Beiträge zur Theorie der Elektrokultur

Von der

Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich

zur Erlangung der

Würde eines Doktors der technischen Wissenschaften

genehmigte

Nr. 688 Promotionsarbeit

vorgelegt von

Werner Oswald, dipl. Ingenieur agr.

aus Luzern

Referent: Herr Prof. Dr. P. Jaccard

Korreferent: Herr Prof. Dr. F. Tank

Berlin

Verlag von Gebrüder Borntraeger

W 35 Schöneberger Ufer 12a

1933

Sonderabdruck aus „Angewandte Botanik“ Bd. XV, Heft 1.

Vorwort.

Vorliegende Arbeit stellt einen Versuch dar, die maßgebenden Faktoren, auf denen eine Erklärung der wachstumsbeeinflussenden Eigenschaft des elektrischen Feldes beruht, in ihren wesentlichen Merkmalen zu studieren. Die Hauptschwierigkeiten, die sich diesen Bestrebungen entgegenstellten, lagen in dem Vorhandensein zahlreicher, sich überdeckender Einzelvorgänge. Der praktische Kulturversuch läßt uns nur ihre Summe erkennen. Es mußte von Anfang an der Einzeluntersuchung vorbehalten bleiben, gewisse Hauptvorgänge zu studieren und diese abzuklären. Wir glauben die großen Linien, an die sich weitere Untersuchungen anknüpfen lassen, durch diese Arbeit gewiesen zu haben.

Besonderer Dank gebührt Herrn Prof. Dr. P. Jaccard, Vorsteher des pflanzenphysiologischen Institutes der E.T.H., unter dessen Leitung vorliegende Arbeit entstand. Es war dem Unterzeichneten ein Vergnügen, unter dessen fördernden Initiative die Studien durchzuführen. Herr Prof. Tank hat mir durch das der Arbeit entgegengebrachte Interesse mitgeholfen, in die zum Teil unabgeklärten elektrisch-physiologischen Verhältnisse der Elektrokultur Licht zu bringen. Herr Dr. Pallmann, Assistent am agrikulturchemischen Institut der E.T.H. hat der Arbeit in kolloidchemischen Fragen fördernd zur Seite gestanden. Ihnen allen gehört mein herzlichster Dank.

Durch das freundliche Entgegenkommen von Herrn Regierungsrat Dr. K. Snell hat sich die „Vereinigung für angewandte Botanik" bereit erklärt, vorliegende Arbeit in ihrer Zeitschrift zu veröffentlichen. Ich danke Herrn Regierungsrat Dr. K. Snell besonders auch für die freundliche Mithilfe bei der Drucklegung der Arbeit.

Zürich, den 28. Februar 1933.

sig.

Werner Oswald.

Inhaltsverzeichnis.

		Seite
I.	Luftelektrizität und Pflanzenwachstum	1
II.	Abgrenzung der Versuche	13
III.	Über die Entstehung und Herkunft der Luftelektrizität	19
IV.	Die Wahl und technische Durchbildung der Hochspannungsquelle	26
V.	Die Pflanze und ihr Einfluß auf die Leitfähigkeit der Atmosphäre	32
VI.	Der Einfluß des elektr. Feldes auf die Komponenten der Atmosphäre	43
	A. Ozonbildung	43
	B. Stickoxydbildung	46
	C. Die Differenzierung der Kohlensäureatmosphäre im elektr. Feld	51
VII.	Der Einfluß des elektr. Feldes auf die Transpiration und auf die Wasserstoffionenkonzentration und den Aschengehalt der Pflanzen	65
VIII.	Praktische Nutzanwendung der Elektrokultur	80

I. Luftelektrizität und Pflanzenwachstum.

Seit die wissenschaftliche Forschung in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts sich intensiver mit dem Studium der Elektrizität zu befassen begann, glaubten gewisse Kreise, hauptsächlich angeregt durch Benjamin Franklins Versuche über die Luftelektrizität, diese als wachstumsfördernden Faktor in den Dienst der pflanzlichen Gütererzeugung stellen zu können. Und gleich von Anfang an nahm die Elektrophysiologie einen breiten Raum ein an der Erforschung elektrischer Vorgänge. Pflanzenphysiologie und Medizin gingen jedoch mit wenig Ausnahmen getrennte Wege. Der Botaniker bediente sich der elektrischen Ladungen in der Atmosphäre, während der Mediziner sich mehr die Erkenntnis auf dem Gebiete der galvanischen Ströme und deren technische Um-

formung zunutze machte. Bei diesem wiederum galten die hauptsächlichsten Versuche mehr der wissenschaftlichen Erkenntnis auf dem Gebiete der medizinischen Therapeutik, während bei jenem von Anfang an mehr wachstumsfördernde Ziele die Hauptbeweggründe zur Forschertätigkeit lieferten.

