Über dynamische Wirkungen innerer Spannungsdifferenzen von Flüssigkeiten und ihre Beziehung zum Saftsteigeproblem der Bäume.

Von **C. Steinbrinck.**

Mit 7 schematischen Figuren.

I. Einleitung.

Wenn man einem Physiker darüber berichtet, dafs ein dem Laien so einfach erscheinender Vorgang, wie das Aufsteigen des rohen Nahrungssaftes in den Bäumen in seinen Ursachen immer noch dunkel sei, so wird man nicht selten einer zuweilen mit einem Anflug von Überlegenheit verbundenen Verwunderung darüber begegnen. Denn da die gewaltigen Kräfte der Osmose event. im Verein mit der Kapillarität und dem Luftdruck auf den ersten Blick hierzu vollkommen ausreichend erscheinen, so ist der Vertreter der „exakten Wissenschaft“ leicht geneigt, es unzulänglicher exakter Schulung der Botaniker zuzuschreiben, dafs ein so alltägliches Problem noch rätselhaft ist. Wenn sich aber der letztere nun seinerseits durch die Andeutung zu verteidigen sucht, ob nicht die Schuld an dem mangelnden Verständnis des Saftsteigeproblems zum Teil wenigstens der Physik zufalle, so wird er grofsen Zweifels gewärtig sein müssen. Und dennoch wage ich zu behaupten, dafs jener Vorwurf einigermafsen gerechtfertigt ist. Untersuchungen über die Dynamik von Flüssigkeiten, die einige Jahre hindurch fortgesetzt sind, haben mich zu der Ansicht geführt, dafs selbst die Mechanik eines so gewöhnlichen Fundamentalapparates, wie es der Winkel- oder Saugheber ist, in den physikalischen Lehrbüchern, soweit sie mir bekannt sind, meist in ganz unklarer und schiefer, um nicht zu sagen verkehrter Weise dargestellt wird. Seine Funktion wird so behandelt, als ob der Luftdruck dabei eine *treibende* Rolle spiele, während sein Betrieb meines Erachtens in Wirklichkeit auf davon unabhängigen Druckdifferenzen *innerhalb der Flüssigkeit selbst* beruht. Fragt man den Physiker ferner, ob er zwischen den aktiven Kräften beim Schenkelheber und bei der Endosmose eine nahe Verwandtschaft anerkenne, so wird man sicherlich meist eine abweisende Antwort erhalten. Man braucht sich durch diese aber nicht irre machen zu lassen. Auch die Theorie der Osmose ist nämlich von den Physikern z. B. etwas stiefmütter-

lich behandelt worden. Was wir heute darüber wissen, verdanken wir hauptsächlich Botanikern und Chemikern und zwar das Gesetzmäfsige desselben in erster Linie den letzteren. Diese müssen aber ebenfalls zugeben, dafs der Mechanismus der Endosmose noch nicht genügend geklärt ist.

Bereits im Jahre 1899 habe ich nun bei Gelegenheit meiner ersten Untersuchungen über die sog. „elastische Entfaltung oder Schwellung“ von Pflanzengeweben [1]) zwischen diesem Vorgang und dem der osmotischen Saugung eine Parallele zu ziehen gesucht. Seitdem habe ich mich weiterhin vornehmlich aus den Mitteilungen der Zeitschrift für physikalische Chemie, sowie aus Einzelpublikationen hervorragender Chemiker über das Wesen dieses Mechanismus zu belehren gestrebt, ohne jedoch eine ganz klare und in sich konsequente, allgemein anerkannte Darstellung desselben zu finden. In der neuesten Auflage von Wüllners Lehrbuch der Experimentalphysik stiefs ich allerdings auf eine kurze Auseinandersetzung hierüber [2]), die mir einwandfrei und die auch mit den Ansichten Pfeffers [3]) übereinzustimmen schien. Jedoch mufste ich nachträglich die Erfahrung machen, dafs gerade dieser Passus Wüllners in einer Rezension des Wüllnerschen Lehrbuches von Ostwald [4]) als verfehlt bezeichnet wurde. Eine im Oktober ds. Jhrs. veröffentlichte Mitteilung von H. Dixon [5]): „A Transpiration Model“, die sich mit dem „anscheinenden Parodoxon“ beschäftigt, dafs eine Pflanzenzelle trotz hohem osmotischen Überdruck saugend wirken könne, hat den Anstofs zu den folgenden Zeilen gegeben. Dixon kommt nämlich ebenso wie ich zu dem Schlusse, dafs hierbei Druckdifferenzen im Wasser selbst tätig sind, indem dieses in der osmotischen Zelle negativ gespannt sei.

Ich hoffe nun zur Klärung dieses Problems beizutragen, wenn ich es hier im Anschlufs an die Theorie des Winkelhebers zu einer ausführlichen Erörterung bringe. Mich dünkt, dafs, wenn erst in den Erscheinungen der Kapillarität, des Hebers und der sog. elastischen Entfaltung von Pflanzengeweben eine gemeinsame Wurzel blofsgelegt ist, der Widerspruch gegen die Auffassung eher schweigen wird, dafs auch die Endosmose aus dieser Wurzel entspringt. Als diese gemein-

1) Siehe Ber. d. deutsch. Bot. Ges. XVII, pag. 111 u. 175. Vgl. auch Physikal. Zeitschrift II, 1901, pag. 493—496.

2) Wüllner, Lehrb. d. Experimentalphys. 1895, I, pag. 674, und 1896, II, pag. 688 u. 689.

3) Pfeffer, Pflanzenphysiologie, 2. Aufl. 1897, I, pag. 126.

4) Zeitschr. f. Physikal. Chemie 1894, XV, pag. 522.

5) Procced. of the Royal Dublin Society 1903, X (N. S.), Part. I, pag. 114—121.

same Ursache erscheint mir nun das Ausgleichsbestreben von inneren Spannungen der Flüssigkeit. Verschieden sind jedesmal nur die Umstände, welche die Dehnungszustände innerhalb der Flüssigkeit hervorrufen. Es wird mein Bestreben sein, dies in den nächsten beiden Abschnitten auseinander zu setzen. Beigefügt ist denselben ein ferneres kurzes Kapitel, worin die gewonnenen Anschauungen zu einer Prüfung der strittigen Auffassungen über das Saftsteigeproblem verwertet werden sollen.

II. Zur Theorie des Schenkelhebers.

1. Die bisherigen Anschauungen darüber.

In der bekannten, vortrefflichen „Physikal. Technik“ von Frick, 6. Aufl. herausg. von O. Lehmann-Karlsruhe, Bd. I, 1890, findet sich pag. 313 hinsichtlich des Winkelhebers folgender Passus: „Es wird zu wenig Gewicht darauf gelegt, dafs der Heber nur fliefsen kann, wenn der Luftdruck ausreicht, die beiden Schenkel gefüllt zu erhalten, so dafs man, wie Emsmann (1885) bemerkt, selbst in verbreiteten und im übrigen sehr guten Büchern die Bemerkung findet, dafs es mit Hilfe des Hebers möglich sei, Wasser über die gröfsten Höhen zu leiten.“ Wenn diese Auffassung früher wirklich wiederholt geäufsert worden ist, so bemühen sich jedenfalls die heutigen physikalischen Lehrbücher, die mir zur Hand sind, fast durchweg, im Gegensatz dazu den Standpunkt von Emsmann und Frick nachdrücklich zu betonen, d. h. besonders hervorzuheben, dafs der Schenkelheber ein Luftdruckapparat sei und die Flüssigkeiten aus diesem Grunde nicht über die barometrische Höhe hinüberbefördern könne.

So beginnen Koppes Anfangsgründe der Physik, bearbeitet von Husmann, 20. Aufl. 1898, die Besprechung des Hebers pag. 114 ausdrücklich mit den Worten: „Auf den Gesetzen des Luftdruckes beruht auch der Saugheber“. Später heifst es pag. 115: „Man sieht aus dieser Darstellung auch noch, dafs das Wasser im Heber zu keiner gröfseren Höhe als 10 m über dem Wasserspiegel emporsteigen kann; bei einem mit Quecksilber gefüllten Heber würde diese Höhe nur 76 cm betragen“. Und es folgt dann die Anmerkung: „Der Heber war schon den Alten bekannt; da ihnen aber die Kenntnis des Luftdruckes abging, so suchten sie die Erscheinungen desselben aus einer anziehenden Kraft des leeren Raumes (horror vacui) zu erklären“.

Der „Leitfaden für den Unterricht der Experimentalphysik nach dem Lehrbuch von E. Budde, bearbeitet von Kiefsling“, 1902,

bringt den Saugheber ebenfalls unter der Überschrift: Anwendungen des Luftdrucks. Auch in ihm findet sich ebenso wie in den Lehrbüchern der Physik von Münch (17. Aufl. 1882, pag. 121) und Reis (7. Aufl. 1890, pag. 212) ausdrücklich die barometrische Höhe als Grenze des Hubes hingestellt. Münch begründet diese Ansicht mit den Worten: „Wäre $h \geq 10{,}5\,m$, so würde keine Bewegung von innen nach aufsen erfolgen, weil die Flüssigkeit nicht bis zum höchsten Punkte gehoben werden würde“. Reis sagt darüber: „Wäre die Höhe gleich 10 m, so wäre der Druck von innen Null, also das Fliefsen unmöglich“.

In Lommels Lehrbuch der Experimentalphysik (2. Aufl. 1895) heifst es pag. 128 (in wörtlicher Übereinstimmung mit seinem Lexikon der Physik und Meteorologie, 1882, pag. 147): „Der Heber ist eine gebogene Röhre, welche dazu dient, eine Flüssigkeit aus einem Gefäfse mit Hilfe des Luftdrucks, der sie bis an den Gefäfsrand hebt, ausfliefsen zu lassen“ und später: „Damit der Heber wirksam sei, darf sein höchster Punkt nicht höher über dem Flüssigkeitsspiegel liegen, als die Höhe der Flüssigkeitssäule beträgt, die dem Luftdruck das Gleichgewicht hält“ [1]).

Wohlgemerkt handelt es sich bei allen diesen Erörterungen um das Weiterfliefsen des gefüllten Hebers, nicht etwa um seine erstmalige Füllung. Der Gedankengang jener Lehrbücher ist ursprünglich ganz richtig und zwar bekanntermafsen der folgende: An der obersten Stelle des Hebers herrscht vom kürzeren Schenkel her der äufsere Druck $P = L - h$ [2]), von dem längeren her der Druck $p = L - H$. Der Heber fliefst nun darum, weil $P - p = (H - h) > 0$. Der Fehler der zitierten Urteile der Lehrbücher liegt nun darin, dafs sie die Gröfse $P' = H - h$, nämlich das tatsächlich vorhandene Übergewicht des längeren Flüssigkeitsfadens nur als rechnerische Mafszahl für den Unterschied der beiderseitigen Luftdruckgröfsen, nicht aber als physikalisch wirkliche und unabhängig vom Luftdruck existierende Kraft ansehen. Mit anderen Worten, sie schmuggeln gewissermafsen in Gedanken die Gröfse L, die sich infolge doppelten

1) Lommel führt als Beweis für die oben angegebene Bedeutung des Luftdrucks auch die Wirksamkeit einer selbsttätigen Waschflasche an. Dies Argument ist aber nicht zutreffend, denn die Regulierung dieser Flasche beruht ja gerade darauf, dafs der Luftdruck beiderseits ungleich wird. Unter gewöhnlichen Umständen hebt sich dagegen der Luftdruck beiderseits auf (siehe die folgenden Zeilen des Textes).

