

Über den Chemotropismus der Pflanzenwurzeln.

Von
Theodor Porodko.

Mit 4 Textfiguren.

Einleitung.

Im Juli 1907 habe ich auf den Vorschlag meines verehrten Lehrers Geheimrat Prof. W. Pfeffer in Leipzig die Frage über den Chemotropismus bei den Pflanzen in Angriff genommen.

Vom Anfang an wurde beschlossen, die ganze Frage einer monographischen Bearbeitung zu unterziehen. Mehrere Gründe veranlaßten hierzu.

Vor allem reicht das faktische Material, über das wir zurzeit verfügen, bei weitem nicht aus. Außerdem findet man da eine Fülle von Widersprüchen und Ungenauigkeiten.

Sodann ist sogar die Existenz der chemotropen Reizbarkeit kaum über jeden Zweifel erhaben. Man erinnere sich nur, daß die ausgezeichneten Untersuchungen Miyoshis¹⁾ über den Chemotropismus der Pilzhyphen neuerdings durch Fulton²⁾ nicht bestätigt werden konnten. Der Grund eines solchen Mißlingens ist meines Erachtens klar und, was ich besonders betonen möchte, symptomatisch. Bisher kennen wir ja sehr wenig die Bedingungen, unter denen sich die chemotrope Sensibilität nachweisen und beobachten ließe. Bei dieser Sachlage wäre es nicht zu verwundern, wenn eine Nachprüfung selbst der eigenen Versuche auf Schwierigkeiten gestoßen wäre.

1) Miyoshi, Botanische Zeitung 1894, S. 1.

2) Fulton, The Botanical Gazette 1906, Vol. 41, p. 81—108.

Endlich ist die Methode der Erforschung des Chemotropismus unzureichend. Man fußt hier fast immer auf dem qualitativen Boden. Solange die Untersuchung eine vorläufige bleibt, ist dies unvermeidlich, ja zweckmäßig. Für die genaue Forschung hingegen bedarf man einer quantitativen Methode. Dieselbe fehlt uns jedoch bisher. Und eine Reihe von Fragen steht somit als unlösbar da, so z. B. die Frage über die Reizschwelle, das Unterscheidungsvermögen, die Präsentations- und Reaktionszeit, über die Abhängigkeit von verschiedenen Bedingungen des Diffusionsstromes, über die Qualifizierung des Reizes sowohl der Größe wie der Natur nach usw.

Aus dem Gesagten geht hervor, daß unsere Kenntnisse der chemotropen Reizbarkeit wohl ungenügend sind. Unter diesen Umständen schien es angebracht, speziell eine monographische Bearbeitung der ganzen Frage vorzunehmen.

Die Aufgabe war aber zu umfangreich. Sie mußte notwendigerweise eingeschränkt werden. Die Frage über den Chemotropismus bei den Pflanzen zerfällt naturgemäß in 2 Teile: einen Chemotropismus der Pilzhyphe und Pollenschläuche und einen solchen der Wurzeln. Ich habe mich auf den letzten Teil beschränkt.

Die vorliegende¹⁾ Arbeit stellt den ersten Teil der beabsichtigten Monographie über den Chemotropismus der Pflanzenwurzeln dar.

Literaturübersicht.

Bisher liegen nur vier Abhandlungen vor, welche sich speziell mit dem Chemotropismus der Pflanzenwurzeln beschäftigen. Die erste derselben wurde im Jahre 1904 von Fr. Newcombe und Anna Rhodes²⁾ veröffentlicht. Im folgenden Jahre erschienen zwei Abhandlungen: die eine von Sammet³⁾, die andere von Lilienfeld⁴⁾. Endlich wurde im Jahre 1908 eine vorläufige Mitteilung Cholodnyis⁵⁾ publiziert.

1) Eine vorläufige Mitteilung ist in den Berichten der Deutsch. Botan. Gesellsch., Bd. 28, S. 50—57 abgedruckt. Inzwischen ist eine ausführliche Publikation in russischer Sprache (*Mémoires d. la Société de naturalistes de la Nouvelle-Russie* [Odessa], t. 35, p. 109—343) erschienen.

2) Fr. C. Newcombe und Anna L. Rhodes, *The Botanical Gazette*, Vol. 37, p. 23—35.

3) R. Sammet, *Jahrb. f. wiss. Bot.*, Bd. 41, S. 611—649.

4) M. Lilienfeld, a) *Ber. d. Deutsch. Bot. Ges.*, Bd. 23, S. 91—96; b) *Beih. z. Botan. Centralbl.*, Bd. 19 (I. Abt.), S. 131—212.

5) N. Cholodnyi, *Verhandl. d. naturforsch. Ges. in Kiew*, Bd. 20, S. 244—249.

Untersuchungen von Newcombe und Rhodes.

Für jeden Versuch wurden zwei Blöcke aus 5—6-proz. Gelatine bereitet, und zwar in Form rechtwinkliger Prismen. Der zu prüfende Stoff befand sich nur in dem einen Block von je einem Paar gelöst. Beide Blöcke wurden so nahe aneinander geschoben, daß dazwischen eine Reihe der lotrecht angeordneten Wurzeln festgehalten wurden. Man setzte dann den Versuch 24 Stunden hindurch fort, und zwar bis $20-23^{\circ}\text{C}$ in einem dunklen und feuchten Raume. Dann schob man die Blöcke auseinander und stellte die Wachstumsrichtung der Wurzeln fest.

Nach dieser Methode untersuchten Newcombe und Rhodes die Wurzeln von *Lupinus albus* und *Cucurbita Pepo*. Bestimmte Resultate wurden nur mit der ersten Pflanze erzielt. Sie stellen sich folgendermaßen dar.

Verschiedene Konzentrationen von Na_2HPO_4 riefen nur positive Krümmungen hervor. NH_4NO_3 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, KNO_3 und MgSO_4 veranlaßten dagegen negative Krümmungen.

Um die relative Reizwirkung verschiedener Stoffe festzustellen, setzten Newcombe und Rhodes die Wurzeln zwischen Blöcken ein, welche die zu vergleichenden Stoffe in isotonischen Lösungen enthielten. Es ergab sich dabei, daß $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ stärker als MgSO_4 , MgSO_4 aber stärker als KNO_3 reizt.

Schließlich gehen Newcombe und Rhodes auf die Deutung der positiven durch Na_2HPO_4 verursachten Krümmungen ein.

Zunächst wird die folgende Annahme diskutiert. Das Wachstum auf der Vorderflanke der Wurzel dürfte unter dem Einfluß von Na_2HPO_4 stärker gehemmt werden als auf der Hinterflanke. Dann würde sich die Wurzel rein passiv in positiver Richtung krümmen. Derartige Krümmung wäre denjenigen an die Seite zu stellen, welche infolge einseitiger Beschädigung der Wachstumsregion eintreten und bekanntlich als traumatisch¹⁾ bezeichnet werden. Newcombe und Rhodes glauben nun, daß die von ihnen beobachteten positiven Krümmungen tatsächlich nicht traumatisch sind. Dafür spricht nach ihrer Meinung Folgendes. Dem Einfluß von Na_2HPO_4 wird nicht nur die Wachstumsregion der Wurzeln, sondern auch deren Spitze ausgesetzt. Die supponierte Schädigung müßte sich somit auch auf die letztere erstrecken und dann nur eine negative traumatrope Krümmung verursachen.

1) Pfeffer, Pflanzenphysiologie, 1904, Bd. 2, S. 591.

Denn direkte Versuche lehren, daß der Traumatropismus wohl instande ist, die Tendenz der Wachstumsregion zur positiven Krümmung zu überwinden. So traten z. B., wenn in einem Gelatineblock 0,01-proz. essigsaures Kupfer gelöst war, nur negative Krümmungen ein, obgleich diese giftige Verbindung auch die Wachstumsregion wohl beschädigen und mithin zur positiven Krümmung veranlassen müßte.

Ferner wird eine andere Annahme ins Auge gefaßt, und zwar, daß die in Rede stehenden Krümmungen osmotrop seien. Die Konzentration an der Vorderflanke der Wurzel ist relativ höher als die an der opponierten Flanke. Dementsprechend dürfte der Turgor an beiden Flanken nicht in gleichem Maße sinken, wodurch begreiflicherweise eine positive Krümmung hervorgerufen werden könnte. Gegen diese Annahme sprechen aber folgende Versuche. Die Wurzeln krümmen sich gegen 0,28-proz. Lösung von Na_2HPO_4 , wachsen aber gerade weiter, sobald diese Lösung durch eine isotonische (3,5%) von Rohrzucker ersetzt ist. Damit nicht genug. Befinden sich die Wurzeln zwischen Blöcken, von denen der eine 0,28% Na_2HPO_4 , der andere dagegen 3,5% Rohrzucker enthält, so krümmen sie sich gegen den ersten Block.

Auf Grund der mitgeteilten Versuche glauben Newcombe und Rhodes erwiesen zu haben, daß positive durch Na_2HPO_4 hervorgerufene Krümmungen rein chemotrop sind.

Was nun die negativen Krümmungen anbelangt, so wird über deren Natur nicht diskutiert. Zwar neigen die Verfasser zu der Annahme, daß hier der Chemotropismus vorliegt, geben aber zu, daß auch der Traumatropismus hier mitbeteiligt sein dürfte. —

Gelegentlich der Untersuchungen von Newcombe und Rhodes möchte ich nur auf zweierlei hinweisen.

1. Die Wurzeln befanden sich zwischen 2 Blöcken, von denen nur der eine das zu prüfende Salz enthielt. Die Verfasser glauben nun, das Salz habe nur auf diejenige Wurzelflanke eingewirkt, die dem betr. Block unmittelbar angelegt war. Das ist aber sicher nicht der Fall. Die Blöcke sind ja dicht aneinander gedrückt. Notwendigerweise muß auch eine Diffusion von dem einen Block zum andern hin stattfinden. Sobald die Wurzeln sich aber als im Diffusionsstrom erweisen, wirkt das betr. Salz auch auf deren Hinterflanke ein.

2. Die Ausführungen der Verfasser, daß die durch Na_2HPO_4 verursachten positiven Krümmungen nicht traumatisch sein könnten,

sind nicht beweiskräftig. Eine entscheidende Bedeutung wird dem Versuch mit Kupferazetat beigemessen. Indessen wurde dieses Salz nur in einer einzigen Konzentration geprüft. Es ist nun möglich, daß die geprüfte Konzentration eben ausreichte, um nur die Wurzelspitze zu schädigen, mithin also eine negative traumatropische Krümmung hervorzurufen, daß sie dagegen zu schwach war, um die eine Seite der Wachstumszone zu schädigen und dadurch eine positive traumatische Krümmung zu erzeugen. Höhere Konzentrationen von Kupferazetat dürften demnach ebensolche positive Krümmungen hervorrufen wie Na_2HPO_4 . Solange diese Möglichkeit nicht ausgeschlossen ist, läßt sich über die Natur der positiven durch Na_2HPO_4 verursachten Krümmungen nichts Sicheres sagen.

Untersuchungen von Sammet.

Für je einen Versuch benutzte Sammet einen großen Glaszylinder, der mit Leitungswasser¹⁾ gefüllt und mit einer Zinkblechscheibe bedeckt war. In der Mitte der Scheibe befand sich eine größere kreisrunde Öffnung; um dieselbe herum, und zwar in Abständen von 1, 3 und 6 cm, zahlreiche kleine Löcher. In die letzteren wurden die Wurzeln eingesetzt und mit Watte darin so befestigt, daß sie lotrecht in das Wasser tauchten. In die zentrale Öffnung wurde eine Tonzelle derart hineingepaßt, daß sie fast bis zu den Rändern in dem Wasser hing. In der Tonzelle befand sich die diffundierende Flüssigkeit. Folglich befanden sich die Wurzeln nach einiger Zeit in einem Diffusionsstrom. Die so zusammengestellten Gefäße ließ Sammet im Dunkeln bei 17—19° C. 12—24 Stunden lang stehen. Dann stellte er die Wachstumsrichtung der Wurzeln fest.

Auf die obige Weise wurden die Wurzeln folgender 14 Pflanzenarten untersucht: *Lupinus albus*, *Vicia Faba major* und *minor*, *Vicia sativa*, *Phaseolus multiflorus*, *Soja hispida*, *Pisum sativum*, *Cucurbita Pepo*, *Citrullus colocynthis*, *Tropaeolum majus*, *Fagopyrum esculentum*, *Brassica nigra*, *Sinapis alba*, *Helianthus annuus*, *Zea Mays*. Besonders gut fielen die Resultate mit *Lupinus albus*, *Vicia sativa* und *Sinapis alba* aus. Mit diesen Pflanzen wurde auch meistens experimentiert. Es wurde das Verhalten der Wurzeln in einem Diffusionsstrom von NaCl, KNO_3 , Essigsäure, Glycerin, Rohrzucker, Äthylalkohol, Äthyläther, Kampfer und Gips untersucht.

1) Um dasselbe zu entgiften, wurde ein Säckchen Erde darin aufgehängt.

Abgesehen von den zwei letzten Stoffen ¹⁾ prüfte Sammet alle übrigen in verschiedenen Konzentrationen.

Auf Grund seiner Versuche kam Sammet zu folgenden Schlüssen.

Die Wurzeln der sämtlichen oben erwähnten Pflanzen führen im Diffusionsstrom aller der angewandten Stoffe Krümmungen aus. Bei schwächeren Konzentrationen beobachtet man positive Krümmungen, bei stärkeren negative. Die Ablenkungswinkel der gekrümmten Wurzeln schwanken zwischen 0 und 90 Grad. Die fraglichen Krümmungen werden eben durch ungleichmäßige Stoffverteilung im Wasser hervorgerufen. Denn sowohl im Wasser als auch in homogenen Salzlösungen wachsen die Wurzeln gerade weiter. Positive Krümmungen sind als chemotrop anzusehen, weil sie nicht durch äquimolekulare Konzentrationen verschiedener Stoffe erzeugt werden. Negative Krümmungen dürften gleichfalls chemotrop sein, übrigens wäre dabei auch die Beteiligung des Osmotropismus keineswegs in Abrede zu stellen.

Um die Verteilung der chemotropen Sensibilität an der Wurzel zu verfolgen, stellte Sammet 2 Versuche mit den um 1—4 mm dekapitierten Wurzeln an. Im ersten Versuch diffundierte eine 10-proz. Lösung von NaCl, im zweiten eine 25-proz. Lösung von Rohrzucker. Es ergab sich, daß bei einer Dekapitation, die 3 mm nicht übertraf, die Wurzeln normale chemotrope Krümmungen ausführten. Erst bei Wegnahme des 4. mm stellten die Wurzeln ihr Wachstum ein und blieben gerade. —

Zunächst sei auf die Fehler der Sammetschen Methode hingewiesen.

1. Die Hydrodiffusion kann nur dann regelmäßig verlaufen, wenn der Versuch in einem zitterfreien und konstant temperierten Raum angestellt ist. Denn sowohl das Zittern des Diffusionsgefäßes als die Temperaturschwankungen versetzen die Flüssigkeit in Massenbewegung und vermischen so rein mechanisch die verschieden konzentrierten Schichten. In diesem Falle darf man natürlich nicht das Konzentrationsgefälle als die Ursache der Wurzelkrümmungen auffassen.

Beide angeführte Bedingungen wurden nun von Sammet nicht erfüllt, was aus S. 614 und 623 seiner Abhandlung hervorgeht.

¹⁾ Kampfer wurde in einer gesättigten Lösung angewandt, Gips — in Platten, die direkt in das Wasser gehängt waren.

2. Als Diffusionsmedium benutzte Sammet Leitungswasser, das sich mit einem Säckchen Erde in Berührung befand. Dieses Verfahren sollte nur das Wasser für die Wurzeln unschädlich machen, in Wirklichkeit aber verwickelte es meines Erachtens die Versuchsbedingungen in sehr hohem Grade.

Erstens befand sich die Tonzelle im Wasser, das vom Anfang an eine gewisse Menge von gelösten Stoffen enthielt. Zusammensetzung und Konzentration derselben waren unbekannt und kaum in sämtlichen Versuchen konstant. Dementsprechend dürfte sowohl die Diffusionsgeschwindigkeit der untersuchten Stoffe als der Abstumpfungsgrad von chemotroper Sensibilität der Wurzeln schwankend sein.

Zweitens fuhren die löslichen Stoffe der in dem Säckchen befindlichen Erde fort, auch während des Versuches zu diffundieren. Keinesfalls darf man daher behaupten, daß die Wurzeln nur unter dem Einfluß des einen Diffusionsstromes gestanden haben. Es gab faktisch zwei Diffusionsströme: aus der Tonzelle und aus dem Säckchen. Wie sie sich kombinierten, läßt sich nicht sagen. Es bleibt somit unbekannt, in welcher Richtung der supponierte chemotrope Reiz die Wurzeln affizierte.

Drittens wurde gleichzeitig mit der Erde eine gewisse Menge von Bodenbakterien dem Wasser zugeführt. Dieselben dürften sich im Laufe von 12—24 Stunden, insbesondere in den Versuchen mit organischen Stoffen, ganz erheblich vermehren. Setzen wir selbst voraus, daß die Wurzeln durch Bakterien unbeschädigt blieben, so müssen wir immerhin zugeben, daß eine kräftige Vermehrung der letzteren den regelmäßigen Verlauf der Diffusion beeinträchtigen dürfte. Denn stärkere Konzentrationen dürften durch die Tätigkeit der Bakterien herabgesetzt, schwächere dagegen sogar vernichtet werden. Doch ist es möglich, daß die Gegenwart der Bakterien gar nicht so unschädlich für Wurzeln ist. Dann dürften die auftretenden Krümmungen mit aller Vorsicht zu deuten sein. Die Bakterien könnten ja die Resistenz der Wurzeln gegen schädliche Einflüsse abschwächen. Da aber die Vorderflanke der Wurzel sich mit stärkeren Konzentrationen berührte, könnte gerade sie leichter beschädigt werden und schließlich eine positive traumatische Krümmung ausführen.

3. Der zu diffundierende Stoff befand sich in einer Tonzelle, die im oberen Teil des Zylinders hing. Unter solchen Bedingungen müßte sich aber der Stoff im Wasser schräg abwärts ausbreiten.

Dies müßte z. T. unter dem Einfluß eines größeren spezifischen Gewichts des Stoffes erfolgen, z. T. aber deshalb, weil von der unteren Grenzfläche der Diffusionszone, die theoretisch horizontal sein sollte, sich tatsächlich sekundäre Diffusionsströme in noch reines Wasser abwärts abzweigen¹⁾. Es bleibt deswegen auch aus diesem Grunde unbekannt, nach welcher Richtung der zu prüfende Stoff tatsächlich diffundierte, also unter welchem Winkel der Strom zur Wurzelachse einwirkte.

4. Abgesehen von den Untersuchungen mit Kampfer und Gips, müßte sich die Konzentration des Stoffes in der Tonzelle mit der Zeit erniedrigen. Andererseits konnte sich die ins Wasser getretene Substanz nur solange ausbreiten, bis sie an die Wände des Glaszylinders gelangte. Von diesem Augenblick an fand hier eine allmähliche Konzentrationssteigerung statt. Begreiflicherweise führen beide Momente das Sinken des Konzentrationsgefälles herbei. Wie lange sich dasselbe überhaupt bewährt, ist unbekannt.

5. Die Methode Sammets gestattet gar nicht die reale Größe der auf die Wurzel einwirkenden Konzentration zu berechnen. Dies ist die Folge des Umstandes, daß Tonzellen angewandt wurden. Denn die Wände derselben verlangsamten das Austreten des Stoffes in einem Grade, der nicht nur für verschiedene Stoffe, sondern auch für verschiedene Konzentrationen ein und desselben Stoffes ungleich sein dürfte. Zwar glaubt Sammet experimentell bestimmt zu haben, daß die realen Konzentrationen des Stoffes in verschiedenen Entfernungen von der Tonzelle im allgemeinen sehr niedrig gewesen seien. Doch wurden die betr. Bestimmungen nur für eine 2-proz. Lösung von NaCl ausgeführt. Indessen befanden sich beim Prüfen des Verhaltens der Wurzeln gegen NaCl in der Tonzelle 25-, 20-, 10- und 5-proz. Lösungen dieses Salzes. Wir wissen also nicht, wie stark nun das Austreten gerade dieser Konzentrationen durch die Tonzellenwände gehemmt wurde.

6. Es ist schwierig, die Lösung im Innern der undurchsichtigen Tonzelle auf gleiches Niveau mit der außenliegenden Flüssigkeit zu stellen. Ob und in welchem Grade dieser Schwierigkeit vorgebeugt worden ist, wissen wir nicht. Sollte aber die äußere und innere Flüssigkeit wirklich ein verschiedenes Niveau haben, so hätte durch die Tonzellenwände eine Filtration unter dem Druck

1) Faktisch gestalten sich hier die Verhältnisse noch komplizierter, weil das über die Diffusion aus der Tonzelle Gesagte sich auch auf das Säckchen Erde bezieht.

stattfinden müssen. Die Flüssigkeiten würden dann in Bewegung geraten, wodurch die Bedingungen für rheotrope Krümmungen geschaffen sein dürften.

Soviel über die Sammetsche Methode. Gehen wir nunmehr auf seine Schlüsse ein.

Sammet ist der Meinung, daß die von ihm beobachteten Wurzelkrümmungen chemotrop seien. Gegen etwaige Mitbeteiligung des Osmotropismus werden zweierlei Gründe¹⁾ angeführt. Zuerst rufen schon sehr niedrige Konzentrationen Krümmungen hervor. Sodann: während die Kampferlösung Krümmungen erzeugt, fehlen diese in den Versuchen mit äquimolekularen Lösungen von NaCl und Zucker.

Gegen die Argumentation Sammets ist folgendes einzuwenden. Wie sub 5) gezeigt, ist die Annahme, daß die Wurzeln im allgemeinen unter dem Einfluß niedriger Konzentrationen ständen, nicht bewiesen. Noch weniger darf man von der Äquimolekularität der auf die Wurzeln einwirkenden Konzentrationen reden. Freilich wurden in die Tonzelle äquimolekulare Lösungen eingetan, diese dürften aber beim Passieren der Tonzellenwand in verschiedenem Maße an Konzentration verlieren. Es ist also klar, daß eine eventuelle Mitbeteiligung des Osmotropismus am Zustandekommen der fraglichen Krümmungen keinesfalls ausgeschlossen ist. Wäre dem aber auch so, die chemotrope Natur der Krümmungen wäre noch lange nicht bewiesen. Denn es sind bei der Deutung dieser Krümmungen mehrere Möglichkeiten denkbar. So beobachtete Sammet Krümmungen im Diffusionsstrom aller daraufhin geprüften Stoffe. Da jeder Stoff eine osmotische Wirkung besitzt, liegt es klar auf der Hand, daß es sich hier gerade um den Osmotropismus handeln könnte. Da wir ferner nichts darüber wissen, wie vollkommen eine gegenseitige Filtration der in Zylinder und Tonzelle befindlichen Flüssigkeiten eliminiert wurde, so kann die rheotrope Natur der Krümmungen nicht ohne weiteres in Abrede gestellt werden. Schließlich ist auch die folgende Annahme möglich. In der Tonzelle befanden sich hochkonzentrierte Lösungen. Wie stark sie durch die Tonwand herabgesetzt wurden, ist unbekannt. Desgleichen wissen wir wenig über die Wachstumsgeschwindigkeit und den Turgeszenzgrad der Wurzeln. In Anbetracht all dessen dürften positive Krümmungen als traumatisch, negative

1) A. a. O., S. 622.

als traumatrop gedeutet werden. Derartige Deutung gewinnt speziell für positive Krümmungen* um so mehr an Wahrscheinlichkeit, daß Sammet sie auch an geköpften Wurzeln beobachtete. Indessen lehren Versuche Cholodnyis¹⁾ und Polowzows²⁾, daß echte chemotrope Krümmungen in Abwesenheit der Wurzelspitze nicht eintreten.

Ziehen wir nun aus dem Gesagten das Fazit, so kommen wir zu folgendem definitiven Schlusse. Möglicherweise sind die von Sammet beschriebenen Krümmungen chemotrop, sicher aber ist das nicht. Denn die Mitbeteiligung des Osmo-, Rheo- und Traumatropismus (resp. der Schädigung der Wachstumszone) ist nicht ausgeschlossen.

Untersuchungen von Lilienfeld.

Bei der Ausführung seiner Versuche benutzte Lilienfeld meistens 2 Methoden. Die erste ist der Methode von Newcombe und Rhodes ähnlich. Die zweite wurde von Lilienfeld selbständig ausgearbeitet und stellt sich folgendermaßen dar. Runde Glasschalen wurden mit einer 3-proz. Gelatine ausgegossen. In der Mitte der Gallerte stach man eine zylindrische Höhlung aus, die bis zum Boden der Schale reichte und 20 ccm der zu prüfenden Lösung enthielt. Um die Höhlung herum in Abständen, die zwischen 5 und 50 mm schwankten, wurden 10—12 Wurzeln lotrecht eingesteckt. Die so zubereiteten Schalen wurden in einer dunklen Dampfkammer gehalten. Nach 24 Stunden stellte man die Wachstumsrichtung der Wurzeln fest.

Lilienfeld experimentierte mit den Wurzeln folgender Pflanzen: *Lupinus albus*, *Vicia Faba*, *Vicia villosa*, *Ervum Lens*, *Pisum sativum*, *Cicer arietinum*, *Phaseolus vulgaris*, *Lepidium sativum*, *Raphanus sativus*, *Raphanus olaiserus*, *Brassica napus*, *Cucurbita Pepo*, *Helianthus annuus*, *Zea Mays*. Eine ganz überwiegende Mehrzahl der Versuche wurde mit *Lupinus albus* angestellt.

Hier seien Resultate angeführt, die mit *Lupinus albus* nach der zweiten³⁾ Methode erzielt wurden. Der Übersichtlichkeit halber erlaube ich mir, alle dabei untersuchten Stoffe in 5 Gruppen ein-

1) A. a. O.

2) W. Polowzow, Untersuchungen über Reizerscheinungen bei den Pflanzen, 1909, S. 72, 111, 112, 122, 124.

3) Den nach der ersten Methode erhaltenen Resultaten schreibt Lilienfeld wenig Bedeutung zu, insofern diese Methode für die Wurzeln nachteilig ist.

zuteilen. Zur ersten Gruppe gehören diejenigen Stoffe, die keine Reaktion hervorgerufen haben, und zwar $K_4Fe(CN)_6$, $MgCO_3$, $CaCO_3$, zitronensaures Kalium, Eisenoxydulphosphat, Glukose, Saccharose und Laktose. Die Stoffe der zweiten Gruppe riefen in allen geprüften Konzentrationen nur positive Krümmungen hervor. Es gehören hierher: $(NH_4)_2SO_4$, K_2SO_4 , Ammoniumferrosulfat, Karbonate von Li, NH_4 , K und Na; Phosphate von NH_4 , Na, K, Mg, Ca und Eisenoxyd; $K_3Fe(CN)_6$, $KMnO_4$; Ammoniumvanadat, weinsaures, zitronensaures und harnsaures Ammonium; weinsaures Natronkali; weinsaures, essigsaures und apfelsaures Kalium, Knochenmehl, Malz- und Fleischextrakt, Pflaumendekokt. Die Stoffe der dritten Gruppe riefen in allen geprüften Konzentrationen nur negative Krümmungen hervor. Hierher gehören: Chloride von NH_4 , Na, K, Li, Ca, Mg, Ba, Fe, Al, Co, Ni, Mn, Cu, Zn und Hg; Nitrate all dieser Metalle mit der Ausnahme von K; Sulfate von Na, Mg, Al, Cu, Zn; NaOH, KOH, $Ca(OH)_2$; HCl, HNO_3 , H_2SO_4 ¹⁾, H_3PO_4 ¹⁾, Ameisen-, Essig-, Wein-, Zitronen- und Apfelsäure; $K_2Cr_2O_7$, Kalialaun, KCNS, essigsaures Cu und Pb, Methylenblau, Eosin, Knopsche Nährlösung. Die Stoffe der vierten Gruppe rufen bei einigen Konzentrationen positive Krümmungen hervor, bei anderen — negative. Hierher gehören: MgJ_2 , weinsaures Natrium, KNO_3 und harnsaures Kalium. Schließlich faßt die fünfte Gruppe Stoffe zusammen, die unbestimmte Resultate zutage brachten. Hierher gehören einerseits Stoffe, unter deren Einfluß sich nicht mehr als eine Hälfte der zum Versuch genommenen Wurzeln krümmte, und zwar KJ, KBr, essigsaures und oxalsaures Ammonium, Harnstoff, Asparagin, Karmin, Fuchsin und Cyanin. Auf der anderen Seite gehören hierher Stoffe, die nur in letalen Konzentrationen geprüft wurden, und zwar KCN, ameisensaures K und NH_4 , essigsaures Na und Ca, buttersaures Kalium.

