

Einige Betrachtungen und Versuche über Grundfragen beim Geotropismus der Wurzel.

Von

E. Giltay (Wageningen, Holland).

Mit 9 Textfiguren.

LIBRARY
NEW YORK
BOTANICAL
GARDEN.

I.

Wenn keimende Samen¹⁾ so gestellt werden, daß die eben hervorbrechende Wurzelspitze horizontal gerichtet ist, so krümmt sich dieselbe, wie allbekannt, alsbald dennoch abwärts.

Von vornherein ließen sich mehrere Ursachen dieser Erscheinung denken.

Am meisten auf der Hand liegend wäre es vielleicht, dieselbe mit dem Herabfließen einer zähen Flüssigkeit zu vergleichen. Und mit diesem Erklärungsversuch wäre auch die Wachstumsrichtung des Stengels²⁾ nicht unvereinbar: man hätte sich bekanntlich des weiteren nur vorzustellen, daß es bei der Wurzel der ganze Körper wäre, welcher abwärts flösse, während es bei dem Stengel bestimmte Nährsubstanzen sein könnten, welche bei horizontaler Richtung sich an der Unterseite dieses Organs häuften, und dort ein stärkeres Wachstum hervorriefen.

Es wäre aber weiter an noch mehrere andere möglichen Ursachen zu denken, wie man das im Lauf der Zeiten faktisch auch getan hat; näher kann dies z. B. in der Dissertation Ciesielskis³⁾ nachgelesen werden.

¹⁾ Man wolle im zweiten Teil dieses Aufsatzes nachsehen, wie dieselben in besserer Weise zu erhalten sind, als durch die übliche Kultur in Sägespänen.

²⁾ Man scheint gewöhnlich schon von vornherein das Bedürfnis zu fühlen, die Aufrichtung des Stengels durch dieselbe Ursache zu erklären — obgleich die Notwendigkeit dazu eigentlich nicht vorliegt.

³⁾ Ciesielski, Untersuchungen über die Abwärtskrümmung der Wurzel. Breslau 1871.

Bei der Aufstellung der verschiedenen Möglichkeiten wäre dann nicht zu vergessen, vielleicht besonders in unserer Zeit der X-strahlen und der Radioaktivität, — obgleich dies oft zu geschehen pflegt — daß auch etwas ganz Unbekanntes die Hauptrolle spielen könnte.

In diesem Aufsatz werde ich die Frage zu beantworten suchen, in welcher Weise etwas Näheres über die Ursache der Krümmung zu finden ist. Man wird sich hier vielleicht des französischen Sprichwortes erinnern »qu'il ne faut pas enfoncer des portes ouvertes«. Doch, ungeachtet der scheinbaren Trivialität, hoffe ich der Frage einige neue Seiten abzugewinnen.

Vorläufig beschränke ich mich auf die Wurzel. Hauptsächlich, weil dieselbe dem Experiment leichter zugänglich ist, und also zu Demonstrationszwecken eher Verwendung finden wird.

Die Experimente, welche der gewöhnlichen Meinung nach die Ursache der Krümmung aufgedeckt haben, sind schon ziemlich alt. Den berühmten Versuchen Knights¹⁾, welche den Effekt der Ausschleuderung durch Rotation zu verfolgen bezweckten, gebührt jedenfalls das Verdienst, die Sache experimentell in die richtige Bahn geleitet zu haben.

Dreiviertel Jahrhundert später hat Sachs²⁾ den Fundamentalversuch abändern wollen. Nach ihm — und ich glaube, daß man ihm heutzutage allgemein dabei folgt — läßt sich der Beweis, daß es die Schwere ist, welche den normalen vertikalen Wuchs bewirkt, »reiner und klarer« führen, wenn man in verschiedener Weise orientierte keimende Samen in vertikaler Ebene langsam — also ohne sichtbare Ausschleuderung — rotieren läßt. Weil dann die Schwere successive von allen Seiten in der Rotierungsfläche angreift, kann sie keine bestimmte Wachstumsrichtung in dieser Ebene mehr zur Folge haben. Die Wurzeln wachsen in diesem Fall dann auch nach allen Seiten.

Es ist meiner Meinung nach wohl einleuchtend, daß dieses Experiment nicht beweiskräftig ist. Denn, sowie durch die Rotation ein bestimmter Effekt der Schwere eliminiert wird, so

¹⁾ On the direction of the radicle and germen during the vegetation of seeds. Philosophical Transactions, 9. Jan. 1806. Übersetzung in »Ostwalds Klassiker«, no. 62.

²⁾ Gesammelte Abhandlungen von Julius Sachs, II S. 987.

ist dasselbe der Fall mit allen anderen möglicherweise vorhandenen Ursachen des normalen Abwärtswachsens. Der Sachs'sche Versuch besagt also weiter nichts, als daß bei der genannten Krümmung eine oder mehrere äußere Ursachen tätig sind.

Versuche, die bei richtiger Ausführung und Diskussion zum Ziel führen müssen, wurden, ich wiederhole es, zuerst von Knight angestellt. Doch ist sofort zu bemerken, daß sich aus diesen Versuchen des berühmten Physiologen eigentlich nicht das folgern läßt, was gewöhnlich aus ihnen gefolgert wird.

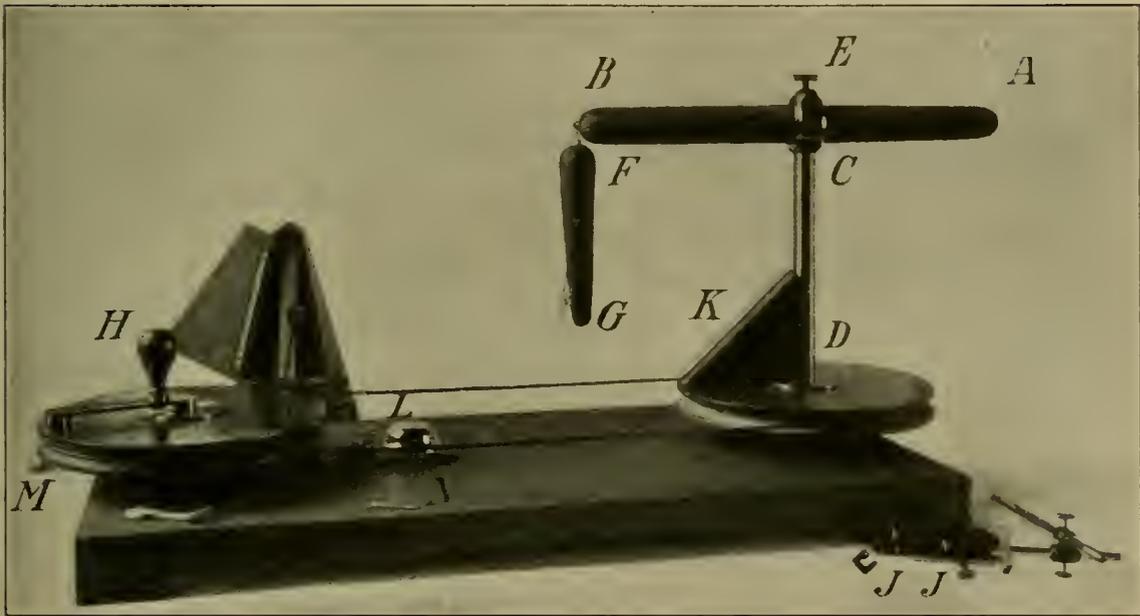


Fig. 1. Zentrifugalmaschine, fertig, um gedreht zu werden.

Um dies einzusehen, machen wir schon jetzt von einem einfachen Apparat Gebrauch, welcher uns später näher dienen wird.

Es ist dies eine Art Zentrifugalmaschine. Die Hauptsachen der Einrichtung werden aus Fig. 1 deutlich sein. Die Achse CD steht zur Fläche der Scheibe möglichst senkrecht. Der zylindrische Holzstab AB ist mit Schraube E an einer willkürlichen Stelle befestigt, der zugespitzte Teil FG, welcher den sich richtenden Teil einer Wurzel vorstellt, ist mit einer kleinen Kette an AB befestigt. An zwei gegenüberliegenden Punkten, deren Verbindungslinie durch den Schwerpunkt des Teiles FG geht,

sind die Enden eines kleinen Fadens befestigt. Zum leichtern und regelmäßigeren Gange sind die Achsen der beiden Scheiben auf Kugeln gelagert.

Wenn man den Apparat in Ruhe läßt, hängt die Spitze natürlich herab. Drehe ich jedoch die Kurbel H, dann wirkt neben der Schwerkraft auch die Rotation ein: die Spitze stellt sich resultierend, bei schnellerer Drehung mehr horizontal, bei langsamerer mehr vertikal.

Wenn auf die Stellung der Spitze noch etwas anderes von Einfluß wäre, würde sich dies natürlich durch deren Stellung verraten. Denken wir uns z. B., daß die Spitze Eisen enthielte, und daß unterhalb derselben ein genügend kräftiger Magnet vorhanden wäre. Es würde dann die magnetische Anziehung die Spitze mehr herunter ziehen, als es ohne dieselbe der Fall sein würde. Umgekehrt ließe sich bei genügender Kenntnis der Drehungsgeschwindigkeit aus der Stellung der Spitze auch ableiten, ob außer Schwere und Rotation noch andere Momente auf die Richtung von Einfluß sind.