2) L, H und h bedeuten den Luftdruck bezw. die Höhen der Flüssigkeitssäulen, alle in gleichem Mafse ausgedrückt (vgl. die Fig. 7, pag. 148).

Vorzeichens weggehoben hat, wieder ein, indem sie sich anstatt H—h immer (L—h)—(L—H) vorstellen und kommen so von der Einbeziehung des Luftdruckes nicht los. Daher heifst es auch noch in dem neuesten der gröfseren physikalischen Lehrbücher, die mir zu Gebote stehen, nämlich in Müller-Ponillet, herausgegeben von Pfaundler, 10. Ausgabe, Bd. I, 1902, pag. 471 vom Saugheber: „In dem Mafse, als wie das Wasser ausläuft, wird auf der anderen Seite durch den Luftdruck von neuem Wasser in die Röhre getrieben". Diese Lehrbücher können sich demnach, um kurz zu rekapitulieren, den Heberprozefs nur so vorstellen, dafs sie auf der einen Seite eine treibende Kraft L—h, auf der anderen eine widerstehende L—H annehmen, die beide durch den Luftdrucküberschufs repräsentiert werden; daher auch der zitierte Schlufs von Münch und Reis, das Fliefsen müsse aufhören, wenn L—h = 0, weil dann keine treibende Kraft mehr da wäre.

2. Theorie des Hebers als Kohäsions- oder Binnendrucksmechanismus.

Die soeben bezeichnete Auffassung von Münch, Reis u. a. ist unzweifelhaft ein grofser Irrtum. Man kann sich diesen auf doppelte Weise klar machen, indem man die Flüssigkeiten in ihrem Verhalten entweder mit soliden oder mit gasförmigen Körpern vergleicht. Wählt man den ersteren Weg, so wird es sich empfehlen, etwa an Stelle des Quecksilbers im Saugheber durch die Schenkel desselben mittelst einiger Rollen ein schweres Drahtseil geführt zu denken. Niemand wird daran zweifeln, dafs, wenn nicht etwa die Reibung zu grofs ist, das im längeren Schenkel herabhängende Seilstück infolge seines Übergewichtes hinabsinken und dabei das kürzere Stück in die Höhe ziehen wird. In derselben Weise mufs aber auch ein Quecksilber- oder anderer Flüssigkeitsfaden ganz unabhängig vom Luftdruck durch die Schwere abwärts gezogen werden, so lange seine Kohäsion ausreicht.

Wenn ein Quecksilberheber tatsächlich zu fliefsen aufhört, sobald oder noch ehe die barometrische Höhe erreicht ist, so liegt dies entweder daran, dafs nicht genügend für völlige Beseitigung der Luft aus dem Heberrohre Sorge getragen worden ist, oder daran, dafs das Quecksilber an der Wandung des Rohres nicht haftet. Denn das winzigste zurückgebliebene Luftbläschen, oder Spuren von Luft, die überhaupt nicht sichtbar werden, unterbrechen, wenn sich die Steighöhe desselben der barometrischen Grenze nähert, indem

diese Luft sich stark ausdehnt, unfehlbar den Flüssigkeitsfaden. Und wenn das Quecksilber am Rohre nicht adhäriert, so löst es sich, sobald die barometrische Höhe erreicht ist, in der obersten Gegend des Hebers von der Wand ab, der Faden schnürt sich ein und reifst, wenn er sehr dünn geworden ist, infolge des Gewichtes der daran ziehenden tiefer gelegenen Quecksilbermasse. Gelingt es aber, durch geeignete Mittel das Zerreifsen zu verhindern, so mufs der Heber, da die Kohäsion des Quecksilbers sehr beträchtlich ist, imstande sein, dasselbe weit über die barometrische Höhe hinüberzubefördern.

Bei dem gewöhnlichen lufthaltigen Wasser kommt die Unterbrechung des Flüssigkeitsfadens im Heber, längst ehe die barometrische Höhe erreicht wird, dadurch zustande, dafs Luftblasen frei werden und Dampfblasen auftreten. Die Anwendung luftfreien Wassers und luftleerer Röhren sichert aber den Zusammenhang der flüssigen Säule und damit auch das Weiterfliefsen des Hebers selbst für sehr beträchtliche Erhebungen über die barometrische Grenze.

Der Irrtum der Lehrbücher kann demnach dem Umstand zugeschrieben werden, dafs sie an diese Kohäsionsverhältnisse nicht gedacht haben. Unter gewöhnlichen Umständen spielt der Luftdruck allerdings beim Heber ebenfalls eine grofse Rolle, aber nur eine statische, insofern er die Form des Flüssigkeitsfadens erhält, sein Zerreifsen hindert. Eine hebende oder treibende, dynamische Bedeutung kommt ihm aber nicht zu. Hiernach könnte man den Heber also wohl einen Kohäsionsmechanismus, aber nicht einen Luftdruckapparat nennen. Denn zu seinem Betrieb ist der Luftdruck entbehrlich, die Kohäsion aber nicht.. Bei der Saugpumpe ist es umgekehrt; die Flüssigkeitssäule, die zu heben ist, darf unterbrochen sein, der Luftdruck aber nicht fehlen [1]).

---

1) Da die Botaniker durch die Versuche von Dixon und Joly, sowie von Askenasy, und durch die von diesen Forschern beigebrachten Zitate aus Donny, Berthelot, Worthington über die bedeutende Höhe der Kohäsion von Flüssigkeiten hinreichend unterrichtet sind (beim Wasser sind ca. 50 Atmosphären experimentell nachgewiesen), so beschränke ich mich an dieser Stelle darauf, auf jene Schriften hinzuweisen. Es sind vornehmlich die drei: a) Dixon und Joly, On the ascent of Sap. Transact of the Royal Society, London 1895, Vol. 186, pag. 563—576. b) Askenasy, Über das Saftsteigen. Verhandl. des Naturhist.-Mediz. Vereins zu Heidelberg, N. F. V, 1895. c) Askenasy, Beiträge zur Theorie des Saftsteigens. Ebenda 1896, V. — Ob man das Mafs der Kohäsionsfestigkeit ohne weiteres mit dem des Kohäsionsdruckes (Oberflächen- oder Normaldruckes) identifizieren kann, lasse ich hier dahingestellt sein. Für den Kohäsionsdruck sind bekanntlich Tausende von Atmosphären errechnet worden.

Wie bereits oben (pag. 131) angedeutet, läfst sich aber unser Problem auch von einer anderen Seite betrachten, indem man die Eigenschaften der Flüssigkeiten heranzieht, die sie mehr den gasförmigen Stoffen nähern. Wir brauchen hierbei die kinetische Flüssigkeitstheorie nicht einmal in Anspruch zu nehmen und wollen uns lediglich auf die Grundeigenschaften der flüssigen Substanzen stützen, die Wüllner im Lehrbuch der Experimentalphysik 5. Aufl., 1895, Bd. I pag. 314 folgendermafsen kennzeichnet: „Aus der, soweit wir beurteilen können, vollkommen freien Beweglichkeit der Flüssigkeitsteilchen gegen einander ergibt sich zunächst, dafs eine flüssige Masse nur dann im Gleichgewicht sein kann, wenn die auf irgend ein Teilchen wirkenden Kräfte sich das Gleichgewicht halten, wenn also die auf das Teilchen wirkenden Kräfte nach gerade entgegengesetzten Richtungen genau gleich sind und deshalb sich aufheben. Denn würde der Druck auf das Molekül nach der einen Richtung stärker als nach der gerade entgegengesetzten, so würde das Molekül, da es auch dem kleinsten Drucke folgt, sich nach der Richtung der gröfseren Kraft bewegen."

Knüpfen wir nun unsere Auseinandersetzungen an die Fig. 1, welche ein aufrechtes, gleichschenkliges U-Rohr darstellt, das mit einer Flüssigkeit vollständig gefüllt ist und dessen offene Enden unten in je ein Gefäfs mit derselben Flüssigkeit eintauchen. Die Flüssigkeitsspiegel seien in beiden Gefäfsen zunächst gleich angenommen. Vom Luftdruck wird vollständig abgesehen, er kann Null sein oder viele Atmosphären betragen; das ist ganz gleichgiltig. Es ist kein Zweifel, dafs der Binnendruck der Flüssigkeit von unten nach oben allmählich abnimmt und z. B. am Gipfel des U-Rohres um das Gewicht der ganzen Flüssigkeitssäule kleiner ist als an der Oberfläche der Flüssigkeit in den Gefäfsen. Trotzdem kann keine Bewegung hinüber oder herüber zu-

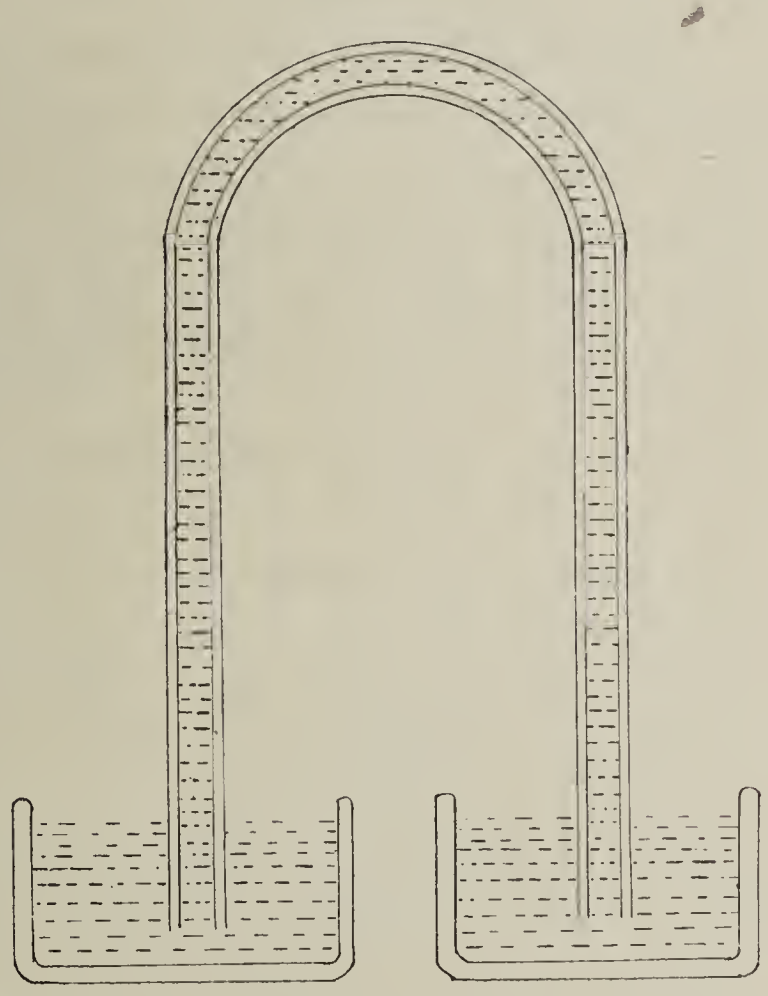


Fig. 1.

stande kommen, weil ja in jedem Niveau auf beiden Seiten genau der gleiche Binnendruck herrscht. Sobald man aber eines der Gefäfse, etwa das rechte, auch nur ein wenig senkt, wird innerhalb des Schenkels, der in dieses Gefäfs taucht, der Dehnungszustand gröfser und somit der Binnendruck geringer als in dem gleichen Niveau des anderen Schenkels, weil ja an jeder Flüssigkeitsschicht des ersteren eine schwerere (längere) Flüssigkeitssäule nach unten zieht. Diese Druckdifferenzen müssen aber bewirken, dafs Substanzteilchen aus dem kürzeren in den längeren Schenkel hinüberwandern, bis ein Ausgleich stattgefunden hat. Und dieser ist erst erreicht, wenn sich die Niveaux der Flüssigkeit in beiden Gefäfsen wieder in gleicher Höhe eingestellt haben.

