Wachstum und Ertrag.

Von

MICHAŁ KORCZEWSKI

Einleitung.

Wenn wir die Entwicklung einer Pflanze betrachten, so ist ihre Größe (gemessen als Höhe, Volumen, Frisch- oder Trockengewicht) eine Funktion der Entwicklungsdauer, d. i. der Zeit, die seit Entwicklungsbeginn verflossen ist. Andererseits aber, ist sie auch, zu einer bestimmten Zeit, eine Funktion der obwaltenden äußeren Bedingungen, wie Nährstoffmenge im Boden, Wasserzufuhr, Lichtintensität u. s. w. Die Erforschung dieser ersten (Zeit-) Funktion bildet das Problem des Wachstums, die Erforschung der zweiten dagegen — Abhängigkeit der Pflanzengröße in einem bestimmten Zeitpunkte (meistens zur Zeit der Reife) von äußeren „Wachstumsfaktoren“ — das Problem des Ertrages. Beide Probleme sind so innig miteinander verknüpft, daß man es nicht umgehen kann, bei der Analyse des Einen nicht auch das Andere zu erörtern.

Fig. 5 illustriert diese gegenseitigen Beziehungen. Die Kurven $0-A_0$, $0.15-A_1$ u. s. w. sind Wachstumskurven. Jede von ihnen ist eine Funktion der Zeit t (die Richtung der Zeitkoordinate ist von rechts nach links als positiv angenommen) und stellt das Wachstum der Trockensubstanz dar, unter konstanten äußeren Bedingungen, die aber für jede Kurve verschieden sind. Die Kurven haben die bekannte sigmoide Gestalt, welche so charakteristisch für die Wachstumskurven ist. Je besser die Wachstumsbedingungen gestaltet sind (z. B. Phosphorsäuregabe, wie in unserem Fall), umso größer die Wachstumsgeschwindigkeit, umso höher steigen die Kurven an. Am Ende der Vegetationsperiode ($t = 69$) zeigen uns die Ordinaten der Wachstumskurven die Höhe des Ertrages A_0 , A_1 , A_2 u. s. w. Verbinden wir die so gewonnenen Ertragswerte miteinander, so stellt

uns die neue Kurve $A_0 A_1 \dots A_8$ die Ertragskurve dar. Sie ist eine Funktion der Phosphorsäuredüngung (x). Wir können durch die Schar der parallelen Ebenen der Wachstumskurven ein Querschnitt auch zu einer früheren Zeit anfertigen — im Versuch bedeutet das eine frühzeitige Ernte — dann bekommen wir intermediäre Ertragskurven, während der Vegetationsperiode, wie z. B. $a_1 b_1$, $a_2 b_2$, u. s. w.

Nun ist das Ertragsproblem von hervorragender Bedeutung für die Landwirtschaft und deshalb wurde es auch von den Agrikulturchemikern sehr eifrig studiert. Da aber für die praktischen Zwecke fast ausnahmslos nur der Endertrag von Bedeutung ist, so wurde auch in den betreffenden Arbeiten nur die Abhängigkeit dieser letzteren Größe von der am Anfang zugegebenen Düngung untersucht, während der ganze Wachstumsprozeß, welcher zwischen der Düngung am Anfang und der Ernte am Ende des Versuches stattgefunden hat, ganz außer Acht gelassen wurde. Durch die ziemlich regelmäßige, meistens parabelförmige, Gestalt der aus den Versuchen gewonnenen Ertragskurven verleitet, glaubte man sie direkt als Funktion der Nährstoffgabe (oder anderer „Wachstumsfaktoren“) durch eine einfache mathematische Formel ausdrücken zu können und so das exakte „Gesetz“ der Ertragssteigerung, oder „Wirkungsgesetz der Wachstumsfaktoren“ aufzustellen. Diese Bemühungen wurden aber nicht durch den erwarteten Erfolg gekrönt. Die bekannte logarithmische Formel von Mitscherlich

$$\log \frac{A}{A-y} = Kx$$

wo x = Nährstoffgabe, y = Ertrag, A und K Konstanten sind, war eine rein empirische Formel, welche die Versuchsergebnisse mit einiger Annäherung wiedergab; es fehlte ihr aber jede theoretische Begründung, so daß die auf Grund dieser Formel errechneten theoretischen Ertragswerte -- welche der richtige Ausdruck der hier wirkenden physiologischen Gesetze sein sollten -- weniger Zuversicht erwecken konnten, als die rohen Versuchsergebnisse, welche ohne jede Formel aus dem Experiment direkt bekannt waren. Mit einer ebenso grossen Annäherung konnten die Versuchsergebnisse auch mit Hilfe anderer Formeln, wie der Parabel- oder Hyperbelgleichung, oder noch anderer, berechnet werden; es lag aber kein Kriterium vor, mit dessen Hilfe die Wahl zwischen dieser Formeln getroffen werden konnte. Der Grad der Übereinstimmung der theoretischen Werte mit den Versuchsergebnissen war eben das einzige Kriterium der Richtigkeit und der Brauchbarkeit der Formeln. Diese Übereinstimmung war aber für alle diese Formeln ziemlich gleich und war sehr unvollkommen. Sonst stützten

sie sich auf keine einzige physiologische Tatsache, aus welcher sie logisch abgeleitet werden konnten und welche, wenn gut bewiesen

Fig. 5.

und über jeden Zweifel erhoben, ihnen eine entsprechend feste Grundlage und einen entsprechend hohen Grad von Wahrscheinlichkeit

liefern konnte. Auch zu einer physiologischen Analyse der ertragsteigernden Wirkung der Nährstoffe und der Gesetze auf welchen diese Wirkung beruht, lieferten die Formeln gar keinen Beitrag, da sie ausschließlich auf die zwei Größen: Nährstoffgabe und Endertrag — beschränkt waren und mit keiner physiologischen Tatsache in Zusammenhang gebracht waren. Es ist aber klar, daß wenn man die „Wirkungsgesetze“ der Wachstumsfaktoren erforschen will, man unbedingt die Prozesse, wo diese „Wirkung“ stattfindet, — also Wachstumsprozesse — untersuchen und messend verfolgen muß; nur eine derartige Untersuchung kann das für die Analyse des Vorgangs nötige Tatsachenmaterial liefern. Wird das nicht getan, so fehlen uns jegliche Anhaltspunkte für eine solche Analyse. Das war aber mit der Mehrzahl der bisherigen Untersuchungen über die Ertragsgesetze der Fall. Darin, glaube ich, liegt die Hauptursache, warum sie so erfolglos geblieben sind.

Die vorliegende Arbeit stellt einen Versuch dar, das Ertragsproblem als ein physiologisches Problem aufzufassen. Ihre Aufgabe bestand darin, die ertragsteigernde Wirkung der Nährstoffe vom Beginn des Wachstums zu verfolgen und die Ertragskurve nicht nur in ihrer endgültigen Gestalt, zur Zeit der Reife, sondern auch in einigen früheren Zeitabschnitten, während des Wachstums, zu untersuchen. Das Problem wurde also auf das Studium des Wachstums unter verschiedenen Bedingungen — in unserem Fall bei verschiedenen Phosphorsäuregaben — zurückgeführt.

Versuchsordnung.

Die Versuche wurden so angelegt, daß sie uns ermöglichen könnten, den Wachstumsverlauf bei verschiedenen Phosphorsäuregaben und damit auch den Einfluß dieser wechselnden Nährstoffmengen auf den Ertrag zur Zeit der Reife und in einigen früheren Zeitabschnitten zu beobachten. Versuchspflanze war Hafer.