Das soeben Gesagte läßt sich unmittelbar auf die Wurzelspitze übertragen. Rotiert dieselbe in einer horizontalen Ebene, dann läßt sich auch hier aus der Richtung, welche die Spitze annimmt, entnehmen, ob neben Schwerkraft und Drehung noch andere Einflüsse einwirken, aber natürlich nur, wenn Rotation und Schwerkraft dem Maße nach bekannt sind.

Knight hat nun bekanntlich mit Keimpflanzen Rotationsversuche u. a. in einer Horizontalebene angestellt und wahrgenommen, daß die Würzelchen nicht mehr vertikal, sondern mehr oder weniger in einer Richtung senkrecht zur Drehachse wuchsen. Gewöhnlich nimmt man an, es folge aus seinen Versuchen, daß die Schwerkraft das richtende Agens der Wurzelspitze sei.¹⁾ Warum sollte dies aber der Fall sein? Knight hat die Geschwindigkeit der Rotation nicht zu den erhaltenen Richtungen in Beziehung gebracht, und er konnte also nicht wissen, ob außer Schwerkraft und Rotation nicht noch andere

¹⁾ Bei dieser Vorstellung ist man eigentlich noch »plus royaliste que le roi«, denn Knight selber sagt in bezug auf das eigentümliche Wachstum von Wurzel und Stengel nur: »Ich sehe auch kaum einen Grund zu bezweifeln, daß dies im wesentlichen, wenn nicht ausschließlich durch die Schwerkraft bewirkt wird«. (l. c. S. 7).

Kräfte richtungsbestimmend gewirkt hatten; nicht einmal hat er gezeigt, daß aus seinen Versuchen notwendig folge, daß die Schwerkraft das hauptsächlichste Agens bildet. Für zwei Fälle hat er zwar angegeben, welche Neigung bei einer bestimmten Rotation erhalten wurde. Diese Daten bilden aber nur eine zahlenmäßige Illustration von der Tatsache, daß bei schnellerer Rotation die Wurzel mehr von der Vertikalen abweicht; er hat nicht gezeigt, was sich aus einem bestimmten Zusammengehen von Drehungsgeschwindigkeit und Richtung der Wurzel folgern läßt. Auch ist nicht deutlich, wie die mitgeteilten Richtungen von etwa 10^0 und 45^0 erhalten sind. Wegen der großen Schwierigkeiten, die damit verbunden sind, genauere Zahlen zu bekommen — der großen individuellen Abweichungen wegen — hätte dieser wichtige Punkt gewiß näher beleuchtet werden müssen.

Man geht also fehl, wenn man behaupten wollte, Knight habe bewiesen, daß die Schwerkraft allein die Abwärtskrümmung der Wurzel bewirkt.

Vielleicht wird man einwenden, daß ich bloß einen Teil seiner Versuche berücksichtige, und seinen Versuchen über Stengelkrümmung und über Rotationsversuche in vertikaler Ebene keine Beachtung schenke. Aber auch aus diesen Experimenten läßt sich das angegebene nicht folgern, wie wir weiterhin sehen werden.

Später hat man zwar genauer auch das Maß der Rotation bestimmt, und so findet man dann auch angegeben — obgleich eigentlich nur gelegentlich, und ohne Bekräftigung durch erforderliche Daten — daß bei gleicher Schwerkraft und »Zentrifugalkraft« sich die Wurzel unter 45^0 stellt. Ich bitte im zweiten Abschnitt nachzusehen, wie ich versucht habe, die erforderlichen Daten zu bekommen.

Ob man sich auch dann aber die Sache richtig vorstellt, erscheint mir zuweilen noch fraglich. Ich finde nämlich aus dieser Tatsache wohl gefolgert, daß die Wurzel zwischen Schwerkraft und Zentrifugalkraft nicht unterscheiden kann, und dann hieraus weiter, daß also die Schwerkraft die Krümmungsursache sein müsse. Mir scheint dies das Rechte nicht zu treffen. Daß die Wurzel zwischen Schwerkraft und Zentrifugalkraft nicht wird unterscheiden können, dürfte von vornherein erwartet

werden, wenigstens wenn man sich auf den materialistischen Standpunkt stellt, welcher in bezug auf physiologische Fragen gewöhnlich eingenommen wird. Man könnte sogar behaupten, daß es keiner Versuche bedürfe um dies festzustellen, und wenn es dennoch experimentell gezeigt ist, ließe sich aus dem Resultat nur eine Bestätigung bekannter Sachen und nichts Neues ableiten. Wenn wirklich die Wurzel sich in die Richtung der Resultante von Schwerkraft und »Zentrifugalkraft« stellt, so kann man daraus den sehr wichtigen Schluß ziehen, der aber gewöhnlich nicht gezogen wird, daß außer Schwerkraft und Zentrifugalkraft keine anderen Richtkräfte auf die Wurzel einwirken.

Wir betrachten jetzt einen anderen Teil der Erscheinungen bei geotropischer Krümmung, daß nämlich die Wurzel sich bleibend richtet, daß die Erscheinung also keine flüchtige ist. Sie ist also nicht der Durchbiegung eines Stabes infolge von Belastung innerhalb der Elastizitätsgrenze zu vergleichen, welche letztere rückgängig wird, sobald die Last weggenommen ist. Dies bestätigt, wie es scheinen könnte, die anfangs erwähnte Vorstellung, welche das Abwärtsachsen mit dem langsamen Abwärtsfließen einer zähen Flüssigkeit vergleicht. Näher noch wird man in dieser Meinung bestärkt, wenn man zugleich mit der Wurzel geeignete Pechstäbchen rotieren läßt; auch diese richten sich jedenfalls ungefähr übereinstimmend mit der mittleren Richtung der Wurzel¹⁾. Befestigt man dieselben bei Stillstand in horizontaler Richtung an einem Ende, so stellen sie sich allmählich vertikal: sie fließen tatsächlich herunter.

Doch wäre, wie wir schon seit längerer Zeit wissen, die Vergleichung der Wurzel mit einer herabfließenden Masse durchaus verfehlt. Daß es wenigstens möglich ist, daß die geotropische Krümmung in anderer Art erfolgt, ist ziemlich nahe liegend. Um dies einzusehen, vergleichen wir die Sache einen Augenblick mit menschlichen Zuständen.

Ich denke mir eine vor einem Zaune stehende Menschen-

¹⁾ Man hat zu ähnlichem Zwecke wohl Pendel verwendet. Weil diese jedoch bei Stillstand sofort wieder herunter sinken, finde ich Pechstäbchen viel geeigneter. Näheres im experimentellen Teil. Nur sei hier schon erwähnt, daß die Pechstäbchen (mittels Öl) von geeigneter Konsistenz angefertigt werden müssen.

masse. In dem Zaun befindet sich eine Öffnung, durch welche zur Not ein schwächtiger Mensch passieren könnte, keiner jedoch von gewöhnlichem Wuchs. Zufällig befindet sich eine Person, die passieren kann, vor der Öffnung. Durch zwei Ursachen könnte nun dieses Passieren erfolgen: passiv und auch aktiv, oder näher gesagt: es könnte sein, daß das Drängen der anderen die bewußte Person hindurchpreßte; aber es wäre auch möglich, daß dieselbe des fortwährenden Gedrängtwerdens müde, sich selbst hindurch zwängt.

Etwas ähnliches wäre bei der Wurzel denkbar. Es könnte sein, daß die Schwerkraft die sich krümmende Spitze unmittelbar herunter holte, oder beim Rotierungsversuch in die Richtung der erwähnten Resultante stellte. Mangel an Steifheit wäre also in diesem Fall die Ursache der Krümmung und dieselbe erfolgte passiv. Aber es wäre auch denkbar, daß die Schwerkraft nur anregend wirkte, daß durch die Schwerkraft nur ein besonderes Verhalten wach würde, welches das Wachstum auf bestimmte Art stattfinden ließe, und die Krümmung verursachte. Bekanntlich spricht man in letzterem Falle von einer Reizwirkung und man sagt, daß die Schwerkraft auslösend gewirkt hat.

Gerade beim positiven Geotropismus der Wurzel kann so deutlich und so leicht gezeigt werden, daß in Wirklichkeit nur die zweite der beiden Möglichkeiten zutrifft. Dieser relativ durchsichtige Fall ist dann auch vielleicht derjenige, welcher am leichtesten zum besseren Verständnis der etwas heiklen Reizwirkungen führt, die übrigens in vielen Fällen nur der landläufigen Meinung nach in ähnlicher Weise wie bei der Wurzel verlaufen dürften, ohne daß es möglich wäre, den näheren Beweis hierfür zu liefern.

Prinzipiell ist der Beweis des aktiven Betragens der Wurzel bei der geotropischen Krümmung leicht zu führen. Die Versuchseinrichtung wurde schon im Jahre 1829 von Johnson in »The Edinburgh New Philosophical Journal«¹⁾ publiziert. Sowie ich gegen die gewöhnlichen Folgerungen aus den Versuchen Knights einige Bemerkungen machen zu müssen gemeint habe, so sind auch die Experimente Johnsons als bei weitem nicht einwandfrei zu bezeichnen. Die Versuchseinrichtung kann bei guter

¹⁾ Oktober 1828. — March 1829, S. 312—317. Die Abhandlung ist datiert 22. Januar 1829.

