Neue Versuche über die geotropische Sensibilität der Wurzelspitze.

Von

August Piccard (Basel)[1]).

Mit 4 Textfiguren.

Darwin glaubte, wie bekannt, den Sitz der Schwerkraftempfindung in die äußerste Wurzelspitze verlegen zu müssen, auf Grund der merkwürdigen Beobachtung, daß eine Wurzel ihre geotropische Krümmungsfähigkeit (in der Wachstumszone) verliert, wenn man ihr die feinste Spitze abschneidet. Mit der Wurzelspitze glaubte er zugleich das empfindende Organ entfernt zu haben, von welchem aus der Reiz in die höher liegende, biegungsfähige Wachstumszone fortgepflanzt werde, analog der Reizleitung durch Nerven bei den Tieren. Ein späterer Forscher glaubte sogar, nervenartige Stränge mikroskopisch erkannt zu haben.

Dennoch ist die Annahme Darwins nicht allgemein durchgedrungen. Der Grund der Lähmung kann ja in den veränderten Druckverhältnissen liegen, welche durch die entstehende Schwellung des Stumpfes hervorgerufen werden. Ich verfolge diese letztere Frage nicht, weil es mir gelungen ist, auf drei anderen Wegen, ohne die Wurzel irgendwie zu verletzen, der Lösung näher zu kommen.

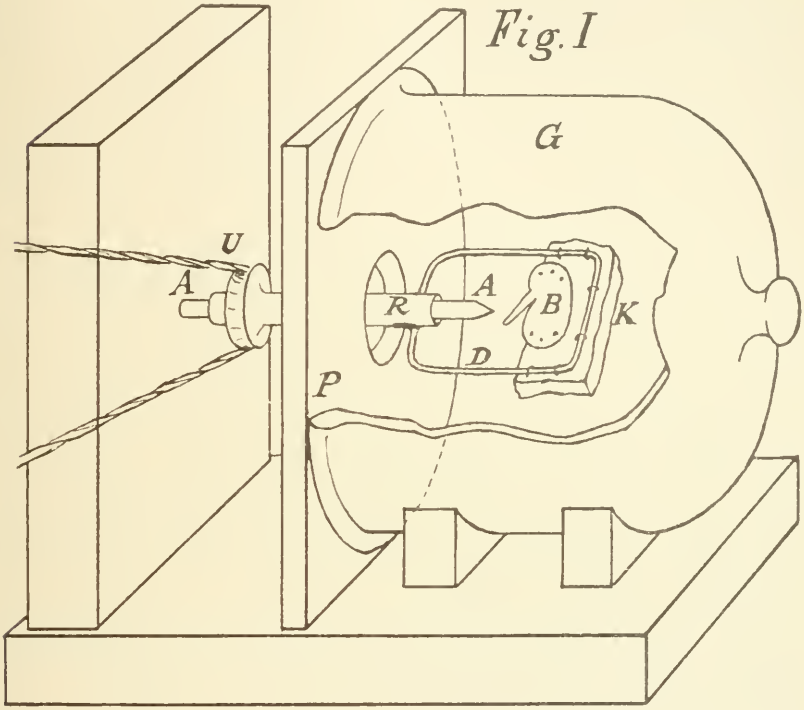
Die bezüglichen Versuche habe ich im botanischen Institut der Universität Basel ausgeführt, mit freundlicher Erlaubnis des Herrn Prof. Alfred Fischer, welchem ich hiermit meinen verbindlichsten Dank ausspreche.