Es wurde die Methode der Sandkultur angewandt. Jedes Zinkgefäß, innen paraffiniert, enthielt 10·5 kg reinen, gewaschenen Sand. Als Grunddüngung erhielt jedes Gefäß: 2 gr CaCO_3 , 1 gr $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, 2 gr KNO_3 , 1·5 gr $(\text{NH}_4) \cdot \text{NO}_3$, 0·3 gr KCl , 0·3 gr NaCl , 0·6 gr MgSO_4 , 0·05 gr FeCl_3 . Phosphorsäure, welche als variabler Faktor gewählt wurde, wurde erst später zugegeben, damit die Keimlinge sich anfangs möglichst gleichmäßig entwickeln könnten und damit wir die Versuche mit gleichen Pflanzen in jeder Reihe beginnen könnten.

Die Samen wurden am 5. VI. (1921) ausgesät, 25 Samen pro Gefäß. Das Gewicht der eingesäten Samen bewegte sich zwischen

Tabelle I.
Höhe der Pflanzen (in Milimetern) in einzelnen

Gefäß Nr.	18. VI.	20. VI.	21. VI.	25. VI.	28. VI.
16	—	126·6 ± 9·4	144·6 ± 10·4	181·1 ± 12·8	260·3 ± 16·6
17	—	131·0 ± 13·4	147·4 ± 10·9	—	260·9 ± 10·3
20	85·7 ± 5·4	121·5 ± 10·2	136·9 ± 11·9	174·0 ± 8·7	245·2 ± 11·6
21	80·1 ± 6·1	118·6 ± 6·9	—	165·8 ± 7·3	235·2 ± 11·9
29	79·0 ± 7·3	107·6 ± 12·2	—	—	237·2 ± 16·1
30	84·4 ± 3·6	116·0 ± 8·6	—	—	260·8 ± 8·9
33	84·6 ± 7·6	115·1 ± 9·2	—	—	248·1 ± 13·7
36	—	113·3 ± 4·5	—	—	243·7 ± 10·3
39	—	108·3 ± 12·0	—	—	243·7 ± 14·1
40	—	122·5 ± 12·9	—	—	262·5 ± 13·1
41	—	107·4 ± 11·6	—	—	254·2 ± 9·1
42	—	121·1 ± 10·6	—	—	256·0 ± 14·9
Mittelwert für die ganze Reihe	82·7 ± 6·7	117·5 ± 12·7	143·0 ± 11·9	173·6 ± 11·7	250·7 ± 15·9

35—45 mg, im Durchschnitt 39·4 mg. Die Keimung erfolgte gleichmäßig und es keimten über 80% Samen. Am 14. VI. wurden die vom Durchschnitt abweichenden Pflänzchen beseitigt und nur 10 Pflanzen in jedem Gefäß belassen. Die durchschnittliche Größe der so ausgeglichenen Keimlinge variierte zwischen 60—70 mm.

Erst jetzt — am 15. VI. — wurde Phosphorsäure zugegeben. Es wurden 5 Reihen angestellt, deren jede 12 Gefäße umfaßte. Die Reihen enthielten:

I. Keine Phosphorsäure	} p. Gefäß.
II. 0·15 gr KH_2PO_4	
III. 0·30 " "	
IV. 0·60 " "	
V. 1·20 " "	

Die Phosphorsäure wurde vorsichtig und stufenweise in Lösung zugegeben. Die Lösung wurde mit NaOH beinahe neutralisiert, um den Unterschieden im H-Ionenkonzentration (entsprechend der verschiedenen Salzkonzentration) vorzubeugen. Wasser wurde bis zu 85% der Wasserkapazität des Bodens zugegeben.

Um von dem ganzen Wachstumsverlauf in jeder Reihe eine möglichst genaue Vorstellung zu gewinnen, wurden außer den Frisch- und Trockengewichtsbestimmungen (die nur selten und in langen Zeitabschnitten erfolgen konnten) in der Zwischenzeit häufigere Höhen-

Gefäßen der Reihe mit 1·20 gr KH_2PO_4 .

3. VII.	8. VII.	16. VII.	25. VII.	9. VIII.	23. VIII.
369·5 ± 15·9	447·6 ± 20·7	582·4 ± 25·6	749·7 ± 33·0	—	826·7 ± 26·5
376·5 ± 16·9	465·8 ± 25·3	608·8 ± 17·0	729·3 ± 42·4	—	—
350·9 ± 35·1	430·2 ± 55·3	577·8 ± 40·4	724·7 ± 60·8	839·1 ± 43·3	—
346·5 ± 19·6	447·2 ± 19·4	—	—	—	—
354·3 ± 21·7	453·8 ± 24·8	590·3 ± 37·8	704·0 ± 47·6	—	792·7 ± 56·9
369·0 ± 13·3	452·7 ± 16·8	574·4 ± 17·5	702·2 ± 42·9	—	—
338·9 ± 20·1	412·0 ± 21·2	528·6 ± 39·6	—	768·0 ± 37·2	—
344·1 ± 17·6	428·4 ± 13·8	576·8 ± 27·2	—	—	814·3 ± 29·7
360·4 ± 15·7	442·7 ± 20·5	555·2 ± 20·4	643·8 ± 20·7	—	—
371·8 ± 14·3	460·9 ± 20·2	—	—	—	—
358·4 ± 20·2	440·7 ± 39·0	—	—	—	—
368·3 ± 17·5	461·6 ± 17·5	592·6 ± 22·5	—	806·2 ± 54·0	—
359·4 ± 21·5	445·9 ± 28·0	577·4 ± 30·3	709·0 ± 54·3	807·0 ± 65·7	811·2 ± 42·2

messungen der wachsenden Pflanzen vorgenommen, besonders in den früheren Entwicklungsstadien. Außerdem wurde die transpirierte Wassermenge tagtäglich auf der Wage bestimmt, was für die Beurteilung des Wachstums in parallelen Töpfen und in parallelen Reihen vom Wert ist, da die transpirierte Wassermenge der Größe und dem Gewicht der Pflanzen angenähert proportional ist. Auf diese Weise — durch die Höhenmessungen in den früheren und die Transpirationmessungen in den späteren Entwicklungsstadien — konnten wir uns über den Gang der Entwicklung in einzelnen Gefäßen, über die Größe der Schwankungen in Parallelen und über die Zuverlässigkeit des Mittelwertes ziemlich gut unterrichten.

Versuchsergebnisse.

a) Das Höhenwachstum.

Tabelle I dient zur Veranschaulichung der Entwicklung in einzelnen Gefäßen und der Größe der Schwankungen zwischen Parallelen während der ganzen Dauer des Versuches. Um Raum zu sparen beschränken wir uns hier nur auf die letzte Reihe mit 1·20 gr KH_2PO_4 , die als Beispiel dienen soll. In den übrigen vier Reihen waren die Verhältnisse ganz analog. Die Zahlen der Tabelle I stellen Mittelwerte der Höhe der 10 Pflanzen in jedem Gefäß dar, mit der dazu gehörigen mittleren Schwankung des Einzelwertes.

Tabelle II.

Höhenwachstum des Hafers bei verschiedenen KH_2PO_4 -Gaben.