Ausführung und richtiger Diskussion zu verläßlichen Resultaten führen, aber Johnson selbst hat dieselben nicht erhalten.

Die Versuche dieses Verf., soweit sie uns interessieren, sind die folgenden: Er hatte gefunden, daß Wurzelspitzen — durch Hydrotropismus — sogar aufwärts wachsen können. Er wollte nun näher wissen, ob eine Wurzel die allseitig reichlich und gleichmäßig mit Wasser versorgt wird, abwärts noch einen Druck ausübt. Er verband dazu eine horizontal gerichtete, unter Wasser gestellte¹⁾ Bohnenwurzel mit dem einen Arm einer (sehr primitiven) Wage; die Verbindung wurde mit Hilfe eines Drahtes hergestellt, der die Spitze der Wurzel durchbohrte. Es fand sich, daß »die Wurzel ein Gewicht zu heben oder wenigstens dessen Zug zu widerstreben scheint¹⁾, wenn dasselbe wahrscheinlich²⁾ bedeutend größer ist als das Gewicht der untergetauchten Wurzel. Der Versuch ist aber das Gegenteil von beweisend, wie zunächst schon aus den von mir spatiierten Wörtern hervorgeht. Näher folgt dies aus folgenden Überlegungen. Zunächst war die Einrichtung der Wage, wie schon hervorgehoben, sehr primitiv. Der Balken bestand aus Holz, und drehte sich um eine feine Nadel. Es ist bei dieser Einrichtung gar nicht deutlich, welcher Teil vom Übergewicht³⁾ durch Reibung getragen wurde. Dann zeigte die Wurzel unter einer Wasserschicht von viermal die Höhe der Bohne⁴⁾ erst in zwei Tagen ein Hinabgehen der Spitze um $\frac{1}{10}$ »Inch« (2,5 mm)⁵⁾.

¹⁾ Die Spatiierung von mir.

²⁾ Die Spatiierung ist von mir. Wörtlich steht an der betreffenden Stelle (S. 315): »A radicle in the 6. and 7. experiments, even whilst descending appears to raise, or at least resist a weight, probably considerably greater than its own when under water« usw.

³⁾ Dasselbe betrug 10 grains (0,65 g).

⁴⁾ Die von mir angegebene Höhe der Wasserschicht leite ich ab aus der beigefügten Figur, die ich hier reproduziere. Doch heißt es in dem Text, daß in den Rezipienten soviel Wasser gegossen wurde, als zur Bedeckung des Samens genügte (Spatiierung von mir), was also bedeutend weniger ist (»Lastly water was poured into the jar sufficient to cover the bean«).

⁵⁾ Von einem anderen Versuch wird ohne Zahlenangabe gesagt, daß die Wurzel seitlich sehr deutlich (most obviously) abwärts wuchs. Aus der beigegebenen Figur, welche den Samen am Ende des Versuchs vorstellt, kann aber bloß abgeleitet werden, daß die Wurzel seitlich wuchs; um so eher könnte auch diese Erscheinung pathologisch gewesen sein.

Nun hätte doch gewiß untersucht werden sollen, ob die unter Wasser gestellte Wurzel überhaupt noch geotropischer Krümmung fähig ist, und wenn das zutraf, nach welcher Zeit dieselbe eintritt; von einer Krümmung, die erst mit zwei Tagen deutlich wird, wäre doch gewiß nicht ohne weiteres anzunehmen, daß man hier eine normale Krümmung und nicht eine pathologische Erscheinung vor sich hatte.

Bei gelegentlichen Versuchen mit Erbsen fand ich, daß, wenn die Wurzel in horizontaler Richtung unter eine Wasserschicht von ± 10 cm Höhe gestellt wird, sie nach wenigen Stunden eine deutlich geotropische Krümmung zeigt, obgleich natürlich merklich langsamer als in freier Luft. Aus welchem Grunde Johnson erst nach zwei Tagen eine Senkung von $2\frac{1}{2}$ mm registrieren konnte, ist mir unbekannt, und der Verdacht, daß er vielleicht gar keine geotropische Krümmung vor sich gehabt hat, wird hierdurch nicht gerade geringer. Jedenfalls gebührt ihm aber das Verdienst, die Methode angegeben zu haben.

Wegen des Interesses dieses Versuches und wegen der schwierigen Zugänglichkeit des Originales¹⁾ reproduziere ich in Fig. 2 die beiden erwähnten Figuren.

Später wurde der Versuch mehrmals in verschiedener Form ausgeführt, bekanntlich auch so, daß man die Wurzel in Quecksilber hineinwachsen ließ. Doch glaube ich nicht, daß man dem wichtigen Experiment die gebührende Beachtung geschenkt hat, schon darum nicht, weil quantitativ die Resultate bedeutend größer sein können als ich sie angegeben finde. Die größten Werte finde ich bei Pfeffer. In dessen Physiologie finde ich

¹⁾ Daß ich das Original zu sehen bekam, verdanke ich der Bemühung des Bibliothekars unserer Hochschule Herrn A. A. van Pelt Lechner, welchem ich dafür meinen besten Dank ausspreche.

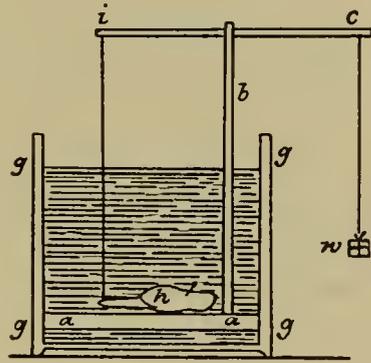


Fig. 2. Reproduktion von zwei Figuren aus der Johnsonschen Abhandlung von 1829.

erwähnt, daß die Wurzel von *Vicia Faba* bei schiefem Auftreffen einen Druck von 1,5 bis 2,2 g entwickelt (l. c. 2, 659).

Im zweiten Teil wolle man nachsehen, wie bei geeigneter Einrichtung die soviel schwächere Erbsenwurzel dasselbe Gewicht herabdrückt, und zwar wenn sie ursprünglich fast horizontal gerichtet war. In diesem Falle entspricht das Gewicht, welches die genannte Wurzel herunterdrückt, leicht dem 150fachen ihres Eigengewichtes und unter Umständen noch bedeutend mehr.

Betrachten wir jetzt das Arbeitsquantum, welches unter Einfluß der Schwere die Spitze verrichtet, während sie sich krümmt. Sei ihr Gewicht G ; wenn sich nun der Schwerpunkt um den Betrag a senkt, ist die durch die Schwerkraft verrichtete Arbeit $G \times a^1$.

Die Arbeit, welche die Spitze aus eigenen Mitteln verrichten kann, ist aber, wie wir sahen, bedeutend größer und zwar gewiß $150 \times G \times a^2$.

In Fällen, unter denen der Geotropismus ein relativ durchsichtiges Beispiel bildet, spricht man also von Reizwirkungen. Der Eingriff heißt auch schlechthin Reiz, und wirkt auslösend. Die Arbeit, welche der Reiz unmittelbar verrichtet, der Reizeingriff, ist in unserem Falle gewiß nicht größer wie $G \times a$, die Arbeit, welche infolge davon ausgelöst wird, oder wenigstens in bestimmter Richtung sich zeigt, der Reizeffekt also, kann einige Hunderte oder sogar Tausende Male mehr betragen. Zwischen diesen beiden besteht kein festes Verhältnis, was wohl der Fall ist, wenn eine Energiemenge einfach in eine andere Form übergeht.

¹⁾ Wenn die Spitze einer unverrückbaren Fläche auflage, würde die Schwerkraft an ihr zwar keine äußere Arbeit verrichten, aber im inneren würden Spannungen auftreten, zu deren Entstehen das Verrichten von innerer Arbeit notwendig war.

Vielleicht hat man einen Augenblick noch einige Neigung, auch die Wirkung der Schwere auf außerhalb der Spitze gelegene Teile als für die Krümmung möglicherweise von Bedeutung zu betrachten. Doch läßt man dies wieder fahren durch die Erwägung, daß früher die ganze Wurzel Spitze gewesen ist.

²⁾ Man berücksichtige hier noch, daß zur Ausübung der Arbeit $150 \times G \times a$ an und für sich die Einwirkung der Schwerkraft nicht notwendig wäre. Würde die Pflanze nicht scheinbar, sondern wirklich der Schwerkraft entzogen werden können, dann wäre sie wohl auch zur Ausübung einer vielleicht nicht stark verschiedenen Arbeit imstande. Was die Schwerkraft tut, ist wohl in erster Linie nur dieses, daß sie dem Wachstum eine bestimmte Richtung gibt.

Wie dies so sein kann, ist klar, denn bei Reizwirkungen tritt ein neues variables Element hinzu, nämlich die eigene Energie der Pflanze.

Es wäre hier noch zu bedenken, daß dasjenige was bewirkt, daß in vertikaler Richtung bei einer Senkung vom Betrage a eine Arbeit von z. B. $150 \times G \times a$ verrichtet wird, keineswegs das ganze Gewicht G zu sein brauchte; es ist nicht einmal wahrscheinlich, daß es diesem Werte gleich ist. Der tatsächlich wirkende Betrag könnte viel geringer sein. Denn es ist wohl nicht anders denkbar, als daß es ein Druck ist, welcher die bewußte Wirkung ausübt. Welcher Druck jedoch, ist wohl schwerlich zu sagen, aber jedenfalls könnte das Gewicht des wirksamen Stoffes ein sehr kleiner Teil von G sein. Vom Standpunkte der Statholithentheorie aus wäre in gewissen Fällen eine rohe Schätzung zu machen.