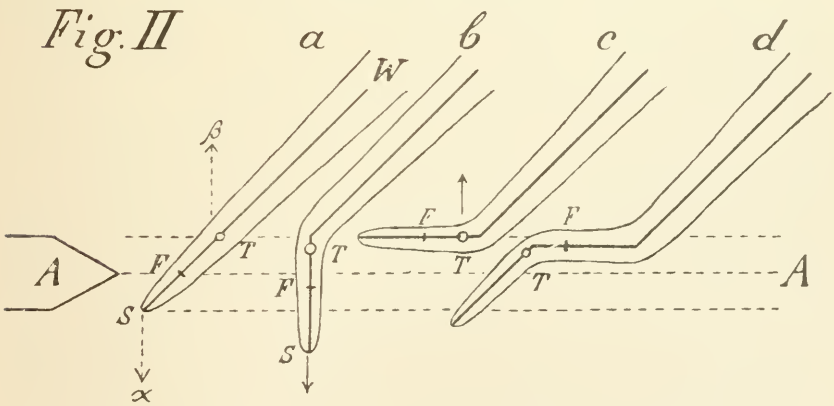
I.

Wäre es möglich, auf die horizontal gelegte Wurzel die Schwerkraft gleichzeitig, aber in entgegengesetzter Richtung, auf die Spitze und auf die biegungsfähige Zone einwirken zu lassen, so würde

1) Die Redaktion der Jahrbücher glaubte diese Arbeit mit Rücksicht auf die Methodik aufnehmen zu sollen.

man aus der Krümmungsrichtung sofort erkennen, ob das Empfindungsorgan sich da oder dort befindet. Leider gibt sich die Schwerkraft nicht dazu her. Die Zentrifugalkraft, die bekanntlich





in der Biologie die Schwerkraft ersetzen kann, scheint beim ersten Blick die gleiche Unmöglichkeit zu bieten. Durch eine besondere Versuchsanordnung ist es mir jedoch gelungen, das Ziel zu erreichen.

Die Fig. I zeigt eine mit ihrer jungen Wurzel von 10—15 mm Länge versehene Saubohne B, welche auf dem Korke K festgesteckt ist, und mit diesem, mit dem Drahtrahmen D, mit der Röhre R und Übersetzung U, durch einen Motor um die feste horizontale Achse AA gedreht wird. Die Wurzel wird schräg zur Achse so gestellt, daß die Zentrifugalkraft auf die Spitze FS (Fig. II, a) in entgegengesetzter Richtung wirkt als auf die übrige Wurzel FW; der Wurzelpunkt F liegt an der Grenze zwischen den beiden Kraftsystemen α und β, in der Mitte zwischen S und T, wobei T die Gegend des Hauptwachstums vorstellt.

(Zum richtigen Verständnis der folgenden Figuren darf nicht vergessen werden, daß die Wurzel mehr oder weniger auf der ganzen Länge des unteren Wurzelteils wächst, weitaus am stärksten aber in einer Zone T, die einige Millimeter oberhalb der Spitze liegt. Die Strecke ST bleibt im Verlaufe der folgenden Versuche annähernd konstant, während die Zellen F, welche ursprünglich in der Verlängerung der Zentrifugalachse lagen, infolge des nachträglichen Wachstums scheinbar immer höher rücken, sogar über T hinauf. Während aber T hinunter, und F scheinbar hinaufrückt, wird infolge des Wachstums der Abstand des einmal gebildeten Knies von F nur wenig größer.)

Schräg, und nicht normal zur Achse, wird die Wurzel gestellt, damit wir eine seitlich wirkende Komponente der Zentrifugalkraft erhalten, welche allein imstande ist, ein Knie zu erzeugen.

Vor Licht und Vertrocknung ist der Keimling geschützt durch eine Glocke G und eine Platte P, welche beide inwendig mit nassem Papier ausgeschlagen sind.

Während der Drehung muß sehr sorgfältig auf bleibende Zentrierung des Wurzelpunktes F geachtet werden. Hierzu ist es gut, von Anfang an sich so einzurichten, daß der Schwerpunkt der Bohne ebenfalls in die Verlängerung der Achse zu liegen kommt. Vor Erschütterungen muß der Keimling soviel als möglich durch gute Anlage und reichliche Ölung des Lagers, sowie durch Vermeidung allzugroßer Geschwindigkeiten geschützt werden. Ich habe eine solche von 20—40 Drehungen in der Sekunde angewendet, was bei einem Radius von 1 mm einer Zentrifugalbeschleunigung entspricht, die $1\frac{1}{2}$—6 mal größer ist als die Beschleunigung g (= 10 m) der Schwerkraft. Bei der Neigung von 45^0 der Wurzel zur Drehungsachse beträgt die wirksame Komponente normal zur Wurzelachse nur noch ca. 1—4 mal g.

