# Über die Wirkung von Strontiumsalzen auf Algen.

Von **Oscar Loew.**

Da die Ähnlichkeit zwischen Kalzium- und Strontiumsalzen in chemischer Beziehung eine sehr weitgehende ist, eine Ähnlichkeit, welche weit größer ist, als die zwischen Kalium- und Natriumsalzen, so hat man es früher für möglich erachtet, daß ein Ersatz von Kalzium durch Strontium in physiologischer Beziehung stattfinden könne.

Die ersten Versuche in dieser Richtung wurden am tierischen Organismus angestellt und zwar mit Hinsicht auf die Knochenbildung, und hier konstatierten sowohl Max Cremer als Weiske, daß eine Vertretung hier nicht stattfinden könne, denn die jungen wachsenden Tiere wurden rhachitisch, die Knochen blieben weich, als der Kalkgehalt der Nahrung durch Strontiumverbindungen ersetzt wurde. Dieses Resultat wäre unverständlich, wenn die Funktion des Kalkes in Knochen lediglich darin bestände, daß er als Phosphat die Festigkeit des Knochens bedinge, denn dazu wäre das Tristrontiumphosphat gewiß ebensogut zu gebrauchen als das Trikalziumphosphat. Es muß hier ein weiterer wichtiger Umstand mitspielen, der die Funktionen der knochenbildenden Zellen beeinflußt und wobei die Kalksalze eben nicht durch Strontiumsalze ersetzbar sind.

Strontiumsalze sind verhältnismäßig ungiftig für das Tier, denn sogar bei intravenöser Injektion von bis zu 1 g auf 20 kg Lebendgewicht beim Hunde erwies es sich nicht als schädlich. Es können ferner bis zu 3 g per os gegeben werden, ohne eine andere Wirkung als eine diuretische zu erzeugen[1]). Bei Kaninchen beobachtete dagegen Burgassi[2]) eine schwach toxische Wirkung von Strontiumsalzen.

Was niedere Tiere betrifft, so hat Herbst[3]) gezeigt, daß bei der Entwicklung von Seeigeleiern Kalziumsalze weder durch Strontium- noch durch Bariumsalze ersetzt werden können.

An grünen Pflanzen wurden zuerst vom Schreiber dieses[4]) im Jahre 1892 diesbezügliche Versuche angestellt, welche ergaben, daß

---

1) Laborde, Jahresber. f. Tierchem., Bd. XX, pag. 63.
2) Ibid. 1907, pag. 587.
3) Arch. f. Entwicklungsmechanik 1895.
4) Flora 1892, pag. 392.

selbst nach mehreren Wochen bei Zimmertemperatur sich keine Giftwirkung an Spirogyra beobachten läßt, wenn in der vollen Nährlösung das Kalziumnitrat durch Strontiumnitrat ersetzt wird, wohl aber tritt bei 28° C eine Schädigung und allmähliches Absterben ein. Der Schluß, daß Strontium das Kalzium auch bei Spirogyren nicht ersetzen könne, war somit berechtigt und Molisch, welcher bald darauf ebenfalls solche Versuche ausführte, gelangte ebenfalls zum selben Schluß. Dieser Autor aber erwähnte außerdem noch die interessante Erscheinung, daß die Bildung der Querwand bei der noch hie und da stattfindenden Zellteilung unvollständig blieb, wenn Strontiumsalze statt Kalziumsalze oder sogar neben Kalziumsalzen vorhanden waren [1]). In solchen Fällen schien somit die Tätigkeit des Zellkernes durch Strontium beeinflußt, denn es ist lediglich die Querwand und nicht die äußere Zellwand, welche eine Veränderung zeigt. Auch Versuche an Bohnenkeimlingen führten Molisch zum Schluß, daß ein physiologischer Ersatz von Kalzium durch Strontium bei Pflanzen nicht möglich sei.

Bald darauf stellte Haselhoff [2]) Versuche mit Phaseolus und Zea an, indem er die Zufuhr von Kalk allmählich verminderte, die von Strontian aber nicht. Unter dieser Bedingung wurde keine Giftwirkung beobachtet, weshalb der Autor eine Vertretung von Kalzium durch Strontium im Pflanzenkörper für möglich erachtete.

Daraufhin wurden von mir Versuche mit Zweigen von Tradescantia [3]) angestellt, welche wieder ergaben, daß eine solche Vertretung unmöglich ist, in Übereinstimmung mit der Beobachtung von Molisch am Bohnenkeimling. Nach 6 Wochen bei 10—14° waren ans den in Kalziumnitrat (0,2 %) befindlichen Zweigen bis zu 3,5 cm lange normale Würzelchen entwickelt, während unter dem Einflusse von Strontiumnitrat (0,2 %) nur ganz hurze gebräunte Stummeln zu sehen waren. Auch bei gleichviel Kalzium- und Strontiumnitrat, gleichzeitig dargeboten, war eine hemmende Wirkung des letzteren unverkennbar; denn die Wurzeln blieben kleiner und die Wurzelhaare waren weniger und kürzer als im Kontrollversuch. Selbst bei einer Verdünnung des Strontiumnitrats auf 0,1 % blieben die Würzelchen weit kleiner als im Kontrollversuch mit Kalziumnitrat und ihre allmähliche Bräunung zeigte ihr Absterben an. Die Wurzelhaare waren sehr klein und vereinzelt,

1) Wiener Akad. Ber. 1895, Bd. CIV. Ich hatte diese Erscheinung ebenfalls gesehen, aber damals für Zufall gehalten.

2) Landw. Jahrb., Bd. XXII, pag. 853.

3) Botan. Zentralbl. 1898, Bd. LXXIV.

während im bloßen destillierten Wasser zahlreich und allerdings weniger lang und dicht als bei 0,1 % Kalziumnitrat.

