorid verhalten sich ungefähr wie Natriumchlorid; dagegen nähern sich Magnesium- und Strontiumchlorid dem Kalziumchlorid.

Nachdem ich diese Tatsachen konstatiert und beschrieben habe, schien es mir wünschenswert, meine Untersuchungsmethodik etwas zu vervollkommen, um genauere Zahlenwerte zu erhalten, welche für die grosse Frage über physiologische Ionenwirkung eine Bedeutung haben könnten. Die physiologische Wirkung verschiedener Kationen und Anionen wurde in der letzten Zeit von mehreren Seiten untersucht mit untereinander zum Teil widersprechenden Resultaten. Zuerst hat Sidney Ringer bei Untersuchung der Muskeltätigkeit gezeigt, dass eine physiologische Lösung, um die normale Blutflüssigkeit zu ersetzen, nicht nur denselben osmotischen Druck, sondern auch dieselbe Ionenzusammensetzung (Na, K, Ca) zu haben braucht. Für die Entwicklung der Eier von Seeigeln zu Larven stellt Kurt Herbst fest, dass Na, K, Ca, Mg, Cl, SO_4 , HCO_3 und OH dazu unentbehrlich sind, und dass die Kationen resp. Anionen jeder Art hier eine spezifische Wirkung haben. Mannigfaltige Lebensprozesse sind in dieser Beziehung von Jacques Loeb untersucht: die Entwicklung der Eier und Embryone von einem Seefisch (*Fundulus*), die Schirmkontraktion bei Medusen, die Erregung der Muskeln und Nerven, die Cytolyse befruchteter Seeigeleier usw.; überall fand der Autor die giftige Wirkung reiner NaCl-Lösungen und ihre Entgiftung durch Ca und einige andere Kationen. Diesen bahnbrechenden Entdeckungen folgten im letzten Jahrzehnt zahlreiche Untersuchungen mehrerer Forscher, welche die Frage über die physiologische Bedeutung der Ionen in drei verschiedenen Richtungen klar zu stellen versuchten.

Einige Autoren, dem Beispiel Kurt Herbst's folgend, studieren die spezifische Rolle einzelner Ionenarten (besonders Ca, Mg, K usw.) bei gewissen Lebensprozessen. Andere studieren die Fälle des von Loeb entdeckten Antagonismus zwischen toxischen und antitoxischen Ionen, und wieder andere versuchen verschiedene Ionen ihrer physiologischen Wirkung nach in gesetzmässige Reihen zu ordnen. Durch alle diese Arbeiten ist die hohe Bedeutung der Ionen für die meisten physiologischen Prozesse ausser Zweifel gestellt; was aber Einzelheiten anbetrifft, so sind die gewonnenen Resultate keineswegs übereinstimmend. Dessenungeachtet fehlt es schon jetzt nicht an Bestrebungen, die tatsächlichen Befunde auf eine allgemeinere theoretische Grundlage zu stellen und sie besonders mit physiko-chemischen Anschauungen in Zusammenhang zu bringen. So hat zuerst Jacques Loeb selbst die Vermutung ausgesprochen, dass der von ihm festgestellte Ionenantagonismus dem grossen physiko-chemischen Unterschied zwischen ein-, zwei- und mehrwertigen Ionen entspricht. Demselben Forscher verdanken wir auch die Anschauung, dass im Grunde aller hier beschriebenen Erscheinungen die Wechselbeziehung zwischen anorganischen Ionen und Protoplasmakolloiden liegt. Diese Idee ist besonders in den Arbeiten von R. Höber hervorgehoben und weiter entwickelt worden, welcher die betreffenden physiologischen Prozesse in Parallele mit der Fällbarkeit gewisser Kolloide unter Wirkung entsprechender Ionen stellt. Noch weitere Verallgemeinerung finden wir bei Mathews. Nach ihm fällt die Reihe der komparativen physiologischen Wirkung verschiedener Ionen (besonders der giftigen Wirkung der Schwermetallionen auf die Entwicklung von *Fundulus*-eiern) in allen Einzelheiten vollständig mit der Reihe der elektrolytischen Lösungsdrucke zusammen. Sobald der osmotische Druck, der in allen physiologischen Erscheinungen eine so grosse Rolle spielt, in Einklang mit den wichtigsten physiko-chemischen Eigenschaften der Lösungen gebracht wird, so stehen wir auch hier vor einer ebenso allgemeinen Gesetzmässigkeit. Diese Ansicht wird besonders von J. Traube näher ausgeführt. Nach diesem Forscher bestimmt die Zahl der Moleküle resp. Ionen nur einen Teil der physiko-chemischen Eigenschaften der Lösungen. Der osmotische Druck ist für ihn nur „Kapazitätsfaktor“ und wird durch „die Zahl der gelösten Teilchen, welche wir als gleichartig voraussetzen wollen“ bedingt; den „Intensitätsfaktor“ aber, d. h. „den Druck, welchen die Summe der

gelösten Stoffteilchen auf die Systemlösung ausübt“¹⁾ nennt Traube den Haftdruck. Der „Haftdruck“ wird in erster Linie beim Messen der Oberflächenspannung der isomolekularen Lösungen bestimmt. Den Reihen von verschiedenen Anionen und Kationen, welche nach ihrem derartig bestimmten Haftdruck geordnet sind, entsprechen die Reihen der betreffenden Ionen nach ihrem Lösungsdruck, nach der Kompressibilität, nach dem Diffusionskoeffizienten, nach der inneren Reibung usw. und nach der Wirkung bei verschiedenen physiologischen Prozessen.

Aus dem Vorhergesagten folgt, dass in unserer Zeit es sich wirklich lohnt, die physiologische Wirkung verschiedener Ionen in isomolekularen Lösungen zu untersuchen, besonders in dem Falle, wo es möglich ist, mehr oder weniger genaue zuverlässige Zahlenwerte festzustellen. Bis jetzt gelang es nur für sehr wenige physiologische Prozesse, und sehr oft beschränkten sich Physiologen damit, zu konstatieren, dass die Ionen einer Art eine grössere physiologische Wirkung haben als die einer anderen. Weiter ist es wichtig, solche physiologischen Prozesse zu untersuchen, in welchen die Ionenlösungen direkt auf das Protoplasma einzelner Zellen wirken und nicht auf komplizierte Organe und Gewebe, wie Muskeln oder Nerven, da hier die Wirkung der Lösungen viel zu verwickelt ist. Das Objekt meiner Untersuchungen (der Stiel von *Zoothamnium alternans*) entspricht diesen beiden Bedingungen. Die Lösungen wirken hier direkt auf die Zellen; was aber die Genauigkeit der von mir erhaltenen Zahlenwerte anbetrifft, so will ich hier meine Untersuchungsmethodik ausführlicher beschreiben.

Für jedes Experiment nehme ich eine Anzahl (ca. 15) intakter Kolonien von *Zoothamnium* in reinem Seewasser. Dann bereite ich ca. 50 ccm der Salzlösung, deren Wirkung zu untersuchen ist. Die Lösung soll ungefähr isosmotisch dem Seewasser sein; gewöhnlich nehme ich zur Untersuchung 0,5 no²⁾ Lösungen von Salzen, deren Molekül in der Lösung in zwei Ionen zerfällt (wie NaCl), und 0,4 no Lösungen von Salzen, deren Molekül in drei Ionen zerfällt (wie CaCl₂). Alle diese Lösungen sind nicht genau isosmotisch und im Vergleich mit Seewasser alle etwas hypotonisch. In meiner früheren Arbeit

1) J. Traube, Der Haftdruck. Verhandl. d. deutsch. physik. Gesellsch. Bd. 10 S. 885. 1908.

2) Hier, wie auch weiter, bedeutet „no“ ein Gramm-Molekül in 1 Liter.

aber habe ich festgestellt, dass die Zoothamnien eine Veränderung, besonders die Verminderung des osmotischen Druckes, sehr gut vertragen und sogar im Seewasser, das mit demselben Quantum destillierten Wassers verdünnt ist, sehr gut über 24 Stunden leben. Fünf Glasschalen wurden mit je ca. 10 ccm vorbereiteter Lösung gefüllt. Mit einer Pipette nehme ich die Kolonien aus dem Seewasser heraus und bringe sie in die erste Schale; dabei wird die Zeit in Minuten bemerkt. Nach rascher Durchmischung mit einer anderen sauberen Pipette bringe ich die Kolonien in die zweite Schale usw. Ich nehme an, dass nach fünf solcher Durchspülungen die Objekte sich in reiner Lösung befinden. Das Übertragen muss rasch durchgeführt werden, und nach 5—7 Minuten untersuche ich schon die Kolonien auf dem Objektträger, unter dem Deckglase, welches auf kleine Deckglasbrüche gelegt ist. Unter der Präparierlupe wird die Lage jeder einzelnen Kolonie rasch gezeichnet und jeder eine bestimmte Nummer gegeben. Dann untersuche ich mit stärkerer Vergrößerung fortwährend die Kolonien und kehre zu jeder in wenigen Minuten zurück, um den Moment des „Kinoplasmazerfalls“ nicht zu versäumen. Dieser Prozess — der Zerfall des Kinoplasmas — ist für meine Untersuchungen sehr wichtig. In den meisten Fällen ist es kaum möglich, den Augenblick des Todes eines Organismus oder einer Zelle genau zu bestimmen, da mit dem Tode verschiedene Lebensprozesse nicht gleichzeitig sistieren oder in Unordnung gebracht werden. Hier aber wähle ich statt des Todes einen ganz bestimmten, leicht bemerkbaren Prozess, der zur vollständigen Lähmung des ganzen Stieles führt.

In einem lebenden Stiele sieht das Kinoplasma wie eine ununterbrochene Säule aus. Bei der Zusammenziehung (wegen Steigerung der Oberflächenspannung) wird diese flüssige Säule kürzer und dicker und wegen der formbestimmenden Wirkung des elastischen Skelettes wird sie spiralartig zusammengerollt; dann wird sie bei der Lähmung des Stieles (wegen Verminderung der Oberflächenspannung) wieder ausgestreckt. Beim Absterben aber wird diese Kinoplasmasäule sehr stark kontrahiert. Diesen Zustand nenne ich „admortale Kontraktion“, die im Gegensatz zur gewöhnlichen Zusammenziehung eine irreversible Reaktion darstellt. Allem Anschein nach steigt hier die Oberflächenspannung des Kinoplasmas sehr hoch und auf anormale Weise. Wenige Augenblicke nach dieser admortalen Kontraktion zerfällt die flüssige Kinoplasmasäule, wahrscheinlich wegen einer neuen sehr starken Steigerung der Oberflächenspannung in eine Tropfenreihe

(Fig. 2); der vorher kontrahierte Stiel wird plötzlich vollständig ausgestreckt und bleibt seitdem selbstverständlich unbeweglich. Allem Anscheine nach werden die Kolloiden des Kinoplasmas irreversibel gefällt.

Gewöhnlich geschieht der Zerfall des Kinoplasmas sehr schnell, und es macht keine Schwierigkeiten, diesen Moment in Minuten zu notieren. Nur in wenigen besonderen Fällen (z. B. unter Wirkung gewisser Anionen, wie SO_4 und anderer) wird der Kinoplasmazerfall verlangsamt und kann sogar ganz ausbleiben. Hier ist es kaum möglich, den Zeitpunkt des Todes genau zu bestimmen.