Beiläufig wird auf die Frage nach der Verteilung der chemotropen Sensibilität an der Wurzel eingegangen. Zu diesem Zwecke dekapitierte Lilienfeld Wurzeln um 1—2 mm und setzte sie dem Diffusionsstrom von je $(NH_4)_2HPO_4$, KH_2PO_4 , weinsaurem K oder NaCl aus. In den ersten 3 Fällen traten immer positive Krümmungen ein, im letzten dagegen negative.

1) Bei 0,0001% beider Säuren krümmte sich nur die eine Hälfte der zum Versuch genommenen Wurzeln positiv, die andere Hälfte dagegen blieb indifferent. Dieses Resultat ist natürlich als unbestimmt zu betrachten.

Was nun die Wurzeln der anderen oben erwähnten Pflanzen anbelangt, so ergab sich folgendes. *Ervum Lens* reagierte überhaupt nicht. *Vicia villosa*, *Zea Mays* und 4 Kruziferen, nach der ersten Methode allein untersucht, krümmten sich nur positiv. Alle übrigen 6 Arten verhielten sich im großen und ganzen dem *Lupinus albus* analog.

Auf Grund seiner Versuche kommt Lilienfeld zu folgenden Schlüssen.

Die Methode der Gelatineblöcke ist für die Untersuchung des Chemotropismus der Wurzeln überhaupt ungeeignet. Die nach der zweiten Methode beobachteten Krümmungen sind chemotrop. Die Richtung derselben hängt z. T. von der Natur des diffundierenden Stoffes ab, z. T. aber von dessen Konzentration. Namentlich geht eine positive Krümmung in eine negative über, wenn die Konzentration eine gewisse Grenze überschreitet. —

Zunächst sei auf die Methode Lilienfelds eingegangen.

Im Vergleich zur Methode Sammets hat die von Lilienfeld¹⁾ den Vorteil, daß hier dank der gallertartigen Konsistenz der Gelatine die Möglichkeit einer Vermischung verschieden konzentrierter Schichten wegfällt. Bei dieser Methode können weder das Zittern des Gefäßes noch die Temperaturschwankungen den regelmäßigen Gang der Diffusion beeinträchtigen. Dieser Vorteil der Methode ist leider der einzige. Im übrigen läßt sich eine ganze Reihe von Nachteilen nachweisen.

1. Als Diffusionsmedium eignet sich die Gelatine²⁾ überhaupt wenig. Denn sie stellt nicht nur ein gutes Substrat für Bakterien dar, sondern wird auch von diesen verflüssigt. Da beim Einsetzen der Wurzeln Bakterien mit eingeführt werden, so findet vermutlich eine besonders kräftige Bakterienvermehrung und Gelatineverflüssigung in der unmittelbaren Nachbarschaft der Wurzeln statt. Abgesehen davon, daß eine derartige Nachbarschaft der Bakterien das Wachstum der Wurzeln beeinträchtigen könnte, verliert der Diffusionsverlauf seine Regelmäßigkeit. Einerseits wird dann die Konzentration des diffundierenden Stoffes durch Bakterien herabgesetzt. Diese Herabsetzung dürfte um so ansehnlicher ausfallen, da sich in der Höhlung nur 20 ccm Lösung befand. Andererseits ist die Diffusion durch

1) Dasselbe bezieht sich begrifflicher Weise auch auf die Methode von Newcombe und Rhodes.

2) Es ist zu bedauern, daß Lilienfeld nicht einmal angibt, welches Präparat von Gelatine er benutzte und ob er dasselbe irgendwie reinigte.

Schichten der verflüssigten Gelatine schon mit den Nachteilen der Hydrodiffusion verbunden¹⁾).

2. Lilienfeld teilt nichts davon mit, ob er die Geschwindigkeit bestimmte, mit welcher Lösungen verschiedener Stoffe und Konzentrationen in der Gelatine diffundierten. Dieser Umstand ist aber von ganz wesentlicher Bedeutung. Lilienfeld ordnete die Wurzeln um die Höhlung herum in Abständen von 5—50 mm an. Setzen wir nun voraus, daß der zu prüfende Stoff während der ganzen Versuchsdauer nur etwa 30 mm zurücklegte. Offenbar würden sich dann alle die Wurzeln außerhalb der Diffusionszone befinden, welche um mehr als 30 mm von dem Höhlungsrand entfernt sind. Bleiben sie dann gerade, so beweist es noch lange nicht, daß sie sich dem Strom gegenüber indifferent verhalten. Krümmen sie sich, so darf man diese Krümmungen doch in keine Beziehung mit dem Strom bringen.

Diese Unterlassung Lilienfelds erschwert in sehr hohem Grade eine richtige Beurteilung der Resultate vieler seiner Versuche.

3. Die Methode Lilienfelds ist für die quantitative Untersuchung des Chemotropismus der Wurzeln ungeeignet. Denn sie kann nichts über diejenigen realen Konzentrationen des diffundierenden Stoffes aussagen, welche chemotrope Krümmungen hervorrufen.

4. Es ist zu bedauern, daß von den zahlreichen (110) Stoffen nur wenige in mehreren Konzentrationen geprüft worden sind. Meistens liegen Angaben nur über 2—3 Konzentrationen vor, die zudem ganz zufällig gewählt wurden. So wird z. B. von NH_4NO_3 nur so viel mitgeteilt, daß bei der Diffusion der 1-proz. Lösung sich 18 Wurzeln negativ krümmen, während 10 indifferent bleiben. Wie die Wurzeln sich aber den höheren wie auch den niedrigeren Konzentrationen gegenüber verhalten, bleibt unbekannt. Unter diesen Umständen ist natürlich das Verhalten der Wurzeln dem Diffusionsstrom von NH_4NO_3 gegenüber keinesfalls als klargelegt anzusehen.

1) Das Ersetzen der Gelatine durch Sand, Sägespäne und anderweitige lockere Medien verschlimmert eher die Sache. Denn solche Medien sind zunächst undurchsichtig. Sodann findet hier eine Diffusion nur durch die mit Wasser gefüllten Zwischenräume des Substrats statt. Jedoch wissen wir schon, wie schwer die Bedingungen für regelmäßige Hydrodiffusion zu beschaffen sind. Endlich ist nicht zu vergessen, daß die fraglichen Medien unregelmäßig feucht sind und Luftblasen enthalten, so daß die Wurzeln hier auch den hydro- und aërotropen Reizen ausgesetzt sein dürften.

Vergegenwärtigen wir uns nun alle Defekte der Lilienfeldschen Methodik, so werden wir auch den erzielten Resultaten einen gewissen Skeptizismus entgegenbringen müssen. Dieselben erweisen sich als sehr unbestimmt. Dies hängt z. T. zwar von der Methode ab, hauptsächlich aber davon, daß die Versuche wenig kontrolliert wurden, wodurch auch die Resultate oftmals vieldeutig werden.

Alle von Lilienfeld nach der zweiten Methode untersuchten Stoffe wurden oben in 5 Gruppen geteilt.

Die Resultate, die mit den Stoffen der ersten und fünften Gruppe erzielt wurden, sind unbrauchbar, und zwar aus folgenden Gründen.

Den Stoffen der ersten Gruppe gegenüber verhielten sich die Wurzeln indifferent. Doch könnte ein derartiger Indifferentismus nur ein scheinbarer sein. Möglicherweise reagierten die Wurzeln entweder deshalb nicht, weil sie nicht mehr wuchsen, oder deshalb, weil die zu prüfende Substanz noch nicht bis zu ihnen gelangt war. Beide aufgestellten Möglichkeiten lassen sich allerdings nicht bestreiten, da Angaben sowohl über Wachstumsgeschwindigkeit der Wurzeln wie über Diffusionsgeschwindigkeit fehlen. Wir wissen also nicht, ob den Stoffen der ersten Gruppe irgend welche Reizwirkung zukommt.

Die Stoffe der fünften Gruppe ergaben unbestimmte Resultate. Der eine Teil dieser Stoffe wurde nur in letalen Konzentrationen geprüft. Es fehlen Angaben über das Verhalten der Wurzeln bei mäßigeren Konzentrationen. Der andere Teil der fraglichen Stoffe ließ nur die Hälfte der genommenen Wurzeln reagieren. Solange die betr. Versuche nicht wiederholt wurden, dürften solche Resultate als zufällig betrachtet werden. Wir wissen also auch hier nicht, ob und welche Reizwirkung den Stoffen der fünften Gruppe zukommt.

Es bleiben also nur 3 Gruppen übrig. Sie enthalten Stoffe, die positive oder negative Krümmungen hervorgerufen haben. Die betr. Resultate dürften nach meiner Meinung nur zur vorläufigen Orientierung in der Frage dienen. Als solche gestatten sie anzunehmen, daß die *Lupinus*-Wurzeln¹⁾ befähigt sind, sich im Diffusionsstrom vieler Stoffe positiv oder negativ zu krümmen. Weiter nichts. Es liegt kein Grund vor, zu behaupten, daß diese Stoffe

1) Die mit anderen Pflanzenarten erhaltenen Resultate sind einer Nachprüfung bedürftig. Denn nur wenige Stoffe wurden untersucht, wobei sich z. T. widersprechende Resultate ergaben.

nur positive Krümmungen, jene nur negative hervorrufen. Denn es wurden zu wenige Konzentrationen je eines Stoffes geprüft. Es bleibt ja immer möglich, daß eine ausgedehntere Untersuchung wesentlich andere Resultate liefern könnte. Ebenso darf man nicht behaupten, daß die Krümmungen von *Lupinus*-Wurzeln chemotrop seien. Denn, wie später auseinandergesetzt ist, stellt der Diffusionsstrom einen zusammengesetzten Reiz dar. Durch die Versuche Lilienfelds ist aber keinesfalls erwiesen, daß die von ihm beobachteten Krümmungen eben Reaktionen auf den chemischen Reiz seien.

Untersuchungen von Cholodnyi.

Cholodnyi beschäftigte sich nur mit der Frage nach der Verteilung der chemotropen Sensibilität an der Wurzel. Er bediente sich der folgenden Methode. Die Wurzeln befanden sich in einem feuchten, auf dem Klinostaten rotierenden Rezipienten. Auf jede Wurzel, und zwar einseitig, wurde ein winziges Stückchen Pergamentpapier gelegt. Dasselbe wurde vorher mit destilliertem Wasser angefeuchtet, in dem MgCO_3 oder $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ suspendiert wurde. Die Teilchen der genannten Stoffe lösten sich allmählich in den sauren Ausscheidungen der Wurzel auf und reizten die letztere einseitig und streng lokal. In der einen Versuchsreihe legte Cholodnyi Papierstücke auf die Spitze der Wurzel, in der anderen — auf deren wachsende etwa 2—3 mm von der Spitze entfernte Zone. Im ersteren Falle traten nun fast ausschließlich negative Krümmungen ein, im letzteren vornehmlich positive. Die Tendenz zur negativen Krümmung erwies sich stärker als die zur positiven, was aus denjenigen Versuchen folgt, wo die Wurzel an beiden erwähnten Punkten gleichzeitig gereizt wurde. Die Krümmung trat erst nach ca. 7 Stunden ein. Durch spezielle Versuche ist es erwiesen, daß der Kontakt mit den reinen Papierstückchen an sich noch keine Wurzelkrümmungen hervorruft.

Aus seinen Versuchen zieht Cholodnyi den Schluß, daß der chemotrope Reiz vorwiegend durch die Wurzelspitze perzipiert ist. Die Wachstumszone besitzt aber entweder eine chemotrope Sensibilität ganz anderer Art oder ist überhaupt chemotrop unempfindlich und krümmt sich nur deshalb positiv, weil die betr. Salze die Wachstumsgeschwindigkeit der Wurzel an der Berührungsstelle etwas herabsetzen.

Eigene Untersuchungen.

Aufgabe derselben.

Eine kritische Besprechung der Abhandlungen von Newcombe und Rhodes, Sammet und Lilienfeld ergab, daß die von diesen Forschern benutzten Methoden mangelhaft und die von ihnen gezogenen Schlüsse wenig begründet sind. Faktisch steht nur die Tatsache fest, daß die Wurzeln mehrerer Pflanzen, dem Diffusionsstrom verschiedener Stoffe ausgesetzt, sich positiv oder negativ krümmen. Eine tiefere Einsicht in diese Tatsache ist aber des weiteren nicht gewonnen worden. Denn wir sind ja über zwei fundamentale Fragen wenig unterrichtet. Welcher Natur sind die im Diffusionsstrom eintretenden Krümmungen? Ist das Verhalten der Wurzeln im Diffusionsstrom erschöpfend untersucht worden? Man darf ja nicht behaupten, daß die fraglichen Krümmungen chemotrop seien, weil eine eventuelle Beteiligung der sonstigen im Diffusionsstrom tätigen Reizfaktoren nicht ausgeschlossen war. Ebenso wenig steht fest, daß wir durch vorliegende Untersuchungen das ganze Verhalten der Wurzeln im Diffusionsstrom kennen gelernt haben. Denn bisher sind nur wenige Konzentrationen je eines Stoffes geprüft worden. Eine erneute Untersuchung dürfte immer auf unerwartete Besonderheiten im Verhalten der Wurzeln stoßen. So wissen wir z. B. aus Lilienfelds Angaben, daß im Diffusionsstrom einer 1-, 0,1- und 0,01-proz. Lösung von MgCl_2 immer negative Krümmungen eintreten. Dies schließt aber gar nicht aus, daß außerhalb dieser Grenzen anders gerichtete Krümmungen stattfinden können. Natürlich würde sich dann das ganze Bild des Verhaltens der Wurzeln MgCl_2 gegenüber uns wesentlich anders vorstellen.

Bei der geschilderten Sachlage schien es mir wichtig, in erster Linie gerade auf diese beiden Fragen einzugehen. Es war aber von vornherein klar, daß diese Fragen nur unter Zuhilfenahme einer quantitativen Methode sich beantworten ließen. Einerseits ist es nötig, erst die reale Größe der auf die Wurzeln einwirkenden Konzentrationen zu kennen, um die Reizeffekte verschiedener Stoffe untereinander vergleichen zu können, maßgebende Momente vermutlich dadurch hervortreten zu lassen und so dem Verständnis der Natur von Krümmungen näher zu treten. Andererseits darf man unter Benutzung einer nur quantitativen Methode sicher sein,

daß die Wurzeln der Einwirkung verschiedener Konzentrationen wirklich ausgesetzt wurden, so daß etwaige Besonderheiten in deren Verhalten der Beobachtung nicht entgehen konnten.

Aus dem Gesagten ergeben sich unmittelbar drei spezielle Aufgaben meiner Arbeit. Erstens war eine quantitative Methode der Untersuchung des Chemotropismus der Wurzeln auszuarbeiten. Zweitens hatte ich unter Zuhilfenahme dieser Methode das Verhalten der Wurzeln im Diffusionsstrom verschiedener Stoffe möglichst vollständig zu untersuchen. Drittens mußte ich, nachdem ein ausreichendes Tatsachenmaterial herbeigeschafft war, zur Aufklärung der Natur der im Diffusionsstrome beobachteten Krümmungen schreiten.

Was mir zur Lösung jeder dieser Aufgaben beizutragen gelang, darüber soll jetzt berichtet werden.

Methodisches.

Oben wurde schon hervorgehoben, unter welchen Bedingungen der Diffusionsprozeß regelmäßig verläuft. Rekapitulieren wir nochmals dieselben. 1. Wenn die Diffusion in Wasser vonstatten geht, ist der Versuch in einem konstant temperierten und zitterfreien Raum anzustellen. 2. Die Ausgangskonzentration des zu diffundierenden Stoffes muß während der ganzen Versuchsdauer konstant sein. 3. Diejenige Stoffmenge, die bis zu den Gefäßwänden gelangt ist, muß sogleich entfernt werden.

Bei der Ausarbeitung meiner eigenen Methode hatte ich vor allem diese Bedingungen zu erfüllen. Der Erfüllung der ersten Bedingung stehen ansehnliche Schwierigkeiten im Wege; ich habe es daher vorgezogen, als Diffusionsmedium Gallerte zu benutzen. Die zweite Bedingung wurde dadurch erfüllt, daß ich für den ununterbrochenen Zufluß der zu diffundierenden Lösung sorgte. Die dritte Bedingung kann man auf zweierlei Weise erfüllen, je nachdem man mit dem stationären oder unstationären Diffusionsstrom arbeiten will. Im ersten Falle ist es wichtig, den durch die diffundierende Substanz zurückzulegenden Weg möglichst zu verkürzen, dafür aber zu sorgen, daß die hindurchdiffundierte Stoffmenge sich fortwährend durch einen Wasserstrom entferne. Im letzten Fall dagegen ist von Wichtigkeit, den Querschnitt des Diffusionsgefäßes in dem Maße zu vergrößern, daß die diffundierende Substanz nicht vor

Beendigung des Versuches bis zu den Glaswänden gelangen und sich dort anhäufen könnte.

Die letztere Versuchsanstellung wäre für meinen Zweck ungeeignet. Ich war bestrebt, die auf Wurzeln einwirkenden Konzentrationen kennen zu lernen. Da aber die Wurzeln nicht momentan, sondern erst nach einiger Zeit reagieren, hatte ich dafür zu sorgen, daß die jeweiligen, auf Wurzeln einwirkenden Konzentrationen sich nicht mit der Zeit ändern. Diese Bedingung ist nur im stationären Diffusionsstrome erfüllt. Denn im Falle eines unstationären Diffusionsstromes steigen die Konzentrationen allmählich, und zwar um so mehr, je länger die Diffusion dauert. Deswegen könnte ich hier höchstens die Grenzen ermitteln, zwischen denen die auf Wurzeln einwirkenden Konzentrationen schwanken. Ich hatte also die Wurzeln der Wirkung eines stationären Diffusionsstromes auszusetzen.

Agar-agar als Medium für Diffusionsversuche.

Als Medium, in dem die Diffusion vonstatten ging und dann die Wurzeln sich befanden, benutzte ich den Agar-agar. Diese Gallerte eignet sich vollkommen für exakte Diffusionsversuche. So löste z. B. Voigtländer¹⁾ die schwierige Frage nach den Diffusionskonstanten vieler Stoffe, indem er dieselben in eine erstarrte Agarlösung diffundieren ließ. Freilich ist auch die Gelatine zu gleichem Zweck von vielen Forschern herangezogen worden. Doch wäre sie für uns ungeeignet, insofern sie durch Bakterien verflüssigt wird. Dieser Nachteil läßt sich im Falle der physiko-chemischen Versuche leicht beseitigen, indem man entweder Versuche bei niedriger Temperatur anstellt oder kleine Dosen antiseptischer Stoffe der Gelatine zusetzt. Aus naheliegenden Gründen ist weder der eine noch der andere Kunstgriff in physiologischen Versuchen zulässig. Indessen verflüssigen banale Bakterien²⁾ den Agar-agar nicht. Seine Konsistenz bewahrt sich also unverändert während der ganzen Versuchsdauer. Außerdem ist der Agar im Vergleich zu Gelatine durch Beimischungen weniger verunreinigt³⁾.

1) F. Voigtländer, Zeitschr. f. physikal. Chemie, S. 316—335. Ferner s. bei Ostwald, Lehrb. d. allgem. Chemie, II. Aufl., Bd. 1, S. 674—705.

2) In der Mehrzahl meiner Versuche kam es zu keiner deutlichen Bakterienvermehrung. Es traten im oberen Teil des Blockes vereinzelte Kolonien auf. Nur bei den Versuchen mit Dextrose und Glyzerin vermehrten sich Bakterien kräftig und durch den ganzen Block hin.

3) Auf diesen Vorteil des Agars macht neuerdings auch Lidforss (Zeitschr. f. Botan., Bd. 1, S. 448) aufmerksam.

Aus den angeführten Gründen habe ich also Agar-agar gewählt. Ehe aber Versuche damit vorgenommen werden konnten, waren erst einige Schwierigkeiten und Zweifel zu beseitigen.

Zunächst filtriert die Lösung von Agar-agar langsam. Da ich für jede Versuchsserie etwa 10—15 Liter Agarlösung brauchte, so war es aus praktischen Gründen wichtig, für das Filtrieren von Agar eine Methode ausfindig zu machen, welche das Verfahren erheblich beschleunigen und zugleich ein Filtrat von hinreichender Durchsichtigkeit liefern würde. Eine derartige Methode ist von mir ausgearbeitet worden¹⁾. In meiner eben zitierten Notiz ist nachgewiesen, daß man eine Agarlösung ohne Bedenken benutzen kann, die unter gewissen Vorsichtsmaßregeln durch Glaswolle abfiltriert ist.

Der zweite Nachteil des Agar besteht darin, daß eine erstarrte Lösung desselben nicht an den Glaswänden haftet. Dies kommt bekanntlich daher, daß auf den freien Flächen der Agargallerte sich das Kondensationswasser ausscheidet. Diejenigen Physikochemiker, die mit Agar experimentierten, ließen wie üblich den Diffusionsstrom sich von unten nach oben ausbreiten. Hier war also die Gefahr vorhanden, daß beim Umkehren des Gefäßes die Agargallerte herausfallen werde. Dieser Schwierigkeit wurde dadurch begegnet, daß die Glaswände vorher mit Chromgelatine²⁾ überzogen wurden. Die Agargallerte haftete dann an den Wänden fest und erfuhr beim Umkehren des Gefäßes keine Verschiebung. Von diesem Kunstgriff konnte ich leider keinen Gebrauch machen, weil aus der Chromgelatine sich ein Diffusionsstrom bilden würde. Dies würde nicht nur dem Hauptstrom die Regelmäßigkeit rauben, sondern infolge stark oxydierender Eigenschaften des Kaliumbichromats auch eine Wachstumshemmung der Wurzeln oder sogar deren Schädigung hervorrufen. Es fragt sich aber, ob und inwieweit das Nichtanhaften von Agar an den Glaswänden bei meiner Versuchsanstellung nachteilig sein könnte. In meinen Versuchen ging die Diffusion nicht von unten nach oben, sondern in horizontaler Richtung. Hier stellten sich also die Verhältnisse günstiger dar, als in den Versuchen der oben genannten Physikochemiker. Dort stand die Agargallerte unter dem Einfluß zweier Kräfte: des Gewichtes der Agarmasse und der Kohäsion zwischen Agar, Kon-

1) Th. Porodko, Centralbl. f. Bakteriöl. (II. Abt.), Bd. 21, S. 424—427.

2) Voigtländer, a. a. O., S. 318; H. Bechhold und J. Ziegler, Zeitschr. f. physik. Chemie, Bd. 56, S. 105—121.

densationswasser und Glaswänden. Die erstere Kraft war bestrebt, die Gallerte aus dem Gefäß herauszuschieben, die letztere wirkte ihr entgegen. Da aber die erstere Kraft sich als stärker erwies, mußte man Chromgelatine zu Hilfe nehmen. Bei meiner Versuchsanordnung bewahrt das Diffusionsgefäß seine normale Stellung. Deswegen konnte hier auch die erwähnte Verminderung der Kohäsionskraft nicht stattfinden. In der Tat überzeugte ich mich davon durch direkte Versuche. Dieselben werden jedoch erst später und in einem anderen Zusammenhange angeführt werden.

Zuletzt blieb noch zu prüfen übrig, ob und inwieweit die Agargallerte als Substrat für wachsende Wurzeln geeignet wäre. In dieser Hinsicht schien die Sache von vornherein recht ungünstig zu liegen. Einerseits sollte die relativ feste Konsistenz von Agar das Wachstum recht mechanisch hemmen. Andererseits ist die erstarrte Agarlösung ein Medium, das nur schwache Aëration zuläßt. Es lag daher die Gefahr nahe, daß die Wurzeln darin zu langsam wachsen würden. Schließlich ist bekannt, daß die geotropische Gleichgewichtslage der Wurzeln oft im Wasser oder in feuchter Luft anormal wird. Fände eine solche Umstimmung auch im Agar statt, so ließe sich etwas Sicheres über die Natur derjenigen Krümmungen, welche im Diffusionsstrom eintreten, nicht gut sagen. Alle die vorausgesetzten Nachteile von Agar erwiesen sich aber bei experimenteller Prüfung als unzutreffend. Einige Vorversuche ergaben, daß sich eine 1 $\frac{1}{8}$ -proz. Agarlösung für meine Zwecke besonders eignete. Konzentriertere Lösungen hemmten die Wachstumsgeschwindigkeit der Wurzeln erheblich. Die Blöcke aber, die aus verdünnteren Lösungen bereitet wurden, waren schwer gegen etwaige Deformationen zu schützen. Benutzt man nun die Agargallerte von der erwähnten Konzentration, so läßt die Wachstumsgeschwindigkeit der darin befindlichen Wurzeln nur wenig zu wünschen übrig. Während nun der durchschnittliche Zuwachs der in Wasser befindlichen Wurzeln 100 % in 24 Stunden ausmacht, pflegt er in Agar 85 % zu erreichen. Dafür zeichnet sich der Agar durch einen wichtigen Vorteil anderweitig aus. Nach einem 24-stündigen Aufenthalte im Wasser erweisen sich fast alle Wurzeln nach verschiedenen Richtungen hin gekrümmt. Im Agar dagegen bleibt durchschnittlich 75 % der Gesamtzahl der Wurzeln völlig gerade.

Das eben Gesagte bezieht sich auf den käuflichen faserigen Agar. Es fragt sich aber, ob es nicht zweckmäßiger wäre, solches

Präparat einer vorherigen Reinigung zu unterwerfen. Voraussichtlich dürfte sich dadurch sowohl die Wachstumsgeschwindigkeit als der Prozentsatz der gerade wachsenden Wurzeln steigern lassen. Der direkte Versuch aber hat diese Vermutungen nicht bestätigt. Die Wurzeln wuchsen fast eben so schnell und gerade im ungereinigten als in dem nach Macé¹⁾ gereinigten Agar. Ich benutzte daher des weiteren das käufliche Agarpräparat.

Die Gefäße für Diffusionsversuche.

Als Diffusionsgefäße benutzte ich rechtwinklige Wannen von zweierlei Dimensionen. Kleinere Wannen waren 10 cm²⁾ lang, 4 cm breit und 7 cm tief. Der Inhalt derselben betrug ca. 300 ccm. Größere Wannen waren 11 cm lang, 8 cm breit und 9 cm tief. Der Inhalt derselben betrug ca. 800 ccm.

In jede der schmalen Wände der Wannen war eine Öffnung gebohrt. Dieselbe maß bei kleineren Wannen 5 mm im Durchmesser und war vom oberen Rand der Wanne um 5 mm entfernt. Bei größeren Wannen waren die betr. Dimensionen 9 und 9 mm.

