

haften blieb. Durch Verkorkung der Zellwände in einer zur zweiten Wurzel tangentialen Richtung trennte sich von letzterer die Brücke ab.

Nicht selten ist die congenitale Verwachsung der Nebenwurzeln nur auf ihre Basis beschränkt, so dass hier dieselben zwei getrennten oder nach Art einer 8 verbundenen Centralcylinder enthalten. Nach dem Scheitel hin verwachsen dieselben aber und vermindern ihre Gruppen stets so, dass endlich die normale Zahl erreicht wird.

Auch die Anordnung der Nebenwurzeln ist oberhalb und unterhalb der Spaltstelle verschieden. Auf der intacten Wurzel sind die verwachsenen Nebenwurzeln meist neben einander stehende (collateral), auf den Spaltwurzeln über einander stehende (serial). Auf den intacten Wurzeln der Monocotylen (Mais) sind sie ausschliesslich collateral, auf den Spaltwurzeln in Wassercultur ausschliesslich serial.

Pflanzenphysiologisches Institut der Universität und Botanisches Institut
der kgl. landwirthschaftlichen Hochschule zu Berlin.

16. H. Rodewald: Ueber die durch osmotische Vorgänge mögliche Arbeitsleistung der Pflanzen.

Eingegangen am 24. Februar 1892.

Zu wiederholten Malen hat PFEFFER¹⁾ darauf aufmerksam gemacht, dass durch osmotische Processe in und von der Pflanze Arbeit geleistet und auch freie Wärme in Arbeit verwandelt werden kann. Es ist der Zweck dieser Arbeit, zu untersuchen, wie gross sich die osmotische Arbeitsleistung unter bestimmten physiologisch wahrscheinlichen Annahmen gestaltet und wann und zu welchem Antheil die äussere freie Wärme dabei in Arbeit übergeht.

Durch die Untersuchungen von VAN T'HOFF²⁾ über „die Rolle

1) PFEFFER, Pflanzenphysiologie, Bd. I. pag. 378; Bd. II. pag. 1; Landw. Jahrbücher, 1878, Bd. 7, pag. 834; Abhandl. der mathemat. physikalischen Gesellschaft der Wissenschaften, Bd. XV. pag. 484.

2) Zeitschrift für physikalische Chemie, Bd. I, 1887, pag. 481.

des osmotischen Druckes in der Analogie zwischen Lösungen und Gasen“ hat sich herausgestellt, dass für verdünnte Lösungen dieselben Gesetze gelten, wie für die Gase, wenn man statt des Druckes bei den Gasen den osmotischen Druck bei den Lösungen setzt.

Durch diese Gesetze ist uns die Möglichkeit gegeben, die Arbeitsgrösse, welche durch osmotische Prozesse geleistet werden kann, zu berechnen, falls wir bestimmte osmotische Prozesse substituieren. Die erwähnten Gesetzmässigkeiten geben uns die genauen Beziehungen zwischen dem Volumen V , der absoluten Temperatur T und dem osmotischen Druck P einer Lösung und sind genau dieselben Gesetzmässigkeiten, die für die Gase als BOYLE's, GAY-LUSSAC's und AVOGADRO's Gesetze bekannt sind.

Sämmtliche drei Gesetze zusammen können in die einfache Gleichung

$$PV = 845 T$$

eingeschlossen werden.

Es ist vielleicht zweckmässig, die Entstehung der in der Gleichung vorkommenden Zahl 845 hier in Erinnerung zu bringen.