Ein ausführlicher historischer Überblick von C. Lipperheide (35) über frühere Versuche auf dem Gebiete der Elektrokultur und eine wissenschaftliche Bewertung derselben von Prof. Jaccard (21) enthebt uns der Aufgabe, die zahlreichen von mehr oder weniger Erfolg begleiteten Arbeiten früherer Forschung aufzuzählen. Das Studium über den Einfluß der Elektrizität auf das Pflanzenwachstum krankt an der Tatsache, daß wir es mit einer Grenzdisziplin der Botanik zu tun haben, die weitgehende Kenntnis auf dem Gebiete der Elektrizität, besonders der Luftelektrizität, voraussetzt. Schon das Vorhandensein eines Luftpotentials setzt die Gegenwart elektrisch geladener Körper voraus, über deren Entstehen und Verhalten wir erst unterrichtet sein müssen. Die Erde besitzt normalerweise gegenüber der umhüllenden Luftsäule eine negative Ladung und gibt vorherrschend Träger ihrer Ladung ab. Die positiv geladenen Ionen der Luft wandern überwiegend zur Erde hin und trachten, ihre Ladung mit negativ geladenen Körpern zu vereinigen. Diese Ionenwanderung führt zu einer Anreicherung der positiven Ionen in den unteren Luftschichten. Enthalten auch diese unteren Schichten der Atmosphäre bis zu durchschnittlich 1 km Höhe (37), durch Dunstmassen, Staub und Rauchteilchen, räumliche Ladungen, die bald positives, bald negatives Vorzeichen haben, so ist das Integral aller Ladungen dieser unteren Schicht positiv. Ebert (9) und Daunderer (8) haben durch ihre Versuche diese Behauptung zuerst bestätigt. Der erstere fand vorherrschend ein Überwiegen der positiven Ladungen von durchschnittlich 9×10^{-8} elektrostatischen Einheiten im ccm Luft.

Hier in den untersten Luftschichten findet ein intensiver Ladungsausgleich statt (Troposphäre), von dessen Größenordnung folgende Überschlagsrechnung Zeugnis ablegen mag: Fortwährend tritt ein Überschuß negativer Ladung in die Atmosphäre, während positive der Erde zugeführt wird. Die Dichte des Stromes ist abhängig von der Leitfähigkeit h und dem Potentialgefälle $\frac{dV}{dh}$. Daraus resultiert eine Dichte des Vertikalstromes $i = h \cdot \frac{dV}{dh}$.

Nehmen wir das Potentialgefälle nach Stutz (49) zu 300 Volt pro m an, d. h. zu $^1/_{100}$ e. st. E. pro cm und setzen für die Leitfähigkeit einen Mittelwert $h = 5 \times 10^{-5}$ e. st. E., so wird $i = 5 \times 10^{-7}$ e. st. E. oder in elektromagnetischen Maßeinheiten $i = 1{,}67 \times 10^{-16}$ Amp./cm^2. Wilson (59) fand als Ergebnis monatelanger Messungen mit einem Elektrometer einen durchschnittlichen Wert für den Vertikalstrom von $2{,}2 \times 10^{-16}$ Amp./cm^2. Dürfte die völlige Übereinstimmung dieser Zahl mit der oben errechneten auch nur zufällig sein, so spricht sie doch für die relative Konstanz dieser Größe bei normalen Witterungsverhältnissen. Auf Bergspitzen, Graten, überhaupt auf exponierten Terrainmodulationen, kann der Vertikalstrom dem hohen Potentialgefälle entsprechend zu abnorm hohen Werten ansteigen.

Die Mittlerin dieses Ladungsausgleiches ist in Gebieten mit Vegetation die Phytosphäre, die Pflanzendecke. Durch die Wasserleitungsbahnen mit dem Untergrund ausgezeichnet elektrisch leitend verbunden, trägt sie im wesentlichen auch dessen Potential. Die negativen Ionen wandern vom Untergrund hinauf zur Elektrode: dem Blatt, der Granne, usw. Daß bei diesem Ionenaustausch in der Pflanze dem Vertikalstrom tatsächlich eine Rolle zukommt, hat schon Ebert (10) an Hand direkter Messungen wahrscheinlich zu machen versucht.