Oben nahmen wir für die Wurzel an, daß der Reizangriff hauptsächlich das Wachstum in bestimmte Bahnen leitet. Es ist wohl einleuchtend, daß dies nicht immer der Fall zu sein braucht. Sehr wohl ist es denkbar, daß ein Reiz Energie kinetisch werden läßt, welche ohne denselben ganz potentiell geblieben wäre. Übrigens fehlt es wohl an genügender Einsicht in die Reizvorgänge um bestimmt sagen zu können, wann, wo und inwieweit das eine und eventuell das andere auftritt.

Man ist gewohnt, zur Verdeutlichung der Reizwirkung dieselbe mit gewissen Vorgängen aus dem Alltagsleben zu vergleichen, wie ich es S. 311 zur Beleuchtung eines Punktes auch getan habe. Ich meine jedoch, daß die gebräuchlichen Analogien nur eine Seite der Sache treffen, indem sie nur für den Fall gelten, daß der Reiz potentielle Energie kinetisch macht, und nicht für die verschiedenen anderen Fälle, welche denkbar wären, u. a. daß das Totalquantum an kinetischer Energie dasselbe bliebe und daß nur die Verteilung eine andere würde, indem an einer Stelle das Wachstum sich verringerte oder sogar ganz aufhörte, an einer anderen dagegen zunähme. Vergleicht man z. B. die Reizwirkung mit dem Abfeuern einer geladenen Waffe, was wie gewöhnlich durch die auslösende Wirkung eines Fingerdrucks geschehen möge, so wird durch diese Fingerwirkung kinetische Energie aus potentieller gebildet. Vergleicht man

mit einer elektrischen Klingel, bei welcher der Strom durchgeht, wenn ein Taster niedergedrückt wird, so hat man ähnliches. Wo ausführlicher über die Sache gesprochen wird, meine ich daher, daß auf die Verschiedenheit der möglichen Vorkommnisse hinzuweisen wäre. Es könnte dann auch die Zahl der gegebenen Vergleiche vergrößert werden und es wäre beispielsweise folgender hinzuzufügen.

Wir denken uns die Pole eines galvanischen Elementes durch Draht verbunden, und zwar so, daß der Draht zunächst einfach ist, sich dann verzweigt, während die Zweige wieder in einen einzigen Draht zusammenlaufen. Nehmen wir an, mittels geeigneter Stöpsel könne in einem der Zweige mehr Widerstand gebracht oder auch der Strom ganz unterbrochen werden, so daß entsprechend mehr Elektrizität durch den anderen Teil der Leitung geht. Alsdann bewirkt ja der Eingriff, daß mehr Energie in eine bestimmte Bahn geleitet wird. Ich meine, daß in dieser Form der Vergleich mit der geotropischen Krümmung besser im Einklang wäre, ohne daß ich natürlich behaupten wollte, daß auch dieser Vergleich mehr als ein oberflächlicher wäre¹⁾.

Im vorigen haben wir bloß die Wurzel und nur Rotation in horizontaler Ebene berücksichtigt. Wir werden jetzt auch den Stengel in unsere Betrachtung aufnehmen sowie die Rotation in vertikaler Ebene.

Der Hauptstengel wächst der Schwerkraft entgegengesetzt. Er könnte aber diese Wachstumsrichtung auch durch etwas anderes als durch die Schwerkraft bekommen. Solange nun bei genügend schneller Rotation in horizontaler Ebene durch passive Ausschleuderung der Stengel nur schwach oder unmerkbar gekrümmt wird, werden wir also, von dieser Krümmung abgesehen, folgende Fälle zu unterscheiden haben:

a) Wenn die Schwerkraft für die geotropische Krümmung unwirksam ist, daß der Stengel aufwärts wächst (was bekanntlich nicht zutrifft);

b) wenn die Schwerkraft wohl wirksam ist bei der normalen Krümmung, daß derselbe sich der Drehungsachse zuwenden wird.

¹⁾ Natürlich ließen sich leicht andere Einrichtungen ausdenken, welche andere mögliche Vorkommnisse illustrieren könnten. Ich betrachte es als überflüssig, hierauf näher einzugehen.

Um nun zu untersuchen, ob neben der Schwerkraft noch andere Ursachen die Richtung beeinflussen, können wir in ähnlicher Weise wie bei der Wurzel vorgehen.

Es ist deutlich, daß alle Teile des Stengels einer eingewurzelten Pflanze die Neigung haben werden, in der Richtung der vertikalen zu fallen. Die »festen« Teile werden schon etwas — ob schon meistens unmerklich — einsinken, wodurch Spannungen entstehen werden, mittels deren die älteren Stengelteile sich aufrecht halten. Gewisse Inhaltsbestandteile werden schon deutlicher oder sogar ganz in ihren Zellen heruntersinken.

Wenn nun infolge der Rotation die Richtung des beginnenden Falles sich geändert hat und der Stengel wächst dann immer dieser Richtung entgegengesetzt, so ist dies ein Zeichen dafür, daß von richtungsbestimmenden Ursachen nur Schwerkraft und Ausschleuderung tätig sind. Aber auch hier ist es notwendig, das Maß der Drehung in Betracht zu ziehen, denn sonst ließe sich die neue Fallrichtung nicht feststellen und könnte aus der Wachstumsrichtung nichts abgeleitet werden.

Wenn Stengel und Wurzel nicht gesondert betrachtet werden, sondern zusammen, und wenn angenommen wird, daß ihre mittleren Wachstumsrichtungen bei verschiedener Umdrehungsgeschwindigkeit einander immer entgegengesetzt sind, so könnten wir ohne weiteres uns den Grund kaum anders denken, als daß die Resultante der richtenden Ursachen für beide Organe immer in dieselbe Gerade fällt. Ob es neben der Schwerkraft und Drehung noch andere richtende Ursachen gäbe, bliebe aber unsicher.

Bei genügend schneller Rotation in vertikaler Ebene endlich kann zwar leicht gezeigt werden, daß die Erdanziehung auf Geotropismus von Stengel und Wurzel von Einfluß sein muß, ob aber neben diesem Faktor noch andere Momente tätig sind, lassen aus einleuchtenden Gründen die betreffenden Versuche nicht erkennen.

Das Resultat dieser Betrachtungen ist also:

1. Aus den Knightschen Versuchen kann nur abgeleitet werden, daß die Schwerkraft auf die geotropische Krümmung von Einfluß ist; sie lassen es aber offen, ob es noch andere und sogar wichtigere richtungsbestimmende Ursachen gibt.

2. Johnson hat eine wertvolle Methode angegeben, um zu untersuchen, ob die Wurzel sich passiv oder aktiv krümmt; jedoch sind die Versuche, die er selbst nach dieser Methode anstellte, zur Ableitung eines Resultats nicht geeignet.

3. Die einzige Versuchsanordnung, durch welche die Richtungsursache klar gelegt wird, besteht darin, daß man die zu untersuchende Wurzel in horizontaler Richtung genügend schnell rotieren läßt.

4. Dabei muß aber das Maß der Drehung in Betracht gezogen werden.

II.

1. Erhaltung der gewünschten Keimungszustände.

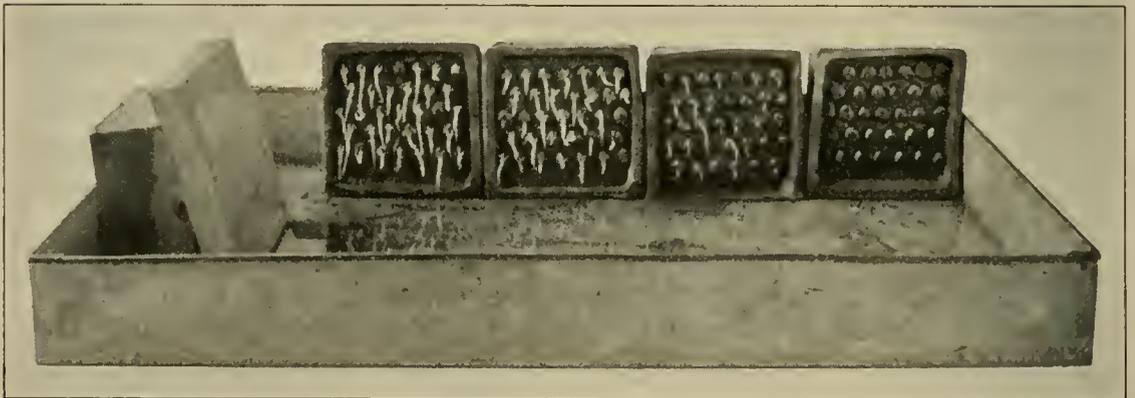


Fig. 3. Gefäß mit Töpfen zur Erhaltung der erforderlichen Keimungszustände.