Diese Notwendigkeit bleibt unverändert auch bestehen, wenn die Höhe der Schenkelrohre die barometrische Grenze, beim Quecksilber z. B. 76 cm, überschreitet. Man wende nicht ein, dafs dies undenkbar wäre. Wie oben gesagt, gibt es Mittel, das Ablösen des Quecksilbers von der Rohrwand zu hindern. Hat doch Askenasy das Quecksilber mit ausgekochtem Wasser festgehalten. Vermutlich täte auch ein verzinntes Eisen-, ein Zink- oder Bleirohr denselben Dienst.

Will man nun von diesen Gesichtspunkten aus den Grundfehler der landläufigen Hebertheorie kennzeichnen, so kann man ihn auch dahin formulieren, dafs dieselbe die selbständigen Binnendruckdifferenzen der Flüssigkeiten für nichts geachtet und dagegen die Gröfse des Luftdrucks, der, weil beiderseits gleich, aktiv gar nicht in Betracht kommt, allein als mafsgebend angenommen hat.

3. Über den experimentellen Nachweis der vorgetragenen Theorie.

Man wird nun von einem exakten Forscher erwarten, dafs er seine Behauptung nicht nur theoretisch begründet, sondern, wenn möglich, auch experimentell belegt. In unserem Falle wäre nachzuweisen, dafs Flüssigkeiten mit dem Heber tatsächlich weit über die barometrische Höhe hinweggehoben werden können. Durch die Liebenswürdigkeit des Herrn Oberregierungsrates Prof. Dr. Weinhold bin ich jedoch der Mühe dieses Beweises völlig enthoben worden. An ihn hatte ich mich nämlich behufs jenes Nachweises um Rat und Unterstützung gewandt, weil Herr Prof. Weinhold der einzige Physiker ist, bei dem ich in der Literatur eine Angabe darüber fand, dafs die allgemeine Behauptung, der Heber stelle seine Tätigkeit im Vakuum ein, unter Umständen keine Giltigkeit habe. Aufserdem hat aber Weinhold an der betreffenden Stelle das Weiter-

fliefsen auch schon auf die Kohäsion bezw. Oberflächenspannung der Flüssigkeiten zurückgeführt. In seinem allbekannten wertvollen Werke: „Physikalische Demonstrationen“ heifst es nämlich (II. Aufl. 1887, pag. 174) unter der Überschrift: „Der Heber hört im Vakuum zu fliefsen auf“, wörtlich: „Zum Nachweis, dafs der Heber im Vakuum aufhört zu fliefsen, eignet sich nur Quecksilber. Man hat zwar Apparate konstruiert, um einen Heber mit Wasser erst dann zu füllen, wenn das Pumpen schon ziemlich weit getrieben ist. Dieselben sind aber kompliziert, erfordern möglichst luftfreies Wasser und versagen doch noch leicht wegen der Kohäsion.“ Nachdem nun ein Quecksilberapparat beschrieben ist, fährt der Verf. hinsichtlich desselben fort: „Zuweilen fliefst der Heber noch, wenn der Druck der Luft im Apparat bereits kleiner geworden ist, als der der Quecksilbersäule im inneren Schenkel des Hebers. In solchen Fällen bewirkt die Oberflächenspannung und Kohäsion des Quecksilbers das Zusammenhalten desselben im Heber. Mäfsige Erschütterung, Schlag mit der Hand auf den Tisch, auf dem die Luftpumpe befestigt ist, bewirkt dann meist das Zerreifsen des Quecksilbers“.

Wie man aus diesem Texte ersieht, hat Weinhold seine Wahrnehmungen nicht zu einer prinzipiellen Klärung der Hebertheorie verallgemeinert. Auf eine briefliche Anfrage teilte er mir in der Tat mit, dafs er mit jenen Sätzen nur auf einen beim Experimentieren beachtenswerten Umstand habe aufmerksam machen wollen. Ich schlug Herrn Prof. Weinhold nun vor, zum Zwecke eines bequemen allgemeinen Nachweises meiner Auffassung den von ihm als zu kompliziert bezeichneten Apparat eines dazu geeigneten Wasserhebers dahin abzuändern, dafs man nicht den ganzen Apparat unter den Rezipienten stellte, sondern das Heberrohr mit zwei geschlossenen, wasserhaltenden Gefäfsen verbände und nur diese evakuierte. Als solche Gefäfse sollten z. B. zwei zweihalsige (Wulff'sche) Flaschen verwendet werden, von denen je ein Tubus den Heber aufnehmen, während die anderen miteinander und mit der Luftpumpe (resp. mit vorher evakuierten grofsen Behältern) verbunden werden sollten. Herr Oberregierungsrat Weinhold nahm sich der Sache nun mit lebhaftem Interesse an, fand das Unpraktische des vorgeschlagenen Apparates bald heraus, ersetzte die Flaschen einfach durch die Kugeln eines Wasserhammers, deren Verbindungsrohr zweckmäfsig gebogen den Heber darstellt, und konnte so auch die Luftpumpe entbehren. Nach Herrn Prof. Weinholds Bericht arbeitet dieser „Vakuumheber“ sowohl mit Wasser wie mit Quecksilber tadellos. So übersteigt z. B. das Quecksilber darin

eine Höhe von 40 cm, auf die sich Herr Prof. Weinhold übrigens nur aus Bequemlichkeitsrücksichten beschränkt hat. Auch der Freiluftversuch mit Quecksilber gelang ihm vollkommen und in ebenso überraschend einfacher Weise, indem er hierbei, wie bei dem eben erwähnten Versuche nach dem Fingerzeige von Askenasys Experiment, das Quecksilber mittels Wassers an der Wand festhielt. Herr Oberregierungsrat Weinhold wird selbst über seine Ergebnisse in Poskes Zeitschrift für physikalischen und chemischen Unterricht ausführlichere Mitteilung machen. Durch sie ist also die Luftdrucktheorie des Hebers endgiltig beseitigt.

Nach meiner Meinung ist es ja vollkommen gleichgiltig, wenn für die üblichen Schulversuche mit lufthaltigem Wasser, trockenem Quecksilber usw., sowie für die Praxis des gewöhnlichen Lebens der Luftdruck zur Erhaltung der Kohäsion tatsächlich statisch eingreifen mufs. Denn es handelt sich für eine exakte Theorie des Hebers, sowie für die Parallele mit den im folgenden Kapitel hier zu besprechenden Vorgängen wesentlich nur um die Feststellung, dafs die Binnendruckdifferenzen von Flüssigkeiten allein für sich zu so erheblichen dynamischen Leistungen ausreichen, falls die Kohäsion gesichert ist.

III. Zur Theorie der osmotischen Saugung.

1. Der Widerstreit der bisherigen Anschauungen.

Es ist bekannt, dafs der Chemiker van't Hoff um die Mitte der 80er Jahre aus den Versuchsergebnissen Pfeffers zahlenmäfsig das Gesetz ableitete, dafs der osmotische Druck dem Gasdruck gleich sei, den die gelösten Moleküle im gleichen Raum bei derselben Temperatur und demselben Druck ausüben würden [1]). Er schrieb ihn daher dem Stofs dieser Moleküle zu. Durch den wärmetheoretischen Zusammenhang des osmotischen Druckes mit der Dampfspannung, dem Siede- und Gefrierpunkt etc. wurden auch diese Gröfsen in Beziehung zum Molekulargewicht gebracht. Hierdurch erwies sich das Gesetz von solcher Bedeutung für die Chemie, dafs dieselbe infolgedessen nach Ostwald [2]) in zehn Jahren „einen so bedeutenden Fortschritt in ihrer Entwicklung zu einer von allgemeinen Prinzipien beherrschten Wissenschaft gemacht hat, wie vielleicht nie vorher durch einen derartigen Gedanken". Seit seinem Bestehen hat das van't Hoff'sche Gesetz in unzähligen Fällen eine rechnungsmäfsige Bestätigung gefunden, ohne dafs jedoch die volle Einsicht in das

1) Zeitschr. f. physikal. Chemie 1887, I, pag. 481.

2) Grundrifs der Chemie, 1899, III. Aufl., pag. 190.

Wesen des osmotischen Mechanismus erreicht worden wäre. Die Ansichten hierüber sind vielmehr auch heute noch nicht geklärt.

Die kinetische Ableitung der Gesetze des osmotischen Druckes (im ursprünglichen Sinne van't Hoffs) ist nach Ostwald[1]) „bisher auf unüberwindliche Schwierigkeiten gestofsen". „Es ist kaum je ein rein erfahrungsmäfsig definierbarer und nachweisbarer Begriff so vielfach mifsverstanden worden wie der des osmotischen Druckes. Verfolgt man diese Mifsverständnisse auf ihren Ursprung zurück, so findet man sie meist durch hypothetische Zutaten verursacht, durch die man diesen Begriff hat erklären oder rechtfertigen wollen" [2]).

Einem interessanten Beispiel eines solchen Mifsverständnisses begegnen wir in der Dissertation des Amerikaners Pupin[3]) aus dem Jahre 1889, der gegen die kinetische Hypothese das Bedenken geltend machte, dafs bei der Übereinstimmung des Gasdruckes und des osmotischen Druckes „eine 49proz. Chlorkaliumlösung mit ihrem osmotischen Druck von 53 Atmosphären in dünnwandigen Gefäfsen nicht aufbewahrt werden" könne. Und in seiner Bemerkung zu dem Einwand des Herrn Pupin[4]) mufste selbst ein Forscher wie Bredig zugeben, dafs ihn selbst Pupins Bedenken anfänglich sehr frappiert habe. Ein solcher Angriff auf die kinetische Hypothese van't Hoffs war allerdings nur in ihren Jugendzeiten möglich; aber auch in den letzten Jahren sind die Versuche noch nicht unterblieben, sein Gesetz nach alter Weise aus der Anziehung des gelösten Stoffes abzuleiten[5]). Bekanntermafsen hat diese ältere Anschauungsweise mehrere Jahre hindurch an Lothar Meyer einen sehr eifrigen Verteidiger gefunden, wobei der Streit sich speziell dahin zuspitzte, ob der osmotische Druck von dem gelösten Körper oder von dem Lösungsmittel herrühre. Am Schlusse einer solchen Diskussion findet sich van't Hoff mit diesem Zwiespalt in folgenden Worten ab[6]): „Wiederum haben wir die im Grunde zwecklose Frage: Was übt den osmotischen Druck aus? Wirklich, es werde betont, ich kümmere mich schliefslich nur um dessen Gröfse; da er sich dem Gasdruck gleich gezeigt hat, so ist man geneigt, sich einen ähnlichen Mechanismus wie bei den Gasen beim Zustandekommen zu denken".

1) Zeitschr. f. phys. Chemie 1897, XXII, pag. 366.

2) Ostwald, Grundrifs der Chemie 1899, pag. 190.

3) Der osmotische Druck und seine Beziehung zur freien Energie. Berlin 1889.

4) Zeitschr. f. phys. Chemie 1889, IV, pag. 444.

5) Vgl. z. B. die Abhandlung von Barmwater, Zeitschr. f. phys. Chemie 1899, XXVIII, pag. 115, sowie auch Schreber, ebenda pag. 79.

6) Zeitschr. f. phys. Chemie 1892, IX, pag. 485.