KH_2PO_4		0		0.15 gr		0.30 gr		0.60 gr		1.20 gr	
Datum	$\frac{t}{\text{Tage}}$	n	$h \pm \sigma$	n	$h \pm \sigma$	n	$h \pm \sigma$	n	$h \pm \sigma$	n	$h \pm \sigma$
A u s s a t											
Zugabe der Phosphatdüngung. Höhe der Pflanzen: 60–70 mm, im Mittel: $h = 65$ mm											
5. VI.	—	44	82.8 ± 10.1	10	86.2 ± 3.8	59	87.5 ± 7.5	30	91.9 ± 8.5	48	82.7 ± 6.7
15. VI.	0	120	95.9 ± 15.9	1 0	103.4 ± 15.3	120	117.8 ± 16.8	100	120.2 ± 15.1	118	117.5 ± 12.7
18. VI.	3	30	127.0 ± 12.1	30	131.7 ± 16.6	30	151.5 ± 10.8	30	144.9 ± 10.4	30	143.0 ± 11.9
20. VI.	6	20	163.4 ± 20.5	20	166.3 ± 24.7	20	186.3 ± 9.3	20	175.0 ± 6.1	30	173.6 ± 11.7
21. VI.	10	120	177.9 ± 19.5	120	228.4 ± 28.4	119	249.4 ± 21.3	110	249.5 ± 20.2	118	250.7 ± 15.9
25. VI.	13 ¹⁾	118	223.4 ± 22.1	118	303.5 ± 35.3	119	338.9 ± 29.0	110	351.6 ± 25.2	118	359.4 ± 21.5
3. VII.	18 ¹⁾	119	266.5 ± 24.9	119	348.3 ± 36.3	119	396.8 ± 33.7	110	430.8 ± 32.7	118	445.9 ± 28.0
8. VII.	23 ¹⁾	89	319.5 ± 34.7	89	466.4 ± 45.6	89	533.3 ± 36.0	80	577.2 ± 35.0	88	577.4 ± 30.3
16. VII.	31	59	401.3 ± 58.2	59	584.8 ± 71.8	60	667.7 ± 52.6	60	705.2 ± 63.8	60	709.0 ± 54.3
25. VII.	40 ²⁾	30	519.4 ± 50.6	30	789.6 ± 49.6	30	857.2 ± 62.4	30	832.5 ± 67.8	30	807.0 ± 65.7
9. VIII.	55	30	551.1 ± 46.2	30	776.0 ± 57.0	30	843.8 ± 54.6	20	845.2 ± 55.1	30	811.2 ± 42.2
23. VIII.	69	30									

1) Bestockung.

2) Rispenentfaltung.

h = Höhe in Millimetern (Mittelwert aus n -Messungen) n = Zahl der Pflanzen welche gemessen wurden.

Die Zeit des Wachstums (t) ist seit dem Tage der Phosphorsäurezugabe (15. VI.) gerechnet.

Vom 16. VII. an vermindert sich die Zahl der Gefäße, je nachdem diese zu Trockensubstanzbestimmungen genömmen wurden. Auch die Messungen waren schon nicht so oft ausgeführt, da die Zuwächse jetzt kleiner geworden sind, und die Transpirationsmessungen uns besser über die Schwankungen in parallelen Gefäßen unterrichten konnten. Die Mittelwerte für die ganze Reihe, die in der untersten Zeile der Tab. I sich befinden, sind mit der mittleren Schwankung des Einzelwertes (d. h. der einzelnen Pflanze, nicht des Gefäßes) angegeben.

Die Mittelwerte aus allen 5 Reihen sind in der Tabelle II zusammengestellt. Sie stellen also das Höhenwachstum bei verschiedenen Phosphorsäuregaben dar. In graphischer Darstellung würden sich daraus die bekannten S-förmigen Kurven ergeben, mit Ausnahme der Reihe ohne Phosphorsäurezusatz, wo das Wachstum, vom 6. Tage an, beinahe geradlinig verläuft. Die übrigen 4 Kurven (0·15—1·20 gr KH_2PO_4) könnten wir durch die Robertson'sche logarithmische Gleichung

$$\log \frac{y}{A-y} = K(t-t_1)$$

mit einiger Annäherung ausdrücken. Aber solche integrale Wachstumsdarstellung ist zu einer etwas eingehenderen Analyse des Wachstumsvorgangs wenig geeignet. Manche eigentümliche Schwankungen, welche ganz gesetzmässig während des Wachstumsverlaufs auftreten, werden bei derartiger Behandlung ausgeglichen und verwischt. Um sie zu finden, ist es besser, die mittleren täglichen Zuwächse zu verfolgen, wo alle Wachstumsänderungen klar hervortreten Tabelle III. gibt die nach den Angaben der Tabelle II berechneten Zuwachswerte wieder.

Tabelle III.

Höhenwachstum. Die mittleren täglichen Zuwächse.

KH_2PO_4	0 gr	0·15 gr	0·30 gr	0·60 gr	1·20 gr
Zeitabschnitt in Tagen	Z u w a c h s i n m m p r o T a g				
0—5 (2·5)	6·18	7·68	10·56	11·04	10·44
5—13 (9·0)	10·25	15·62	16·45	16·16	16·65
13—18 (15·5)	9·10	15·02	17·90	20·42	21·74
18—23 (20·5)	8·62	8·96	11·58	15·84	17·30
23—31 (27·0)	6·62	14·76	17·06	18·55	16·44
31—40 (35·5)	9·09	13·15	14·93	14·22	14·62
40—55 (47·5)	7·87	13·65	12·63	8·49	6·53
55—69 (62·0)	2·26	—	—	0·91	0·30

In Fig. 6 sind diese Ergebnisse graphisch dargestellt. Wir sehen, daß in den ersten 15 Tagen die Wachstumsgeschwindigkeit ansteigt und zwar um so mehr, je größer die Phosphorsäuregabe; dann sehen wir ein jähes Sinken der Kurven, das zu einem ausgesprochenen Minimum führt, welches zwischen dem 15. und 25-en Tage liegt. Der weitere Verlauf der Kurven ist weniger übersichtlich. Nach dem zweiten Maximum — zwischen dem 25. und 30. Tage — sinken die Kurven nicht gleichmäßig, so dass es nicht klar ist, ob ein zweites

Fig. 6.

Minimum vorliegt oder nicht. Ähnliche Maxima und Minima der Wachstumsgeschwindigkeit (berechnet pro Einheit Pflanzenmasse) wurden auch von Briggs, Kidd und West¹⁾ am Mais gefunden. Das Eintreten des Hauptminimums wurde von ihnen mit der Blütenentwicklung im Zusammenhang gebracht. In unserem Beispiel traf das Minimum um den 20-ten Tag ein, während die Rispen erst viel später um den 40-ten Tag (= 50 Tage nach den Aussaat) sich zu entfalten

¹⁾ Briggs, Kidd und West, A quantitative Analysis of Plant Growth, Part I, and II. Annals of Applied Biology VII., 1920.

begannen. Die Bestockung dagegen, deren Gang auch verfolgt wurde, fiel gerade mit dem Minimum der Wachstumsgeschwindigkeit überein. Die ersten Bestockungstriebe wurden um den 13. Tag beobachtet und ihre Zahl nahm während der nachfolgenden 10 Tage zu, gleichzeitig mit der verminderten Wachstumsgeschwindigkeit. In der Tabelle IV ist die Entwicklung der Bestockungstriebe in allen fünf Reihen dargestellt. Die Zahl der Bestockungstriebe ist in Prozenten angegeben (Zahl der neugebildeten Triebe pro Hundert Pflanzen). Nur in der Nullreihe fand keine Bestockung statt (1 Bestockungstrich unter 120 Pflanzen, d. h. 0·8%) und in Übereinstimmung damit gibt es hier kein Wachstumsminimum zu dieser Zeit, sondern später, vielleicht im Zusammenhang mit der Blütenbildung.

Tabelle IV.

