

Beitrag zur Beurteilung
der klimatischen Wachstumsfaktoren Kohlensäure, Sauerstoff
und Luftdruck

von HEINZ JANERT (Königsberg Pr.).

Unter Wachstumsfaktoren versteht man bestimmte chemische Substanzen, physikalische Erscheinungen oder andere Agentien, die das Pflanzenwachstum und somit die Höhe des Pflanzenertrags fortdauernd beeinflussen und bei deren Fehlen eine normale Vegetation unmöglich ist. Als klimatische wiederum bezeichnet man diejenigen äusseren Wachstumsfaktoren, die direkt der Atmosphäre entstammen oder durch diese wirken, im Gegensatz zu denen des Bodens, die auf den Pflanzenorganismus nur einwirken können, wenn sie dem Boden einverleibt und den Pflanzenwurzeln erreichbar sind. Seitdem zum ersten mal JUSTUS v. LIEBIG gewisse konkrete Stoffe als Wachstumsfaktoren in diesem Sinne festgestellt hat, ist die pflanzenphysiologische Forschung städig bemüht gewesen, unsere Kenntnisse über das Wesen der Wachstumsfaktoren zu erweitern. Diese Arbeiten wandten sich jedoch in ungleich grösserer Masse der Erforschung der Bodenfaktoren zu, da diese der Einwirkung des Menschen mehr ausgesetzt, also eher kulturfähig sind, während die klimatischen Faktoren mehr oder weniger als feststehende Tatsachen hingenommen werden müssen. Sind erst die Bodenfaktoren restlos erforscht und bei weit fortgeschrittener Kultur optimal gestaltet, so werden die klimatischen Faktoren immer deutlicher den Charakter der evrhältismässig am meisten im Minimum befindlichen Wachstumsfaktoren annehmen. Dann wird es, begründet durch die spezifische Eigenschaft des Bodens, seine Unvermehrbarkeit, vom wirtschaftspolitischen und Rentabilitätsstandpunkt zur Notwendigkeit, auch die klimatischen Faktoren zu kultivieren. Ein Ziel, oder vielmehr ein Weg, dessen fernerer Verlauf der Unzulänglichkeit menschlichen Denkens verschlossen ist.

Zur Untersuchung der Wirkung eines Wachstumsfaktors ist der Vegetationsversuch als einzig zuverlässiger Mittel anzusehen. Das heisst ein praktischer Versuch, bei dem man das betreffende Agens unter möglichst optimaler Gestaltung aller anderer Faktoren auf lebende Pflanzen wirken lässt und dessen Ergebnis aus dem Ertrage resultiert, denn allein auf den Ertrag kommt es an. Von der Wirkung des betr. Faktors auf den Ertrag erhält man kein klares Bild, wenn zu derartigen Versuchen nur Pflanzenteile, etwa abgetrennte Blätter, verwandt werden, wie es verschiedene Forscher getan haben, die dadurch oder infolge nicht genügend deutlicher Fragestellung an die Natur zum Teil zu irreführenden, stets aber nur zu qualitativen, Richtung abgebenden Resultaten gelangt sind.

Nachdem aber E. A. MITSCHERLICH (1) durch Schaffung des „Wirkungsgestzes der Wachstumsfaktoren“ die Bahnen für die quantitative Untersuchung derartiger Fragen gewiesen hat, ist es notwendig, die quantitative Versuchsanstellung und Resultatsverwertung, die allein eine sichere Beurteilung der durch den betr. Faktor erreichbaren Ertragssteigerung zulässt, nunmehr auch für die Erkenntnis der Wirkung der in Frage stehenden drei klimatischen Faktoren nutzbar zu machen. Ausschliesslich dieser Aufgabe ist die vorliegende Arbeit gewidmet.

Den Stand der wissenschaftlichen Forschung schildere ich bei der Mitteilung meiner eigenen Versuche über die einzelnen Faktoren, die ich in der Reihenfolge Luftdruck - Sauerstoff - Kohlensäure besprechen werde.

A. Der Luftdruck.

Angesichts der Tatsache, dass phanerogame Pflanzen bis zu einer Höhe von 6000 m über dem Meeresspiegel im westlichen Tibet (2), kryptogame entsprechend höher vorkommen, dass andererseits Pflanzen noch in einer Tiefe von 200 m unter dem Meeresspiegel (3) ihr Leben fristen können, was eine Druckdifferenz von über 20 Atmosphären bedeutet, lag es nahe, zu untersuchen, welchen Einfluss der äussere Druck der Luft auf das Pflanzenleben ausübt. Bereits SENEBIER (4) und HUMBOLDT (5) äusserten sich dahin, dass der Druck der Luft einen Einfluss auf das Wachstum und die Gestalt der Pflanzen hat.

Der erste, der diese Frage experimentell zu lösen versuchte, war DOEBEREINER (6). Er verglich keimende Gerstensamen erstens in halb verdünnter und zweitens in doppelt verdichteter Luft und stellte fest, dass beide gleichmässig keimten, nach 14 Tagen aber die ersteren 6 Zoll, die letzteren dagegen 9 Zoll lang geworden waren. Aus dieser Beobachtung glaubte DOEBEREINER schliessen zu dürfen, dass der verminderte Luftdruck ein Faktor ist, der das Pflanzenwachstum schädlich beeinflusst, und folgert daraus weiter, dass dieser auch für das geringere Wachstum auf den Bergen verantwortlich zu machen sei. Dass diese Schlussfolgerung unberechtigt ist, leuchtet sofort ein, wenn man die veränderte Partialpressung des Sauerstoffs, der nach meinen Untersuchungen als Wachstumsfaktor anzusehen ist, berücksichtigt. P. BERTH (7), der zur Klärung dieser Frage zahlreiche Keimversuche angestellt hat, kam denn auch zu dem Resultat, dass lediglich die Sauerstoff-Tension unabhängig von dem jeweiligen Luftdruck für die Keimintensität massgebend sei. Er bewies, dass Samen in normaler Luft nicht besser keimen als in verdünnter Luft, sofern man diese derart mit Sauerstoff anreichert, dass die Partialpressung des Sauerstoffs nicht geändert wird. Vermindert man dagegen den Luftdruck, ohne gleichzeitig die procentische Zusammensetzung der Luft zu ändern, so verläuft die Keimung umso langsamer, je geringer der Druck ist. Somit ist auch der Grad der Luftverdünnung, bis zu dem noch eine Keimung stattfindet, lediglich durch die minimalst zulässige Sauerstoff-Partialpressung gegeben. Ferner zeigte er, dass die durch zu grosse Tension des Sauerstoffs bedingten Schädigungen der Pflanzen ebenso eintraten bei Vermehrung des Druckes auf 5 Atmosphären wie in reinem Sauerstoff bei normalem Druck, und bei 9 Atmosphären ebenso wie bei 2 Atmosphären und 90% Sauerstoff.

Diese Resultate bestätigten auch die Untersuchungen von A. WIELER (8). Bei dem Studium der Frage: „Wie weit muss der Sauerstoffgehalt der umgebenden Luft sinken, um das Wachstum zu verlangsamen?“ ging er von der Voraussetzung aus, dass eine Verlangsamung des Wachstums durch Verringerung der Sauerstoff-Pressung erzielt wird, und dass letztere durch Luftverminderung hergestellt werden kann, ohne dass eine durch diese bedingte Störung zu befürchten ist. Zu seiner Ueberraschung fand er jedoch, dass das Wachstum bei durch Luftdruck-Verminderung erzielter geringerer Sauerstoff-Partialpressung zunahm, anstatt abzunehmen. Er konnte aber nachweisen, dass diese Wachstums-Beschleunigung nicht auf den verminderten Luftdruck, sondern auf den geringeren Sauerstoff-Gehalt zurückzuführen war, da die Beschleunigung auch eintrat, wenn er die zur Erzielung eines geringeren Sauerstoffgehaltes zunächst hergestellte Luftdruck-Verminderung durch Zuleitung reinen Wasserstoff-Gases ausglich. Eine weitere Erklärung konnte darin gesucht werden, dass das Auspumpen wie ein Reiz wirkt, und dadurch das Wachstum beschleunigt wird. WIELER zeigte jedoch, dass eine solche Reizwirkung nicht infrage kommt, da die Verminderung des procentischen Sauerstoffgehalts der Luft unter Vermeidung des Auspumpens ebenso eine Wachstumsbeschleunigung zur Folge hatte.

Die Untersuchungen von Paul JACCARD (9), die denen von BERTH sehr ähnlich sind, bringen nichts wesentlich neues. Trotzdem er ausführlich feststellt, dass die Erscheinungen, die in gewöhnlicher Luft zu beobachten sind, ganz ähnlich den bei vermindertem Druck auftretenden sind, sofern der Partialdruck des Sauerstoffs dem in gewöhnlicher Luft entsprechend eingestellt wird, dass sich

ferner in gewöhnlicher Luft unter 0,5 Atm. Druck dieselben Erscheinungen zeigen wie in einem konprimierten Gasgemenge von Sauerstoff, Wasserstoff und Stickstoff bei dem der Partialdruck des Sauerstoffs dem der Luft bei 0,5 Atm. Druck entspricht, so glaubte er doch, die beobachteten Erscheinungen besonders bezüglich der Deformationen im äusseren Habitus der Pflanzen nicht ausschliesslich durch die Wirkung verminderten Sauerstoff-Gehalts erklären zu können und kommt zu folgendem Schluss: „bien que la tension de l'oxygène joue un rôle prépondérant dans le phénomène, la pression absolue a aussi une action manifeste“.

Hier setzt die umfangreiche Arbeit von Friedrich SCHAIBLE (10) an, auf die ich näher eingehen muss, da SCHAIBLE, um dies gleich vorwegzunehmen, zu sehr abweichenden Resultaten gelangt ist, indem er der jeweiligen Sauerstoff-Partialdruck einen sehr geringen, dagegen dem Luftdruck an sich einen hervorragenden Einfluss auf das Pflanzenwachstum zuspricht. Er tadelt an der Versuchsanstellung der letztgenannten drei Forscher, abgesehen von der kurzen Versuchsdauer, vor allem, dass die Versuchspflanzen in der Zeit zwischen zwei Evakuationen in stagnierender Luft standen, deren Zusammensetzung durch die Lebenstätigkeit der Pflanzen naturgemäss allmählig verändert werden musste. Um dies zu vermeiden konstruierte er einen komplizierten Apparat, der trotz gleich bleibendem vermindertem Luftdruck eine kontinuierliche Lufterneuerung zulies. Er erreichte das dadurch, dass er eine mit dem Recipienten verbundene Wasserstrahl-Luftpumpe ununterbrochen arbeiten liess und durch eine feine Kapillare von genau berechneten Ausmassen ständig wiederum frische Luft zuführte. Diese sehr sinnreiche Methode ist zweifellos für die vorliegenden Untersuchungen durchaus brauchbar. Vorbedingung ist aber, dass die Vergleichsversuche unter normalem Luftdruck in gleichem Masse eine ständige Lufterneuerung erfahren. Das ist nicht geschehen, vielmehr erfreuten sich die unter normalem Druck beobachteten Vergleichspflanzen nicht nur keiner kontinuierlichen Lufterneuerung, sondern sie standen sogar unter einer Glasglocke, über deren, wenigstens zeitweise, Lüftung in der sonst sehr ausführlichen Beschreibung von SCHAIBLE kein Wort zu finden ist. Natürlich beobachtete SCHAIBLE sehr grosse Unterschiede, die besonders bei assimilierenden grünen Pflanzen infolge nicht genügender Kohlensäure-Zuführung zum Ausdruck kommen mussten. Es ist daher nicht verwunderlich, wenn SCHAIBLE zu dem bestimmten Schluss kommt, dass die Pflanzen unter vermindertem Luftdruck stärker wachsen als bei gewöhnlichem Barometerstand. Andererseits stellte er jedoch fest, dass Samen im luftverdünnten Raum langsamer und weniger zahlreich keimen als bei normalem Druck. Die Versuche, die der Frage galten, ob die veränderte Sauerstoff-Partialdruck auf diese Ergebnisse einen Einfluss ausgeübt hat, führten zu einem negativen Resultat.