Weitere Versuche, in welche auch die Wirkung von Bariumsalzen einbezogen wurde, wurden auf meine Anregung hin von U. Suzuki unternommen und zwar an Keimlingen von Hordeum und Fagopyrum und mit Zweigen von Phlox, Rubus und Coreopsis. Es ergab sich, daß Barium schädlicher wirkt als Strontium und unter dem Einflusse des Bariumnitrates eine allmähliche Gelbfärbung der Blätter wie beim Etiolieren eintrat. In der normalen Lösung mit Kalziumnitrat fand eine gesunde und kräftige Entwicklung statt, während die Keimlinge bei Strontium- und Bariumnitrat und Ausschluß von Kalziumsalzen nach 19 Tagen ein so kümmerliches Aussehen hatten, daß der Versuch beendet wurde. Die Stengel waren so schwach, daß sie sich zur Seite neigten, neue Blätter kamen nicht mehr zum Vorschein, die Kotyledonen fielen vor der Zeit ab und die Wurzelentwicklung war völlig sistiert. Es ergab sich ferner auch hier, daß bei partiellem Ersatz von Kalzium durch Strontium die schädliche Wirkung des letzteren verzögert wurde. Bei den oben erwähnten Zweigen fielen unter dem Einflusse von Barium und Strontium die Blätter ab und neue Blätter entwickelten sich nicht, während unter dem von Kalzium die Blätter gesund blieben und neue zur Entwicklung kamen.

In jüngster Zeit hat Hager[1]) Versuche angestellt, welche den Einfluß von Barium und Strontium bei gleichzeitiger Anwesenheit von Kalzium zeigen sollten. Ein armer Sandboden mit 0,027 % CaO und 0,0117 % MgO erhielt z. B. auf 10 kg einen Zusatz von 2,5—7,5 g Kalk als Karbonat und 4,6—13,8 g Strontian ebenfalls als Karbonat. Im Haferstroh wurde dann bei einem dargebotenen Verhältnis von CaO:SrO = 1:4,6 ein Aschengehalt von 10,02 % mit dem Verhältnis 5,60 CaO zu 3,47 SrO oder wie 1:0,62 gefunden. War ferner im Boden das Verhältnis CaO:BaO = 1:6,8, so lieferte das erzeugte Haferstroh bei 8,82 % Asche das Verhältnis 4,56 CaO:3,65 BaO oder 1:0,8.

Bei einem dargebotenen Verhältnis CaO : SrO = 1 : 4,6 enthielten die erhaltenen Gerstenkörner das Verhältnis 1 : 0,12, die Haferkörner 1 : Spur, die Pferdebohnensamen 1 : 0,33 und die Senfsamen 1 : 1,08.

Es ging also auch in die Samen ein ganz anderes Verhältnis von Kalk zu Strontian über, als den Wurzeln dargeboten war; Strontian

---

1) Kulturversuche mit höheren Pflanzen über die Aufnahme von Strontium, Barium und Magnesium. Leipzig 1909.

ging in die Samen noch schwerer über, als in die Blätter. Mit dem Eintritt von Strontian in die Pflanze war jedoch öfters eine Steigerung der Produktion verbunden (Reizwirkung); bei dem oben erwähnten Verhältnis im Boden aber ergab sich eine bedeutende Depression der Ernte, welche bei Gerstenkörnern 51 %, bei Pferdebohnen 35 % betrug.

Die Barytdüngung wirkte in der Regel stark ertragsmindernd, nur beim Haferstroh war eine Steigerung zu bemerken. Bei Gerstenkörnern sank der Ertag von im Kontrollfall 100 g auf 8 g; bei Buchweizen von 100 g auf 6,59 g. Barium ging in die Samen gar nicht über, mit Ausnahme beim Senf, wo er vielleicht aber nur in der Schale war [1]).

Der Grund, warum Barium das Kalzium physiologisch nicht zu ersetzen vermag, könnte darin gesucht werden, daß die Assimilation des Schwefels bei der Eiweißbildung verhindert werden kann, da Bariumsalze die Schwefelsäure der aufgenommenen Sulphate unlöslich machen können. Auffällig muß es daher erscheinen, daß bei Darbietung von Bariumsalzen neben Kalziumsalzen überhaupt noch ein Wachstum möglich war, es ließen sich wohl Suzuki's Resultate bei Kalziumausschluß, aber kaum die Hager's bei gleichzeitiger Kalziumzufuhr mit jener Ansicht erklären; bei letzterem Falle müßte man höchstens annehmen, daß bei den Zuständen in den Pflanzenzellen genügend Bariumsulfat kolloidal gelöst bleibt, um die Assimilation des Schwefels dem Protoplasma bei der Eiweißbildung zu ermöglichen. Wenn aber diese Ansicht richtig wäre, dann müßte man für Suzuki's Resultate der Bariumwirkung beim Kalziumausschluß eine andere Erklärung, als die obige suchen. Bei der Annahme, daß Kalziumverbindungen lediglich für die Membranbildung nötig seien, erscheint die absolute Unmöglichkeit der physiologischen Vertretung von Kalzium durch Barium oder Strontium schwer begreiflich, ebenso als bei der Annahme, daß Kalzium lediglich Oxalsäure oder andere Säuren, welche im Stoffwechsel auftreten, durch ihre Ausfällung unschädlich zu machen hätten; denn Barium- und Strontiumsalze dieser Säuren sind ebenfalls ziemlich schwer löslich, jedenfalls in genügendem Grade. Oxalsaurer Strontian z. B. löst sich in Wasser im Verhältnis von 1 : 12000, das Salz wäre also gewiß schwerlöslich genug.

1) Es mag hier angeführt werden, daß nach Crawford (Bulletin No. 129 des Bureau of Plant Industry, Washington 1908) auf gewissen Böden in Colorado Astragalus und Aragallus Barytverbindungen aufnehmen und deshalb Tiere, die längere Zeit diese Pflanzen fressen, zugrunde gehen.

Da Barium sich indessen weiter von Kalzium entfernt, als Strontium, und ferner bei niederen Pflanzen der Gesamteffekt sich leichter übersehen läßt, so stellte ich nochmals Versuche an Spirogyra mit Strontiumsalzen an und zwar in anderer Weise als früher, wo die Algenfäden direkt in eine Nährlösung kamen, in welcher Kalziumnitrat durch Strontiumnitrat ersetzt war. Die Spirogyrafäden wurden diesmal in relativ konzentrierte Lösungen gesetzt, mit Ausschluß von Nährsalzen. Später wurden dann einige Proben von diesen Algen in eigentliche Nährlösungen übergeführt. Es war wahrscheinlich, daß auf diese Weise eher Erscheinungen zutage treten würden, welche Strontium im Gegensatz zu Kalzium im Gefolge hat.