Ich habe hauptsächlich mit einer Erbse gearbeitet, nämlich mit der »rozyn-erwt« (Rosin-erbse) von Boeke & Huidekoper in Groningen. Gewöhnlich werden Keimpflanzen zu physiologischen Versuchen so erhalten, daß man die Samen in Wasser einweicht, und dieselben dann in feuchten Sägespänen keimen läßt. Ich finde dies aber sehr unbequem, weil sich auf diese Weise das Wachstum so schlecht oder garnicht ohne weiteres mit den Augen verfolgen läßt. Seit Jahren ziehe ich es bei weitem vor, die Samen nach dem Schwellen etwa halbwegs in feuchten Sand zu stecken, und zwar so, daß die Wurzel, deren Lage äußerlich bekanntlich sehr wohl kenntlich ist, sich an der vom Sande abgewendeten Seite befindet, und der Oberfläche des Sandes parallel gelagert ist. Ich verwende zu diesen Kulturen vierseitige, fast prismatische Töpfe (Fig. 3), und lege die Würzel-

chen sämtlich parallel, und zu einer der Seitenflächen des Topfes senkrecht. Wenn dann die Töpfe auf diese letztere Seitenfläche aufgestellt werden, ist die Sandoberfläche nahezu senkrecht gerichtet, und die Würzelchen können bei ihrer Entwicklung dem Sande entlang wachsen. Wenn ich früh und spät am Tage einen Topf besäte, hatte ich fast immer zu meinen Versuchen eine genügende Anzahl junger Pflanzen. Die Töpfe werden nebeneinander in ein größeres Gefäß mit etwas Wasser aufgestellt und die Oberfläche des Sandes mit einem zinkenen Deckel gegen Eintrocknen geschützt. Weil nach dem Entfernen dieses letzteren alle Samen offen liegen, ist es ein leichtes, dieselben rasch zu durchmustern und sich das Beste auszuwählen.

Die Figur, welche gegen Ende des Frühjahres angefertigt wurde, zeigt deutlich, wie die Keimung öfters mehr oder weniger unregelmäßig verläuft, während auch viele Würzelchen ziemlich große Abweichungen von der Vertikalen aufweisen; ich glaube, daß beides besonders bei älteren Samen vorkommt.

2. Die Verwendung von Pechstäbchen, um das Resultat von Schwerkraft und Rotation zu fixieren.

Wenn man sich die Sache prinzipiell deutlich gemacht hat, kann man im Notfall auch die Rechnung umgehen, wenn man zugleich mit den Keimpflanzen die S. 310 schon erwähnten Pechstäbchen rotieren läßt, welche die Eigenschaft haben, sich unter Einfluß der Schwerkraft (eventuell auch der Rotation) langsam zu richten, so langsam, daß, wenn man mit der Rotation aufhört, es mindestens mehrere Minuten dauert, bevor eine weitere Änderung in deren Stellung wahrzunehmen ist. Zu ihrer Herstellung wird käufliches Pech mit etwas Öl versetzt, und bei höherer Temperatur (Schale in kochendes Wasser setzen!) damit verrieben. Zu wenig Öl läßt die Masse zu spröde werden, zu viel macht sie zu weich. Bei geeigneter Ausführung entsteht jedoch eine Substanz, die bei gewöhnlicher Temperatur in geeignetem Grade plastisch ist. Hieraus werden kleine Stäbchen gebildet, die mittels Nadeln horizontal gestellt werden. Ist nachher der größere Teil in etwa einem halben Tage vertikal gerichtet, dann sind sie gut brauchbar. Von solchen Stäbchen stelle ich immer eins neben die Keimpflanzen, anstatt der Pendel, die zu demselben Zweck

wohl verwendet sind, die aber ihre Richtung nach Aufhören der Rotation nicht beibehalten und daher unpraktisch sind.

Auch in Fällen, wo man die Sache nicht rechnerisch verfolgt — welches letztere, wo es angeht, immer empfehlenswert ist — ist es gut, die Stäbchen doch auch zu verwenden. Sie bilden eine nicht unwillkommene Kontrolle über den Grad der stattgehabten Rotation. Man hat aber darauf zu achten, daß das Material immer von geeigneter Konsistenz ist, und empfiehlt es sich daher, öfters Kontrollversuche anzustellen, indem Stäbchen horizontal aufgestellt werden. Sinken sie richtig herab, dann ist die Sache in Ordnung.

3. Bestimmung der anzuwendenden Rotation.

Soeben sahen wir zwar, daß bei der Bestimmung der Rotationsgeschwindigkeit die Rechnung zu umgehen ist, wenn wir das Resultat von Schwerkraft und Rotation an den oben beschriebenen Pechstäbchen beurteilen; doch geht das Aufsuchen von praktisch geeigneten Rotationen natürlich viel besser, wenn die Sache im voraus berechnet wird, wie wir das jetzt ausführen werden.

Zum besseren Verständnis ist es dabei vielleicht nicht ungeeignet, wenn wir zunächst in Erinnerung bringen, daß, wenn ein Körper z. B. mittels einer gespannten Schnur in einem Kreis herumgeführt wird, es der Zug in der Schnur ist, welcher die erforderliche auf den Körper wirkende Zentripetalkraft liefert. Wegen der Gleichheit von Wirkung und Gegenwirkung können wir auch sagen, daß der Körper denselben Zug — zentrifugal — auf die Schnur ausübt. Bei Stillstand des Körpers wäre dieselbe Spannung in der Schnur zu erhalten, wenn auf den Körper, statt nach innen zu, nach außen hin die nämliche Kraft ausgeübt würde.

Bei der Rotation durchlaufen die am weitesten von der Rotationsachse entfernten Punkte eines Stäbchens in derselben Zeit einen größeren Weg, als die der Achse am nächsten liegenden, und sind daher die auf den verschiedenen Masseneinheiten wirkenden Kräfte nicht gleich. Wenn jedoch die Dimensionen der Stäbchen klein sind im Vergleich zu den Entfernungen zur Achse der Rotation, so können wir uns allen Stoff der Stäbchen in dem Schwerpunkt vereinigt denken. Wir haben dann also nur noch mit einer Entfernung zu tun.

Welche Entfernung und welche Rotationsgeschwindigkeit wir zweckmäßig nehmen, ergibt sich aus der bekannten Gleichung

$$R = \frac{g}{4 \pi^2 n^2}$$

in welcher R die Entfernung zur Achse, g die zentripetale Beschleunigung, und n die Anzahl der Touren in der Sekunde bedeutet. Wenn wir nun dafür sorgen, daß die bei der Rotation tätige Zentripetalkraft der Schwerkraft gleich wird, dann werden die Stäbchen sich unter 45° zur Vertikalen stellen, welche Richtung sehr geeignet ist, weil sie ohne nähere Messung relativ genau nach dem Augenmaß bestimmt werden kann. Diese Richtung wird also erhalten, weil bei Gleichheit der einwirkenden Kräfte der Effekt auf dieselbe Masse auch gleich ist, so daß die Stäbchen sich gerade in Mittelstellung richten. Bei Gleichheit der einwirkenden Kräfte weist aber auch die Beschleunigung, welche dieselbe Masse durch jede dieser beiden erhalten würde, denselben Betrag auf. Es wird also die Beschleunigung durch die Zentripetalkraft (g in obiger Formel) der Beschleunigung durch die Erdschwere gleich sein. Und weil bis auf ein Geringes letzterer Wert, in Metern ausgedrückt, und π^2 einander gleich sind, haben wir bloß $n = 1$ zu nehmen (diese Rotationsgeschwindigkeit ist ja bequem zu erzielen!) um zu bekommen:

$$R = \frac{1}{4} (M)$$

Dieser Wert ist, mit der Länge der Pechstäbchen verglichen, groß, weshalb unsere oben angegebene Bedingung erfüllt ist.

Es dürfte nicht ungeeignet sein, diesen Betrag mit dem Apparat, welcher uns S. 307 schon gedient hat, noch zu kontrollieren. Zwar mußte hier die Spitze relativ groß genommen werden, um einem größeren Auditorium bequem sichtbar zu sein, so daß es strenge genommen nicht mehr zulässig ist, bei der Berechnung allen Stoff im Schwerpunkt vereinigt zu denken, aber der Fehler ist zu gering, um sich störend bemerkbar zu machen.