Jedoch möge ein in der folgenden Tabelle wiedergegebenes Versuchsergebnis den allgemeinen Wert der von SCHAIBLE angestellten Versuche näher beleuchten. Dieser Versuch sollte zeigen, dass die bei einigen anderen Versuchen stattgehabte bedeutende Verminderung der Kohlensäure keinen wesentlichen Einfluss auf die betreffenden Pflanzen gehabt hat. Der Versuch zeigte jedoch noch viel mehr als er zeigen sollte. Zunächst lässt das Ergebnis an sich auf grosse Ungenauigkeiten in der Versuchs-Anordnung schliessen, denn es ist höchst unwahrscheinlich, dass der fast vollständige Entzug der Kohlensäure tatsächlich „keinen wesentlichen“ Einfluss ausgeübt hat. Ferner zeigt die Tabelle, wie irreführend die Angaben über Länge und Dicke des Stengels, Länge und Breite der Blätter und über das Volumen im Vergleich zu den Gewichtsangaben sind. Daraus folgt die vollkommene Unbrauchbarkeit der auf Seite 125, 132, 133 und 135 der SCHAIBLE'schen Arbeit mitgeteilten Resultate, die sich nur auf die ersteren Angaben beschränken, Begreiflich sind auch die Differenzen der Grün- und Trockengewichte von a und c. Sehr interessant ist weiterhin, dass die allein massgebenden Trockensubstanz-Gewichte der Pflanzen unter a gegenüber den Pflanzen b und c, die unter vermindertem Druck (etwa $1/4$ Atm.) standen, eine bedeutende Gewichtszunahme aufweisen, während die zur Beurteilung speziell dieser Frage angestellten zahlreichen Versuche im allgemeinen entgegengesetzte Resultate ergeben haben,

Wie schon vorher erwähnt, erkannte SCHAIBLE den Einfluss veränderter Sauerstoff-Partiärpressung auf die Erscheinungen, die an Pflanzen in verdünnter Luft beobachtet wurden, nicht an. Er hält sich auf Grund seiner Versuche vielmehr für berechtigt, BERT vorzuwerfen, dass seine Versuche lediglich angestellt seien, um

SCHAIBLE, 6. Experiment, p. 119.

Exemplare	Länge des Stengels			Dicke des Stengels. mm	Länge		Breite der Blät- ter mm	Volu- men ccm	Gewicht	
	Wur- zel bis Keim- blatt mm	Keim- blatt bis 1. Blatt- paar mm	ins- ge- samt mm		der Blatt- stiele mm	der Blät- ter mm			grün mgr	trocken mgr
a. unter normalem Druck	62	26,66	88,66	7,75	6,33	14,33	14	2,5	4200	450
b. im Re- zip. R mit aller Kohlens.	73,6	40,8	114,4	7	15,3	19	19,2	4,15	4050	360
c. im Re- zip. R 1. Kohlens. grösstent entzogen	74	33,4	107,4	8	18	27,9	30,1	4,4	4500	370

eine „vorgefasste“ Meinung zu bestätigen; und von WIELER behauptet er, dass dieser trotz entgegengesetzter Resultate an der Sauerstoff-Theorie von BERT festgehalten habe. Für beide Behauptungen habe ich nicht die geringsten Anhaltspunkte finden können. Unverständlich ist namentlich die Angabe SCHAIBLE's, WIELER habe über die Versuche und deren Resultate, die die Richtigkeit der BERT'schen Theorie bestätigen. Wenn SCHAIBLE sich schliesslich noch darauf beruft, WIELER habe am Schluss seiner Abhandlung selbst angegeben, dass das schlechtere Wachstum im luftverdünnten Raum vorläufig nicht zu erklären sei, so liegt hier ein Irrtum vor, denn bei genauerem Studium des betr. Abschnittes erkennt man un schwer, dass WIELER lediglich gemeint hat, dass es zunächst noch unerklärlich ist, worauf der faktisch bestehenden Einfluss der Sauerstoff-Partiärpressung auf das Pflanzenwachstum zurückzuführen ist.

SCHAIBLE hat auch versucht, anstelle der Sauerstoff-Theorie eine andere Erklärung für das gesteigerte Wachstum bei vermindertem Luftdruck zu geben. An der Hand zahlreicher Versuche mit Markzylindern tritt er den Beweis an, dass die Beschleunigung der Wachstumsvorgänge im luftverdünnten Raum auf die erhöhte Turgosspannung, die durch gesteigerte Wasseraufnahme im luftverdünnten Raum bedingt sei, zurückzuführen ist.

SCHWENDENER und KRABBE (11) haben jedoch bereits nachgewiesen, dass eine gesetzmässige Beziehung zwischen Zuwachsgrösse und dem Masse der Turgordehnung nicht besteht.

Auch PFEFFER (12) weist diese Annahme als irrig zurück, akzeptiert aber trotzdem den direkten Einfluss des verminderten Luftdrucks. Die von ihm in betracht gezogene Erklärung, dass durch eine Luftverdünnung die zur Aquilibrierung des natürlichen Luftdrucks benutzte Turgorenergie für die Pflanze disponibel wird,

hält der Kritik jedoch nicht stand. Denn eine solche Wirkung müsste sich bei wachsenden Pflanzen und Keimlingen in gleicher Richtung äussern und zwar als einmalige Reizwirkung, nicht aber als Dauerwirkung, da anzunehmen ist, dass die Pflanze sehr bald die normale Druckdifferenz wieder herstellt, zu deren Aufrechterhaltung dann der gleiche Energie-Aufwand notwendig ist. Seine Annahme würde auch bedingen, dass eine gegensätzliche Wirkung eintritt, wenn die in verdünnter Luft gezogenen Pflanzen wieder dem normalen Luftdruck ausgesetzt werden.

Diese Erwägungen haben mich zu dem Schluss geführt, dass die verbreitete, durch die SCHAIBLE'schen Versuche begründete Ansicht, durch die Luftdruck-Vermin- derung an sich könne eine Beschleunigung der Wachstumsvorgänge verursacht werden, durchaus nicht einwandfrei bewiesen ist, sodass es wünschenswert erschien, hierin durch exaktere Versuche endgiltig Klarheit zu schaffen. Exakter sind meine Versuche zum mindesten insofern, als sie den hauptsächlichsten Mangel sämtlicher bisher in dieser Richtung angestellter Versuche, der zweifellos in der ungenügenden Anzahl von Vergleichsversuchen (2 - 3) und in dem gänzlichen Fehlen von Parallelversuchen zu erblicken ist, abstellen. Ferner bin ich peinlich darauf bedacht gewesen, alle übrigen Wachstumsfaktoren möglichst optimal zu gestalten, alle übrigen Wachstumsfaktoren möglichst optimal und für alle Versuchspflanzen gleich zu gestalten, sodass eine etwaige Wirkung des variierten Luftdrucks deutlich hätte zum Ausdruck kommen müssen.

Ich begann mit einem Keimversuch mit Samen von *Avena sativa*. Da ein Apparat, wie ihn SCHAIBLE verwandt hat, für mich aus naheliegenden Gründen nicht infrage kam, hielt ich im Wesentlichen an der allerdings erheblich verbesserten Methode von WIELER fest, insofern als ich die Lüftererneuerung, ebenso wie dieser, durch häufiges Evakuieren bewirkte. Die von SCHAIBLE gegen diese Methode angeführten Gründe kann ich nicht anerkennen. Gewiss wird durch die Lebenstätigkeit der Pflanzen eine allmähliche Veränderung der Zusammensetzung der in den Gefässen eingeschlossenen Luft herbeigeführt, die schliesslich für die Pflanzen schädlich werden muss. Jedoch glaube ich, dass dieser Gefahr durch entsprechende Grösse der Vegetationsgefässe und häufige Lüftererneuerung durchaus genügend vorgebeugt worden ist. Selbst wenn trotzdem eine solche Schädigung eintreten wäre, so hätte sie alle Versuchspflanzen gleichmässig treffen müssen und hätte somit das Gesamtergebnis nicht beeinflussen können.

Als Versuchsgefässe benutzte ich luftdicht abgeschlossene zylindrische Glasgefässe mit einem durchschnittlichen Volumen von 915 ccm, in denen ich je 25 Samenkörner auf gleichmässig feuchtem Filtrierpapier zum Keimen ansetzte. Ich gieng nun so vor, dass ich zunächst sämtliche Gefässe gleichmässig bis auf 10 mm Quecksilbersäule mittelst Wasserstrahl-Luftpumpe evakuierte. Dadurch wurde eine eventuelle Reizwirkung, die durch verschieden starkes Auspumpen hätte eintreten können, ausgeschlossen. In die luftleeren Gefässe leitete ich dann so lange reinen Sauerstoff, den ich einer Stahlflasche entnahm, hinein, bis ich einen Druck von 159 mm anzeigte, welche Sauerstoffmenge unter Zugrundelegung eines für den Ort meiner Untersuchungen normalen Luftdrucks von 758 mm einer Sauerstoff-Partialdruck von 21 Vol.-Prozent entspricht. Die Variierung des Luftdrucks erreichte ich dann durch Zuleitung verschiedener Mengen reinen Stickstoffs. Da dieser in Stahlflaschen nicht erhältlich war, musste ich ihn mir selbst herstellen. Ein Versuch, ihn aus Ammoniumnitrit zu gewinnen, musste der hohen Kosten wegen aufgegeben werden. Ich habe mir den Stickstoff dann stets folgendermassen hergestellt: Der in einem abgeschlossenen Quantum Luft enthaltene Sauerstoff wurde durch Verbrennung in Kohlensäure übergeführt, dieses Gasgemisch zwecks Entfernung der Kohlensäure durch drei Flaschen mit konzentrierter Natronlauge geleitet und der dann allein übrig bleibende Sauerstoff, nur noch vermischt mit Argon, in einem Gasometer aufgefangen.

Die Variierung des Luftdrucks ist aus der Tabelle auf der folgenden Seite ersichtlich. Ich beobachtete den Versuch 14 Tage, in welcher Zeit ich die Gasmischung 8 mal erneuerte.

Als Resultat ergab sich, dass die Hafersamen mit fortschreitender Luftdruck-Vermin- derung schneller keimten. Die Unterschiede waren nicht gross, aber durchweg

deutlich erkennbar. Hierin könnte man bei oberflächlicher Betrachtung allerdings eine Bestätigung der Theorie von SCHAIBLE erblicken. Die Steigerung der Keimintensität lässt sich aber viel einfacher als durch diese Theorie erklären, nämlich dadurch, dass die Diffusion des Sauerstoffs bei geringerer Durchmischung mit Stickstoff lebhafter vor sich gehen musste. Da aber der Sauerstoff mit 21 Vol. Prozent für die Keimpflanze noch nicht im Optimum vorhanden war, so konnte und musste durch die lebhaftere Diffusion des Sauerstoffs eine Steigerung der Keim-Intensität herbeigeführt werden.

Luftdruck-Keimversuch. Druck in mm Quecksilbersäule.

Nr.	21% Sauerstoff	Stickstoff	nicht ausgepumpt	zusammen
I.	159	0	10	169
II.	159	100	10	269
III.	159	200	10	369
IV.	159	300	10	469
V.	159	400	10	569
VI.	159	500	10	669
VII.	159	589	10	758
VIII.	mit atmosphärischer Luft gefüllt			758

Jedem einzelnen Gefäss läuft ein zweites parallel.

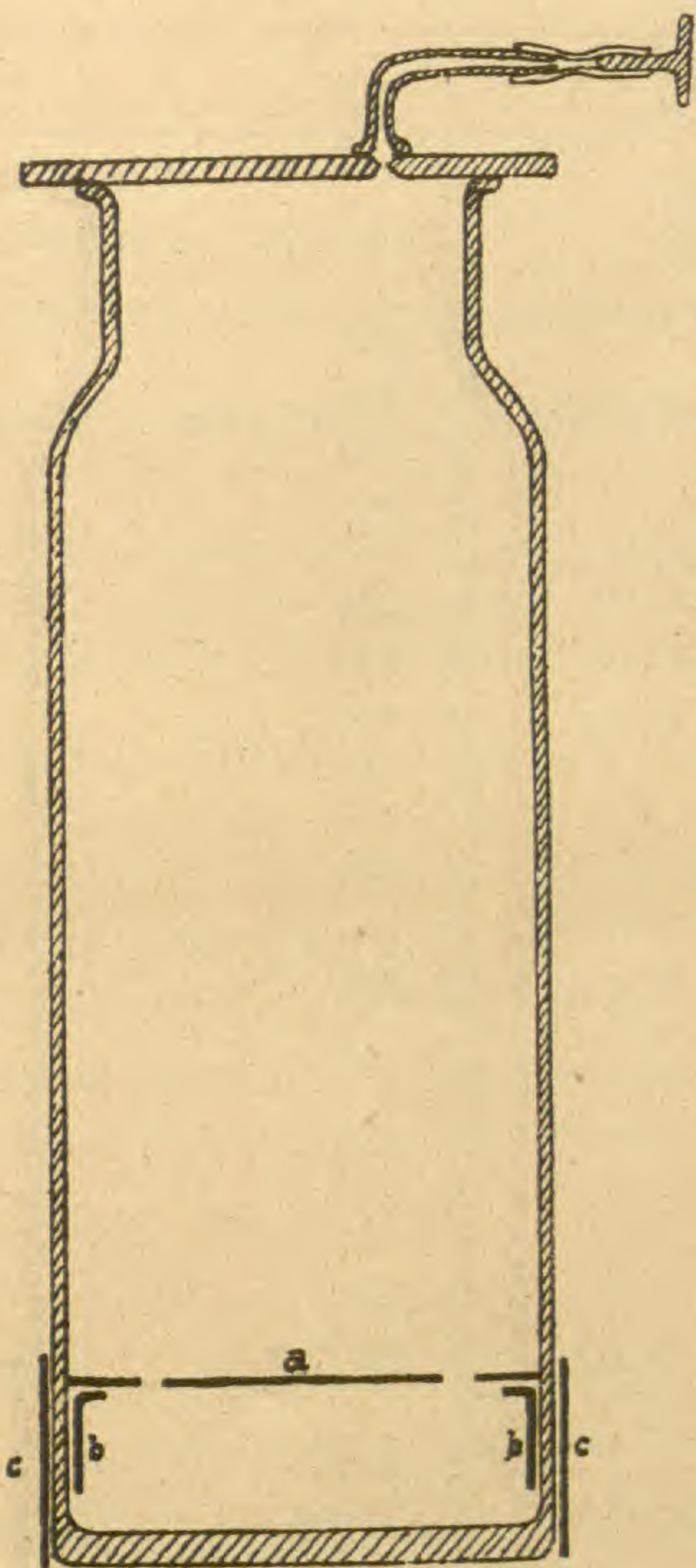
Nach Abschluss des Versuchs setzte ich die beiden Extreme, also die Gefässe I. und VII, dem normalen Luftzutritt aus, wobei sich zeigte, dass die Keimpflanzen in Gefäss I. den Vorsprung, den sie gegenüber denen im Gefäss VII. ursprünglich hatten, in ihrer weiteren Entwicklung beibehielten.