An je eine der breiten Wannenwände wurden gläserne Balken befestigt. Dieselben wurden folgendermaßen eingerichtet. Ein Stück des Glasstabes wurde derart gebogen, daß beide Schenkel parallel waren und etwa um die Dicke der Wannenwand voneinander abstanden. Den gebogenen Glasstab setzte ich auf die breite Wand der Wanne derart auf, daß er sich lotrecht in der Mitte der Wand befand. Der innere Schenkel des Stabes reichte beinahe bis zum Boden der Wanne, der äußere wurde von außen an die Wand befestigt. Die Glasstäbe waren bei den kleineren Wannen 4 mm dick, bei den größeren — 6 mm. Die beschriebenen Balken hatten den Zweck, bei etwaigen Neigungen der Wanne eine Verschiebung des Agarblocks längs der Wände zu verhindern. Wenn die Dicke eines Agarblocks 20 mm übertraf, reichten zwei Balken für je eine Wanne vollkommen aus. Dies war aber nicht der Fall in den Versuchen, wo dünnere Blöcke angewandt wurden. Hier setzte ich auf je eine der breiten Wände bereits zwei Balken auf, und zwar derart, daß sie voneinander um die Dicke des beabsichtigten Blockes (z. B. um 10 mm) entfernt waren. Wie aus

1) E. Macé, *Traité pratique de Bactériologie*, Paris 1889, p. 150. Ich zitiere nach Klebahn, *Jahrb. f. wiss. Bot.*, Bd. 41, S. 488.

2) Ich gebe überall die inneren Dimensionen der Wannen an.

Fig. 1 ersichtlich, waren beide Balken der einen Wand mit denen der gegenüberliegenden symmetrisch geordnet. Sie alle befanden sich natürlich in lotrechter Lage. Außer der Zahl der Balken wurde noch deren Dicke vergrößert, und zwar betrug sie bei kleineren Wannen 6 mm, bei größeren — 10 mm. Bei der geschilderten Modifikation der Balkenvorrichtung erwies sich der Agarblock zwischen vier Balken gleichsam eingeklemmt und vermochte daher nicht, sich so leicht zu deformieren oder gar zu verschieben, wie es bei gewöhnlichen Balken sicher der Fall wäre.

Die Anstellung des Diffusionsversuches.

Zunächst soll darüber berichtet werden, wie ich verfuhr, um den Agarblock in die Mitte der Wanne hinein zu bekommen. Für

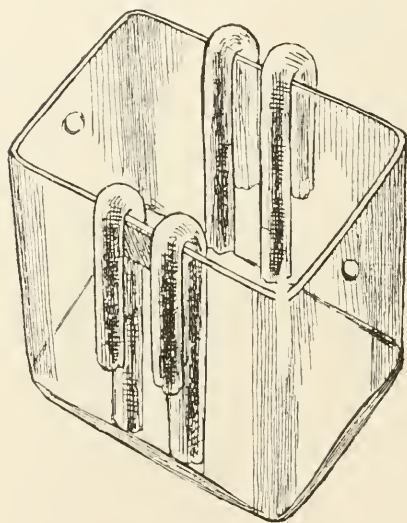


Fig. 1.

je eine Wanne schnitt ich zwei Glasplatten. Sie waren fast um die Hälfte höher als die Wanne selbst und etwas schmaler als die durchbohrten Wände derselben. Beide Platten wurden an ein Korkstück derart geklebt, daß sie einander parallel waren. Das Ankleben geschah in den Teilen der Platten, welche dann über dem Niveau der Wannenränder hervorragten. Die Dicke des bindenden Korkstückes war der Dicke des beabsichtigten Blocks gleich. Die geschilderte Vorrichtung hatte also die Form einer Bank (Fig. 2). Wurde

diese Bank auf den Boden der Wanne in der Mitte aufgestellt, so befanden sich beide Platten in lotrechter Lage. Bei Wannen mit gewöhnlichen Balken waren also die letzteren von beiden Platten in gleicher Entfernung. Bei Wannen mit einer verdoppelten Zahl von Balken befand sich jede Platte¹⁾ der Bank zwischen je zwei gegenüberliegenden symmetrisch geordneten Balken.

Nachdem die Bänke auf ihre Plätze gestellt waren, verschloß ich die Öffnungen in den schmalen Wänden mit Stöpseln und füllte

1) Sie waren entsprechend enger geschnitten.

die Wannen mit der warmen ($40-45^{\circ}\text{C.}$) Agarlösung bis zum Rande voll. Dann wurden die Wannen in einen feuchten Raum gestellt und blieben dort etwa 20 Stunden lang.

Nunmehr ging ich an das Bereiten der Blöcke. Nachdem ich die Stöpsel aus den Bohrungen der Wanne genommen hatte, schnitt ich mittels eines Messers mit breiter Klinge den Agar aus denjenigen Teilen der Wanne, welche sich auf beiden Seiten der Bank befanden. Diese Operation gelingt leicht, wenn man die Wannen etwas neigt und die Agarmasse in kleinen (ca. zwei- bis dreimaligen)

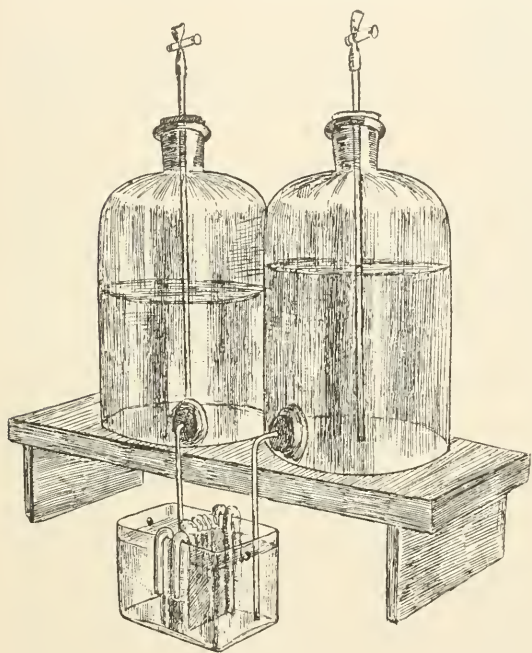


Fig. 2.

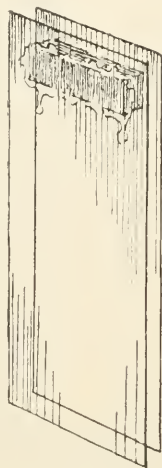


Fig. 3.

Portionen entfernt. Nach erfolgter Operation stellt sich das Diffusionsgefäß folgendermaßen dar (Fig. 3): auf beiden Seiten der Bank befinden sich zwei Höhlungen, von Agar vollkommen gereinigt, zwischen den Platten der Bank — der Agarblock.

Jetzt wurde jede Wanne auf ihren Platz gestellt. In die eine der Höhlungen wurde die Ableitungsröhre der Mariotteschen Flasche eingeführt, welche die zu prüfende Lösung enthielt. In die andere Höhlung kam dagegen die Ableitungsröhre der zweiten mit Wasser gefüllten Mariotteschen Flasche. Dann setzte ich beide

Mariotteschen Flaschen in Gang, wobei dafür gesorgt wurde, daß die Füllung der Höhlungen gleichmäßig erfolgt. Sobald die Flüssigkeiten bis zum Niveau der Öffnungen an schmalen Wannenwänden emporgestiegen sind, wurde die Ausflußgeschwindigkeit vermindert. Dann hob ich die Bank auf und entfernte sie aus der Wanne. Da die obere Fläche des Blocks etwa um $\frac{1}{2}$ —1 cm höher als die eben erwähnten Öffnungen stand, so war jegliche Kommunikation über den Block ausgeschlossen¹⁾.

Auf diese Weise begann die vorläufige Diffusion unmittelbar nach dem Entfernen der Bank aus der Wanne.

Die Mariotteschen Flaschen sind Flaschen, die unten mit Tuben versehen sind (s. Fig. 3). Der Inhalt derselben schwankte bei kleineren Wannen von 4—6 Liter; bei größeren betrug er 10 Liter.

Die obere Öffnung je einer Flasche wurde mit einem Gummistöpsel verschlossen. Durch die darin gebohrte Öffnung ging eine dünne gerade Glasröhre. Das untere Ende derselben reichte beinahe bis zum Boden der Flasche, das obere ragte über dem Stöpsel um einige Zentimeter empor und wurde mit einem Stück Gummrohr versehen. An dieses brachte ich einen Schraubenquetschhahn an, um die Breite des Lumens und somit die Ausflußgeschwindigkeit regulieren zu können. Die Tubusöffnung je einer Flasche wurde mit einem Gummistöpsel verschlossen, der mit einer außen senkrecht gebogenen Glasröhre versehen war. Der vertikale Teil dieser Röhre reichte fast bis zum Boden der Höhlung. Aus dem Gesagten geht klar hervor, daß in jeder Höhlung eine kontinuierliche Erneuerung der Flüssigkeit stattfinden mußte. Eine frische Flüssigkeit floß in den unteren Teil der Höhlung und drängte die ehemalige durch die Bohrung in der schmalen Wannenwand hinaus. Fließt nun die Flüssigkeit in einem genügend schnellen Tempo zu, so muß die ursprüngliche Konzentration in der Höhlung keinerlei Änderungen während der ganzen Versuchsdauer erfahren.

1) Was nun die Kommunikation zwischen beiden Höhlungen längs der Wannenwände anbelangt, so überzeugten mich direkte Versuche, daß sie niemals stattfindet. Tat ich in die Höhlung eine gefärbte Lösung, stets erfolgte die Diffusion lediglich durch die freie Seitenfläche des Agarblocks und zwar derselben vollkommen parallel. Der Agar adhärirt also dem Glase so stark, daß sein Block eine hermetische, das Innere der Wanne zu zwei Hälften trennende Lamelle vorstellt. Das Kommunizieren zwischen beiden Hälften (also Höhlungen) ist somit nur auf dem Wege der Diffusion durch den Agarblock möglich.

Bei den Versuchen mit den dünnen (6—10 mm) Blöcken dauerte die vorläufige Diffusion meist 24 Stunden, bei solchen dagegen mit den dickeren (20—40 mm) Blöcken 48 Stunden.

Nach Verlauf dieser Zeit ging ich an das Einführen der Wurzeln in den Agarblock.

Die Samen der benutzten Pflanzen stammten von der Firma Haage und Schmidt in Erfurt. Nach eintägigem Aufquellen legte ich die Samen in mäßig feuchte, locker gelagerte Sägespäne, und zwar so, daß die Wurzeln ohne irgendwelche Krümmungen trieben. Die Berührungsfläche der Kotyledonen von *Lupinus albus* war dabei lotrecht. Die Keimung der Samen erfolgte stets im demselben Zimmer, wo die Versuche selbst angestellt wurden. Sobald die Wurzeln eine Länge von 20—40 mm erreicht hatten, setzte ich sie in den Agarblock. Zu diesem Zweck konstruierte ich den folgenden Apparat (Fig. 4).

Der vertikale Teil desselben stellt ein Stativ dar, in dessen Stamm eine T-förmige Röhre mittels einer Kremaliere glatt ein- und ausgeschoben werden kann. Auf dem horizontalen Schenkel dieser T-förmigen Röhre ist ein Korkstück befestigt; in dieses sind einige Glasstäbchen gesteckt, deren freie Enden zuerst zu langen und dünnen Spitzen ausgezogen wurden. Die Glasstäbchen sind derart befestigt, daß alle Spitzen sich in einer Fläche und zwar untereinander parallel befinden. Das Stativ des Apparates ruht auf drei mit Schrauben versehenen Füßen. Auf diese Weise ist es leicht, die Glasspitzen vertikal einzustellen.

Mittels des beschriebenen Apparates ließ ich nun die Glasspitzen in die gewünschte Stelle des Agarblocks eindringen. Dabei sorgte ich dafür, daß die Spitzenfläche der Vorderfläche des Blockes

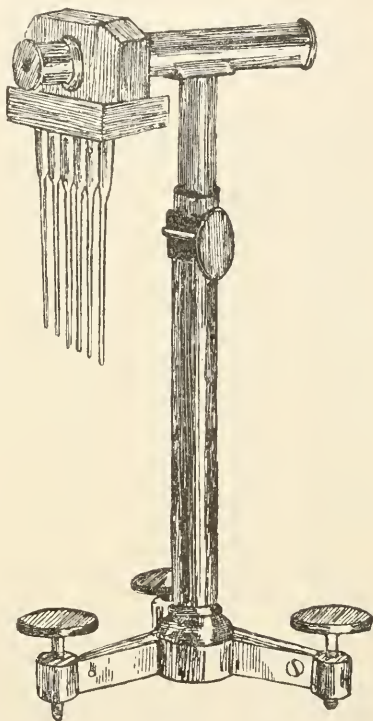


Fig. 4.

immer parallel war. An der Stelle, wo die Glasspitzen in den Block eingedrungen sind, bleiben nachher deutliche Spuren in Form winziger Grübchen.

Die Prozedur des Einsetzens der Wurzeln in den Agar selbst bestand in folgendem. Jede Wurzel, die von geeigneter Länge und völlig gerade war, tauchte ich in eine größere Schale mit Leitungswasser und spülte die Sägespäne mit einem Pinsel vorsichtig ab. Dabei achtete ich besonders darauf, daß der Pinsel die Wurzelspitze nicht berühre. Die gewaschene Wurzel wurde dann mit einem in Millimeter geteilten Lineal gemessen. Da Abspülen und Messen nur wenige Sekunden dauerten, war keine Induktion des Schwerereizes zu fürchten. Die gemessene Wurzel wurde für einen Augenblick in destilliertes Wasser getaucht und, sobald größere Tropfen desselben herabgeflossen, in das im Block schon vorhandene Kanälchen eingesetzt. Die Wurzel dringt ganz glatt hinein, und zwar auf dem von der Glasspitze gemachten Wege, ist also in lotrechter Lage. Das Einsetzen der Wurzeln geschah bis zum Hypokotyl derselben. Die Kotyledonen der *Lupinus*-Keimlinge hatten meistens eine solche Lage¹⁾, daß ihre Berührungsfläche den breiten Wannenwänden parallel war, wobei der Embryo gegen die steigenden Konzentrationen hin gerichtet war.

Nach dem Einsetzen der Wurzeln verdunkelte ich die Diffusionsgefäße. Von diesem Moment an begann der eigentliche Versuch. Derselbe dauerte in den meisten Fällen 24 Stunden.

Beim Konstatieren der Resultate je eines Versuchs verfuhr ich folgendermaßen. Gerade gebliebene Wurzeln wurden sofort herausgenommen und gemessen. Was nun gekrümmte Wurzeln anbelangt, so stellte ich, ohne sie aus dem Block herauszunehmen, erst fest, wie die Richtung der Krümmung gegen die des Diffusionsstromes orientiert war. Dann wurde jede gekrümmte Wurzel aus dem Block herausgenommen, ihr Ablenkungswinkel mittels Transporteurs bestimmt und ihre Länge nach dem Gerademachen der Krümmung gemessen.

Für die Kontrolle sowohl der Wachstumsgeschwindigkeit der Wurzeln als des Nutationsbestrebens derselben setzte ich einige Exemplare (6—10) in reinen Agar ein. Derselbe füllte das Gefäß entweder ganz oder hatte eine Form des Blocks, der dem des

1) Durch spezielle Versuche überzeugte ich mich, daß diese oder jene Lage von *Lupinuskotyledonen* weder die Größe noch die Richtung der im Diffusionsstrom eintretenden Krümmung irgendwie beeinflußt.

Versuches vollkommen analog, nur beiderseits von Wasser umspült war.

Die zu diffundierenden Stoffe stammten in überwiegender Mehrzahl von bekannten Firmen von Merck, Kahlbaum und Schering und stellten meistens chemisch reine Präparate dar. Für das Lösen sowohl der untersuchten Stoffe als des Agars benutzte ich immer destilliertes Wasser.

Quellen der Versuchsfehler.

Der oben geschilderten Versuchsanstellung haften manche Fehler an. Dieselben lassen sich in 2 Gruppen teilen.

Zur ersten gehören diejenigen Fehler, welche die Versuche unvergleichbar machen könnten. Ich meine Schwankungen in der Temperatur, in der Agarkonzentration, in der Versuchsdauer und im Alter der Wurzeln. Es ist kaum anzunehmen, daß alle diese Schwankungen die Resultate meiner Versuche wesentlich beeinflussen dürften. Denn sie bewegten sich stets in einem engen Spielraum.

Zur zweiten Gruppe der Fehler gehören diejenigen, welche die Bestimmung der auf die Wurzeln einwirkenden Konzentrationen ungenau machen könnten. 7 Fehler gehören hierher.

1. Bei der Bereitung der Lösungen benutzte ich zuweilen Präparate, die nicht chemisch rein und völlig trocken waren. Zudem wurden sie auf einer Präzisionswaage abgewogen, welche höchstens bis 0,02 g empfindlich war.

2. Die Ausflußgeschwindigkeit aus den Mariotteschen Flaschen war eine solche, daß durchschnittlich während 2—3 Stunden der Inhalt jeder Höhlung völlig erneuert war. Ob eine derartige Geschwindigkeit ausreichend war, um die ursprüngliche Konzentration der Flüssigkeit in der Höhlung konstant zu erhalten, weiß ich nicht. Ich gebe gerne zu, daß hier gewisse Schwankungen Platz greifen dürften. Mithin dürften auch die berechneten auf die Wurzeln einwirkenden Konzentrationen als der Wirklichkeit nicht absolut entsprechend gelten.

3. Eine gewisse Ungenauigkeit in der Berechnung könnte dadurch hervorgerufen werden, daß die Wurzeln eine nicht absolut lotrechte Stellung haben und sich in einer nicht absolut gleichen Entfernung von der Vorderfläche des Blocks befinden könnten.

4. Auch kann leicht ein Fehler beim Messen desjenigen Abstandes vorkommen, in dem sich die Wurzeln von der Vorder-

fläche des Blocks befinden. Dieser Fehler scheint übrigens unvermeidlich zu sein. Denn nicht alle Wurzeln haben gleiche Dicke und dazu nimmt die Dicke je einer Wurzel nach unten hin allmählich ab. Je nach dem Niveau, auf welchem die Ablesung gemacht wird, erhält man verschiedene Werte. Unter diesen Umständen schien es mir am zweckmäßigsten, die Ablesungen auf dem Niveau der Mitte der Wurzel zu machen.

5. Da die Balken die Querschnittsfläche des Agarblocks einengen, so kommt es zu einer Modifikation der normalen Verteilung von Diffusionsgeschwindigkeiten und Konzentrationen. Denn die Gleichung (2), welche unten angeführt und unseren sämtlichen Berechnungen zugrunde gelegt ist, setzt voraus, daß der Agarblock überall den gleichen Querschnitt hat.

6. Der Agarblock ragt über dem Niveau der in den Höhlungen befindlichen Flüssigkeiten stets um $1/2-1$ cm empor. In diesem Teil des Blocks mußte also der Strom eine Richtung nehmen, die von der üblichen horizontalen abwich.

7. Die Dauer der vorläufigen Diffusion dürfte sich für das Stationärwerden des Stromes als unzureichend erweisen. Da dieser Fehler besonders ins Gewicht fallen könnte, so ist es nötig, hier näher darauf einzugehen. Zunächst mögen aber diejenigen theoretischen Sätze aus der Diffusionslehre in aller Kürze vorausgeschickt¹⁾ werden, welche meinen Berechnungen zugrunde liegen.

Für den Fall, daß der Diffusionsvorgang nur nach einer Richtung hin und in einem prismatischen Gefäße stattfindet, wird derselbe durch die Differentialgleichung ausgedrückt:

$$dy/dt = -k \, d^2y/dx^2 \quad (1).$$

Hier bedeutet x die Strecke in der Richtung der Diffusion, y — die Konzentration, t — die Zeit; k ist die Diffusionskonstante; das negative Zeichen bedeutet, daß der Strom in der Richtung der kleineren Konzentrationen verläuft.

Ist ein stationärer Zustand eingetreten, d. h. wird an zwei Stellen des Diffusionsgefäßes die Konzentration andauernd konstant erhalten, und ist genügend Zeit verflossen, so ist die Konzentration nicht mehr von der Zeit abhängig, und die Gleichung (1) reduziert sich auf

$$d^2y/dx^2 = 0 \quad (2).$$

$$\text{woraus} \quad dy/dx = a \quad (3)$$

$$\text{und} \quad y = ax + b \quad (4)$$

1) Ich folge dabei Ostwald, a. a. O.

folgt, wo a und b die Integrationskonstanten sind, die aus den Versuchsbedingungen bestimmt werden müssen.

Um a und b zu bestimmen, stellen wir sukzessiv x und y der Null gleich. Bezeichnen wir die Ausgangskonzentration (vor dem Block) durch y_0 , die Dicke des Blocks durch l , so finden wir: $y_0 = b$ und $al + b = 0$, woher

$$a = -b/l = -y_0/l \quad (5)$$

folgt und die Gleichung (4) gestaltet sich folgendermaßen um:

$$y = -\frac{y_0}{l}x + y_0 = \frac{y_0(1-x)}{l} \quad (6).$$

Die Gleichung (6) gestattet, die Konzentration des diffundierenden Stoffes an einem beliebigen Punkte des Blocks zu berechnen, falls nur die Ausgangskonzentration (y_0), die Dicke des Blocks (l) und der Abstand (x) des gegebenen Punktes von der Ausgangskonzentration bekannt sind.

Nach dieser (6) Formel wurden überall Konzentrationen berechnet, welche auf die Vorderseite der in den Block eingesetzten Wurzeln einwirkten. x bezeichnet also den Abstand von der vorderen Fläche des Agarblocks bis zur vorderen, d. h. gegen steigende Konzentrationen gewandten Flanke der Wurzel.

Wie aus der Gleichung (3) ersichtlich, ist das Konzentrationsgefälle für je einen Block und für je eine Ausgangskonzentration konstant, und zwar $\frac{-y_0}{l}$ gleich. Ist daher l in Millimetern ausgedrückt, so repräsentiert die angeführte Größe die Differenz derjenigen Konzentrationen, welche sich in zwei voneinander in der Richtung des Stromes um 1 mm abstehenden Punkten befinden. Diese Größe ist weiterhin in meinen Tabellen als „Konzentrationsgefälle auf je 1 mm“ angeführt. Da aber der Durchmesser des unteren Teiles der *Lupinus*-Wurzeln ungefähr 1 mm mißt, so weist „Konzentrationsgefälle auf je 1 mm“ zugleich darauf hin, wie groß die Differenz der auf die opponierten Wurzelflanken einwirkenden Konzentrationen ist¹⁾.

1) Dieser Schluß ist nur dann gültig, wenn die Wurzeln für die diffundierenden Stoffe in demselben Grade permeabel sind, wie der Agarblock selbst. Anderenfalls muß es zu einer Perturbation in der normalen Verteilung der diffundierenden Substanz kommen. Vermutlich dürfte dabei vor der Vorderflanke der Wurzel eine Stoffanhäufung entstehen, hinter der Hinterflanke dagegen ein verminderter osmotischer Druck herrschen. Diese Perturbation des Stromes müßte entweder während des ganzen Versuchs dauern, wenn die Wurzel absolut unpermeabel wäre, oder nur solange, bis die diffundierende Substanz die Wurzel durchdrungen hätte.

Ich betrachte also des weiteren das Verhalten der Wurzeln lediglich unter den Bedingungen eines stationären Diffusionsstromes. Da aber der letztere nicht sofort, sondern erst nach einiger Zeit stationär wird, so durfte ich den eigentlichen Versuch mit den Wurzeln nicht früher beginnen, als dank vorläufiger Diffusion der stationäre Zustand des Diffusionsstromes erreicht war. Wie lange mußte nun zu diesem Zwecke die vorläufige Diffusion fortgesetzt werden? Diese Frage läßt sich nicht bestimmt beantworten, und zwar aus folgenden Gründen.

Solange der diffundierende Stoff den Agarblock durchsetzt, d. h. in jedem sukzessiven Momente wieder neue und neue Teile von reinem Agar angreift, bleibt der Diffusionsstrom unstationär. Sobald aber die ersten Spuren des diffundierenden Stoffes nach dem Durchdringen des Blockes in das die hintere Blockfläche umspülende Wasser zu treten beginnen, hört der unstationäre durch die Gleichung (1) ausgedrückte Zustand des Stromes auf. Doch ist auch der stationäre durch die Gleichung (2) ausgedrückte Zustand des Stromes gleichfalls noch nicht eingetreten. Wie lange dieses Zwischenstadium, welches man als den Vorgang des Stationärwerdens eines Diffusionsstromes bezeichnen dürfte, dauert, ist mir unbekannt.

Bei solcher Lage der Dinge habe ich eine gewisse Unbestimmtheit in meiner Versuchsanordnung zulassen müssen, und zwar in bezug auf die Dauer der vorläufigen Diffusion. Wie lange sie in meinen Versuchen tatsächlich dauerte, ist schon oben angeführt. Es fragt sich nunmehr, warum sie gerade eine solche Dauer hatte.

Wir haben gesehen, daß während der vorläufigen Diffusion 2 Prozesse stattfinden mußten: 1. das Durchdringen des Stoffes durch den Agarblock und 2. das Stationärwerden des Stromes. Nur die Dauer des ersten Prozesses wurde von mir für die meisten untersuchten Stoffe festgestellt. Zu diesem Zweck verfuhr ich folgendermaßen.

Bekanntlich ist der Weg, den ein unstationärer Diffusionsstrom zurücklegt, durch die folgende Gleichung Stefans ausgedrückt:

$$h = a\sqrt{t} \quad (7).$$

In derselben bedeutet t die Zeit in Tagen; a den in Zentimetern gemessenen Weg, welchen ein Stoff in den ersten 24 Stunden zurücklegt.

a ist eine Konstante, welche 1. für jede Konzentration und 2. für jeden Stoff spezifisch ist.

Was das erste Verhältnis anbelangt, so fand Yégounow¹⁾, daß, wenn die Konzentration (x) des Stoffes in geometrischer Progression zunimmt, die Verbreitungsgeschwindigkeit (v) desselben in arithmetischer Progression steigt. Indessen läßt sich v als eine Funktion von a ausdrücken. In der Tat

$$v = \frac{dh}{dt} = \frac{d(a\sqrt{t})}{dt} = \frac{a}{2\sqrt{t}}.$$

Da aber aus der Gleichung (7) $\sqrt{t} = h/a$ folgt, so ist

$$v = \frac{a}{2\sqrt{t}} = \frac{a^2}{2h}.$$

Wenn man der Einfachheit halber v stets in demjenigen Querschnitt des Diffusionsgefäßes bestimmt, der von der Ausgangslösung um 1 cm entfernt ist, so ist

$$v = a^2/2.$$

Auf diese Weise ist der von Yégounow festgestellte Zusammenhang zwischen x und v durch die Gleichung ausgedrückt:

$$x = 2a^{2/m} \quad (8),$$

wo m eine für jeden Stoff spezifische Konstante ist.

Was nun den Zusammenhang zwischen a und der Stoffnatur betrifft, so stellte Yégounow fest, daß das Verhältnis der Diffusionskonstante zur Diffusionsgeschwindigkeit (in einem gegebenen Abstand von der Ausgangskonzentration) für die äquimolekulare Lösungen aller Stoffe konstant ist:

$$\frac{K}{v} = \frac{K_1}{v_1} = \dots \dots \dots \frac{K_n}{v_n} = \text{const.}$$

Da aber $v = a^2/2$ ist, so gelangen wir zur Gleichung:

$$\frac{K}{a^2} = \frac{K_1}{a_1^2} = \dots \dots \dots \frac{K_n}{a_n^2} = \text{const.} \quad (9).$$

Um also die Dauer des Durchdringens des Agarblocks seitens des diffundierenden Stoffes zu bestimmen, hatte ich Folgendes zu erfüllen. 1. Für einige beliebige Konzentrationen irgend eines Stoffes mußte ich a in der Gleichung (7) bestimmen. 2. Unter Zuhilfenahme der Gleichung (8) war a für verschiedene Konzentrationen des nämlichen Stoffes zu berechnen. 3. Unter Zuhilfenahme der Gleichung (9) mußte ich a für verschiedene Konzentrationen aller der Stoffe berechnen, deren Diffusionskonstanten

1) M. Yégounow, Compt. rend., t. 142, p. 954.

bekannt sind¹⁾. 4. Auf Grund der gefundenen Werte von a hatte ich aus der Gleichung (7) t zu bestimmen.