2. Stellung der Aufgabe.

Der Physiker, und namentlich der Botaniker, ist aber vielfach in ganz anderer Lage wie der Chemiker. Denken wir speziell an das Saftsteigeproblem, so können wassergesättigte Pflanzenzellen überhaupt keine wasserhebende Tätigkeit mehr leisten, mag ihr osmotischer Druck noch so hoch sein. Daher kommt es hierbei wie in anderen Fällen nicht so sehr darauf an, diejenige Zahl zu ermitteln, die der Chemiker gew. κατ' ἐξοχήν als osmotischen Druck bezeichnet, nämlich den maximalen Überdruck innerhalb einer gesättigten Zelle, als vielmehr die Bedingungen zu kennen, unter denen eine nicht gesättigte Zelle arbeitet und über die Kräfte unterrichtet zu sein, die bei dieser Arbeit ins Spiel kommen, d. h. Wasser in sie hineintreiben (oder event. auch aus ihr herausziehen). Um diesen Unterschied in den beiderseitigen Aufgaben zu kennzeichnen, habe ich absichtlich für dieses Kapitel nicht die Überschrift: Zur Theorie des osmotischen Druckes, sondern die Worte: Zur Theorie der osmotischen Saugung gewählt.

Ich möchte mich nämlich im folgenden auf diese allgemeinere Frage aus der Lehre der Osmose beschränken und Zahlenmäfsiges nur nebenbei berühren. Unsere Frage lautet demnach: Welche Kraft treibt den Stoff, der als Lösungsmittel verwendet worden ist (in unserem Falle stets Wasser) aus der Umgebung einer ungesättigten osmotischen Zelle in diese hinein?

3. Die bisherigen Urteile über die Ursache der osmotischen Saugung.

Lüpke (Grundzüge der Elektrochemie, II. Aufl. 1896, pag. 73) nennt unser Problem eine noch wenig erörterte Frage. Einen eigenartigen Anlauf zur Beantwortung derselben habe ich in Nernsts Theoret. Chemie [1]) gefunden. Nachdem er nämlich die Einrichtung einer Pfeffer'schen mit Rohrzucker beschickten Zelle beschrieben hat, fährt er fort: „Durch die Niederschlagsmembran wurden die Zuckermoleküle am Austritt gehindert, nicht aber das Wasser am Passieren der Zellwand. Die Folge davon ist . . . Druckwirkung auf die halbdurchlässige Membran; da letztere aber nicht nachgeben kann, weil sie in die widerstandsfähige Tonzelle eingelagert ist, so wird nach dem Prinzip von Aktion und Reaktion umgekehrt ein Zug auf die Lösung ausgeübt werden, der sie von

---

1) Theoret. Chemie, III. Aufl. 1900, pag. 132.

der Membran hinwegzutreiben sucht. Diesem Zug kann Folge geleistet werden, indem die Lösung in dem Steigrohr unter gleichzeitigem Eindringen von Wasser emporsteigt und zwar wird die Steigehöhe so grofs werden, bis der hierdurch geweckte hydrostatische Gegendruck das weitere Eindringen von Wasser verhindert."

Sehr plausibel erscheint diese Darstellung schwerlich, sie erinnert einigermafsen an den horror vacui. In van't Hoffs populärer Abhandlung: „Über die Theorie der Lösungen" [1]) findet sich ferner folgender Satz: „In bezug auf die vielumstrittene Frage, ob der osmotische Druck von Anziehung der gelösten Substanz auf das aufserhalb der semipermeablen Wand befindliche Lösungsmittel oder aber vom Anstofsen und Zurückprallen der gelösten Teilchen herrührt, läfst sich aussagen, dafs der betreffende Beweis keine diesbezüglichen Voraussetzungen macht". Ob aber van't Hoff hierin durch den zweifellos auffälligen und wohl beabsichtigt erscheinenden Zusatz der beiden von mir durch Sperrdruck hervorgehobenen Worte: „und Zurückprallen" eine ähnliche Auffassung hat andeuten wollen, wie sie Nernst in den zitierten Worten kundgibt, ist mir nicht klar. Ursprünglich hat van't Hoff nämlich ein viel anschaulicheres Bild von dem osmotischen Vorgang gegeben, das er besonders auch bei der Diskussion mit Lothar Meyer [2]) ausgeführt hat und das von Pfeffer ebenfalls vorzugsweise empfohlen wird. Der Letztgenannte sagt hierüber nämlich [3]): „Übrigens wird alles am übersichtlichsten und klarsten unter Annahme der Theorie, die van't Hoff unter Zugrundelegung meiner Untersuchungen entwickelte. . . . Wenn in einer semipermeablen Zelle Zuckermoleküle im Wasser herumfliegen, so wirken sie nach dem Mariotte'schen Gesetze und der Avogadro'schen Hypothese drückend, wie etwa Kohlensäure in einer gaserfüllten Zelle, die nicht Kohlensäure, wohl aber Wasserstoff (der hier an Stelle des Wassers tritt) diosmieren läfst, aber dieses Gas nicht verliert, weil die Zelle von Wasserstoff umgeben ist." Der Wasserstoff mufs nämlich erfahrungsgemäfs so lange eindringen, bis sein Partialdruck in der Zelle so grofs geworden ist, wie die Spannung der äufseren Wasserstoffatmosphäre.

---

1) Sammlg. chem. und chem.-techn. Vorträge von Ahrens, Bd. V, Stuttgart 1900, pag. 4.

2) Zeitschr. f. phys. Chem. 1890, V, pag. 23 und 174.

3) Pflanzenphys., II. Aufl. 1897, I, pag. 126.

In seinem Lehrbuch der Experimentalphysik[1]) hat Wüllner nun diesen Vergleich für die Pfeffer'sche Zelle folgendermafsen ausgeführt: „Innerhalb der Lösung sind in der Volumeinheit Zuckermoleküle und wenn wir von einer etwaigen Kontraktion der Lösung absehen, in dem Mafse weniger Wassermoleküle, als Zuckermoleküle vorhanden sind. Der Partialdruck des Wassers ist somit innen und aufsen verschieden, es mufs demnach so lange Wasser in die Zuckerlösung diffundieren, bis der Partialdruck des Wassers im Innern gleich demjenigen aufsen geworden ist, bis also der Überdruck dem in der Lösung ursprünglich vorhandenen Drucke des Zuckers gleich geworden ist. Der durch die Endosmose entstandene Überdruck gibt also den Partialdruck des gelösten Zuckers im Innern der Lösung." Eine dem ganz entsprechende Darstellung findet sich im zweiten Bande von Wüllners Werk pag. 688 und 689 wieder.

Merkwürdigerweise hat aber Ostwald gegen diese Auffassung Einspruch erhoben. In einer Rezension des ersten Bandes der 5. Aufl. von Wüllners Werk[2]) hebt er ausdrücklich die oben zitierte Stelle pag. 674 als nicht befriedigend hervor; es ginge nicht an, „den im Innern der Zelle herrschenden Druck als einen Druck des Wassers zu behandeln; er ist durchaus ein Druck des gelösten Stoffes". Ostwald begründet seine Kritik näher damit, dafs bei Wüllner „hier wie an anderen Stellen" die Neigung hervortrete, „die kinetische Hypothese nicht als Illustration der empirisch abgeleiteten Gesetze, sondern als ein Beweismittel für sich zu behandeln". Ein solches Verfahren erschiene ihm „in diesem Falle besonders bedenklich, als Männer, wie Boltzmann und Lorentz sich dahin erklärt haben, dafs eine befriedigende kinetische Theorie der Lösungen ohne sehr zweifelhafte Annahmen schwer möglich ist".

Ob nun diese Kritik eines so hervorragenden Gelehrten die Veranlassung gewesen ist, dafs Nernst bezw. van't Hoff neuerdings in dem oben angeführten Erklärungsversuche den Rückstofs herangezogen hat, kann ich nicht beurteilen. Jedenfalls scheint mir aber, nachdem Weinholds Versuche im Zusammenhang mit meiner Analyse der Vorgänge beim Winkelheber die grofse Leistungsfähigkeit von Spannungsdifferenzen der Flüssigkeiten unabhängig von jeder Hilfstheorie erwiesen haben, Ostwalds Einwand, dafs sich Wüllners Darstellung des osmotischen Druckes nur auf eine zweifelhafte

---

1) 5. Aufl., Bd. I, 1895, pag. 674.
2) Zeitschr. f. phys. Chemie 1894, XV, pag. 522.

Hypothese, nämlich die kinetische, stütze, nicht mehr haltbar zu sein. Beim Heber ist ja in meinen Auseinandersetzungen die kinetische Hypothese nirgendwo notwendig gewesen. Es scheint mir daher nicht vermessen zu sein, sondern durchaus einer logischen Forderung zu entsprechen, wenn im folgenden versucht wird, trotz einer solchen Autorität wie Ostwald, die Frage von neuem in Wüllners Sinne hier zu erörtern. Ich hoffe wenigstens, dafs eine Parallele zwischen der osmotischen Saugung einerseits und anderseits den Tatsachen, die uns von der Kapillarität, dem zweiten Askenasy'schen Versuch, der elastischen Schwellung und dem Winkelheber her bekannt sind, zur Klärung des erstgenannten Problems beitragen werden.

4. Erklärung der osmotischen Saugung aus Binnendrucksdifferenzen des Lösungsmittels innerhalb und aufserhalb der Lösung.

Bereits in der Einleitung habe ich meiner Ansicht Ausdruck verliehen, dafs den am Schlusse der vorigen Nummer genannten Bewegungserscheinungen eine gemeinsame Ursache zugrunde liege, die darin besteht, dafs in jedem der angeführten Fälle innerhalb der Flüssigkeit ohne Mitwirkung des Luftdruckes zunächst ein lokaler Dehnungszustand erzeugt wird, dessen Ausgleich dann jene Bewegungen zur Folge hat. Dies soll zunächst näher erörtert werden.

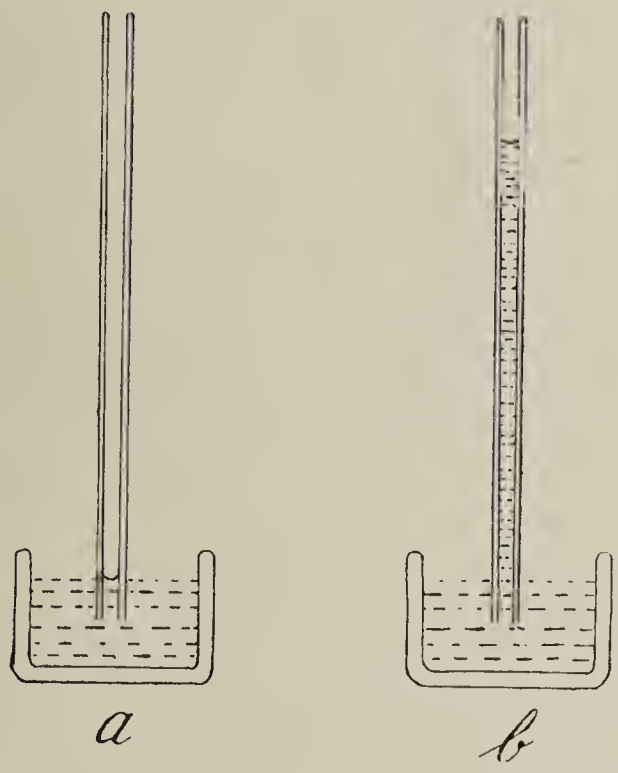


Fig. 2.