Als nächsten stellte ich einen Wachstumsversuch an, und zwar ebenfalls mit Hafer, wie ich überhaupt zu meinen sämtlichen Versuchen Hafer benützte, da dieser schnell wächst und auch in Nährlösung gut gedeiht. Die Versuchsanstellung blieb im wesentlichen die gleiche mit dem Unterschiede, dass ich

1. andere Gefässe benützte;
2. den Hafer vorher auf Filtrierpapier ankeimte und erst nach Entwicklung des Sprosses in die Vegetationsgefässe brachte;
3. dem Gasgemisch durchweg 5% Kohlensäure beigab und
4. den Versuch nicht wie den Keimversuch im Dunkeln hielt, sondern im Gewächshaus aufstellte.

Die Vegetationsgefässe, die ich zu diesem Versuch ebenso wie zu den beiden Sauerstoff-Vegetationsversuchen und zu dem Kohlensäure-Versuch Nr. IV. verwendete, werden durch Fig. 1 (Seite 161) und Figur 3 veranschaulicht. Die Gefässe waren im hiesigen Landwirtschaftlichen Institut bereits vorhanden, wo sie zur Ausführung von Bodenanalysen nach der Kohlensäure-Extraktionsmethode benutzt wurden. Ich brauchte nur den Gefässrand plan schleifen, die Deckel besorgen und die Inneneinrichtung herstellen. Letztere gelang nach verschiedenen misslungenen Versuchen sehr zufriedenstellend. Die paraffinierte Blechscheibe a, die wegen der schmaleren Gefässöffnung aus zwei auseinandernehmbaren Teilen besteht, ist mit 12 im Kreise angeordneten Durchbohrungen zur Aufnahme von 12 Pflänzchen versehen. Sie wird durch 4, bei späteren Versuchen 8 Trägern -b- gehalten, die mit einem Kitt bestehend aus 4 Teilen Harz, 1 Teil Wachs und 1 Teil Kolkothar an der Gefässwand befestigt sind. Die Blechscheibe ist mit einer vierfachen Lage Filtrierpapier bedeckt, was notwendig ist, um die Pflanzen in den grösseren Durchbohrungen zu halten. Die angewandte Nährlösung enthielt alle notwendigen Salze in einer Gesamtkonzentration von 1,5 pro Mille. Sie wird von oben durch die Blechscheibe und seitwärts durch schwarzes Kartompapier -o- fast vollständig verdunkelt, sodass Algenbildung nur in ganz unbedeutendem Masse eintrat. Zur Abdichtung der Gefässe an der Berührungsfläche von Deckel und Gefässrand benützte

ich Plastilin, das im Handel leicht erhältlich und auch nicht teuer ist, besonders wenn man berücksichtigt, dass es stets von neuem verwandt werden kann. Die Masse eignet sich zu diesem Zweck offenbar sehr gut, da während der ganzen Dauer der Versuche nicht ein einziges Gefäss undicht wurde



Figur 1 Masstab 1 6

Auf das Ankeimen ist besonders Sorgfalt zu verwenden, denn es muss verhindert werden, dass sich die Keimwurzeln mit dem Filtrierpapier oder irgend einer anderen Unterlage verfilzen. Das wird sehr gut erreicht durch Anwendung eines Rost-Keimapparats wie ich ihn stets benützt habe. Auf Glasroste, die mit Filtrierpapier umhüllt sind, legt man die Haferkörner derart, dass die Keimwurzeln dem geotropen Reiz folgend in das bis dicht unter dem Roste stehende Wasser wachsen müssen, ohne dabei mit dem Filtrierpapier in Berührung zu kommen. Um möglichst gleiche Pflanzen zu erzielen, sind nur vorher ausgesuchte, gleichmässig entwickelte Körner zu verwenden.

Der Versuch wurde im Monat Juni 1921 ausgeführt und 25 Tage beobachtet. Die Gasmischung wurde zunächst an jedem, später an jedem zweiten Tag erneuert. Die Variierung des Druckes und die aus dem Grüngewicht der Halme und durch Trochenschubstanz-Bestimmung ermittelten Resultate sind aus der Tabelle auf Seite 162 ersichtlich.

Die etwas geringeren Erträge von XIX und XX sind mit den übrigen Resultaten nicht direkt vergleichbar, da diese beiden Gefässe mit gewöhnlicher Luft und nicht, wie die anderen Gefässe, mit einem künstlichen Gasgemisch gefüllt waren. Danach ergibt sich innerhalb der Fehlergrenze vollkommene Übereinstimmung der Resultate.

Dieses Ergebnis bestätigt nicht nur die Anschauungen von BERT und WIELER, nach der der äussere Druck ohne Einfluss auf das Pflanzenwachstum ist, sondern auch meine Erklärung für das Ergebnis des vorher beschriebenen Keimversuchs. Denn bei diesem Versuch waren sowohl Kohlensäure wie

Sauerstoff im Ueberschuss vorhanden, sodass durch die lebhaftere Diffusion dieser Gase keine Steigerung des Wachstums-Prozesses herbeigeführt werden konnte.

Als Gesamtergebnis meiner Versuche über die Einwirkung veränderten Luftdrucks auf das Pflanzenwachstum stelle ich folgendes fest:

Die abnormen Erscheinungen, mit denen das Pflanzenwachstum auf Verminderung des äusseren Luftdrucks reagiert, sind nicht auf eine direkte Wirkung des verminderten Luftdrucks an sich zurückzuführen, sondern sind lediglich eine Folge-Erscheinung der veränderten Partialpressung der das Pflanzenwachstum integrierenden Bestandteile der Luft.

B Der Sauerstoff

Schon der Entdecker des Sauerstoffs SCHEELE (13) hat die Bedeutung des Sauerstoffs für das Pflanzenleben erkannt, denn er gibt an, dass bei der Keimung Feuerluft (Sauerstoff) verbraucht und dabei Luftsäure (Kohlensäure) gebildet wird, und dass reiner Sauerstoff das Pflanzenleben schädlich beeinflusst. Nachdem die physiologische Wirkung des Sauerstoffs untersucht war, hat zuerst INGENHOUSZ (14) die Atmungs- und Assimilationsprozesse näher erforscht. Er stellte fest, dass beide Prozesse von einander unabhängig sind, dass die Zersetzung der Kohlen-

säure nur in grünen Pflanzenteilen unter Einfluss des Lichts stattfindet, und dass Atmungsprozesse Tag und Nacht statthaben.

In der richtigen Erkenntnis, dass für die Entwicklung der Keimpflanze nur exotherme Verbrennungs- oder Oxydationsprozesse massgebend sind und dass deren

Luftdruck-Vegetationsversuch.

Nr.	Druck in mm Hg.	Erträge in Gramm.					
		Halme grün	Halme trocken	Wurzeln trocken			
I	206,9	13,05	13,38 ± 0,23	0,90	0,882 ± 0,013	0,39	0,383 ± 0,004
II		13,89		0,91		0,39	
III		12,77		0,83		0,37	
IV		13,82		0,89		0,38	
V	306,9	14,16	13,98 ± 0,2	0,92	0,885 ± 0,02	0,39	0,383 ± 0,004
VI		13,27		0,84		0,37	
VII		14,61		0,93		0,39	
VIII		13,86		0,85		0,38	
IX	406,9	13,22	13,91 ± 0,27	0,84	0,873 ± 0,013	0,37	0,377 ± 0,004
X		14,57		0,90		0,39	
XI		13,94		0,88		0,37	
XII		-		-		-	
XIII	506,9	13,13	14,29 ± 0,98	0,83	0,88 ± 0,04	0,36	0,38 ± 0,02
XIV		13,46		0,93		0,40	
XV	606,9	15,12	14,19 ± 0,78	0,92	0,885 ± 0,03	0,39	0,375 ± 0,01
XVI		13,25		0,85		0,36	
XVII	758	13,09	13,69 ± 0,5	0,88	0,87 ± 0,008	0,36	0,365 ± 0,004
XVIII		14,29		0,86		0,37	
XIX	758	13,36	13,19 ± 0,14	0,82	0,81 ± 0,008	0,36	0,36 ± 0,0
XX		13,02		0,80		0,36	

Die angegebenen Druckhöhen resultieren aus je 21% Sauerstoff = 159 Quecksilber, 5% Kohlensäure = 37,9 mm Quecksilber, nicht ausgepumpt 10 mm Quecksilber und steigenden Mengen Stickstoff.

Intensität und damit auch die Keimintensität selbst von der verfügbaren Sauerstoffmenge abhängig sein muss, haben darauf HUMBOLDT (15) und ROLLO (16) den Einfluss wechselnder Sauerstoff-Partialdruck auf die Keimintensität untersucht und gefunden, dass die Keimung durch steigenden Sauerstoffgehalt der Luft bis zu reinem Sauerstoff beschleunigt wird.

Während soweit ein kontinuierlicher Fortschritt in der Erkenntnis der pflanzenphysiologischen Wirkung des Sauerstoffes zu verzeichnen ist, haben alle späteren Forschungen keine wesentlichen Fortschritte gebracht. Sie verlieren sich in Einzelheiten und vernachlässigen namentlich die scharfe Trennung zwischen Assimilations-Prozessen, zwischen Keimpflanze und assimilierender grüner Pflanze, beachten also nicht genügend die grundsätzliche Wirkung des Sauerstoffes, der nur abbauen und verbrennen kann, der aber dabei und dadurch Energie frei macht, die von der Sonne kommt und durch die Assimilationstätigkeit grüner Pflanzen festgelegt und aufgespeichert wurde. Der Sauerstoff vermag nicht neue Energie zu

schaffen. Er entbindet nur festgelegte Energie und stellt sie den Lebewesen zur Verfügung, wodurch deren sämtliche Lebensprozesse erst ermöglicht werden. Die Sonne allein spendet unserm Erdball neue Energie, die dann von der lebenden grünen Pflanze aufgespeichert werden kann. Um aber selbst leben und assimilieren zu können, brauchen die Pflanzen direkt nutzbare Energie, die sie wiederum nur durch Oxydation bereits gebildeter organischer Substanz gewinnen können.

Um in der Besprechung der vorliegenden Literatur fortzufahren, sind weiterhin die Arbeiten von Huber und SENEBIER (17) zu erwähnen, denen offenbar schwere methodische Fehler zugrunde liegen. Anders ist es nicht zu erklären, wie sie zu dem Resultat kommen konnten, dass sich die Keimung in einem Gasgemisch von 3 Teilen Stickstoff resp. Wasserstoff und 1 Teil Sauerstoff günstiger vollzieht, als wenn das Mischungsverhältnis dieser Gase umgekehrt gestaltet wird. Entweder sind die angewandten Gase nicht rein gewesen, oder es wurde bei der Bestimmung der Versuchsergebnisse falsch vorgegangen.

SAUSSURE (18) fand bei Keimversuchen mit *Pisum sativum*, dass die Keimung der Samen in reinem Sauerstoff nicht begünstigt wurde, nur die Kohlensäure-Ausscheidung war viel grösser als in der atmosphärischen Luft, und die in reinem Sauerstoff erzeugten Keimlinge wogen im Vergleich zu denen in normaler Luft nur die Hälfte.

Augenscheinlich spielt hier die Natur der im Samenkorn bzw. den Cotyledonen aufgespeicherten Reservestoffe eine grosse Rolle. Die sehr eiweissreichen Leguminosen-Samen bilden grössere Mengen von Atmungsenzymen, Oxydationsfermenten oder Oxydasen, wodurch die Atmungsprozesse in reinem Sauerstoff weit über das zur Entwicklung des Keimlings notwendige Mass gesteigert werden. Es werden so viele Kohlenstoff-Verbindungen verbrannt, dass die Keimpflanze die dadurch im Uebermass gewonnene Energie nicht mehr voll für ihre Entwicklung ausnützen kann. Es liegt also eine Schädigung vor, da mehr organische Substanz oxydiert wird und verloren geht, als zur Erzielung des gleichen Effekts nötig ist. Bei eiweissärmeren Samen, die geringere Mengen von Enzymen bilden können, zum Beispiel den Getreidesamen, tritt eine derartige Schädigung weniger in Erscheinung.