Es ist sehr wichtig, für die Lösungen gutes destilliertes Wasser zu haben. Gewöhnlich habe ich doppelt destilliertes Wasser gebraucht, welches zum zweitenmale in Glasgefäßen destilliert wurde, seine Leitfähigkeit aber habe ich leider nicht bestimmt. Die meisten Salze bekam ich von Merck (Darmstadt) oder Kahlbaum (Berlin). Gewöhnlich waren die Salze „pro analysi“ bezeichnet, zum Teil auch mit Prüfschein. Selbstverständlich war auch beim Reinigen des Glases peinliche Sauberkeit notwendig; dieser Teil der Arbeit nahm die meiste Zeit in Anspruch.

Es wird unten gezeigt, dass die Temperatur einen sehr grossen Einfluss auf die Reaktionszeit hat. Leider war es unmöglich, das ganze Experiment im Termostaten zu machen. Ich notierte gewöhnlich die Lufttemperatur, die Temperatur der Stammlösung und die Temperatur der Lösung in der letzten Schale; der Unterschied zwischen diesen drei Werten beträgt meistens $0,5-1^\circ \text{C.}$, ich nahm den Mittelwert.

Fig. 2.

Wie bei allen physiologischen Experimenten, so auch hier, sind individuelle Schwankungen nicht zu vermeiden. Es gibt keine zwei in allen Beziehungen gleichen Zellen, keine zwei gleiche Zoothamnium-Kolonien. Die eine ist jünger als die andere, weniger gefüttert oder mehr durch vorherige Tätigkeit erschöpft. Sogar dem äusseren Ansehen nach sind die Stämme sehr verschieden, mehr oder weniger

dick, mit vielen und mit wenigen Seitenzweigen, mit mehreren oder kaum merkbaren Körnungen in Thekoplasma. Schon wegen der verschiedenen Dicke der Kinoplasmasäule kann die Oberflächenspannung nicht in allen Fällen gleich sein. Auch semipermeable Thekoplasma können verschiedene Dicke haben und können so nicht eine beständige Durchlässigkeit besitzen. Deswegen bekommt man bei jedem Experiment für einzelne Kolonien verschiedene Werte, und es ist nötig, Mittelwerte zu berechnen, also möglichst zahlreiche Kolonien bei jedem Experiment zu untersuchen. Das ist ein unvermeidlicher Nachteil jedes physiologischen Experimentes, da die Organismen, eventuelle Zellen, nicht gleich sein können und dürfen.

II. Die Wirkung einzelner Elektrolyte auf die Lebensfähigkeit des Zoothamniumstieles.

1. Kaliumchlorid.

In meiner letzten Arbeit konnte ich über die Wirkung 0,5 no KCl-Lösungen auf Zoothamnium alternans nur eins mitteilen, nämlich dass sie sich von der Wirkung 0,5 no NaCl kaum unterscheidet: die Kolonien halten es in diesen Lösungen nur ca. 20 Minuten aus, und dann zerfällt das Kinoplasma in Tropfen. Als ich im Winter 1911 dieselben Experimente in Villafranca wiederholt hatte, war ich erstaunt, viel höhere Werte zu erhalten. Die Erklärung dieser Abweichung wurde aber bald in der Temperaturdifferenz gefunden. Seitdem habe ich eine Anzahl Experimente angestellt mit dem speziellen Zweck, den Einfluss der Temperatur auf die Reaktionszeit zu bestimmen.

Bei Durchmusterung der Tab. I (S. 336) findet man vielleicht, dass bei einigen Experimenten die Zahlenwerte für die einzelnen Kolonien in viel zu weiten Grenzen voneinander abweichen, und dass deswegen die Berechnung des Mittelwertes zu künstlich erscheint. So ist beim Experiment 2 der minimale Wert 16, der maximale 70. Es ist aber zu bemerken, dass in dieser Beziehung das genannte Experiment eine Ausnahme bildet. Möge man andererseits in jeder Reihe den maximalen und minimalen Wert als zufällige Abweichungen resp. Anomalien ganz ausser acht lassen, und sofort werden die Werte der Reihe viel mehr stimmend erscheinen, der mittlere Wert aber bleibt beinahe unverändert. Es folgt daraus, dass wir wirklich recht haben, diese Mittelwerte zu berechnen.

Tabelle I.

Wirkung der 0,5 no KCl-Lösung.

Nummer des Ex- peri- mentes	Temp. ° C.	Anzahl der Kolo- nien	Zeit bis zum Zerfallen des Kino- plasmas in Minuten		v = Ge- schwindig- keit ¹⁾ der Reaktion
			a) für die einzelnen Kolonien	b) Mittel	
1	14—15	13	24, 32, 32, 34, 34, 38, 38, 39, 40, 41, 42, 42, 50	37	9,6
2	14—15	9	16, 22, 25, 25, 32, 32, 38, 40, 70	35	10,3
3	14—15	5	34, 34, 34, 34, 34	34	10,6
4	15	16	25, 25, 25, 30, 30, 30, 30, 30, 33, 39, 39, 39, 39, 42, 42, 45	34	10,6
5	17,5	8	20, 23, 23, 23, 24, 26, 28, 35	25	14,4
6	18	8	15, 19, 21, 21, 23, 26, 31, 35	24	15,0
7	18	12	18, 19, 19, 20, 20, 21, 21, 22, 22, 23, 24, 25	21	17,1
8	19	14	18, 20, 20, 20, 22, 24, 24, 26, 26, 27, 28, 29, 29, 38	25	14,4
9	19	10	13, 13, 16, 18, 19, 21, 22, 25, 28, 29	20,4	17,6
10	19,5	5	14, 14, 20, 24, 30	20,4	17,6
11	20,5	9	14, 15, 15, 18, 19, 20, 20, 20, 22	19	19,0
12	21	19	11, 11, 13, 14, 15, 16, 16, 16, 17, 18, 19, 21, 21, 22, 22, 22, 23, 23, 24	18	20,0
13	22	20	11, 13, 13, 14, 15, 15, 15, 15, 15, 15, 16, 16, 16, 17, 18, 19, 20, 25, 26, 27	17,5	20,6
14	23	12	11, 12, 14, 16, 16, 18, 20, 21, 21, 22, 22, 28	18,5	19,5
15	23	13	15, 15, 15, 17, 17, 18, 18, 18, 18, 19, 20, 24, 26	18,5	19,5

Beim Vergleich der zusammengestellten Resultate ist ganz unverkennbar, dass dem Steigen der Temperatur auch das Steigen der Reaktionsgeschwindigkeit entspricht, und zwar im Bereich von 8—9° steigt die Geschwindigkeit von 9,6 auf 19,5 — sie wird also mehr als verdoppelt. Seit den klassischen Untersuchungen von van't Hoff wissen wir, dass genau ebenso die Temperatur auf die Geschwindigkeit aller chemischen Reaktionen wirkt; auf je 10° vergrößert sich die Geschwindigkeit zwei- bis dreimal oder $Q_{10} = 2-3$. Besonders ist im letzten Jahrzehnt dieselbe Reaktions-Geschwindigkeit-Temperatur-

1) In dieser Tabelle, wie auch auf allen anderen, wurde als willkürliche Einheit ($v = 1$) eine solche Geschwindigkeit erwähnt, bei welcher der Zerfallprozess 6 Stunden = 360 Minuten dauert. Wenn wir diese Grösse als Einheit annehmen, so wird z. B. in Experiment 12, in welchem das Kinoplasma der Kolonien im Mittel in 18 Minuten zerfällt, die mittlere Geschwindigkeit $v = \frac{360}{18} = 20$.

Regel (R. G. T.-Regel) auch in sehr vielen physiologischen Prozessen gefunden worden, und sie ist auch für Kolloidchemie gültig¹⁾.

2. Natriumchlorid.

Wie für KCl, so auch für die Wirkung von Natriumchlorid habe ich früher den Einfluss der Temperatur nicht beachtet. Ich konnte nur mitteilen, dass 0,5 no NaCl-Lösung die Zoothamnien in 15—26 Minuten abtötet. Die starke Inkongruenz dieser Werte wird wenigstens teilweise durch den Temperatureinfluss erklärt.

Tabelle II.

Wirkung der 0,5 no NaCl-Lösung.

Nummer des Ex- peri- mentes	Temp. ° C.	Anzahl der Kolo- nien	Zeit bis zum Zerfallen des Kino- plasmas in Minuten		v
			a) für einzelne Kolonien	b) Mittel	
16	13	18	22, 30, 32, 35, 37, 40, 45, 45, 45, 45, 50, 58, 66, 70, 70, 70, 70, 70	50	7,2
17	13	13	35, 35, 35, 40, 42, 42, 43, 43, 47, 60, 60, 60, 70	48	7,5
18	15	16	23, 24, 25, 30, 32, 35, 35, 45, 45, 45, 50, 60, 70, 80, 80, 80	42	8,5
19	17,5	9	15, 24, 25, 31, 36, 36, 36, 39, 43	32	11,3
20	19,5	6	22, 24, 25, 29, 31, 33	27	13,3
21	20	7	20, 21, 21, 24, 27, 32, 39	26	13,8
22	20,5	10	19, 20, 21, 23, 24, 25, 29, 29, 35, 45	27	13,3
23	22,5	15	14, 14, 16, 16, 16, 17, 17, 17, 18, 19, 20, 20, 22, 26, 27	18,5	19,5

Bemerkung zur Tabelle. In den Experimenten 16, 17 und 18 sind einige anscheinend sehr junge Kolonien bis zum Ende der Beobachtung intakt geblieben. Die Mittelwerte sollten dementsprechend etwas erhöht werden.

Es ist ersichtlich, dass die van't Hoff'sche R. G. T.-Regel auch für die Wirkung der NaCl-Lösung vollständig gültig ist. Dem Unterschiede von 9,5° C. entspricht hier die $\frac{19,5}{7,2} = 2,7$ malige Steigerung der Reaktionsgeschwindigkeit.

1) Eine Zusammenstellung der physiologischen Befunde siehe besonders A. Kanitz, Arbeiten über die R. G. T.-Regel bei Lebensvorgängen. Zeitschr. f. Elektrochemie Bd. 13. 1907, und Zeitschr. f. physik. Chemie 1910 und Ch. D. Snyder, On the Meaning of variation in the magnitude of temperature coefficient of physiological processes. The Americ. Journ. of Physiol. vol. 28. 1911.

Auf Fig. 3 sind aus Zahlenwerten der Tabellen I und II die Kurven konstruiert, indem auf der Abszisse die Temperatur, auf der Ordinate die entsprechende Reaktionsgeschwindigkeit eingetragen

Fig. 3.

wurde. Dabei ist zu bemerken, dass für jede Temperatur die Reaktionsgeschwindigkeit in KCl höher als in NaCl ist. Daraus folgt, dass für Zoothamniumstiele Natriumchlorid etwas giftiger als Kaliumchlorid ist.

3. Chloride anderer einwertiger Ionen.

RbCl, CsCl, NH₄Cl, LiCl.

Die Wirkung dieser Chloride habe ich teilweise in der Zeit untersucht, als ich stärkere Temperaturdifferenzen nicht mehr erhalten konnte; ausserdem, was RbCl und CsCl anbetrifft, so habe ich diese Salze nur in beschränkten Quantitäten. Deswegen gebe ich für diese Chloride keine Temperaturkurven, obgleich der Temperatureinfluss auch hier aus wenigen erhaltenen Werten ersichtlich ist.

Tabelle III.

Wirkung der 0,5 no Lösungen von RbCl, CsCl, NH₄Cl, LiCl.