Die Gewichtseinheit eines Gases nehme bei einem Druck P_0 das Volumen V_0 ein. Aendert sich das Volumen in V um, so ändere sich der Druck in P . Auch die Temperaturänderung hat auf Druck- und Volumenänderung bekanntlich einen Einfluss. Die quantitativen Beziehungen zwischen diesen Umwandlungen werden durch das BOYLE'sche (MARIOTTE'sche) und GAY-LUSSAC'sche Gesetz ausgedrückt, nach welchen beiden Gesetzen bekanntlich ist

$$P_0 V_0 (1 + \alpha t) = PV$$

Hier bedeutet α den Ausdehnungscoefficienten der Gase = $\frac{1}{273}$ und t die Temperatur. Statt α können wir setzen $\frac{1}{a}$, wenn wir $a = 273$ nehmen; die Gleichung lässt sich dann umformen in

$$\frac{P_0 V_0}{a} (a + t) = PV.$$

Da zwischen Druck und Volumen nach BOYLE umgekehrte Proportionalität besteht, so ist das Product aus beiden eine constante Zahl. Da auch a constant ist, so ist der erste Factor auf der linken Seite der Gleichung ebenfalls eine Constante, die mit R bezeichnet wird. $a + t$ aber bedeutet die absolute Temperatur, die mit T bezeichnet wird. Setzen wir diese beiden Grössen in die Gleichung ein, so haben wir

$$RT = PV$$

Diese Gleichung ist der in der mechanischen Wärmetheorie gebräuchliche Ausdruck des GAY-LUSSAC-BOYLE'schen Gesetzes.

Wenn wir von der Gewichtseinheit der Gase ausgehen, so hat R einen für alle Gase gleichen Werth, falls Temperatur und Druck auch gleich sind, die Volumina der Gewichtseinheit sind aber bei verschiedenen Gasen verschieden. Wir können statt von der Gewichtseinheit aber auch von dem Moleculargewicht in kg ausgedrückt ausgehen, dann wird die Constante R eine andere, ebenfalls für alle Gase gleiche, weil die Volumina, welche in Rechnung gezogen werden, nunmehr nach dem AVOGADRO'schen Gesetz gleich werden, denn die Moleculargewichte verhalten sich wie die Gewichte der Volumeneinheit.

Um die so gewählte Volumeneinheit zu finden, können wir vom Wasserstoff, dessen Moleculargewicht = 2 ist, ausgehen und untersuchen, welches Volumen 2 kg Wasserstoff bei Normaldruck und Normaltemperatur einnehmen. 1 Cubikmeter Wasserstoff wiegt bei der absoluten Temperatur $T = 273$ und dem Druck $P = 10333$ kg pro Quadratmeter 0,08956 kg . Demnach ist das gesuchte für alle Gase gleiche Volumen $V = \frac{2}{0,08956} = 22,39$ Cubikmeter.

Der Werth von R wird gefunden, wenn man in die Gleichung $RT = PV$ für $T = 273$, $P = 10333$ und $V = \frac{2}{0,08956}$ setzt und die Gleichung für R auflöst. Hierbei wird $R = 845$, und die Bedeutung dieser Zahl ist damit klargelegt.

Ich gehe jetzt zur Betrachtung der Arbeit, welche durch osmotische Prozesse geleistet werden kann, über. Für die Pflanzenzelle spaltet sich diese Arbeit in äussere und innere. Aeussere Arbeit kann durch die osmotischen Prozesse z. B. geleistet werden, wenn bei der Vergrösserung der Zelle durch Wachstum der Luftdruck überwunden oder von einer Keimpflanze eine Erdscholle gehoben wird etc., innere dagegen kann geleistet werden durch Ueberwindung von Spannungen der Zellwand. So lange die Spannung nicht rückgängig gemacht ist, steigert sie den Energieinhalt der Zelle und somit die Verbrennungswärme.

Wir wollen jetzt die Frage aufwerfen, wie viel innere und äussere Arbeit kann ein Kilogramm-Molecül Rohrzucker in einer in Wasser schwimmenden Zelle überhaupt leisten, wenn dabei die osmotische Kraft so günstig verwerthet wird, wie physikalisch überhaupt möglich. Wir stellen uns vor, das Kilogramm-Molecül sei in der weiter oben gewählten Volumeneinheit $V = 22,39$ Cubikmeter Wasser gelöst, alsdann ist der osmotische Druck P , den es auszuüben vermag, wenn die Zelle in Wasser schwimmt = 10333 kg pro Quadratmeter oder eine Atmosphäre. Wir wollen ferner annehmen, dass dieser osmotische Druck in der Zelle bereits erreicht sei und also osmotisches Gleichgewicht herrsche, alsdann kann die osmotische Kraft der Zuckerlösung ohne