Diese Auffassung wird durch die Versuche von BOEHM (19) bestätigt. Er fand, dass in reinem Sauerstoff die Keimung von *Phaseolus multiflorus*, *Evum lens* und *Pisum sativum* stark, von *Lepidium sativum*, *Linum usitatissimum* und *Helianthus annuus* weniger und von den Getreidearten sogar wie für nicht geschädigt wurde.

Nachdem auch BERT (20) einen schädigenden Einfluss sowohl zu hoher als auch zu niedriger Sauerstoffdruck festgestellt hatte, waren es besonders WIELER (21) und Jentys (22), die versucht haben, diese Frage quantitativ zu behandeln.

Jedoch kann ich die Methode, nach der beide vorgegangen sind, zu derartigen Versuchen nicht als geeignet ansehen. Sie haben nämlich, wenn man von einigen Keimversuchen absieht, Pflanzen in einem durchschnittlichen Alter von 5 bis 10 Tagen verwendet, diese während der Dauer der Einwirkung verschiedener Sauerstoff-Druckungen im Dunkeln gehalten und die Resultate derartiger Versuche dann durch Messen des Zuwachses von Stengel und Wurzeln mittelst eines Glas-Massstabes und Fernrohr-Ablesung oder mittelst horizontaler Mikroskope gewonnen. Wenn man aber berücksichtigt, dass die Zuwachsgrösse von 5 bis 10 Tage alten Pflanzen nur noch in geringer Masse durch die Sauerstoff-Druckung, das heisst durch die Intensität der Atmungsprozesse bestimmt wird, da die Reservestoffe, die der Same ursprünglich enthielt, ganz oder zum grössten Teil verbraucht sind, dass die Zuwachsgrösse derartiger Pflanzen vielmehr in erster Linie durch die assimilatorische Leistung bestimmt wird, so ist bei dieser Versuchs-Methode, die auf der Messung der Zuwachsgrösse beruht, der wichtigste, die Zuwachsgrösse bestimmende Faktor ganz ausgeschaltet worden. Wenn die beiden Forscher trotzdem Zuwachse feststellen konnten, so lag das daran, dass entweder die Reservestoffe der Samen noch nicht ganz verbraucht waren, oder dass die Pflanzen vor Einstellung in den Versuch kräftig hatten assimilieren können, sodass durch die neu gebildeten Kohlenstoff-Verbindungen ein weiterer Zuwachs möglich war. Es ist daher nicht verwunderlich, dass die gewonnenen Resultate sehr schlecht übereinstimmen und zum

Teil recht unwahrscheinlicher Natur sind. Unwahrscheinlich ist namentlich die von WIELER bei zahlreichen Versuchen gemachte Beobachtung, dass die Zuwachsgrösse von einem Nullpunkt bei vollständigem Sauerstoff-Entzug mit steigender Sauerstoff-Zuführung allmählig ansteigt bis zu einer Sauerstoff-Pressung von etwa 3 bis 6%. Wurde die Sauerstoff-Pressung weiter gesteigert, so wurde die Zuwachsgrösse wieder geringer, um schliesslich noch einmal anzusteigen und in reinem Sauerstoff ein zweites Optimum zu erreichen.

Nach diesen Betrachtungen ist sofort klar, an welchem Punkt meine Versuche ansetzen mussten. Den Einfluss wechselnder Sauerstoff-Spannung auf die Keimung zu untersuchen wäre zwecklos gewesen, denn es liegt kein Grund vor, die Richtigkeit der besonders von HUMBOLDT, ROLLO, SAUSSURE und BOEHM gefundenen Resultate zu bezweifeln. Besonders wichtig und noch gar nicht untersucht ist aber der Einfluss wechselnder Sauerstoff-Pressung auf die im Übrigen unter normalen Verhältnissen wachsende grüne, assimilierende Pflanze. Ich zog deshalb meine Versuche ganz anders auf, als es bisher geschehen ist, nämlich als Vegetations-Versuche, deren Ergebnis aus dem Pflanzenertrag resultiert.

Die beiden von mir ausgeführten Versuche waren in Bezug auf die Technik der Versuchsanstellung ganz gleich. Ich benutzte dieselben Gefässe wie zu den vorher beschriebenen Luftdruckversuchen. Diese Gefässe evakuierte ich und gab dann allen Gefässen gleichmässig 5% Kohlensäure und dann nur noch die entsprechende Menge Sauerstoff zu, variierte also neben dem Sauerstoff nur noch den Luftdruck. Dadurch konnte das Resultat nicht beeinflusst werden, und dies Verfahren hatte den grossen Vorteil, dass das Auspumpen bedeutend schneller ging.

Der erste Versuch lief vom 13. 7. 21 bis zum 1. 8. 21. Aus der Tabelle auf Seite 165 ist das Ergebnis dieses Versuchs ersichtlich. Die berechneten Werte sind mit dem Faktor 0,1 nach der Formel

$$\log (0,63 - y) = 0,7993 (-1) - 0,1 \cdot X$$

gewonnen. Die Grössenwerte habe ich fortgelassen, weil diese bei einer derartigen Versuchsmethode stets sehr unzuverlässig sind, da an den in abgeschlossenen Gefässen stehenden Pflanzen sehr verschieden viel Wasser haftet.

Die Pflanzen in reinem Sauerstoff, abzüglich 5% Kohlensäure, waren schon um die Mitte der Versuchsdauer abgestorben. Sie hatten sich anfänglich am besten von allen entwickelt, nahmen jedoch allmählig ein fahles Aussehen an und wurden schliesslich ganz farblos und durchsichtig. Augenscheinlich hatten die Oxydationsprozesse die Assimilation erheblich überwogen, es wurden mehr Kohlenstoff-Verbindungen verbrannt, als neu aufgebaut werden konnten. Die Pflanzen mussten absterben, nachdem alles Atmungsmaterial verbraucht war, es anscheinend waren nur die Zellulose-Membranen übrig geblieben. Auch schon bei 33,3% Sauerstoff ist ein wesentlicher Rückgang des Ertrags zu verzeichnen, weil hier schon die Intensität der Atmungsprozesse über das optimale Mass gesteigert war. Ohne Sauerstoff giengen die Pflanzen sehr bald ein, und auch in den Gefässen mit 0,33% Sauerstoff blieben nur wenige Pflanzen bis zum Abschluss des Versuchs am Leben. Das Optimum der Sauerstoff-Pressung dürfte bei der angewandten Methode, wenn den Pflanzen also Kohlensäure im Ueberschuss zur Verfügung steht, bei 15% ungefähr erreicht sein.

Bei dem zweiten Versuch, dessen Ergebnis aus der Tabelle auf Seite 166 zu ersehen ist, variierte ich deshalb den Sauerstoff entsprechend anders. Ich steigerte ihn von 0,4 bis 15,0% und liess auch den Nullpunkt fort, sodass ich bei 20 verfügbaren Gefässen mit 4 Parallelversuchen arbeiten konnte. Das machte sich bei den Resultaten sehr vorteilhaft bemerkbar, da die gefundenen Werte mit den berechneten besser übereinstimmten als bei dem ersten Versuch, wie aus der graphischen Darstellung Fig. 2, in der beide Versuche zusammengefasst sind, ersichtlich ist. Die berechneten Werte sind nach der Gleichung

$$\log (0,5225 - y) = 0,7181 (-1) - 0,1 \cdot X$$

also ebenfalls mit dem Faktor 0,1 gewonnen.

Der Versuch lief vom 15. bis 28. August 1921. Schon vom zweiten Tage an zeigten die Pflanzen deutliche Unterschiede, die sich im weiteren Verlauf des Versuchs sehr schön ausprägten, wie das die Figur 3 zeigt.

In den Gefäßen mit 0,4% Sauerstoff waren die meisten Pflanzen beim Abschluss des Versuchs bereits abgestorben, sodass die übrigen Wachstumsfaktoren nicht in gleicher Weise zur Geltung kommen und die berechneten Werte nicht erreicht werden konnten. Zusammenfassend haben meine Versuche zur Beurteilung des Sauerstoffs also folgendes Resultat ergeben:

Der Sauerstoff ist als Wachstumsfaktor anzusehen, da er die Höhe des Pflanzenertrags nach dem Wirkungsgesetz der Wachstumsfaktoren beeinflusst. Sein Wirkungsfaktor ist nach meinen Versuchen konstant und beträgt 0,1. Ob er aber

Sauerstoffversuch Nr. 1.

Nr.	% Sauerstoff.	Trockensubstanz der Halme	
		Gefunden	Berechnet
I		0,0	
II.	0,0	0,0	0,0
III.		0,0	
IV.		0,03	
V.	0,333	0,01	0,037 ± 0,013
VI.		0,07	
VII.		0,13	
VIII.	1,0	0,16	0,153 ± 0,009
IX.		0,17	
X.		0,37	
XI.	3,33	0,32	0,36 ± 0,016
XII.		0,39	
XIII.		0,57	
XIV.	10,0	0,56	0,58 ± 0,012
XV.		0,61	
XVI.		0,59	
XVII.	33,3	0,49	0,547 ± 0,022
XVIII.		0,56	
XIX.		95,0	
XX.			

bei geringerem Kohlensäuregehalt der Luft auch konstant bleibt, ist sehr fraglich. Anzunehmen ist vielmehr, dass er mit abnehmendem Kohlensäuregehalt der Luft ansteigt, also von der photosynthetischen Leistung und dadurch mittelbar auch von der Lichtintensität beeinflusst wird. Eine Sauerstoff-Pressung, die bei höchstmöglich gesteigerter Assimilation optimal ist, wird bei geringerer Assimilation bereits schädigend wirken, weil das Verhältnis zwischen Assimilation und Dissimilation ungünstiger geworden ist, da die Atmungsprozesse mit gleicher Intensität fort dauern.

Während der Wirkungsfaktor des Sauerstoffs bei einem Kohlensäuregehalt der Luft von 5% gleich 0,1 und eine Sauerstoff-Pressung von ungefähr 15% optimal ist, so können bei normalem Kohlensäuregehalt der Luft vielleicht schon etwa 10% Sauerstoff die Intensität der Atmung bis zur optimalen Höhe steigern. Wer-

den die Pflanzen aber im Dunkeln gehalten, ihre Lebensfunktionen also durch Ausschaltung der Assimilation stark herabgesetzt, so dürften entsprechend den Feststellungen von WIELER bereits 3 bis 6% Sauerstoff zur Unterhaltung der notwendigen Atmungsprozesse genügen. Daraus würde sich dann auch die Tatsache erklären, dass verschiedene Forscher bei der Untersuchung der pflanzenphysiologischen Wirkung des äusseren Luftdrucks eine bedeutende Förderung der Wachstumsprozesse in verdünnter Luft, also bei verminderter Sauerstoff-Partialdruck, haben nachweisen können.

=====

Sauerstoffversuch Nr. 2.

=====

Nr.	% Sauerstoff	Grüengewicht d. Halme gefunden	berechnet	Trockengewicht gefunden	der Halme berechnet
I.	0,4	0,1	0,173 ± 0,034	0,02	0,023 ± 0,003
II.		0,16		0,02	
III.		0,26		0,03	
IV.		-		-	
V.	1,0	0,98	1,58 ± 0,15	0,09	0,108 ± 0,004
VI.		1,75		0,11	
VII.		1,89		0,12	
VIII.		1,7		0,11	
IX.	2,5	2,84	3,35 ± 0,18	0,20	0,223 ± 0,007
X.		3,27		0,22	
XI.		3,19		0,22	
XII.		4,1		0,25	
XIII.	6,0	5,77	5,938 ± 0,127	0,39	0,39 ± 0,007
XIV.		5,59		0,38	
XV.		5,98		0,37	
XVI.		6,41		0,42	
XVII.	15,0	8,22	8,02 ± 0,214	0,52	0,515 ± 0,012
XVIII.		7,2		0,48	
XIX.		7,97		0,50	
XX.		8,7		0,56	

=====

C. Die Kohlensäure.

Wie der Gesamt-Pflanzenertrag von der jeweiligen Gestaltung einer zur Zeit noch unüberschaubaren Zahl von „Wachstumsfaktoren“ abhängig ist, so wird auch der wichtigste Lebensprozess der höheren Pflanzen, die photosynthetische Leistung der grünen Pflanzenzelle und in ihr jedes einzelnen Chloroplasten, von verschiedenen Faktoren beeinflusst. F. F. BLACKMAN (23) nennt als solche Faktoren:

1. den verfügbaren Kohlendioxydbetrag; 2. die verfügbare Wassermenge; 3. die Intensität der verfügbaren Lichtenergie; 4. den Betrag von vorhandenem Chlorophyll und 5. die Temperatur.

Besonders der erste dieser 5 Faktoren, dessen Untersuchung dieser Abschnitt meiner Arbeit gewidmet ist, interessiert und vom Standpunkt landwirtschaftlicher Forschung.