Zahl der Bestockungstriebe im Verhältnis zu der Gesamtzahl der Pflanzen in jeder Reihe (in Prozenten).

KH ₂ PO ₄		0 gr	0·15 gr	0·30 gr	0·60 gr	1·20 gr
Datum	$\frac{t}{\text{Tage}}$	%	%	%	%	%
28. VI.	13	0·8	15·8	44·2	71·8	84·7
3. VII.	18	0·8	17·5	55·0	149·1	185·6
8. VII.	23	0·8	27·5	110·0	185·8	197·5
16. VII.	31	0·8	27·5	110·0	185·8	197·5

Aus der Tabelle ist der große Einfluß der Phosphorsäure auf die Bestockung ersichtlich.

b) Wachstum der Pflanzenmasse.

Zur Bestimmung des Wachstums der Pflanzenmasse wurde viermal während der Vegetationsperiode Ernte vorgenommen und zwar am 24, 40, 55 und 69-ten Tage nach der Phosphorsäurezugabe, also in ± 2 -wöchentlichen Intervallen. Es wurden dazu immer je drei Parallelgefäße aus jeder Reihe entnommen. Um aber ein Mittelwert zu bekommen, der dem Durchschnitt für die ganze Reihe möglichst genau entspricht, wurden die zur Ernte bestimmten Gefäße sorgfältig ausgewählt und zwar nach dem Mass ihrer Höhe (bei der ersten Ernte), oder nach der Grösse der transpirierten Wassermenge (bei den übrigen Ernten). Zur Erläuterung des Verfahrens gebe ich hier ein Beispiel an:

Bei der ersten Ernte, am 24-en Tage wurden in der Versuchsreihe II (0·15 gr. KH₂PO₄) die Gefäße Nr. 5, 45 und 55 geerntet.

Diese wurden nach den Höhenmessungen ausgewählt und zwar so, daß der Mittelwert für alle drei (303·9 mm bzw. 353 mm) dem Mittelwert für die ganze Reihe (303·5 mm bzw. 348·3 mm) am besten entsprach. Aus der Tabelle V sehen wir, dass obwohl von einer genauen Proportionalität zwischen der mittleren Höhe in einzelnen Gefäßen und der Trockensubstanz keine Rede sein kann, der Sinn der Änderungen der gleiche ist, d. h. je höher die Pflanzen waren, desto grösser ihr Trockengewicht. Gefäß Nr. 45 stand, was die Höhe anbetrifft, dem Mittelwert aus den drei Gefäßen — und auch dem aus der ganzen Reihe — am nächsten. Nach der Ernte zeigte es sich, daß seine Trockensubstanz (4·15 gr) dem Mittelwert aus allen drei

Tabelle V.

Gefäßnummer	Höhe am 18 Tage	Höhe am 23 Tage	Trockensubstanz am 24 Tage
	mm	mm	gr
Nr 5	325·3	366·2	5·70
„ 45	311·5	361·8	4·75
„ 55	275·1	330·9	4·19
Mittel:	303·9	353·0	4·88
Mittel für die ganze Reihe	303·5	348·3	

Gefäßen (4·88) ebenso am nächsten stand. Es ist also wahrscheinlich, daß sie auch dem Mittelwert für die ganze Reihe am besten entsprach. Bei den folgenden Ernten wurden die Gefäße, wie gesagt, nach dem Mass ihrer Transpiration auserwählt. Da die Transpiration tagtäglich bestimmt wurde, so war uns für jedes Gefäß die Transpirationsgröße sowohl in dem gegebenen Zeitmoment, wie in der vorangehenden Zeitperiode genau bekannt.

Die in den folgenden Tabellen VI und VII angegebenen Mittelwerte aus je drei Parallelgefäßen haben also einen höheren Grad von Zuverlässigkeit als gewöhnliche Mittelwerte aus drei, zufällig aus der Reihe herausgegriffenen, Proben.

Weiter möchte ich noch bemerken, dass bei der zweiten Ernte die am meisten vom Mittel abweichenden Gefäße geerntet wurden, wodurch für die nachfolgenden Ernten nur die am gleichmässigsten sich entwickelnden Pflanzen übriggeblieben sind. Dementsprechend finden wir die Mittelwerte bei der zweiten Ernte mit sehr grossen (8—18⁰/₀), bei der nächsten Ernte aber mit sehr kleinen (1·4—7·7⁰/₀) mittleren Schwankungen behaftet.

Die in den Tabellen VI und VII zusammengestellten Versuchsergebnisse können in Form von Wachstumskurven (für jede P-Gabe eine besondere Kurve), oder von Ertragskurven (für jede Ernte eine Ertragskurve) graphisch dargestellt werden. Fig. 5 stellt diese beiden Kurvensysteme in Form eines einzigen Raumdigramms dar. Von diesem Diagramm war schon am Anfang die Rede, wo es auch erläutert wurde. Das Diagramm stellt das Wachstum von Trockensubstanz unter verschiedenen Phosphorsäuregaben und gleichzeitig den Ertrag zu verschiedenen Zeitpunkten während des Wachstums dar. Ein analoges Diagramm für die Frischsubstanz könnte nach den Angaben der Tab. VI gezeichnet werden.

Aus den Tabellen VI und VII lässt sich der prozentische Wassergehalt der Pflanzen bei verschiedener Phosphorsäuredüngung und in verschiedenen Wachstumsstadien berechnen. Die erhaltenen Zahlen (Tabelle VIII) zeigen, dass der Wassergehalt der Pflanzen mit fortschreitender Entwicklung schnell abnimmt. Ausserdem aber sehen wir, dass auch die Phosphorsäuregabe einen Einfluss auf den Wassergehalt ausübt und zwar in dem Sinne, dass je bessere Ernährungsbedingungen die Pflanzen besitzen, desto wasserreicher sie sind.

c) Verlauf der Transpiration.

Wie gesagt, wurden die Messungen der Transpiration — ebenso wie die Längenmessungen — eigentlich nur zum Zwecke der Beurteilung des Entwicklungsganges und der Größe der Schwankungen in den Parallelgefäßen, unternommen. Nichtdestoweniger lieferten sie einige Ergebnisse von allgemeinerer Bedeutung, die erwähnt werden können. Die Wasserverdunstung wurde von 20 Juni an (= 5 Tage nach der Phosphorsäurezugabe) tagtäglich bestimmt.

Da die ausführlichen Tabellen der täglichen Wasserverdunstung aller 60 Gefäße zu umfangreich sind, gebe ich sie hier in gekürzter Form an. In der Tabelle IX ist die totale, vom 20. VI. bis zu den angegebenen Tagen pro Gefäß verdunstete Wassermenge angegeben. Von der Wiedergabe der Verdunstung in den einzelnen Gefäßen wurde aber abgesehen, obwohl gerade nach diesen Zahlen die Wahl der zur Ernte bestimmten Gefäße getroffen wurde; die Zahlen der Tabelle IX stellen nur Mittelwerte aus allen n Gefäßen jeder Reihe mit der dazugehörenden mittleren Schwankung. Diese letztere Größe unterrichtet uns über die Gleichförmigkeit der Entwicklung in den Parallelgefäßen einer Reihe weit besser als die mittlere Schwankung der Frisch- oder Trockengewichtes (Tabelle VI u. VII), welche nur aus je 3 Gefäßen berechnet wurde und von uns durch die Wahl

Tabelle VI.

Frischgewicht der Pflanzen. Mittelwerte aus je 3 Bestimmungen.