Es ist überflüssig, das sämtliche Ziffermaterial, über das ich in dieser Hinsicht verfüge, anzuführen. Es wird wohl genügen hervorzuheben, daß die übliche Dauer der vorläufigen Diffusion die Zeit mindestens um das Doppelte übertraf, welche nötig war, damit die gegebene Substanz durch den ganzen Agarblock diffundieren konnte. Ob sich während dieser überschüssigen Zeit ein stationärer Zustand herausbildete oder nicht, dürfen die unten in meinen Tabellen angeführten Zahlen als genau oder annähernd betrachtet werden. Übrigens ist es möglich, daß mitunter beiderlei zutreffen könnte. Im Falle hoher Konzentrationen oder dünner Blöcke dürfte ja der Diffusionsstrom schon stationär sein, im Falle niedriger Konzentrationen oder dickerer Blöcke dagegen dürfte er den stationären Zustand noch nicht erreichen.

Erklärung der Tabellen.

Die Ergebnisse meiner Versuche sind in Tabellen zusammengefaßt. Die Tabelle Nr. 45 ausgenommen, beziehen sich alle übrigen auf Wurzeln von *Lupinus albus*.

Jede Tabelle aus den ersten 44 faßt Versuche zusammen, die mit je einem Stoffe angestellt wurden. Tabelle Nr. 45 faßt alle die Versuche zusammen, welche mit *Helianthus*-Wurzeln ausgeführt wurden.

Die Tabellen enthalten nur ausgewählte Versuche.

Jede Tabelle enthält folgende Angaben.

Zunächst gebe ich, und zwar in Stunden, die Dauer sowohl der vorläufigen Diffusion als des eigentlichen Versuches an.

Dann folgen die Grenzen, zwischen denen die Temperatur während der Gesamtdauer der vorläufigen Diffusion und des Versuches schwankte. Die Grade sind nach Celsius angegeben.

Ferner folgen: die Ausgangskonzentration, die Konzentration an der Vorderflanke der Wurzel und das Konzentrationsgefälle auf je 1 mm. Die Konzentrationen sind überall in Grammolekeln ausgedrückt.

1) Man kann hierzu empirische Data gebrauchen. Ich zog aber im Falle von Elektrolyten vor, diese Konstanten nach der bekannten Formel Nernsts

$$K = 0,04485 \cdot \frac{u \cdot v}{u + v} [1 + 0,0034 (t - 18)]$$

zu berechnen.

Dann führe ich, und zwar in Millimetern, die Dicke des Agarblocks und den Abstand von der Ausgangskonzentration (d. h. von der Vorderfläche des Blocks) bis zur Vorderflanke der Wurzel an.

Ferner wird die Anzahl der in einer Reihe befindlichen Wurzeln sowie deren mittlerer Zuwachs während des Versuches in % angegeben. Bei der Berechnung der Prozente verfuhr ich folgendermaßen. Den durchschnittlichen Zuwachs der Kontrollwurzeln setzte ich 100 % gleich und rechnete dann auf Grund dieser Einheit den mittleren Zuwachs der in einer Reihe befindlichen Wurzeln im Versuch um. Diese Weise einer Feststellung des Zuwachses wurde in den Versuchen der Tabellen Nr. 1—45 und 48 angewandt. In den Tabellen Nr. 46, 47 und 50 ist die Länge der Wurzeln sowohl des Experiments als der Kontrolle vor und nach dem Versuch in Millimetern angegeben.

Schließlich befinden sich in der letzten vertikalen Kolonne je einer Tabelle die Resultate des Versuches. Wegen der Kürze bediene ich mich hier der folgenden Symbole. Das Zeichen $+$ bedeutet die positive Krümmung, d. h. eine Krümmung, die gegen den Diffusionsstrom gerichtet ist. Das Zeichen $-$ bedeutet die negative Krümmung, d. h. eine Krümmung, die in der Richtung des Diffusionsstromes aufgetreten ist. Das Zeichen $\pm$ bedeutet, daß die Wurzel sich seitlich gekrümmt hat, und zwar derart, daß die Krümmungsfläche senkrecht zu der Richtung des Stromes im Block orientiert ist. Die Zeichen $\overset{+}{\pm}$ und $\overset{-}{\pm}$ bedeuten die Krümmungen, die zwischen $+$ und $\pm$ bzw. $-$ und $\pm$ liegen. Die Symbole $\left\{ \begin{smallmatrix} + \\ - \end{smallmatrix} \right\}$, $\left\{ \begin{smallmatrix} - \\ + \end{smallmatrix} \right\}$, $\left\{ \begin{smallmatrix} \pm \\ \pm \end{smallmatrix} \right\}$ usw. bedeuten, daß die Wurzel eine kombinierte Krümmung gebildet hat. Das obere Zeichen bei je einer Parenthese bezieht sich auf die Krümmung, welche im oberen Teil der Wurzel eingetreten ist, das untere Zeichen dagegen bezieht sich auf die Krümmung, die im unteren Teil der Wurzel lokalisiert ist. Folgt je einem der beschriebenen Symbole eine Ziffer, so bedeutet sie, um wie viel Grade die Wurzel sich von der Vertikale abgekrümmt hat. Fehlen den Symbolen die Ziffern, so weist es darauf hin, daß die Ablenkungswinkel weniger als 5° betragen haben. Das Zeichen 0 bedeutet, daß die Wurzel gerade geblieben ist. In den Fällen, wo die Reaktion der Wurzel durch die angeführten Symbole nicht oder nur schwer beschrieben werden konnte, steht daneben das Fragezeichen. Durch die Zeichen $2 = 0$; $5 = +10$ usw. wird angezeigt,

daß 2 Wurzeln gerade geblieben, 5 Wurzeln positiv, und zwar unter 10^0 , gekrümmt sind usw.

In der Rubrik der Resultate sind auch etwaige Abweichungen von dem normalen Turgeszenzgrad der Wurzeln erwähnt.

In den Tabellen ist nicht besonders angegeben, in wieviel Reihen die Wurzeln im Block angeordnet wurden. Die betr. Data lassen sich aber indirekt aus den angeführten Angaben leicht entnehmen und so fort. Sind in einem Versuch 2 Konzentrationen an der Vorderflanke der Wurzel angeführt, so bedeutet es, daß die letzteren in 2 Reihen angeordnet wurden.

In den Tabellen Nr. 46, 47 und 50 wird außerdem nicht angegeben, wieviel Wurzeln sich in je einer Reihe befanden. Diese Zahl ist gleichfalls leicht zu ersehen, weil hier für jede Wurzel sowohl Zuwachs als Resultate einzeln angeführt sind.

Experimentelles.

Das Verhalten der Wurzeln im Diffusionsstrom.

Den Einfluß des Diffusionsstromes habe ich hauptsächlich an den Wurzeln von *Lupinus albus* und nur teilweise an denen von *Helianthus annuus* untersucht.

Die Ergebnisse der mit *Lupinus* angestellten Versuche sind in den Tabellen Nr. 1—44 zusammengefaßt.

Die mit *Helianthus* ermittelten Resultate befinden sich in der Tabelle Nr. 45.

Die *Lupinus*-Wurzeln wurden im Diffusionsstrom von 44 Stoffen untersucht. Die Tabellen Nr. 1—8 fassen Versuche zusammen, die mit 8 Nichtelektrolyten ausgeführt wurden. Die übrigen 36 Tabellen fassen die Versuche zusammen, welche mit Elektrolyten angestellt wurden, und zwar befinden sich in den Tabellen Nr. 9—12 Versuche mit 4 Säuren, in den Tabellen Nr. 13—14 die mit 2 Alkalien, in den Tabellen Nr. 15—44 die mit 30 Salzen.

Die *Helianthus*-Wurzeln wurden im Diffusionsstrom von 6 Stoffen untersucht, und zwar einer Säure, einem Alkali und 4 Salzen.

Führen wir jetzt unsere Tabellen an.

Tabelle 1. Borsäure.

In den Versuch. 1 u. 4 ist die Dauer der vorläuf. Diff. 44 Std., die des Vers. 31 Std. Temperatur. 19—22°.

—	2 u. 5	—	—	24 "	—	24 "	—	16—18°.
—	3 u. 6	—	—	49 "	—	27 "	—	18—20°.
—	7	—	—	26 "	—	30 "	—	15—17°.

Nr. des Versuchs	Ausgangskonzentration	Dicke des Blocks	Abst. v. d. Ausgangskonz. bis z. Vorderfl. d. Wurz.	Konzentr. an der Vorderfl. d. Wurz.	Konzentrationsgefälle auf je 1 mm	Anz. d. Wurz. i. ein. Reihe	Mittlerer Zuwachs der Wurzeln in %	Resultate
1	0,1	30	9	0,07	0,0033	7	12	7 = 0
	—	—	20	0,033	—	7	43	2 = +20; 1 = +10; 2 = +20; 1 = +20; 1 = ?
2	0,04	10	5	0,02	0,004	5	20	Nach 3, 10 u. 24 Std. alle 5 = 0
3	0,03	30	9	0,021	0,001	7	32	7 = 0
	—	—	19	0,011	—	7	76	7 = 0
4	0,01	30	10	0,0067	0,00033	7	120	5 = 0; 2 = +
	—	—	18	0,004	—	7	107	3 = 0; 4 = +
5	0,008	10	5	0,004	0,0008	5	60	Nach 3 u. 10 Std. 5 = 0
								" 24 Std. 4 = 0; 1 = +
6	0,003	30	7	0,0023	0,0001	7	136	7 = 0
	—	—	18	0,0012	—	7	129	7 = 0
7	0,001	10	5	0,0005	0,0001	5	138	Nach 7 1/2 Std. 5 = 0
								" 30 St. 4 = 0; 1 = +

Tabelle 2. Äthylalkohol.

In den Versuch. 1 u. 7 ist die Dauer der vorläuf. Diff. 50 Std., die des Vers. 28 Std. Temperatur. 15—16°.

—	2, 5 u. 6	—	—	49 "	—	21 "	—	15—18°.
—	3 u. 4	—	—	24 "	—	24 "	—	16—18°.

1	1,98	32	9	1,424	0,0619	7	0	7 = +. Spitzen braun, Turgor sehr schwach
	—	—	21	0,681	—	7	36	5 = 0; 1 = +10; 1 = +
2	1,0	31	10	0,678	0,03226	7	39	7 = 0
	—	—	21	0,323	—	7	55	3 = 0; 2 = -20; 1 = +10; 1 = +30
3	0,8	10	5	0,4	0,08	5	25	} Nach 3 1/2, 10 u. 24 Std. 5 = 0
4	0,2	10	5	0,1	0,02	5	51	
5	0,1	31	11	0,065	0,00323	7	80	5 = 0; 1 = -; 1 = +10
	—	—	20	0,036	—	7	74	6 = 0; 1 = +20
6	0,01	32	8	0,0075	0,000312	7	95	4 = 0; 2 = +; 1 = +20
	—	—	21	0,0034	—	7	106	6 = 0; 1 = +30
7	0,001	32	10	0,00069	0,0000313	7	89	2 = 0; 2 = +30; 1 = -30; 1 = -50; 1 = +40
	—	—	22	0,00031	—	7	95	3 = 0; 1 = -10; 1 = -25; 1 = +30; 1 = +20

Tabelle 3. Glycerin.

In den Versuch. 1 u. 4 ist die Dauer der vorläuf. Diff. 26 Std., die des Vers. 30 Std. Temp. 15–17°.

—	3 u. 5	—	—	49 "	—	21 "	—	15–18°.
—	2	—	—	50 "	—	28 "	—	15–16°.

Nr. des Versuchs	Ausgangskonzentration	Dicke des Blocks	Abst. v. d. Ausgangskonz. bis z. Vorderfl. d. Wurz.	Konzentr. an der Vorderflanke der Wurzel	Konzentrationsgefälle auf je 1 mm	Anz. d. Wurz. i. ein. Reihe	Mittlerer Zuwachs der Wurzeln in %	Resultate
1	0,5	10	5	0,25	0,05	5	63	Nach 8 Std. 5 = 0 " 30 Std. 3 = $\pm$; 1 = $+$; 1 = $+$
2	0,135	30	9	0,094	0,0045	7	74	1 = 0; 4 = $\pm$ 25; 1 = $-$ 40; 1 = $\pm$ 40
	—	—	18	0,054	—	7	88	2 = 0; 2 = $-$ 10; 1 = $\pm$ 30; 1 = $\pm$ 30; 1 = $\pm$ 40
3	0,0404	32	11	0,0265	0,00126	7	78	1 = 0; 2 = $+$; 2 = $\pm$ 30; 1 = $\pm$ 40; 1 = $-$ 10
	—	—	20	0,0151	—	7	91	3 = 0; 2 = $-$ 20; 1 = $-$; 1 = $\pm$ 15
4	0,01	10	5	0,005	0,001	5	104	Nach 8 Std. 5 = 0 " 30 Std. 3 = $-$; 1 = $\pm$; 1 = $\pm$
5	0,0067	32	10	0,0046	0,00021	7	100	6 = 0; 1 = $\pm$ 15
	—	—	20	0,0025	—	7	103	7 = 0

Tabelle 4. Chloralhydrat.

In den Versuch. 1 u. 4 ist die Dauer der vorläuf. Diff. 49 Std., die des Vers. 25 Std. Temp. 18–20°.

—	3 u. 5	—	—	24 "	—	24 "	—	16–18°.
—	2	—	—	44 "	—	31 "	—	19–22°.

1	0,02	30	9	0,014	0,00067	7	0	6 = $+$; 1 = 0
	—	—	20	0,0067	—	7	28	3 = 0; 1 = $+$; 1 = $+$ 10; 1 = $+$ 20; 1 = $+$ 30
2	0,01	30	10	0,0067	0,00033	7	33	2 = $+$; 2 = $+$ 10; 2 = $+$ 15; 1 = $+$ 20
	—	—	18	0,004	—	7	77	6 = 0; 1 = $+$
3	0,01	10	5	0,005	0,001	5	6	Nach 3 Std. 5 = 0 " 9 1/2 Std. 5 = $+$ " 24 Std. 2 = $+$ 20; 3 = $+$ 30
4	0,002	32	9	0,00144	0,0000625	7	66	7 = 0
	—	—	19	0,00081	—	7	91	3 = 0; 3 = $+$; 1 = $-$ 15
5	0,001	10	5	0,0005	0,0001	5	60	Nach 3 Std. 5 = 0 " 9 1/2 Std. 4 = 0; 1 = $+$ " 24 Std. 3 = 0; 1 = $+$; 1 = $\pm$ 10

Tabelle 5. Harnstoff.

In den Versuch. 1, 4 u. 5 ist die Dauer der vorläuf. Diff. 49 Std., die des Vers. 26 Std. Temp. 18—20°.
 — 3 u. 6 — — 26 „ — 30 „ — 15—17°.
 — 2 — — 44 „ — 31 „ — 19—22°.

Nr. des Versuchs	Ausgangskonzentration	Dicke des Blocks	Abst. v. d. Ausgangskonz. bis z. Vorderfl. d. Wurzel	Konzentr. an der Vorderflanke der Wurzel	Konzentrationsgefälle auf je 1 mm	Anz d. Wurz. i. ein. Reihe	Mittlerer Zuwachs der Wurzeln in %	Resultate
1	0,03	32	10	0,0207	0,00094	7	18	2 = 0; 2 = +10; 2 = +20; 1 = +30
	—	—	21	0,0103	—	7	95	2 = 0; — 40; +10; +20; +40; +30
2	0,01	29	10	0,0067	0,000345	7	94	4 = 0; 2 = +; 1 = +
	—	—	19	0,0035	—	7	127	6 = 0; 1 = +
3	0,01	10	5	0,005	0,001	5	97	Nach 6½ Std. 5 = 0
								„ 30 Std. 1 = 0; 3 = —; 1 = +
4	0,003	31	9	0,00213	0,000097	7	101	5 = 0; 1 = +10; 1 = +10
	—	—	20	0,00106	—	7	123	6 = 0; 1 = +10
5	0,001	30	9	0,0007	0,000033	7	70	6 = 0; 1 = +10
	—	—	19	0,00037	—	7	90	5 = 0; 1 = —10; 1 = —50
6	0,001	10	5	0,0005	0,0001	5	135	Nach 6½ Std. 5 = 0
								„ 30 Std. 3 = 0; 2 = —

Tabelle 6. Traubenzucker.

In den Versuch. 1, 3 u. 5 ist die Dauer der vorläuf. Diff. 49 Std., die des Vers. 21 Std. Temp. 15—18°.
 — 2. u. 4 — — 26 „ — 30 „ — 15—17°.

1	0,2	30	8	0,147	0,0067	7	85	+40; — 30; 0; ? 0; ? +; 2 = +40
	—	—	19	0,073	—	7	85	+80; +40; +30; — 20, — 30; 2 = — 40
2	0,1	10	5	0,05	0,01	5	95	Nach 6 Std. 5 = 0
								„ 30 Std. 4 = +; 1 = —
3	0,01	32	10	0,0069	0,0003125	7	70	+50; +10; — 10; 2 = +40; 2 = +40
	—	—	21	0,0034	—	7	58	+40; +40; +25; 2 = — 20; 2 = — 30
4	0,01	10	5	0,005	0,001	4	120	Nach 6 Std. 4 = 0
								„ 30 Std. 2 = +; 1 = +; 1 = +
5	0,001	31	7	0,00077	0,0000323	7	99	0; +; +; +30; +50; +20; +30
	—	—	19	0,00039	—	7	95	— 20; — 50; — 60; +30; +40; +40; +40

Tabelle 10. HNO_3 .In Vers. 1 u. 3 ist die Dauer d. vorl. Diff. 45 Std., die des Vers. 27 Std. Temp. $17-19^\circ$.

— 2 —		— 47 „ —		— 24 „ —		— 15—17 $\frac{1}{2}$ °.		
Nr. des Versuchs	Ausgangskonzentration	Dicke des Blocks	Abstand v. d. Ausgangskonz. bis zur Vorderfl. d. Wurzel	Konzentr. an der Vorderflanke der Wurzel	Konzentrationsgefälle auf je 1 mm	Anz. d. Wurz. i. ein. Reihe	Mittlerer Zuwachs der Wurzeln in %	Resultate
1	0,00213	40	11	0,00154	0,0000533	3	0	3 = 0. Plasmolysiert
	—	—	22	0,00096	—	3	0	3 = 0. Plasmolysiert
	—	—	32	0,00042	—	3	94	1 = — 15; 2 = — 20
2	0,00053	21	6	0,00038	0,0000254	3	73	1 = — 15; 2 = +
	—	—	14	0,00017	—	3	70	1 = 0; 2 = + 10.
3	0,00043	40	9	0,000331	0,0000107	3	85	3 = 0
	—	—	20	0,000213	—	3	122	1 = 0; 2 = + 20
	—	—	30	0,000106	—	3	86	1 = — 15; 1 = + 15; 1 = + 20

Tabelle 11. Essigsäure.

In Vers. 1 u. 2 ist die Dauer d. vorl. Diff. 48 Std., die des Vers. 23 Std. Temp. $16-19^\circ$.

— 3 u. 4 —				— 47 „ —				— 25 „ —				16—18°.	
1	0,00538	21	7	0,0035	0,000256	3	18	3 = 0.	Plasmolysiert				
	—	—	14	0,0017	—	3	46	+ 30, + 40, + 25					
2	0,00358	40	10	0,000268	0,0000896	3	22	3 = 0.	Plasmolysiert				
	—	—	20	0,000179	—	3	85	—; +; +					
	—	—	29	0,00098	—	3	86	+ 10; +; +					
3	0,00358	22	6	0,00261	0,000163	3	29	3 = 0.	Plasmolysiert				
	—	—	15,5	0,00105	—	3	82	1 = 0; 2 = — 25					
4	0,00179	20	6	0,00125	0,0000896	3	72	1 = 0; 2 = + 15					
	—	—	14	0,00053	—	3	94	1 = 0; 2 = + 15					

Tabelle 12. Zitronensäure.

In Vers. 1, 2 u. 3 ist die Dauer d. vorl. Diff. 48 Std., die des Vers. 23 Std. Temp. $16-19^\circ$.

— 2 —		— 47 „ —		— 25 „ —		— 16—18°.		
1	0,00208	40	9	0,00161	0,0000521	3	16	3 = 0. Plasmolysiert
	—	—	18	0,00114	—	3	67	+ 20; + 20; + 25
	—	—	28	0,00062	—	3	57	— 10; — 20; + 40
2	0,00063	19	5,5	0,00044	0,000033	3	24	3 = 0. Spitzen plasmolysiert
	—	—	12,5	0,00021	—	3	73	+ 35; 2 = + 30
3	0,00047	20	5	0,000352	0,0000234	3	52	+ 30; 2 = + 20
	—	—	12	0,000188	—	3	70	+ 10; + 20; + 25
4	0,00016	22	7	0,000107	0,0000071	3	53	+ 20; — 25; + 30
	—	—	14	0,000057	—	3	88	— 20; + 20; + 10

Tabelle 13. NaOH.

In Vers. 1 ist die Dauer der vorl. Diff. 48 Std., die des Vers. 24 Std. Temp. $15\frac{1}{2}$ — 20° .
 — 2, 3 u. 5 — — 49 „ — 24 „ — 16 — 20° .
 — 4. u. 6 — — 47 „ — 26 „ — $17\frac{1}{2}$ — 21° .

Nr. des Versuchs	Ausgangskonzentration	Dicke des Blocks	Abst. v. d. Ausgangskonz. b. z. Vorderl. d. Wurzel	Konzentr. an der Vorderflanke der Wurzel	Konzentrationsgefälle auf je 1 mm	Anz. d. Wurz. i. ein. Reihe	Mittlerer Zuwachs der Wurzeln in %	Resultate
1	0,0152	40	6	0,0129	0,00038	4	19	3 = 0
	—	—	18	0,0083	—	3	58	1 = — 90; 2 = + 55
	—	—	29	0,0041	—	3	74	0; +; + 40
2	0,01013	41	6	0,0086	0,000247	3	29	1 = 0; 2 = + 15
	—	—	17	0,0059	—	2	38	+ 70; + 65
	—	—	26	0,0037	—	3	65	1 = + 40; 2 = + 15
3	0,00507	41	11	0,0037	0,000124	3	32	+ 55; + 55; + 30
	—	—	22	0,00234	—	3	81	3 = +
	—	—	34	0,00086	—	3	116	3 = 0
4	0,0038	40	10	0,00285	0,000095	3	51	1 = 0; 2 = +
	—	—	30	0,00095	—	3	60	3 = 0
5	0,0038	21	4	0,00307	0,00018	3	72	+ 25; + 40; + 40
	—	—	12	0,00162	—	3	98	2 = 0; 1 = +
6	0,00253	40	12	0,00177	0,0000633	3	77	2 = 0; 1 = +
	—	—	26	0,00088	—	3	101	3 = 0

Tabelle 14. NH₄OH.

In Vers. 1 u. 3 ist die Dauer der vorl. Diff. 47 Std., die des Vers. 24 Std. Temp. 15— 19° .
 — 2 — — 48 „ — 24 „ — 15 — $17\frac{1}{2}^{\circ}$.
 — 4 — — 50 „ — 24 „ — $15\frac{1}{2}$ — 19° .

1	0,02246	38	11	0,016	0,00059	3	0	3 = 0. Turgor schwach
	—	—	23	0,0088	—	3	13	+ 20, 0; + 20
	—	—	30	0,0047	—	3	62	+ 50; + 30; + 30
2	0,00842	22	7	0,0057	0,000383	3	40	+ 40; + 50; + 70
	—	—	15	0,0026	—	3	82	+ 40; + 75; + 30
3	0,0057	40	9	0,00435	0,000143	3	62	+ 30; + 30; + 40
	—	—	20	0,0028	—	3	100	1 = — 15; 2 = + 15
	—	—	30	0,0014	—	3	99	3 = 0
4	0,00168	22	7	0,00115	0,000077	3	154	+; 0; + 10
	—	—	15	0,000533	—	3	170	+; 2 = 0

Tabelle 15. LiCl.

In Vers. 3 ist die Dauer der vorl. Diff. 49 Std., die des Vers. 25 Std. Temp. 16—17½°.			
— 1	—	—	50 „ — 28 „ — 15—16°.
— 2	—	—	22 „ — 24 „ — 16—20°.
— 4	—	—	21 „ — 24 „ — 15—17°.
— 5	—	—	30 „ — 24 „ — 19—20°.

Nr. des Versuchs	Ausgangskonzentration	Dicke des Blocks	Abstand v. d. Ausgangskonz. bis zur Vorderfl. d. Wurzel	Konzentr. an der Vorderflanke der Wurzel	Konzentrationsgefälle auf je 1 mm	Anz. d. Wurz. i. ein. Reihe		Resultate
						Mittlerer Zuwachs der Wurzeln in %		
1	0,1	29	8	0,0724	0,00345	7	26	7 = 0
	—	—	19	0,0345	—	7	103	3 = 0; —; —10; —40; +40
2	0,05	10	5	0,025	0,005	3	38	Nach 8½ Std. 3 = 0
								„ 24 Std. 0; +10; +20
3	0,03	30	8	0,022	0,001	7	54	+; +40; —10; 2=0; 2=+10
	—	—	19	0,011	—	7	74	—; —50; 5=—40
4	0,01	10	5	0,005	0,001	3	59	Nach 5 Std. 3 = 0
								„ 24 Std. 0; —10; —20
5	0,005	10	5	0,0025	0,0005	4	57	—; ?—; —50; —20. Turg. schwach

Tabelle 16. Li₂SO₄.

In Vers. 1, 3 u. 5 ist die Dauer der vorl. Diff. 26 Std., die des Vers. 24 Std. Temp. 19—20°.

— 2 u. 4						— 22 „ — 24 „ — 16—19½°.		
1	0,02	10	5	0,01	0,002	3	22	0; + 15; $\mp$ 20
2	0,01	10	5	0,005	0,001	3	51	Nach 8 Std. 3 = 0 „ 24 Std. —; — 40; $\mp$ 40
3	0,005	10	5	0,0025	0,0005	3	44	0; — 15; $\mp$ 20
4	0,001	10	5	0,0005	0,0001	3	104	Nach 7½ Std. 3 = 0 „ 24 Std. — 25; + 30; $\mp$ 30
5	0,0005	10	5	0,00025	0,00005	3	92	—; $\mp$; + 10

Tabelle 17. NaCl.

In Vers. 1 u. 2 ist die Dauer der vorl. Diff. 47 Std., die des Vers. 24 Std. Temp. 15—18°.

— 3 u. 4				— 28 „ — 24 „ — 19—21°.				
1	0,34	37	10	0,249	0,0092	3	10	3 = 0. Spitzen plasmolysiert
	—	—	21	0,147	—	3	79	1 = 0; 2 = — 10
	—	—	31	0,055	—	3	119	2 = —; 1 = — 20
2	0,171	20	5	0,128	0,00855	3	40	— 20; — 25; — 30
	—	—	13	0,059	—	3	73	— 15; — 20; — 30
3	0,06	30	10	0,04	0,002	3	107	3 = 0
	—	—	21	0,018	—	3	129	0; — 10; — 15
4	0,009	30	9	0,0063	0,0003	3	131	3 = 0
	—	—	19	0,0033	—	3	136	3 = 0

Tabelle 18. Na_2SO_4

In Vers. 1 u. 2 ist die Dauer der vorl. Diff. 48 Std., die des Vers. 25 Std. Temp. 16—18°.

— 3 — — 22 „ — 27 „ — 16—19°.

— 4 — — 25 „ — 28 „ — 20—21°.

Nr. des Versuchs	Ausgangskonzentration	Dicke des Blocks	Abstand v. d. Ausgangskonz. bis zur Vorderfl. d. Wurzel	Konzentr. an der Vorderflanke der Wurzel	Konzentrationsgefälle auf je 1 mm	Anz. d. Wurz. i. ein. Reihe	Mittlerer Zuwachs der Wurzeln in %	Resultate
1	0,2	32	9	0,143	0,00625	7	29	7 = 0
	—	—	19	0,081	—	7	69	-50; -40; -30; -; +10; 0; +15
2	0,03	30	9	0,021	0,001	7	88	0; +; +20; +20; -15; +10; +20
	—	—	18	0,012	—	7	90	+30; +20; -55; +40; 3 = -30
3	0,003	10	5	0,0015	0,0003	5	104	3 = 0; -20; { + -
4	0,001	10	5	0,0005	0,0001	4	153	4 = 0

Tabelle 19. Essigsäures Natrium.