a) Die kapillare Erhebung. Fig. 2 *a* stelle ein Haarröhrchen vor, das soeben in Wasser gesenkt ist. In dem Moment, in dem das untere Rohrende in das Wasser taucht, bildet sich daselbst der konkave Meniskus. Dieser bleibt aber nur eine verschwindend kurze Zeit an derselben Stelle, weil mit seiner Entstehung eine Verminderung des Oberflächendrucks unterhalb des Meniskus unmittelbar verbunden ist. Es ist also der Überdruck des Aufsenwassers, der die Flüssigkeit in dem Haarröhrchen so schnell in die Höhe treibt, dafs wir das Aufsteigen selbst meist kaum gewahren. Ist der Aufstieg vollendet, wie in Fig. 2 *b*, so bleibt in dem ganzen gehobenen Flüssigkeitsfaden der Dehnungszustand nach oben zunehmend zwar bestehen, ein weiterer Ausgleich ist aber

dadurch verhindert, dafs die Binnendrucke inner- und aufserhalb des Röhrchens am Grunde desselben gleich sind. Dies ist aber die für den Wasserübertritt entscheidende Grenzstelle.

b) Der zweite Versuch Askenasys. Askenasy hat bekanntlich gezeigt, dafs man durch Verdunstung von Wasser aus einem Gipspfropf Quecksilber weit über den Barometerstand heben kann. Fig. 3 *a* zeigt, wie das hierzu benutzte Glockentrichterrohr *TT'*, dessen Glocke mit Gips gefüllt und noch dazu von einem Gipsballen *G* umgeben ist, nach der Wasserfüllung aufrecht gestellt und mit dem offenen Ende in ein Quecksilbergefäfs eingetaucht war. Anfänglich reichte das Wasser des Rohres natürlich abwärts bis zum Quecksilberspiegel des Gefäfses. Infolge der Verdunstung durch den Gipsballen hindurch nahm es aber an Volum ab und zog das Quecksilber nach sich. In einem Falle überstieg die Höhe der Quecksilberkuppe den Barometerstand um 14 cm.

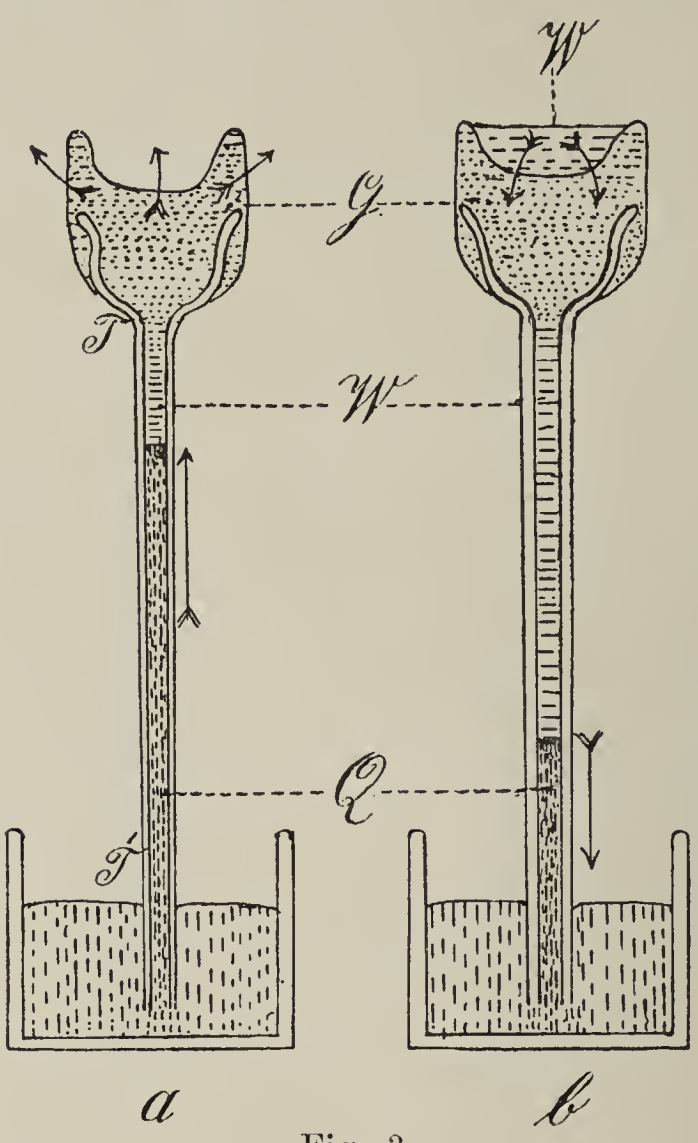


Fig. 3.

Dieser Versuch ist sehr bekannt geworden, weniger hingegen der zweite, der uns hier besonders interessiert. Nachdem das Quecksilber eine Strecke weit gestiegen war, gofs nämlich Askenasy Wasser auf den Gips. (In der Fig. 3 *b* ist angenommen, dafs dieses in eine Höhlung oben im Gipsballen eingebracht worden sei.) Und siehe da, dieses Wasser drang binnen kurzem durch die Gipsporen in das Rohr hinein, während das Quecksilber zurücksank. Offenbar hatte die Quecksilbersäule vorher das Wasser im Rohre gedehnt (vgl. Fig. 3 *a*) und diese Spannung sich durch den Gips auf das Wasser in der Gipshöhlung fortgepflanzt.

c) Die elastische Entfaltung. Wenn lebende oder flüssigkeitsgefüllte tote Pflanzenzellen Wasser verlieren, so ist es eine überaus verbreitete Erscheinung, dafs sich ihr Inhalt (Wasser, Zellsaft, Protoplasma) nicht von der Wand ablöst, sondern diese bei der Volumenabnahme mit nach Innen zieht und in Falten legt (von mir

als „Schrumpfeln“ bezeichneter Vorgang). Die Zellen der Fig. 4*a* nehmen dabei etwa die Form von Fig. 4*b* an. In Fig. 4*b* haben die Zellen das Wasser noch nicht ganz, sondern nur zum Teil eingebüfst. Bringt man sie nun aber wieder mit Wasser zusammen, so dringt dieses oft aufserordentlich schnell ein und führt die Zellen zur ursprünglichen Form (Fig. 4*a*) zurück. Ohne Zweifel ist dieses Phänomen dem Sachverhalt bei dem zweiten Askenasy'schen Versuche ganz analog. Der Dehnungszustand des Zellwassers wird diesmal jedoch nicht durch ein Quecksilbergewicht, sondern durch die Elastizität der Zellwand veranlafst [1]).

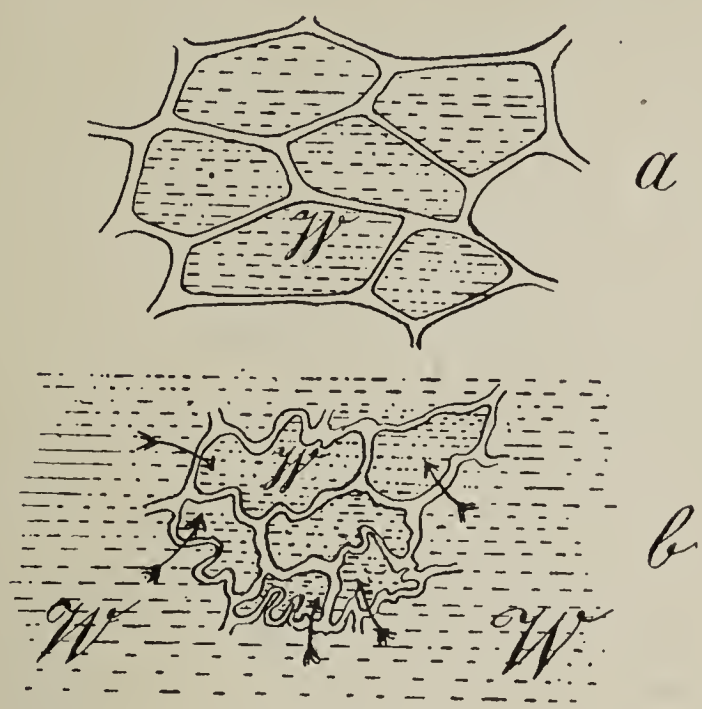


Fig. 4.

d) Die osmotische Saugung. Da wir für den Heber die uns gestellte Aufgabe schon erledigt haben, so können wir uns endlich unserem eigentlichen Problem zuwenden. Wodurch wird also in einer Lösung der Dehnungszustand des Lösungsmittels hervorgebracht? Knüpfen wir die Erörterung dieser Frage an Fig. 5.

In Fig 5*a* sei *ABCD* ein Gefäfs mit halbdurchlässiger Niederschlagsmembran. Durch die Scheidewand *t*—*t* wird es in zwei ungleiche Räume geteilt. Der bei weitem kleinere enthält den zu lösenden Stoff *S*; die gröfsere Abteilung ist mit dem Lösungsmittel *W* gefüllt. Denken wir uns die Scheidewand *t*—*t* beseitigt, so wird sich *S* in *W* verteilen. Das Lösungsmittel, das vorher auf den einen Raum beschränkt war, wird sich seinerseits, wenn wir uns zunächst die Annahme gestatten, dafs bei der Mischung von *S* und *W* keine Volumenänderung eintritt, über den ganzen Raum *ABCD* ausbreiten. Es wird durch die Teilchen von *S* auseinander gedrängt und seine eigene Dichte wird demgemäfs verringert. An Stelle des dehnenden Gewichtes beim Heber und beim zweiten Askenasy'schen Versuch, oder an Stelle der Oberflächenspannung bei der Kapillarität und des Zuges der adhärierenden Wandung bei der elastischen Entfaltung von Pflanzenzellen tritt also hier als Dehnungsursache die Keilwirkung der

---

1) Vgl. das Referat in der phys. Zeitschr. II, 1901, pag. 493.

sich auflösenden Teilchen von S auf und setzt den Partiärdruck des Lösungsmittels dementsprechend herab. Kein Wunder also, wenn das das Gefäfs umspülende Lösungsmittel W infolge seines Überdrucks bis zum Ausgleich desselben oder, was dasselbe sagt, bis zur Herstellung gleicher Dichte von W innen und aufsen, eindringt (s. Fig. 5 *b*).