Beim ersten Versuch enthielt die eine Lösung 1 % Chlorkalzium die andere Chlorstrontium[1]) in chemisch äquivalenter Menge, also 1,7 %. Völlig normale Fäden von Spirogyra crassa wurden am 26. Oktober in die mit reinstem, aus Glas destillierten Wasser bereiteten Lösungen eingesetzt. Die Salze selbst waren als chemisch rein bezogen, das Chlorstrontium außerdem noch zweimal umkristallisiert worden. Die Glasflaschen standen am Fenster eines Zimmers, dessen Temperatur mehrere Monate lang zwischen 10 und 16 ° wechselte.

Nach 11 Tagen war noch gar kein Unterschied zu bemerken, ausgenommen, daß bei den Strontiumzellen der Zellkern, der sich hier bei mikroskopischer Betrachtung als Spindel darstellt, etwas in der Mitte verbreitert und im Längendurchmesser etwas verkürzt schien.

Bei einer weiteren Besichtigung am 17. November ergab sich, daß bei Chlorkalzium die Stärkekörner größer waren als bei Chlorstrontium und die Färbung des Chloroplasten dort etwas dunkler war als hier, in beiden Fällen zeigte sich bei manchen Zellen im zentralen Teil eine ganz geringfügige Einschnürung des Zytoplasmas bei den Haftstellen der Plasmodienstränge, wahrscheinlich eine Folge des relativ hohen Salzgehaltes.

Am 15. Januar, also nach 80 Tagen ergab die mikroskopische Prüfung, daß in beiden Fällen eine Anzahl Zellen, deren Menge auf ca. 15 % veranschlagt wurde, abgestorben war. Eine 10 %ige Glukoselösung rief bei den gesunden Zellen in beiden Fällen normale Plasmolyse hervor. Beim Chlorstrontium erwiesen sich die Chlorophyllbänder seitlich mehr oder weniger kontrahiert, so daß die lappigen Ausbuchtungen mehr oder weniger verwischt waren. Sehr auffallend aber war der Unterschied im Stärkemehlgehalt. Bei Chlorkalzium lag

1) Beide Salzmengen beziehen sich auf den wasserfreien Zustand.

eine ungemeine Überfüllung mit Stärkmehl vor, bei Chlorstrontium war der Gehalt nur sehr mäßig, ja in vielen Zellen geradezu ein verschwindendes Minimum. Die Chlorkalziumzellen ließen ferner öfters an der Innenseite der Querwände Verdickungen der Zellwand in Form von lappenförmigen Auswüchsen erkennen, was bei den Chlorstrontiumzellen viel seltener und dann nur sehr schwach der Fall war.

Wegen der Überfüllung mit Stärkekörnchen konnte der Zellkern bei den Chlorkalziumzellen nicht erkannt werden, während er bei den Chlorstrontiumzellen hier und da sichtbar war, und zwar konnte dann nirgends mehr die normale Form wahrgenommen werden, sondern eine Kugelform. Bei den Chlorkalziumzellen wurde durch Verdunklung während 4 Tagen soviel Stärkeverbrauch erzielt, daß der Zellkern hie und da sichtbar wurde. Er zeigte sich dann nur unbedeutend von der Linsenform abweichend und weitweniger der Kugelform sich nähernd, als dies beim Chlorstrontium der Fall war, was möglicherweise auf die verschiedene Konzentration (chemische Äquivalenz) zurückzuführen war.

Sehr auffallend waren bei den Chlorstrontiumzellen häufig auftretende Kristallnadeln, welche entweder büschelförmig oder warzenförmig angeordnet waren und manchmal in einer Art Blase (anomale Plasmolyse?) lagen. Diese Kristalle waren unlöslich in Alkohol, aber löslich in viel kochendem Wasser und wurden beim Erwärmen mit verdünntem kohlensauren Natron zerstört unter Bildung eines amorphen Niederschlags. Verdünnte Essigsäure löste sie bei gewöhnlicher Temperatur nicht, wohl aber sehr konzentrierte Essigsäure, ferner verdünnte Salz- und Schwefelsäure, welch letztere indessen an Stelle der Nadeln eine geringe Menge des amorphen Niederschlags lieferte. Demnach lag ein dem oxalsauren Kalk ähnliches Salz vor, jedoch wahrscheinlich nicht oxalsaurer Strontian, weil dieses auch in starker Essigsäure nur schwer löslich ist. Vielleicht war es das Strontiumsalz einer der Oxalsäure nahestehenden Säure (Weinsäure?).

In den Chlorkalziumzellen dagegen konnten keinerlei Kristalle aufgefunden werden.

Beim Übertragen einer Probe der Strontiumzellen in eine normale Nährlösung fand eine Regenerierung zu normalen Zellen nicht mehr statt[1]), wohl aber gelang dieses als dieselbe Algenart nur 20 Tage in jener Lösung von Strontiumchlorid bei einer 15° C nicht über-

1) Eine Probe war bei einem Versuche schon nach 2 Tagen tot, was vielleicht nur auf zu rasche Änderung der Konzentration beruhen mochte.

steigenden Temperatur verweilt hatte. Die Nährlösung hatte folgende Zusammensetzung:

| | |
|---|---|
| Monokaliumphosphat . . . . . | 0,1 p. m. |
| Kalziumnitrat . . . . . | 0,1 „ „ |
| Magnesiumsulfat . . . . . | 0,3 „ „ |
| Kaliumnitrat . . . . . | 0,2 „ „ |
| Ferrosulfat . . . . . | Spur |

Der Überschuß von Magnesia über Kalk in dieser Lösung wurde mit der Absicht angewandt, um eine Streckung des Chlorophyllbandes zu erzielen und so den Kern besser sichtbar zu machen. Es zeigte sich, daß die kugelige Kerntasche bald wieder die für die Spezies normale Linsenform annahm. Ferner wurde hier in einigen Zellen bei der Zellteilung die schon von Molisch erwähnte unvollständige Bildung der Querwand wieder beobachtet, wenn Strontium in den Zellen war.