KH_2PO_4	Oberirdischer Teil	Wurzel	Ganze Pflanze $\pm$ Mittlere Schwankung $\sqrt{\frac{\sum d^2}{n-1}}$	KH_2PO_4	Oberirdischer Teil	Wurzel	Ganze Pflanze $\pm$ Mittlere Schwankung
I Ernte (9. VII.) $t = 24$ Tage				III. Ernte (9. VIII.) $t = 55$ Tage			
gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr
0	10·70	13·94	24·64 $\pm$ 1·38	0	21·57	6·97	28·54 $\pm$ 1·85
0·15	22·46	22·50	44·96 $\pm$ 5·69	0·15	67·20	17·91	85·11 $\pm$ 0·85
0·30	33·95	27·94	61·89 $\pm$ 8·64	7·30	100·90	22·85	123·73 $\pm$ 4·75
0·60	47·62	26·40	74·03 $\pm$ 3·06	0·60	153·20	29·14	182·34 $\pm$ 9·88
1·20	52·80	22·38	75·18 $\pm$ 5·26	1·20	182·97	38·44	221·41 $\pm$ 14·27
II. Ernte (25. VII.) $t = 40$ Tage				IV. Ernte (23. VIII.) $t = 69$ Tage			
gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr
0	29·11	15·68	44·79 $\pm$ 3·55	0	17·8	4·1	21·9 $\pm$ 3·43
0·15	68·43	28·65	97·08 $\pm$ 14·83	0·15	45·7	10·9	56·6 $\pm$ 9·19
0·30	105·88	44·15	150·03 $\pm$ 13·86	0·30	70·9	16·2	87·1 $\pm$ 8·88
0·60	142·04	55·93	197·97 $\pm$ 39·77	1·60	115·9	21·8	137·7 $\pm$ 20·37
1·20	172·22	57·30	229·52 $\pm$ 37·85	1·20	142·5	26·5	169·0 $\pm$ 8·41

Tabelle VII.

Trockensubstanz.

KH ₂ PO ₄	Gefäß Nr.	Einzelerträge			Mittelerträge			Mittlere Schwankung in % des Mittel- wertes
		Oberirdischer Teil	Wurzel	Ganze Pflanze	Oberirdischer Teil	Wurzel	Ganze Pflanze ± mittlere Schwankung	
I. Ernte (9. VII.) t = 24 Tage								
0	2	gr 1·64	gr 1·36	gr 3·00	1·69	1·22	gr 2·91 ± 0·096	± 3·3%
	26	1·64	1·26	2·90				
	48	1·78	1·03	2·81				
0·15	5	3·12	2·58	5·70	3·02	1·86	4·88 ± 0·77	± 15·8 ⁰ / ₀
	45	3·11	1·64	4·75				
	55	2·84	1·35	4·19				
0·30	9	4·36	2·50	6·86	4·32	2·00	6·32 ± 0·92	± 14·6 ⁰ / ₀
	11	4·92	1·93	6·85				
	49	3·69	1·57	5·26				
0·60	18	5·52	2·24	7·76	5·72	1·96	7·68 ± 0·17	± 2·2 ⁰ / ₀
	24	5·89	1·90	7·79				
	47	5·74	1·74	7·48				
1·20	21	5·96	1·63	7·59	6·14	1·53	7·67 ± 0·70	± 9·1 ⁰ / ₀
	40	6·64	1·77	8·41				
	41	5·83	1·19	7·02				

KH ₂ PO ₄	Gefäß Nr	Einzelerträge			Mittelerträge			Mittlere Schwankung in % des Mittel- wertes
		Oberirdischer Teil	Wurzel	Ganze Pflanze	Oberirdischer Teil	Wurzel	Ganze Pflanze ± mittlere Schwankung	
II. Ernte (25. VII.) t = 40 Tage								
0	3	gr 6·08	gr 1·87	gr 7·95	5·68	1·65	7·33 ± 0·87	± 11·9 ⁰ / ₀
	43	6·10	1·60	7·70				
	57	4·85	1·49	6·34				
0·15	6	14·46	3·76	18·22	13·35	3·05	16·40 ± 1·80	± 11·0 ⁰ / ₀
	19	13·55	2·76	16·31				
	54	12·03	2·63	14·66				
0·30	12	20·20	5·67	25·87	19·71	4·65	24·36 ± 2·43	± 10·0 ⁰ / ₀
	31	17·58	4·00	21·58				
	50	21·36	4·29	25·65				
0·60	27	29·06	5·19	34·25	25·81	5·42	31·23 ± 5·81	± 18·6 ⁰ / ₀
	34	28·53	6·36	34·89				
	38	19·85	4·70	24·55				
1·20	17	30·71	5·92	36·63	29·09	5·89	34·98 ± 2·83	± 8·1 ⁰ / ₀
	30	31·07	5·50	36·57				
	37	25·49	6·25	31·74				
III. Ernte (9. VIII.) t = 55 Tage								
0	4	6·18	1·03	7·21	6·79	1·11	7·90 ± 0·61	± 7·7 ⁰ / ₀
	59	6·94	1·18	8·12				
	60	7·25	1·12	8·37				
0·15	8	20·77	3·03	23·80	20·26	2·78	23·04 ± 0·91	± 4·0 ⁰ / ₀
	22	20·50	2·77	23·27				
	44	19·52	2·53	22·05				
0·30	25	30·38	3·57	33·95	29·85	3·44	33·29 ± 0·85	± 2·6 ⁰ / ₀
	51	30·36	3·23	33·59				
	52	28·82	3·52	32·34				
0·60	14	44·44	4·37	48·81	43·59	4·54	48·13 ± 0·68	± 1·4 ⁰ / ₀
	35	43·61	4·49	48·10				
	39	42·71	4·77	47·48				
1·20	20	54·86	5·33	60·19	50·52	5·57	56·09 ± 3·97	± 7·1%
	33	46·87	5·46	52·33				
	42	48·82	5·93	55·75				
IV. Ernte (23. VIII.) t = 69 Tage								
0	1	6·79	0·66	7·45	7·34	0·76	8·10 ± 0·56	± 6·9 ⁰ / ₀
	23	7·70	0·77	8·47				
	58	7·52	0·85	8·37				
0·15	1	19·93	1·96	21·89	19·85	1·99	21·84 ± 1·56	± 7·1%
	53	21·52	1·86	23·38				
	56	18·10	2·16	20·26				
0·30	10	34·28	3·36	37·64	31·44	3·01	34·45 ± 2·90	± 8·4%
	28	29·59	2·32	31·91				
	32	30·46	3·33	33·79				
0·60	13	45·40	4·21	49·61	43·49	3·90	47·39 ± 5·26	± 11·1 ⁰ / ₀
	15	47·64	3·51	51·15				
	46	37·43	3·99	41·42				
1·20	16	57·51	3·89	61·40	53·81	4·64	58·45 ± 2·58	± 4·4 ⁰ / ₀
	29	52·51	4·75	57·26				
	36	51·43	5·27	56·70				

Tabelle VIII.

Wassergehalt der Pflanzen, in 100 Gramm frischer Substanz.

	I Ernte	II Ernte	III Ernte	IV Ernte
KH ₂ PO ₄	O b e r i r d i s c h e r T e i l			
0	84.2 gr	78.2 gr	68.3 gr	58.8 gr
0.15	86.5 "	78.9 "	69.7 "	56.6 "
0.30	87.1 "	80.2 "	70.2 "	55.7 "
0.60	87.9 "	80.7 "	71.2 "	62.5 "
1.20	88.4 ..	80.3 "	72.1 "	62.2 ..
	W u r z e l			
0	90.9 gr	88.8 gr	83.6 gr	80.9 gr
0.15	91.6 "	89.0 "	84.1 "	81.1 "
0.30	92.7 "	89.2 "	84.5 "	81.0 "
0.60	92.4 "	89.9 "	84.1 "	82.2 "
1.20	93.1 "	89.5 "	85.1 "	82.2 "

dieser Gefäße absichtlich beeinflußt und modifiziert wurde. Vergleichen wir aber die Schwankungen der Transpiration und die Schwankungen des Frisch- oder Trockengewichts, so sehen wir, daß sie von derselben Größenordnung sind.