In Vers. 1 ist die Dauer der vorl. Diff. 50 Std., die des Vers. 28 Std. Temp. 15—16°.

— 2 — — 49 „ — 25 „ — 16—17½°.

1	0,03	32	10	0,0206	0,00094	7	21	7 = 0
	—	—	21	0,0103	—	7	62	4 = 0; 2 = +10; 1 = +15
2	0,009	32	10	0,0061	0,000281	7	74	2 = 0; 2 = +; -; +10; +40
	—	—	22	0,0028	—	7	92	+50; +40; +60; -40; -45; 2 = -30

Tabelle 20. Na_2CO_3 .

In Vers. 1 u. 3 ist die Dauer der vorl. Diff. 47 Std., die des Vers. 26 Std. Temp. 17½—21°.

— 2, 4 u. 5 — — 49 „ — 24 „ — 16—20°.

1	0,283	40	8	0,226	0,00707	3	7	3 = 0. Turgor schwach
	—	—	22	0,127	—	3	31	—; +; +
	—	—	33	0,049	—	3	70	-40; -30; 0
2	0,113	39	11	0,081	0,0029	3	24	3 = 0
	—	—	21	0,052	—	3	29	+55; 2 = +40
	—	—	32	0,02	—	3	76	—; 0; -25
3	0,094	40,5	5	0,082	0,00232	3	23	3 = 0. Turgor schwach
	—	—	15	0,059	—	3	38	-15; -40; 0
	—	—	26	0,033	—	3	50	+40; 2 = +55
4	0,0755	35	4	0,066	0,00216	3	18	0; 2 = +. Turgor schwach
	—	—	14	0,045	—	3	33	+90; 2 = +40
	—	—	26	0,019	—	3	55	+15; 2 = +55
5	0,0189	39	4	0,0169	0,000484	3	56	3 = +55
	—	—	14	0,0122	—	2	93	+40; +15
	—	—	27	0,0056	—	3	114	3 = 0

Tabelle 21. NaNO_3 .

In Vers. 1 ist die Dauer der vorl. Diff. 48 Std., die des Vers. 25 Std. Temp. 16—18°.

— 2 u. 4 — — 22 „ — 27 „ — 16—19°.
 — 3 u. 5 — — 25 „ — 28 „ — 20—21°.

Nr. des Versuchs	Ausgangskonzentration	Dicke des Blocks	Abstand v. d. Ausgangskonz. bis zur Vorderfl. d. Wurzel	Konzentr. an der Vorderflanke der Wurzel	Konzentrationsgefälle auf je 1 mm	Anz. d. Wurz. 1. ein. Reihe	Mittlerer Zuwachs der Wurzeln in %	Resultate
1	0,3	30	8	0,22	0,01	7	10	5 = 0; 2 = +. Turgor schwach
	—	—	18	0,12	—	7	45	+10; +20; -15; 2 = -20; 2 = -10
2	0,1	10	5	0,05	0,01	5	36	Nach 5 Std. 5 = 0
								„ 27 „ -30; -40; 3 = -50
3	0,03	10	5	0,015	0,003	3	133	0; -10; -15.
4	0,01	10	5	0,005	0,001	5	117	3 = 0; -20; -30
5	0,003	10	5	0,0015	0,0003	4	141	-; 3 = 0

Tabelle 22. KCl .

In Vers. 1, 3 u. 4 ist die Dauer d. vorl. Diff. 22 Std., die d. Vers. 24 Std. Temp. 16—19½°.

— 2 — — 31 „ — 22 „ — 20—22°.

1	0,1	10	5	0,05	0,01	5	22	Nach 6½ Std. 5 = 0
								„ 24 „ 1 = 0; 4 = —
2	0,03	30	9	0,021	0,001	3	104	3 = 0
	—	—	21	0,009	—	3	132	3 = 0
3	0,01	10	5	0,005	0,001	5	113	Nach 6½ Std. 5 = 0
								„ 24 „ +10; +10; -; 2 = -10
4	0,001	10	5	0,0005	0,0001	5	106	Nach 6½ Std. 5 = 0
								„ 24 Std. +10; -15; ± 20; 2 = —

Tabelle 23. K_2SO_4 .

In Vers. 2 u. 3 ist die Dauer der vorl. Diff. 22 Std., die des Vers. 24 Std. Temp. 18—19½°.

— 1 — — 48 „ — 25 „ — 16—18°.

1	0,03	32	8	0,0225	0,00094	7	50	3 = 0; 2 = +20; +; +
	—	—	20	0,0112	—	7	87	0; -; +20; +15; +30; 2 = -10
2	0,01	10	5	0,005	0,001	5	62	Nach 7 Std. 5 = 0
								„ 24 „ -; -10; -20; 2 = +20
3	0,001	10	5	0,0005	0,0001	4	102	Nach 7 Std. 4 = 0
								„ 24 „ 3 = 0; 1 = +20

1	0,25	10	5	0,125	0,025	3	11	+ , + , + 10. Turgor schwach
2	0,1	10	5	0,05	0,01	3	43	? 0; + 15; + 15
3	0,02	10	5	0,01	0,002	5	84	0; + ; - ; - 10; - 20
4	0,01	10	5	0,005	0,001	3	128	Nach $8\frac{1}{2}$ Std. 3 = 0 n 24 n —; 2 = + 10
5	0,001	10	5	0,0005	0,0001	3	122	Nach $8\frac{1}{2}$ Std. 3 = 0 n 24 n ++; +; + 60

Tabelle 27. KH_2PO_4 .

In Vers. 3 ist die Dauer der vorl. Diff. 48 Std., die des Vers. 24 Std. Temp. $15-17\frac{1}{2}^\circ$.
 — 1 u. 2 — — 50 „ — 24 „ — $16-19^\circ$.

Nr. des Versuchs	Ausgangskonzentration	Dicke des Blocks	Abstand v. d. Ausgangskonz. bis zur Vorderfl. d. Wurzel	Konzentr. an der Vorderflanke der Wurzel	Konzentrationsgefälle auf je 1 mm	Anz. d. Wurz. i. ein. Reihe	Mittlerer Zuwachs der Wurzeln in %	Resultate
1	0,0884	40	8	0,071	0,00221	3	24	$3 = 0$
	—	—	19	0,046	—	3	53	$+10; +10; +15$
	—	—	30	0,022	—	3	83	$0; -10; -15$
2	0,02205	21	6	0,0157	0,00105	3	63	$+20; 2 = 0$
	—	—	14	0,0073	—	3	97	$2 = 0; 1 = \begin{cases} - \\ +35 \end{cases}$
3	0,00736	40	8	0,00588	0,000184	3	102	$1 = 0; 2 = +20$
	—	—	21	0,0035	—	3	149	$2 = 0; 1 = +15$
	—	—	31	0,00165	—	3	166	$3 = 0$

Tabelle 28. Essigsaures Kalium.

In Vers. 1 ist die Dauer der vorl. Diff. 50 Std., die des Vers. 28 Std. Temp. $15-16^\circ$.
 „ 2 — — 49 „ — 25 „ — $16-17\frac{1}{2}^\circ$.

1	0,03	31	8	0,0223	0,00097	7	20	$6 = 0; 1 = +$
	—	—	22	0,0087	—	7	83	$7 = 0$
2	0,009	31	8	0,0066	0,00029	7	89	$4 = 0; 3 = +$
	—	—	19	0,0034	—	7	115	$2 = 0; -10; +30; -30; 2 = -40$

Tabelle 29. NH_4Cl .

In Vers. 2 ist die Dauer der vorl. Diff. 48 Std., die des Vers. 23 Std. Temp. $19-20^\circ$.
 — 4 — — 26 „ — 25 „ — $19-20^\circ$.
 — 1, 3 u. 5 — — 24 „ — 21 „ — $14\frac{1}{2}-16^\circ$.

1	0,1	10	5	0,05	0,01	5	21	$+10; +15; +20; 2 = +40$
2	0,04	40	12	0,028	0,001	3	107	$+20; 2 = +10$
	—	—	22	0,018	—	3	113	$3 = -20$
	—	—	31	0,009	—	3	106	$3 = -30$
3	0,01	10	5	0,005	0,001	5	56	$-10; -15; -; 2 = -20$
4	0,005	10	5	0,0025	0,0005	5	85	$0; -10; +40; 2 = -30$
5	0,001	10	5	0,0005	0,0001	5	58	$5 = 0$

Tabelle 30. NH_4Br .

In Vers. 1 ist die Dauer der vorl. Diff. 21 Std., die des Vers. 24 Std. Temp. $15-17^\circ$.
 — 2 u. 5 — — 26 " — 25 " — $19-20^\circ$.
 — 3 u. 4 — — 23 " — 24 " — $14\frac{1}{2}-16^\circ$.

Nr. des Versuchs	Ausgangskonzentration	Dicke des Blocks	Abst. v. d. Ausgangskonz. bis z. Vorderfl. d. Wurzel	Konzentr. an der Vorderflanke der Wurzel	Konzentrationsgefälle auf je 1 mm	Anz. d. Wurz. i. ein. Reihe	Mittlerer Zuwachs der Wurzeln in $\frac{0}{10}$	Resultate
1	0,1	10	5	0,05	0,01	3	33	Nach 5 Std. 3 = 0 " 24 " $+10$; $+20$; $+35$
2	0,05	10	5	0,025	0,005	5	58	2 = ? 0; $\bar{+}25$; -40 ; -50
3	0,01	10	5	0,005	0,001	3	91	0; -10 ; -30
4	0,001	10	5	0,0005	0,0001	3	86	$\bar{+}15$; 2 = 0
5	0,0001	10	5	0,00005	0,00001	4	101	2 = 0; $\bar{+}10$; -20

Tabelle 31. NH_4J .

In Vers. 2 ist die Dauer der vorl. Diff. 21 Std., die des Vers. 24 Std. Temp. $15-17^\circ$.
 — 1 u. 4 — — 26 " — 25 " — $19-20^\circ$.
 — 3 — — 23 " — 24 " — $14\frac{1}{2}-16^\circ$.

1	0,1	10	5	0,05	0,01	3	20	$+$; $+25$; $\bar{+}50$. Turgor schwach.
2	0,05	10	5	0,025	0,005	3	72	Nach 5 Std. 3 = 0 " 24 " -15 ; -30 ; -40
3	0,01	10	5	0,005	0,001	3	101	1 = 0; 2 = ? 0
4	0,001	10	5	0,0005	0,0001	3	134	3 = 0

Tabelle 32. $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$.

In Vers. 1, 3 u. 5 ist die Dauer der vorl. Diff. 21 Std., die d. Vers. 24 Std. Temp. $15-17^\circ$.
 — 2 u. 4 — — 26 " — 25 " — $19-20^\circ$.

1	0,1	10	5	0,05	0,01	5	13	Nach $5\frac{1}{2}$ Std. 5 = $+$ " 24 " 3 = 0; $+10$; $+15$
2	0,04	10	5	0,02	0,004	5	24	-20 ; $+20$; $+30$; $+35$; $+40$
3	0,01	10	5	0,005	0,001	5	95	Nach $5\frac{1}{2}$ Std. 5 = 0 " 24 " -10 ; 2 = 0; 2 = -20
4	0,005	10	5	0,0025	0,0005	5	82	1 = 0; 4 = -20
5	0,001	10	5	0,0005	0,0001	5	98	Nach $5\frac{1}{2}$ Std. 5 = 0 " 24 " $+10$; $+25$; 3 = 0

Tabelle 33. NH_4NO_3 .

In Vers. 1, 3 u. 5 ist die Dauer d. vorl. Diff. 22 Std., die d. Vers. 24 Std. Temp. $16-19\frac{1}{2}^\circ$.
 — 2 u. 4 — — 30 " — 24 " — $19-20^\circ$.

1	0,1	10	5	0,05	0,01	5	32	Nach $6\frac{1}{2}$ Std. 1 = 0; 4 = $+$ " 24 " $+10$; $+30$; $+50$; 2 = $+40$
2	0,05	10	5	0,025	0,005	4	56	-20 ; $+$; 2 = $-$
3	0,01	10	5	0,005	0,001	5	97	Nach 7 Std. 5 = 0 " 24 " $+$; $-$; -15 ; 2 = 0
4	0,002	10	5	0,001	0,0002	4	86	$-$; -10 ; $\bar{+}40$; $\bar{+}40$
5	0,001	10	5	0,0005	0,0001	5	71	Nach 8 Std. 5 = 0 " 24 " -30 ; 0; $\bar{+}10$; $\bar{+}40$; $\bar{+}45$

Tabelle 34. NH_4CNS .

In Vers. 1 2 u. 4 ist die Dauer der vorl. Diff. 21 Std., die des Vers. 24 Std. Temp. 15—17°. — 3 u. 5 — — 26 „ — 25 „ — 19—20°.

Nr. des Versuchs	Ausgangskonzentration	Dicke des Blocks	Abstand v. d. Ausgangskonz., bis zur Vorderfl. d. Wurzel	Konzentr. an der Vorderflanke der Wurzel	Konzentrationsgefälle auf je 1 mm	Anz. d. Wurz. i. ehn. Reihe	Mittlerer Zuwachs der Wurzeln in %	Resultate
1	0,1	10	5	0,05	0,01	5	31	Nach 6 Std. 2 = +; 3 = 0 „ 24 „ +10; { -; +20; +25; +15; +40
2	0,01	10	5	0,005	0,001	5	73	Nach 6 Std. 5 = 0 „ 24 „ +10; -15; -50; +25; +40
3	0,005	10	5	0,0025	0,0005	5	86	+; 0; -15; 2 = -
4	0,001	10	5	0,0005	0,0001	5	129	Nach 5½ Std. 5 = 0 „ 24 „ -10; +20; +20; 2 = +10
5	0,0001	10	5	0,00005	0,00001	5	128	4 = 0; 1 = +

Tabelle 35. Oxalsaurer Ammonium.

In Vers. 1 u. 3 ist die Dauer der vorl. Diff. 21 Std., die des Vers. 24 Std. Temp. 15—17°. — 2 u. 4 — — 26 „ — 25 „ — 19—20°.

1	0,01	10	5	0,005	0,001	5	29	Nach 7 Std. 4 = 0; 1 = + „ 24 „ 0; +10; +20; 2 = +40
2	0,002	10	5	0,001	0,0002	5	100	3 = 0; +10; +20
3	0,001	10	5	0,0005	0,0001	5	100	Nach 6 Std. 5 = 0 „ 24 „ 0; +20; +40; 2 = +10
4	0,0001	10	5	0,00005	0,00001	5	111	2 = 0; +10; +15; +30

Tabelle 36. MgCl_2 .

In Vers. 1 u. 4 ist die Dauer der vorl. Diff. 48 Std., die des Vers. 24 Std. Temp. 15—17½°. — 2 u. 3 — — 47 „ — 24 „ — 15—19°. — 5 u. 6 — — 49 „ — 24 „ — 16—19°.

1	0,1485	42	10	0,113	0,00354	3	60	1 = 0; 2 = +
	—	—	22	0,07	—	3	159	-20; -25; -40
	—	—	32	0,035	—	3	142	-30; -40; -50
2	0,099	42	12	0,07	0,00236	3	59	0; +20; +70
	—	—	23	0,0446	—	3	86	-25; 2 = -10
	—	—	33	0,0213	—	3	87	-20; 2 = -30
3	0,021	42	10	0,0158	0,0005	3	68	-10; -20; -30
	—	—	20	0,0109	—	3	102	2 = -15; 1 = { +40
	—	—	32	0,0049	—	3	103	2 = -10; 1 = -20
4	0,004	41	11	0,0029	0,0001	3	125	1 = 0; 2 = -20
	—	—	22	0,00187	—	3	123	0; -10; -20
	—	—	33	0,0008	—	3	129	0; 2 = -20
5	0,00103	41	11	0,00074	0,000025	3	130	-20; 2 = 0
	—	—	22	0,00047	—	3	112	0; -10; -15
	—	—	33	0,00019	—	3	120	-20; 2 = -30
	0,00045	20	7	0,00029	0,0000223	3	132	3 = 0
	—	—	15	0,00011	—	3	118	3 = 0

Tabelle 37. $MgSO_4$.

In Vers. 1 u. 8 ist d. Dauer d. vorl. Diff. 30 Std., die d. Vers. 24 Std. Temp. 19—20°.
 „ 2, 3, 5 u. 7 — — 19 „ 31 „ — 20—21°.
 „ 4 u. 6 — — 24 „ 21 „ — 14½—16°.

Nr. des Versuchs	Ausgangskonzentration	Dicke des Blocks	Abst. v. d. Ausgangskonz. bis z. Vorderfl. d. Wurzel	Konzentr. an der Vorderflanke der Wurzel	Konzentrationsgefälle auf je 1 mm	Anz. d. Wurzel in ein. Reihe	Mittlerer Zuwachs der Wurzeln in %	Resultate			
1	0,2	10	5	0,1	0,02	3	27	+60; +70; +85.	Turgor schwach		
								Nach 4 7 10 31 Std.			
2	0,1	10	5	0,05	0,01	3	100	0 0 — —40	} Turgor schwach		
							57	+ + + +			
							138	— — — —45			
3	0,05	10	5	0,025	0,005	3	112	— — —15 —40	} Turgor schwach		
							68	— — —30 —45			
							102	— — — —40			
4	0,01	10	5	0,005	0,001	5	72	?0; —20; —25; 2 = —30;			
								Nach 3½ 7 10 31 Std.			
5	0,005	10	5	0,0025	0,0005	3	206	0 — — —40			
							166	0 — — —30			
							209	0 — — —20			
6	0,001	10	5	0,0005	0,0001	5	61	2 = 0; 3 = —10			
								Nach 3½ 7 10 31 Std.			
7	0,0005	10	5	0,00025	0,00005	3	139	0 0 0 +15			
							139	0 0 0 +20			
							276	0 0 0 —20			
8	0,0001	10	5	0,00005	0,00001	4	124	—15; +10; 2 = 0			

Tabelle 38. $Mg(NO_3)_2$.

In Vers. 1 u. 4 ist die Dauer der vorl. Diff. 21 Std., die des Vers. 24 Std. Temp. 15—17°.
 — 2 — — 30 „ — 24 „ — 19—20°.
 — 3 — — 21 „ — 24 „ — 15—17°.

1	0,1	10	5	0,05	0,01	5	23	Nach 7 Std. 1 = 0; 4 = +			
								„ 24 „ 2 = 30; 2 = +25; 1 = +70			
								Turgor schwach			
2	0,02	10	5	0,001	0,002	5	46	—20; —30; —40; —50; —60			
3	0,01	10	5	0,005	0,001	5	76	Nach 7 Std. 5 = —			
								„ 24 „ 2 = —45; 2 = —50; 1 = —70			
4	0,001	10	5	0,0005	0,0001	5	90	Nach 7 Std. 5 = 0			
								„ 24 „ 2 = 0; —; —40; +20			

Tabelle 39. CaCl_2 .In Vers. 1 u. 6 ist die Dauer d. vorl. Diff. 50 Std., die d. Vers. 24 Std. Temp. $17\frac{1}{2}$ — 19° .

— 2 — — 48 " — 23 " — 19 — 20° .
 — 3, 4 u. 5 — — 24 " — 21 " — $14\frac{1}{2}$ — 16° .

Nr. des Versuchs	Ausgangskonzentration	Dicke des Blocks	Abst. v. d. Ausgangskonz. bis z. Vorderfl. d. Wurz.	Konzentr. an der Vorderflanke der Wurzel	Konzentrationsgefälle auf je 1 mm	Anz. d. Wurz. i. ein. Reihe	Mittlerer Zuwachs der Wurzeln in %	Resultate
1	0,363	42	10	0,277	0,00864	3	23	+ 20; + 25; + 30. Turg. schwach
	—	—	22	0,173	—	3	72	0; — 10; $\left\{ \begin{smallmatrix} + \\ -30 \end{smallmatrix} \right.$
	—	—	32	0,086	—	3	132	2 = 0; 1 = — 20
2	0,28	42	11	0,207	0,0067	3	57	+ 10; 2 = 0
	—	—	21	0,14	—	3	133	0; — 10; $\left\{ \begin{smallmatrix} + \\ -35 \end{smallmatrix} \right.$
	—	—	31	0,073	—	3	133	— 20; 2 = — 25
3	0,1	10	5	0,05	0,01	5	41	— 20; — 30; 3 = — 40
4	0,01	10	5	0,005	0,001	5	66	— 50; 2 = — 20; 2 = — 30
5	0,001	10	5	0,0005	0,0001	4	68	—; — 10; 2 = — 20
6	0,00073	37	8	0,00057	0,0000197	3	120	+; 0; — 15
	—	—	17	0,00039	—	3	125	2 = 0; 1 = + 20
	—	—	28	0,000177	—	3	131	— 20; 2 = 0
7	0,0001	10	5	0,00005	0,00001	4	81	4 = 0

Tabelle 40. CaBr_2 .In Vers. 1 u. 2 ist die Dauer der vorl. Diff. 26 Std., die d. Vers. 25 Std. Temp. 19 — 20° .

" 4 u. 5 — — 23 " — 24 " — $14\frac{1}{2}$ — 16° .
 " 3 — — 21 " — 24 " — 15 — 17° .

1	0,15	10	5	0,075	0,015	3	49	+10; —40; —50
2	0,1	10	5	0,05	0,01	3	48	—30; —40; —60
3	0,05	10	5	0,025	0,005	3	65	Nach 5 Std. $3 = 0$ " 24 " —30; —40; —50
4	0,01	10	5	0,005	0,001	3	85	40; $2 = -30$
5	0,0001	10	5	0,00005	0,00001	3	87	0; $2 = -20$

Tabelle 41. $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$.In Vers. 2 u. 4 ist die Dauer d. vorl. Diff. 24 Std., die d. Vers. 21 Std. Temp. $14\frac{1}{2}$ — 16° .

— 1, 3 u. 5		—	—	21 "	—	24 "	—	15—17°.
0,5	10	5	0,25	0,05	3	0	Nach 5 Std. +; 0; 0 ,, 24 ,, 0; +15; +20. Plasmol.	
0,1	10	5	0,05	0,01	5	52	—10; —20; —25; —30; —50	
0,01	10	5	0,005	0,001	5	83	Nach 5 ¹ / ₂ Std. 5 = — N. 24 Std. —50; 2 = —30; 2 = —40	
0,001	10	5	0,0005	0,0001	5	69	—10; —40; 3 = —20	
0,0001	10	5	0,00005	0,00001	5	92	Nach 5 ¹ / ₂ Std. 5 = 0 N. 24 Std. 0; —20; —60; +30; +40	

Tabelle 42. Essigsäures Kalzium.

In Vers. 3 u. 4 ist die Dauer der vorl. Diff. 30 Std., die des Vers. 24 Std. Temp. 19—20°.

„ 1 — — 49 „ — 25 „ — 16—17 $\frac{1}{2}$ °.

„ 2 — — 21 „ — 24 „ — 15—17°.

Nr. des Versuchs	Ausgangskonzentration	Dicke des Blocks	Abst. v. d. Ausgangskonz. bis z. Vorderfl. d. Wurz.	Konzentr. an der Vorderflanke der Wurzel	Konzentrationsgefälle auf je 1 mm	Anz. d. Wurz. i. ein. Reihe	Mittlerer Zuwachs der Wurzeln in %	Resultate
1	0,01	31	9	0,0071	0,000323	7	48	5 = 0; 2 = +
	—	—	18	0,0042	—	7	89	2 = — 10; 3 = — 40; $\overline{+}$ 50; $\overline{+}$ 20
2	0,005	10	5	0,0025	0,0005	5	42	Nach 6 Std. 5 = 0
								„ 24 „ 0; — 15; 3 = — 40
3	0,001	10	5	0,0005	0,0001	4	86	— 40; — 30; $\overline{+}$ 40; $\overline{+}$ 30
4	0,0001	10	5	0,00005	0,00001	4	119	2 = 0; — 10; $\pm$ 40

Tabelle 43. SrCl₂.

In Vers. 3, 4 u. 5 ist die Dauer der vorl. Diff. 22 Std., die des Vers. 27 Std. Temp. 16—19°.

— 1 — — 26 „ — 25 „ — 19—20°.

— 2 — — 30 „ — 24 „ — 19—20°.

1	0,15	10	5	0,075	0,015	3	15	—; — 10; — 30
2	0,1	10	5	0,05	0,01	3	18	3 = —
3	0,05	10	5	0,025	0,005	3	25	Nach 6 Std. 3 = 0
								Nach 27 Std. 0; — 20; — 30
4	0,01	10	5	0,005	0,001	3	45	3 = 0 — 15; — 20; — 40
5	0,001	10	5	0,0005	0,0001	3	82	3 = 0 3 = — 20

Tabelle 44. BaCl₂.

In Vers. 1 u. 3 ist die Dauer der vorl. Diff. 28 Std., die des Vers. 24 Std. Temp. 19—21°.

— 2 — — 31 „ — 22 „ — 20—22°.

— 4 — — 48 „ — 23 „ — 19—20°.

1	0,03	30	10	0,02	0,001	3	12	0; $\pm$ 10; $\pm$ 20
	—	—	20	0,01	—	3	29	2 = 0; 1 = $\pm$
2	0,021	30	8	0,0154	0,0007	3	55	—, — 10; — 40
	—	—	19	0,0077	—	3	98	0; —; — 10
3	0,009	30	9	0,0063	0,0003	3	36	— 10; 2 = — 20
	—	—	19	0,0033	—	3	66	—; 2 = — 10
4	0,003	30	10	0,002	0,0001	3	75	3 = 0
	—	—	20	0,001	—	3	122	3 = 0

Tabelle 45. Versuche mit *Helianthus annuus*.

In Vers.	1 u. 3	ist die Dauer der vorl. Diff.	47 Std., die des Vers.	24 Std.	Temp. 15—16°.
—	2 u. 4	—	45 „	—	24 „
—	5, 17, 18 u. 19	—	22 „	—	29 „
—	6, 8, 10, 13 u. 15	—	24 „	—	24 „
—	7, 9, 11, 12 u. 16	—	27 „	—	22 „
—	14	—	50 „	—	24 „

Nr. des Versuchs	Diffund. Stoff; Ausgangskonzentr. desselben	Dicke des Blocks	Abst. v. d. Ausgangskonz. bis z. Vorderd. d. Wurz.	Konzentr. an der Vorderflanke der Wurzel	Konzentrations- gefälle auf je 1 mm	Anz. d. Wurz. i. ein. Reihe	Mittlerer Zuwachs der Wurzeln in %	Resultate	
1	0,00084 H ₂ SO ₄	40	10	0,00062	0,000021	3	0	3 = 0.	Plasmolysiert
		—	21	0,00039	—	3	0	3 = 0.	„
		—	32	0,00016	—	3	64	3 = 0	
2	0,0001 H ₂ SO ₄	38	10	0,000077	0,0000027	5	55	2 = ?; 3 = 0	
		—	21	0,000046	—	5	69	2 = ?; 3 = 0	
3	0,0102 NaOH	20	7	0,0065	0,00051	3	45	+ 20; 2 = + 30	
		—	14	0,003	—	3	40	— 70; + 40; + 65	
4	0,0051 NaOH	43	9	0,00405	0,000118	3	22	— 10; + 15; + 30	
		—	22	0,00246	—	3	70	0; — 10; + 20	
		—	32	0,00129	—	3	101	3 = 0	
								Nach 6 Std.	Nach 29 Std.
5	0,1 KCl	30	10	0,066	0,0033	4	246	4 = 0	2 = 0; ? ±; + 10
		—	20	0,033	—	4	284	4 = 0	3 = 0; — 10
6	0,1 KCl	10	5	0,05	0,01	4	31	4 = 0	
7	0,01 KCl	10	5	0,005	0,001	4	170	2 = 0; ? ±; + 20	
8	0,1 NH ₄ Br	20	8	0,06	0,005	4	62	+; + 25; 2 = + 10.	
9	0,05 NH ₄ Br	10	5	0,025	0,005	4	61	2 = 0; 2 = + 10	
10	0,01 NH ₄ Br	10	5	0,005	0,001	4	57	0; — 40; + 20; + 20	
11	0,0033 NH ₄ Br	20	6	0,00234	0,000167	4	121	3 = 0; 1 = + 15	
12	0,2 CaCl ₂	10	5	0,1	0,02	4	66	0; — 30; + 10; + 30	
13	0,1 CaCl ₂	16	5	0,05	0,01	4	77	+ 20; 3 = 0	
14	0,0727 CaCl ₂	37	9	0,055	0,00197	2	100	2 = 0	
		—	20	0,0334	—	2	88	2 = 0	
		—	28	0,0177	—	2	118	2 = 0	

Fortsetzung der Tabelle 45.