Als Träger des Elektrizitätsaustausches innerhalb der Pflanze kommen wohl in erster Linie die Ionen der Nährsalzlösung in Betracht. Neben N, P, K, als den wichtigsten mineralischen Nährstoffkomponenten, spielen auch besonders im Hinblick auf ihre hydrolytische Dissoziation und Reaktionsfähigkeit Mg, Ca, Na, Fe, S eine Rolle. Diese in den Salzen der Nährlösung vorkommenden Elemente können nur in gelöstem Zustand durch die pflanzliche Zellmembran diffundieren. Eine Kataphorese kommt daher von vornherein nicht in Betracht.

Betrachten wir die dissoziierten Kationen und Anionen der Nährlösung erst in ihren Äquivalentverhältnissen zueinander, so ergibt sich entweder eine saure oder alkalische Reaktion, je nachdem wir einen Überschuß an H-Ionen oder OH-Ionen in der Lösung haben. Sehen wir vorderhand von jedem Auswahlvermögen der pflanzlichen Zelle für die einzelnen Nährstoffe ab und betrachten die Ionen in ihrem Verhalten zum elektrischen Feld, ausgedrückt auf der einen Seite durch die negative Erdladung und auf der anderen durch das positive Luftpotential, so ergibt sich folgende Gruppierung der Hauptnährstoffkomponenten:

Anionen	Kationen
OH	H
NO_3	K
PO_4	Ca
So_4	Eisenhydrat
SiO_2	Na

Das Aufsteigen der hydrolisierten Anionen wird durch das positive Luftpotential begünstigt, wogegen die Aufnahme der Kationen verzögert wird. Die Ausscheidung von H-Ionen — besonders in Form von R | COO | H — aus den Wurzelhaaren, dürfte schon allein auf Grund dieser Überlegungen sehr wahrscheinlich sein. In der Tat haben denn auch Kulturversuche in Pfefferscher Nährlösung deutlich gezeigt[1]), daß durch eine positive Feldeinwirkung eine stärkere Zunahme der Wasserstoffionenkonzentration erfolgt, als bei sonst unter den nämlichen Bedingungen gehaltenen Kontrollpflanzen. Bei einer anfänglich übereinstimmenden Wasserstoffionenkonzentration, deren pH[2]) zwischen 6,85 und 6,88 lag, ergab sich bei den Kontrollpflanzen nach 16 Tagen ein pH von 6,64 bis 6,67, bei den Versuchspflanzen ein pH von 6,48 bis 6,50. Dürfen diese Konzentrationsverschiebungen wegen der Pufferwirkung des in der Nährlösung eher im Überschuß zurückbleibenden Calziums und der Alkalisierung der Nährlösung als Folge ihrer hydrolisierenden Wirkung an der Wand des Glasgefäßes auch nicht ohne weiteres absolut gewertet werden, so kann der Versuch doch als positive Bestätigung einer Kationenanreicherung in der als Kathode wirkenden Nährlösung gelten. Ähnliche Ergebnisse ergaben sich auch bei Lipperheide (35) bei *Phaseolus vulgaris* in v. d. Cronescher Nährlösung.

Ich werde später bei Behandlung meiner Versuche noch näher auf diese Verhältnisse zu sprechen kommen. Die normale elektrische Feldeinwirkung unterstützt vor allem den Aufstieg der hydrolisierten NO_3 und PO_4-Ionen, also der Anionen, was der Zirkulation in den Gefäßen um so förderlicher ist, als die Hydra-

---

[1]) Vgl. Kap. VII, Abschnitt 2.

[2]) Sörensen definiert die Wasserstoffionenkonzentration pH als den neg. Brig. Log. der betr. konkreten Zahl, also $pH = -\log C_H$. Die Dissoziationsgleichung des Wassers $C_H \cdot C_{OH} = K_w = 10^{-14,11}$ wird zur Gleichung $10^{-pH} \cdot 10^{pOH} = K_W = 10^{-14,14}$. Die Summe der Wasserstoff- und Hydroxylexponenten ist bei 18° stets 14,4. Für Wasser ist $pH = -\log 10^{-7,07} = +7,07$.