Nach ungefähr einstündiger Rotierung, also ehe die Wurzel eine sichtbare Krümmung ausführen konnte, wird der Keimling auf dem Klinostat befestigt (nur etwa 10 Drehungen in der Stunde), woselbst die Schwerkraft nicht mehr zur Geltung kommt, da ihre Richtung beständig wechselt. Auch da ist der Keimling durch einen Kasten vor Trockenheit und Licht geschützt. Die Beobachtung geschieht durch ein Glasfenster, das sonst verdunkelt bleibt. Nach einigen (2—10) Stunden ist die Reaktion in Form eines Knies eingetreten.

Genauere Angaben über Zeit- und Wachstumsmessungen hätten hier nur einen Scheinwert, da Temperatur, Feuchtigkeit, Geschwindigkeit der Zentrifugalmaschine, Dauer der Präsentationszeit und individuelle Veranlagung eine zu große Rolle spielen. In den beiliegenden Zeichnungen (Fig. II) sind die verschiedenen Stadien schematisch auf der Wurzelachse dargestellt, während die Umrisse den Beobachtungen in 5maliger Vergrößerung entsprechen.

Wären, wie Darwin annimmt, die empfindenden Zellen nur in der Spitze, so müßte die geschleuderte Wurzel beim nachfolgenden Wachsen im Klinostat die Form der Fig. II, *b* annehmen, weil nur die Kraft α wahrgenommen würde. Läge dagegen die Perzeptionsstelle nur in der Wachstumszone, also in der Gegend von *T*, so würde daselbst die Kraft β wahrgenommen, und die Wurzel müßte die Form der Fig. II, *c* annehmen.

Aus meinen Versuchen geht nun hervor, daß zunächst nur die Biegung Fig. II, *c*, also im Sinne der zweiten Hypothese, erfolgt; läßt man aber die Wurzel noch länger im Klinostat wachsen, so kommt die Wirkung der Kraft α auf die weniger empfindliche Spitze auch noch zur Geltung, sodaß schließlich eine Sförmige Doppelkrümmung nach Fig. II, *d* entsteht.

Ging von Anfang an auf der Schleudermaschine die Drehungsachse nicht unterhalb, sondern mitten durch die Wachstumszone, sodaß *F* und *T* ursprünglich zusammenfallen, so treten auf dem Klinostat beide Wirkungen gleichzeitig ein und es entsteht unmittelbar die Sförmige Doppelkrümmung.

Ging die Drehungsachse oberhalb der Zone, so bildet sich das einfache Knie nach unten.

Hieraus ergibt sich, daß empfindende Zellen sowohl an der Spitze als auf der ganzen Länge der Wachstumszone verteilt sind. Ein besonderes „Sinnesorgan“ in der äußersten Wurzelspitze existiert

nicht und ebenso wenig eine „Fortpflanzung“ des Reizes in der Längsrichtung.

Über die Größe der Sensibilität in den einzelnen Regionen können unsere Versuche keine Auskunft geben, weil die Größe der Reaktion, die wir allein wahrnehmen, auch eine Funktion der Größe des Wachstums ist, welche letztere in den verschiedenen Regionen eine andere ist.