Wie man sieht, ist diese Auffassung an die kinetische Hypothese durchaus nicht gebunden. Man wende auch nicht ein, dafs die An-

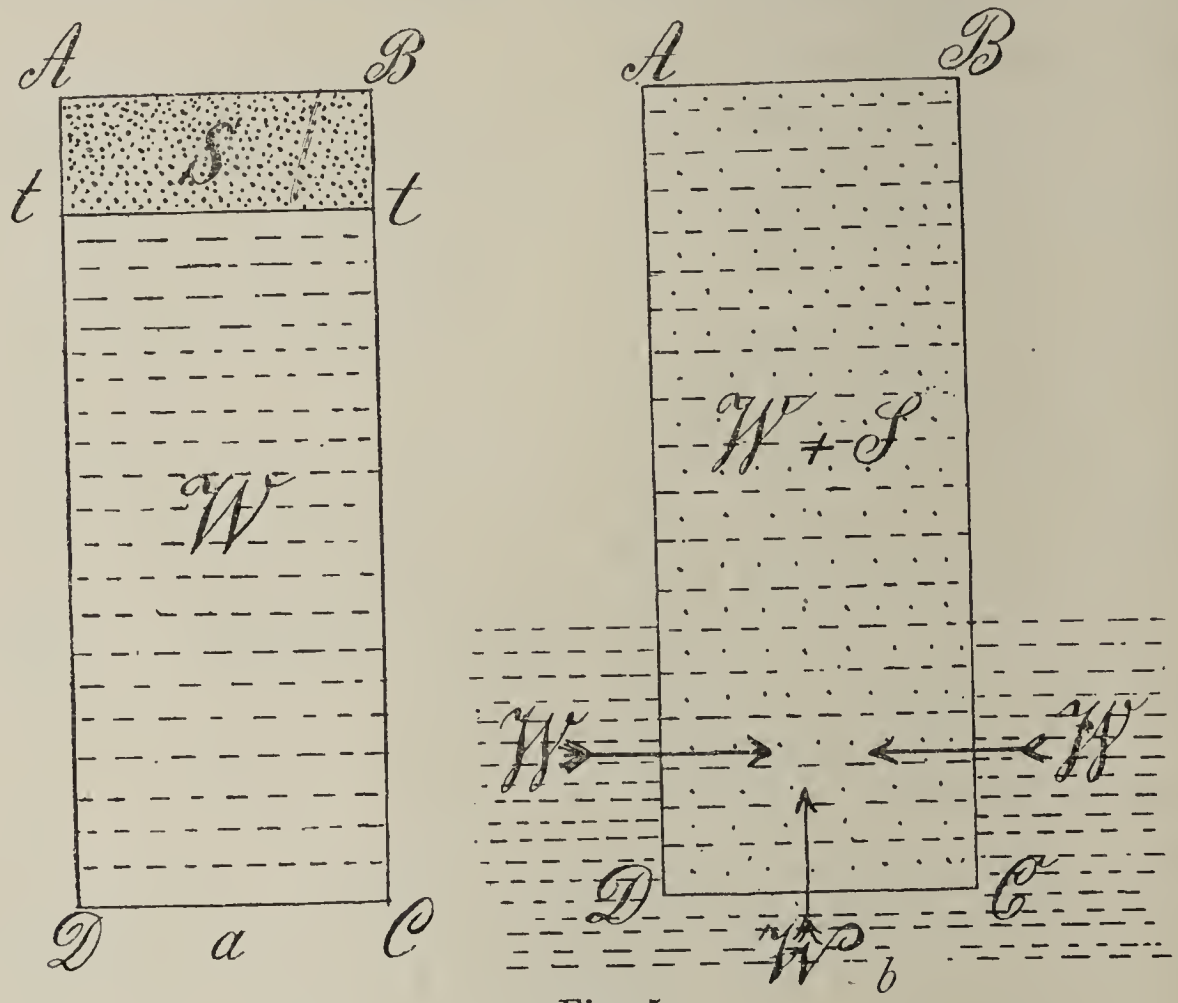


Fig. 5.

nahme, es finde beim Mischen keine Volumänderung statt, die Schlufsfolgerungen beeinträchtige; der Dehnungszustand kann ja auch bei einer Volumkontraktion noch eintreten. Wir haben diesen idealen Fall nur supponiert, weil ja auch das van't Hoff'sche Gesetz nur für solche Idealfälle genau gilt.

5. Prüfung unserer Anschauung an van't Hoffs Gesetz.

Wenn wir nun von unseren grundlegenden allgemeinen Erörterungen über die osmotische Saugung zur Feststellung des Betrages des erreichbaren osmotischen Druckes übergehen, so wird sich zeigen, dafs unsere Auffassung mit dem Gesetze van't Hoffs nicht im Widerspruche steht. Dieses gilt nämlich, wie die Gasgesetze genau genommen nur für sog. „vollkommene" Gase, exakt nur für unendlich verdünnte Lösungen. Für solche dürfen wir die An-

nahme gleichbleibenden Volums beim Mischen mit der Voraussetzung verknüpfen, dafs die Lösung sehr nahe denselben Oberflächen-(Normal)druck besitzt, wie das Lösungsmittel. Bezeichnen wir nun diesen bekanntlich sehr hoch anzunehmenden Oberflächendruck mit O, den äufseren Druck (ausgeübt durch die Luft, die Dampfspannung etc.) mit A, den gewöhnlichen Binnendruck des Lösungsmittels mit P_w, den Partialdruck desselben in der Lösung mit p_w und endlich den Partialdruck des gelösten Stoffes mit p_s, so gelten die Gleichungen:

$$P_w = O + A$$
$$p_s + p_w = O + A, \text{ also}$$
$$p_s + p_w = P_w, \text{ folglich}$$
$$p_w = P_w - p_s;$$

d. h. in einer solchen Lösung ist der Binnendruck des Lösungsmittels in der Lösung um den Partialdruck des gelösten Stoffes unter den gewöhnlichen Binnendruck des Lösungsmittels draufsen herabgesetzt. Wird er also durch die Osmose wieder auf seinen ursprünglichen Betrag gesteigert, so erreicht bei gleichbleibendem Volum der Lösung der Gesamtdruck den Wert $P_w + p_s$, der Überdruck also genau dieselbe Gröfse wie p_s: der osmotische Druck ist demnach gleich dem Druck der gelösten Moleküle. Wenn man nun ebenfalls die Pfeffer-schen Resultate heranzieht, so ergibt sich, ohne dafs die kinetische Hypothese benutzt ist, der van't Hoff'sche Satz, dafs die gelösten Stoffe dem Gasgesetz folgen. (Aufserdem berührt diese Ableitung mehrere Ursachen, die zur Folge haben, dafs das Gesetz van't Hoffs vielfach nur annähernd gilt).

Ein Beispiel diene zur Erläuterung. Für eine 1 proz. Rohrzuckerlösung hat sich das van't Hoff'sche Gesetz nach Pfeffers Ergebnissen hinreichend zutreffend erwiesen. Pfeffer konnte mit derselben einen osmotischen Druck von 0,65 Atmosphären (bezogen auf 0°) erzielen. Um diesen Betrag ist also der Partiärdruck des Wassers in einem Tropfen solcher Zuckerlösung unter den gewöhnlichen Binnendruck des reinen Wassers herabgesetzt. Mit anderen Worten, das Wasser dieses Tropfens verhält sich so, als ob es durch eine äufsere Kraft von 0,65 Atmosphären negativ gespannt wäre; es ist so stark gedehnt, als ob z. B. der Atmosphärendruck darauf auf ca. ein Drittel des gewöhnlichen Luftdrucks, nämlich auf etwa 25 cm Quecksilber gesunken wäre, indes die Zuckerteilchen mit den übrigen zwei Dritteln des Luftdrucks nach aufsen wirken.[1]) In einem Tropfen

1) Hieraus liefse sich annähernd berechnen, welche Wassermenge beispielsweise in eine osmotische Zelle, in der 1 g Zucker in 100 g Wasser gelöst sind, ein-

einer 3 proz. Zuckerlösung beläuft sich die negative Spannung des Wassers im Tropfen schon auf ca. 2 Atmosphären, was auf den ersten Blick befremdlich erscheint, aber verständlich wird, wenn man den überaus hohen Betrag des Binnendrucks im reinen Wasser erwägt, der 10 000 Atmosphären übersteigen soll [1]).

6. Bedingungen zum Zustandekommen der Osmose.

Werfen wir nun an der Hand der vorher entwickelten Anschauungen kurz die alte Streitfrage zwischen Lothar Meyer und van't Hoff nochmals auf: Wodurch wird der osmotische Überdruck bewirkt, durch den gelösten Stoff oder durch das Lösungsmittel? Nach meiner Meinung mufs die Antwort lauten: Beiderlei Stoffe sind bei der Osmose aktiv beteiligt. Der Mechanismus scheint sich mir am leichtesten klarstellen zu lassen, wenn man wieder den Betrieb einer Saugpumpe zum Vergleich wählt. Diese Pumpe arbeitet mit Luftdruck-, die osmotische Zelle mit Binnendruckdifferenzen. Wie der Kolbenhub im Pumpenstiefel eine Luftverdünnung, so bringt der zwischen den Teilchen des Lösungsmittels verteilte fremde Stoff eine Dichtigkeitsabnahme dieses Mittels hervor. Weiter geht aber die direkte Wirkung beider äufserer Einwirkungen (des Kolbenhubs und der gelösten Substanz) nicht. Die Pumpe kann nicht arbeiten ohne die Spannung der Atmosphäre, die osmotische Zelle nicht ohne den inneren Überdruck des aufsen befindlichen Lösungsmittels. Diese Überdrucke stellen beidemale die vis a tergo dar, die die Flüssigkeit nach den Orten geringerer Spannung treibt. Ebensowenig wie es üblich ist, zu sagen, der Kolbenhub stelle bei der Pumpe die treibende

---

treten mufs, um den maximalen Überdruck bei gleichbleibendem Volum derselben hervorzubringen. Der Kompressionskoeffizient des Wassers beträgt 50 Millionstel, d. h. durch eine Druckänderung von 1 Atmosphäre wird eine entsprechende Volumänderung von 50.10^{-6} Volumteilen hervorgebracht. Durch eine Druckverminderung von 0,65 Atmosphären wird das Wasser also um $50.10^{-6}.0{,}65$ Volumteilen gedehnt. Für unsere Zuckerlösung, deren Volum 100,6 ccm mifst, betrüge die Volumzunahme also $100{,}6.50.10^{-6}.0{,}65$ ccm $= 0{,}003$ ccm. So viel vermöchte unsere Zelle also bis zur Sättigung an Wasser aufzunehmen. Hätten wir es dagegen mit idealen Gasen zu tun, so müfsten von dem durchlässigen Gase 0,6 cm eindringen. Dies macht den grofsen Unterschied zwischen Gasen und Flüssigkeiten hinsichtlich der Volumverhältnisse anschaulich.

1) S. van der Waals, Kontin. d. gasf. u. flüss. Zust., II. Aufl. 1899, pag. 114 u. 175. Auch die Rechnung nach Stefans Methode (vgl. Ostwald, Grundr. d. allg. Chemie 1899, pag. 146) ergibt das oben angeführte Resultat, während Tumlirz (Sitzungsber. d. Wiener Akad. d. Wiss. CX. Abt. IIa, Mai 1901 pag. 517) jenen Druck auf etwa die Hälfte, nämlich ca. 5000 Atm., beziffert.

Kraft dar, ebensowenig dürfte man meines Erachtens den gelösten Stoff vorzugsweise als das Agens ansprechen, das die Osmose eigentlich verursacht. Im Gegenteil, wenn man die Saugpumpe als Luftdruckapparat charakterisiert, müfste man konsequenterweise eine osmotische Zelle mit wässriger Lösung als einen Wasserspannungsmechanismus charakterisieren.

Dies tritt besonders klar hervor, wenn man der osmotischen Zelle statt „gewöhnlichen“ Wassers gedehntes Wasser zum Aufsaugen darreicht. — Eine Anordnung, die dieser Forderung entspricht, findet sich schon in Ostwalds Grundrifs der Chemie, III. Aufl. 1899, pag. 205 abgebildet. Es ist die Fig. 28 daselbst, die Ostwald zur Ableitung des Zusammenhunges zwischen dem osmotischen Druck und der Dampfspannung einer Lösung benutzt hat. Es sei mir gestattet, dieselbe mit Weglassung einiger für uns unwesentlicher Teile zu reproduzieren.

In dem aufrechten Glasrohr denkt sich Ostwald bei L über der halbdurchlässigen (punktiert gezeichneten) Wand ein kleines Quantum einer beliebigen Lösung eingefüllt und zwar in einer solchen Höhe der im übrigen mit dem Lösungsmittel ganz gefüllten Röhre, dafs die Länge dieser Säule der osmotisch erreichbaren Steighöhe entspricht. Wäre die Lösung bei L etwa 1 proz. Zuckerlösung mit einem osmotischen Druck von 0,65 Atmosphären, so müfste also die Länge der Wassersäule $0{,}65 \cdot 10{,}5\,\text{m} =$ rund 7 m sein. Ostwald will durch diese Einrichtung erzielen, dafs die Lösung aus der Wassersäule keine Substanz mehr an sich reifsen kann. In der Tat kann hier keine Wasserbewegung mehr eintreten, weil sowohl der Partialdruck des Wassers in der Lösung, als der Binnendruck des Wassers unterhalb der Scheidewand 0,65 Atmosphären weniger beträgt als sonst (der erstere durch die Einwirkung der Zuckerteilchen, der letztere durch das Gewicht der gesamten Wassersäule), also beiderseits der Scheidewand gleiche Wasserspannung vorhanden ist. Würde man die Wassersäule länger gewählt haben, so würde sie der Lösung sogar Wasser entziehen. Eine andere Einrichtung ähnlicher Art wäre die folgende.