Aber nicht nur hier spielt die Wirkung des verfügbaren Kohlendioxydbetrages, das heisst des Kohlensäuregehaltes der Luft, eine bedeutende Rolle, sondern auch

die Geologie hat sich viel mit dieser Frage beschäftigt. Allerdings von einem ganz anderen Gesichtspunkt aus, denn die pflanzenphysiologische Wirkung der Kohlensäure ist dabei vollkommen unbeachtet geblieben, vielmehr ist der Kohlensäuregehalt der Luft lediglich zur Erklärung der klimatischen Verhältnisse weit zurückliegender Erdperioden herangezogen worden. Trotzdem gehe ich auf die geologischen Betrachtungen näher ein, da sich beide Wissenschaften in dieser Frage bemerkenswert zu ergänzen scheinen.

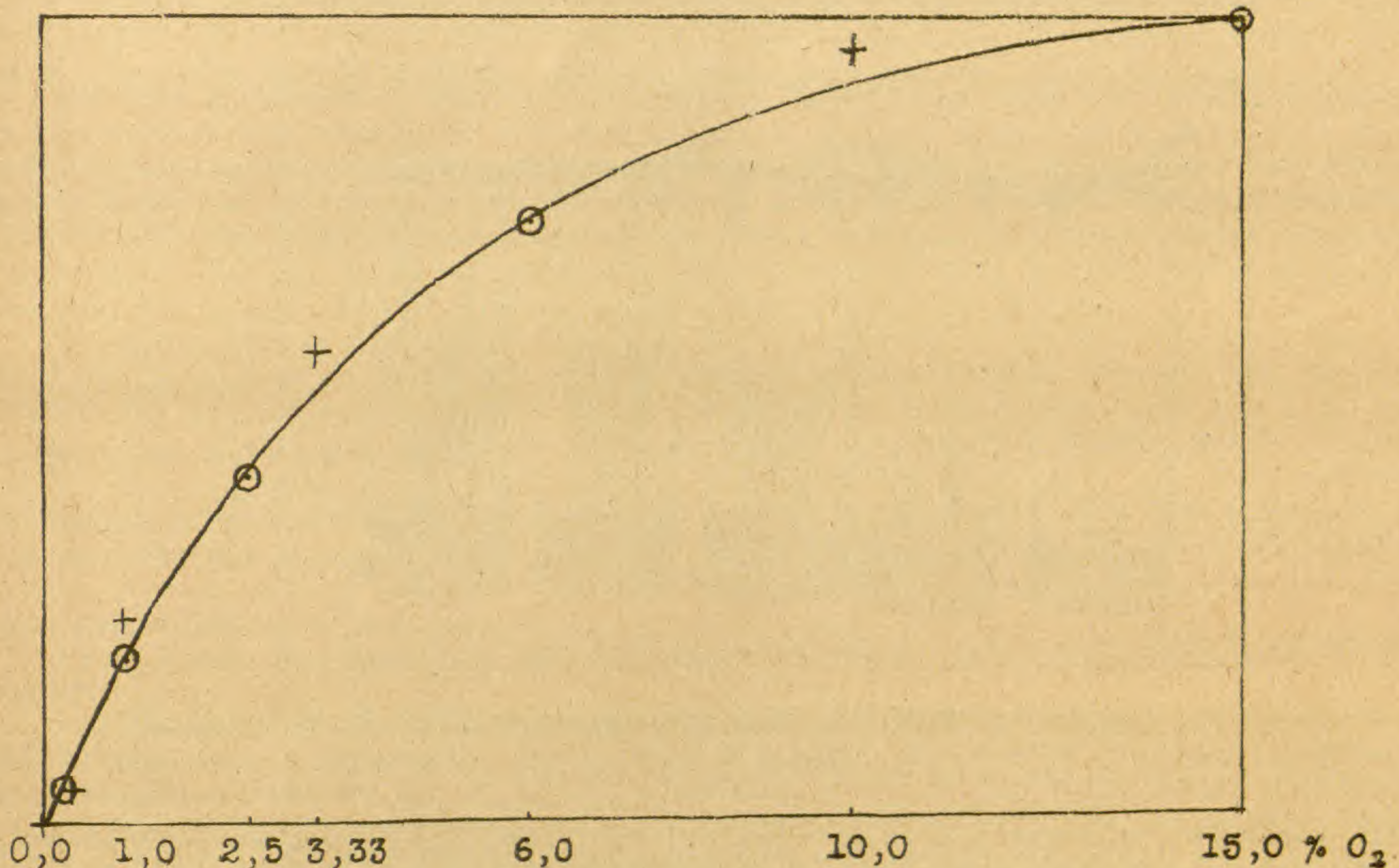
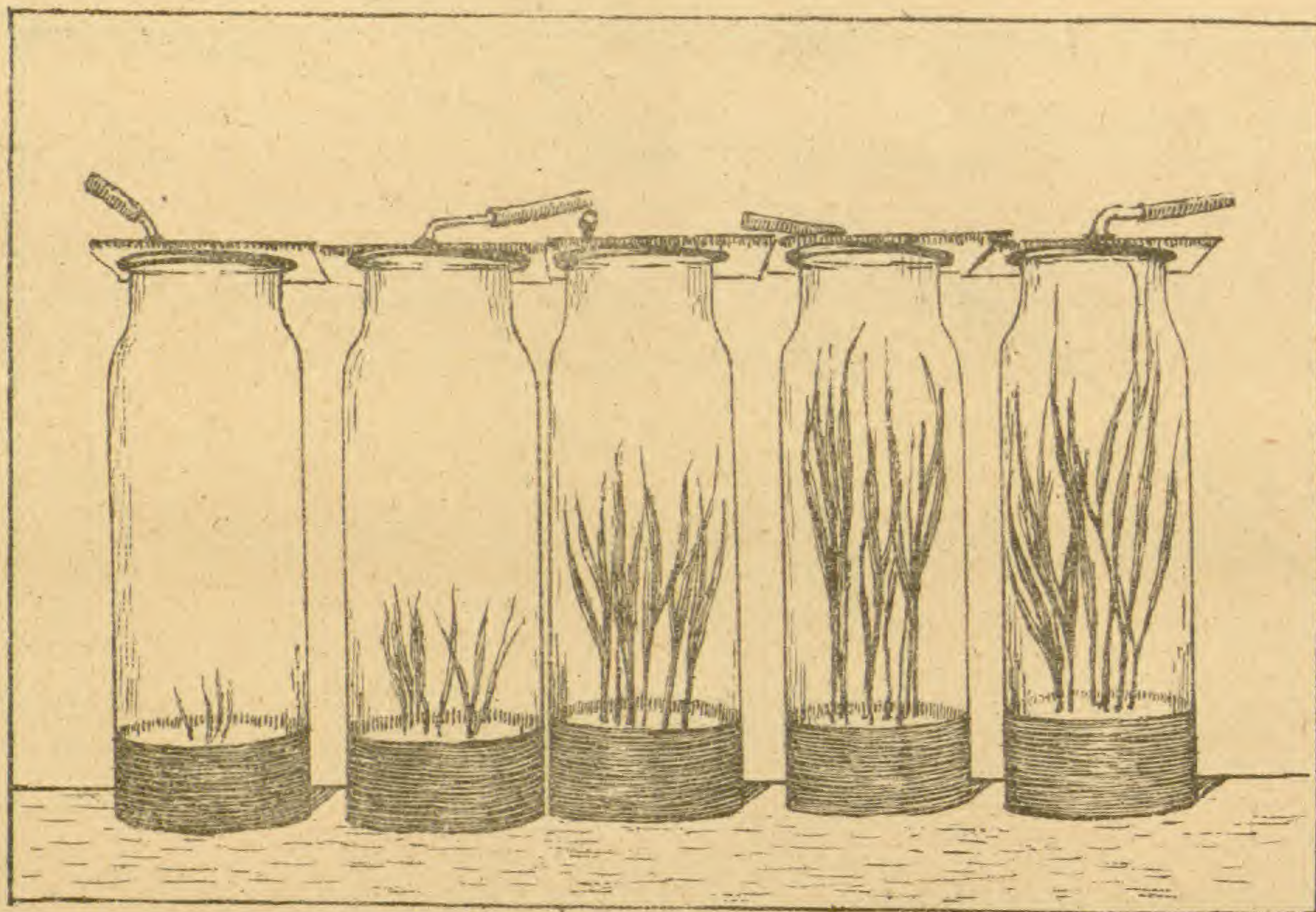


Fig. 2. Resultate des ersten (+) und zweiten (0) Sauerstoff-Versuchs.

S. ARRHENIUS (24) und Fritz FRECH (25), die hauptsächlichlichen Vertreter der Kohlensäure-Theorie, gehen davon aus, dass die Kohlensäure ebenso wie der Wasserdampf die Eigentümlichkeit besitzt, die Sonnenstrahlen leicht durchzulassen, hingegen die von der Erdoberfläche zurückgeworfenen Wärmestrahlen zum grossen Teil zu absorbieren und dadurch deren Ausstrahlung in den Weltraum zu verringern. Daraus würde folgen, dass ein höherer Kohlensäure-Gehalt der Atmosphäre einen günstigeren Wärmehaushalt der Erde bedingen muss. Da beide Forscher als erwiesen ansehen, dass sowohl die Wärmestrahlung der Sonne wie auch die Erwärmung der Erdoberfläche durch das Erdinnere sich in den fraglichen Erdperioden nicht wesentlich verändert haben, so bleibt für die Erklärung der grossen klimatischen Veränderungen, die während dieser Erdperioden stattgefunden haben, auch nur die Kohlensäure-Theorie übrig. Wie hoch die Wirkung der Kohlensäure von ihnen veranschlagt wird, geht aus einer Berechnung von ARRHENIUS hervor, der angibt, dass eine Abnahme des Kohlensäure-Gehalts der Luft auf $\frac{3}{5}$ des heutigen Betrags bereits zu einer neuen Vereisung Nordamerikas und Mitteleuropas führen würde, während andererseits die tropische Temperatur der Eocaenzeit, in der die polaren Gegenden um 8 - 9 Grad wärmer waren, als jetzt, eine Vermehrung des Kohlensäuregehaltes der Luft um das $2\frac{1}{2}$ bis 3-fache des jetzigen Betrages zur

Voraussetzung hätte. Als Kohlensäurequellen kommen grosse Eruptivperioden mit anschliessenden, lange anhaltenden gewaltigen Kohlensäure-Exhalationen infrage. Die beiden Forscher glauben auch, gewisse regelmässige Beziehungen zwischen den Eruptionen und den klimatischen Verhältnissen nachweisen zu können. Auch sind die zur Erklärung der klimatischen Veränderungen notwendigen Schwankungen des Kohlensäure-Gehalts der Luft wenigstens nach den Berechnungen von ARRHENIUS nicht so gross, dass sie durch die Exhalationen aus dem Erdinnern nicht genügend begründet werden könnten.



0,4 1,0 2,5 6,0 15,0 % Sauerstoff.

Figur 3.

Nach ihrer Darstellung hat sich der Wechsel von Klima und Kohlensäuregehalt der Luft während des Palaeozoikums etwa folgendermassen vollzogen:

Die enormen Masseausbrüche des Praecambrium bewirkten einen bedeutenden Ueberschuss an Kohlensäure, der sich während der ruhigen cambrischen Zeit wieder vermindert, jedoch im Silur und besonders Devon durch ein erhebliches Wiedererwachen gleichzeitiger Vulkan- und Masseneruptionen wiederum derart ergänzt wird, dass in den späteren Abschnitten der palaeozoischen Aera ein gleichmässig warmes Klima herrscht. Zur Steinkohlenzeit, in der die Eruptivtätigkeit merklich nachlässt, wird der Kohlensäuregehalt durch Karbonat- und Steinkohleflötz-Bildung dann stark herabgedrückt, bis die fortschreitende Verminderung der Kohlensäure schliesslich am Beginn der Dyas-Periode zur Ausbildung der südlichen Eiszeit führt.

Diese Kohlensäuretheorie besitzt jedoch verschiedene bedeutende Angriffspunkte. Zunächst sind die Berechnungen von ARRHENIUS, durch die diese Theorie erst in den Bereich der Wahrscheinlichkeit gerückt wird, durchaus hypothetisch. Ferner ist die Eiszeit zu Beginn der Dyas-Periode nur für die südliche Halbkugel nachgewiesen, während auf der nördlichen Halbkugel das warme Klima fort dauerte. Das spricht zweifellos gegen die Theorie, denn der Kohlensäure-Gehalt der Atmosphäre ist auf beiden Halbkugeln sicherlich der gleiche gewesen. Unwahrscheinlich und geradezu unhaltbar wird die Theorie jedoch, wenn man die Verhältnisse der Carbonzeit betrachtet. Die Vertreter der Kohlensäure-Theorie behaupten ausdrücklich, dass das Klima des Carbon nicht tropisch gewesen sei, was sie damit begründen, dass tropisches Klima die Kohlebildung verhindert hätte, ebenso wie in der Jetztzeit das tropische Klima die Torfbildung verhindert, da zwischen den Wendekreisen

eine solche nicht nachzuweisen ist. Nimmt man aber für die Carbonperiode gemässigttes Klima und somit die Kohlensäure-Pressung in der Luft mitbetwa 0,03% an, so wird die umfangreiche Kohlebildung zur Carbonzeit gänzlich unerklärlich. Dann wäre es vollkommen unverständlich, warum jetzt keine Kohlebildung statt hat, denn die Torfbildung des Jetztzeit ist doch mit den in Frage stehenden gewältigen Pflanzen-Anhäufungen nicht entfernt vergleichbar. Während man das gemässigte Klima für die Carbonzeit und die dafür gegebene Begründung anerkennen muss, so ist anderseits der Kohlensäure-Gehalt der Luft zur Carbonzeit wesentlich höher anzunehmen, denn einen solchen bedingen notwendig die gewältigen Massen-Eruptionen im Silur und Devon und deren, wenn auch abgeschwächte, Fortdauer im Carbon selbst. Auch spricht die Tatsache, dass die Bildung von Pflanzensubstanz durch höheren Kohlensäure-Partialdruck wesentlich gesteigert, ja sogar vervelfacht wird, wie meine Versuche bewiesen haben, meines Erachtens sehr für diese Annahme.