Die Gesamtmenge des während der Vegetationsperiode verdunsteten Wassers nimmt also mit der Zeit zu und die entsprechenden Kurven würden den früher besprochenen Wachstumskurven (für Frisch- und Trockensubstanz) äußerlich sehr ähnlich sein. Sie würden dieselbe S-förmige Gestalt haben und um so höher steigen, je größer die Phosphorsäuregabe.

Die obigen Messungen liefern uns ein ziemlich genaues Bild des Transpirationsverlaufs während des Wachstums des Hafers bei verschiedenen Phosphorsäuregaben. Wir können diese Angaben noch etwas näher ansehen. Zunächst fragen wir, wie verhält sich die Menge des während der ganzen Vegetationsperiode verdunsteten Wassers zu der während derselben Zeit gebildeten Trockensubstanz. Wir bekommen folgende Zahlen (Tabelle X).

Aus den Zahlen der letzter Kolonne ergibt sich, daß je größer die Phosphorsäuregabe desto weniger Wasser auf 1 Gramm gebildeter Trockensubstanz während der Vegetationsperiode transpiriert wurde. Es ist nun interessant zu prüfen, ob auch die Intensität der Transpiration in jedem Augenblick, während der Entwicklung, von der Phosphorsäuregabe in derselben Weise abhängt und umso niedriger wird, je bessere Wachstumsbedingungen den Pflanzen geboten werden? Um vergleichbare Resultate zu bekommen, müssen wir den Einfluß der verschiedenen Größe der Pflanzen in verschiedenen

Tabelle IX.**Verlauf der Transpiration.**

T. W. = Totale transpirierte Wassermenge, in kg pro Gefäß. M. S. = Mittlere Schwankung, in Prozenten der T. W.

KH ₂ PO ₄		0 gr		0.15 gr		0.30 gr		0.60 gr		1.20 gr	
Datum	$\frac{t}{\text{Tage}}$	T.W.	± M. S.	T.W.	± M. S.	T.W.	± M. S.	T.W.	± M. S.	T.W.	± M. S.
	(vom 15. VI)	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%
20. VI.	5	Beginn der Transpirationmessungen									
27. VI.	12	0.38	± 8.8	0.40	± 7.4	0.41	± 5.5	0.37	± 7.0	0.41	± 10.2
2. VII.	17	0.89	7.1	1.05	6.4	1.16	7.0	1.13	10.5	1.22	6.0
7. VII.	22	1.10	7.4	1.37	5.4	1.57	6.6	1.58	10.6	1.74	6.2
12. VII.	27	1.59	5.4	2.19	5.0	2.67	5.2	2.86	9.8	3.23	4.5
17. VII.	32	2.28	4.0	3.36	5.2	4.28	6.2	4.85	11.1	5.52	5.0
21. VII.	36	2.99	4.5	4.67	5.8	6.21	5.5	7.39	10.0	8.37	4.8
25. VII.	40	3.81	4.5	6.21	4.1	8.46	2.9	10.58	7.0	11.86	3.8
28. VII.	43	4.47	4.4	7.67	5.1	10.57	3.6	13.42	6.1	14.97	3.4
1. VIII.	47	5.14	4.9	9.28	5.1	12.78	4.9	16.45	7.1	18.61	3.0
5. VIII.	51	5.70	5.6	10.28	5.1	14.24	5.0	18.54	6.8	21.08	2.9
9. VIII.	55	6.36	7.8	11.15	7.5	15.62	9.5	20.36	8.5	23.68	2.4
13. VIII.	59	6.88	7.9	11.97	8.0	16.81	10.0	22.23	7.7	25.91	2.3
21. VIII.	67	7.16	8.2	12.27	8.5	17.25	9.7	23.00	7.1	26.82	2.2

Tabelle X.

KH ₂ PO ₄ gr	Totale transpirierte Wassermenge	Gebildete Trocken- substanz (Endertrag)	Wasser transpiriert auf 1 Gramm gebildeter Trockensubstanz
0	7160 gr	8.1 gr	884 gr
0.15	12270 "	21.8 "	563 "
0.30	17250 "	34.4 "	500 "
0.60	23000 "	47.4 "	485 "
1.20	26820 "	58.4 "	458 "

Reihen berücksichtigen und also die Transpiration auf Einheit Pflanzenoberfläche, oder — da diese nicht gemessen wurde — auf Einheit Pflanzenmasse berechnen. Die in einer Zeiteinheit durch 1 Gramm Pflanzenmasse verdunstete Wassermenge ist eine ganz andere Größe als die auf ein Gramm gebildeter Pflanzenmasse durch die ganze Pflanze verdunstete Wassermenge. Als Zeiteinheit wurde ein Intervall von 4 Tagen genommen (obwohl Messungen für jeden Tag vorhanden sind), um die eventuellen Schwankungen der täglichen Transpirationswerte etwas auszugleichen. Während dieses Intervalls und zwar immer am dritten Tag wurde die Pflanzenmasse bestimmt. Die entsprechenden Werte des Frischgewichtes sind der Tabelle VI entnommen. Die Resultate sind in Tabelle XII dargestellt.

Tabelle XI.

Zeit der Transpirationsbestimmung	KH ₂ PO ₃	Durch 1 Gefäß in 4 Tagen verdunstetes Wasser (Mittelwert)	Frischgewicht der transpirierenden Pflanzen	Transpiration in 4 Tagen auf 1 Gramm Frischsubstanz	Mittel
7—10 Juli (I Ernte)	0	400 gr	24·6 gr	16·3 gr	14·5
	0·15	660 "	45·0 "	14·7 "	
	0·30	890 "	61·9 "	14·4 "	
	0·60	1000 "	74·0 "	13·5 "	
	0·20	1170 "	75·2 "	15·5 "	
23—26 Juli (II Ernte)	0	870 gr	44·8 gr	19·4 gr	17·7
	0·15	1800 "	97·1 "	18·5 "	
	0·30	2570 "	150·0 "	17·1 "	
	0·60	3590 "	198·0 "	18·1 "	
	0·20	3950 "	229·5 "	17·2 "	
7—10 August (III Ernte)	0	660 gr	(28·5) gr	(23·2)	10·4
	0·15	830 "	85·1 "	9·8	
	0·30	1300 "	123·7 "	10·5	
	0·60	1790 "	182·3 "	9·8	
	0·20	2540 "	221·4 "	11·5	