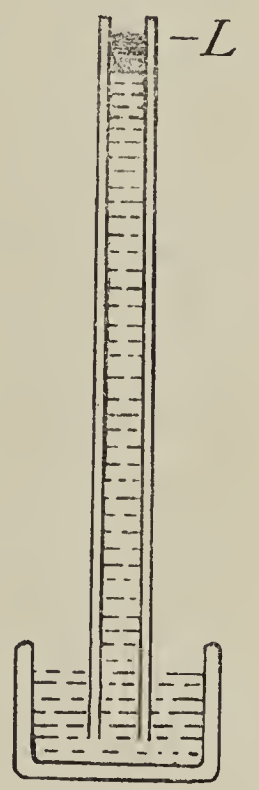


Fig. 6.

In dem Winkelheber der Fig. 7 sei inmitten seines Buges eine senkrechte halbdurchlässige Scheidewand angebracht und der linke kürzere Schenkel etwa wieder mit der Zuckerlösung von 1 %, der längere mit reinem Wasser gefüllt. Enthielte der Heber nur reines

Wasser, so wäre links von der Scheidewand ein Überdruck vorhanden, gemessen durch die Differenz $H—h$ der Schenkellängen (diese etwa in Metern ausgedrückt). Dieser treibt die Flüssigkeit nach rechts. Da aber der linke Schenkel die Zuckerlösung enthält, so ist dieser Überdruck (wenn wir diesen Schenkel kurz annehmen und den Unterschied im spez. Gewicht des Wassers und der Lösung vernachlässigen) um 0,65 Atmosphären, d. h. um den Zug einer Wassersäule von ca. 7 m herabgesetzt. Es hängt also nur davon ab, ob $H—h \gtrless 7$, in welcher Richtung sich das Wasser durch die Scheidewand bewegen wird. Das Wandern der Wasserteilchen wird unterbleiben, wenn $H—h = 7$.

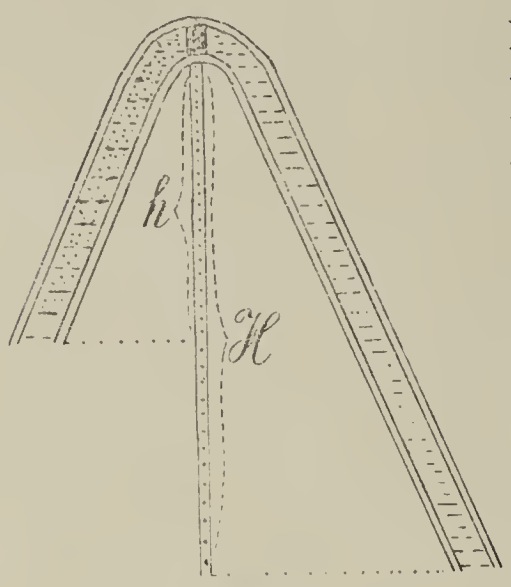


Fig. 7.

IV. Bemerkungen zum Saftsteigeproblem.

Die vorstehende Untersuchung ist hervorgegangen aus dem Wunsche, über verschiedene Fragen, die sich auf das Saftsteigen beziehen, ins Klare zu kommen. Hierher gehören die nach der osmotischen Leistungsfähigkeit der Blattzellen in ihrer Wirkung auf das Wasser der Leitungsbahnen, nach der Möglichkeit der Existenz ununterbrochener Wasserfäden oder -netze von der Wurzel bis zu den Blättern und nach der event. Nachweisbarkeit eines solchen Zusammenhangs, sowie nach der Wahrscheinlichkeit eines Eingriffs der äufseren Luft in den Betrieb des Saftsteigens. Vielleicht werden durch die vorausgegangenen Mitteilungen noch Andere zur Diskussion unseres Problems angeregt. Ich bin zu einem sicheren Resultate hinsichtlich einer der heute von verschiedenen Forschern vertretenen Theorien nicht gekommen, hinsichtlich der Kohäsionstheorie allerdings auf erhebliche Bedenken gestofsen.

Wie in der Einleitung berichtet, hat den Anstofs zu dieser Untersuchung die neueste Publikation von H. Dixon unter dem Titel „A Transpiration Model“ gegeben. Es ist zunächst bemerkenswert, dafs Dixon, einer der Mitbegründer der Kohäsionstheorie des Saftsteigens, den lebenden Blattzellen beim Zustandekommen des Transpirationsstromes eine erhebliche Rolle zuteilt. Er billigt demnach den Standpunkt Nolls nicht, der der Meinung ist, dafs Strasburgers Versuche die Mitwirkung der lebendigen Elemente

bei dem Transpirationstrom wohl endgiltig ausschliefsen[1]). Dixon sagt vielmehr in einer „Note of the rôle of osmosis in transpiration“ vom Jahre 1896[2]): „From various considerations we think it most probable, that under normal conditions the force which establishes the tension in the sap in the water-conduits is to be referred to the osmotic properties of the cells of the leaf“. Und er begründet diese Auffassung damit, dafs „in transpiration-experiments in which colouring materials or other substances poisonous or non poisonous are supplied in watery solution to the cut surface of a transpiring branch, it is found that the rate of transpiration continues without much diminution till the solution can te detected in the leaves, but then suddenly falls off“. Auf pag. 770 wird noch ein anderer Grund angeführt: „The fact, that the leaves of the highest trees remain turgescent during the time of transpiration may . . . be used as an argument in support of the view, that it is the osmotic properties of the cells of the leaf which directly put the water in the tracheal system in tension“ und einige Zeilen später: „As we know the leaves do not normally become flaccid during transpiration we may conclude that during normal transpiration the tractional force is exerted by the osmotic properties of the turgescent cells in the leaf“[3]). In konsequenter Verfolgung dieser Meinung hat Dixon 1897[4]) zunächst die Höhe des osmotischen Drucks in Blattzellen verschiedener Gewächse zu ermitteln gesucht (wobei er ein Maximum von 16 Atmosphären fand), und in der bereits mehrfach zitierten Mitteilung von 1903 die Frage diskutiert, wie es möglich sei, dafs stark turgescente Zellen aus den Leitungsbahnen fortwährend Wasser aufsaugen könnten. Er kommt dabei[5]) zu folgendem Schlusse: „A state of tension may exist in the water (solvent) of leaf-cells, while simultaneously the dissolved substances may be exerting an osmotic pressure. This latter is apparent from the fact that these cells remain in a turgid state. 2. The tension set up by evaporation at the surface of the leaf-cells during transpiration is transmitted through the

1) Bonner Lehrbuch der Botanik, V. Aufl. 1902, pag. 156.

2) Proceed. of the Royal Dublin Society, 1896, III, Nr. 5, pag. 767.

3) Auch Askenasy war der Meinung, dafs die lebenden Zellen durch ihre Osmose die Vermittlung zwischen den verdunstenden Oberflächen des Blattes und dem Wasser der Leitungsbahnen übernehmen (s. Abhandl. von 1896. Ber. d. Heidelb. Vereins, pag. 1 des Sonderdrucks.

4) On the osmotic pressure in the cells of leaves; Proceed. of the Dublin Society 1897, IV, Nr. 1, pag. 61.

5) l. c. pag. 121.

solvent in these cells to the water in the conducting vessels and tracheids of the leaf".

Dabei ist zu bemerken, dafs Dixon, wie aus seiner ersten diesjährigen Mitteilung: „The cohesion theory of the ascent of sap" [1]) hervorgeht, an seiner Kohäsionstheorie und der Ansicht, dafs in den Bäumen ununterbrochene Wasserfäden von unten bis oben ziehen, festhält. Da nun Noll (l. c.) gelegentlich seiner Erörterung der Transpirationserscheinungen erwähnt, dafs Eucalyptusbäume 150 m erreichen, so stellte ich mir folgende Aufgabe: Denken wir uns einen solchen Stamm von kontinuierlichen Wasserfäden der ganzen Länge nach durchzogen und schreiben den lebenden Zellen der obersten Blätter einen osmotischen Druck von 15 Atmosphären zu. Können unter solchen Umständen die wasserverdunstenden Blätter turgescent bleiben und eine ausgiebige Wasserzufuhr bewirken?

Ein aufmerksamer Leser wird sofort entdecken, dafs diese Frage nur ein Spezialfall des am Schlusse des vorigen Abschnitts behandelten Themas ist, zu dessen Diskussion wir nach Ostwald die Fig. 6 herangezogen haben. Nach den dortigen Erörterungen müfste am oberen Ende der Leitungsbahnen des Eucalyptus in ihrem Wasser eine negative Spannung von ca. —15 Atmosphären vorhanden sein [2]). Wenn die benachbarten Zellen aber auch nur schwach turgescent wären, so müfste sich in ihnen die Wasserspannung schon über den Betrag von —15 Atmosphären, also etwa auf $-14^3/_4$ oder $14^1/_2$ erhoben haben. In diesem Falle würde somit ihnen der höhere Wasserdruck zukommen, und anstatt Wasser aufwärts zu ziehen, müfsten sie es umgekehrt an die Leitungsbahnen abgeben. Nur im Zustande der Erschlaffung, wenn also durch die Wasserverdunstung ihr Zellsaft konzentrierter geworden wäre, könnten sie eine saugende Wirkung ausüben. Der osmotische Druck jener Eucalyptuszellen müfste demnach den Betrag von 15 Atmospären übersteigen, damit sie in stark turgescentem Zustande Wasser aus den Leitungsbahnen schöpfen könnten. Es wäre interessant, genauer zu untersuchen, ob die osmotische Kraft der Blattzellen ihrer Höhe über dem Boden entsprechend zunimmt [3]).

Wie ich aus Pfeffers Pflanzenphysiologie ersehe, hat derselbe schon auf diesen für die Kohäsionstheorie beachtenswerten Umstand

---

1) Proceed. of the Dublin Society 1903, X, Part. I, Nr. 4.

2) Der Wurzeldruck ist vernachlässigt.

3) Nach Pfeffers Pflanzenphysiologie, II. Aufl. 1897, I, pag. 121 kann der osmotische Druck in der Wurzel der Zuckerrübe 21 Atmosphären betragen.

hingewiesen [1]). Er sagt nämlich: „Es sei darauf aufmerksam gemacht, dafs in den trachealen Bahnen die abschliefsenden Wandungen ebenso leicht Wasser aufnehmen als abgeben und dafs der negative Zug einer kontinuierlichen Wassersäule unvermeidlich auf ein Einsaugen von Wasser, also auf eine abwärts ziehende Wasserbewegung hinarbeiten müfste".

Zu diesem Bedenken gegen die Zweckmäfsigkeit überaus langer Wassersäulen gesellen sich aber schwerere, die gegen ihre Existenzfähigkeit zu sprechen scheinen. Da bei starkem Winde die Blattstiele und Zweige oft starken Erschütterungen und Stöfsen ausgesetzt sind, so wäre es bei der aufserordentlich hohen Spannung solcher sehr langer Wassersäulen in den Saftbahnen wohl möglich, dafs jene Erschütterungen genügten, um die Kohäsion der flüssigen Fäden aufzuheben. Bei den Heberversuchen wenigstens bringt ein Stofs mit einem harten Körper, wie sich Herr Oberregierungsrat Weinhold brieflich ausdrückte, „todsicher" die Unterbrechung stark gespannter Flüssigkeitssäulen hervor.