tation, die Wasseranlagerungsfähigkeit besonders des letzteren dieser beiden Radikale im Vergleich zu den metallischen Kationen besonders dem Kalium eine schlechte ist (29)[1]). Allerdings handelt es sich beim aufsteigenden Wasserstrom nicht um einen reinen Elektrolyten. Er stellt vielmehr ein hydrophyles Kolloid dar, in welchem Eiweißstoffe, wie Purinderivate, Lecithine, aber auch Aminosäuren gewisse physiologische Aufgaben zukommen, auf die wir anschließend eingehen werden. Auf diese Eiweißstoffe übt nach Kostytschew das Vorhandensein dieser Anionen, besonders des NO_3 eine lösende Wirkung aus. Umgekehrt besitzen die Kationen, im besonderen Maße die der Alkalimetalle, in der Reihenfolge der Hofmeisterschen Ionenreihe (47):

$$Li > Cs > Na > Rb > K$$

eine aussalzende Wirkung. Führen bei der vorhandenen Konzentration der Nährsalzlösung diese Verhältnisse auch nicht zu einer Ausflockung, so liegt es im Bereich der Wahrscheinlichkeit, daß es zu Umladungen der Zellkolloide führen kann. Dieser Vorgang ist nach Kostytschew reversibel. Nach der Entfernung des Elektrolyten durch die Dialyse oder Herabsetzung seiner Konzentration durch starke Verdünnung, geht das Kolloid wieder in Lösung über, ohne seine Eigenschaft zu verändern. Die Form, in welcher das Kalium aufgenommen wird, ist noch nicht geklärt. Sein Hydratationsvermögen und seine schon bei verhältnismäßig geringen Konzentrationen auftretende aussalzende Wirkung macht es, wie sich aus diesen kolloidchemischen Betrachtungen ersehen läßt, dem Chemismus der Nährstoffaufnahme zur Notwendigkeit, daß das Kalium entweder in einem Komplexsalz oder was wahrscheinlicher sein dürfte, an ein- oder mehrbasische organische Säuren gebunden, im Wasserstrome aufsteigt. Auch der Aufstieg an einem im Überschuß mit OH-Ionen gepufferten Eiweißkörper ist kolloid-chemisch betrachtet ganz gut denkbar; jedoch würden der Diffusion höher molekularer Körper durch die Porenweite der Zellmembranen gewisse Grenzen gesetzt.

Die Fixierung der Reaktion der aufsteigenden Nährlösung, wie auch des Plasmas der lebenden Pflanzen überhaupt, um einen Mittelwert fällt nur zu einem kleinen Teil der wahlweisen Aufnahme der Nährsalze durch die Pflanzenwurzel zu. Individuell verschieden und, wie gewisse später zur Behandlung kommende

[1]) Seite 20 ff.

Versuchsergebnisse noch zeigen werden, auch zeitlich wechselnd, muß ein Puffer hier sein, der für das Plasma schädliche, stark saure bzw. alkalische Reaktionen verhütet. Dafür sorgen die sogen. amphoteren Elektrolyte. Nach Kostytschew versteht man darunter Körper, die sowohl H-Ionen als OH-Ionen abspalten können, und also sowohl Säuren wie Basen sind (27). Physiologisch wichtig sind dabei besonders Aminosäuren, Purinderivate, Lecithine und Eiweißkörper, die gleichzeitig H^+, OH^- und Zwitterionen $R^{\pm}$ liefern. Glykokoll dissoziiert auf folgende Weise:

$$NH_2 \cdot CH_2 \cdot COOH + H_2O$$
$$= HONH_3 \cdot CH_2 \cdot COOH = NH_3 \cdot CH_2 \cdot COO \mp H^+ + OH^-.$$

Die Bildungsmöglichkeit der Säure und der Base ist bei ein und demselben Ampholyten nicht gleich stark ausgeprägt. Folgende Tabelle zeigt die basische und die saure Dissoziation von verschiedenen amphoteren Elektrolyten (28)[1]):

Substanz	K_H (25°)	$K_{(OH)}$ (25°)
Glykokoll	$1{,}8 \cdot 10^{-10}$	$2{,}7 \cdot 10^{-12}$
Leucin	$1{,}8 \cdot 10^{-10}$	$2{,}3 \cdot 10^{-12}$
Phenylalanin	$2{,}5 \cdot 10^{-9}$	$1{,}3 \cdot 10^{-12}$
Asparaginsäure	$15{,}0 \cdot 10^{-5}$	$1{,}2 \cdot 10^{-1}$
Lysin	$1{,}0 \cdot 10^{-11}$	$1{,}0 \cdot 10^{-7}$

Das Vorhandensein derartiger Ampholyten gibt der Lösung eine mehr oder weniger charakteristische Eigenreaktion. Bei der großen Verdünnung der aufsteigenden Nährlösung kommt der Dissoziationskonstanten des Wassers und besonders auch der darin gelösten Kohlensäure, je nach dem Grad der Verdünnung, eine steigende Bedeutung zu.

Die dissoziierten Nährsalze sind, wie schon aus dem Vorhergesagten hervorgeht, bei weitem nicht alle elektrisch geladene Körper im Wasserstrom. Wie die folgende Untersuchung zeigt, stellen die extrahierten Pflanzensäfte kolloide Systeme dar.