Ältere Hypothesen, die den Kohlensäure-Gehalt der Luft zur praecarbonischen und carbonischen Zeit sogar mit 30% annehmen, welche gewältige Kohlensäure-Menge erst in Kohlenflötze umgewandelt werden musste, bevor die Kontinente für höhere Tiere bewohnbar wurden, gehen natürlich zu weit, denn in einer solchen Atmosphaere ist auch das Pflanzenleben unmöglich. Dass im Silur und Devon trotz höherem Kohlensäure-Gehalt keine Kohlebildung stattgefunden hat, erklärt sich zwanglos aus dem für diese Erdperioden nachgewiesenen tropischen Klima.

Trotzdem ein gewissen Einfluss der Luft-Kohlensäure auf die Klimabildung nicht ausgeschlossen ist, kann ich doch aus den angeführten Gründen die Theorie, welche die klimatischen Veränderungen in früheren Erdperioden allein durch veränderten Kohlensäure-Gehalt der Atmosphaere zu erklären sucht, nicht anerkennen. Wohl aber sehe ich in der Annahme einer, durch die Stärke der Exhalationen bedingten inkonstanten Partiärpressung der Luftkohlensäure eine brauchbare Erklärung für die überaus wichtigen, besonders im Carbon stattgehabten Kohlebildungen, durch welche die wirtschaftliche Entwicklung der Jetztzeit so entscheidend beeinflusst worden ist.

Nach dieser Abschweifung auf geologisches Gebiet kehre ich zu meinem Thema zurück.

Zur Produktion von Pflanzensubstanz, also zur Ertragsbildung ist in erster Linie Kohlenstoff notwendig. Den grünen Pflanzen, die allein Pflanzensubstanz aus anorganischen Stoffen neu zu bilden vermögen, steht als einzige Kohlenstoffquelle die in der atmosphaerischen Luft enthaltene Kohlensäure zur Verfügung, denn die von verschiedenen Forschern nachgewiesene Fähigkeit der Pflanzen, bei Kohlensäure-Mangel Formaldehyd und auch Amide als Kohlenstoff-Quelle auszunützen, kommt praktisch nicht in Betracht. Zum Studium der vorliegenden Frage ist es notwendig, sich zunächst den Vorgang der Kohlensäure-Zuführung zu den Assimilationsorganen zu vergegenwärtigen. Die Pflanze ist nicht in der Lage, durch einen chemischen oder physikalischen Anziehungs-Prozess eine stetige Kohlensäure-Versorgung zu bewirken. Vielmehr stellt sich die Zuführung der Kohlensäure, die für die Chloroplasten erst erreichbar wird wenn sie im Zellsaft gelöst vorhanden ist, als ein reiner Diffusionsprozess dar. Alle assimilierenden Zellen stehen durch die mit Flüssigkeit imbibierten Zellwände mit den Interzellular-Räumen und diese wiederum mit der Aussenluft durch die zahlreichen Spaltöffnungen in Verbindung. Angenommen, die Kohlensäure-Spannung im Zellsaft, in den Interzellularräumen und der Aussenluft hätte sich vollkommen ausgeglichen, so wird durch den bei eintretender Belichtung einsetzenden Assimilationsprozess die Konzentration der im Zellsaft gelösten Kohlensäure verringert. Dadurch wird ein Diffusionsgefälle von der Interzellular-Luft nach dem Zellsaft zu geschaffen und infolge der hierdurch bedingten gleichzeitig einetzenden Verminderung des Kohlensäure-Gehaltes der Interzellular-Luft ein solches von der Aussenluft durch die Spaltöffnungen nach der in den Interzellularräumen eingeschlossenen Luft. Erhöht man den Kohlensäure-Partialdruck der Aussenluft künstlich, so wird dadurch zunächst das Diffusionsgefälle erhöht. Ein lebhafterer Zustrom von Kohlensäure setzt ein, durch den dann die Konzentration der im Zellsaft gelösten Kohlensäure wieder so weit erhöht

das Diffusionsgefälle zugleich so weit verringert wird, bis sich assimilatorischer Verbrauch und Diffusionsgefälle die Wage halten. Infolge der so entstandenen höheren Konzentration der im Zellsaft gelösten Kohlensäure wird den Chloroplasten in der Zeiteinheit mehr Kohlensäure erreichbar, die Photosynthetische Leistung wird also gesteigert, der Pflanzenertrag erhöht. Der Ertrag kann jedoch nicht proportional der Erhöhung der verfügbaren Kohlensäure-Menge steigen, damit steigender photosynthetischer Leistung auch eine steigende giftige Wirkung ausgeübt wird, wie ich noch zeigen werde. Auf die Wechselwirkung dieser beiden Prozesse, die Steigerung der photosynthetischen Leistung einerseits und die dadurch bedingte steigende Giftwirkung andererseits ist die allmähliche, immer stärker werdende, aus meinen Versuchen deutlich erkennbare Verschiebung der Proportionalität zwischen der Ertragssteigerung und der Steigerung der zugeführten Kohlensäure-Mengen zu Ungunsten der Ertragssteigerung, also die Bildung der Ertragskurve durch den Wachstumsfaktor Kohlensäure zurückzuführen. Die photosynthetische Leistung der Assimilationsorgane ist aber nicht nur von der verfügbaren Kohlensäure-Menge, sondern neben verschiedenen anderen Faktoren auch in ausschlaggebender Weise von der verfügbaren Lichtmenge abhängig derart, dass mit verminderter Lichtintensität auch die photosynthetische Leistung geringer wird und umgekehrt. Wird aber bei gleichbleibendem Kohlensäure-Partialdruck der Aussenluft die photosynthetische Leistung geringer, so muss die Konzentration der im Zellsaft gelösten Kohlensäure steigen, um das Gleichgewicht zwischen Diffusionsgefälle und assimilatorischen Verbrauch wieder herzustellen. Wäre nun die Giftwirkung, durch welche die mit dem Wachstumsfaktor Kohlensäure erreichbare Ertragssteigerung nach oben begrenzt wird, auf die Kohlensäure selbst zurückzuführen, die Stärke der Giftwirkung also durch die Höhe der Konzentration der im Zellsaft gelösten Kohlensäure bedingt, so müsste bei geringerer Lichtintensität mit steigendem Kohlensäure-Partialdruck der Aussenluft die Giftwirkung schneller ansteigen als bei höherer Lichtintensität. Die schneller ansteigende Giftwirkung müsste also schon früher, das heisst bei geringerem Kohlensäure-Partialdruck der Aussenluft so stark werden, dass eine weitere Ertragsteigerung unmöglich wird. Der durch Erhöhung des Kohlensäure-Gehalts der Luft erreichbare Höchstertrag würde demnach bei geringerer Lichtintensität früher erreicht werden, der Wirkungsfaktor der Kohlensäure müsste mit abnehmender Licht-Intensität steigen.

Tatsächlich liegen die Verhältnisse aber umgekehrt, denn der Wirkungsfaktor der Kohlensäure wird mit abnehmender Lichtstärke kleiner. Diese Erscheinung ist nur dadurch zu erklären, dass nicht die Kohlensäure selbst giftig wirkt, dass die Giftwirkung vielmehr auf ein bei dem Assimilationsprozess auftretendes Zwischenprodukt, wahrscheinlich das Formaldehyd, zurückzuführen ist.

Ebenso wie die Gährungserreger, die Saccharomyceten, durch den von ihnen selbst gebildeten giftigen Alkohol geschädigt und schliesslich getötet werden, ist anzunehmen, dass auch die höheren Pflanzen durch den von ihnen gebildeten Aldehyd geschädigt werden können. Denn es ist nicht anzunehmen, dass der gebildete Aldehyd momentan weiter umgewandelt wird, also gewissermassen direkt von Hand zu Hand geht. Sicher ist vielmehr, dass der Aldehyd zunächst in Lösung geht und erst gelöst durch die fermentative Wirkung besonderer Enzyme weiter umgewandelt wird. In gelöstem Zustand kann der Aldehyd dann sehr wohl Giftwirkungen ausüben. Natürlich tritt eine solche Giftwirkung des Aldehyds bei normalem oder gering gesteigertem Kohlensäure-Gehalt der Luft kaum in Erscheinung, da die produzierten Aldehydmengen zu gering sind.

Darauf, dass die Giftwirkungen von dem Formaldehyd und nicht von der Kohlensäure selbst ausgehen, deuten auch die Vergiftungs-Erscheinungen selbst hin, die sich sehr charakteristisch äussern, wie ich bei dem ersten von mir durchgeführten Versuch habe feststellen können.

Die Giftwirkung tritt erst ein, wenn die ersten Blätter entwickelt und entflattet sind, wenn also die Assimilation begonnen hat. Das allein würde schon beweisen, dass die Giftwirkung nicht von der Kohlensäure selbst ausgeht, sondern dass der Giftstoff erst bei der Assimilation gebildet wird. Würde die Kohlensäure selbst giftig wirken, so müsste sie das Leben der Keimpflanze ebenso unterbinden wie das der grünen assimilierenden Pflanze, zumal durch die lebhaften Oxydations-

prozesse in der Keimpflanze sehr viel Kohlensäure gebildet wird. Die Entwicklung des Keimlings wird durch hohen Kohlensäuregehalt der Luft nur insofern beeinträchtigt, als durch ihn die Partialpressung des Sauerstoffs eingeengt wird.

Im ersten Stadium der Vergiftung zeigen die neu gebildeten Pflanzenteile eine mangelhafte Ausbildung des Chlorophylls, im zweiten Stadium unterbleibt die Chlorophyllbildung in den neu gebildeten Pflanzenteilen vollständig. Sie erscheinen und bleiben rein weiss, während die vorher schon vorhandenen Blätter ihre saftig grüne Farbe beibehalten. Das letzte Stadium der Vergiftung ist schliesslich die vollkommene Sistierung der Wachstumsvorgänge. Es werden keine neuen Sprosse gebildet, die vorhandenen Blätter bleiben aber grün.

Abgesehen davon, dass die assimilatorische Tätigkeit der Pflanzen stark beeinträchtigt zu sein scheint, deuten diese Erscheinungen namentlich auf eine Vergiftung der Enzyme hin. Die Neubildung von Chlorophyll und besonders die Atmungsprozesse und damit die Wachstumsvorgänge werden gestört und schliesslich vollständig inhibiert. Eine Vergiftung der Enzyme tritt aber nur als Wirkung typischer Gifte auf, und so ein typisches Gift ist die Kohlensäure zweifellos nicht. Das beste Beispiel ist dafür wiederum die alkoholische Gärung. Trotzdem eine in lebhafter Gärung befindliche Lösung mit Kohlensäure übersättigt ist, so

tritt dadurch doch keine Schädigung der Gärungserreger ein. Erst die zunehmende Konzentration des gebildeten Alkohols, der zwar ein schwacher aber doch typischer Giftstoff ist, schädigt die Gärungserreger und verhindert schliesslich die vollständige Vergärung des vorhandenen Zuckers.

Bedenkt man nun, dass in der ersten Phase der Photosynthese durch Spaltung der Kohlensäure Formaldehyd gebildet wird, der dann erst durch einen zweiten Umwandlungsprozess weiter assimiliert, das heisst zu Zucker polymerisiert werden muss, so liegt es nahe, der Wirkung des Aldehyds, der ja ein typisches Gift darstellt, die pflanzenphysiologischen Schädigungen zuzuschreiben, die bei stärkerer Erhöhung des Kohlensäure-Gehalts der Luft zu beobachten sind.

Durch diese Annahme würde sich neben allen anderen Erscheinungen auch die sonst unbegreifliche Tatsache erklären, dass die Höhe des Wirkungsfaktors der Kohlensäure sich gleichsinnig mit der Stärke der Lichtintensität verändert. Denn durch verminderte Lichtintensität wird die photosynthetische Leistung stark herabgesetzt, sodass die Produktion von Aldehyd erst bei wesentlich höherem Kohlensäuregehalt der Luft so stark wird, dass die Giftwirkung des Aldehyds in den Vordergrund tritt und eine weitere Ertragssteigerung verhindert. Der Höchstertrag wird also später, das heisst erst bei höheren Kohlensäure-Partialdrücken erreicht; und der Wirkungsfaktor der Kohlensäure ist entsprechend niedriger.