Zur Erlangung reiner Resultate ist es durchaus notwendig, alle störenden Nebenwirkungen sorgfältig zu vermeiden, wie: Erschütterungen, einseitige Feuchtigkeit und Beleuchtung, ungenaue Zentrierung in der Schleudermaschine, Verletzungen, ja sogar jede Berührung der Wurzel (sie muß frei in einem Loche in feuchtem Sägemehl gewachsen sein). Weil dieses alles nicht durchweg gelang, fielen von den 24 Versuchen, die ich ausgeführt habe, 9 außer Betracht (3 Wurzeln haben nur undeutlich reagiert, 2 garnicht, 3 sind während des Versuches abgestorben, 1 war von Anfang an schlecht zentriert). Unter den 15 gültigen Wurzeln hat eine einzige scheinbar die Darwinsche Krümmung gezeigt, und 14 haben vollkommen klar und deutlich in der oben angegebenen Weise reagiert, indem 2 die einfache Krümmung der Fig. II, *c* ausführten, und 12 darüber hinausgingen, bis zur ausgesprochenen Sförmigen Doppelkrümmung der Fig. II, *d*.

Damit ist die Frage entschieden. Zum gleichen Resultat haben zwei weitere Methoden geführt.

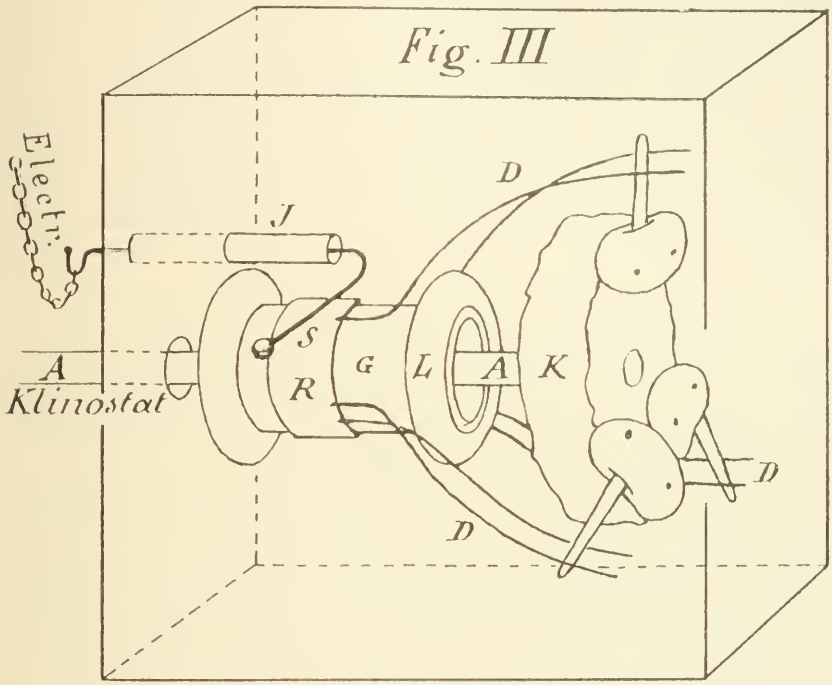
II.

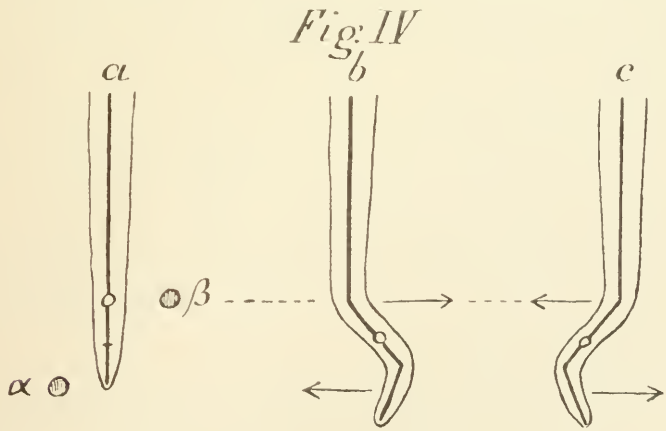
In der zweiten Versuchsreihe habe ich die Schwerkraft durch die Anziehungskraft eines statisch elektrischen Konduktors ersetzt.