Bei einem weiteren Versuch (März 1910) wurden Fäden von Spirogyra communis in 1 %ige Lösungen von Chlorstrontium und Chlorkalzium eingesetzt, etwa haselnußgroße Ballen völlig gesunder Fäden in 30 ccm der Lösungen, in größeren Proberöhren. Die Proben standen in den ersten Wochen bei 12—16° C an einem Fenster; direktes Sonnenlicht hatte öfters aber dann stets nur kurze Zeit Zutritt. Es ließ sich auch hier wieder konstatieren, daß die Fäden in Chlorkalzium viel mehr Gasblasen im Lichte bildeten. als die im Chlorstrontium. Nach 43 Tagen zeigten sich in der Chlorstrontiumlösung nur wenige Zellen abgestorben, im Chlorkalzium scheinbar gar keine. Die Chlorophyllbänder waren in beiden Fällen etwas mehr gestreckt als vorher, in vielen Fällen parallel der Längsachse. Beim Chlorstrontium waren die Ränder der Chlorophyllbänder jedoch häufig etwas verquollen. Ein großer Unterschied bestand auch diesmal im Stärkegehalt der Chloroplasten, welcher bei Chlorkalzium bedeutend größer war als bei Chlorstrontium. Kristallbildungen, wie beim ersten Versuch, waren diesmal weit seltener in den Chlorstrontiumzellen zu sehen, was entweder darauf beruhen mag, daß eine andere Algenspezies zum Versuche diente, oder darauf, daß die Chlorstrontiumlösung nicht wie damals 1,7 %, sondern nur 1 % Salz enthielt. Was den Zellkern betrifft, so war derselbe meistens mehr oder weniger in der Mitte erweitert, wie früher schon beobachtet. Dies bedingte aber eine Verlängerung der Plasmodiumstränge, da die Längsachse verkürzt wurde, oder eine geringe Einschnürung des Zytoplasmas in der Kernzone.

Normale Kernformen (mit Tasche) waren nicht sehr häufig zu sehen, beim Chlorkalzium waren dieselben weit häufiger.

Nun wurde (22. April) ein Teil der Zellen aus der 1%igen in eine 0,3%ige Lösung beider Chloride versetzt und bei höherer Temperatur wie bisher, nämlich bei 17—21° weiter beobachtet. Ein anderer Teil aber kam infolgende Nährlösung, in welcher Kalzium durch Strontium ersetzt war:

| | |
|---|---|
| Monokaliumphosphat . . . . | 0,2 p. m. |
| Kaliumnitrat . . . . . | 0,3 „ „ |
| Magnesiumsulfat . . . . . | 0,2 „ „ |
| Strontiumchlorid . . . . . | 0,2 „ „ |
| Ferrosulfat . . . . . | Spur |

Es starb nur ein Teil der Zellen in dieser Lösung bald ab, ein anderer Teil aber blieb noch längere Zeit leben und zeigte hie und da sogar Zellteilung, wobei aber diesmal die unvollständigen Querwände nicht zu sehen waren. Der Kern nahm allmählich wieder seine normale Form an, aber die Chlorophyllbänder wurden immer dünner, immer schmächtiger, die ohnehin geringen Stärkemengen schwanden zuletzt vollständig und der Hungertod war es offenbar, der mehr und mehr Zellen das Leben kostete, bis schließlich, am 24. Mai, fast alle Fäden abgestorben waren. Der Kern mochte sich auf Kosten des Chloroplasten oder unter Mithilfe des aus der abgestorbenen Partie stammenden Kalkes regeneriert haben, aber dem Chloroplasten war Regeneration nicht möglich. Von einigem Interesse schien es, daß sich eine Flagellatenform, Chlamydomonas, und eine nur sehr schwach grüne Oscillaria in dieser Lösung stark vermehrten. Letztere bedarf des Kalkes wahrscheinlich überhaupt nicht, bei ersterer aber wäre eine weitere Prüfung nötig. In der Kontrollnährlösung mit Chlorkalzium statt Chlorstrontium fand ein üppiges Spirogyrawachstum mit sehr kräftigem Chlorophyllband statt.

Was nun jenen anderen Anteil Algenzellen betrifft, welcher nach 43 Tagen aus der 1%igen Lösung in 0,3%ige Lösungen versetzt und nun bei 17—21° weiter kultiviert wurde, so ergab sich ein immer mehr zunehmender Unterschied. Nach weiteren 20 Tagen waren die Chlorkalziumalgen noch so tiefgrün wie je zuvor, reich an Stärkemehl und mit völlig normalem Chloroplasten, kurzum sie waren noch immer von strotzender Gesundheit, trotz Abwesenheit jedes anderen Nährstoffes und trotz Ausschluß der Zellvermehrung. Nur die Zellkerntasche zeigte sich, wie schon erwähnt, öfters statt in Spindelform im

Durchschnitt nun als Elipse und hier und da auch als Kreis. Abgestorbene Zellen waren sehr selten, selbst nach 4 Monaten.

Bei den Strontiumzellen dagegen zeigte sich kein saftiges Grün, sondern ein Gelbgrün, die Chloroplasten hatten nur Spuren von Stärke und hatten in Länge und Breite abgenommen [1]); die Pyrenoide waren öfters, mit Chloroplasma umgeben, als kugelige Massen aus dem Verbande getreten, in die anfänglich reihenförmige Anordnung von solchen Kugeln kam allmählich Unordnung, worauf bald der Tod folgte, so daß Kern und Chloroplasmakugeln einen wirren Haufen in solchen Zellen bildeten. Die Kerntaschen von noch lebenden Zellen waren völlig kugelig geworden, hingen aber an noch längeren Plasmasträngen am Chloroplasten. Weit mehr als die Hälfte aller Zellen waren nach 63 Tagen tot und die noch lebenden fristeten wahrscheinlich nur auf Kosten des toten Materials ihr Leben noch einige Zeit kümmerlich weiter.