Nummer des Ex- peri- mentes	Salz	Temp. ° C.	Anzahl der Kolo- nien	Zeit bis zum Zerfallen des Kino- plasmas in Minuten		r
				a) für einzelne Kolonien	b) Mittel	
24	RbCl	ca. 14	9	28, 28, 38, 41, 42, 46, 53, 68, > 76	47	7,7
25	RbCl	21	24	17, 17, 17, 18, 19, 20, 20, 20, 20, 22, 22, 22, 22, 22, 22, 22, 24, 24, 26, 30, 33, 34, 34	23	15,6
26	CsCl	ca. 14	9	45, 45, 70, 74, 80, > 80, > 80, > 80, > 80	> 70	< 5,1
27	CsCl	ca. 14	9	65, 65, 65, 85, 98, 120, 130, > 130, > 130	> 100	< 3,6
28	NH ₄ Cl	19	9	35, 57, 69, 95, 95, 105, 105, 140, 150	95	3,8
29	NH ₄ Cl	22,3	20	19, 27, 27, 30, 40, 40, 40, 42, 44, 60, 60, 60, 70, 85, 87, 90, 105, 105, 112, 125	63	5,7
30	LiCl	19	8	77, 110, 140, 140, 140, 175, 175, 190	143	2,5
31	LiCl	20,5	13	105, 125, 125, 125, 140, 140, 166, 175, 177, 177, 185, 190, 195	155	2,3

Bemerkung: Bei den Experimenten 24, 26 und 27 wurde die Beobachtung früher unterbrochen, ehe die Kinoplasmasäulen in allen Kolonien zerfallen waren. Deswegen ist die Zeit bis zum Zerfallen des Kinoplasmas für einige Kolonien nicht genauer bestimmt, was das Zeichen > andeuten soll.

In meiner vorigen Arbeit habe ich die Wirkung von RbCl und CsCl überhaupt nicht untersucht, für NH₄Cl (ohne Temperaturangabe) habe ich ungefähr dieselbe Wirkung wie für NaCl gefunden. Was LiCl anbetrifft, so habe ich damals zu meinem Erstaunen einen viel höheren Wert als für NaCl, KCl und NH₄Cl erhalten. Dessenungeachtet glaubte ich, dass die Chloride aller vier einwertigen Kationen eine und dieselbe Gruppe giftiger Elektrolyten bilden, und meinte, dass eine Ausnahme von LiCl vielleicht einer ungenügenden Reinlichkeit dieses Salzes zuzuschreiben wäre. Jetzt aber erscheint

es mir sicher, dass wir hier statt einer einheitlichen Gruppe eine Reihe von Elektrolyten von ganz verschiedener Giftigkeit haben. Zwischen einer KCl-Lösung, welche die Zoothamnien bei 20,5° in 19 Minuten abtötet und einer LiCl-Lösung, welche dazu bei gleicher Temperatur 155 Minuten braucht, ist ein sehr grosser Abstand. Und dieser Abstand ist mit der Reihe NaCl, RbCl, CsCl und NH₄Cl, deren Giftigkeit allmählich fällt, gefüllt. Leider sind meine Experimente mit 0,5 no Lösungen nicht zahlreich genug, um die Wirkung dieser Salze bei gleicher Temperatur zu vergleichen. Besonders ist das Fehlen der Werte für die Wirkung der CsCl-Lösung bei ca. 21° bedauerlich. Wenn wir aber die Wirkung der KCl-, NaCl- und RbCl-Lösungen bei 14° und bei 21° vergleichen, so sehen wir, dass die Reaktionsgeschwindigkeit bei dieser Temperaturerhöhung ungefähr verdoppelt wird¹⁾. Und so könnte man auch mit einiger Wahrscheinlichkeit annehmen, dass in der CsCl-Lösung, welche bei 14° Zoothamnien in 70—100 Minuten tötet ($v = 5,1-3,6$), die Reaktionsgeschwindigkeit auf etwa 7,2, was dem Mittelwert von 50 Minuten entspricht, berechnet werden kann. Wenn wir diesen berechneten Wert vorläufig annehmen wollen, so wird die Reihe einwertiger Kationen sich folgendermassen gestalten:

Tabelle IV.

Vergleichende Wirkung der Chloride von einwertigen Kationen.

Chlorid	Reaktions- geschwindigkeit	Temperatur ° C.	Experiment
K	19,0	20,5	11
Rb	15,6	21,0	25
Na	13,3	20,5	22
Cs	ca. 7,2	(21,0)	berechnet
NH ₄	5,7	22,3	29
Li	2,3	20,5	31

4. Chloride zweiwertiger Kationen.

CaCl₂, MgCl₂, SrCl₂.

Wie ich schon früher festgestellt habe, sind für Zoothamnien CaCl₂- und MgCl₂-Lösungen wenig giftig. Besonders kann *Z. mucedo*

1) Nämlich bei KCl bei T. = 14—15°, $v = 9,6-10,6$, bei T. = 21°, $v = 20$ (Experimente 1, 2, 3 und 12); für NaCl bei T. = 13°, $v = 7,2-7,5$, bei T. = 20—20,5°, $v = 13,3-13,8$ (Experimente 16, 17, 21 und 22); für RbCl bei T. = 14°, $v = 7,7$, bei T. = 21°, $v = 15,6$ (Experimente 24 und 25).

in diesen Lösungen mehrere Tage beinahe ebensogut wie im Seewasser leben. Was *Z. alternans* anbetrifft, so sind die meisten Exemplare dieser Art empfindlicher, aber auch hier bemerkt man individuelle Schwankungen: fast bei jedem Versuch bleiben einzelne Kolonien noch längere Zeit am Leben, nachdem alle anderen abgestorben sind. Deswegen ist es sehr schwierig, genaue Zahlenwerte für die Wirkung dieser Lösungen zu erhalten, um so mehr, als wegen der längeren Dauer der Experimente die Unmöglichkeit einer Fütterung und die Schwierigkeit, den Gasaustausch aufrecht zu erhalten, störend in den Weg treten. Diese Umstände erklären genügend eine gewisse Buntheit der Resultate. Und da ausserdem die mehrere Stunden lang ohne Unterbrechung dauernden Beobachtungen ziemlich mühsam sind, so wollte ich nicht zu viel Zeit und Mühe verlieren, um unsichere Resultate zu bekommen, um so mehr, als ich einen viel sichereren Weg — die Untersuchung der Elektrolytenkombinationen — vor mir hatte, um die Reihe der zweiwertigen Kationen festzustellen. Deswegen gebe ich hier Zahlenwerte nur für die Wirkung von Kalziumchlorid-Lösungen, sie betreffen wenige Experimente, die ich zu Ende führen konnte.

Tabelle V.

Wirkung der 0,4 no Lösungen von CaCl_2 .

Nr. des Experiments	Temp. ° C.	Anzahl der Kolonien	Zeit bis zum Zerfallen des Kinetoplasmas in Minuten		v
			a) für einzelne Kolonien	b) Mittel	
32	19	16	160, 200, 200, 200, 200, 200, 200, 200, 270, 270, 270, 270, 360, 500	250	1,6
33	19	22	90, 110, 140, 145, 175, 175, 195, 215, 225, 235, 235, 235, 300, 300, 300, 300, 410, 410, 410, 410, 435, 445	268	1,3
34	unbestimmt	8	190, 240, 290, 315, 315, 425, 430, 430	317	1,1

Bemerkung: Die Zahlenwerte für einzelne Kolonien sind abgerundet, da die Beobachtungen erst nach mehr oder weniger grossen Intervallen gemacht wurden.

Die für diese drei Experimente gewonnenen Zahlenwerte passen sehr gut zusammen. Bei den anderen Versuchen mit der Wirkung von 0,4 no CaCl_2 -Lösung starben die meisten Exemplare auch innerhalb eines Arbeitstages (in ca. 8—10 Stunden); einzelne Exemplare

blieben aber noch weiter am Leben. Deswegen kann man vielleicht das erhaltene Mittel — 250—317 Minuten — als etwas zu niedrig annehmen¹⁾. Wenn wir aber die Reaktionsgeschwindigkeit hier auch gleich 1 (d. h. 360 Minuten) oder noch kleiner annehmen wollen, so wird auch in diesem Fall die Differenz in der Wirkung von KCl und CaCl_2 nicht qualitativ, sondern nur quantitativ. Der Abstand zwischen der giftigen Wirkung von KCl und LiCl (Reaktionsgeschwindigkeiten 19 und 2,3) bleibt mehrere Male grösser als der Abstand zwischen LiCl und CaCl_2 ($v = 2,3$ und 1). Aber auch dieser Abstand bleibt nicht leer. Obgleich ich keine zuverlässigen Zahlenwerte für SrCl_2 und MgCl_2 habe, deren 0,4 no Lösungen ungefähr ebenso wirken wie die CaCl_2 -Lösungen, so wird doch aus weiteren Versuchen mit Elektrolytenkombinationen ersichtlich, dass nach ihrer giftigen, eventuell entgiftenden Wirkung Sr- und Mg-Ionen zwischen Li-Ionen einerseits und Ca-Ionen andererseits stehen.

Die Ergebnisse meiner neueren Untersuchungen über die Wirkung reiner dem Seewasser isomotischer Lösungen einzelner Elektrolyten sind somit folgendermaassen zu schliessen: In der Zeit, als ich hauptsächlich die Wirkung von NaCl und KCl einerseits und CaCl_2 und MgCl_2 andererseits untersuchte, konnte ich an einen prinzipiellen Unterschied zwischen giftigen einwertigen und ungiftigen zweiwertigen Kationen glauben. Nachdem aber mehrere andere einwertige Kationen, besonders Cs, NH_4 und Li genauer untersucht wurden, verschwand der Gegensatz dieser zwei Gruppen. Nunmehr bilden für mich KCl, RbCl, NaCl, CsCl, NH_4Cl , LiCl, SrCl_2 , MgCl_2 und CaCl_2 eine Reihe mit allmählich sinkender Giftigkeit. Dieser Schluss wird auch durch zahlreichere und genauere Experimente durch die Wirkung von Elektrolytenkombinationen bekräftigt, welche im folgenden Kapitel dargelegt wird.

1) Auch für die giftige Wirkung von CaCl_2 ist die Temperatur von grosser Bedeutung. Bei niedriger Temperatur gelingt es viel eher Zoothamnen längere Zeit lebendig in CaCl_2 zu halten, besonders in grösseren Quantitäten der Lösung. So habe ich am 18. April 1911 gegen 3 Uhr nachmittags bei 15°C . in 50 ccm 0,4 no CaCl_2 -Lösung mehrere Exemplare Z. alternans gebracht. In der Nacht sank die Temperatur sicher unter 10°C . Am anderen Tage waren alle noch lebend. Auch am 20. April lebten noch einige Kolonien, zwei Exemplare kontrahierten sogar den ganzen folgenden Tag, und erst nach etwa 80 Stunden war die Kinoplasmasäule auch bei ihnen zerfallen.

Ausser den genannten Chloriden versuchte ich auch einige andere zu studieren: BeCl_2 und AlCl_3 ; die Versuche aber sind mir misslungen. In den dem Seewasser isosmotischen Lösungen dieser Chloride sterben die Zoothamnien sofort, wie in BaCl_2 - oder HgCl_2 -Lösungen. Es ist aber wohl möglich, dass die Be- und Al-Ionen selbst ungiftig sind; die giftige Wirkung der Lösungen ihrer Chloride aber ist durch die starke Alkalinität ihrer Lösungen verursacht. Um diese Frage zu entscheiden, sind weitere nicht ganz einfache Versuche notwendig, zu welchen ich bis jetzt keine Zeit hatte.