In diesem Apparat nun kann man zunächst die bei Rotation wirksamen Zentripetalkräfte bei Stillstand durch eine einzige zentrifugal gerichtete Kraft ersetzen, und zwar in der aus Fig. 4

leicht ersichtlichen Weise. Die etwas transformierte Saltersche Briefwage (vergl. auch die Fig. 1 auf S. 307) dient, um die in horizontaler Richtung angreifende Kraft auszuüben. Wenn die Indices J J (S. 307 Fig. 1, rechts unten) übereinstimmen, ist die Spannung der Feder der Wage dem Zuge gleich, welchen die Schwere auf FG ausübt. Die Richtung der Spitze wird verglichen mit derjenigen der Hypothense des gleichschenkelig rechtwinkligen Dreiecks bei K. Dieses ist zur bequemen Messung der Katheten wegnehmbar angebracht. Es soll hierbei die Spitze in solcher Entfernung von der Achse

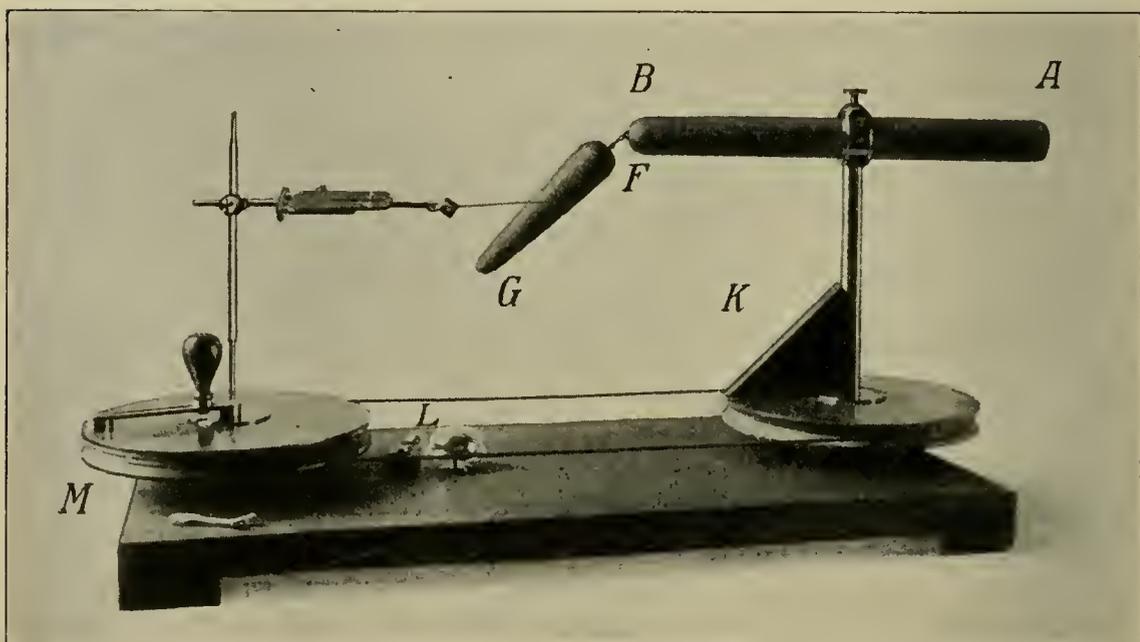


Fig. 4. Die Zentrifugalmaschine, bei der eine in horizontaler Richtung angreifende Kraft die bei Drehung auftretende Zentripetalkraft ersetzt.

gebracht sein, daß, wenn erstere unter 45° neigt, der Schwerpunkt $\frac{1}{4}$ Meter von der Achse entfernt ist. — Zur Regulierung der Rotation wird ein gutes Metronom verwendet, welches auf 120 gestellt wird, und dann zweimal pro Sekunde schlägt. Jede halbe Rotation wird am Apparat mittels Klingel L angegeben, welche mit zwei Kupferstücken M (Fig. 1, S. 307) in Tätigkeit gesetzt wird, aber auch mit Stift N (Fig. 1) ausgeschaltet werden kann. Mit einiger Übung ist es nun ziemlich leicht, die Schläge des Metronoms mit jenen des Zentrifugalapparats übereinstimmen zu lassen. Die Spitze stellt sich dabei unter einen Winkel, welcher von jenem der Hypothense K nicht zu unterscheiden ist. —

4. Versuchsanordnung bei Verwendung von Keimpflanzen.

Bis jetzt konnte ich die notwendigen Versuche nicht in ganz befriedigender Weise ausführen. Dazu würde sich nämlich empfehlen, als Triebkraft für die Rotation eine konstante Kraft zu verwenden, am besten die Schwerkraft. Die große Beschleunigung, die erzielt werden müßte im Verein mit der Tatsache, daß der Apparat die Nacht über würde laufen müssen, ohne daß es notwendig wäre, das treibende Gewicht wieder aufzuziehen, haben es mir einstweilen unmöglich gemacht, dies zu verwirklichen.

Einstweilen habe ich einen Heinrici-Motor verwenden können. Wegen Ungleichheiten in dem Gasdruck, die auch mit einem Moitessier-Regulator nicht ganz zu beseitigen waren, sind Unregelmäßigkeiten in dem Gange geblieben, so daß die Anzahl Touren in der Minute, statt fortwährend 60 zu sein, zwischen 56 und 64 schwankte. Wenn entweder das Maximum oder das Minimum fortwährend inne gehalten wäre, würden sich die Pechstäbchen schon gut 4^0 stärker oder minder stark gegen die Vertikale neigen. Weil der schnellere Gang abends, der langsamere überwiegend nachts stattgefunden hat, ist von den Pechstäbchen nur zu erwarten, daß sie sich gewöhnlich etwas mehr vertikal gerichtet haben, als bei ganz richtigem Gange der Fall gewesen wäre. Wir werden dies sofort bestätigt finden.

Die Keimpflanzen werden in Glasdosen mittels Stecknadel auf Korkscheiben befestigt und die letzteren mit Siegellack an den Deckel gekittet. Auf dem Kork ist mit Kupfernägeln ein Teil eines Kreises von 25 cm Radius angegeben; der Mittelpunkt des Kreises liegt in der Rotationsachse. Über den Nägeln befinden sich die Wurzeln der Keimpflanzen; die Distanz der Wurzelspitzen von der Achse kann sich also nur durch Wachstum und Krümmung um ein Geringes ändern. Von solchen Glasdosen können in maximo drei angebracht werden, welche gleichmäßig auf einem horizontalen Rade verteilt sind, so daß dasselbe auch gleichmäßig belastet ist. Dieses Rad dreht sich, auf Kugeln gelagert (aus einem Fahrrad konstruiert!), um die vertikale Achse eines Gestelles, wird wegen der geringen

Reibung sehr leicht getrieben, und kann zum Zweck anderer Versuche noch mit mehreren anderen Sachen belastet werden¹⁾.

Mit dem beschriebenen Apparat habe ich nun ziemlich viele Bestimmungen ausgeführt. Es ist jedoch keine leichte Sache, ein gutes Zahlenmaterial zu bekommen, denn Wurzeln zeigen in sehr hohem Maße individuelle Abweichungen, über deren nähere Ursachen vorläufig wohl nichts zu sagen ist. Zuweilen gehen dieselben sogar in ganz entgegengesetzte über, so daß sie dann der normalen Richtung des Stengels entsprechen. Ich habe bei meinen Bestimmungen alle Krümmungen größer als 65° und kleiner als 25° nicht verwendet, und deshalb die extremen Teile der Frequenzkurve auch nicht gezeichnet; die Wahl dieser Grenzen ist aber ganz willkürlich.

Im ganzen wurden 368 Bestimmungen ausgeführt, die im Mittel die Abweichung $46,6^{\circ}$ gaben. Die 48 zu gleicher Zeit aufgestellten Pechstäbchen gaben einen mittleren Betrag von

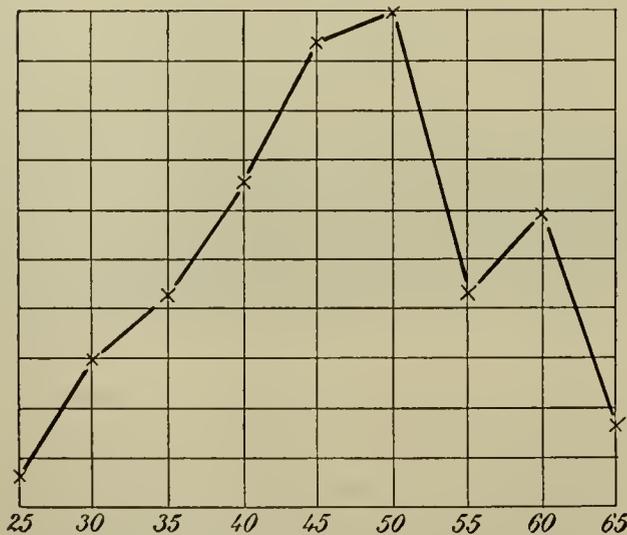


Fig. 5. Frequenz der erhaltenen Wurzelspitze-Richtungen. Die Abscisse gibt die Winkel an; die Ordinaten die Zahl der Exemplare.

$48,7^{\circ}$. Daß diese Richtung dichter bei 50° als bei 45° liegt, wurde oben schon zu erklären versucht. Weil der unvermeidliche Ablesungsfehler ca. $\pm 2,5^{\circ}$ beträgt, ist die Übereinstimmung dieser Mittelwerte sehr befriedigend.

Die mit den einzelnen Zahlen erhaltene Frequenzkurve ist aus Fig. 5 ersichtlich.

Eine Serie von Messungen wird vielfach nur dann als ganz befriedigend zu betrachten sein, wenn mit denselben eine regelmäßige Frequenzkurve zu bilden sein wird. Mein Material entspricht diesem Desideratum nur unvollkommen.

¹⁾ Bei Bestimmung mit einem Bremsband (vgl. Kleiber-Karsten, Physik für Techniker, 1902, S. 60) wurde die geleistete Arbeit ca. 133 Gramm-meter pro Sekunde gefunden, also noch nicht $\frac{2}{1000}$ Pferdestärke.