Auffallend ist, daß die Zellen verhältnismäßig lange in 1 % iger Chlorstrontiumlösung fortleben können, ehe sich eine schädliche Wirkung dieses Salzes zeigt. Nur wenige Salze erreichen einen solchen Grad von Unschädlichkeit, denn bei gleicher Konzentration erweisen sich Natriumsalze und Kaliumsalze schon nach wenigen Tagen schädlich, wobei öfters normale oder anomale Plasmolyse und irreguläre Kontraktion entweder als Ganzes oder in verschiedene Ballen zerteilt, erfolgt [2]). Magnesiumsalze bei gleicher Konzentration töten schon in wenigen Stunden, während Chlorkalzium und nach ihm Kalziumnitrat bei 1 % iger Lösung monatelang ertragen werden.

Nicht nur Spirogyra sondern auch die nahe verwandte Zygmema und Mougeotia ertragen wochenlang Chlorstrontium in 1 % Lösung. Werden aber die Proben dann 24 Stunden im Thermostat auf 34° C gehalten, so sieht man bei Chlorstrontium viele Zellen tot, bei Chlorkalzium aber noch schön erhalten.

Werden frische Spirogyren jedoch dieser Vergleichsprobe unterzogen, so bemerkt man nicht immer schon nach 24 Stunden einen Unterschied. Viel hängt jedenfalls davon ab, ob etwas Kalk in den Zellen gespeichert war oder nicht.

---

1) Die Abnahme der Chloroplastenmasse bei Kalziummangel hat auch Bokorny beobachtet. Bot. Zentralbl. 1895, Bd. LXII.

2) In einer 1 % igen Chlornatriumlösung sieht man bei Spirogyra nitida z. B. nach 1—3 Tagen teils normale Plasmolyse, teils Chloroplasten-Plasmolyse, wobei der Chloroplast in eine Anzahl Kugeln zerfällt; ein anderer Teil der Zellen ist bereits tot.

Bei einem weiteren Versuch wurden 1%ige Lösungen von Kalzium- und Strontiumnitrat (wasserfrei) verwendet, in welche Fäden von Spirogyra nitida gesetzt wurden. Die Temperatur des Zimmers schwankte nun zwischen 18 und 24°, war also beträchtlich höher, als beim ersten Versuch mit Chloriden. Zum Vergleich dienten Algen in 0,6 % Kaliumnitratlösung und in Quellwasser. Nach 11 Tagen waren die sehr stärkereich gewordenen Fäden in der Kaliumnitratlösung ganz abgestorben, meist unter beträchtlicher Konktraktion des Zytoplasmas. Öfters war das Chlorophyllband in einzelne Ballen verwandelt. Bei Strontiumnitrat waren etwa 20% der Zellen tot, bei Kalziumnitrat aber war nichts Abgestorbenes zu bemerken, der Stärkemehlgehalt in beiden letzteren Lösungen war nur mäßig und etwa gleich.

Nach 15 Tagen war die Algenmasse in der Strontiumnitratlösung gelblich geworden, während die in Kalziumnitrat noch schön dunkelgrün waren. Die nähere Prüfung ergab, daß höchstens 10% der Zellen in Strontiumnitrat noch lebend waren und die abgestorbenen verschiedene Grade der Kontraktion des Zytoplasma und des Chloroplasten zeigten, indem die volle Totenstarre bald früher, bald später eintrat und oft weitere Veränderungen verhinderte. Das Chlorophyllband war in den einen Zellen seitlich kontrahiert, so daß die Pyrenoide nur durch dünne Fäden miteinander verbunden waren. In anderen Zellen aber waren die Pyrenoide mit etwas Chloroplasma umgeben, als kugelige Massen aus dem Verband getreten.

Die Zellen in der Kalziumnitratlösung erwiesen sich in jeder Beziehung noch normal.

Es mag hier noch erwähnt werden, daß manche Salze, selbst bei öfterem Umkristallisieren, aus destilliertem Wasser, welches aus Glas nochmals destilliert wurde, nicht von solchen Spuren Kupfer zu befreien sind, die sie an sich gezogen haben beim ersten Umkristallisieren aus gewöhnlichem destillierten Wasser in der Fabrik, welche die Salze in den Handel brachte. Diese leisen Spuren Kupfer werden dann besonders von dem Chlorophyllband aufgespeichert und dieses zeigt dann ein auffallend frühes Absterben, dem bald auch Zytoplasma und Kern folgt (von Nägeli oligodynamische Wirkung genannt). Diese Art des Absterbens ist ziemlich charakteristisch, so daß sie kaum mit dem Absterben in reinen Salzlösungen etwa durch höhere Konzentration zu verwechseln ist. Schon makroskopisch kann man in 1—2 Tagen ein weißliches Aussehen der Fäden beobachten, der Turgor ist vollständig verschwunden, wie beim Herausnehmen der Fäden mit einem Glasstabe sofort zu erkennen ist, und das Zytoplasma zeigt sich stark trübe.

Unter den Salzen, welche als chemisch rein bezogen wurden und solche Spuren Kupfer enthielten, ist mir eine Probe Kaliumsulfat und eine Probe Bariumnitrat vorgekommen. Das letztere Salz war durch zweimaliges Umkristallisieren mit aus Glas destilliertem Wasser nicht von seiner Giftigkeit zu befreien, und tötete Spirogyren in 15—18 Stunden, während eine andere Probe Bariumnitrat in 0,5 % Lösung mehrere Wochen lang von den Spirogyren bei 15—18° sehr gut ertragen wurde.

Schlußbetrachtungen: Bei dem Verhalten von Algenzellen zu Strontiumsalzen muß vor allem auffallen, daß diese sehr lange in einer Konzentration vertragen werden, wie sonst keine anderen Salze, Kalziumsalze ausgenommen. Man kann wohl daraus als wahrscheinlich schließen, daß Strontium andere metallische Elemente, Kalium, Magnesium und Kalzium nicht aus wichtigen Positionen im Protoplasma sofort verdrängt, obgleich nach dem Gesetz der Massenwirkung man einen Platzwechsel mit seinen physiologischen oder vielmehr pathologischen Folgen vermuten könnte.