III. Die Wirkung der Elektrolytenkombinationen auf die Lebensfähigkeit des Zoothamnium-Stieles.

Schon früher habe ich gezeigt, dass beim Zoothamnium die Ca- und Mg-Ionen die giftige Wirkung von NaCl- und KCl-Lösungen abschwächen und dass diese antitoxische Wirkung schon minimale Mengen von CaCl_2 oder MgCl_2 (bis 0,001 no und weniger) zeigt, dass aber bei weiterer Konzentrierung diese antitoxische Wirkung nur wenig steigt. Diesmal war es meine Aufgabe, die Frage zu entscheiden, ob auch den wenig giftigen einwertigen Ionen, wie NH_4 und Li, eine antitoxische Wirkung eigen ist. Weiter war es wichtig, die Grenzwerte der Konzentrationen, die die erste Spur einer antitoxischen Wirkung offenbaren, zu bestimmen und soviel wie möglich für jede Kationenart eine Kurve der antitoxischen Wirkung verschiedener Konzentrationen zu erhalten, um einen neuen Stützpunkt für die Feststellung der Kationenreihe zu gewinnen. Um vergleichbare Werte zu bekommen, nahm ich bei den meisten Experimenten als giftige Lösung eine 0,5 no-Lösung von Kaliumchlorid, und bei Vermischung mit einer antitoxischen Lösung sorgte ich, den osmotischen Druck unverändert zu lassen, d. h. ich vermischte diese Lösung nur mit 0,5 no-Lösungen der Chloride anderer einwertiger Kationen oder mit 0,4 no-Lösungen der Chloride zweiwertiger Kationen. Was die Bezeichnung anbetrifft, so bedeutet z. B. 0,25 no KCl + 0,2 no CaCl_2 die Mischung gleicher Teile isosmotischer Lösungen genannter Chloride.

Die antitoxische Wirkung der zweiwertigen Kationen.

0,001 no ist der Grenzwert, bei dem ich eine antitoxische Wirkung von Ca-Ionen konstatieren konnte. Gegen eine NaCl-Lösung, wie ich schon früher festgestellt habe, ist auch 0,0005 no CaCl_2 merklich antitoxisch; hier aber ist Ca bei solcher Verdünnung nicht mehr merklich tätig, vielleicht deswegen, weil die K-Ionen giftiger als die Na-Ionen sind.

Tabelle VI.
Wirkung der gemischten Lösungen von KCl und CaCl_2 .

Nr. des Ex- peri- mentes	Tempe- ratur ° C.	Gehalt in Teilen der no- Lösung		Anzahl der Kolonien	Zeit bis zum Zerfallen des Kinoplasmas in Minuten		v
		KCl	CaCl ₂		a) für einzelne Kolonien	b) Mittel	
12	21	0,5	—	19	11, 11, 13, 14, 15, 16, 16, 17, 18, 19, 21, 21, 22, 22, 22, 23, 23, 24	18	20
35	ca. 20	0,5	0,001	14	17, 17, 22, 22, 25, 25, 32, 32, 36, 47, 57, 57, 57, 83	38	9,5
36	21	0,5	0,004	16	15, 20, 20, 22, 23, 23, 24, 25, 29, 37, 67, 67, 75, > 120, > 120	ca. 44	ca. 8,2
37	20	0,5	0,005	20	17, 20, 20, 20, 23, 23, 23, 25, 30, 30, 30, 33, 37, 39, 45, 47, 95, 95	34	10,6
38	19,5	0,5	0,006	18	15, 17, 20, 20, 20, 23, 27, 27, 30, 30, 40, 50, 60, 70, 90	35	10,3
39	20	0,5	0,007	22	25, 29, 33, 36, 45, 50, 50, 55, 55, 60, 75, 79, 80, 87, 100, 110, 115, 125, 140, 150	76	4,7
40	20	0,5	0,008	27	40, 50, 50, 50, 50, 50, 50, 61, 70, 70, 70, 75, 80, 80, 97, 100, 102, 110, 110, 110, 121, 123, 130, 130, 135	86	4,2
41	20	0,5	0,01	25	45, 45, 50, 60, 60, 60, 65, 70, 70, 75, 80, 80, 85, 90, 100, 110, 115, 120, 120, 120, 125, 145, 180, 180	94	3,8
42	20	0,45	0,03	18	25, 25, 60, 60, 60, 60, 65, 65, 95, 100, 100, 112, 112, 120, 120, 122, 122, 122, 130	87	4,1
43	21,5	0,44	0,06	39	25, 25, 30, 40, 40, 40, 40, 40, 40, 40, 45, 50, 50, 50, 55, 60, 60, 65, 65, 80, 80, 85, 90, 90, 95, 95, 105, 105, 105, 135, 150, 150	75	4,8
44	unbestimmt	0,37 ^a	0,1	10	60, 60, 75, 89, 130, 155, 165, > 180, > 180, > 180	> 127	< 2,9
45	19	0,25	0,2	18	30, 30, 35, 45, 50, 50, 78, 105, 108, 111, 166, 175, 175, 175, 175, 190, 190	114	3,1
46	19	0,2	0,24	25	70, 80, 80, 80, 80, 130, 220, 250, 250, 380, 380, 380. Ausserdem 11 Kolonien > 400, < 1300 ca. 600?	ca. 360	ca. 1
47	19	0,1	0,32	23	40, 70, 120, 140, 140, 140, 160, 160, 230, 250, 270, 270, 270, 270, 330, 400, 400, 440, 3 Kolonien über 440	ca. 360	ca. 1
48	19	0,1	0,32	22	6 Kolonien ca. 200, 18 Kolonien ca. 300, 4 Kolonien über 400	ca. 360	ca. 1
49	20	0,1	0,32	23	19 Kolonien < 1000, 4 Kolonien ca. 1200	ca. 360	ca. 1
50	19	0,01	0,4	31	180, 1 0, 180, 200, 220, 240, 250, 300, 300, 330, 330, 350, 350, 350. Übrige 16 Kolonien über 400	ca. 360	ca. 1
51	20	0,01	0,4	18	13 Kolonien < 1000, 5 Kolonien ca. 1200	ca. 360	ca. 1
32	19	—	0,4	16	160, 200, 200, 200, 200, 200, 200, 270, 270, 270, 270, 360, 500	250	1,6
33	19	—	0,4	22	90, 110, 140, 145, 175, 175, 195, 215, 225, 235, 235, 300, 300, 300, 300, 410, 410, 410, 435, 445	268	1,3

Es ist auffällig, dass die antitoxische Wirkung der Ca-Ionen besonders bei stärkeren Verdünnungen in hohem Grade individuell ist. Bei den Experimenten 35—39 waren einzelne Kolonien ganz ausserordentlich durch die Ca-Ionen geschützt; für die Mehrzahl der Individuen aber war die schützende Wirkung nur wenig merklich. Zuweilen konnte ich schon zu Beginn des Experimentes alle Kolonien in zwei zum Teil scharf abgegrenzte Gruppen teilen: einerseits stark und andererseits wenig oder kaum für die Ca-Ionen empfindlich. Es kann sein, dass dieser Unterschied in gewisser Beziehung zum Alter der Kolonien steht; jüngere kleinere Kolonien sind mehr dauerhaft. Physico-chemisch kann die Ursache in der Dicke oder kolloidalen Beschaffenheit semipermeabler Protoplasmaschichten liegen.

Beim Zunehmen der Konzentration steigt die antitoxische Wirkung der Ca-Ionen zuerst sehr schnell (von 0,001 auf 0,01 no), dann aber viel langsamer, und die Wirkung der 0,2 no CaCl_2 -Lösung (Experiment 45) unterscheidet sich von der Wirkung 0,01 no-Lösung (Experiment 41) nur wenig. Wie ich schon früher geäußert habe, ist die Kurve der antitoxischen Wirkung von Ca der Adsorptionskurve sehr ähnlich.

Eins schien mir interessant, aber sehr schwierig zu bestimmen: dauert das Sinken der giftigen Wirkung einer KCl-Lösung beim Zunehmen der Ca-Ionen immer fort oder nur bis zu einem gewissen Punkte, so dass die reine CaCl_2 -Lösung wieder giftiger ist im Vergleich mit der Lösung, welche Spuren von K enthält? Nur im letzten Falle hätten wir auch hier die bekannte Loeb'sche Regel, dass reine Elektrolyte giftiger als Elektrolytenkombinationen sind. Leider dauern die betreffenden Experimente viel zu lange, um genaue Zahlenwerte zu bekommen. Ich habe mehrere zum Teil parallele Experimente angestellt (46—51, 32 und 33), um diese Frage aufzuklären. Es scheint, dass in reinen CaCl_2 -Lösungen die Zoothamnien ein wenig früher sterben als beim Zusatz von 0,01 no bis 0,2 no KCl. Aber ganz sicher ist dieser Schluss nicht. Ich ziehe vor, diese Frage noch offen zu lassen. Übrigens kann auch eine „antitoxische“ Wirkung der K-Ionen, wenn sie überhaupt existiert, nur unbedeutend sein.

Wenn wir die Tabelle VII (S. 346) mit der vorhergehenden vergleichen, so sehen wir, dass der Grenzwert für die antitoxische Wirkung der Mg-Ionen höher als die der Ca-Ionen ist. 0,001 no Mg übt keine

Tabelle VII.
Wirkung der gemischten Lösungen von KCl und MgCl_2 .

Nummer des Ex- peri- mentes	Temp. ° C.	Gehalt in Teilen der no-Lösung		Anzahl der Kolo- nien	Zeit bis zum Zerfallen des Kinoplasmas in Minuten		v
		KCl	MgCl ₂		a) für einzelne Kolonien	b) Mittel	
52	unbest.	0.5	0,001	8	Sechsz Kolonien < 11, 15, 20	< 12	30
53	21,5	0.5	0,005	10	12, 16, 18, 20, 24, 25, 26, 34, 40	24	15
54	unbest.	0.5	0,01	9	25, 40, 45, 53, 60, 65, 68, 80, 80	57	6,3
55	20,5	0.5	0,01	20	25, 32, 37, 42, 46, 53, 53, 53, 53	57	6,3
56	21	0.5	0,02	15	22, 27, 44, 46, 55, 55, 58, 61, 66, 90, 95	77	4,7
57	21	0.5	0,03	18	17, 35, 50, 50, 50, 68, 80, 80, 98, 105	170	3,8
58	22	0.44	0,05	14	40, 40, 50, 55, 65, 71, 80, 85, 85, 88	80	4,5
59	unbest.	0.37	0,1	9	55, 90, 100, 120, 130, 135, 135, 175	121	3
60	20,5	0,25	0,2	26	70, 70, 70, 70, 105, 125, 160, 160, 160, 160, 160, 195, 200, 220, 260, 260, 260, 260	ca. 200	ca. 1,8

Tabelle VIII.

Wirkung der gemischten Lösungen von KCl und SrCl_2 :

[illegible]

Bemerkung: Bei Experiment 62 sind 8 Kolonien sehr früh abgetötet, eine einzelne aber blieb lange Zeit (126 Minuten) am Leben; wenn wir diese ausser acht lassen, so bekommen wir als Resultat des Experimentes $v = 21.2$; für alle 9 Kolonien aber ist das Mittel $v = 12$. — Gerade eine solche Idiosyncrasie einzelner Kolonien für Sr ist auch in den folgenden Experimenten 62—65 merklich; die Mittelwerte betreffen hier alle, d. h. auch diese absonderlichen Kolonien.

antitoxische Wirkung aus und sogar 0,005 no eine kaum merkliche. Erst bei 0,01 no ist diese Wirkung unzweifelhaft, aber auch bei dieser Konzentration sind die Mg-Ionen weniger wirksam als die Ca-Ionen; die Anwesenheit der letzteren erniedrigt die Reaktionsgeschwindigkeit bis 3,8 (Experiment 41), die Mg-Ionen dagegen nur bis 6,3 (Experiment 54 und 55). Auch gegen die toxische Wirkung der Na-Ionen sind die stark verdünnten Mg-Ionen weniger als die Ca-Ionen wirksam (l. c. S. 384).