Diese Theorie ist zwar noch nicht einwandfrei bewiesen, doch hat sie zum mindesten insofern die Wahrscheinlichkeit für sich, als sie eine brauchbare, in keinem Fall versagende Erklärung für alle auf diesem Gebiet bisher gemachten Beobachtungen gibt.

Der Ansicht von BORNEMANN (26), die Grösse der Assimilation sei innerhalb der Grenzen der Leistungsfähigkeit der Zellen proportional dem Kohlensäuregehalt der umgebenden Luft, kann ich mit der Einschränkung zustimmen, dass diese Proportionalität durch die Leistungsfähigkeit der Zellen nicht nur begrenzt, sondern dauernd und zwar mit steigendem Kohlensäure-Gaben in immer stärkerem Masse beeinflusst, also aufgehoben wird; dass ferner nicht die direkte Leistungsfähigkeit der Zellen selbst hier beschränkend und begrenzend wirkt, sondern dass die an sich viel höhere Leistungsfähigkeit der Zellen durch die beschriebene Giftwirkung in ausschlaggebendem Masse herabgedrückt wird.

Auch die sehr interessanten Beobachtungen von H. FISCHER (27) und KISSELEW (28) lassen ebenso wie meine Versuchsergebnisse darauf schliessen, dass Giftwirkungen schon eintreten, wenn der Kohlensäure-Überschuss noch eine Ertragsteigerung zu zeitigen vermag.

FISCHER teilt als Gesamtergebnis seiner Untersuchungen über die Wirkung erhöhten Kohlensäure-Gehalts der Luft folgendes mit:

1. Die Pflanzen wachsen kräftiger; 2. sie entwickeln früher ihre Blüten, die

3, zahlreicher, oft auch grösser und lebhafter gefärbt waren; 4. sie trugen früher und reicher Frucht; 5. sie waren widerstandsfähiger gegen tierische Schädlinge.

Von diesen 6 Punkten bezieht sich nur einer auf die Förderung des vegetativen Wachstums, während drei auf eine bedeutende Zunahme des generativen Wachstums, also derjenigen Wachstumsprozesse hinweisen, die auf Erhaltung der Art gerichtet sind. Offenbar ist der Pflanzenorganismus, dessen Gesamtwachstum durch den höheren Kohlensäure-Gehalt der Luft noch gefördert wird, bereits Giftwirkungen ausgesetzt, die die Pflanze veranlassen, ihre Kräfte in gesteigertem Masse der Erhaltung der Art zuzuwenden, da das Leben des Individuums gefährdet erscheint.

FISCHER erklärt die beobachteten Erscheinungen allerdings ganz anders. Er geht davon aus, dass, wie die gärtnerische Praxis lehrt, durch Beschneiden oder Einengen der Wurzeln sowie durch Einschränkung der durch die Wurzeln erfolgenden Ernährung gleichfalls der Blütenansatz gefördert werden kann, und dass blühende resp. Blüten treibende Pflanzen sehr lebhaft atmen, also eine grosse Menge vorher gebildeter Kohlenstoff-Verbindungen verbrauchen. Daraus folgert er, wie auch aus der von ihm beobachteten wesentlichen Förderung der Blütenbildung durch reichlichere Kohlenstoff-Ernährung, dass die Verschiebung des Verhältnisses zwischen „Lufternährung“ und „Bodenernährung“ zu Gunsten der Lufternährung für die Förderung des generativen Wachstums ausschlaggebend sei, und dass andererseits durch Begünstigung der Bodenernährung unter Vernachlässigung der Lufternährung die vegetativen Wachstumsvorgänge im Vergleich zu den generativen mehr gesteigert würden.

Diese Hypothese, die eine absolut unerklärliche verschiedenartige Wirkung von Boden- und Lufternährung zur Voraussetzung hat, würde die vorliegenden Beobachtungen nicht nur nicht erklären, sondern deren Verständnis noch erschweren. In der von FISCHER zur Begründung seiner Hypothese angezogenen gärtnerischen Erfahrung sehe ich vielmehr eine Stütze für die von mir gegebene Erklärung. Denn durch eine Beschränkung der durch die Wurzeln erfolgenden Ernährung und durch Beschneiden oder Einengen der Wurzeln wird wohl eine Einschränkung der Bodenernährung herbeigeführt, aber doch in erster Linie eine Schädigung des Pflanzenorganismus bewirkt, welche die Wachstumsvorgänge dann in gleicher Richtung beeinflusst wie eine durch Giftwirkung hervorgerufene Schädigung.

Eine bedeutende Förderung gerade der generativen Wachstumsprozesse haben auch die Versuche von DEMOUSSY (29), Obergärtner Ernst WINTER (30) und KISSELEW bewiesen.

Eine bemerkenswerte Parallele zu diesen Beobachtungen zeitigte ein von mir angestellter Versuch (siehe unten). Die Bestockung, also auch ein der Erhaltung der Art dienender Wachstumsvorgang, war mit zunehmender Kohlensäuregabe wesentlich gesteigert. Sie war am stärksten sogar bei den Pflanzen, die im Ertrag gegenüber dem Höchstertrag infolge zu hohen Kohlensäure-Partialdrucks bereits eine Schädigung aufwiesen.

Gegenüber diesen ganz einwandfreien Beobachtungen können die gegensätzlichen Resultate von BROWNE und ESCOMBE (31) nichts beweisen. Auf Grund ihrer Versuche stellen sie fest, dass ausnahmslos alle untersuchten Arten blühender Pflanzen genau auf eine atmosphärische Umgebung von 0,03% Kohlensäure abgestimmt zu sein scheinen, sodass die Reaktion, mit der sie auf jede geringe Zunahme dieses Betrags antworten, in einer Richtung liegt, die ihrem Wachstum durchaus ungünstig ist. Die aus diesen Versuchen von ihnen gezogene Schlussfolgerung, dass eine verhältnismässig plötzliche Zunahme der Kohlensäure in der Luft auf das Zweifache und Dreifache des augenblicklichen Betrages die rasche Vernichtung fast aller unserer Blütenpflanzen herbeiführen würde, ist ebenfalls zu verwerfen. Denn DEMOUSSY (32) hat nachgewiesen, dass die von BROWN und ESCOMBE beobachteten Erscheinungen auf Verunreinigung der angewandten Kohlensäure durch Chlorwasserstoff zurückzuführen sind. Er erzielte dieselben Erscheinungen, sobald er die Kohlensäure aus Marmor und Slessäure entwickelte.

Bevor ich zur Besprechung meiner eigenen Versuche übergehe, gebe ich zunächst noch einen kurzen Ueberblick über die bereits vorliegenden Versuchsergebnisse, Da sich meine Versuche jedoch lediglich mit dem Problem beschäftigen, wie hoch der Einfluss erhöhten Kohlensäure-Gehalts der Luft auf den Pflanzenertrag einzuschätzen ist, gehe ich nur auf die Literatur ein, die speziell diese Frage behandelt.

Schon SAUSSURE (33) hat den Einfluss höherer Kohlensäure-Partialdrucke auf das Pflanzewachstum experimentell untersucht. Jedoch waren die von ihm angewandten Kohlensäuregaben, nämlich von 8% steigend bis zu reiner Kohlensäure, viel zu hoch gewählt. Nur die mit 8% Kohlensäure behandelten Pflanzen wuchsen besser als die in normaler Luft stehenden Vergleichspflanzen. Später war es vor allen GODLEWSKI (34), der sich mit dieser Frage eingehender beschäftigt hat und dem der sichere Nachweis gelang, dass Steigerung des Kohlensäuregehalts der Luft innerhalb gewisser Grenzen die Assimilation wahrnehmbar fördert. Wie fast alle späteren Versuche, so verfolgten auch die seinigen schon das Ziel, ein Optimum der Kohlensäure-Konzentration zu finden. Er bestimmte dieses mit 5 bis 10%. In der zusammenfassenden Aufzählung seiner Resultate sind besonders Punkt 4 und 5 bemerkenswert, die ich deshalb wörtlich wiedergebe:

4. Je stärker die Lichtintensität ist, desto mehr wird die Sauerstoffausscheidung durch die Zunahme des Kohlensäuregehaltes bis zum Optimum begünstigt und bei Ueberschreiten des Optimums desto weniger gehemmt.

5. Aus dem Satz 4 folgt, dass der Einfluss der Lichtintensität auf die Sauerstoffausscheidung um so grösser ist, je mehr Kohlensäure der Luft beige-mengt ist.

Der Absatz 5, der eine Schlussfolgerung aus den in Absatz 4 mitgeteilten Beobachtungen darstellen soll, ist offensichtlich unrichtig, Er wird erst richtig, wenn man den Satz umkehrt und wenn man sagt, der Einfluss höherer Kohlensäure-Beimengung der Luft ist umso grösser, je stärker die Lichtintensität ist. Nur diese Fassung würde im Kausalzusammenhang mit den in Absatz 4 festgestellten Tatsachen stehen und würde dann eine volle bestätigung dessen bedeuten, was ich über den Einfluss der Lichtintensität auf die Grösse des Wirkungsfaktors der Kohlensäure gesagt habe.

Einen wesentlichen Fortschritt brachten dann die Untersuchungen von KREUSLER (35). Er arbeitete mit geringen Steigerungen des Kohlensäure-Partialdruckes, doch hatten seine Untersuchungen mit den früheren die zu kurze Versuchsdauer gemein und wurden ausserdem durch den grundsätzlichen Fehler beeinträchtigt, dass sie nur mit abgetrennten Blättern und mit künstlicher Lichtquelle ausgeführt wurden, sodass die gewonnenen Resultate nur bedingt auf den Gesamt-Pflanzenertrag und damit auf die landwirtschaftliche Praxis übertragbar sind. Ganz abgesehen davon, dass die ausserordentlich geringen Werte, um die es sich bei einer derartigen Versuchsmethode stets handelt, sehr grosse Beobachtungsfehler bedingen, die durch Parallelversuche nicht ausgeglichen wurden. Zu diesen Uebelständen kommt noch hinzu, dass Blätter von verschiedenen Pflanzenarten und von verschiedenem Alter verwandt wurden. Keine der 8 angestellten Versuchsreihen zeigt ein auch nur annähernd regelmässiges Kurvenbild, das bei einem exakten Versuch zweifellos hätte zustande kommen müssen. Auch durch eine Zusammenfassung sämtlicher Resultate, die abgesehen von der Verschiedenartigkeit der verwandten Blätter insofern vergleichbar sind, als sie durchweg auf die in der Zeiteinheit pro qdm einseitige Blattfläche jeweils assimilierte Kohlensäuremenge umgerechnet sind, lassen sich die grossen Fehler nicht ausgleichen. Trotz alledem bedeuten die KREUSLER'schen Versuche einen Fortschritt, da die Fragestellung, die seinen Versuchen zugrunde lag, im Gegensatz zu allen anderen Versuchen durchaus quantitativ ist. Nur war die Methode nicht geeignet, eine klare Antwort auf diese Frage zu erteilen. Auf die von KREUSLER erzielten Resultate komme ich später noch zurück. Bezüglich aller übrigen Versuche kann ich mich kurz fassen. Die Versuche von DEMOUSSY (36), FISHER (37), KISSELEW (38), KLEIN und REINAU (39) und WINTER (40) gleichen sich fast vollkommen sowohl in Bezug

auf die Methode wie auch hinsichtlich der Resultate. Sie haben alle in abgeschlossenen Räumen gearbeitet und stellen eine bedeutende Steigerung des Pflanzenwachstums und besonders der generativen Wachstums-Vorgänge durch Erhöhung des Kohlendioxid-Gehalts der Luft fest. Auch WILLSTÄTTER und STOLL (41), deren Experimente in der Hauptsache der Erforschung anderer, mit der Kohlenstoff-Assimilation zusammenhängender Fragen galten, haben beobachtet, dass das Optimum der Kohlendioxid-Druck wesentlich höher ist als der normale Kohlendioxidgehalt der Luft. Sie geben an, dass die assimilatorische Leistung unter den gegebenen Versuchsbedingungen durch Erhöhung der Kohlendioxid-Konzentration über 5% hinaus nicht weiter gesteigert werden könnte. Auf die speziellen Fragen, denen die Versuche von BORNEMANN und die diesen ähnlichen Versuche anderer Forscher gezeigten haben, werde ich am Schluss meiner Arbeit eingehen.

Zu der Zeit, als ich mit meinen Versuchen begann, war also bereits einwandfrei festgestellt, dass eine wesentliche Ertragssteigerung durch Erhöhung des Kohlendioxidgehalts der Luft erzielt werden kann und dass andererseits eine Schädigung des Pflanzenwachstums eintritt, wenn der Kohlendioxiddruck über ein gewisses Optimum hinaus gesteigert wird. Es war also nur noch notwendig, den Verlauf der durch den Wachstumsfaktor Kohlendioxid erreichbaren Ertragssteigerung quantitativ zu bestimmen, das heisst den Wirkungsfaktor zu ermitteln.

Mit dem ersten von mir durchgeführten Vegetationsversuch (Kohlendioxidversuch Nr. 1) erreichte ich dieses Ziel zwar nicht, doch ist dieser Versuch insofern sehr interessant, als er infolge Steigerung des Kohlendioxidgehalts bis zu 31% alle Stadien der Vergiftung deutlich vor Augen führte, und auch das Optimum hinreichend genau bestimmte.