Schädliche Wirkungen von Chlorstrontium machen sich bei Algen äußerst langsam bemerklich, wenn die Zellvermehrung ausgeschlossen ist, und diese Wirkungen äußern sich am deutlichsten am Chlorophyllkörper, dessen stärkebildende Funktion zunächst abnimmt, worauf eine Änderung der Färbung in gelbgrün, dann eine Schrumpfung und schließlich der Tod erfolgt. Diese Erscheinungen zeigen sich bei gleicher Konzentration von Chlorkalzium in gleicher Zeit nicht, welches überhaupt das einzige Salz ist, das bei einer Konzentration von 1 % monatelang die Spirogyren gänzlich intakt läßt.

In zweiter Linie treten bei lange dauerndem Einfluß von Chlorstrontium Kristallnadeln in den Spirogyrenzellen auf, welche unter dem Einfluß von Chlorkalzium — ceteris paribus — nicht auftreten. Diese Kristalle können unter den vorliegenden Verhältnissen nur eine Strontiumverbindung einer organischen Säure sein. Sollte dieses nicht auf eine Behinderung normal verlaufender Respiration deuten? Wenn aber unter dem Einfluß von Strontium sowohl Assimilation wie Atmung eine Depression erleiden, welche unter dem Einfluß von Kalzium ausbleibt, so kann es sich nicht um nebensächliche Stoffwechselprozesse handeln, sondern um die wichtigsten Ernährungsvorgänge, welche nur unter dem Einfluß des Kalziums normal bei diesen Organismen verlaufen.

Nach der von mir seit lange vertretenen Ansicht ist der Zellkern und Chloroplast von den höheren Algen ab aufwärts aus Kalzium-

verbindungen von Proteiden aufgebaut, weil kalkfällende Stoffe, wie neutrales Kaliumoxalat oder Fluornatrium[1]), bei einer Konzentration von 1—2 % eine auffallend rasche kontrahierende Wirkung auf den Zellkern ausüben, worauf dann bald der Chlorophyllkörper angegriffen wird. Schon in 2 Minuten erstarrt der Kern mit Kerntasche und Plasmodiensträngen zu einem dünnen, fadenartigen Gebilde, wenn eine 2 %ige Lösung jenes Oxalats auf Spirogyra crassa einwirkt.

Mit jener Auffassung würden auch obige Beobachtungen gut vereinbar sein, daß Chlorkalzium den Chloroplasten monatelang intakt läßt, Chlorstrontium aber nicht. Da der Chloroplast bei den Spirogyrazellen eine relativ sehr große Oberfläche darbietet, so kann er auch eher Unterschiede bei der Einwirkung erkennen lassen, als andere Chloroplasten.

Niedere Algen bedürfen, wie sowohl Molisch als ich ungefähr zu gleicher Zeit beobachtet haben, des Kalkes nicht[2]), trotzdem Kern und Chlorophyllkörper bei ihnen normal funktionieren. Für diese ist aber auch neutrales Kaliumoxalat gar kein Gift und Fluornatrium ein sehr viel schwächeres als für die höheren Algen; ebenso sind für niedere Algen Magnesiumsalze bei Ausschluß von Kalziumsalzen nicht giftig, wie das bei den höheren Algen und aufwärts der Fall ist. Unter diesen Umständen blieb nur die logische Folgerung übrig, daß mit der höheren Differenzierung der Form und des Fortpflanzungsmodus Kalziumproteidverbindungen für den Kernaufbau notwendig wurden. Wenn aber der Kern sich solche Kalziumverbindungen herstellt, so gibt er dieselben auch zum Aufbau des Chloroplasten ab, der wahrscheinlich nicht selbst sein Baumaterial fabrizieren kann, und deswegen werden auch überall da, wo der Zellkern wichtige Kalziumverbindungen enthält, auch die Chloroplasten solche enthalten. Ein Austausch dieses Kalziums durch andere Elemente, wie K, Na, Mg, wird Strukturstörung durch Änderung des Imbibitionsgrades und dadurch den Tod herbeiführen. Kaliumoxalat, Natriumfluorid und Mag-

1) Flora 1905, pag. 333.

2) Hierher gehören Palmellaceen, ferner Scenedesmus und wahrscheinlich Oscillaria. Molisch hat bei Protokokkus, Stichokokkus, Mikrothamnion und Ulothrix beobachtet. Ob indes letztere bei Abwesenheit von Kalk auch Gameten bildet, wäre noch zu prüfen. In neuerer Zeit (Wiener Akad. Ber. 1909) hat Brunnthaler bei der Cyanophycee Gloeothece rupestris beobachtet, daß sie von Chlormagnesium in 1 %iger Lösung nicht geschädigt wird, was für das Nichtbedürfnis dieser Alge für Kalk spricht.

nesiumsulfat sind solche Mittel, das Kalzium abzuscheiden und durch Kalium, Natrium oder Magnesium zu ersetzen. Säuren und sauer reagierende Salze wirken natürlich ebenfalls kalkentziehend, und die Beobachtung von Benecke, daß die schädliche Wirkung von saurem Kaliumphosphat bei Algen durch Gegenwart von Kalziumsalzen verhindert werden kann, ist ebenso leicht erklärlich, wie meine frühere Beobachtung, daß saures Kaliumphosphat[1]) die Giftwirkung der Magnesiumsalze bei Spirogyren beschleunigt. Dort ist leicht sofortiger Wiederersatz für jedes entzogene Kalziumatom möglich, und hier addieren sich zwei Kalzium entziehende Wirkungen[2]).

Aus zahlreichen und interessanten Versuchen über den Einfluß von Kalzium- und Magnesiumsalzen auf die Wurzel von Weizenkeimlingen schließt Hansteen, daß Kalziumsalze hauptsächlich zur Bildung der Zellwand nötig sind, denn diese wird schleimig und degeneriert, wenn Kalk in der Lösung fehlt. Hierzu möchte ich mir zu bemerken erlauben, daß nicht untersucht wurde, ob nicht schon vor dem Degenerieren der Zellwand der zugehörige Zellkern abgestorben war. War aber dieser, resp. die Zelle tot, bevor die Degeneration der Zellwand eintrat, so erklärt sich diese letztere Erscheinung sehr leicht durch den Angriff von Bakterien, welche sich nun die aus der toten Zelle herausdiosmierenden organischen Substanzen zu nutze machten, nachdem sie durch die austretenden Substanzen an die Membranen der absterbenden Zellen gelockt wurden.