weitere Veränderung überhaupt keine Arbeit leisten. Jetzt möge sich das Molecül Rohrzucker spalten nach der Gleichung $C_{12} H_{22} O_{11} + H_2O = 2 C_6 H_{12} O_6$, alsdann verdoppelt sich die Anzahl der Molecüle, mithin verdoppelt sich der Druck und nach wieder eingetretenem Gleichgewicht hat sich das Volumen V verdoppelt und P ist bis auf eine Atmosphäre zurückgegangen. Mit der Volumenvergrößerung ist eine Arbeit geleistet, die wir berechnen wollen. So wie die Volumenvergrößerung der Zelle beginnt, sinkt der osmotische Druck und auch die Temperatur. Wir wollen annehmen, dass die Volumvergrößerung so langsam vor sich geht, dass die Temperatur der Zelle sich mit der der Umgebung = 0° (oder 273 absol. T.) fortwährend ausgleicht. Es soll ferner der sich der Volumvergrößerung entgegengesetzte Widerstand zu jeder Zeit dem osmotischen Druck gleich sein (streng genommen nur unendlich wenig geringer) alsdann wird die osmotische Kraft am vortheilhaftesten für die Arbeitsleistungen ausgenutzt. Soll die geleistete Arbeit auf demselben Wege rückgängig gemacht und also das Volumen V von 2 bis auf 1 herabsinken, so muss eine Arbeit geleistet werden, die der ersten gleich ist.

Bezeichnen wir die Arbeit mit L , so wird, wenn das Volumen der Zelle unendlich wenig zunimmt, die der Volumzunahme dV entsprechende Arbeit

$$dL = P dV.$$

Nach der Gleichung $PV = 845 T$ ist

$$P = \frac{845 T}{V}.$$

Setzen wir diesen Werth in die Gleichung für dL ein, so erhalten wir

$$dL = 845 T \frac{dV}{V}$$

Um die Arbeit L für die Volumzunahme von $V = 1$ bis auf $V = 2$ zu finden, müssen wir die vorstehende Gleichung für dieses Intervall integrieren, also

$$L = 845 T \int_{V=1}^{V=2} \frac{dV}{V}$$

$$L = 845 T \cdot \log \frac{V=2}{V=1}$$

Bevor wir eine ziffermässige Rechnung anstellen, müssen wir eine bestimmte Temperatur wählen, da die Temperatur 0° für physiologische Vorgänge in der Pflanzenzelle zu tief liegt. Die Temperatur der Zelle sei 15° , so wird $T = 273 + 15$ und

$$L = 845 \cdot 288 \cdot \log. \text{ nat. } 2,$$

$$L = 170200 \text{ Kilogrammometer,}$$

$$L = 401 \text{ Cal.}$$

Wir haben bei dieser Berechnung die Annahme gemacht, dass

bei der Ausdehnung der Zelle der Druck von 2 Atmosphären herabsinkt auf eine Atmosphäre und die Temperatur stets ausgeglichen wird. Die Druckcurve ist also mit der isothermischen Curve bei den Gasen gleich.

Wir können nun weiter die Annahme machen, dass der Zerfall des ganzen Kilogramm-molecüls Rohrzucker nicht auf einmal erfolgt, sondern Molecül für Molecül, wobei dann der Druck sich während der Volumvergrößerung stets ausgleicht und dauernd $= P$ ist. Die durch Ausdehnung bewirkte Abkühlung werde durch Wärmezufuhr von aussen compensirt. Wenn dann die Umsetzung beendet ist, so ist das Volumen $V = 2$ geworden und die Arbeit L , die dabei geleistet worden ist, wird