Aus der Tabelle geht hervor, dass, mit Ausnahme der Null-Reihe, die Transpiration in allen Reihen gleich ist und nur von dem Entwicklungsstadium der Pflanzen, nicht aber von den Entwicklungsbedingungen, also nicht von der Höhe der Phosphorsäuregabe abhängt. Das abweichende Verhalten der Null-Reihe erklärt sich zum Teil dadurch, daß hier die Verdunstung der Sandoberfläche stark ins Gewicht fiel. Während bei den übrigen Reihen die Sandoberfläche durch die üppige Vegetation ganz bedeckt war, war sie in der Null-Reihe, wo die Pflanzen sehr mager aussahen, fast ungehindert der Verdunstung ausgesetzt. Bei der dritten Messung endlich (1—10 August), wo die Abweichung am größten ist, kommt noch ein anderer Umstand hinzu: wir betrachten das Gewicht der frischen Substanz als ein angenähertes Mass für die Pflanzenoberfläche. Die Transpirationsleistung der Pflanze hängt ja nicht von dem Gewicht, sondern von der Oberfläche, welche dem Frischgewicht der Pflanze angenähert proportional sein muss. Die Proportionalität hört aber auf, wenn die Pflanzen zu vertrocknen beginnt. Das war aber hier gerade der Fall. Zur Zeit der dritten Ernte waren die Pflanzen der Null-Reihe schon stark vertrocknet; ihr Gewicht (Frischgewicht) war fast auf die Hälfte (28·5 gr gegen 44·8 gr bei der zweiten Ernte) gesunken. Die Größe ihrer Organe und insbesondere ihre Oberfläche entsprach aber mehr ihrem früherem Gewicht. Während also die

Verdunstung, berechnet auf 1 Gramm Frischgewicht, sehr hoch herauskam, würde sie berechnet auf Einheit Oberfläche viel kleiner ausfallen.

Während also die Wachstumsgeschwindigkeit von der PO_4 -Gabe in hohem Grade abhängt, ist die pro Einheit Pflanzenmasse transpirierte Wassermenge in einem bestimmten Entwicklungsstadium in allen Reihen gleich. Das Verhältnis der pro Einheit Pflanzenmasse transpirierten Wassermenge zu der durch dieselbe Einheit, in derselben Zeit, produzierten Substanzmenge wird also umso größer ausfallen, je weniger Substanz durch Wachstum produziert wurde, was in unserem Experiment bei niedrigen PO_4 -Gaben zutrifft. Damit erklären sich die in Tab. X wiedergegebenen Resultate.

d) Chemische Zusammensetzung der Pflanzen.

Die geerntete Pflanzensubstanz aus allen vier Ernten wurde auf Gesamtphosphorsäure und Gesamtstickstoff analysiert. Die Resultate sind in den folgenden Tabellen XII und XIII wiedergegeben.

Tabelle XII.

Der Phosphorsäuregehalt der Pflanzen. Analysen ausgeführt durch F. Majewski, Assistenten des Instituts.

P ₂ O ₅ in Prozent der Trockensubstanz					Ertrag an P ₂ O ₅ (in mg) auf 1 Gefäß			
KH ₂ PO ₄	I Ernte	II Ernte	III Ernte	IV Ernte	I Ernte	II Ernte	III Ernte	IV Ernte
gr	%	%	%	%	mg	mg	mg	mg
0	0·35	0·24	0·18	0·23	10·1	17·3	14·6	18·1
0·15	0·47	0·29	0·23	0·26	26·8	48·0	52·4	56·0
0·30	0·64	0·31	0·26	0·26	40·5	79·7	87·9	92·8
0·60	0·89	0·45	0·32	0·33	68·3	135·1	155·4	157·1
1·20	1·19	0·57	0·43	0·43	91·9	200·5	242·5	250·0

Tabelle XIII.

Der Stickstoffgehalt der Pflanzen. Analysen ausgeführt durch F. Majewski, Assistenten des Instituts.

N in Prozent der Trockensubstanz					Ertrag an N (in mg) auf 1 Gefäß			
KH ₂ PO ₄	I Ernte	II Ernte	III Ernte	IV Ernte	I Ernte	II Ernte	III Ernte	IV Ernte
gr	%	%	%	%	mg	mg	mg	mg
0	3·50	2·19	1·96	2·39	100·0	160·4	154·8	189·9
0·15	3·45	1·90	1·67	1·69	196·6	311·6	385·3	368·9
0·30	3·99	1·95	1·47	1·55	252·3	502·5	489·6	554·9
0·60	4·37	1·52	1·34	1·34	335·8	450·7	643·6	634·9
1·20	4·34	1·72	1·24	1·14	334·2	600·4	697·0	669·5

Das Pflanzenmaterial aus jedem Gefäß wurde gesondert analysiert. Die angeführten Zahlen in den Tabellen XII und XIII stellen also Mittelwerte meistens aus drei, seltener aus zwei, Bestimmungen in Parallelgefäßen. Die Schwankungen in P_2O_5 - oder N-Gehalt der Pflanzen in Parallelgefäßen waren meistens klein; nur selten überschritten sie 10%.

Besprechung der Resultate.

Wie schon in der Einleitung dargelegt wurde, ist es aussichtslos die Gesetzmässigkeiten der Ertragssteigerung als eine Funktion der am Anfang zugesetzten Nährstoffgaben, ohne Berücksichtigung der physiologischen Prozesse der Nährstoffverarbeitung und der Substanzerzeugung während des Wachstums, direkt durch eine mathematische Formel auszudrücken; all derartigen Versuche haben gescheitert. Es müssen vielmehr die Gesetze des Wachstums und der Substanzproduktion erforscht werden, um eine Grundlage zur Lösung des Problems des Ertrages zu schaffen.

In der vorliegenden Arbeit wurde das Wachstum des Hafers bei verschiedenen Phosphorsäuregaben untersucht und messend verfolgt. Die Ergebnisse sind in den Tabellen I—IV und VI—VII wiedergegeben. Was den Wachstumsverlauf anbelangt, so zeigen uns die Längenmessungen (Tab. II) daß die Kurve der Wachstumsgeschwindigkeit (Fig. 6) ein ausgesprochenes Minimum aufweist. Ein ähnliches Zuwachsmimum wurde auch beim Wachstum der Maispflanze durch Briggs, Kidd und West nach den Beobachtungen von Kreuzler und Hornberger, beschrieben. Nur wurde jenes Minimum durch die erwähnten Autoren mit der Blütenbildung in Zusammenhang gesetzt, während in unserem Fall das Minimum mit der Bestockung in Zusammenhang zu stehen scheint.

Angeichts dieser Tatsachen ist es unmöglich den ganzen Wachstumsverlauf durch eine einfache Gleichung, wie z. B. die Robertson'sche Gleichung, darzustellen. Nach Robertson soll die Wachstumsgeschwindigkeit durch eine eingipfelige, symmetrische Kurve von der Gleichung $\frac{dy}{dt} = Ky (A - y)$ sich darstellen lassen. In unserem Fall aber müssen wir den Wachstumsprozess als aus wenigstens zwei solchen Wachstumsperioden zusammengesetzt betrachten. Ob diesen Teilprozessen die Robertson'sche Gleichung genügt oder nicht, bleibt noch dahingestellt. Es ist aber klar, daß wir für den Gesamtverlauf des Wachstums die Robertson'sche

Gleichung, so wie es z. B. Rippel¹⁾ gethan hat, nicht anwenden können.

Der Einfluß der Phosphorsäuregabe auf das Wachstum ist aus den Tabellen I, VI und VII ersichtlich. Fig. 5 zeigt uns das Wachstum der Trockensubstanz bei verschiedenen Phosphorsäuregaben. Je größer die Phosphorsäuregabe, desto höher steigen die Kurven. Setzen wir den höchsten Wert in jeder Reihe gleich 100, so bekommen wir den Wachstumsverlauf in Relativzahlen ausgedrückt (Tab. XIV).

Tabelle XIV.

Wachstum der Trockensubstanz in Relativzahlen. Der höchste Wert in jeder Reihe ist = 100 gesetzt²⁾.