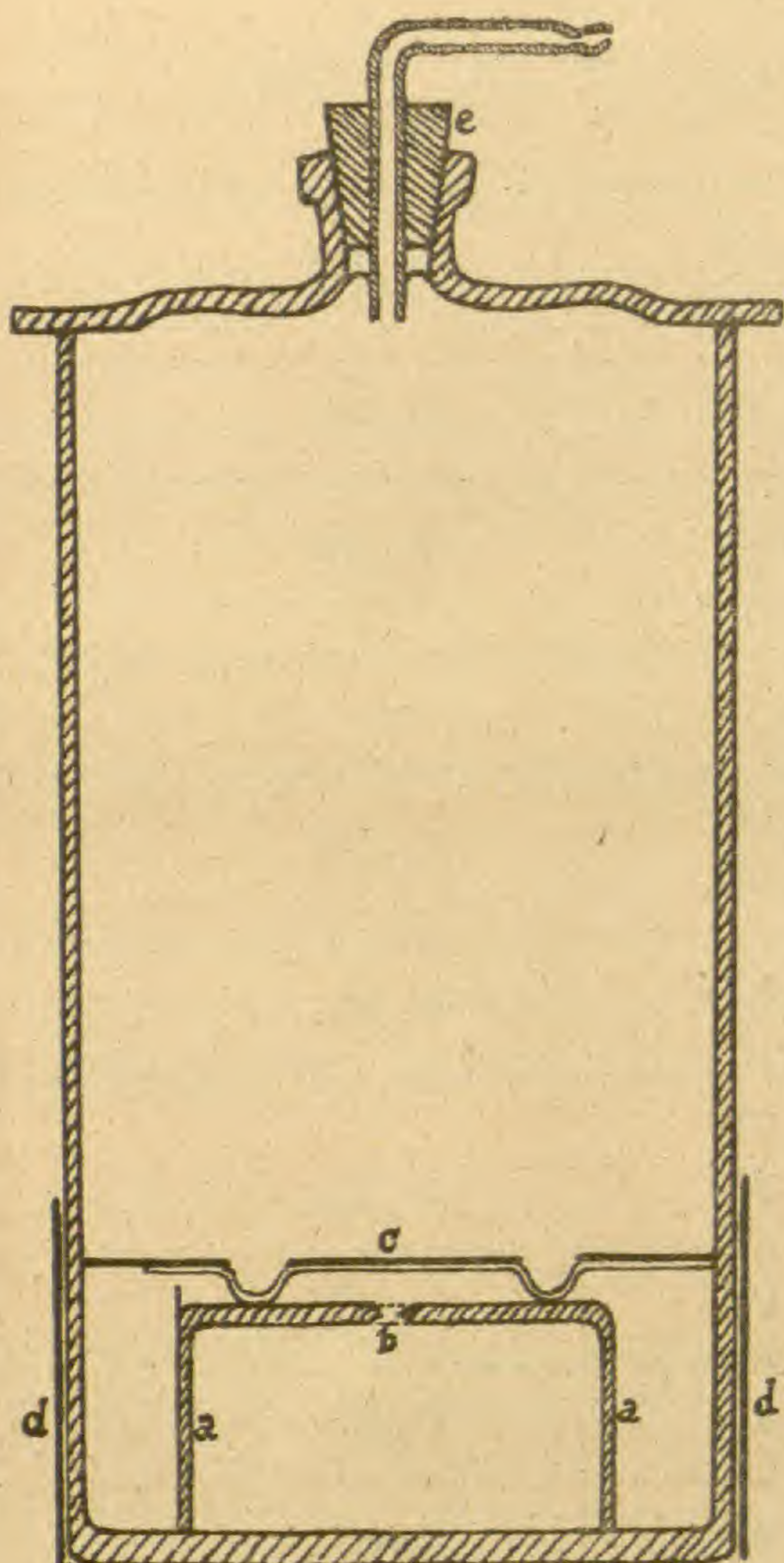
Der Versuch wurde in abgeschlossenen Gefässen ausgeführt und die Lüfterneuerung durch häufiges Evakuieren bewirkt. Im Gegensatz zu meinen Sauerstoff-Versuchen habe ich bei diesem Versuch neben dem untersuchten Wachstumsfaktor, hier also der Kohlendioxid, den Luftdruck nicht variiert, vielmehr füllte ich die Gefässe nach jedem Auspumpen wieder bis zum normalen Druck mit atmosphärischer kohlendioxidfreier Luft, nachdem ich vorher die erforderlichen Kohlendioxidmengen mittels einer Burette zugegeben hatte. Fig. 4 auf Seite 175 stellt eines der benutzten Vegetationsgefässe dar.

Der mit Filtrierpapier umhüllte bei (b) durchbohrte Glassockel (a) bildet die Unterlage für die Haferkörner, die auf seinem oberen Rande im Kreise derart liegen, dass sie ihre Wurzeln an dem Filtrierpapier herunter in die Nährlösung strecken müssen. Er wird durch am Boden liegende, zwischen Sockel und Gefässwand eingeklemmte Glasröhren in der Mitte des Gefässes festgehalten. Die Blechscheibe (c), die einen kreisförmigen Ausschnitt für die Flamme besitzt, dient lediglich zur Beschattung der Nährlösung, ebenso das aussen angebrachte schwarze Kartonpapier (d). Der Gummistopfen (e) ist auf der Unterseite paraffiniert, um Störungen durch die Kohlendioxid-Abspaltung des Gummis auszuschliessen.

Bei späteren Versuchen habe ich den Glassockel (a) entfernt, die Blechscheibe (c) durch an der Gefässwand angebrachte Träger gestützt und mit einer vierfachen Lage Filtrierpapier bedeckt. Die Keimlinge wurden dann längs des ringförmigen Ausschnittes mit den Wurzeln durch das Filtrierpapier, von dem sie dann gehalten wurden, in die Nährlösung gesteckt.

Der Versuch wurde vom 27. März bis 30. April 1921 beobachtet. An jedem zweiten bis dritten Tage wurde die Luft in den Gefässen erneuert. Leider war in dem Gewächshaus, in dem die Versuche standen, die Belichtung nicht für alle Gefässe gleich, worauf die sehr grossen Fehler des Versuchs wohl im erster Linie zurückzuführen sind. Aus der Tabelle auf Seite 176 sind die angewandten Kohlendioxid-Konzentrationen und die jeweils erzielten Erträge, angegeben in Gramm, ersichtlich. Die Resultate zu den Berechnungen über die Höhe des Wirkungsfaktors der Kohlendioxid heranzuziehen ist nicht möglich. Die Beobachtungen, die ich bei diesem Versuch über den Bestockungsgrad und besonders die Vergiftungs-Erscheinungen machen konnte, habe ich früher bereits mitgeteilt. Diesen Ausführungen

sei nur hinzugefügt, dass die Bestockung in den Gefässen I bis III bei Abschluss des Versuchs noch gar nicht begonnen hatte, während sie am weitesten im Gefäss nr. XII fortgeschritten war. Hinsichtlich der Vergiftungserscheinungen ist noch zu erwähnen, dass die Gefässe nr. XII und XIII die für das erste, Nr. XIV die für das zweite und Nr. XV und XVI die für das letzte Stadium der Vergiftung



Figur 4. 1:6.

typischen Erscheinungen aufwiesen. Ferner zeigt das Resultat, dass das Optimum der Kohlensäure-Konzentration bei einer derartigen Versuchsanstellung bei 5% ungefähr erreicht ist. Bemerkenswert ist noch, dass diejenigen Pflanzen, die im letzten Stadium der Vergiftung standen, in ihrem äusseren Habitus vollkommen den Pflanzen glichen, die ich bei meinen Sauerstoff-Versuchen unter weitgehendem Sauerstoff-Entzug beobachten konnte. Das ist auch nicht anders zu erwarten, denn in beiden Fällen ist die Sistierung der Wachstumsvorgänge in erster Linie durch Unterbindung der normalen Atmungsprozesse herbeigeführt worden. Hier sind die Enzyme, welche die zur Atmung notwendigen Oxydationsprozesse vermitteln, vergiftet, dort waren die Oxydationsprozesse durch Fehlen des nötigen Sauerstoffs unmöglich gemacht.

Da ich den Wert und die grosse Bedeutung gerade dieses Versuchs für meine Untersuchungen damals noch nicht übersehen konnte, glaubte ich, die Tatsache, dass mich dieser erste Versuch dem konkreten Ziel meiner Arbeit nicht näher gebracht hatte, der Methode zuschreiben zu müssen. Ich gieng daher dazu über, ebenso wie KREUSLER und WILLSTAETTER mit einem kontinuierlichen Gasstrom zu arbeiten, wobei ich die Schwierigkeiten, die durch die lange Versuchsdauer und die Notwendigkeit zahlreicher Parallel- und Vergleichsversuche entstanden, stark unterschätzte. Da die primitiven Institutseinrichtungen es nicht gestatteten, die erforderlichen Gasströme durch eine entsprechende Zahl von kontinuierlich betriebenen Luftpumpen herzustellen, musste ich anders vorgehen.

Ich baute einen Apparat, der im Wesentlichen darauf beruhte, dass ich in grossen, etwa 60 Liter fassenden Glasballons die entsprechenden Gasgemische herstellte, das heisst, sie mit Luft von bestimmtem Kohlensäure-Gehalt füllte, und diese Luft dann durch Einleiten angesäuerten Wassers langsam aus den Ballons heraus und durch die Vegetationsgefässe hindurch drückte. Waren die Ballons dann ganz mit Wasser gefüllt, so hebte ich das Wasser wieder ab, wobei ich der nachdringenden Luft bestimmte Kohlensäure-Mengen zusetzte bzw. die Kohlensäure ganz oder teilweise entzog. War das geschehen, so konnte die Begasung der Versuchspflanzen von neuem beginnen. Der Profilschnitt Figur 5 (im folgenden Heft des „Archivs“) veranschaulicht diesen Apparat.

Zu dem Profilschnitt sind einige Erläuterungen notwendig. Der Hochbehälter (a), in dem der Wasserstand durch eine selbsttätige Abhebevorrichtung (b) stets auf gleicher Höhe erhalten wurde, wird durch die Wasserleitung (c) gespeist. Durch den Vertropfer (d) wird dem Wasser kontinuierlich Salzsäure zugesetzt. Von dem Hochbehälter gelangt das Wasser durch die Schlauchleitung (e) in das Verteilrohr (f) und von diesem durch die Schlauchverbindungen (g) in die 8 Glasballons (h). Durch das so eingeleitete Wasser wird die Luft aus den Ballons

durch die Rohrverbindungen (i) in die Vegetationsgefäße (k) gepresst. An jedem Ballon sind drei Vegetationsgefäße angeschlossen, durch die dieselbe Luft nacheinander durchgeht, die also parallel laufen. In das Rohr (i) ist ein Ueberlauf-fläschchen (l) eingeschaltet, das die erfolgte Füllung des Ballons anzeigen und

=====

Kohlensäure-Versuch Nr. 1.

Nr.	% CO ₂	Grüengewicht.	Trockengewicht der Halme.	
I.	0,03	8,34	0,50	
II.		9,67	0,50	0,50
III.	0,08	9,16	0,47	0,47
IV.	0,2	9,12	0,50	
V.		9,31	0,49	0,50
VI.	-	-	-	-
VII.	1,0	10,50	0,56	
VIII.		11,65	0,60	0,58
IX.	2,0	13,06	0,64	0,64
X.	5,0	21,05	0,95	
XI.		17,06	0,82	0,89
XII.	8,75	16,0	0,87	0,87
XIII.	12,5	15,65	0,83	0,83
XIV.	18,75	5,8	0,37	0,37
XV.	25,0	4,62	0,24	0,24
XVI.	31,25	4,59	0,20	0,20

=====

die rechtzeitige Absperrung der Wasserzuleitung ermöglichen sollte. Die Rohrverbindungen (m) und das Sammelrohr (n) dienen zum Abhebern der Ballons. Die dann nachdringende Luft tritt durch das Röhrchen (o) in die Ballons ein. Alle Schlauch- und Rohrverbindungen sind mit Quetschhähnen oder anderen Verschlüssen versehen, die in der Skizze (Fig. 5) zur besseren Uebersichtlichkeit fortgelassen sind.

Dieser Apparat ermöglichte eine kontinuierliche Begasung für die Dauer von etwa 4 Stunden. Dann waren die Ballons vollgelaufen und mussten geleert, bzw. mit neuer Luft gefüllt werden. Während der 19-tägigen Versuchsdauer habe ich die Begasung nur an wenigen Tagen zweimal, also 8 Stunden lang, durchführen können.

(Schluss im Heft 4).

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Botanisches Archiv. Zeitschrift für die gesamte Botanik](#)

Jahr/Year: 1922

Band/Volume: [1](#)

Autor(en)/Author(s): Janert Heinz

Artikel/Article: [Beitrag zur Beurteilung der klimatischen Wachstumsfaktoren Kohlensäure, Sauerstoff und Luftdruck 155-176](#)