$$L = P (V = 2 - V = 1)$$

oder

$$L = 845 T (V = 2 - V = 1).$$

Setzen wir wieder dieselben Werthe von früher ein, so ergibt sich

$$L = 243360 \text{ Kilogramm-meter.}$$

$$L = 575 \text{ Cal.}$$

Unter diesen Umständen wird von den osmotischen Kräften die meiste Arbeit geleistet, die nur noch gesteigert werden kann, wenn sich die Temperatur steigert. Gehen wir damit z. B. bis zu 50° (eine viel höhere Temperatur vertragen die meisten Pflanzen nicht), so ergibt sich für

$$L = 272935 \text{ kgm.}$$

$$L = 644 \text{ Cal.}$$

Wir sind bei dieser Berechnung ausgegangen von der Annahme, dass das Rohrzuckermolecül nach der Gleichung $C_{12} H_{22} O_{11} + H_2O = 2 C_6 H_{12} O_6$ zerfällt. Es liegt auf der Hand, dass durch abermalige Spaltung des Traubenzuckers und des Fruchtzuckers die Verdoppelung der Molecülzahl sich wiederholen kann, was dann eine Verdoppelung der Arbeit zur Folge haben wird. Indessen ist klar, dass bei der endlichen Anzahl Atome, die das Molecül $C_{12} H_{22} O_{11}$ enthält, sich dieser Verdoppelungsvorgang auch nur eine beschränkte Anzahl mal wiederholen kann. Die höchste, für den osmotischen Process wirksame Molecülzahl, die aus einem Molecül Rohrzucker entstehen kann, ist 12, da die entstehenden Wassermolecüle für die Steigerung des osmotischen Druckes unwirksam sind.

Die osmotische Arbeitsleistung eines Kilogramm-Molecüls Rohrzucker bei 15° kann also den Werth von $12 L = 2920320$ Kilogramm-meter oder 6895 Cal. nicht übersteigen. Dabei ist es ganz gleichgültig, welcher Art die Umsetzungen sind, die das

Zuckermolecül bis zu seinem Zerfall in CO_2 und H_2O durchmacht, denn der osmotische Druck ist von der Qualität der Molecüle gänzlich unabhängig und hängt nur von der Zahl derselben ab.

Vergleichen wir die maximale osmotische Arbeitsleistung eines Kilogramm-Molecüls Rohrzucker bei 15° mit dessen Verbrennungswärme [1322172 Cal.¹⁾], so ergibt sich, dass die osmotische Leistung nur 0,521 pCt. von der gesammten Verbrennungswärme des Kilogramm-Molecüls Rohrzucker ausmacht.

Bei dieser Berechnung ist vorausgesetzt, dass die Zelle in Wasser schwimmt. Durch Verdunstung von Wasser aus der Zelle, wodurch sich die Concentration des Zellsaftes ändert und mit ihr der osmotische Druck, kann weitere Arbeit geleistet werden. Doch auf diesen Fall will ich später eingehen und vorerst eine andere Frage erörtern.

Bei der osmotischen Volumvergrößerung der Zelle, wodurch eben die Arbeit geleistet wird, findet Abkühlung statt. Ich habe angenommen, dass dieselbe durch Wärmezufuhr von aussen ausgeglichen wird, so dass die Temperatur constant 15° bleibt. Die Reaction $C_{12} H_{22} O_{11} + H_2O = 2 C_6 H_{12} O_6$ ist aber mit Wärmeentbindung verbunden, die grösser ist als nöthig, um die Abkühlung zu compensiren. Es bestehen nun offenbar zwei Möglichkeiten: entweder fallen Temperatursteigerung durch Reactionswärme und Abkühlung durch osmotische Volumänderung ihrem ganzen Verlauf nach zeitlich zusammen, alsdann kann von aussen keine Wärme aufgenommen werden, oder der Temperatenausgleich und der Volumausgleich vollziehen sich in verschiedenen Zeiten, dann kann von aussen Wärme aufgenommen werden, wenn die Temperaturdifferenz sich schneller ausgleicht als die Volumdifferenz. Bei Eintritt der ersten Möglichkeit ist die osmotische Leistung an die chemische Reaction (Athmung?) gekettet, bei Eintritt der zweiten Möglichkeit würde durch osmotische Prozesse äussere Wärme, die nicht durch die chemische Reaction mit Nothwendigkeit entstanden zu sein braucht, in Arbeit verwandelt werden können. Um uns für eine Möglichkeit zu entscheiden, müssen wir Temperatur- und Volumausgleich als Function von der Zeit untersuchen.