Versuchs- reihe gr KH_2PO_4	Wachstumsdauer, in Tagen				Der höchste Wert, absolut in gr
	24	40	55	69	
0	35.9	90.5	97.5	100	8.10
0.15	21.2	71.2	100	94.8	20.26
0.30	18.3	70.7	96.6	100	34.45
0.60	16.0	64.9	100	98.5	48.13
1.20	12.8	59.8	95.9	100	58.45

Je höher also die Phosphorsäuregabe, desto weniger Trockensubstanz wurde in der früheren Wachstumsstadien erzeugt im Verhältnis zu der Maximalernte in jeder Reihe. Während der ersten 24 Tage aber wurde, bei der höchsten Gabe (1.20), nicht nur relativ sondern auch absolut weniger Trockensubstanz erzeugt als bei der niedrigeren (0.60) Phosphorsäuregabe (s. Tab. VII und Fig. 5). Der Einfluß von Phosphorsäure in dieser Periode äußerte sich vielmehr in der erhöhten morphologischen Tätigkeit, nämlich in der Bildung der Bestockungstriebe, wie es aus Tab. IV hervorgeht. Die volle Entfaltung der ertragssteigernden Phosphorsäurewirkung findet erst in späteren Perioden statt, desto später, je höher die Phosphorsäuredüngung. Der Anstieg der Wachstumskurven ist auch steiler in den höheren Reihen. Bei der Anwendung der Robertson'schen Formel (bloß als Interpolationsformel) würde diese Eigentümlichkeit der Phosphorsäurewirkung in der Vergrößerung der beiden Kon-

¹⁾ Rippel, A. u. Ludwig, O. Untersuchungen über physiologische Gleichgewichtszustände bei Pflanzen. Biochem. Zeitschr. **155**, 1925 und **177**, 1926.

²⁾ Zur Orientierung ist in der letzten Kolonne auch der absolute Wert des Maximalertrags in jeder Reihe angegeben.

stanten A und K ihren Ausdruck finden, ähnlich wie es Rippel und Ludwig³⁾ für die Stickstoffwirkung beim *Helianthus* gefunden haben. Die Berechnung der Konstanten in der Robertson'schen Formel stellt aber nur eine andere — und zwar ungenauere — Form der Beschreibung der durch die Relativzahlen der Tab. XIV ausgedrückten Versuchsergebnisse dar. Über die physiologischen Vorgänge der Nährstoffverwertung und Substanzerzeugung unterrichten uns weder die Konstanten noch die ganze Robertson'sche Formel

Fig. 7. Einfluß verschiedener KH_2PO_4 -Gaben auf die Aufnahme von Phosphorsäure durch die Pflanzen in aufeinanderfolgenden Wachstumsperioden (I—IV).

gar nicht. Einen Einblick in den physiologischen Mechanismus der Substanzerzeugung und Wachstums können wir nur auf Grund besonders angestellten Versuche erhalten, welche uns das nötige Tatsachenmaterial über die fraglichen physiologischen Prozesse liefern werden. Einige derartige Tatsachen ergeben sich auch aus der vorliegenden Untersuchung.

³⁾ Rippel, A. u. Ludwig, O. Untersuchungen über physiologische Gleichgewichtszustände bei Pflanzen. Biochem. Zeitschrift, Bd. 177, 1926.

Betrachten wir zuerst die Phosphorsäureaufnahme durch die Pflanzen. Tab. XII gibt an, wieviel Phosphorsäure aufgenommen und am Ende jeder Periode geerntet wurde; daraus läßt sich die Menge der während der einzelnen, aufeinanderfolgenden Perioden, aufgenommenen Phosphorsäure, als Funktion der Phosphorsäuregabe, leicht berechnen. Die Ergebnisse sind in Kurvenform in Fig. 7 dargestellt. Es zeigt sich, daß die Kurven annähernd geradlinig verlaufen, d. h. daß die Phosphorsäure beinahe proportional der Phosphorsäuremenge im Boden durch die Pflanzen aufgenommen wurde.

Fig. 8.

Der Stickstoff war in allen Reihen in gleicher Menge dem Boden zugesetzt; trotzdem ist die aufgenommene Stickstoffmenge nicht konstant (s. Tab. XIII), sondern von der Höhe der P_2O_5 -gabe abhängig. Die Abhängigkeit der Stickstoffaufnahme von der Phosphorsäuregabe muß aber vorwiegend eine indirekte sein. Die Stickstoffaufnahme hängt nämlich einerseits von der Stickstoffkonzentration im Boden, andererseits aber von der Größe und der Aufnahmefähigkeit der Pflanze ab, welche wiederum durch die Phosphorsäuregaben bestimmt sind. Es ist bemerkenswert, daß während der Prozentgehalt an Phosphorsäure in der Trockensubstanz, besonders während

der III und IV Ernte (Tab. XII) mit der Höhe der P_2O_5 -Gabe zunimmt, nimmt der Stickstoffgehalt unter denselben Bedingungen ab (Tab. XIII). Aber während der ersten Wachstumsperiode (I Ernte) nimmt der prozentische Stickstoffgehalt mit der Phosphorsäuregabe zu, — eine sehr merkwürdige Tatsache!

Von besonderer Wichtigkeit ist nun die Wirkung der aufgenommenen Phosphorsäure auf die Trockensubstanzproduktion. Ein Milligramm aufgenommenener Phosphorsäure bewirkt nicht immer die Bildung einer und derselben Menge Trockensubstanz; seine Wirkung hängt vielmehr von den im Organismus herrschenden Reaktions- und Gleichgewichtsbedingungen ab. Fig. 8 stellt die produzierte Trockensubstanz als Funktion der aufgenommenen Phosphorsäure dar. Wie wir sehen, ergibt sich für jede Reihe eine ganz andere Kurve. Die Phosphorsäurewirkung hängt also, in eigentümlicher Weise, von der am Anfang zugesetzten Menge Phosphorsäure, also von der Phosphorsäureabsorption, ab. Je höher die Phosphorsäuregabe und also je höher der Phosphorsäuregehalt in den Pflanzen, desto weniger Trockensubstanz wird auf Einheit aufgenommenener Phosphorsäure gebildet. Dieser hemmende Einfluß der Phosphorsäureanhäufung wird nur durch die größere Menge der zur Verfügung stehenden Phosphorsäure kompensiert, so daß bei größeren Phosphorsäuregaben mehr Trockensubstanz gebildet wird. Die Ausnutzung der Phosphorsäure ist dann aber reine geringere.

Mit Hilfe der in Fig 8 dargestellten Kurven läßt sich die in jedem Moment durch 1 Milligramm Phosphorsäure hervorgerufene Trockensubstanzsteigerung berechnen. Man muß dazu nur eine Tangente an die Kurve in dem betrachteten Punkte errichten. Der so erhaltene Wert ist ein Maß für die „ertragssteigernde“ Wirkung der Phosphorsäure. Die Bedingungen, unter welchen diese Wirkung stattfindet — wie der Phosphorsäuregehalt, Stickstoffgehalt, Alter der Pflanzen u. s.w. sind uns aus den Versuchsergebnissen für jeden Punkt bekannt oder können berechnet werden. Die Aufgabe weiterer Forschung muss es sein, die biochemischen Reaktionen, auf welchen diese Wirkung der Phosphorsäure bei den synthetischen Prozessen in der Pflanzenzelle beruht, kennen zu lernen und die ihnen zu Grunde liegenden Gesetze festzustellen. Erst auf Grund dieser Gesetz wird eine Theorie der Ertragssteigerung (ein „Wirkungsgesetz der Wachstumsfaktoren“) aufgestellt werden können.

Aus dem Pflanzenphysiologischen Institut der Landwirtschaftlichen Hochschule in Warschau.