Was aber die antitoxische Wirkung der konzentrierten Mg- und Ca-Lösungen anbetrifft, so scheint diese in beiden Fällen sehr ähnlich zu sein. Ich habe nur wenige zuversichtliche Zahlenwerte, und diese scheinen sogar zugunsten der stärkeren Wirkung der Mg-Ionen auszufallen. Wenn ich also in meiner Kationenreihe den ersten Platz für Ca behalte, so tue ich das nur wegen der stärksten antitoxischen Wirkung dieses Ions bei grossen Verdünnungen.

Die antitoxische Wirkung der Sr-Ionen (Tabelle VIII auf S. 346) ist unzweifelhaft schwächer als die der Mg-Ionen. 0,01 no SrCl_2 übt überhaupt keine Wirkung aus, bei 0,02 no und 0,03 no ist diese nur bei einzelnen Kolonien merklich. In der von mir untersuchten Kationenreihe nimmt Sr sicherlich den dritten Platz, nach Mg und Ca, ein.

Die antitoxische Wirkung der einwertigen Ionen.

Schon vorher habe ich beobachtet, dass der Zusatz zur NaCl-Lösung von einem gewissen Quantum KCl die giftige Wirkung der Na-Ionen nicht nur nicht schwächt, sondern sogar verschärft (l. c. S. 388 und 389). Damals aber konnte ich keine genauen Zahlenwerte erhalten, da ich die Temperaturwirkung noch ausser acht liess. Aber auch jetzt schien es mir nicht der Mühe wert, die Wirkung der Mischungen KCl + NaCl genauer zu studieren, da die Reaktionsgeschwindigkeiten für reine Lösungen dieser Elektrolyten zu nahe stehen und zu gross sind. Dasselbe betrifft auch die Mischungen KCl + RbCl. Bei einem Versuch (69) bekam ich einmal folgendes Resultat: Bei $21,5^\circ \text{C}$. wurden 24 Kolonien in eine Mischung von gleichen Teilen KCl (0,25 no) und RbCl (0,25 no) gebracht. Die Zeiten bis zum Zerfall des Kinoplasmas für einzelne Kolonien waren: 14, 15, 16, 16, 16, 18, 19, 19, 19, 19, 21, 21, 22, 22, 22, 22, 23, 23, 25, 25, 25, 30, 31, 47 Minuten. Das Mittel beträgt also 22 Minuten, die Reaktionsgeschwindigkeit $v = 16,3$. Die Verzögerung

der Reaktion im Vergleich zu der Wirkung der reinen KCl-Lösung (bei 21° C. $v = 20$) ist merklich; die Reaktionsgeschwindigkeit ist der einer reinen RbCl-Lösung (bei 21° — 15,6) näher.

Bei einem anderen Versuche (70) gelang es mir festzustellen, dass auch die Wirkung einer Mischung von KCl und CsCl in der Mitte zwischen den Wirkungen reiner Lösungen dieser Elektrolyten steht. Bei 18° C. sind neun Kolonien in ein Gemisch von 0,4 no KCl + 0,1 no CsCl gebracht. Das Kinoplasma einzelner Kolonien zerfällt in 20, 23, 25, 25, 28, 30, 35, 45, 47 Minuten. Das Mittel beträgt demnach 31 Minuten, $v = 11,6$. In reiner KCl-Lösung bei 18° C. ist die Reaktionsgeschwindigkeit 15—17,1 (6 und 7); die antitoxische Wirkung von 0,1 no Cs-Ionen ist also merklich und entspricht ungefähr der Wirkung von ca. 0,03 no Sr-Ionen (Versuch 63).

Viel mehr versprechend schien mir die Untersuchung der antitoxischen Wirkung der NH_4 - und Li-Ionen, und in dieser Richtung habe ich mehrere Experimente angestellt.

Wirkung der NH_4 -Ionen. (Siehe Tabelle IX auf S. 349.)

Vergleicht man diese Serie mit der vorherigen, welche die Wirkung der Sr-Ionen illustriert, so fällt es auf, dass die stark verdünnten NH_4 -Lösungen (0,01—0,04) antitoxisch nicht weniger stark, sogar noch stärker wirksam sind als die entsprechenden SrCl_2 -Gemische. Vielleicht wirkt hier die alkalische Reaktion der NH_4Cl -Lösungen. Bei der Steigerung der Konzentration aber wird die antitoxische Wirkung der NH_4 -Ionen immer mehr und mehr von der der Sr-Ionen übertroffen. Die Wirkung der NH_4 -Ionen beim Steigen der Konzentration erhöht sich anfangs rasch, wird aber dann beinahe stationär, ungefähr gleich der Wirkung einer reinen NH_4Cl -Lösung. Wenn man von dem Experiment 74, das bei zu hoher Temperatur angestellt wurde, absieht, so bekommt man eine schöne logarithmische Kurve:

$$20,5 - 15,6 - 12 - 9,7 - 9 - 6,5 - 5,7.$$

Wirkung der Li-Ionen. (Siehe Tabelle X auf S. 349.)

Im allgemeinen entspricht die Wirkung der Li-Ionen denen der anderen antitoxischen Ionen; beim Steigen der Konzentration der Li-Ionen in KCl-Lösungen steigt auch ihre antitoxische Wirkung bis zu solcher Reaktionsgeschwindigkeit, wie wir in reiner LiCl-Lösung beobachten. In zwei Beziehungen aber ist diese Tabelle eigentümlich. Da die reine LiCl-Lösung weniger giftig als die reine NH_4Cl -Lösung ist, so möchte man erwarten, dass im Vergleich zu NH_4 noch kleinere

Tabelle IX.
Wirkung der gemischten Lösungen von KCl und NH_4Cl .

Nr. des Experimentes	Temp. ° C.	Gehalt in Teilen der no-Lösung		Anzahl der Kolonien	Zeit bis zum Zerfallen des Kinoplasmas in Minuten										v	
		KCl	NH ₄ Cl		a) für einzelne Kolonien											b) Mittel
13	22	0,5	—	20	11, 13, 13, 14, 15, 15, 15, 15, 15, 15, 16, 16, 16, 16, 17, 17, 18, 19, 20, 25, 36, 27	17,5	20,6									
71	22	0,49	0,01	26	14, 15, 15, 15, 15, 15, 17, 17, 18, 18, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 25, 25, 25, 26, 27, 32, 36, 38, 50	23	15,6									
72	22	0,47	0,03	20	15, 16, 18, 21, 21, 23, 24, 24, 24, 26, 26, 27, 27, 34, 34, 39, 43, 43, 46, 50	30	12									
73	21,5	0,46	0,04	18	21, 24, 24, 24, 24, 24, 27, 29, 32, 33, 34, 43, 44, 54, 70, > 90	37	9,7									
74	23,5	0,44	0,06	24	12, 12, 12, 12, 13, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 24, 25, 26, 29, 31, 33, 33, 34, 40, 44, 48, 48	25	14,4									
75	23	0,6	0,14	18	20, 22, 22, 24, 26, 29, 33, 35, 37, 40, 46, 48, 50, 50, 50, 65, 90	40	9									
76	22,7	0,25	0,25	22	20, 26, 26, 28, 35, 36, 40, 48, 48, 50, 52, 54, 55, 60, 75, 75, 84, 100, 105	55	6,5									
29	22,3	—	0,5	20	19, 27, 27, 30, 40, 40, 40, 42, 44, 60, 60, 60, 70, 85, 87, 90, 105, 105, 112, 125	63	5,7									

Bemerk.: Bei Experiment 74 ist die sehr hohe Temperatur zu beachten! Überhaupt ist die ganze Versuchsserie bei hoher Temperatur angestellt.

Tabelle X.
Wirkung der gemischten Lösungen von KCl und LiCl.

	KCl	LiCl																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
--	-----	------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Mengen von Li genügten, um die giftige Wirkung der KCl-Lösung zu mildern. Diese Erwartung erweist sich aber als falsch. Die 0,01 no Li-Lösungen sind ganz unwirksam, ebenso wie die 0,05 no-Lösungen. Erst bei 0,06 no erweisen sich einzelne Kolonien durch die Wirkung von Li etwas geschützt, und sogar 0,1—0,2 no-Lösungen schützen die Zoothamnien wenig: die Reaktionsgeschwindigkeit fällt noch nicht bis zur Hälfte. Erst im Gemisch von gleichen Teilen LiCl und KCl wird die antitoxische Wirkung der Li-Ionen bedeutend: $v = 4$. Dieser plötzliche Zuwachs der antitoxischen Wirkung ist die zweite Eigentümlichkeit der Tabelle.

Ich kann noch nicht entscheiden, wie diese beiden Eigentümlichkeiten in der beobachteten Wirkung der Li-Ionen zu erklären sind. Die Experimente 78—85 wurden an vier verschiedenen Tagen bei ziemlich verschiedenen Temperaturen angestellt. Es ist kaum anzunehmen, dass hier irgendwelche zufälligen Versuchsfehler die Reaktionsgeschwindigkeit erniedrigten. Eine Zeitlang glaubte ich, dass mein LiCl-Salz (von Merck, ohne Inschrift „pro analysi“) ungenügend rein wäre und eine Menge $MgCl_2$ enthalte, deren Anwesenheit die antitoxische Wirkung der Lösung zuzuschreiben sei. Aber die Reaktionsgeschwindigkeit bis auf vier herabzusetzen, das vermögen erst ziemlich starke $MgCl_2$ -Lösungen (— 0,02 bis 0,03 no). Wenn eine 0,25 no LiCl-Lösung 0,025 no $MgCl_2$ enthält, so wäre das eine unglaublich starke Verunreinigung des Salzes. Und sonst ähnelt in anderen Beziehungen das Verhalten der Zoothamnien in LiCl-Lösungen keineswegs der Wirkung der Mg-Ionen. Deswegen lasse ich beide Eigentümlichkeiten der Tabellen noch unerklärt und begnüge mich mit dem Schluss, dass die Hauptresultate auch hier denselben Charakter wie für die antitoxische Wirkung anderer Ionen haben.

Die Zahlenresultate der Experimente 1—87 habe ich in Fig. 4 (Tafel IV) graphisch dargestellt. Die meisten in diesem Diagramm zusammengestellten Versuche sind bei einer Temperatur von 20—21 ° C. ausgeführt worden, und so können die Kurven als Isothermen für die Wirkung verschiedener Kationen gelten. Diese Isothermen habe ich in folgender Weise konstruiert: Auf der Abszisse wurde die Konzentration des betreffenden Kations im Gemisch mit KCl oder (bei B) in reiner Lösung, auf den Ordinaten die mittlere Geschwindigkeit des Zerfallprozesses des Kinoplasmas im betreffenden Experiment eingetragen; überall sind die Nummern der Experimente notiert.

Der Punkt X auf der Ordinate A , von dem alle Kurven ausgehen, bedeutet die Reaktionsgeschwindigkeit (18) für $T = 21^\circ$ in reiner KCl-Lösung.

Das Diagramm illustriert vier fundamentale Tatsachen, welche als Ergebnisse dieses Kapitels gelten können.

1. Chloride aller untersuchten Kationen in reinen Lösungen sind mehr oder weniger giftig für Zoothamnien. Die Giftigkeit fällt in die Kationenreihe: K, Rb, Na, Cs, NH_4 , Li, Sr, Mg, Ca.

2. Alle untersuchten Kationen üben eine antitoxische Wirkung aus, wenn sie zu einer Chloridlösung giftigerer Kationen zugesetzt werden.

3. Von minimalen Konzentrationen beginnend wächst die antitoxische Wirkung der Kationen zuerst schnell, dann immer langsamer. Dem Aussehen nach nähern sich die Kurven einer typischen logarithmischen Kurve.