Nr. des Versuchs	Diffund. Stoff; Ausgangskonzentr. desselben	Dicke des Blocks	Abst. v. d. Ausgangskonz. b. z. Vorderl. d. Wurzel	Konzentr. an der Vorderflanke der Wurzel	Konzentrations- gefälle auf je 1 mm	Anz. d. Wurz. i. ein. Reihe	Mittlerer Zuwachs der Wurzeln in %	Resultate	
15	0,015 MgCl ₂	10	5	0,0075	0,0015	4	26	+ 45; + 55; 2 = + 10	} Turgor schwach
16	0,0125 MgCl ₂	10	5	0,00625	0,00125	4	33	+ 20; 3 = + 10	
17	0,01 MgCl ₂	10	5	0,005	0,001	3	270	Nach 6 Std. 3 = 0 „ 29 „ 0; — 10; — 15	
18	0,005 MgCl ₂	10	5	0,0025	0,0005	4	241	4 = 0	
19	0,0025 MgCl ₂	10	5	0,00125	0,00025	4	250	4 = 0	

Auf Grund der 45 angeführten Tabellen komme ich zu den folgenden Schlüssen.

Zunächst wird von den mit *Lupinus*-Wurzeln erzielten Resultaten die Rede sein.

Die *Lupinus*-Wurzeln, dem Diffusionsstrome der sämtlichen untersuchten Stoffe ausgesetzt, bleiben in der Regel nicht indifferent, sondern reagieren mit Krümmungen.

Das Verhältnis zwischen der Reizwirkung des Stromes und der Reaktion der Wurzeln läßt sich folgendermaßen darstellen.

Der krümmende Effekt des Stromes läßt sich nicht bei beliebigen Konzentrationen beobachten, sondern nur innerhalb bestimmter, für verschiedene Stoffe verschiedener Konzentrationsgrenzen. Ober- und unterhalb derselben bleiben die Wurzeln gerade. Innerhalb derselben variiert nun die Krümmungsreaktion 1. in der Intensität, 2. in der Form und 3. in der Richtung.

Sehen wir uns nun alle diese 3 Schwankungen etwas näher an.

Intensität der Krümmung. Die Ablenkungswinkel schwanken zwischen 0 und 90°. Dies war auch vorausszusehen, insofern die in den Agarblock gesteckten Wurzeln sich unter dem Reizeinfluß zweier Kräfte — Diffusionsstrom und Schwere — befinden. Die erstere wirkt bei unserer Versuchsanstellung auf die Wurzeln in horizontaler Richtung ein, d. h. im rechten Winkel zur Längsachse der Wurzeln; die letztere Kraft dagegen wirkt in lotrechter Richtung, d. h. in der Richtung der Längsachse der Wurzeln. Je

nach der relativen Größe beider Kräfte nimmt die Wurzel eine gewisse zwischen 0 und 90° liegende Gleichgewichtslage an. Da aber die geotropische Stimmung der Wurzeln überall im Agarblock konstant bleibt, so ist offenbar die Intensität der Krümmung nur von der Intensität des Diffusionsreizes abhängig.

Der letztere, soweit sich zurzeit urteilen läßt, hängt wiederum ab: 1. von der Natur des diffundierenden Stoffes, 2. von der auf die Wurzel einwirkenden Konzentration, 3. von der Dicke des Agarblocks (also vom Konzentrationsgefälle) und 4. von der Einwirkungs-dauer des Diffusionsstromes. Ob und wie diese Abhängigkeit genau zu formulieren ist, läßt sich einstweilen nicht sagen. Gegenwärtig darf man nur soviel behaupten, daß die im Diffusionsstrom einer gegebenen Substanz befindlichen Wurzeln sich um so stärker krümmen¹⁾, je höher²⁾ die reizende Konzentration, je dünner²⁾ der Agarblock und je länger²⁾ die Einwirkungs-dauer des Stromes ist.

Form der Krümmung. Die *Lupinus*-Wurzeln, welche sich sowohl in gleicher Richtung als auch gleich stark gekrümmt haben, können sich noch durch die Form ihrer Krümmungen voneinander unterscheiden. Als Form der Krümmung bezeichne ich die Lokalisation derselben und das Aussehen der Biegungslinie. In dieser Hinsicht kommen zwei Extreme zum Vorschein. Einerseits sieht man Krümmungen, welche fast auf die Wurzelspitzen lokalisiert und scharf eckig sind. Andererseits begegnet man den Krümmungen, welche in höheren Zonen der Wurzeln beginnen und bogenartig sind. Zwischen diesen Extremen liegen verschiedene Übergänge.

Die Unterschiede in der Lokalisation³⁾ der Krümmungen lassen sich unschwer mit der Wachstumsgeschwindigkeit der betr. Wurzeln in Zusammenhang bringen. Wie aus den obigen Tabellen ersichtlich, ist die Wachstumsschnelligkeit⁴⁾ der Wurzeln in verschiedenen

1) Ich meine die Krümmungen der einen (+ oder —) Richtung.

2) Allerdings innerhalb bestimmter Grenzen.

3) Die Unterschiede im Aussehen der Biegungslinie dürften möglicherweise analog erklärt werden.

4) Dieselbe scheint von der Natur der diffundierenden Substanz abzuhängen, sowie davon, wie hoch die auf die Wurzeln einwirkende Konzentration ist und wie lange diese Einwirkung dauert.

Außer den Schwankungen der Wachstumsgeschwindigkeit der sich krümmenden Wurzeln beobachtet man häufig auch Schwankungen ihrer Turgeszenz. Dabei kommen wieder zwei Extreme vor, und zwar einerseits sind die Wurzeln des Turgors völlig beraubt, andererseits aber zeigen sie eine bis zur Straffheit erhöhte Turgeszenz.

Es kommen gleichfalls Unterschiede in dem Aussehen der gekrümmten Wurzeln zur

Versuchen bei weitem nicht gleich. Wachsen die Wurzeln sehr langsam¹⁾, so müssen auch Krümmungen unweit von der Spitze stehen bleiben. Wachsen aber die Wurzeln in einem normalen¹⁾ Tempo, so wird die Biegungsstelle allmählich durch diejenigen Wurzelzonen nach oben verschoben, welche in die Gleichgewichtslage geraten sind und hier so weiter wachsen.

Richtung der Krümmung. Berücksichtigt man die Gesamtheit der Versuche, so ist das Bild, welches die Wurzeln in dieser Hinsicht darbieten, ziemlich kompliziert. Nur bei wenigen Versuchen reagieren die sämtlichen Wurzeln übereinstimmend, d. h. mit Krümmungen in gleicher Richtung. Viel häufiger krümmt sich die Mehrzahl der in einer Reihe befindlichen, also gleich stark gereizten Wurzeln nach einer Richtung, die Minderzahl dagegen nach einer anderen oder nach verschiedenen Richtungen. Übrigens sind auch solche Versuche nicht selten, bei denen keine der Richtungen dominiert.

Will man bei dieser Sachlage zu irgend welchen allgemeinen Schlüssen betreffs der Krümmungsrichtung der im Diffusionsstrom verschiedener Stoffe befindlichen Wurzeln gelangen, so muß man sich auf das Verhalten nicht sämtlicher Wurzeln, sondern der Mehrzahl derselben stützen.

Unter dieser Beschränkung, die übrigens auch bei sonstigen empirischen Verallgemeinerungen üblich ist, darf man mit gewissem Recht 2 Sätze aufstellen.

1. Wirken auf die Wurzeln Konzentrationen, welche mehr oder weniger wachstumshemmend sind, so krümmen sich die Wurzeln positiv. Der Effekt wird fast bei sämtlichen untersuchten Stoffen beobachtet, mögen sie Elektrolyte oder Nichtelektrolyte sein.

2. Wirken aber mäßigere Konzentrationen auf die Wurzeln ein, so tritt ein Unterschied zwischen Elektrolyten und Nichtelektrolyten zutage.

Im Diffusionsstrom der Nichtelektrolyten verhalten sich die Wurzeln im allgemeinen unbestimmt. Es kann hier von einer dominierenden Krümmungsrichtung nicht gut die Rede sein. Denn die Krümmungsrichtung ist verschiedenartig sowohl bei fast jedem

Beobachtung. Meistens sehen die Wurzeln vollkommen normal aus, bisweilen aber sind sie keilartig zugespitzt und dunkel gefärbt.

1) Es ist hierbei die Geschwindigkeit nur während der Ausführung der Krümmung gemeint.

einzelnen Versuche als auch bei verschiedenen untereinander vergleichbaren Versuchen. Zuweilen beobachtet man hier gerade gebliebene oder $\pm$ gekrümmte Wurzeln. Häufiger aber bleibt ein Teil der Wurzeln je einer Reihe gerade, ein anderer dagegen krümmt sich nach verschiedenen ($+$, $-$, $+$, $\pm$, $=$) Richtungen hin.

Einfacher stellen sich die Verhältnisse im Falle der Elektrolyten dar.

Von wenigen Ausnahmen abgesehen, beobachtet man hier stets eine dominierende Krümmungsrichtung, und zwar bei Anwendung von Säuren, Alkalien, Na_2CO_3 ¹⁾ und K_2CO_3 ¹⁾ eine positive, bei Anwendung von neutralen Salzen dagegen eine negative.

Es sei nun auf die Unterschiede in der krümmenden Wirkung der einzelnen Elektrolyten hingewiesen.

Gute positive Krümmungen wurden hauptsächlich bei alkalischen Lösungen beobachtet. Die Säuren rufen seltener positive Krümmungen hervor, wobei auch der Ablenkungswinkel schwach ist. In Anbetracht dessen, daß im Diffusionsstrome beliebiger saurer und alkalischer Lösungen positive Krümmungen beobachtet werden, kommt die reizende Wirkung allem Anschein nach den H^+ - und OH^- -Ionen zu.

Was nun die negativen Krümmungen anbelangt, so scheint die Stärke derselben von der Natur des Kation abzuhängen.

Salze mit zweiwertigen Kationen, wie Ca , Mg oder Sr ²⁾ rufen, unabhängig von der Natur des Anion, stets ausgezeichnete negative Krümmungen hervor. Diese werden in sehr breiten Konzentrationsgrenzen und an fast allen Wurzeln je einer Reihe beobachtet. Besonders schöne Krümmungen sah ich durch MgCl_2 hervorgerufen.

Salze mit einwertigen Kationen, wie Li , K , Na oder NH_4 , rufen weniger prägnante negative Krümmungen hervor. So sind hier die Krümmungen schwächer, erstrecken sich auf einen kleineren Prozentsatz der Wurzeln je einer Reihe und lassen sich überhaupt im engeren Spielraume der Konzentrationen beobachten. Auch hier scheint die Natur des Anion ohne Belang zu sein.

1) Die Lösungen dieser Salze sind bekanntlich hydrolysiert und besitzen demnach eine alkalische Reaktion.

2) BaCl_2 reizte bedeutend schwächer, was übrigens seinen Grund darin haben dürfte, daß ich infolge der giftigen Eigenschaften von BaCl_2 relativ schwache Konzentrationen anwenden mußte.

Diese aufgestellten Regeln besitzen aber nur eine relative Bedeutung, weil sie auf dem Verhalten der Mehrzahl der Wurzeln allein basieren.

Es tritt an uns nun die Frage heran: Wie ist denn das abweichende Verhalten der Minderzahl der Wurzeln zu verstehen?

Hier treten uns zahlreiche und verschiedenartige Ausnahmen der eben aufgestellten Regeln entgegen.

Erstens stellt sich das Verhalten der Mehrzahl der Wurzeln zuweilen anormal dar. So wächst z. B. die Mehrzahl gerade weiter oder krümmt sich in der $\pm$ Richtung, obschon sowohl bei höheren als bei niedrigeren Konzentrationen gute und bei gegebenem Stoffe normal gerichtete Krümmungen beobachtet werden. Verhältnismäßig seltener krümmt sich die Mehrzahl der Wurzeln einer Reihe nach der Richtung, welche der normalen geradezu entgegengesetzt ist. So kommen z. B. bei Versuchen mit Säuren und Alkalien negative Krümmungen vor. Auch treten bei Versuchen mit neutralen Salzen, und zwar bei mäßigen Konzentrationen, positive Krümmungen ein. Oder es kommt endlich bei Nichtelektrolyten eine dominierende Krümmungsrichtung zum Vorschein.

Zweitens erscheint die zu erwartende Mehrzahl bisweilen nicht, und die Wurzeln krümmen sich dann nach verschiedenen Richtungen.

Drittens weichen einige Wurzeln von der üblichen Schablone ab, selbst in den günstigsten Fällen, wenn eine sichere Mehrzahl vorhanden ist, und sie wachsen entweder gerade weiter, oder krümmen sich nach irgend einer ungewöhnlichen Richtung.

Viertens ist die Krümmungsrichtung an und für sich oft ungewöhnlich, ganz gleich, ob sie zur dominierenden wird oder nicht. Wie sind z. B. die Krümmungen der intermediären, zwischen $+$ und $-$ liegenden Richtung, also die $\overline{+}$, $\pm$, $+$ Krümmungen aufzufassen? Oder wie sind solche zusammengesetzte Krümmungen zu deuten, wie es $\left\{ \begin{smallmatrix} + \\ - \end{smallmatrix} \right\}$, $\left\{ \begin{smallmatrix} - \\ + \end{smallmatrix} \right\}$, $\left\{ \begin{smallmatrix} + \\ + \end{smallmatrix} \right\}$, $\left\{ \begin{smallmatrix} - \\ - \end{smallmatrix} \right\}$ usw. sind?

Bei der geschilderten Sachlage läßt sich über das Verhalten der *Lupinus*-Wurzeln im großen und ganzen nichts Endgültiges sagen. Die bisher mitgeteilten Versuche reichen offenbar dazu nicht aus. Es mußten noch spezielle Versuche herangezogen werden. Über dieselben soll erst im folgenden Kapitel berichtet werden.

Hier bleibt noch übrig, das Verhalten der *Helianthus*-Wurzeln im Diffusionsstromen kurz zu schildern.

Wie aus Tabelle 45 ersichtlich, wurden positive Krümmungen bei den wachstumshemmenden Konzentrationen einiger Stoffe beobachtet. In dieser Hinsicht stimmt also das Verhalten der *Helianthus*-Wurzeln mit dem der *Lupinus*-Wurzeln überein. Sonst machen sich manche Differenzen bemerkbar. Ausgesprochene negative Krümmungen wurden z. B. nur mit NH_4Br und MgCl_2 beobachtet. Freilich kommen mitunter $\pm$ Krümmungen vor, zumeist aber wachsen die Wurzeln ungestört gerade weiter.

Da im Falle der *Helianthus*-Wurzeln die Zahl der untersuchten Stoffe relativ gering ist, wäre es voreilig, irgend welche allgemeine Schlüsse über die genannte Pflanze zu folgern. Die Gründe, weshalb die *Helianthus*-Wurzeln im engeren Maßstabe untersucht worden sind, werden erst am Schluß des folgenden Kapitels angegeben.

Über die Natur der im Diffusionsstrom an *Lupinus*-Wurzeln auftretenden Krümmungen.

Es wurde oben die Ansicht ausgesprochen, daß die Krümmungen der *Lupinus*-Wurzeln im Diffusionsstrom Wachstumskrümmungen seien.

Dafür sprechen folgende Gründe.

Zunächst geht aus den Messungen der Wurzellänge vor und nach dem Versuch hervor, daß die wachsenden Wurzeln allein krümmungsfähig sind.

Sodann wurde mitunter konstatiert, daß die gekrümmten Wurzeln gewachsen, aber plasmolysiert waren. Derartige Wurzeln, selbst aus dem Agarblock herausgenommen¹⁾, bleiben dennoch gekrümmt. Offenbar liegen hier Krümmungen vor, welche durch Wachstum fixiert worden sind. Demnach darf man sie auch nicht als Variationskrümmungen betrachten.

Bemerkenswert sind endlich Versuche, bei denen die im Agarblock befindlichen Wurzeln gerade geblieben und nicht gewachsen sind, trotzdem aber eine normale Turgeszenz aufweisen. Derartige Wurzeln verfügen also über Mittel, Variationskrümmungen auszuführen; trotzdem bleiben sie gerade. Offenbar handelt es sich beim Krummwerden nicht um den Turgor, sondern ums Wachstum. In der Tat sieht man bei denjenigen niedrigeren Konzentrationen

1) Solange sich die Wurzeln im Agarblock befinden, können die Krümmungen natürlich nicht passiv ausgeglichen werden.

des nämlichen Stoffes, welche den Wurzeln das Wachstum bereits gestatten, auch Krümmungen eintreten.

Aus all dem Gesagten geht hervor, daß die im Diffusionsstrome eintretenden Krümmungen der *Lupinus*-Wurzeln durch ungleichmäßiges Wachstum der opponierten Flanken zustande kommen. So wächst im Falle der positiven Krümmung die hintere Flanke der Wurzel relativ schneller als die vordere. Bei negativen Krümmungen hat die Wachstumsschnelligkeit eine umgekehrte Verteilung. Bei intermediären Krümmungen aber liegt ein ungleichmäßiges Wachstum der Seitenflanken der Wurzel vor. Oben haben wir aber gesehen, daß die *Lupinus*-Wurzeln in der Lage sind, sich im Diffusionsstrome nach den verschiedensten Richtungen hin zu krümmen. Der Diffusionsstrom kann somit eine ungleichmäßige Wachstumsverteilung auf einem beliebigen Paar der opponierten Wurzelflanken hervorrufen.

Es fragt sich nun, wovon dies abhängt. Die Richtung des Diffusionsstromes ist ja überall die gleiche. Sie fällt mit der Fläche der + und — Krümmung zusammen. Augenscheinlich darf man nur diese Krümmungen ohne weiteres als orientierend ansehen. Wie sind dann die intermediären Krümmungen zu verstehen?

Auf den ersten Blick könnten sie als zufällig, also als durch irgendwelche Fehler der Versuchsanstellung verursacht angesehen werden. Solche Vermutung ist jedoch nicht stichhaltig. Meine Versuchsanstellung war stets die gleiche. Der postulierte Einfluß der methodischen Fehler sollte ebenfalls stets zur Geltung kommen. Dennoch krümmten sich Wurzeln in den Versuchen mit Mg- oder Ca-Salzen in einer oft absolut übereinstimmenden Weise.

Man könnte ferner eine andere Vermutung in Erwägung ziehen. Oben habe ich hervorgehoben, daß etwa 25% der in den reinen Agar gepflanzten Wurzeln nutieren. Nehmen wir nun an, das Nutationsbestreben erhalte sich auch dann, wenn die Wurzeln sich in einem von dem Diffusionsstrom durchsetzten Agarblock befinden. Je nach dem, ob und in welchem Grade sich das genannte Bestreben hier erhalten würde, dürfte ein größerer oder kleinerer Prozentsatz der unbestimmten Krümmungen im Sinne der autonomen Nutationen gedeutet werden. Leider wissen wir zurzeit nicht, wie die Verhältnisse tatsächlich liegen. Mit gleichem Recht darf man ja annehmen, daß das Nutationsbestreben unter dem Einfluß des Diffusionsreizes vollständig unterdrückt wäre. Somit kann die postulierte Vermutung zurzeit weder bestätigt noch widerlegt werden. Sie ist daher auch nicht in Betracht zu ziehen.

Wenig wahrscheinlich ist schließlich auch die folgende Vermutung. Als oben die eventuellen Nachteile des Agar besprochen wurden, habe ich betont, daß die geotropische Stimmung der *Lupinus*-Wurzeln trotz ihres Befindens in diesem Medium nicht merklich beeinflußt wird. Nun könnte man aber vermuten, es fände eine derartige Beeinflussung in einem vom Diffusionsstrom durchsetzten Agarblock statt. Dann wären auch die in Rede stehenden unbestimmten Krümmungen als geotropisch anzusehen. Dennoch ist auch diese Vermutung wenig wahrscheinlich. Die $+$ und $-$ Krümmungen erreichen 90° fast niemals, wenngleich der Diffusionsstrom auch unter dem Rechtwinkel auf die Wurzeln einwirkt. Der Krümmungswinkel fällt immer um so ansehnlicher aus, je stärker die Reizwirkung des Stromes ist. Außerdem weisen die einmal im Diffusionsstrom unter einem gewissen Winkel gekrümmten Wurzeln nicht selten an ihren Spitzen noch eine zweite lotrecht nach unten gerichtete Krümmung auf. Derartige Krümmungen lassen sich auch an den Wurzeln beobachten, die in der $+$ Richtung reagiert haben. Nach alledem ist sehr wahrscheinlich, daß die geotropische Stimmung der *Lupinus*-Wurzeln sich auch im Diffusionsstrom unveränderlich erhält.

Sämtliche eben besprochene Vermutungen erwiesen sich also als wenig geeignet, das Wesen der intermediären Krümmungen zu erklären. Bei solcher Sachlage blieb nur die Annahme übrig, daß sämtliche im Diffusionsstrom vorkommende Krümmungen, mag ihre Richtung sein wie sie will, Reaktionen gerade auf den Diffusionsreiz sind. Des weiteren versuche ich nun diese Annahme einer experimentellen Prüfung zu unterziehen. Zu diesem Zwecke wurden 4 Versuchsreihen angestellt, und zwar: 1. Versuche mit geköpften Wurzeln; 2. Versuche über Nachwirkung des Diffusionsreizes; 3. Versuche über die Reiz- und Unterschiedsschwelle bei den Wurzeln, die sich im Diffusionsstrom von $MgCl_2$ befinden; 4. Versuche über den Einfluß der Experimentdauer auf die dabei zu erzielenden Resultate.

Gehen wir jetzt zur Mitteilung all dieser Versuche über.

Versuche mit geköpften Wurzeln.

Diesbezügliche Versuche sind in Tabelle 46 zusammengefaßt. Die Versuchsanstellung wich von der üblichen nur insofern ab, daß in je einer Reihe der in den Agarblock gepflanzten Wurzeln

nur etwa 1—2 der Kontrolle wegen intakt waren, die übrigen dagegen dekapitiert wurden. Die Dekapitation erstreckte sich auf die in der Tabelle angegebene Zahl der Millimeter. In dieser Versuchsreihe wurden folgende Stoffe angewandt: CaCl_2 , MgCl_2 , NaOH , Na_2CO_3 , Na_2SO_4 und Chloralhydrat.

Tabelle 46.

In Vers. 1 u. 5 ist die Dauer d. vorl. Diff. 26 Std., die d. Vers. 27 Std. Temp. 22—24°.						
— 2 u. 3	—	—	24	„	— 24	— 24—28°.
— 7 u. 8	—	—	23	„	— 22	— 15—17 $\frac{1}{2}$ °.
— 4	—	—	22	„	— 24	— 24—27°.
— 6	—	—	29	„	— 24	— 21—22 $\frac{1}{2}$ °.

Nr. des Versuchs	Diffund. Stoff; Ausgangskonzentr. desselben	Dicke des Blocks	Abstand v. d. Ausgangskonz. bis zur Vorderfl. d. Blocks	Konzentration a. d. Vorderflanke der Wurzel	Konzentrations- gefälle auf je 1 mm	Länge der Wurzel vor dem Versuch	Länge der Wurzel nach dem Versuch	Wiev. mm abgeschn. wurde	Resultate
1	0,2 CaCl_2	10	5	0,1	0,02	21	35	0	— 20
						28	49	0	— 40
						27	30	1	0
						30	35	1	+
						27	34	1	+ 45
2	0,2 CaCl_2	28	9	0,136	0,00714	32	51	0	— 30
						33	53	0	— 45
						26	30	1,5	0
						35	42	1,5	—
						35	37	1,5	0
		—	17	0,079	—	41	58	0	— 45
						34	54	0	— 60
						37	45	1,5	0
						36	48	1,5	0
						34	43	1,5	0
3	0,1 MgCl_2	30	9	0,07	0,00333	38	51	0	— 10
						26	43	0	— 45
						40	45	1,5	—
						40	43	1,5	0
						27	27	1,5	0
		—	18	0,04	—	40	61	0	— 50
						40	57	0	— 60
						40	51	1,5	0
						36	37	1,5	0
						29	38	1,5	0
4	0,04 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	10	5	0,02	0,004	26	32	0	+ 70
						33	44	0	+ 40

Nr. des Versuchs	Diffund. Stoff; Ausgangskonzentr. desselben	Dicke des Blocks	Abstand v. d. Ausgangskonz. bis zur Vorderfl. d. Wurzel	Konzentration a. d. Vorderflanke der Wurzel	Konzentrations- gefälle auf je 1 mm	Länge der Wurzel vor dem Versuch	Länge der Wurzel nach dem Versuch	Wiev. mm abgeschnitten, wurde	Resultate
4	0,04 (NH ₄) ₂ SO ₄	10	5	0,02	0,004	36	39	1	+ 25
						34	36	1	+ 30
						37	40	1	+ 20
5	0,01 Chloral- hydrat	10	5	0,005	0,001	26	40	0	+ 10
						25	41	0	{ -
						30	43	1	+ 20
						34	50	1	+ 20
6	0,03 Na ₂ CO ₃	30	10	0,02	0,001	34	43	0	+ 45
						30	36	1	+ 10
						26	32	1	+
						24	28	2	0
						31	35	2	0
		—	20	0,01	—	37	47	0	+ 50
						34	51	1	+ 50
						32	43	1	+
						32	37	2	— 10
						31	35	2	0
						33	45	0	+ 40
						35	45	0	+ 70
						41	56	1	+ 30
						38	51	1	+ 45
						35	42	1	+ 30
7	0,01 Na ₂ CO ₃	30	10	0,0066	0,000333	40	53	0	+ 45
						39	52	0	+ 60
						42	60	1	+ 20
						43	65	1	+ 20
						42	61	1	+ 20
		—	20	0,0033	—	43	51	0	+ 60
						38	48	0	+ 70
						28	42	1	+ 10
						37	47	1	+ 20
						33	43	1	+ 30
						40	59	0	0
						36	48	0	+ 60
						30	51	1	+ 20
						42	63	1	+ 20
						37	50	1	0
8	0,1 NaOH	30	10	0,0066	0,000333	43	51	0	+ 60
						38	48	0	+ 70
						28	42	1	+ 10
						37	47	1	+ 20
						33	43	1	+ 30
		—	20	0,0033	—	40	59	0	0
						36	48	0	+ 60
						30	51	1	+ 20
						42	63	1	+ 20
						37	50	1	+ 40

Auf Grund der in Tabelle 46 mitgeteilten Versuche lassen sich folgende Schlüsse ziehen.

Versuche Nr. 2 und 3 weisen darauf hin, daß ohne Wurzelspitze negative Krümmungen nicht zustande kommen.

Versuche Nr. 4—8 lehren, daß positive Krümmungen auch an den um 1 mm dekapitierten Wurzeln vorkommen. Da die Versuche Nr. 4 und 5 einerseits und Nr. 6—8 andererseits identische Resultate ergaben, so sind die in beiden Fällen, d. h. unter dem Einfluß sowohl der hohen Konzentrationen als auch der OH' -Ionen, vorkommenden positiven Krümmungen von gleicher Natur.

Besonders lehrreich ist der Versuch Nr. 1. Er zeigt, daß, indem intakte Wurzeln sich unter dem Einfluß von CaCl_2 negativ krümmen, die um 1 mm dekapitierten schon positive Krümmungen aufweisen.