Nachdem verschiedene Vorversuche diese Möglichkeit bewiesen, habe ich die Lage des Empfindungsorgans auf folgende Weise zu bestimmen gesucht. Auf dem Klinostaten werden neben einer mit der Erde in Verbindung stehenden Wurzel zwei elektrische Konduktoren aufgestellt, und zwar der eine α neben der Spitze, der andere β von der andern Seite aus, neben der Wachstumszone, wie es Fig. IV, *a* zeigt. Der Abstand zwischen Wurzel und Konduktor beträgt 3 mm. Die Wurzel muß sich konkav krümmen nach derjenigen Seite, auf welcher der Konduktor war, welcher der Empfindungsstelle am nächsten stand.

Der zu diesem Versuch nötige, ziemlich komplizierte Apparat Fig. III sei im folgenden beschrieben: Die horizontale, langsam

drehende Achse AA des Klinostaten reicht durch ein Loch in einen mit nassem Löschpapier ausgeschlagenen Kasten. An der Spitze trägt sie den Kork K, auf welchem die Bohnen so aufgesteckt werden,





daß die Wurzeln radiär hervorragen. Hinter dem Kork befindet sich ein an der Achse befestigter, aber durch das Glasrohr G und den Siegellackwulst L gut isolierter Metallring R, welcher durch einen

Schleifkontakt *S* beständig elektrisch geladen wird. Die Zuleitung zum Schleifer muß beim Eintritt in den feuchten Kasten durch das gefirniste Glasrohr *J* isoliert werden. An den Metallring sind 6 dicke Bleidrähte *D* angelötet, deren Enden die Konduktoren darstellen. Diese kann man leicht durch Biegen der Drähte in die gewünschte Lage versetzen. Die Wurzeln sind durch den feuchten Kork und die Achse mit der Erde in leitender Verbindung, während die Konduktoren durch Drähte, Ring, Schleifkontakt, Zuleitung, Elektrisiermaschine (System Wimshurst) und Motor beständig so stark elektrisch erhalten werden, daß gerade noch keine Funken den 3 mm weiten Abstand zwischen Konduktor und Wurzel überspringen. Der Kasten selbst ist nicht isolirt.

Die elektrische Beeinflussung dauert 1—2 Stunden, worauf die Elektrisiermaschine abgestellt, der Klinostat aber weiter gedreht wird. Die Beobachtung geschieht von der vorderen Seite des Kastens durch ein Glasfenster, das sonst verdunkelt bleibt. Nach 2—10 Stunden ist die Reaktion eingetreten.

Die Versuchsreihe hat im großen ganzen das gleiche Resultat ergeben wie die erste, doch in weniger prägnanter Weise. Hier sind nämlich verschiedene störende Faktoren im Spiel:

1. Die elektrische Anziehungskraft wirkt bekanntlich nur auf die Oberfläche der leitenden Körper und ist im Gegensatz zur Schwerkraft und Zentrifugalkraft von der Masse der Körper unabhängig; sie wirkt also nur auf die äußeren Zellen, nicht auf die inneren. Da deswegen der Versuch längere Zeit in Anspruch nimmt, sind alle Unglückschancen wie Vertrocknung usw. entsprechend vermehrt.

2. Durch Funkenbildung, welche trotz aller Vorsichtsmaßregeln doch manchmal eintritt, werden die getroffenen Wurzeln getötet, was man an ihrem glasigen Aussehen erkennt.

3. Wenn angezogene Staubteilchen sich auf Konduktor oder Wurzel setzen, tritt Glimmentladung ein, welche eine lokale Ozonbildung zur Folge hat. Durch Ozon aber werden die Wurzeln an der betreffenden Stelle verbrannt, was man an ihrer Schrumpfung und Schwärzung erkennt.

4. Es ist nicht zu vergessen, daß die bloße Nähe eines festen Körpers eine Krümmung der Wurzel gegen denselben verursachen kann, die wahrscheinlich durch Verdunstungsdifferenz auf beiden Seiten bedingt ist. Diesen Faktor habe ich zu reduzieren gesucht durch möglichste Sättigung der Atmosphäre mit Wasser.

5. Da beide Konduktoren nicht ganz gleich weit von der Wurzel aufgestellt werden können, so ist meist die Wirkung des einen oder des anderen vorherrschend, sodaß statt der vollständigen Sförmigen Doppelkrümmung oft nur die eine eintritt.