4. Das Maximum der antitoxischen Wirkung eines Kations trifft gewöhnlich nicht die Grösse der Reaktionsgeschwindigkeit in reiner Chloridlösung desselben Kations. Das unbedeutende Steigen der Ca-Kurve auf der rechten Seite scheint mir noch unvollkommen bewiesen und ohne Parallele mit anderen Kurven.

Das Diagramm ist nach Untersuchungen der Wirkung verschiedener Kationen in KCl-Lösungen zusammengestellt. Es ist aber kaum zu zweifeln, dass die beobachteten vier Regeln auch in anderen Fällen gelten. Wenn das richtig ist, so könnte man im voraus berechnen, mit welcher Reaktionsgeschwindigkeit das Kinoplasma des Zoothamniums in irgendeinem Gemisch zweier beliebiger oben untersuchter Chloride zerfällt. Für Gemische von NaCl mit MgCl_2 und NaCl mit CaCl_2 ist das ziemlich genau in meinen früheren Untersuchungen bewiesen (l. c. Fig. 12).

IV. Die Wirkung einzelner Elektrolyte auf einige reversible Lebensprozesse bei Zoothamnium.

Der Zerfall der Kinoplasmasäule ist ein irreversibler Prozess, in dessen Grunde allem Anschein nach eine irreversible Fällung der Protoplasmakolloide liegt. Es wäre interessant zu wissen, ob die oben festgestellte Ionenreihe auch für reversible Lebensprozesse gültig ist. Ich habe zwei solcher Prozesse gewählt: die Flimmerbewegung und die Kontraktilität des Stieles.

1. Flimmerbewegung.

Es wurde schon früher von mir festgestellt, dass die Flimmerbewegung bei Zoothamnien von dem Giftigkeitsgrade der Lösung nicht abhängt, aber vom Vorhandensein gewisser Kationen stark beeinflusst wird. So merkt man in einer NaCl-, KCl- oder CaCl_2 -Lösung nie die Flimmerbewegung, aber die Mg-Ionen in reiner MgCl_2 -Lösung oder im Gemisch mit anderen Chloriden lösen sofort das Flimmern der Cilien auf. Jetzt ist nachzuweisen, ob diese Eigenschaft den Mg-Ionen allein oder auch einigen anderen in der Kationenreihe nahestehenden gehört.

Was die Mg-Ionen anbetrifft, so genügen minimale Mengen von MgCl_2 , zu einer KCl-Lösung beigemischt, um die Flimmerbewegung aufzulösen. So genügt im Versuch 53 das Vorhandensein von 0,005 no Mg kaum dazu, um die Geschwindigkeit des Zerfalles des Kinoplasmas merklich sinken zu lassen (bis 15), und doch wurde bei mehreren Exemplaren eine Cilienbewegung beobachtet. In keinem der anderen Versuche mit $\text{KCl} + \text{MgCl}_2$ -Gemischen oder in reiner MgCl_2 -Lösung wurde die Flimmerbewegung vermisst. Andererseits ist für CaCl_2 -Lösungen ebenso wie für $\text{KCl} + \text{CaCl}_2$ -Gemische die vollständige Abwesenheit der Cilienbewegung charakteristisch. Nur beim Versuch 43 habe ich die Flimmerbewegung bei einzelnen Kolonien beobachtet; ich hatte aber schon vorher geahnt, dass dieser Versuch abweichende Resultate geben musste, da hier die Reinheit des destillierten Wassers etwas unsicher war. Bei einigen Kontrollversuchen habe ich tatsächlich konstatiert, dass die Zumischung unbedeutender Mengen MgCl_2 auch in CaCl_2 -Lösungen eine lebhafte Flimmerbewegung bewirkt.

In der Kationenreihe steht dem Mg am nächsten Sr, und auch in der Wirkung auf die Flimmerbewegung ist dieses Ion am meisten dem Mg-Ion ähnlich. So habe ich die Flimmerbewegung in den Versuchen 64, 65, 66 und 67 festgestellt, also für Konzentrationen von 0,04 no bis 0,1 no SrCl_2 . Bei der Kolonie, welche im Gemisch $\text{KCl} + 0,04$ no SrCl_2 205 Minuten lebte, war die Flimmerbewegung über 150 Minuten bemerkbar. Ein interessanter Unterschied zwischen Sr und Mg ist zu beachten: in reinen SrCl_2 -Lösungen, ebenso wie in 0,25 no $\text{KCl} + 0,2$ no SrCl_2 -Lösungen (Exp. 68) bleiben die Cilien unbeweglich, in reiner MgCl_2 -Lösung dagegen arbeiten die Cilien mehrere Stunden lang! Also ist in

dieser Beziehung das Stronziumchlorid dem Magnesiumchlorid ähnlich, aber nicht gleich.

Auch in den Lösungen, welche NH_4Cl enthalten, erlöscht die Cilienbewegung nicht vollständig. Freilich wird bei den meisten Kolonien die Flimmerbewegung sofort eingestellt, aber bei einzelnen dauert diese noch eine Zeitlang fort. Besonders lange flimmern die aboralen Ringe grosser Infusorienköpfe, welche allmählich frei werden und dann fortschwimmen. Im Versuch 31 (0,03 no NH_4Cl) flimmerte nur eine Kolonie und nicht mehr als 10 Minuten; im Versuch 32 bemerkte ich die Flimmerbewegung bei einer Kolonie noch nach 40 Minuten. Auch im Versuch 34 flimmerten aborale Ringe einiger grossen freiwerdenden Köpfe ca. 50 Minuten lang. In einem stärkeren Gemisch — 0,25 no KCl + 0,25 NH_4Cl (Versuch 35) habe ich keine Flimmerbewegung mehr bemerkt. Auch in reinen NH_4Cl -Lösungen ist die Flimmerbewegung sehr schwach: im Versuch 29 bei $T = 22,3^\circ$ flimmerten nur aborale Ringe einiger freiwerdenden Köpfe; dagegen flimmerten bei einer niedrigeren Temperatur (19°) auch die gewöhnlichen Köpfe einiger Kolonien mit ihren peristomalen Cilien bis 70 Minuten.

Auch in Lösungen, welche LiCl enthalten, bemerkt man zuweilen einige Flimmerbewegungen. Aber die Besonderheiten dieses Ions werden auch hier merklich. In Lösungen, welche 0,25 no oder weniger LiCl enthalten, ist meistens keine Spur irgendwelcher Flimmerbewegung bemerkbar; höchstens bewegen sich die Cilien der aboralen Ringe einiger freiwerdenden grossen Köpfe. In reinen LiCl -Lösungen aber und in einem Gemisch 0,1 KCl + 0,4 LiCl arbeiten solche grossen Köpfe ziemlich gut mit ihren aboralen Cilienringen; auch gewöhnliche Köpfe flimmern in seltenen Fällen, aber sehr schwach, und man merkt nur einzelne Kontraktionen dieser oder jener Cilie.

In KCl -, NaCl -, RbCl - und CsCl -Lösungen erlöscht wenigstens nach den ersten 5—10 Minuten die Flimmerbewegung vollständig, und sogar bei niedrigeren Temperaturen, bei welchen die Zoothamnien über 100 Minuten in 0,5 no CsCl am Leben bleiben können, sind die Cilien unbeweglich.

Das Resultat unserer Studien ist somit folgendes: Eine normale rasche Flimmerbewegung bei sämtlichen Individuen ist nur bei Anwesenheit von Mg -Ionen bemerkbar; aber auch andere nahestehende

Ionen, wie Sr, Li, NH_4 , können eine Bewegung der Cilien bei einzelnen Kolonien, besonders in aboralen Ringen der grossen Köpfe, auslösen.

Lösungen von Magnesiumchlorid reagieren meistens alkalisch. Diese Alkalinität nach genauen physico-chemischen Methoden zu bestimmen, konnte ich wegen Mangel an notwendigen Apparaten nicht ausführen.

Um aber die Frage zu prüfen, ob die MgCl_2 -Lösungen nicht wegen ihrer Alkalinität die Flimmerbewegung bedingen, habe ich eine Reihe von Experimenten angestellt, indem ich den 0,4 no-Lösungen von CaCl_2 oder MgCl_2 eine kleine Menge HCl oder NaOH beigemischte und die Wirkung solcher schwach sauren und schwach alkalischen Lösungen untersuchte (s. unten Tabelle XI, S. 356). Gegen H-Ionen sind Zoothamnien sehr empfindlich. Bei 0,001 no HCl wurden Kolonien in wenigen Minuten getötet, indem die Kinoplasmasäule nicht in Tropfen zerfällt. Auch in 0,4 no CaCl_2 + 0,0007 no HCl bemerkte ich dasselbe (Versuch 105). 0,0005 no HCl und 0,0001 no HCl in einer 0,4 no CaCl_2 -Lösung vertragen Zoothamnien besser und zerfielen im Durchschnitt erst nach 96 bzw. 119 Minuten (107 und 108). In einer 0,4 no MgCl_2 -Lösung, zu welcher 0,0001 no HCl beigemischt ist, leben einzelne Zoothamnien-Kolonien sogar länger als in reiner MgCl_2 -Lösung (über 24 Stunden), und die Flimmerbewegung wird die ganze Zeit merklich. In 0,4 no MgCl_2 + 0,0005 no HCl stirbt die Mehrzahl der Kolonien rasch, aber die Cilien arbeiten noch bis zum Tode. Daraus folgt, dass es unrichtig ist, die Wirkung von MgCl_2 -Lösung der Flimmerbewegung der alkalischen Reaktion zuzuschreiben, um so mehr, als auch hundertmal verdünnte (0,005 no) Lösungen von MgCl_2 eine starke Wirkung haben (Versuch 53). Andererseits, bei Zusatz von 0,0001 no NaOH zu einer 0,4 no CaCl_2 -Lösung, was die Lebensfähigkeit der Zoothamnien bis zu 140 Minuten verkürzt, lässt die Flimmerbewegung nicht nach (Versuch 110), ebenso wie auch eine kleinere Menge von NaOH (0,00001 no NaOH, Versuch 109). Nur einmal habe ich ein starkes Flimmern bei einer Zoothamnium-Kolonie beobachtet, indem ich der 0,4 no CaCl_2 -Lösung 0,001 no NaOH zusetzte; das war aber eine sehr giftige Lösung, in der alle Kolonien bald starben (Versuch 112).

Die Spezifität der Mg-Ionen für die Flimmerbewegung bleibt also unstrittig; diesen Ionen folgen Sr-, Li- und NH_4 -Ionen nach.

2. Die Kontraktilität des Stieles.

Es gelang uns nicht, die Ionenwirkung auf die Flimmerbewegung in irgendwelchen Zahlenwerten zu verdeutlichen. Für die Kontraktilität des Stieles dagegen gelingt es ohne besondere Schwierigkeiten. Wenn man normale Zoothamnien im Seewasser untersucht, so merkt man, dass gewöhnlich alle Kolonien sich still in „Diastole“ verhalten; die Stiele sind gestreckt, alle Seitenzweige ausgebreitet, und die Köpfe arbeiten unaufhörlich mit den Cilien. Nur selten, bei einem Stoss oder irgendwelchem anderen Reiz, wird die Kolonie plötzlich zusammengezogen, dann aber wieder ausgebreitet. Bei andauernden starken Reizen kann eine Art tetanischer Kontraktion entstehen, bei welcher die Kolonien längere Zeit im Systolezustand bleiben, mit ständigen Zuckungen. Wenn bei schwacher Vergrößerung mehrere Kolonien im Gesichtsfelde liegen, so nimmt es keine besondere Mühe, die Zahl der Kontraktionen pro Minute jeder einzelnen zu notieren; innerhalb eines Versuches kann man auf solche Art eine genügende Anzahl von Minutenbeobachtungen sammeln, um ein Mittel zu berechnen, das die Kontraktilität für das Experiment charakterisiert. So habe ich z. B. für Seewasser einmal bei 155 Minutenbeobachtungen, welche bei acht verschiedenen Kolonien gemacht wurden, 55 Kontraktionen berechnet, also im Durchschnitt $\frac{55}{155} = 0,37$ Kontraktionen pro Minute (Experiment 88). In einem anderen Versuche habe ich bei 200 Minutenbeobachtungen 75 Kontraktionen, im Durchschnitt also $\frac{75}{200} = 0,37$ pro Minute, gefunden (Experiment 89). Dass hier in beiden Fällen ein und derselbe Zahlenwert (0,37) gefunden ist, scheint wohl ein blosser Zufall zu sein, da gewöhnlich die Mittelwerte in weiteren Grenzen variieren. Es wäre richtiger, zu schliessen, dass im Seewasser die Zoothamnien ungefähr einmal in 2—3 Minuten kontrahieren.