Wir wollen zunächst den Temperatenausgleich betrachten, wobei wir natürlich eine endliche Temperaturdifferenz zwischen der Zelle und der Umgebung voraussetzen müssen, weil bei unendlich kleinen Differenzen die Zeit unendlich gross wird, was keinem natürlichen Process entspricht. Wir nehmen dieselbe = t . Bedeutet c den in der Zeit 1 bei der Temperaturdifferenz 1 erfolgten Ausgleich, so ist der in einer

1) Journal für praktische Chemie, N. F. Bd. 31, 1885, pg. 291, nach Bestimmungen von STOHMANN. Streng genommen müssten wir die Verbrennungswärme des gelösten Zuckers in Rechnung ziehen, was indessen das Resultat nur wenig beeinflusst.

unendlich kleinen Zeit dz sich vollziehende Ausgleich nach NEWTON

$$c t dz.$$

Durch diesen Ausgleich geht t in $t - dt$ über. Wir erhalten die Differentialgleichung

$$- dt = c t dz$$

$$dz = - \frac{1}{c} \frac{dt}{t}$$

und durch Integration

$$z = - \frac{1}{c} \log t.$$

Die Rechnung für die Volumausgleichung gestaltet sich folgendermassen. Wir dürfen annehmen, dass für unendlich kleine Zeiten die Volumausgleichung der Druckdifferenz p proportional ist. Ferner sei die Volumänderung in der Zeiteinheit bei der Druckdifferenz $1 = a$, so ist die in der unendlich kleinen Zeit sich vollziehende Volumänderung

$$a p dz.$$

Dadurch wird die Volumdifferenz v umgeändert in $v - dv$, und es entsteht die Gleichung

$$- dv = a p dz.$$

$$dz = - \frac{dv}{a p}.$$

Durch Integration dieser Gleichung folgt

$$z = - \frac{V}{a p}.$$

Als Functionen von der Zeit betrachtet folgen also Temperatenausgleich und Volumausgleich verschiedenen Gesetzen, deshalb ist es denkbar, dass die durch die Reactionswärme bedingte Temperaturerhöhung schneller ausgeglichen wird, als die durch Veränderung des osmotischen Druckes bedingte Volumänderung und mit ihr die Abkühlung, die der Volumänderung proportional geht, zumal die Temperaturdifferenz in geometrischer Reihe schwindet, während die Volumdifferenz sich in arithmetischer Reihe vermindert, wie das die Gleichungen für z zeigen. Dadurch wird es denn auch möglich, dass äussere Wärme in Arbeit verwandelt werden kann, was, wenn anfangs Temperaturgleichheit herrschte, wie schon hervorgehoben wurde, ganz unmöglich wäre, wenn der Temperatenausgleich und der Volumausgleich als Functionen von der Zeit betrachtet einander parallel gingen, denn dann wäre ja die Reactionswärme in jedem Augenblick verfügbar zur Ausgleichung der durch die Volumänderung bewirkten Abkühlung.

Wenn indessen äussere Wärme in Arbeit verwandelt werden soll, so müssen endliche Druckdifferenzen vorausgesetzt und die osmotische Leistung strenggenommen nach der Gleichung

$$L = 845 T \log \frac{V_2}{V_1}$$

berechnet werden. Je kleiner wir aber die Druckdifferenzen wählen, je kleiner werden auch die Volumdifferenzen $V_2 - V_1$, und umsomehr nähert sich der Werth dieser Gleichung demjenigen der Gleichung

$$L = 845 T (V_2 - V_1).$$

Der Arbeitswerth, den diese Gleichung liefert, ist also ein Grenzwert, der in Wirklichkeit kaum erreicht werden kann.