Dies alles und anderes erklärt, warum bei meinen 32 Versuchen nach dieser Methode 12 Wurzeln nicht oder undeutlich reagiert haben, und daß von den anderen 20 etwa nur 6 beide Krümmungen nach Fig. IV, *b* ausgeführt haben. Dennoch erscheint mir das Resultat zweifellos. Mehrere der genannten schädlichen Ursachen fallen übrigens bei der folgenden Serie außer Betracht.

III.

Da die elektrische Anziehungskraft, also die Kraft zwischen zwei ungleichnamig elektrischen Körpern, imstande ist, die Schwerkraft zu ersetzen, so liegt die Vermutung nahe, daß auch die elektrische Abstoßungskraft, also die Kraft zwischen zwei gleich elektrischen Körpern, das entsprechende — natürlich umgekehrte — Resultat liefern werde. Der Versuch hat diese Vermutung bestätigt: eine statisch elektrische Wurzel wendet sich von einem gleichnamig elektrischen Drahtende ab. Es läßt sich somit die elektrische Abstoßungskraft zur Bestimmung des Sitzes der Empfindung verwenden.

Diese Methode hat gegenüber der vorigen große Vorteile: da Wurzel und Konduktor gleichnamig geladen sind, so kann die elektrische Spannung viel höher gewählt werden, ohne daß Funken- und Ozonbildung eintritt. Die Reaktion erfolgt daher schneller und sicherer. Endlich fällt der Einwurf 4 der vorigen Methode hier weg, da die Wurzel nicht angezogen, sondern abgestoßen wird.

Zu diesen Versuchen hat der gleiche Apparat gedient wie vorhin, nur mit der Änderung, daß diesmal Bohnen und Bleidrähte mit der Achse verbunden sind, und daß Achse und Uhrwerk isoliert und elektrisch geladen werden.

Nach ein bis zwei Stunden wird die Elektrisiermaschine abgestellt, die Bleidrähte werden von den Wurzeln entfernt, damit ihre Gegenwart nicht durch Verdunstungsunterschiede störend einwirkt, und der Klinostat weiter gedreht, bis die Reaktion nach einigen Stunden eingetreten ist. Diesmal muß sich die Wurzel so krümmen, daß ihre konvexe Seite gegen denjenigen Konduktor gewendet ist, welcher der empfindungsfähigen Stelle am nächsten liegt.

Das Resultat dieser dritten Versuchsreihe ist die S-förmige Krümmung nach Fig. IV c, welche das Spiegelbild der vorigen ist. So gelangen wir zum gleichen Schlußergebnis wie nach den beiden ersten Methoden.

Nebenbei sei noch folgendes erwähnt: Da die elektrischen Kräfte nur an der Oberfläche des Körpers wirken, muß man annehmen, daß die Oberfläche der Wurzel mit empfindlichen Zellen versehen ist. Daß von diesen aus eine Reizleitung in radiärer Richtung nach innen erfolgt, ist wohl möglich.

Schlußfolgerungen:

1. Die Organe, welche die Schwerkraft (aber auch die Zentrifugalkraft, die elektrische Anziehungskraft und die elektrische Abstoßungskraft) empfinden, sind weder in der Spitze allein, wie Darwin angenommen, noch in der Zone des Hauptwachstums allein konzentriert, sondern sie sind auf der ganzen Länge des unteren Wurzelteils verteilt. Jede Partie kann für sich perzeptiv und reaktiv funktionieren.

2. Die empfindungsfähigen Zellen befinden sich, wenigstens teilweise, an der Oberfläche.

3. Eine Fortpflanzung des Reizes in der Längsrichtung findet nicht statt.

Basel, Oktober 1903.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Jahrbücher für wissenschaftliche Botanik

Jahr/Year: 1904

Band/Volume: 40

Autor(en)/Author(s): Piccard August

Artikel/Article: Neue Versuche über die geotropische Sensibilität der Wurzelspitze. 94-102