Ganz andere Zahlenwerte bekommen wir bei der Untersuchung reiner CaCl_2 -Lösungen oder einfacher Gemische von Ca-Ionen. Hier werden Kontraktionen viel zahlreicher, und einige Kolonien bleiben oft in dauernder tetanischer Systole. In Tabelle XI (S. 356) sind die Resultate von 18 Versuchen zusammengestellt: die meisten betreffen die Gemische von KCl und CaCl_2 (von 0,007 no bis 0,39 no CaCl_2), weitere die Gemische von NaCl und CaCl_2 oder CaSO_4 , ein Gemisch von MgCl_2 und CaCl_2 , auch reine CaCl_2 -Lösungen, ebenso wie ein Ge-

Tabelle XI.

Wirkung von Ca-Ionen auf Kontraktilität des Stieles.

Nr. des Experimentes	Lösung	Temp. ° C.	Anzahl von Beobachtungs-Minuten	Zahl der gezählten Kontraktionen	Durchschnittliche Anzahl von Kontraktionen pro Minute
39	0,5 no KCl + 0,007 no CaCl ₂	20	100	215	2,15
40	0,5 no KCl + 0,008 no CaCl ₂	20	250	276	1,1
41	0,5 no KCl + 0,01 no CaCl ₂	20	150	267	1,78
90	0,5 no KCl + 0,01 no CaCl ₂	—	155	444	2,9
43	0,44 no KCl + 0,06 no CaCl ₂	21,5	140	301	2,15
44	0,37 no KCl + 0,1 no CaCl ₂	—	157	406	2,6
45	0,25 no KCl + 0,2 no CaCl ₂	19	300	779	2,6
47	0,1 no KCl + 0,32 no CaCl ₂	19	40	169	4,22
48	0,1 no KCl + 0,32 no CaCl ₂	19	145	654	4,5
49	0,1 no KCl + 0,32 no CaCl ₂	20	40	116	2,9
51	0,01 no KCl + 0,4 no CaCl ₂	20	50	92	1,84
32	0,4 no CaCl ₂	19	115	647	5,62
91	0,4 no CaCl ₂	16,5	152	327	2,15
92	NaCl + 0,1 no CaCl ₂	—	138	508	3,7
93	NaCl + 0,01 no CaCl ₂	—	198	1001	5,1
94	NaCl + 0,001 no CaCl ₂	—	119	206	1,7
95	NaCl + 0,001 no CaSO ₄	21,5	90	417	4,61
97	1 no Urea + 0,01 no CaCl ₂	21,5	120	353	3
96	0,2 no MgCl ₂ + 0,2 no CaCl ₂	20,5	200	542	2,71

misch von 1 no Harnstoff-Lösung mit 0,01 no CaCl₂. Überall steigt die Kontraktilität sehr stark im Vergleich zu der im Seewasser. In keinem dieser 18 Experimente fällt die durchschnittliche Anzahl der Kontraktionen pro Minute unter 1; in 15 Fällen ist dieses Mittel über 2 Kontraktionen pro Minute. In zwei gut untersuchten Fällen stieg dieser Mittelwert sogar über 5. Da hier allem Anschein nach die Konzentration der Ca-Ionen (über 0,007 no), ebenso wie das Vorhandensein anderer Ionen in der Lösung keine merkliche Bedeutung hat, so wird es uns erlaubt, einen Mittelwert für die Kontraktilität der Zoothamnien unter Wirkung der Ca-Ionen zu berechnen. Er ist ca. 3 pro Minute.

In der Tabelle XII (S. 357) sind die Resultate der Wirkung auf die Kontraktilität anderer Ionen zusammengestellt. Selbstverständlich konnten nicht solche Lösungen in dieser Beziehung untersucht werden, in denen die Zoothamnien zu kurze Zeit (unter 30 Minuten) leben. Um genaue Werte zu bekommen, ist es nötig, die Kontraktionen am Anfang des Experimentes und kurz vor dem Tode nicht zu beachten. Deswegen fehlen in der Tabelle solche Lösungen, welche nur K-, Na- und Rb-Chloride enthalten. Man merkt aber, dass die

Tabelle XII.

Wirkung von Mg, Sr, Li und NH_4 -Ionen auf Kontraktilität des Stieles.

Nr. des Ex- peri- mentes	Lösung	Temp. ° C.	Anzahl von Beobach- tungs- minuten	Zahl der gezählt n Kon- traktionen	Durchschnitt- liche Anzahl von Kon- traktionen pro Minute
54	0,5 no KCl + 0,01 no MgCl_2	—	93	23	0,2
56	0,47 no KCl + 0,02 no MgCl_2	21	100	24	0,24
57	0,46 no KCl + 0,03 no MgCl_2	21	90	6	0,07
58	0,44 no KCl + 0,05 no MgCl_2	22	120	20	0,16
59	0,37 no KCl + 0,1 no MgCl_2	—	226	210	0,9
60	0,25 no KCl + 0,2 no MgCl_2	20,5	330	159	0,48
98	0,4 no MgCl_2	21	290	191	0,66
99	NaCl + 0,1 no MgCl_2	—	111	97	0,87
100	NaCl + 0,01 no MgCl_2	—	62	14	0,22
66	0,42 no KCl + 0,07 no SrCl_2	20	150	81	0,4
67	0,37 no KCl + 0,1 no SrCl_2	21	320	208	0,65
68	0,25 no KCl + 0,2 no SrCl_2	19	280	168	0,6
85	0,3 no KCl + 0,2 no LiCl	22,5	60	68	1,13
87	0,1 no KCl + 0,4 no LiCl	20	600	298	0,5
31	0,5 no LiCl	20,5	200	143	0,7
30	0,5 no LiCl	19	95	53	0,56
101	0,5 no LiCl	19	190	46	0,24
76	0,25 no KCl + 0,25 no NH_4Cl	22	35	26	0,74
28	0,5 no NH_4Cl	19	90	68	0,75
29	0,5 no NH_4Cl	22,3	170	59	0,35
27	0,5 no CsCl	14	90	87	0,97
102	1 no Urea + 0,01 no CsCl	21,5	30	11	0,37
103	1 no Urea + 0,01 no NaCl	21,5	55	28	0,5

reinen Lösungen von MgCl_2 , LiCl, NH_4Cl , CsCl und verschiedene Gemische ausser diesen Chloriden noch KCl, NaCl und SrCl_2 enthalten, auch sind zwei Gemische von Harnstoff und NaCl event. CsCl. Alle diese sehr verschiedenen Lösungen haben nur ein ihnen allen eigentümliches Merkmal: sie enthalten keine Ca-Ionen. Es ist kaum zu zweifeln, dass diesem Mangel auch der Unterschied der Zahlenwerte in den Tabellen XI und XII zuzuschreiben ist: in Abwesenheit der Ca-Ionen werden die Zoothamnien viel ruhiger und kontrahieren weniger als einmal pro Minute. Da die Abweichungen bei einzelnen Versuchen anscheinend ganz unregelmässig sind, so kann man auch für alle 23 Versuche dieser Tabelle einen Mittelwert berechnen: er ist fast genau 0,5. Also unter Wirkung der Ca-Ionen kontrahieren die Zoothamnien um sechsmal häufiger als bei Abwesenheit dieser Ionen. Die Spezifität der Ca-Ionen in dieser Beziehung ist augenfällig.

Tabelle XIII.

Wirkung von H- und OH-Ionen in CaCl_2 - und MgCl_2 -Lösungen.

Nummer des Experi- mentes	Lösung	Anzahl der Kolonien	Tem- peratur ° C.	Zeit bis zum Zerfallen in Minuten	ϑ	Anzahl von Beobach- tungs- minuten	Zahl der gezählten Kon- traktionen	Durchschnitt- liche Anzahl von Kontraktionen pro Minute
104	0,4 no CaCl_2 + 0,001 no HCl	20	21,5	1)	—	—	—	—
105	0,4 no CaCl_2 + 0,0007 no HCl	20	23	1)	—	—	—	—
106	0,4 no CaCl_2 + 0,0006 no HCl	20	22,5	1)	—	—	—	—
107	0,4 no CaCl_2 + 0,0005 no HCl	26	22	96	3,75	25	86	4,13
108	0,4 no CaCl_2 + 0,0001 no HCl	18	22	119	3	70	294	4,2
109	0,4 no CaCl_2 + 0,00001 no NaOH	25	21,5	> 120	< 3	75	58	0,77
110	0,4 no CaCl_2 + 0,0001 no NaOH	18	21	140	2,57	86	263	3
111	0,4 no CaCl_2 + 0,0005 no NaOH	20	23	> 73	< 5	20	96	4,8
112	0,4 no CaCl_2 + 0,001 no NaOH	ca. 20	21	1)	—	—	—	—
113	0,4 no MgCl_2 + 0,0015 no HCl	ca. 20	21	1)	—	—	—	—
114	0,4 no MgCl_2 + 0,0001 no HCl	20	21	> 300	ca. 1	230	139	0,6
115	0,4 no MgCl_2 + 0,0005 no HCl	ca. 20	21	?	?	50	35	0,7

1) Sofort nach dem Einlegen eine admoderate Kontraktion; das Kinoplasma bleibt zusammengerollt, zerfällt nicht in Tropfen.

Ehe ich dieses Kapitel schliessen wollte, versuchte ich noch die Wirkung der H- und OH-Ionen auf die Kontraktilität zu prüfen. In Tabelle XIII (S. 358) sind die Resultate der Wirkung dieser zwei so ausserordentlich wichtigen Ionen zusammengestellt, welche gewiss viel genauer untersucht werden müssten, als ich es tun konnte.

Die Konzentrationen von OH und H, welche über 0,0005 no liegen, sind sehr giftig, und ihr Einfluss auf die Kontraktionen kann nicht beobachtet werden. Die schwächeren Konzentrationen aber, mit Ausnahme eines einzigen Versuches, geben uns nichts Neues. Durch die H-Ionen wird die Anzahl der Kontraktionen in der $MgCl_2$ -Lösung nicht über 0,6 bis 0,7 pro Minute steigen und in der $CaCl_2$ -Lösung nicht unter 4,13 bis 4,2 fallen. Was die OH-Ionen anbetrifft, so geben die 0,0001 no- und 0,0005 no-Lösungen gewöhnlich hohe Werte der Ca-Kontraktionen: 3 und 4,8. Im Versuch 109 aber, der eine sehr schwach alkalische $CaCl_2$ -Lösung (0,00001 no NaOH) betrifft, ist die niedrige Konzentrationszahl auffallend. Dieses Resultat kann vielleicht grössere Bedeutung haben. Es scheint nämlich merkwürdig, dass in Seewasser, das Ca-Ionen enthält, die Zoothamnien viel ruhiger bleiben als in den anderen von mir untersuchten Ca enthaltenden Gemischen. Die Ursache liegt gewiss in der komplizierten Kombination der Ionen in Seewasser. Früher glaubte ich, dass hier das SO_4 -Ion eine grosse Rolle spielt; aus dem Versuche 95 aber wird es klar, dass auch dieses Anion allein die beunruhigende Rolle des Ca nicht aufheben kann. Die Mg-Ionen sind in dieser Beziehung ebensowenig wirksam (Exp. 96). Kann es nicht sein, dass bestimmte kleine Mengen von OH-Ionen in stets etwas alkalischem Seewasser die richtigen Antagonisten der Ca-Ionen sind? Diese Frage lasse ich vorläufig offen. Bei neueren Beobachtungen wird es notwendig sein, die Alkalinität der Lösungen nach genaueren physico-chemischen Methoden zu bestimmen.