Zwar ist die Zahl meiner mit geköpften Wurzeln angestellten Versuche gering. Ich habe mich aber auf dieselbe deshalb beschränkt, weil die dadurch gelieferten Resultate mit denen der betr. Versuche von Sammet, Lilienfeld und Cholodnyi recht gut übereinstimmen.

Sammet und Lilienfeld beobachteten positive Krümmungen auch an den dekapitierten Wurzeln. Cholodnyi ist der Meinung, daß positive Krümmungen an den Wurzeln auftreten, wenn ihre Wachstumsregion allein gereizt wird. Insofern es sich also um die positiven Krümmungen handelt, sind wir alle darüber einig, daß solche Krümmungen auch ohne Wurzelspitze zustande kommen können.

Was nun negative Krümmungen anbelangt, so bestätigen meine Versuche mit Dekapitation diejenigen Experimente Cholodnyis, worin die Wurzelspitze allein gereizt wurde. Für das Zustandekommen der negativen Krümmungen ist daher notwendig, daß die Wurzelspitze vorhanden ist¹⁾.

1) Zwar fand Lilienfeld, daß unter dem Einfluß des Diffusionsstromes von NaCl auch die um 1—2 mm dekapitierten Wurzeln sich negativ krümmten. Allein es wird dabei nicht mitgeteilt, ob eingetretene Krümmungen normal stark oder schwächer ausgefallen sind. Im letzteren Fall wäre es denkbar, daß das Perzeptionsvermögen sich nicht streng auf die Spitze beschränkt, sondern auch z. T. in der Wachstumszone lokalisiert ist. Von diesem Standpunkt aus dürften vereinzelte negative Krümmungen der dekapitierten Wurzeln in meinen Versuchen eine ungezwungene Erklärung finden.

Versuche über die Nachwirkung des Diffusionsreizes.

An die Anstellung der fraglichen Versuche bin ich erst vor kurzem herangetreten. Zurzeit verfüge ich nur über 4 derartige Versuche. Dieselben sind in Tabelle 47 zusammengefaßt.

Durch diese Versuche war ich bestrebt, zwei Fragen zu lösen. Und zwar, ob sich der Aufenthalt der Wurzeln im Diffusionsstrom durch irgend welche Nachwirkungen kundgibt? Und ferner, ob unter Anwendung sowohl positive wie negative Krümmungen hervorrufer Stoffe eventuelle Nachwirkungen mit gleicher Prägnanz eintreten?

Die Versuche wurden in üblicher Weise angestellt. Aus jeder Reihe befand sich ein Teil der Wurzeln im Agarblock bis zu Ende des Versuches, um die krümmende Wirkung des Stromes zu kontrollieren. Die übrigen Wurzeln wurden dagegen nach Verlauf des in Tabelle angegebenen Zeitraumes¹⁾ in reinen Agar²⁾ übertragen. Mit den übertragenen Wurzeln verfuhr ich weiterhin auf zweierlei Weise.

In den Versuchen Nr. 1 und 2 ließ ich das Gefäß mit diesen Wurzeln auf dem Klinostat um die horizontale Achse rotieren. Die Dauer der Rotation ist in Tabelle angegeben, die Dauer einer Drehung betrug 2 Minuten.

In den Versuchen Nr. 3 und 4 blieb das Gefäß mit den in reinen Agar übertragenen Wurzeln ruhig in normaler Lage.

Um die Krümmungsrichtung der übertragenen Wurzeln in Beziehung zur Richtung des Diffusionsstromes bringen zu können, bezeichnete ich mit Tinte vor dem Übertragen der Wurzeln ihre Vorderflanke.

Wie aus der umstehend angeführten Tabelle 47 folgt, treten die positiven Krümmungen als Nachwirkung nicht ein, wohl aber die negativen, obzwar nur nach dem Eliminieren des Schwerereizes.

Bemerkenswert ist der Versuch Nr. 2. Er zeigt, daß eine S-förmige $\left\{ \begin{smallmatrix} - \\ + \end{smallmatrix} \right.$ Krümmung nicht auf einmal entsteht. In der Tat tritt zunächst eine negative Krümmung ein und erst später geht sie z. T. in eine positive über.

Ich messe den in diesem Abschnitt mitgeteilten Resultaten einen definitiven Wert nicht bei. Ich sehe sie einstweilen lediglich als vorläufig an.

1) Derselbe war selbstverständlich kürzer als die betr. Reaktionszeit.

2) Natürlich der üblichen Konzentration.

Tabelle 47.

In Vers. 1 ist die Dauer der vorl. Diff. 47 Std., die des Vers. 24 Std. Temp. 15—19°.

— 2	—	—	48 „	—	28 „	—	15—17½°.
— 3	—	—	27 „	—	22 „	—	22—24°.
— 4	—	—	24 „	—	29 „	—	17½—20½°.

Nr. des Versuchs	Diffund. Stoff; Ausgangskonzentr. desselben	Dicke des Blocks	Abstand v. d. Aus- gangskonz. bis zur Vorderl. d. Wurzel	Konzentration a. d. Vorderflanke der Wurzel	Konzentrations- gefälle auf je 1 mm	Länge d. Wurzel vor dem Versuch	Länge d. Wurzel nach dem Versuch	Wieviel Stunden sich die Wurzeln im Block befanden	Resultate	
1	0,0152 NaOH	38	10	0,0112	0,0004	21	33	24	}	0
						23	35	8		16 0
		—	20	0,0072	—	24	37	8	}	Stund. 0
						24	34	24		+ 60
		—	31	0,0028	—	25	42	8	}	auf 0
						28	46	8		dem 0
						27	45	24	}	+ 25
						25	49	8		Klino- 0
						27	53	8		stat 0
										{—
2	0,08 MgCl ₂	37	8	0,062	0,00217	30	36	28	}	{+ — 20
						24	42	8		— 30
		—	18	0,04	—	24	38	8	}	Stund. — 40
						27	44	8		auf — 10
		—	28	0,02	—	36	58	8	}	dem 0
						26	43	28		— 30
						26	51	8	}	Klino- 0
						27	50	8		stat 0
3	0,05 MgCl ₂	29	10	0,0323	0,0017	22	43	22	}	— 15
						25	42	22		? 0
		—	20	0,0154	—	30	64	3	}	0
						36	53	3		0
						30	59	3		0
						24	42	22		— 20
						24	49	22		0
						34	58	3		0
						33	60	3		0
						34	57	3		0
4	0,01 MgCl ₂	20	10	0,005	0,001	46	70	29	}	— 40
						40	62	29		+ 20
		—	—	—	—	29	54	29	}	— 10
						30	53	29		— 30
										Nach 7
						40	67	4		0
						38	65	4		0
						35	64	4		0
						36	61	4		0
						33	60	4		0
						38	66	7		0
						32	52	7		0
						37	65	7		0
						35	55	7		0
						38	60	7		0
										29 Std.
										+ 10
										+ 10
										+ 20
										— 10
										+ 10
										+ 10
										— 10
										0

Versuche zur Feststellung der Reiz-
und Unterschiedsschwelle bei den *Lupinus*-Wurzeln, die
sich im Diffusionsstrom von $MgCl_2$ befinden.

Die zuletzt festgestellte Tatsache, daß negative Krümmungen sich als Nachwirkung erzielen lassen und von dem Vorhandensein der Spitze abhängig sind, ließ schon vermuten, daß diese Krümmungen durch Reiz hervorgerufen seien, daß also hier eine tropistische Reaktion vorliege. Um die Richtigkeit dieser Vermutung zu prüfen, stellte ich eine Reihe der oben charakterisierten Versuche an. Kurz, es handelte sich dabei um die Prüfung, ob das Webersche Gesetz¹⁾ auch hier Geltung habe.

Meine in dieser Richtung angestellten Versuche sind in Tabelle 48 zusammengefaßt. Die ersten 5 Versuche stellen die Reizschwelle fest; sie wurden nach der üblichen Methode angestellt. Die übrigen 37 Versuche hatten den Zweck, die Schwelle der Unterschiedsempfindlichkeit für Konzentrationsdifferenzen festzustellen. Die Anstellung dieser Versuche wich von der üblichen nur insofern ab, daß hier in der hinteren Höhlung das Wasser ebenfalls durch eine Lösung von $MgCl_2$ ersetzt wurde; die Konzentration der letzteren war aber niedriger als die der Vorderhöhlung. Die Konzentrationen in beiden Höhlungen sind nun in der Kolonne der Ausgangskonzentrationen angegeben, und zwar bezieht sich die obere von je 2 mit einer Parenthese umschlossenen Ziffern auf die vordere Höhlung, die untere dagegen auf die hintere Höhlung (vgl. Tab. 48).

Stellen wir nun tabellarisch (vgl. Tab. 49, S. 374) diejenigen Versuche zusammen, bei denen der Reiz die Schwelle überschreitet, d. h. wo bei minimalem Reiz schon bei der Mehrzahl der Wurzeln eine kaum merkliche Reaktion zutage tritt. Häufig geben die vorliegenden Versuche nur Grenzen an, zwischen denen die fragliche Schwelle liegt. In diesen Fällen nehme ich der Genauigkeit halber an, daß die Schwelle bei den Bedingungen liegt, die den Mittelwert der Bedingungen von zwei betr. Versuchen darstellen. So ist z. B. im Versuche Nr. 2 die Reaktion bereits deutlich ausgeprägt, im Versuch Nr. 3 bezieht sie sich dagegen nur auf die Minderzahl der Wurzeln. In diesem Falle nehme ich an, daß die Reizschwelle unter den Bedingungen liegt, welche die Mitte aus den Bedingungen von Versuch Nr. 2 und 3 vorstellen.

1) Bekanntlich reguliert dasselbe die Beziehung zwischen Reizintensität und Erregung auch bei anderen Orientierungsbewegungen.

Tabelle 48. $MgCl_2$.

In Vers. 1 u. 2	ist d. Dauer d. vorl. Diff. 26 St., die d. Vers. 21 St.	Temp. 22—24°.
— 3, 13, 14, 20, 26	— 24 „	— 24 „ — 20 $\frac{1}{2}$ —22°.
— 4—7, 39	— 26 „	— 24 „ — 20—24°.
— 8—12, 15—17, 23, 24	— 30 „	— 23 „ — 16—19°.
— 18, 19, 21, 22, 25, } 27—31, 38, 40—42 }	— 24 „	— 24 „ — 19—20°.
— 32—37,	— 27 „	— 22 „ — 17 $\frac{1}{2}$ —20 $\frac{1}{2}$ °.

Nr. des Versuchs	Ausgangskonzentrationen	Dieke des Blocks	Abst. v. d. höh. Ausgangskonz. bis zur Vorderfl. d. Wurzel	Konzentration a. d. Vorderflanke der Wurzel	Konzentrationsgefälle auf je 1 mm	Anz. d. Wurz. i. ein. Reihe	Mittlerer Zuwachs der Wurzeln in %	Resultate
1	0,002	10	5	0,001	0,0002	5	42	— 25; $\overline{+}$ 15; 3 = — 10
2	0,001	10	5	0,0005	0,0001	5	61	— 20; — 35; $\overline{+}$ 40; 2 = — 30
3	0,00075	10	5	0,000375	0,000075	5	100	— 15; — 25; 3 = 0
4	0,0005	10	5	0,00025	0,00005	5	79	$\overline{+}$ 20; $\left\{ \begin{smallmatrix} - \\ + \end{smallmatrix} \right\}$; 3 = 0
5	0,00025	10	5	0,000125	0,000025	5	72	—; $\pm$ 20; $\pm$ 10; 2 = 0
6	$\left\{ \begin{smallmatrix} 0,005 \\ 0,0005 \end{smallmatrix} \right\}$	10	5	0,00275	0,00045	5	56	— 15; 4 = — 10
7	$\left\{ \begin{smallmatrix} 0,0025 \\ 0,0005 \end{smallmatrix} \right\}$	8	4	0,0015	0,00025	5	50	$\overline{+}$ 20; — 20; — 30; 2 = — 10
8	$\left\{ \begin{smallmatrix} 0,002 \\ 0,0005 \end{smallmatrix} \right\}$	10	5	0,00125	0,00015	6	59	— 50; — 20; — 35; $\left\{ \begin{smallmatrix} + 10 \\ - 30 \end{smallmatrix} \right\}$; 2 = $\overline{+}$ 30
9	$\left\{ \begin{smallmatrix} 0,0015 \\ 0,0005 \end{smallmatrix} \right\}$	10	5	0,001	0,0001	6	76	$\overline{+}$ 15; — 15; — 35; 3 = — 10
10	$\left\{ \begin{smallmatrix} 0,001 \\ 0,0005 \end{smallmatrix} \right\}$	10	5	0,00075	0,00005	6	74	4 = — 15; $\left\{ \begin{smallmatrix} - 10 \\ - 30 \end{smallmatrix} \right\}$; $\left\{ \begin{smallmatrix} - 10 \\ - 20 \end{smallmatrix} \right\}$
11	$\left\{ \begin{smallmatrix} 0,00075 \\ 0,0005 \end{smallmatrix} \right\}$	10	5	0,000625	0,000025	6	82	0; $\overline{+}$ 25; 2 = — 15; 2 = — 10
12	$\left\{ \begin{smallmatrix} 0,0006 \\ 0,0005 \end{smallmatrix} \right\}$	10	5	0,00055	0,00001	6	72	— 10; $\overline{+}$ 20; $\pm$ 10; $\left\{ \begin{smallmatrix} - 10 \\ - 10 \end{smallmatrix} \right\}$; 2 = 0
13	$\left\{ \begin{smallmatrix} 0,0035 \\ 0,00075 \end{smallmatrix} \right\}$	10	5	0,004125	0,000275	5	77	—; — 15; — 25; $\overline{+}$ 35; — 40
14	$\left\{ \begin{smallmatrix} 0,0025 \\ 0,00075 \end{smallmatrix} \right\}$	10	5	0,001625	0,000175	5	80	— 10; — 15; — 20; 2 = 0
15	$\left\{ \begin{smallmatrix} 0,002 \\ 0,00075 \end{smallmatrix} \right\}$	10	5	0,001375	0,000125	6	63	0; — 20; — 25; — 30; — 35; + 40
16	$\left\{ \begin{smallmatrix} 0,0015 \\ 0,00075 \end{smallmatrix} \right\}$	10	5	0,001125	0,000075	6	62	0; — 20; — 30; — 40; $\left\{ \begin{smallmatrix} - 10 \\ - 30 \end{smallmatrix} \right\}$; $\left\{ \begin{smallmatrix} - 10 \\ - 20 \end{smallmatrix} \right\}$
17	$\left\{ \begin{smallmatrix} 0,001 \\ 0,00075 \end{smallmatrix} \right\}$	10	5	0,000875	0,000025	6	75	$\pm$ 10; $\overline{+}$ 10; $\overline{+}$ 40; $\pm$ 25; 2 = — 25
18	$\left\{ \begin{smallmatrix} 0,005 \\ 0,001 \end{smallmatrix} \right\}$	10	5	0,003	0,0004	5	76	0; — 25; — 35; 2 = — 30
19	$\left\{ \begin{smallmatrix} 0,004 \\ 0,001 \end{smallmatrix} \right\}$	10	5	0,0025	0,0003	5	78	0; — 20; — 30; 2 = — 10

Nr. des Versuchs	Ausgangskonzentrationen	Dicke des Blocks	Abst. v. d. höh. Ausgangskonz. bis zur Vorderfl. d. Wurzel	Konzentration a. d. Vorderflanke der Wurzel	Konzentrationsgefälle auf je 1 mm	Anz. d. Wurz. i. ein. Reihe	Mittlerer Zuwachs der Wurzeln in %	Resultate
20	0,0035 0,001	10	5	0,00225	0,00025	5	77	— 15; — 40; $\left\{ \begin{smallmatrix} + \\ -20 \end{smallmatrix} \right\}$; 2 = 0;
21	0,003 0,001	10	5	0,002	0,0002	5	73	— 25; 0; 2 = —; $\overline{+}$ 35
22	0,002 0,001	10	5	0,0015	0,0001	5	100	+ 10; — 20; — 25; 2 = — 30
23	0,0015 0,001	10	5	0,00125	0,00005	6	65	+ 20; — 10; — 25; 2 = 0
24	0,00125 0,001	10	5	0,001125	0,000025	6	60	4 = 0; — 20; $\pm$ 40
25	0,008 0,002	10	5	0,005	0,0006	5	63	$\pm$ 30; 0; — 40; — 20; $\left\{ \begin{smallmatrix} \pm \\ -20 \end{smallmatrix} \right\}$
26	0,007 0,002	10	5	0,0045	0,0005	5	57	0; —; — 30; — 25; — 15
27	0,006 0,002	10	5	0,004	0,0004	5	68	— 20; — 30; $\left\{ \begin{smallmatrix} + \\ -35 \end{smallmatrix} \right\}$; 2 = — 10
28	0,005 0,002	10	5	0,0035	0,0003	5	65	— 10; — 15; — 25; 2 = — 30
29	0,004 0,002	10	5	0,003	0,0002	5	76	0; — 20; — 30; 2 = — 10
30	0,003 0,002	10	5	0,0025	0,0001	5	77	$\overline{+}$ 25; — 10; $\pm$; — 20; $\left\{ \begin{smallmatrix} -10 \\ -10 \end{smallmatrix} \right\}$
31	0,0025 0,002	10	5	0,00225	0,00005	5	94	3 = 0; $\pm$; $\overline{+}$ 20
32	0,015 0,005	10	5	0,01	0,001	5	30	+ 30; $\overline{+}$ 40; 2 = $\left\{ \begin{smallmatrix} -10 \\ -30 \end{smallmatrix} \right\}$; $\left\{ \begin{smallmatrix} -10 \\ +40 \end{smallmatrix} \right\}$
33	0,01 0,005	10	5	0,0075	0,0005	5	31	— 15; — 20; — 30; 2 = — 40
34	0,009 0,005	10	5	0,007	0,0004	5	40	3 = —; — 30; $\pm$
35	0,008 0,005	10	5	0,0065	0,0003	5	32	0; $\pm$; — 10; — 20; — 25
36	0,007 0,005	10	5	0,006	0,0002	5	41	2 = 0; 2 = $\overline{+}$; 1 = ? —
37	0,006 0,005	10	5	0,0055	0,0001	5	29	2 = 0; + 35; — 15; $\pm$ 30
38	0,0214 0,01	10	5	0,0157	0,00114	5	35	$\pm$ 30; 2 = — 20; —; $\left\{ \begin{smallmatrix} -10 \\ -40 \end{smallmatrix} \right\}$
39	0,02 0,01	10	5	0,015	0,001	5	33	— 25; — 30; — 35; — 40; — 50
40	0,0175 0,01	10	5	0,01375	0,00075	5	43	— 20; — 25; — 30; $\overline{+}$ 30; $\overline{+}$ 40
41	0,015 0,01	10	5	0,0125	0,0005	5	54	— 45; ? —; 3 = — 30
42	0,0125 0,01	10	5	0,01125	0,00025	5	43	0; ? —; — 20; $\overline{+}$; $\left\{ \begin{smallmatrix} -20 \\ + \end{smallmatrix} \right\}$

Tabelle 49.

Nr. des Versuchs aus Tabelle 48	Ausgangs- konzentrationen	Konzentration a. d. Vorderflanke der Wurzel	Konzentration a. d. Hinterflanke der Wurzel	Differenz der an der Vorder- und Hinterflanke der Wurzeln vor- hand. Konzent.	Verhältnis dieser Differenz zur Konzentration a. d. Hinterflanke der Wurzel
2					
3	0,000875	0,0004375	0,00035	0,0000875	0,25
12	{ 0,0006 0,0005	0,00055	0,00054	0,00001	0,0186
17	{ 0,001 0,00075	0,000875	0,00085	0,000025	0,0294
{ 23	{ 0,001375	0,0011875	0,00115	0,0000375	0,0326
{ 24	{ 0,001				
{ 30	{ 0,00275	0,002375	0,0023	0,000075	0,0326
{ 31	{ 0,002				
36	{ 0,007 0,005	0,006	0,0058	0,0002	0,0345
42	{ 0,0125 0,01	0,01125	0,011	0,00025	0,0227

Auf Grund der Tabellen 48 und 49 komme ich zum folgenden Schluß.

Führen wir eine Wurzel in den Agarblock ein, so kommt und bleibt die vordere und hintere Flanke mit den verschiedenen Konzentrationen in Berührung. Die Vorderflanke wird von einer höheren Konzentration berührt und daher stärker gereizt als die Hinterflanke. Je höher dabei *caeteris paribus* die Konzentrationsdifferenz ist, desto kräftiger fällt auch die Reizung aus.

Es fragt sich nun, ob das Webersche Gesetz, insofern es die Intensitäten von Reiz und Erregung zueinander in Beziehung bringt, auch für diesen Fall gültig ist.

Das Webersche Gesetz sagt bekanntlich, daß der Reizzuwachs, mag er (innerhalb bestimmter Grenzen natürlich) absolut so groß sein wie er will, nur dann als eine die Reaktion hervorrufende Erregung empfunden wird, wenn er in einer bestimmten minimalen Beziehung zum bereits vorhandenen Reiz steht. Blicken wir von diesem Standpunkt aus auf unsere Verhältnisse.

Wie aus Tabelle 49 ersichtlich, nehmen die Differenzen der an den gegenüberliegenden Wurzelflanken befindlichen Konzentrationen immer zu. Die absoluten Größen des Reizzuwachses steigen somit allmählich bei den sukzessiven Versuchen. Anders

verhält es sich mit der Erregung. Für sie ist die relative Reizgröße maßgebend, und eben sie ist überall gleich stark. In der Tat, sieht man von dem Versuch Nr. 2 und 3 der letzten Tabelle ab¹⁾, so schwankt überall das Verhältnis der Differenz der an den gegenüberliegenden Wurzelflanken befindlichen Konzentrationen zu der an der Hinterflanke herrschenden Konzentration ziemlich nahe um den Mittelwert 0,0284. Dieser Wert ist nun als die Schwelle der Unterschiedsempfindlichkeit der *Lupinus*-Wurzeln für Konzentrationsdifferenzen von $MgCl_2$ zu betrachten. Hat also der Konzentrationszuwachs einen bestimmten minimalen (0,0284) Bruchteil der Konzentration erreicht, welche die hintere gleichsam vergleichende Wurzelflanke reizt, so ist die Unterschiedsschwelle überschritten und es tritt eine kaum merkliche, der Reizschwelle entsprechende Reaktion ein.

Wir sehen also, daß das Webersche Gesetz auch für negative durch den Diffusionsstrom von $MgCl_2$ hervorgerufene Krümmungen gültig ist.

Über den Einfluß

der Dauer des Versuchs auf die Resultate desselben.

Die übliche Dauer meiner Versuche betrug 24 Stunden. Da sie aber gewissermaßen willkürlich gewählt wurde, so lag die Gefahr nahe, daß auch das Verhalten der Wurzeln, welches nach 24 Stunden konstatiert wurde, sich als zufällig erweisen dürfte.

Es wäre ja denkbar, daß die Empfindlichkeit einzelner Wurzeln der Reizwirkung des Diffusionsstromes gegenüber ungleich sein könnte. Bei empfindlicheren Wurzeln dürfte dann die Reaktion sowohl früher eintreten wie auch schneller verlaufen, als dies bei den weniger empfindlichen Wurzeln der Fall wäre.

Ferner ist die Möglichkeit nicht ausgeschlossen, daß die einmal eingetretenen Krümmungen sich dann entweder völlig ausgleichen, oder ihre ursprüngliche Richtung ändern.

Ob die aufgestellten Möglichkeiten richtig seien, konnten nur Versuche entscheiden. Es waren also Versuche notwendig: 1. über die Reaktionszeit und 2. über die Stabilität der einmal eingetretenen Reaktion der Wurzeln.

1) Was auch gewissermaßen gerechtfertigt wäre, insofern in Versuchen Nr. 14—16 der Tabelle 50 negative Krümmungen bereits bei den viel niedrigeren Konzentrationen beobachtet wurden.

Bereits bei der Anstellung der in den ersten 44 Tabellen angeführten Versuche verfolgte ich von Zeit zu Zeit das Verhalten der Wurzeln. In der meisten Fällen waren aber nach 5, 7, sogar 10 Stunden keine Spuren von Krummwerden zu sehen. Nur hie und da, namentlich wenn die reizende Konzentration hoch, der Agarblock dagegen dünn war, beobachtete ich positive Krümmungen schon nach 5–9 Stunden. Desgleichen erwies sich die Reaktionszeit etwas kürzer auch im Diffusionsstrom von Salzlösungen mit zweiwertigen Kationen.

Diese inzwischen gemachten Beobachtungen reichten natürlich nicht aus, um eine Lösung der aufgestellten Fragen zu ermöglichen. Deswegen stellte ich eine Reihe von speziellen Versuchen mit MgCl_2 an. Diese Versuche sind nun in Tabelle 50 zusammengefaßt. Indem ich sowohl die Höhe der Ausgangskonzentration wie auch die Dicke des Agarblocks verschiedentlich variierte, war ich bestrebt, die Bedingungen eines möglichst starken Reizes zu schaffen, woraus sich voraussichtlich auch eine kürzere Reaktionszeit ergeben dürfte.

Auf Grund der in Tabelle 50 angeführten Ergebnisse komme ich zu den folgenden Schlüssen.

1. Ist die Konzentration MgCl_2 stark genug, der Agarblock dagegen hinreichend dünn, so kommen schon 2–3 Stunden nach dem Beginn des Versuches die ersten Spuren einer negativen Krümmung zum Vorschein. Unter weniger günstigen Bedingungen (und zwar bei niedrigerer Konzentration und dickerem Agarblock) steigt die Reaktionszeit auf 4, 5 und mehr Stunden.

2. Aus den Versuchen Nr. 12–16 folgt, daß eine doppelte Versuchsdauer die nach 24 Stunden konstatierten Resultate wesentlich nicht modifiziert. Die Krümmungsrichtung bleibt immer negativ; nur das treppenförmige Aussehen des gekrümmten Wurzelteiles weist darauf hin, daß hier ein Kampf zwischen dem Geotropismus und dem Diffusionsreiz stattgefunden hat.

3. Mehrere Versuche zeigen, wie eine anfangs negative Krümmung, häufig über das intermediäre $\pm$ Stadium, zum Ende des Versuches in eine positive umgewandelt wird.

4. Das Ausgleichen der einmal eingetretenen Krümmung wurde nicht beobachtet.

Die gefolgerten Schlüsse basieren auf den makroskopischen Beobachtungen.

Tabelle 50.

In Vers. 1—6 ist die Dauer d. vorl. Diff. 23 Std., die d. Vers. 24 Std. Temp. 16—19°.
 — 7—11 — — 20 „ — 25 „ — 14—17 $\frac{1}{2}$ °.
 — 12—16 — — 20 „ — 51 „ — 15 $\frac{1}{2}$ —18°.