Fragen wir nun nach dem Verhältniss zwischen derjenigen Wärme, die möglicherweise von aussen aufgenommen und in Arbeit verwandelt werden kann, und derjenigen Wärme, die der chemischen Reaction entstammt und in Arbeit verwandelt werden kann, so besteht zwischen beiden kein festes Verhältniss, sondern dasselbe hängt ab von der durch die Umsetzung bewirkten Druck- und Temperaturdifferenz, sowie von den Coefficienten a und c . Soviel lässt sich indessen aus den beiden Gleichungen für z auch ohne Kenntniss der Coefficienten a und c folgern, dass die äussere Wärme um so weniger mit für Arbeitsleistungen verwandt wird, je geringer die Druck- und Temperaturdifferenzen genommen werden, denn um so mehr nähert sich die geometrische Reihe für die Temperaturdifferenzen der arithmetischen für die Volumdifferenzen, und um so mehr fallen Wärmeabgabe nach aussen und Wärmeverbrauch für Arbeit zeitlich zusammen, um so mehr müssen sich beide Prozesse compensiren. Wir können das kurz so ausdrücken: Wenn die Bedingungen für die osmotische Arbeitsleistung am günstigsten sind, so sind auch die Bedingungen für die Verwerthung der Reactionswärme am günstigsten; wenn die Zelle äussere Wärme in Arbeit verwandelt, so ist die überhaupt erreichbare osmotische Arbeit jedenfalls kein Maximum.

Ich habe bislang die Temperatur der Zelle und des Wassers, in dem sie schwimmt, von vorne herein als gleich angenommen, wenn also Temperaturdifferenzen in Frage kamen, so waren sie durch die Reactionen (chemische wie physikalische) selbst bedingt. Wir können nun auch die Annahme machen, die Temperatur der Umgebung der Zelle sei von vorne herein höher oder tiefer als die der Zelle selbst und dann die Frage nach der Grösse der osmotischen Leistung aufwerfen. Dieselbe beantwortet sich nach dem Vorausgegangenen leicht.

Wenn die Temperatur der Umgebung höher ist als die der Zelle, so ist die osmotische Leistungsfähigkeit ein Maximum, aber äussere Wärme braucht nicht nothwendig in Arbeit verwandelt zu werden. Steigt die Temperatur der Zelle, so erhöht sich die osmotische Leistungsfähigkeit im Verhältniss der absoluten Temperaturen.

Ist die Temperatur der Zelle höher als die der Umgebung, so kann die Reactionswärme schneller an die Umgebung abgegeben werden, als

sich die osmotischen Arbeitsleistungen vollziehen. Die osmotische Leistungsfähigkeit sinkt im Verhältniss wie sich die absolute Temperatur der Zelle verringert. Soweit osmotische Arbeit geleistet wird, strebt die damit verbundene Abkühlung den Temperatenausgleich zwischen Zelle und Umgebung zu beschleunigen, die Zelle kühlt sich also in Folge der Arbeit ab und benutzt ihre eigene freie Wärme zu den osmotischen Leistungen. Die in Arbeit verwandelte Wärme ist nicht die durch die chemische Reaction entstandene. Die osmotische Leistungsfähigkeit ist unter diesen Umständen kein Maximum.

Wir geben jetzt die Voraussetzung auf, dass die Zelle in Wasser schwimmt und betrachten eine Zelle, die Wasser verdunsten kann, aber doch auch mit Wasser in Berührung ist, so dass sich osmotische Prozesse vollziehen können. Wir gehen wieder von einem osmotischen Gleichgewichtszustand aus, der durch Zerfall des Molecüls Rohrzucker in Trauben- und Fruchtzucker und darauf folgender Volumvergrößerung der Zelle herbeigeführt ist. Die dadurch bewirkte Arbeitsleistung