Doch gebe ich es, weil es wenigstens etwas ist, was ich liefere, und weil ein größerer Satz Beobachtungen, soviel ich weiß, bis dahin fehlt. Vielleicht daß ich später auf die Sache zurückkomme, wenn es mir gelingen sollte, eine fast ganz regelmäßige Rotation zu erhalten. —

Zu Demonstrationszwecken ist es zuweilen vielleicht emp-

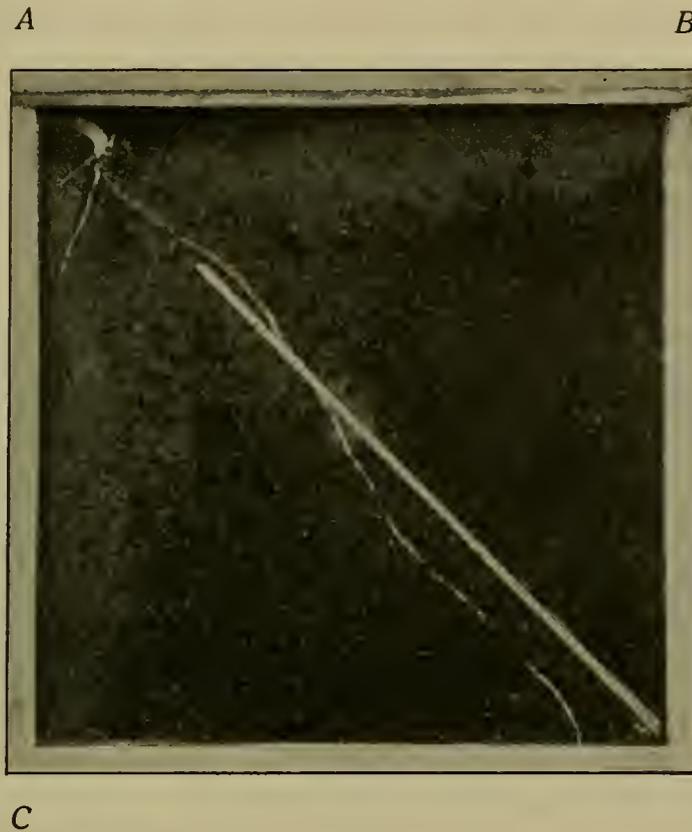


Fig. 6. Vegetationskasten mit Wurzel, gewachsen bei gleicher Beschleunigung infolge von Erdanziehung und Drehung.

fehlenswert, in anderer Art vorzugehen, um den Knightschen Versuch zu zeigen. Diese Manier ist auch aus Fig. 6 ersichtlich.

Bekanntlich wird häufig in Anlehnung an Sachs¹⁾ ein besonderer Vegetationskasten gebraucht, um das Wachstum der Wurzel zu zeigen. Das eigentümliche daran ist, daß derselbe zwei gegenüberliegende Glaswände hat, die von oben nach unten etwas konvergieren. Wenn die Samen längs des Glases aus-

¹⁾ Gesammelte Abhandlungen. - 2, 775. Fig. 50c.

gelegt werden, gehen normale Hauptwurzeln der Glasfläche entlang herunter.

Ich habe mir nun aus Zinkblech einige Kästchen machen lassen, die auf dem Rade in eine Art hölzernes Etui gesteckt und darin mit einem Holzkeil befestigt werden können, und zwar derart, daß die gläserne Fläche etwas geneigt ist. Mittels einer Schraube können diese Etuis der Achse mehr oder weniger genähert werden, und auch um eine vertikale Achse gedreht werden. Ihre Stellung wird nun jeden Tag so reguliert, daß erstens eine in der Höhe der Wurzelspitze auf der Glasfläche gedachte horizontale Linie nahezu durch die Rotationsachse geht, während zweitens die Spitze immer ungefähr in 25 cm von der Achse entfernt gehalten wird. Falls die Schwerkraft nicht wirkte, und nur die Rotation tätig wäre, würden die Spitzen bei ganz regelmäßigem Wachstum in horizontaler Richtung dem Glase entlang gehen, also in Fig. 6 nach AB; wäre nur die Schwerkraft tätig, dann gingen sie senkrecht herunter, also in der Figur parallel AC. Sind jedoch beide in gleichem Grade wirksam, und nur diese beiden, dann wächst die Wurzel intermediär, und folgt also dem weißen Strich, den man in der Figur auf dem Glase gezogen sieht. Es ist nun aus der Figur deutlich, wie die Wurzel in der Hauptsache wenigstens diesem Strich parallel gegangen ist. Die Abweichung unten ist vielleicht die Folge von Aerotropismus, verursacht durch die nächsten, im Boden befindlichen, kleinen Öffnungen.

Die Glasflächen werden bei einem Versuch mit Zinkscheiben verdunkelt. Zum Anfertigen der Photos wurden diese jedoch weggenommen. Bemerkts sei noch, daß die Erde gleichmäßig feucht gehalten werden muß, um hydrotropischen Abweichungen vorzubeugen. —

Anfangs war es mein Bestreben, mit Keimpflanzen zu arbeiten, die möglichst schnell eine geotropische Krümmung zeigten. Später habe ich dies jedoch wieder aufgegeben, weil die einfachste Versuchsanordnung diese ist, daß die Erbsen ohne weiteres auf Kork gespießt werden, und in diesem Fall wachsen sie jedoch nur dann normal, wenn sie sehr jung sind, und die Wurzel noch gar nicht oder kaum die Samenhaut durchbohrt hat; sind sie nur wenig älter, dann läßt ohne besondere Maßregeln oft die Wasserzufuhr zu wünschen übrig.

Bei der angegebenen früheren Versuchsanordnung waren aber die verwendeten Wurzeln zum mindesten mehrere Millimeter lang. Um die am schnellsten reagierenden heraus zu finden, wurden die Töpfe umgelegt, so daß die Wurzeln ungefähr horizontal gelagert waren. Und obgleich nun diese Manier ganz verlassen wurde, möchte ich auf etwas hinweisen, was dabei meine Aufmerksamkeit auf sich gezogen hat, und was von theoretischem Interesse sein könnte. Die Wurzeln reagierten nämlich der Hauptsache nach in zweierlei Art: einige wurden fast bis zur äußersten Spitze gleichmäßig gekrümmt (Fig. 7, a); andere zeigten die Krümmung nur in einem sehr beschränkten Teil, und blieben beiderseits von diesem gerade (Fig. 7, b).

a b



Fig. 7. Verschiedene Krümmungsart horizontal gelegter Wurzeln.

Ich meine nun, daß namentlich die ersteren Fälle eine besondere Verwertung verdienen in bezug auf die seit Darwin vielfach ventilerte, aber noch immer nicht endgültig entschiedene Frage nach dem Geschiedensein von Perzeption des Geotropismus und der dadurch hervorgerufenen Krümmung. Sogar die wenigstens scheinbar sehr beweisenden Versuche Czapeks werden angefochten, und so findet man in der letzten Auflage der Jostschen Vorlesungen die Frage als offen hingestellt.

Es scheint mir nun, daß, wenn die Spitze fast in ihrer ganzen Länge sich gleichmäßig krümmt, bis die äußerste Spitze vertikal steht, man doch nicht umhin kann, anzunehmen, daß der sich krümmende Teil es »erfahren« haben muß, wenn der in diesem Fall sehr kurze Endteil vertikal gerichtet ist. Oder mit anderen Worten, daß es die äußerste Spitze (Länge ca.

1—2 mm) ist, welche den Schwerkraftreiz perzipiert, und die Krümmung auslöst, also, daß Auslösung und Krümmung wenigstens der Hauptsache nach räumlich geschieden sind.

Man könnte nicht behaupten, daß die Wurzel sich krümmte bis ein anderer Teil, z. B. der vorletzte, eine bestimmte Richtung, sagen wir z. B. von 10^0 mit der Vertikalen bildet, und also den empfindlichen Teil dorthin verlegen; denn dann würde die Wurzel, wenn sie von Anfang an vertikal aufgestellt wurde, nicht vertikal weiter wachsen können. Es scheint mir also für den angegebenen Fall, die Perzeption wenigstens in der Hauptsache auf einen kleinen Teil nahe des Wurzelendes beschränkt zu sein.

5. Einrichtung zur Ausführung des Johnsonschen Versuchs.

Ich betrachte es als etwas von fundamentaler Wichtigkeit, daß bei Vorlesungen dieser Versuch vorgeführt wird, weshalb ich eine Methode suchte, um ihn mit einer gewöhnlichen Wage, welche den Vorteil der Empfindlichkeit hat, schnell anstellen zu können.

Folgende Art gibt mir volle Befriedigung.

Ich verwende die sogenannte »Studentenwage« von Beckers sons in Rotterdam, à 50 Mark. Am linken Arm wird die Schale fortgenommen und an deren Stelle ein Apparat aufgehängt, der mit der Schale an der anderen Seite, zusammen mit einem Tariergewicht, Gleichgewicht herstellt. Dieser Apparat besteht aus:

a) einer Stange aus Aluminium (St. in Fig. 8), an welcher sich unten eine Verbreiterung befindet. Auf dieser Verbreiterung muß die horizontale Wurzel aufliegen; seitlich sind an derselben Glasplättchen angebracht, welche ein seitliches Ausweichen der Wurzel verhindern.

Unten an dieser Verbreiterung hängt der Teil:

b) ein viel schwereres Kupfergewicht. Dies soll dazu dienen, um zu bewirken, daß bei weitem der meiste Stoff von a + b bedeutend unter der Wurzel liegt, so daß diese nur eine geringe, seitliche Verschiebung von a + b verursachen kann.

Weiterhin habe ich eine Glasdose, welche dazu bestimmt ist, die Keimpflanze zu tragen und ihre Umgebung feucht zu halten.