Nr. des Versuchs	Ausgangskonzentration	Dicke des Blocks		Abst. v. d. Ausgangskonz. bis z. Vorderfl. d. Wurz.	Konzentration a. d. Vorderflanke der Wurzel	Konzentrationsgefälle auf je 1 mm	Länge der Wurzel vor dem Versuch	Länge der Wurzel nach dem Versuch	Resultate				
									nach Stunden:				
									4	6	8	24	
1	0,1	37	18	0,051	0,0027	43	58	—	—	—	— 40		
						37	55	0	—	—	— 40		
						32	50	0	—	—	— 30		
						35	52	0	—	—	— 40		
2	0,1	30	15	0,05	0,00333	46	58	—	—	—	— 35		
						40	50	0	—	—	— 40		
						43	58	0	0	—	— 30		
						38	50	0	—	—	— 50		
3	0,1	21	8	0,061	0,00476	37	47	—	—	—	+ 30		
						32	41	0	?	—	+ 10		
						24	33	0	?	?	+ 15		
						40	50	0	?	?	+ 20		
4	0,05	40	19	0,0262	0,00125	35	52	0	0	0	0		
						41	59	0	0	—	— 40		
						40	57	0	0	—	— 20		
						35	49	0	0	—	+ 40		
5	0,05	29	13	0,0276	0,0017	33	48	—	—	— 20	?—		
						38	43	—	—	— 30	— 60		
						38	43	—	—	— 20	— 60		
						40	55	—	—	— 25	— 60		
6	0,05	21	8	0,031	0,0024	36	52	—	—	— 20	— 50		
						37	52	—	—	— 15	— 15		
						40	54	—	—	— 30	— 50		
						40	55	0	0	— 20	— 50		
7	0,05	18	10	0,022	0,00278	25	35	0	—	—	— 20	— 20	— 60
						37	46	0	—	—	— 20	— 30	— 60
						37	42	0	—	—	— 10	— 20	— 55
						2	3	5 $\frac{1}{2}$	7 $\frac{1}{4}$	9 $\frac{1}{2}$	25		
8	0,05	10	4	0,03	0,005	34	40	0	—	—	— 20	— 30	— 70
						33	40	0	—	—	—	—	?
						29	32	0	—	—	— 20	— 30	{ + 70

Fortsetzung der Tabelle 50.

Nr. des Versuchs	Ausgangskonzentration	Dicke des Blocks	Abst. v. d. Ausgangskonz. bis z. Vorderfl. d. Wurz.	Konzentration a. d. Vorderflanke der Wurzel	Konzentrationsgefälle auf je 1 mm	Länge der Wurzel vor dem Versuch	Länge der Wurzel nach dem Versuch	Resultate						
								nach Stunden:						
								2	3	5 1/2	7 1/4	9 1/2	25	
8	0,05	10	4	0,03	0,005	30	34	0	—	—	—	—	?	+
						45	50	0	—	—	—20	—30	—50	
						1	2 1/2	5	6 1/2	8 1/2	24			
9	0,05	10	4	0,03	0,005	35	43	0	—	—20	—20	—20	—50	
						35	41	0	—	—20	—20	—20	+ 75	
						33	46	0	—	—10	—20	—20	—40	
10	0,05	6	2,5	0,029	0,00833			2	3	5 1/2	7 1/4	9 1/2	25	
						30	33	0	—	+	+	+	+ 40	
						29	35	0	—	—	?	+	+ 40	
						34	35	0	—	—	?	+	+ 45	
						36	40	0	—	—	?	+	+ 90	
11	0,05	6	2	0,033	0,00833			1	2 1/2	5	6 1/2	8 1/2	24	
						29	35	0	—	—15	—20	+	+ 90	
						31	37	0	—	—20	—20	+	+ 60	
12	0,005	10	5	0,0025	0,0005	5 Wurzeln		3	6 1/2	9	24	51	Die Krümmungen sind nur treppenförmig geworden	
								0	—15	—30	—60			
								0	—15	—40	—60			
								0	—20	—30	—60			
								0	—15	—40	—60			
								0	—20	—40	—60			
								0	—20	—40	—60			
13	0,005	6	3	0,0025	0,000833	5 Wurzeln		0	0	0	—10	—10		
								0	0	0	+ 20	+ 20		
								0	0	0	—10	—10		
								0	0	0	0	0		
								0	0	0	+ 20	+ 20		
								4	8	10	24	51		
14	0,00005	20	10	0,000025	0,0000025	3 Wurz.		0	0	+	+ 50	Die Krümmungen sind nur treppenförmig geworden		
								0	0	0	+ 50			
								0	0	0	—30			
15	0,00005	10	5	0,000025	0,000005	3 Wurz.		0	—	—20	—60			
								0	0	0	+ 60			
								0	—	—15	—60			
16	0,00005	6	3	0,000025	0,0000083	3 Wurz.		0	0	0	—20	Die Krümmungen sind nur treppenförmig geworden		
								0	0	0	—			
								0	0	0	—			

Es schien mir wünschenswert, das Verhalten der Wurzeln in den ersten Stunden des Versuches mit einem Horizontalmikroskop zu verfolgen. Auf diese Weise ließe sich vermutlich die Frage beantworten, ob etwa die Krümmung nicht noch früher, als oben konstatiert wurde, beginne, sowie ob ephemere (d. h. nachher sich ausgleichende) Krümmungen stattfinden. Meine diesbezüglichen mikroskopischen Beobachtungen habe ich in Tabelle 51 zusammengefaßt.

Tabelle 51.

Ein Teilstrich des Okularmikrometers = 0,06 mm.

Sämtliche Versuche sind bei 16—19° C. ausgeführt. — Die Dauer der einzelnen Versuche ist in der Rubrik der Resultate angegeben.

Nr. des Versuchs	Dauer d. vorl. Diff.	Diffund. Stoff; Ausgangskonzentr. desselben	Dicke des Blocks	Abst. v. d. Ausgangskonz. bis z. Vorderl. d. Wurz.	Konzentration a. d. Vorderflanke der Wurzel	Konzentrations- gefälle auf je 1 mm	Resultate			
1	22	0,04 H_3BO_3	10	5	0,02	0,004	Nach —	30 Min.	0	
							1 Std.	10 „	+ 2	Teilstriche
							1 „	40 „	+ 7	„
							2 „	10 „	+ 8	„
							2 „	40 „	+ 9	„
							3 „	40 „	+ 9	„
							23 „	—	+ 30	Grad
2	24	0,02 H_3BO_3	10	5	0,01	0,002	Nach 3 Std.	45 Min.	0	
							5 „	45 „	0	
							24 „	—	0	
3	22	0,005 H_3BO_3	10	5	0,0025	0,0005	Nach —	15 Min.	0	
							—	30 „	0	
							1 Std.	—	+ 1	Teilstrich
							1 „	45 „	+ 2,5	„
							4 „	15 „	+ 7	„
							19 „	—	0	(Bedeutender Zuwachs)
4	22	0,005 H_3BO_3	10	5	0,0025	0,0005	Nach —	30 Min.	0	
							1 Std.	—	0	
							1 „	30 „	0	(Deutlicher Zuwachs)
							2 „	—	0	
							2 „	30 „	0	
							3 „	—	0	
							3 „	30 „	0	
							5 „	—	0	

Fortsetzung der Tabelle 51.

Nr. des Versuchs	Dauer d. vorl. Diff.	Diffund. Stoff ; Ausgangskonzentr. desselben	Dicke des Blocks	Abst. v. d. Ausgangskonz. bis z. Vorderfl. d. Wurz.	Konzentration a. d. Vorderflanke der Wurzel	Konzentrations- gefälle auf je 1 mm	Resultate		
4	22	0,005 H ₃ BO ₃	10	5	0,0025	0,0005	Nach 5 Std.	30 Min.	0
							6 "	—	0
							6 "	30 "	0
							7 "	—	0
							9 "	10 "	0
							24 "	—	0 (Bedeutender Zuwachs)
5	22	0,1 MgCl ₂	10	5	0,05	0,01	Nach —	15 Min.	0
							1 Std.	—	0
							2 "	—	0
							3 "	15 "	0
							4 "	30 "	+
							5 "	45 "	+ 25°
							8 "	—	+ 25°
6	24	0,05 MgCl ₂	10	5	0,025	0,005	Nach —	20 Min.	0
							—	40 "	— 4 Teilstr.
							1 Std.	5 "	— 4 "
							3 "	20 "	— 12 "
							5 "	50 "	— 12 "
							24 "	—	{ — +}
7	22	0,03 MgCl ₂	10	5	0,015	0,003	Nach —	30 Min.	0
							1 Std.	—	0
							1 "	30 "	— 2 Teilstr.
							2 "	15 "	— 4 "
							4 "	30 "	— 5 "
							20 "	—	— 23 "
									oder — 15 Grad;
8	24	0,01 MgCl ₂	10	5	0,005	0,001	Nach —	15 Min.	0
							—	45 "	+ 2 Teilstr.
							1 Std.	15 "	+ 2 "
							2 "	15 "	0
							4 "	15 "	— 1 "
							4 "	50 "	— 1 "
							5 "	15 "	— 1 "
							5 "	45 "	— 2 "
							8 "	30 "	— 11 "
							24 "	—	— 45 Grad

Sehen wir nun die Ergebnisse der Tabelle 51 etwas näher an.

Versuche Nr. 1, 6 und 7 zeigen, daß die Reaktionszeit, wie auch vorausszusehen war, viel kürzer ist, als es nach nur makroskopischen Beobachtungen schien.

Versuch Nr. 8 weist auf das Vorhandensein des Kampfes zwischen Tendenzen zu positiver und negativer Krümmung hin. Demzufolge dürfte sich die Wurzel auch in einem verlangsamten Tempo krümmen. Möglicherweise erklärt sich in analoger Weise auch die ansehnliche Reaktionszeit im Versuch Nr. 5. —

Die in diesem Abschnitt angeführten Versuche sprechen also dafür, daß die Dauer des Versuches nicht ohne Einfluß auf das Resultat desselben ist. Doch kann dieser Einfluß recht verschieden ausfallen. In vielen Fällen behalten die einmal eingetretenen + oder — Krümmungen ihre ursprüngliche Richtung bis zum Ende des Versuches bei. Zuweilen aber erweist sich die eingetretene Reaktion als labil. Augenscheinlich kommt es dabei zum Kampf zwischen entgegengesetzten Krümmungstendenzen. Dementsprechend wird bald nur die Reaktionszeit verlängert, bald die eingetretene Krümmung ausgeglichen, bald die negative Krümmung über die intermediären Stadien von $\frac{=}{+}$, $\frac{+}{+}$, $\frac{+}{-}$ Krümmungen in eine positive umgewandelt.

Hypothese zur Erklärung des Verhaltens der *Lupinus*-Wurzeln im Diffusionsstrom.

Die im letzten Kapitel mitgeteilten Versuche klären die Natur der im Diffusionsstrom eintretenden Krümmungen bis zu einem gewissen Grade auf. Trotzdem bleiben manche Eigentümlichkeiten dieses Verhaltens immer rätselhaft. Es schien mir daher zeitgemäß, hier eine Hypothese zu Hilfe zu nehmen, um endlich das ganze Bild des Verhaltens der *Lupinus*-Wurzeln im Diffusionsstrom von einem einheitlichen Standpunkte aus verstehen zu können.

Meine Hypothese beruht auf folgenden Sätzen.

Der Diffusionsstrom jedes Stoffes veranlaßt die Wurzeln sich in der Richtung seiner Verbreitung zu krümmen.

Ganz abhängig davon, ob der Diffusionsstrom entweder auf die Wachstumsregion allein oder nur auf die Wurzelspitze einwirkt, treten positive oder negative Krümmungen ein.

Sowohl diese wie jene werden in der Wachstumsregion der Wurzeln ausgeführt. Ihre Natur ist aber verschieden.

Positive Krümmung kommt passiv zustande, und zwar unter dem Einfluß der direkten Einwirkung des Stromes auf die Wachstumsregion. Denn wofern die vordere Flanke der Wurzel mit stärkeren Konzentrationen als die hintere in Berührung kommt, wächst sie relativ langsamer. Positive Krümmungen sehe ich als traumatisch¹⁾ an.

Negative Krümmungen kommen aktiv zustande, und zwar unter dem Einfluß der Erregung, die durch den Diffusionsstromreiz in der Spitze hervorgerufen und von hier nach der Wachstumsregion hin geleitet wird. Damit negative Krümmungen zustande kommen, muß augenscheinlich die vordere Wurzelflanke im Vergleich zu der hinteren rascher wachsen. Negative Krümmungen sehe ich als tropistisch an. Mit welchem Tropismus haben wir es nun hier zu tun? Der Diffusionsstrom repräsentiert einen zusammengesetzten Reiz. Hier liegt eine ungleichmäßige Verteilung nicht nur der chemischen, sondern auch der osmotischen und elektrischen²⁾ Energie vor. Jede der genannten³⁾ Energien kann ja tropistisch reizen. Solange unaufgeklärt ist, welche es tatsächlich tut, ziehe ich vor, die in Rede stehenden negativen Krümmungen als diffusiotrop zu bezeichnen.

Bei meiner Versuchsanstellung wirkt der Diffusionsstrom auf die Wachstumsregion und die Spitze der Wurzel gleichzeitig ein. Dementsprechend wird die physiologische Stromwirkung zweifach sein. Die Folge davon ist, daß die vordere Seite des wachsenden Wurzelteiles zum Kampfplatz zweier⁴⁾ entgegengesetzter Wachstums-

1) Pfeffer, Pflanzenphysiologie, II. Aufl., Bd. 2, S. 591.

2) Diffundiert ein Elektrolyt, welcher in ungleich bewegliche Ionen zerfällt, so findet deren Scheidung statt und so entsteht eine Spannung des elektrischen Feldes. Vgl. Nernst, Zeitschr. f. physikal. Chemie, Bd. 2, S. 613—637.

3) Möglicherweise sind hierbei noch nicht alle beteiligten Energien aufgezählt.

4) Faktisch stellen sich Verhältnisse komplizierter dar. Denn außer den genannten Tendenzen ist noch die geotropische Stimmung der Wurzel zu berücksichtigen. Der Geotropismus diktiert sämtlichen Wurzelflanken ja eine gleichmäßige Wachstums-schnelligkeit. Daß an der im Diffusionsstrom eintretenden Krümmungsbewegung der Wurzel auch der Geotropismus beteiligt ist, geht aus meinen folgenden Beobachtungen hervor. a) Der Krümmungswinkel erreicht fast nie 90°, obgleich der Diffusionsstrom auf die Wurzelachse unter dem Rechtwinkel einwirkt. b) Bei der Untersuchung der besonders unter dem Einfluß schwacher Konzentrationen negativ gekrümmten Wurzeln bemerkte ich häufig, daß gerade die Wurzelspitzen nachträglich noch nach unten abgekrümmt waren. Offenbar gewinnt hier der Geo- auf dem Diffusiotropismus die Oberhand. Dies war auch zu erwarten. Denn der geotropische Reiz nimmt mit dem Krummwerden der Wurzel immer zu, der diffusiotrope Reiz dagegen wird abgeschwächt, insofern die negativ

tendenzen wird. Die Dauer und das Resultat dieses Kampfes hängt von der relativen Intensität der ringenden Tendenzen ab.

Das oben geschilderte verwickelte Verhalten der *Lupinus*-Wurzeln im Diffusionsstrom hängt davon ab, daß der erwähnte Kampf hier unter komplizierten und, was wichtiger ist, schwankenden Bedingungen verläuft. Einerseits schwankt die durch physikochemische Bedingungen des Diffusionsversuches bestimmte Reizintensität bei verschiedenen Experimenten. Andererseits ist die Empfindlichkeit sowohl der Wurzelspitze wie auch der Wachstumsregion für die Wirkung des Diffusionsstromes nicht nur bei verschiedenen Wurzeln den individuellen Schwankungen unterworfen, sondern kann sich auch bei ein und derselben Wurzel im Laufe der Zeit (Gewohnheitserscheinungen) verändern.

Gehen wir jetzt vom Standpunkt der entwickelten Hypothese aus zur Analyse des Verhaltens der *Lupinus*-Wurzeln im Diffusionsstrom über.

Ist die eine Wachstumstendenz während der ganzen Versuchsdauer überwiegend, so tritt die betr. Krümmung direkt ein — dabei muß die Reaktionszeit kurz sein — und bewahrt ihre Richtung unverändert bis zum Ende des Versuchs.

Sind beide Tendenzen während der ganzen Versuchsdauer gleich stark, so wächst die Wurzel gerade weiter. Im Falle schwacher Konzentrationen dürften übrigens gerade gebliebene Wurzeln als wirklich indifferent gelten.

Sind beide Tendenzen anfangs gleich stark und überwiegt erst nach einiger Zeit eine derselben die andere, so ist hier eine längere Reaktionszeit und erst dann eine Krümmung in entsprechender Richtung zu erwarten.

Ist endlich die eine Tendenz bei Beginn des Versuches stärker, gibt aber allmählich der anderen nach, so sind hier 2 Kombinationen denkbar. Es kommen entweder S-förmige $\left\{ \begin{smallmatrix} - \\ + \end{smallmatrix} \right.$ oder $\left\{ \begin{smallmatrix} + \\ - \end{smallmatrix} \right.$ Krümmungen zustande, oder es entstehen Krümmungen einer intermediären zwischen $+$ und $-$ liegenden Richtung.

Die entwickelte Hypothese erklärt leicht auch sonstige Eigentümlichkeiten des Verhaltens der *Lupinus*-Wurzeln im Diffusionsstrom.

sich krümmenden Wurzeln in den Bereich des geringeren Diffusionsreizes (d. h. schwächerer Konzentrationen und der Einwirkung des Stromes unter einem schiefen Winkel) geraten.

In einigen Versuchen, wo die Wurzeln in zwei Reihen angeordnet waren, fällt einem auf, daß trotz des überall guten Wachstums nur die Wurzeln der zweiten Reihe sich negativ krümmen. Die Wurzeln der ersten Reihe dagegen, welche durch den Strom anscheinend stärker gereizt werden, wachsen entweder gerade fort oder reagieren mit Krümmungen nach verschiedenen Richtungen. Derartige Eigentümlichkeit läßt sich folgendermaßen erklären. In der ersten Reihe ist der diffusiotrope Reiz zwar stärker, dafür infolge der höheren Konzentrationen fällt aber auch die Tendenz zur positiven Krümmung stärker aus. In der zweiten Reihe dagegen kann die diffusiotrope Reizung, wenn auch schwächer, doch eine intensivere Reaktion darum hervorrufen, weil die Tendenz zur positiven Krümmung sich als schwächer erweist.

Zwei andere Eigentümlichkeiten des Verhaltens der Wurzeln sind auf den ersten Blick gleichfalls wenig begreiflich. Es gibt einerseits positive Krümmungen bei Konzentrationen, die niedriger sind als die, welche negative Krümmungen hervorrufen. Andererseits kommen bisweilen scharf negative Krümmungen dann zum Vorschein, wenn die betr. Konzentrationen recht niedrig sind, zumal viel niedriger liegen als die untere für negative Krümmungen festgestellte Konzentrationsgrenze.

Diese beiden Eigentümlichkeiten lassen sich folgendermaßen erklären. Fast alle die Stoffe, welche bei hohen Konzentrationen das Wachstum hemmen, beschleunigen dieses bei den niedrigeren. Da aber die gegenüberliegenden Wurzelflanken von verschiedenen Konzentrationen berührt werden, so sind zwei Kombinationen denkbar. 1. Die vordere Flanke wächst mit normaler, die hintere dagegen mit gesteigerter Geschwindigkeit. Dann tritt — bei schwacher diffusiotroper Reizung — die positive Krümmung rein passiv ein. Indessen könnte man gerade sie als positive chemotrope Krümmung ansehen. 2. Die vordere Wurzelflanke wächst mit gesteigerter, die hintere dagegen mit normaler Geschwindigkeit. In diesem Falle kommt eine negative Krümmung gleichfalls passiv zustande. Wird aber die negative Krümmung zu gleicher Zeit unter dem Einfluß eines schwachen diffusiotropen Reizes angestrebt, so krümmt sich die Wurzel negativ im stärkeren Grade, als es der Intensität des diffusiotropen Reizes allein entspräche.

Schließlich lassen sich die mit *Helianthus*-Wurzeln ermittelten Resultate vom Standpunkt unserer Hypothese aus bis zu einem gewissen Grade begreifen. Es wäre ja möglich, daß diese Wurzeln

deshalb gerade weiter wachsen, weil die entgegengesetzten Wachstumstendenzen gleich stark sind. Übrigens wäre auch daran zu denken, daß hier entweder die geotropische Stimmung sehr stark oder die diffusiotrope Reizung zu schwach ist. Welche der angeführten Möglichkeiten faktisch vorliegt, wird sich nicht eher entscheiden lassen, als wenn die Methodik selbst modifiziert werden wird, und zwar in dem Sinne, daß der Diffusionsstrom auf die Wurzelspitze allein einwirkt. Erst dann würde es der Mühe wert sein, auf die Untersuchung des Verhaltens von *Helianthus*-Wurzeln im Diffusionsstrome näher einzugehen. Das Gesagte erhellt zugleich, weshalb das weitere Anstellen der Versuche mit *Helianthus*-Wurzeln nach der üblichen Methode unterbrochen werden mußte.

Schluß.

Im experimentellen Teil der vorliegenden Arbeit war ich bestrebt: 1. eine quantitative Methode der Erforschung des Chemotropismus der Wurzeln auszuarbeiten; 2. das Verhalten der Wurzeln im Diffusionsstrom zu untersuchen; und 3. die Natur der hier beobachteten Krümmungen zu erklären.

Auf dem Gebiet jeder der aufgestellten Angaben gelang es mir, gewisse Resultate zu erzielen.

Eine Methode der quantitativen Untersuchung des Chemotropismus der Wurzeln ist in den Hauptzügen ausgearbeitet. Selbstredend bedarf dieselbe noch mancher Vervollkommnungen. In erster Linie dürften die oben angegebenen Quellen der Versuchsfehler eine Berücksichtigung finden. Ließen sie sich auch nicht ganz beseitigen, so wäre festzustellen, in welchem Grade sie die Versuchsergebnisse beeinflussen könnten.

Das Verhalten der Wurzeln im Diffusionsstrom ist nur bei *Lupinus albus* genügend untersucht worden. Des weiteren stehe ich im Begriff, auch die Wurzeln anderer Pflanzen in den Bereich meiner Untersuchungen zu ziehen. Das kleine mir zurzeit vorliegende Material über das Verhalten der Wurzeln von *Helianthus annuus*, *Vicia Faba minor* und *Ricinus communis* läßt vermuten, daß wir hier den schon uns bekannten Verhältnissen begegnen werden. Übrigens tauchen schon einige spezifische Differenzen sowohl betreffs der besonders stark reizenden Stoffe als auch betreffs der krümmenden Konzentrationen auf.

Die Natur der im Diffusionsstrom auftretenden Krümmungen fängt eben an, sich zu klären. Es gelang mir einstweilen, die Gebiete der positiven und negativen Krümmungen scharf voneinander zu trennen. Positive Krümmungen lassen sich unschwer begreifen. Was aber ihrem Wesen nach negative Krümmungen sind, müssen erst künftige Untersuchungen lehren. Der Weg hierzu scheint klar vor uns zu liegen.

Einerseits hat man die oben beschriebene Methode, wonach die ganze Wurzel dem Diffusionsstrom ausgesetzt wird, dahin zu modifizieren, daß sich entweder die Spitze oder die Wachstumszone allein im Block befinde. Sollte sich übrigens die Einwirkung des Diffusionsstromes auf die Wachstumszone allein durch keinerlei Nachwirkungen kundgeben, so wird man die Versuche auch nach der üblichen Methode anstellen dürfen. Man wird aber nur dafür sorgen müssen, daß die Wurzeln sich im Agarblock kürzere Zeit befinden als die Reaktionszeit beträgt, um dann in reinen Agar übertragen zu werden und hier schon die Nachwirkung einer Reizung der Wurzelspitze hervortreten zu lassen.

Andererseits, indem man die Agarblöcke in einer erwünschten Dicke bereitet und die Wurzeln in einer erwünschten Entfernung von den Höhlungen einsetzt, kann man die verschiedenen Bedingungen des Diffusionsstromes nach Belieben variieren. Auf diese Weise läßt sich unschwer analysieren, welche Momente (die Natur des diffundierenden Stoffes, die Diffusionsschnelligkeit, die absolute auf die Wurzel einwirkende Konzentration, das Konzentrationsgefälle, die Dauer der Einwirkung des Diffusionsstromes usw.) den krümmenden Effekt des Diffusionsstromes bedingen. Dadurch ließe sich voraussichtlich auch der Zusammenhang zwischen dem Reiz und der Reaktion im Diffusionsstrom genau formulieren.

Je nach dem Resultat all dieser beabsichtigten Versuche dürfte das Schicksal unserer Hypothese verschieden sein. Sollte sie sich späterhin selbst als völlig unhaltbar erweisen, so verdient sie doch zurzeit als Arbeitshypothese Berücksichtigung. Denn sie gestattet zunächst das komplizierte Verhalten der Gesamtheit der *Lupinus*-Wurzeln im Diffusionsstrom zu einem gewissen Grade zu erklären. Sodann bringt meine Hypothese den Chemo- und Galvanotropismus der Wurzeln in nahen Zusammenhang.

Die neuesten Untersuchungen Gassners¹⁾ stellten endgültig

1) G. Gassner, Der Galvanotropismus der Wurzeln, 1906.

fest, daß die Natur der unter dem Einfluß des galvanischen Stromes eintretenden positiven und negativen Krümmungen der Wurzeln verschieden ist. Man darf nur negative Krümmungen als galvanotrope ansehen; sie treten ohne Spitze nicht ein. Positive Krümmungen dagegen wurden auch an den Wurzeln beobachtet, bei denen die Spitze entfernt oder nicht gereizt wurde. Positive Krümmungen stellen somit Schädigungskrümmungen vor, welche als eine Folge der herabgesetzten Wachstumsschnelligkeit der der Anode zugekehrten Wurzelflanke zustande kommen. Die Ursache der negativen Krümmungen liegt nach Gassners Meinung in der einseitigen Schädigung der Wurzelspitze. Deswegen betrachtet er diese Krümmungen als eine besondere Form von Traumatropismus.

Stellen wir unsere Schlußfolgerungen mit denen von Gassner zusammen, so springt die große Analogie sofort ins Auge.

Wir sehen unsere positive Krümmungen gleichfalls als Schädigungskrümmungen an und glauben nur negative Krümmungen als diffusiotrop bezeichnen zu dürfen. Die nächste Ursache der negativen diffusiotropen Krümmung dürfte auch hier in einer einseitigen Schädigung der Wurzelspitze liegen. Somit dürfte der Diffusiotropismus gleichfalls eine neue Form des Traumatropismus darstellen. Erst vergleichende Untersuchungen über den Galvano-, Chemo- und Traumatropismus werden entscheiden können, ob die eben ausgesprochene Ansicht richtig ist. Als Hypothese aber ist dieselbe wohl der Beachtung wert. Es werden ja hierdurch die Gebiete von drei Tropismen vereinigt, die auf den ersten Blick einander fern zu liegen scheinen. Dieser Vereinigung dürften folgende zwei Analogien zugrunde liegen.

Zunächst begegnen wir im Bereich jedes der genannten Tropismen positiv traumatischen und negativ tropistischen Krümmungen.

Sodann liegt kein Grund vor, im Bereich jedes dieser Tropismen die Existenz von positiven tropistischen Krümmungen anzunehmen. Was den Traumatropismus anbelangt, kann darüber wohl kein Zweifel obwalten. Bei Untersuchung des Galvanotropismus freilich sah Schellenberg¹⁾ positive Krümmungen unter dem Einfluß schwacher Stromdichten auftreten. Doch ist die Natur dieser Krümmungen, wie von Rothert²⁾ mit Recht betont wurde,

1) Schellenberg, Flora, 1906, Bd. 96, S. 474.

2) W. Rothert, Zeitschr. f. allgem. Physiol., 1907, Bd. 7, S. 157—158.

noch unklar. Möglicherweise sind es nicht galvanotropische Krümmungen. Schließlich liegt bei dem Chemotropismus der Wurzeln kaum ein Grund vor, die von Sammet und Lilienfeld beschriebenen positiven Krümmungen als tropistisch zu betrachten. Diese Krümmungen wurden ja auch an geköpften Wurzeln beobachtet. Außerdem ist eine Mitbeteiligung der anderen krümmenden Faktoren bei der Versuchsanstellung der zuletzt genannten Forscher wohl nicht ausgeschlossen.

Alles in allem stellen somit die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit allerdings nur die ersten Schritte zur experimentellen Bearbeitung der oben aufgestellten Aufgaben vor. Diese Schritte scheinen aber richtig getan worden zu sein, da die Ergebnisse unserer Arbeit nicht nur eine Reihe von wichtigen Fragen aufstellen, sondern auch auf den klaren Weg zu ihrer Lösung hinweisen.

Odessa, den 24. Oktober 1910.

Botanisches Laboratorium der Universität.