Nach Askenasys Angabe [2]) bewirkte auch bei einem Versuche Berthelots die geringste Erschütterung das Zerreifsen des Wassers. Allerdings vermochten bei einem Versuche Donnys nach Askenasys Bericht (l. c. pag. 14) die heftigsten Stöfse kein Zer- oder Abreifsen der flüssigen Säule hervorzurufen, jedoch war diese auch nicht einmal 1 m lang. Immerhin könnte hinsichtlich des pflanzlichen Wasserleitungsapparates vielleicht der Umstand für die Kohäsionstheorie geltend gemacht werden, dafs die Leitungsbahnen gröfstenteils im Innern der Gewebe geborgen und daher vor „harten" Stöfsen geschützt seien.

Jedoch trifft die Kohäsionstheorie noch auf zwei andere Schwierigkeiten, nämlich den Luftgehalt des Wassers der Leitungsbahnen und den undichten Abschlufs ihrer Wandungen gegen die Atmosphäre. Was die Kohäsion von lufthaltigem Wasser anbetrifft, so haben Dixon und Joly in ihrer Mitteilung vom 26. Juli 1895 pag. 568—570 allerdings über Versuche berichtet, bei denen solches Wasser (in dem nebenbei das eine Mal auch Holzstückchen eingebracht waren) bis über 7 Atmosphären gespannt gewesen wäre, ohne zu reifsen. Jedoch ist sehr zu beachten, dafs die Wasserteilchen etwa wie Flüssigkeit im Siedeverzug dabei in Ruhe verharren durften. Nach den Heberver-

---

1) Pflanzenphysiologie, II. Aufl., Bd. I, 1897, pag. 206 u. 207.

2) S. die Abhandl. von 1898, l. c. pag. 15 des Sonderdrucks.

suchen zu urteilen, tritt dagegen bei Wasser, das in Bewegung ist, die Unterbrechung bei stärkerer Spannung stets ein, wenn es nicht annähernd luftfrei ist. Wie aus Askenasys Bericht (l. c. 1896, pag. 11 des Sonderdruckes) ersichtlich ist, hat auch er seine bekannten Versuche mit Wasser angestellt, „das meist zu wiederholten Malen einige Zeit gekocht war". Wenn Strasburger tote Pflanzengewebe zu Versuchen verwandte, wurden sie erst längere Zeit mit kochendem Wasser infiltriert. Dagegen fanden Dixon und Joly selbst schon das Wasser, das aus Pflanzen infolge Wurzeldruckes austrat, nicht luftfrei (l. c. pag. 568 Anmerkg.). Hierzu kommt nun noch die Luftdurchlässigkeit der Wandungen, zwischen denen sich das Wasser aufwärts bewegt; denn der Hub von Flüssigkeitssäulen auf beträchtliche Höhen durch den Heber ist unbedingt an den Abschluſs des Heberrohres gegen die Atmosphäre gebunden. Dieser Abschluſs ist bei den Leitungsbahnen der Pflanzen aber bei weitem nicht so gesichert, wie man es gewöhnlich dargestellt findet. In bezug auf diesen Punkt möchte ich diesmal[1]) namentlich auf sehr interessante Versuche Nolls[2]) hinweisen und sie deshalb etwas ausführlicher besprechen, weil sie mir nicht genügend gewürdigt erscheinen und weil sie ferner auffällig an die Wirkung der Partialdrücke bei der Osmose erinnern. Noll brachte nämlich beblätterte Zweige, deren Schnittende er in Wasser tauchte, in eine Atmosphäre von Wasserstoff, Leuchtgas, Kohlensäure und anderen Gasen. Die drei erstgenannten drangen mit ungemeiner Schnelligkeit durch die Intercellularen in die Gefäſse ein, so daſs ein Manometer bei Anwendung von Kohlensäure einen Überdruck von $^1/_4$ Atmosphäre in der Gefäſsluft anzeigte und „Wasserstoff mit Luft gemischt in einem Blasenstrom in die Wasservorlage einbrauste". Auch Sauerstoff bewirkte in den Gefäſsen eine Verdichtung, obschon in geringerem Maſse. Stickstoff dagegen verhielt sich entgegengesetzt, es rief in den Leitungsbahnen eine erhöhte Verdünnung hervor. Die Spannungserscheinungen kehrten sich nach Nolls Bericht um, wenn er die Gase direkt von den Gefäſsbahnen durch die Schnittfläche aufsaugen lieſs.

Die mit diesen Gasen beobachteten Vorgänge erinnern ungemein an die bekannten Schulversuche in dem physikalischen Unterricht, wobei man an einem Manometer, das mit einer porösen Tonzelle

---

1) Vgl. Ber. d. deutsch. Bot. Ges. XVIII, 1900, pag. 388—392.

2) Über die Luftverdünnung in den Wasserleitungsbahnen der höheren Pflanzen. Sitzungsber. d. niederrhein. Ges. f. Natur- u. Heilkunde 1897, 15. Nov.

verbunden ist, eine aufserordentlich rasche und starke Erhöhung des Gasdrucks im Innern der Tonzelle nachweist, wenn man die Zelle in eine Atmosphäre von Wasserstoff oder Leuchtgas bringt. In dieser Weise werden ja diejenigen Wirkungen von Partiärdrucken demonstriert, die schon von van't Hoff und nach ihm von Pfeffer zur Erklärung des osmotischen Druckes verwertet worden sind.

Auch bei Nolls Versuchen beiderlei Art scheint mir dieselbe Erklärung auf der Hand zu liegen. Bei der Anwendung von Wasserstoff, Leuchtgas und Kohlensäure ist das Ein- bezw. Ausströmen durch die Gefäfswände darum so beschleunigt, weil auf der jeweilig anderen Seite der Wandung (beim Einströmen innerhalb der Leitungsbahnen, beim Ausströmen in der freien Atmosphäre) das betreffende Gas anfangs überhaupt nicht oder nur in Spuren vorhanden ist. Dagegen strömt der Sauerstoff langsamer ein, weil die Leitungsbahnen denselben in den Blasen zwischen den getrennten Wassersäulchen schon enthalten. Das Verhalten des Stickstoffs läfst sich verstehen, wenn man annimmt, dafs die Wandung der Leitungsbahnen für Sauerstoff leichter durchlässig ist als für Stickstoff. Infolge seines partiären Überdrucks innerhalb der Gefäfse diffundiert der Sauerstoff nach aufsen und zwar rascher, als der Stickstoff eindringen kann. (Von dem chemischen Verbrauch des Sauerstoffs innerhalb der Gewebe ist dabei ganz abgesehen.)

Jedenfalls erscheinen Nolls Ergebnisse, gleichgiltig ob unsere speziellen Annahmen zur Erklärung derselben richtig sind, unbegreiflich, wenn man nicht eine relativ hohe Permeabilität der Wände des Trachealsystems für jene Gase und somit auch für die Luftbestandteile annimmt. Diese Auffassung steht zwar, wie bereits gesagt, in einigem Gegensatz zu der üblichen. Sollte diese aber nicht durch die Idee beeinflufst worden sein, dafs zum Zustandekommen des Transpirationsstromes ein nahezu dichter Abschlufs der Leitungsbahnen von der Atmosphäre erforderlich sei? Und sollte nicht ganz im Gegenteil die Vermutung Beachtung verdienen, dafs durch die relative Luftdurchlässigkeit des Trachealsystems die Zerlegung längerer gespannter Wassersäulen in kürzere von geringerer, ja ganz unerheblicher negativer Spannung begünstigt werden soll? Indem sich nämlich solche kurze Wassersäulchen lediglich dadurch, dafs der untere Meniskus etwas flacher gewölbt ist als der obere, selbst tragen, braucht ihre innere Spannung, selbst wenn sie im Baum in sehr beträchtlicher Höhe schweben, von der Normalspannung des Wassers nur wenig abzuweichen. Es wird also den lebenden Zellen, selbst wenn sie

stark turgescieren, leicht gemacht, Wasser aus ihnen zu entnehmen. Allerdings würde die Erkenntnis des Hauptproblems, wie sie zu jenen Höhen hinaufgelangen, durch jene Annahme keineswegs erleichtert. Dies bliebe nach wie vor noch rätselhaft.

Ist nun unsere bisherige Auseinandersetzung nicht gerade zugunsten der Kohäsionstheorie ausgefallen, so möchte ich anderseits nicht verhehlen, dafs mir eine Beobachtung, die ich bisher, ihre Richtigkeit vorausgesetzt, als schlagenden Beweis gegen die Kohäsionstheorie angesehen habe, nicht mehr beweiskräftig erscheint. Ich meine folgendes. Bekanntlich hat Schwendener gegen die Ansicht, dafs in Bäumen kontinuierliche Wasserfäden oder auch nur ein zusammenhängendes Wassernetz vorhanden seien, seine Manometerversuche geltend gemacht. Wenn er nämlich in verschiedenen Höhen an Baumstämmen mit einem Manometer verbundene durchlöcherte Hohlbohrer anbrachte, so zeigten sich die Manometerdrucke voneinander in hohem Grade unabhängig, während sie in gesetzmäfsigem Zusammenhange hätten stehen und die lokalen Unregelmäfsigkeiten hätten ausgleichen müssen, wenn die Bohrer durch zusammenhängende Wasserfäden mit einander verbunden gewesen wären. Dieser Schlufs Schwendeners leuchtet an sich sehr ein. Es ist dabei aber aufser acht gelassen, dafs der Tatbestand jener Versuchsergebnisse mit den Verhältnissen des Baumes vor dem Anbringen der Bohrer nicht übereinzustimmen braucht. Allerdings ist jedes Manometer anscheinend aufser Zusammenhang mit dem anderen gewesen. Aber dieser Zusammenhang könnte darum doch im Stamme ursprünglich bestanden haben und der Rifs der gespannten Wasserfäden nach Analogie der mehrfach betonten analogen Vorgänge bei den Heberversuchen erst durch das Eindringen der Manometerrohre veranlafst worden sein. Somit scheint mir unser Problem immer noch sehr aufklärungsbedürftig zu sein. Man darf ja auch nicht vergessen, dafs die Erfahrungen am Heber nicht ohne weiteres auf den Pflanzenkörper übertragbar sind. Denn 1. wird das Fortbestehen der Kohäsion bei den Pflanzen sehr wahrscheinlich durch die Enge der Leitungsbahnen begünstigt, 2. ist die aufsteigende Bewegung des Wassers in den Leitungsbahnen erheblich langsamer als bei den gewöhnlichen Heberversuchen, 3. haben meine Versuche über die Grenzen des Schrumpfelns ergeben, dafs der Luftgehalt des Wassers und die Luftdurchlässigkeit der Membran im Pflanzenkörper nicht so schnell zur Unterbrechung der Kohäsion zu führen braucht, wie es nach den Erfahrungen am Heber den Anschein haben könnte.

Lippstadt, 31. Dezember 1903.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Flora oder Allgemeine Botanische Zeitung

Jahr/Year: 1904

Band/Volume: 93

Autor(en)/Author(s): Steinbrinck Carl

Artikel/Article: Über dynamische Wirkungen innerer Spannungsdifferenzen von Flüssigkeiten und ihre Beziehung zum Saftsteigeproblem der Bäume 127-154