$$L = 845 T \log \frac{V_2}{V_1}$$

kann durch Wasserverdunstung rückgängig gemacht werden und sich auf's Neue wiederholen. Dabei wird äussere Arbeit in Wärme verwandelt. Indessen wird die äussere Wärme dabei sehr schlecht ausgenutzt. Um den Process rückgängig zu machen, muss eine Wassermenge $V_2 - V_1$ verdunstet werden, was einen Wärmearbeit von $(V_2 - V_1) l$ Cal. erfordert, wenn l die Verdampfungswärme des Wassers ist. Für unser Beispiel $V_2 - V_1 = 1$ ist statt 1 die gewählte Volumeneinheit von 22,39 Cubikmeter = 22390 kg einzusetzen. Nehmen wir die Verdampfungswärme bei $15^\circ = 596$ Cal., so würde ein Wärmearbeit von 13344440 Cal. allein zur Wasserverdunstung erforderlich sein, wozu noch der Wärmewerth der rückgängig zu machenden Arbeit von 401 Cal. hinzukommt. Es werden also durch diesen Process nur ca. 0,003 pCt. der aufgewandten Wärme in Arbeit verwandelt.

Wenn wir ferner uns den Verlauf des Processes auch so vorstellen, dass durch die Verdunstung der osmotische Druck constant gehalten wird, sodass wir die Maximalarbeit bekommen, die durch osmotische Prozesse geleistet werden kann, so beträgt der in Arbeit verwandelte Theil der aufgewandten Wärme doch nur 0,00433 pCt.

Da diese Arbeit unabhängig von chemischen Zersetzungsprocessen in der Zelle geleistet wird, so können wir die Annahme machen, dass einmal in der Zelle chemische Umwandlungen überhaupt nicht stattfinden. Alsdann muss, wenn der osmotische Druck constant bleiben soll, auch das Volumen der Zelle constant bleiben, was nur möglich ist, wenn durch den osmotischen Druck, der, wenn vorher Gleichgewicht bestand, mit beginnender Verdunstung in der Zelle negativ wird,

ebensoviel Wasser eingesogen wird, wie durch Verdunstung verloren geht. Ob die durch Wasserverdunstung erzielte osmotische Arbeit dazu ausreicht, hängt von den Widerständen, die der Wasserbewegung entgegenstehen, ab. Soviel ist aber ohne Weiteres klar, wollen wir die Wasserbewegung durch osmotische Arbeit erklären, so muss eine osmotische Druckdifferenz nachweisbar sein. Wenn z. B. durch osmotische Arbeit das Wasser des Transpirationsstromes 10 m hoch der Schwerkraft entgegen bewegt werden soll, so muss zwischen der Concentration des Wurzelzellsaftes und der des verdunstenden Blattes ein Konzentrationsunterschied herrschen, der mit einer ca. 1,5 procentigen Rohrzuckerlösung isoton ist. Ich will indessen auf die Fragen der Wasserbewegung hier nicht näher eingehen.

Nun ist noch die Frage von Interesse, in welchem Verhältniss die durch Wasserverdunstung erzielbare osmotische Arbeitsleistung zu der durch chemische Umsetzung ausgelösten Energie steht. Natürlich ist dies Verhältniss kein constantes, sondern hängt ganz von dem Verhältniss ab, in welchem Wasserverdunstung und chemische Umsetzung stehen.

Ich habe bei früheren Versuchen über den Stoff- und Kraftumsatz in der Pflanze das Verhältniss der durch Leitung und Strahlung in Folge von Sauerstoffathmung abgegebenen Wärme zu derjenigen, welche durch Wasserverdunstung abgegeben wurde, an Kohlrabistengeln bestimmt, wobei sich, um hier einige Versuche¹⁾ anzuführen, folgende Zahlen ergaben.