V. Schluss.

Durch oben dargelegte Experimente ist eine physiologische Kationenreihe festgestellt:

Man sieht, dass in dieser Reihe die betreffenden Ionen nicht nach ihrem Molekulargewicht gruppiert sind. Die Wertigkeit der Ionen spielt eine gewisse Rolle; aber zwischen ein- und zweiwertigen Ionen haben wir keine Kluft gefunden.

Diese Kationenreihe steht sehr nahe der von Wilsmore¹⁾ gefundenen Kationenreihe nach Maass des „absoluten elektrischen Potentials“ („elektrolytischer Lösungsdruck“ von Nernst):

K (2,92) — Na (2,54) — Rb²⁾ (2,54) — Sr (2,49) — Ca (2,28) — Mg (2,26).

In dieser letzten Reihe ist nur eine Abweichung: Mg steht eine Stelle hinter Ca, doch sind die Zahlenwerte sehr nahe aneinander (2,28 und 2,26). Sie sind aber für normale Lösungen angegeben und nicht für verdünnte, bei denen die stärkere antitoxische Wirkung der Ca-Ionen besonders deutlich hervortritt; für 0,4 no-Lösungen dagegen war auch in unserem Falle sehr schwer zu entscheiden, ob die Ca-Ionen wirklich eine kleinere Reaktionsgeschwindigkeit haben. Die Eigenschaften der Ionen, welche sich in ihrem Lösungsdruck äussern, bestimmen noch mehrere weitere Ionenreaktionen. So gibt J. Traube³⁾ folgende Reihe von Kationen nach dem Haftdruck (gleich der molekularen Erniedrigung der Oberflächenspannung) ihrer Chloride:

Cs (0,09), Rb (0,12) — NH₄ (0,13) — K (0,14), — Li (0,15?) — Na (0,16)
— Li (> 0,16?); Mg (0,33) — Sr (0,37) — Ca (0,41).

Diese Kationenreihen weicht in einigen Einzelheiten von den beiden oben angeführten ab. Es ist aber zu bemerken, dass die experimentelle Bestimmung der Oberflächenspannung von Salzlösungen bis jetzt auf viele Schwierigkeiten stösst; von der Oberflächenspannung dünnerer Salzlösungen wissen wir kaum etwas Sicheres (s. Freundlich, Kapellarchemie 1909, S. 165 ff.). Die oben angeführten Werte von Traube betreffen normale Lösungen. Aber auch für diese finden andere Autoren etwas abweichende Werte, welche Traube selbst anführt: so nimmt nach Forch (Ann. d. Physik Bd. 17, 1905) NH₄ die Stelle zwischen K und Na und nicht vor K ein. Was die Li-Ionen anbetrifft, so hat Traube für LiCl zwei verschiedene Werte des Haftdruckes gefunden, und er glaubt, dass der kleinere Wert dem „hydratisierten“ Ion entspricht.

1) Wilsmore, Zeitschr. f. physik. Chemie Bd. 36 S. 92. 1901.

2) Nach Mathews, The Americ. journ. of Physiol. vol. 10. 1904.

3) J. Traube, Der Haftdruck. Verhandl. d. deutsch. physik. Gesellsch. Bd. 10 S. 880—930. 1908. — J. Traube, Die Theorie des Haftdruckes. Pflüger's Arch. Bd. 132 S. 511—538. 1910, und andere Arbeiten.

Sehr interessant sind die Kationenreihen, die Höber¹⁾ für die Fällbarkeit des Eiweisses von den Alkaliionen festgestellt hat. Der Verfasser zeigte, dass diese Reihen ganz verschieden sind und davon abhängen, ob die Reaktion der Lösung sauer, alkalisch oder neutral ist. Bei Gegenwart einer Säure ist die Reihenfolge:

bei alkalischer Reaktion dagegen

und bei neutraler Reaktion

Diese letztere Kationenreihe, welche einen Übergangscharakter hat und etwas variieren kann, nennt Höber eine „physiologische“ Kationenreihe, da er diese bei einer ganzen Anzahl physiologischer Vorgänge findet (s. auch Höber, Physik. Chemie der Zelle, 1911. S. 398). Die Kationenreihe, die Höber die „physiologische“ nennt, fällt vollkommen mit der zusammen, welche ich für die Lebensfähigkeit der Zoothamnien gefunden habe. Diese Übereinstimmung ist um so merkwürdiger, als meine Untersuchungen auf einem neuen Objekt mit besonderer Methodik durchgeführt wurden und leicht vergleichbare Zahlenwerte gaben.

Wie ich in der Einleitung gezeigt habe, wird der Zerfall des Kinoplasmas allem Anschein nach durch Erhöhung der Oberflächenspannung auf der Grenze Kinoplasma-Thekoplasma bestimmt. Es ist wohl möglich, dass im Grunde dieses Prozesses in allen Fällen eine und dieselbe Ursache liegt, nämlich die Fällung der Eiweisskörper. So ist es leicht zu verstehen, dass verschiedene Chloride dieselbe Reaktion nur in verschiedenen Zeiträumen zustande bringen; der Vergleich mit den von R. Höber untersuchten Prozessen der Eiweissfällung unter Wirkung verschiedener Elektrolyte bekommt eine sichere Grundlage.

Es entsteht aber eine wichtige Frage: Wäre es richtig, die Geschwindigkeit, mit welcher der Zerfallprozess des Kinoplasmas vor sich geht, mit der Reaktionsgeschwindigkeit der Eiweissfällung ohne weiteres zu identifizieren? Könnte man glauben, dass der Fällungsprozess im Stiele der Zoothamnien sofort beginnt, wenn wir die

1) R. Höber, Zur Kenntnis der Neutralsalzwirkungen. Hofmeister's Beitr. z. chem. Physiol. u. Pathol. Bd. 11 S. 35—64. 1908.

Kolonie z. B. in eine 0,5 pro NH₄Cl-Lösung gebracht haben, und sich dann allmählich verbreitet, um nach etwa 95 Minuten zu enden? Nein, wie eine einfache Beobachtung zeigt, verhalten sich die Kolonien zuerst ganz normal, und erst einige Minuten vor dem Zerfall entsteht ganz plötzlich eine irreversible Kontraktion, welcher der Zerfall des Kinoplasmas nachfolgt. Es ist wohl sicher, dass der Vergiftungsprozess in zwei verschiedene Hälften zerfällt; im ersten Stadium dringen die betreffenden Ionen allmählich ins Thekoplasma, in dem zweiten viel kürzeren Stadium verläuft der Eiweissfällungsprozess, welcher die admortale Kontraktion und den Zerfall des Kinoplasmas bedingt. Die bei unseren Experimenten berechnete Reaktionsgeschwindigkeit betrifft gewiss hauptsächlich das erste Stadium des ganzen Prozesses.

Ich will hier nicht die grosse Streitfrage erörtern, in welcher Weise die Salze und andere lipoidunlösliche Stoffe in das Protoplasma eindringen. Es scheint aber kaum zu leugnen, dass hier die Adsorption des eindringenden Stoffes zu den Kolloidteilchen („disperse Phase“) der Plasmahaut eine Hauptrolle spielt. Die grosse Wichtigkeit der Oberflächenspannung in dem Diosmoseprozess zu beweisen, danach strebt in erster Linie J. Traube. Aber auch der Overton-Nathanson-Höber'schen Theorie steht diese Auffassung solcher Fälle, in welchen das Eindringen der Salze unstreitig ist, keineswegs entgegen. Wenn die Adsorption wirklich den Diosmoseprozess bedingt, so wird aus einer Gemischlösung von mehr oder weniger bathotonen Stoffen ein solcher zuerst in die Plasmahaut eindringen, welcher die Oberflächenspannung am meisten erniedrigt; der Adsorption wegen wird dieser Stoff sich an der Oberfläche ansammeln und nur langsam ins Innere eindringen, andererseits aber auch das Eindringen anderer weniger bathotonen Stoffe verhindern. In der letzteren Beziehung werden auch die kleinsten Mengen eines bathotonen Stoffes nach dem Gibbs'schen Gesetz stark wirksam (s. Freundlich, Kapillarchemie S. 164).

Beachtet man diese Ausführungen, so versteht man, dass von zwei Chloridlösungen diejenige langsamer in die Plasmahaut der Zoothamnien eindringt und deswegen weniger giftig ist, deren Kation mehr die Oberflächenspannung erniedrigt, und in der Lösung, in welcher zwei verschiedene Kationen enthalten sind, wird der mehr Oberflächenspannung erniedrigende antitoxisch gegen das giftige Ion

wirken, und das auch in dem Falle, wenn dieses weniger giftige Ion in der Lösung in sehr starker Verdünnung sich befindet.

Es wird somit im ersten Stadium der Vergiftung des Zoothamniumstieles (d. h. beim Eindringen der Kationen in die Plasmahaut) die Reaktionsgeschwindigkeit parallel der Adsorbierbarkeit des betreffenden Kations steigen. Aber durch dieselbe Eigenschaft (die Adsorbierbarkeit) wird auch allem Anschein nach der Einfluss der Kationen auf die Eiweissfällung bestimmt, da jede Verminderung der Spannung auf der Oberfläche der Kolloidteilchen den Fällungsprozess verlangsamt. Wir sehen also, dass die Geschwindigkeit in den beiden Hälften des Vergiftungsprozesses des Zoothamniums unter Wirkung der Chloride von einem und demselben Faktor — Adsorbierbarkeit oder Haftdruck der Kationen — abhängen kann. Folglich genügt es, anzunehmen, dass in der Reihe:

jedes Kation die Oberflächenspannung Plasma-Wasser weniger erniedrigt als das folgende, um alle Einzelheiten des Diagramms Fig. 4 (Taf. IV) zu erklären. Diese Annahme ist meine Arbeitshypothese.

Was den Einfluss der Ionen auf reversible Lebensprozesse — Flimmerbewegung und Kontraktilität betrifft — so ist hier der Zusammenhang mit physico-chemischen Eigenschaften der Kationenreihe viel weniger deutlich. Bei der Flimmerbewegung können Sr-, Li- und NH_4 -Ionen nur sehr unvollkommen die Mg-Ionen ersetzen; in bezug auf seine Wirkung auf die Kontraktilität aber steht Ca allen anderen untersuchten Kationen gegenüber. Daraus konnte man schliessen, dass hier ausser reinen physikalisch-chemischen Prozessen noch diese oder jene chemische Reaktionen mitgewirkt haben; in meiner früheren Arbeit (Archiv für Zellforschung Bd. 7) versuchte ich, den Voraussetzungen von Jacques Loeb folgend, zu zeigen, dass hier allem Anschein nach irgendwelche unlösliche oder undissoziierbare Ca- resp. Mg-Verbindungen gebildet werden.