Daß die Wurzeln nicht nur unter dem Einflusse der Kalziumsalze Haare bilden, sondern nach Hansteen auch in einer mit Wasserdampf gesättigten Luft, mag vielleicht in der durch letzteren Umstand herbeigeführten Steigerung der Atmung beruhen, wodurch die Zellkernfunktionen unter der erhöhten Energielieferung ebenfalls gesteigert wurden.

Daß ferner die Wurzeln auch abstarben, wenn für Zufuhr von Kalziumsalzen in das Innere der Wurzel gesorgt wurde, aber die um-

---

1) Das saure oder Monokaliumphosphat wirkt selbst bei einer Konzentration von 1,2 % ziemlich langsam auf Spirogyra ein, so daß bei den meisten Zellen der Eintritt normaler Plasmolyse erst nach 24 Stunden und dann der Tod erfolgt, unter Bleichung des Chlorophylls.

2) Es mag hier angeführt werden, daß ein gewisser Parallelismus der Giftwirkung zwischen oxalsaurem Kali und Fluornatrium auch für den tierischen Organismus beobachtet werden kann. F. Winkler hat ferner bei Froschblutleukocyten beobachtet, daß beide Salze rasch diese Kerne angreifen. „Die Leukocyten des Frosches scheinen einem Kernzerfalle zu unterliegen, ebenso die Leukocyten aus den Peritonealexsudaten der Maus. Neutrales Kaliumtartrat ließ diesen Kernzerfall nicht eintreten.“ (Briefliche Mitteilung.)

gebende Lösung nur Magnesiumsalze enthielt, erklärt sich wohl daraus, daß infolge von stetiger Diffusion von Magnesiumsalzen in die Pflanze diese stets in sehr bedeutendem Überschuß waren. Es ist übrigens hervorzuheben, daß Hansteen keineswegs die Folgerung zieht, daß der Kalk nur in der Membran wichtige Funktionen zu erfüllen habe.

Hansteen weist auch auf die unvollständige Querwandbildung bei der Zellteilung unter dem Einflusse von Strontium hin, aber die Querwandbildung ist eine Funktion des Zellkerns, welcher nach meiner Ansicht eben nicht mehr völlig normal funktionieren kann, wenn auch nur ein minimaler Teil seines Kalziumgehalts durch Strontium ersetzt ist. Die äußere Zellwand zeigt unter dem Einfluß von Strontiumsalzen gar keine Anomalien, woraus man allerdings nichts gegen Hansteens Ansicht ableiten kann. Es ist ja sehr leicht möglich, daß Kalziumsalze oder Strontiumsalze in den Zellmembranen abgelagert werden können.

Herr Warthiadi von der hiesigen Technischen Hochschule hat beobachtet, daß Tradescantiazweige in kalkhaltiger, aber magnesiafreier Lösung auf Kosten von absterbenden Blättern lange Zeit immer neue Triebe entwickeln, während in der kalkfreien aber magnesiahaltigen Lösung keine Spur eines neuen Triebes erscheint. Jene neuen Triebe verlangten zwar auch etwas Magnesia, aber so viel dürfte wohl aus den absterbenden Blättern zugewandert sein. Neue Triebe aber erfordern in erster Linie eine normale Tätigkeit der Zellkerne, welche vor allem von der Anwesenheit von Kalzium abhängt.

Mit meiner Folgerung, daß sowohl Kern als Chlorophyllkörper kalziumhaltige Proteide enthalten, steht auch im Einklang, daß die Blätter die kalkreichsten Organe sind [1]), was nicht durch den Gehalt an Kalziumoxalat erklärt werden kann, denn bei Gramineen, welche, wie manche Liliaceen und Solanaceen, gewöhnlich Kalziumoxalat nicht enthalten, findet dieselbe Regel statt. Man könnte auch meinen, daß Kalk nur deshalb mehr in den Blättern vorhanden ist, weil diese überhaupt die aschereichsten Organe seien, allein es handelt sich hier nicht um einen absoluten, sondern um einen relativen Kalkgehalt.

Von Interesse ist die Beobachtung Ermakows, daß Kalziumsalze bei Assimilation des Nitratstickstoffs eine wichtige Rolle spielen,

1) Church (1887) hat normale und Albinoblätter von gleichaltrigen Zweigen von Quercus rubra verglichen. Aus seinen Daten folgt, daß 1000 Teile weißer Blätter (trocken) 2,2 Teile Kalk, 1000 Teile grüner Blätter aber 3,98 Teile Kalk enthielten. Ob der Gehalt an Kalziumoxalat verschieden war, wurde leider nicht untersucht. Jedenfalls sind die „Leukoplasten“ bei Albinoblättern degeneriert.

aber nicht bei der Assimilation von Ammoniakstickstoff. Dies läßt sich wohl so am einfachsten erklären, daß sich aus den gespeicherten Alkalinitraten zunächst Kalziumnitrat bildet und dieses leichter hydrolisiert wird, als Kalium- oder Natriumnitrat. Das Kalziumoxid geht dabei sofort in organische Salze über, während die Salpetersäure im Moment des Freiwerdens zu Ammoniak reduziert wird, das sofort als Baustein bei der Bildung von Eiweiß eventuell von Asparagin Verwendung findet.

Bei niederen Algen, wenn sie bei Abwesenheit von Kalziumsalzen wachsen, könnten sicherlich auch Magnesiumsalze dieselben Dienste leisten. So interessant Ermakow's Versuche auch sind, so können sie doch über die eigentliche physiologische Rolle des Kalks keine Entscheidung bringen, da die Pflanzen ja ebensogut Ammoniakstickstoff als Nitratstickstoff verwenden können.