Um dies zu erreichen, ist an den Deckel ein Stück Kork gekittet, dessen untere Fläche sich in solcher Lage befindet,

daß die horizontale Wurzel in geeignete Höhe kommt. Die Erbse wird mit einer Stecknadel aufgespießt und mit einem baumwollenen Faden ein paarmal umwunden. Die Enden derselben hängen in etwas Wasser hinab, welches sich unten in der Glasdose befindet, und welches dienen muß um die Luft in der Dose und auch die Keimpflanze feucht zu erhalten. Die Abmessungen sind nun alle so genommen, daß bei ge-

St

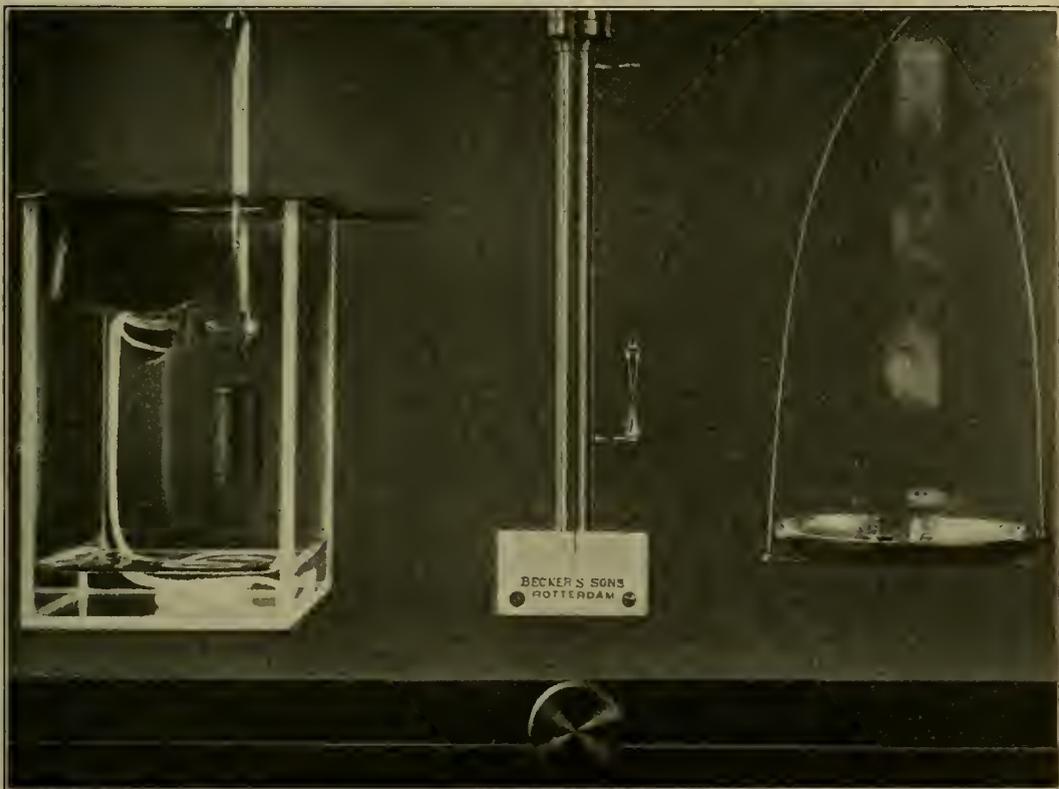


Fig. 8. Wage mit Einrichtung zum Vorführen des Johnsonschen Versuches (die Erbsenwurzel hat angefangen 1,5 g abwärts zu drücken).

hobenem, also nicht arretiertem Balken die Wurzelspitze gerade auf die dazu bestimmte Aluminiumfläche kommt; auf die andere Schale wird dann das Übergewicht gestellt. Natürlich wird der Balken soweit gehoben, bis der Index auf 0 kommt.

Bei Vorlesungen gebrauche ich, um sicher zu sein, daß der Versuch gelingt, gewöhnlich nur ca. 50 mal das Gewicht der sich krümmenden Spitze, also 0,5 Gramm. In günstigen Fällen kann die schwächige Erbsenwurzel ungefähr dreimal soviel Arbeit

verrichten; so betrug in dem Fall von Fig. 8 die Überbelastung 1,5 Gramm. Bei stärkerer Belastung gelingt der Versuch leichter bei etwas geänderter Versuchsanordnung¹⁾, obschon noch immer ohne daß das von Pfeffer verwendete Eingipsen erforderlich ist. Nach wenigen Stunden ist nun deutlich sichtbar, daß die Wurzel sich abwärts krümmt (vgl. Fig. 8), also daß sie sehr aktiv ist und nicht einfach herabfließt. Mit kräftigeren Wurzeln kann man natürlich entsprechend größere Übergewichte verwenden. So gelang es mir mehrmals die Wurzel von *Vicia Faba* bis zu 5 Gramm hinabdrücken zu sehen. Doch weist diese Pflanze auch wieder bedeutende Verschiedenheiten auf und der Versuch mißlingt zuweilen wieder mit viel geringerem Übergewicht.

Jedenfalls sind die zulässigen Belastungen jedoch merklich größer als diejenigen, welche dafür angegeben werden. Pfeffer erwähnt als Maximumdruck für *Vicia Faba* bei schiefem Auftreffen 1,5—2,2 g²⁾. Hierbei ist dann noch zu bemerken, daß in meinen Versuchen die Wurzeln anfangs ganz horizontal gelagert waren.

Über den in Fig. 8 dargestellten Fall bemerke ich noch das Folgende. Der Versuch war morgens 10 Uhr fertig gestellt; die Belastung betrug 1,5 g. Um 3 Uhr 30 nachmittags, als die Photographie von Fig. 8 angefertigt wurde, war die Wurzel deutlich im Begriff, die Stange herunter zu drücken: nur das Ende der Wurzelhaube war noch mit der Stützfläche in Berührung. Am folgenden Morgen wurde die Wurzel geschlängelt auf der Aluminiumfläche angetroffen, was wohl darauf hinweist, daß sie abwechselnd die Stange nieder gedrückt hatte und wieder ausgewichen war. Übrigens ist es durchaus keine Regel, daß sie diese Form annimmt. Das Ausweichen gibt zu mehrfachen Formveränderungen Veranlassung.

Wenn es der Wurzel gelingt, die Stange ganz herab zu drücken, geht sie dabei öfters fast genau vertikal, zuweilen

¹⁾ Es werden dann die Glasplättchen an der Aluminiumstange weggenommen und das Wurzelende zwischen den es bis zur Spitze berührenden Kork und die gewöhnliche Stützfläche des Aluminiumapparats gebracht. Die Belastung kann in diesem Falle bei der Rosinerbse bis zu 5 Gramm betragen, aber es dauert dann nicht lange bis die Wurzel seitlich ausweicht.

²⁾ Pflanzenphysiologie. S. 659.

auch mehr unregelmäßig abwärts. Die individuellen Verschiedenheiten sind groß, ganz wie beim gewöhnlichen Wachstum.

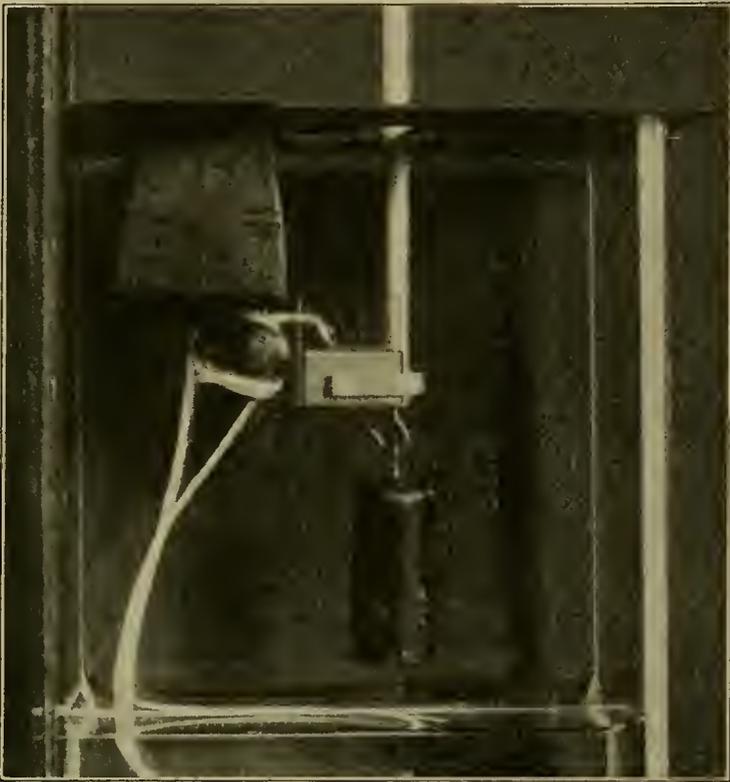


Fig. 9. Dieselbe Wage mit Erbsenwurzel in einem späteren Stadium des Versuchs.

Fig. 9 gibt eine Photographie von einem Fall, in dem die Richtung anfangs eine geringere, später eine größere Abweichung von der Vertikalen zeigte.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

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

Jahr/Year: 1910

Band/Volume: [2](#)

Autor(en)/Author(s): Giltay E.

Artikel/Article: [Einige Betrachtungen und Versuche über Grundfragen beim Geotropismus der Wurzel. 305-331](#)