Versuch No.	Durch Wasserverdunstung abgegebene Wärme.	Durch Leitung und Strahlung abgegebene Wärme.
I.	160 cal	295 cal
II.	49 „	225,7 „
III.	49,4 „	215,4 „

Da nun günstigen Falles von der durch Wasserverdunstung abgegebenen Wärme 0,00433 pCt. in osmotische Arbeit verwandelt werden können, so sieht man, dass das Verhältniss sehr zu Gunsten der Athmungswärme ausfällt. Bei Versuch No. I würden also nur $\frac{160}{100}$ 0,00433 cal. in osmotische Arbeit umsetzbar sein, d. i. 0,00152 pCt. der durch Athmung ausgelösten Wärme. Nun waren freilich bei diesen Versuchen die Bedingungen für die Wasserverdunstung so ungünstig wie möglich, allein, wenn sich die Wasserverdunstung auch erheblich vergrößert, so dürfte die dadurch verfügbar werdende osmotische Arbeitskraft gegenüber der durch Athmung ausgelösten Energie stets sehr gering bleiben.

Wir haben für unsere Rechnungen eine Zelle von unnatürlicher

1) PRINGSHEIM's Jahrbücher Bd. XX, p. 274.

Grösse vorausgesetzt, es braucht wohl kaum erwähnt zu werden, dass durch dieses Verfahren die relativen Verhältnisse zwischen der Verbrennungswärme des Zuckers und der durch osmotische Vermittelung entstandenen Arbeit nicht verändert werden und also auch für die kleinste Zelle Gültigkeit haben. Etwas anders wird sich indessen das Verhältniss gestalten, wenn wir statt vom Zucker von einem anderen Körper, der osmotische Arbeit zu leisten vermag und gleichzeitig auch verathmet werden kann, ausgehen, z. B. von einer organischen Säure. Indessen verschiebt sich das Verhältniss dabei nur sehr wenig. Die maximale osmotische Arbeitsleistung ist der Zahl der Kohlenstoffatome im Molecül proportional, die Verbrennungswärme der organischen Verbindungen (soweit sie für den Athmungsprocess überhaupt in Frage kommen), ist aber der Zahl der Kohlenstoffatome im Molecül nicht völlig proportional. Ich will auf die Berechnung des Verhältnisses für andere Prozesse verzichten, da jedenfalls die Kohlenhydrate ein normales Beispiel bieten.

Anorganische Verbindungen, die in der Zelle nicht weiter zu zerfallen vermögen, können osmotische Arbeit nicht leisten, sondern höchstens vermitteln.

Wenn die Widerstände, die dem osmotischen Druck entgegenwirken, nicht in jedem Moment dem osmotischen Drucke gleich sind, sondern geringer, so ist die osmotische Arbeitsleistung natürlich keine maximale, sondern sie ist geringer als die berechneten Werthe und kann im Grenzfall Null werden.

Resultate:

In Wasser schwimmende Pflanzen können, wenn sie bei einer Temperatur von 15° ein Kilogramm-Molecül Rohrzucker verathmen, ohne weiteren Stoffumsatz durch Vermittelung von osmotischen Processen mit oder ohne Aufnahme freier Wärme höchstens eine Arbeit von 2920320 Kilogramm-Meter oder 6895 Cal. leisten, d. i. nur 0,521 pCt. der gesammten Verbrennungswärme des Kilogramm-Molecüls Rohrzucker. Diese Verhältnisszahl gestaltet sich bei anderen Kohlenhydraten fast gleich.

Freie Wärme kann in untergetauchten Wasserpflanzen durch osmotische Prozesse in Arbeit verwandelt werden, doch kann die osmotische Arbeitsleistung der Zelle dann kein Maximum sein.

Wird in einer Zelle, die Wasser verdunsten kann, freie Wärme dadurch in Arbeit verwandelt, dass Concentrationsunterschiede hervorgerufen werden, so kann die freie Wärme höchstens zu 0,004433 pCt. in Arbeit verwandelt werden.

Kiel, Landw. Institut der Universität.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Berichte der Deutschen Botanischen Gesellschaft](#)

Jahr/Year: 1892

Band/Volume: [10](#)

Autor(en)/Author(s): Rodewald Hermann

Artikel/Article: [Ueber die durch osmotische Vorgänge mögliche Arbeitsleistung der Pflanzen. 83-93](#)