Es wurde behauptet, daß Kaliumsalze ebenso wie Kalziumsalze der Giftwirkung von Magnesiumsalzen entgegenwirken können, allein die hierfür angeführten Versuche an Algen dauerten allzu kurze Zeit, um entscheidend zu sein. Wir[1]) haben in dieser Beziehung junge Gerstenpflanzen von 8 cm Höhe nach Befreiung vom Endosperm in folgende Lösungen eingesetzt, je drei Stück:

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| I | 0,4 % | Magnesiumsulfat. | | |
| II | 0,4 % | „ | + 0,2 % | Kalziumsulfat. |
| III | 0,4 % | „ | + 0,2 % | Kaliumsulfat. |
| IV | 0,4 % | Kaliumsulfat. | | |

Die Pflanzen in I waren in 7 Tagen tot, in Lösung III starben zwei Pflanzen in 15 Tagen, die dritte in 41 Tagen, in Lösung IV starben zwei Pflanzen in 28 Tagen, die dritte in 36 Tagen, in Lösung II aber hatte jede Pflanze nach 5 Monaten noch drei völlig gesunde Blätter, welche zum Teil auf Kosten der ersten abgestorbenen Blätter sich entwickelt hatten, und die Wurzeln waren von 6 cm auf 14 cm gewachsen, während in den Lösungen I, II und IV gar kein Wurzelwachstum zu konstatieren war. Erst 6 Monate nach Beginn des Versuchs zeigte das jüngste Blatt in II Gelbfärbung und fingen die Spitzen der anderen an zu verdorren. Das längste Blatt maß dann 10 cm. Die Gesamtzahl der toten Blätter war 21. Da sich ein Pilz auf den Blättern einstellte, wurde der Versuch beendigt. Er zeigt aber hinreichend klar, daß die Giftwirkung von Magnesiumsalzen nur

1) O. Loew und K. Aso, On physiologically balanced solutions. Bulletin, College of Agriculture, Tokyo University, Vol. VII, No. 3.

durch Kalziumsalze vollständig aufgehoben, durch Kaliumsalze aber nur verzögert wird, was auch Hansteen fand.

Es ist auch behauptet worden, daß Kaliumsalze bei Abwesenheit anderer Salze giftig auf Pflanzen wirken. Allein Algen sterben in Kaliumsalzlösungen bei Ausschluß anderer Nährstoffe so langsam ab, daß man kaum von einer wirklichen Giftwirkung mehr sprechen kann. Während z. B. Spirogyren in 0,2—0,3 %iger Lösung von Chlormagnesium in 2 Tagen total absterben, sind sie in 0,3 %iger Lösung von Chlorkalium erst in 18—20 Tagen erheblich geschädigt, indem der Kern losgelöst als unregelmäßig kontrahierte Masse in der Zelle liegt und der Chloroplast angegriffen ist. Das Cytoplasma ist hierbei oft noch völlig intakt und der Turgor noch erhalten.

Bei Phanerogamen ist es noch schwieriger, eine „Giftwirkung" von Kaliumsalzen in Abwesenheit anderer Nährstoffe zu erkennen. Gerstenkeimlinge von 18 cm Höhe, welche des letzten Restes des Endosperms beraubt wurden, können 1—3 Monate lang in 0,5 %igen Lösungen von Kaliumnitrat-, -chlorid, oder -sulfat lebend bleiben; Maiskeimlinge blieben über 7 Wochen lang in einer 0,5 %igen Lösung von Kaliumsulfat gesund.

Der Grund, warum Strontium das Kalzium physiologisch nicht ersetzen kann, ist jedenfalls in anderer Richtung zu suchen, als der für die Unfähigkeit des Magnesiums. Indessen chemische Unterschiede von einer solchen Art, daß man jene physiologische Unfähigkeit des Strontiums mit einiger Wahrscheinlichkeit davon ableiten könnte, sind bis jetzt nicht bekannt. Dagegen existieren zwischen Kalium und Natrium einige sehr markante Unterschiede, die wohl geeignet sind, den gewaltigen physiologischen Unterschied zwischen diesen zwei Elementen zu verstehen. Kalium kann sich z. B. mit Kohlenoxyd verbinden und diese Verbindung durch Einwirkung von Wasser in ein Benzolderivat (Trichinoyl) übergehen. Natrium aber ist unfähig, sich mit Kohlenoxyd zu verbinden. Kali kann bei der Einwirkung auf Phenol kondensierende Wirkung ausüben und viel Diphenol erzeugen, Natron aber liefert dabei wesentlich nur Resorzin und Phlorogluzin [1]). Schon vor langer Zeit hat daher Schreiber dieses die Ansicht ausgesprochen, daß Kali (vielleicht als Verbindung mit einem Nukleoproteid) bei den synthetischen Arbeiten in pflanzlichen wie tierischen Zellen beteiligt sei.

---

1) Weiteres hierüber O. Loew in „The Physiological Rôle of Mineral Nutrients", pag. 96, Washington 1899 und II Edition, Bulletin No. 45, pag. 19 u. 34. U. S. Department of Agriculture, Division of Vegetable Physiology and Pathology.

Beim Vergleich von Baryt mit Kalk habe ich einen Unterschied in der Wirkung auf verdünnten Formaldehyd wahrgenommen, welcher hier Erwähnung finden mag. Während bei der Anwendung von Kalk die Kondensation zu einem Zucker (Formose) vorherrscht über die Spaltung des Formaldehyds in Ameisensäure und Methylalkohol, überwiegt bei der Anwendung der äquivalenten Menge Baryt diese Spaltung über jene Zuckerkondensation. Da Strontian in bezug auf Basizität zwischen Kalk und Baryt steht, so kann man auch für Strontian ein geringeres Kondensationsvermögen als für Kalk vermuten. Indessen daraus könnte man wohl kaum die physiologische Unfähigkeit des Strontiums ableiten [1]).

Jedenfalls ergibt sich aber wieder, daß es irrig ist, zu schließen, daß der „Kalk nichts mit dem innigsten Getriebe des Lebens zu tun habe", weil die niedersten Organismen ihn nicht brauchen.

---

1) Wie Meltzer und Auer fanden, wirken Kalziumverbindungen anders auf tierische Zellen als Strontiumverbindungen und anders als Magnesiumverbindungen; sie können aber nur antagonistisch gegen letztere, nicht gegen erstere wirken. Amer. Journ. Physiol. 1908.

# ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Flora oder Allgemeine Botanische Zeitung

Jahr/Year: 1911

Band/Volume: 102

Autor(en)/Author(s): Loew Oscar

Artikel/Article: Über die Wirkung von Strontiumsalzen auf Algen 96-112