Filtrierter Preßsaft aus Karotten nach ober- und unterirdischen Organen getrennt, wurde im Ultramikroskop auf seine kolloidale Struktur untersucht. Es interessierte vor allem die Frage nach der Homogenität und Heterogenität des Systems, sowie sein Verhalten als elektrischer Leiter. Der durch ein Papierfilter gelassene

[1]) Seite 75.

Preßsaft hielt die Zellreste wie auch die Mikronen zurück, so daß im Mikroskop die Flüssigkeit als optisch leer angesehen werden konnte. Im Ultramikroskop dagegen traten zahlreiche Beugungsscheibchen auf, bei denen 30 Minuten nach dem Auspressen, neben dem Braunschen Bewegungsphänomen, eine gewisse überlagerte Bewegung feststellbar war, welche jedoch nur einen Teil der Ultramikronen zu beeinflussen schien. Mit Anlegen der Spannung begannen sich dann die Lichtpunkte zu separieren, wobei sich eine stärkere Wanderung zur Kathode hin feststellen ließ.

Natürlich bringt der luftelektrische Vertikalstrom im Verhältnis zu den gewaltigen Energiemengen, die die Pflanze in Form von Licht und Wärme von der Sonne zugeführt erhält, nur schwache Kräfte in ihren Energiehaushalt hinein. Auch im Verhältnis zu den großen interzellularen Ladungsphänomenen scheinen die elektrischen Energieträger des vertikalen Ladungsausgleiches, die die Pflanze zur Leitung benutzt, keine überragende Rolle zu spielen[1]).

Diese Ausführungen zeigen also zur Genüge, daß das Leben der Pflanze in weitgehendem Maße an elektrophysiologische Vorgänge gebunden ist. Die Bestrebungen, die Elektrizität als Aktivierungsfaktor in den pflanzlichen Produktionsprozeß hineinzubringen, bedeutet für die Pflanze an und für sich kein neues physiologisches Problem. Die ersten Versuche über Elektrokultur, so vor allem diejenigen von Bertholon, Gardini, Ingenhouz und Wollny (60) rechnen im Grunde alle mit einer elektrischen Feldwirkung der Atmosphäre gegen die Erde und schreiben ihr eine für das Pflanzenwachstum spezifische Wirkung zu. Ihre Bestrebungen gingen dahin, mit Hilfe eines im Prinzip gleich aussehenden Apparates — Elektrovegetometer genannt — die Raumladung der unteren Luftschichten zu konzentrieren und sie beliebig

[1]) Ich denke dabei nicht bloß an osmotische Konzentrationsgefälle, sondern an meßbare elektrische Spannungseffekte und Ströme, die ihren Sitz in der Pflanze aufweisen. So hat man z. B. gefunden, daß sich die Wurzel unabhängig von dem negativen Erdpotential gegen den Stamm und die Blätter negativ verhält. Wird ein Apfel oder eine andere Frucht an irgendeiner Stelle gequetscht und verbindet man diese Stelle der Schale mit einem Galvanometer, so zeigt dieses einen Strom entsprechend einige Zehnmillivolt Spannung an. Dabei erscheint die beschädigte — auch angeschnittene — Stelle immer negativ gegen die unbeschädigte. Man spricht in diesem Falle von einem Verletzungsstrome (Techn. Rundschau Nr. 41, S. 3, 1931). Analog sind auch von der Medizin solche physiologischen Ströme gemessen worden. Diese biochemischen Ströme harren noch einer eingehenden Erforschung durch die Pflanzenphysiologie.

mittels einer aus zahlreichen Spitzen versehenen Elektrode der Phytosphäre zuzuleiten. Die mangelnden Kenntnisse dieser Forscher über Luftelektrizität und daher ihr Unvermögen über ihr Vorhaben quantitative Vergleiche anzustellen, haben nicht nur unbrauchbare, sich widersprechende Ergebnisse gezeitigt, sondern auch die wissenschaftliche Erkenntnis weiter nicht gefördert.

Die Versuche mit galvanischer Elektrizität brachten insofern ein neues Phänomen in die Physiologie der unterirdischen Pflanzenorgane hinein, als die hier zur Anwendung gelangten Stromdichten das Plasma schädigten. Die Versuchsanordnung geschah in der Regel derart, daß zwischen zwei in das Erdreich versenkten, parallel gegenübergestellten Elektroden, Cerealiensaatgut ausgelegt wurde. Lipperheide verwendete zur Nachprüfung der Versuche von Loewenberg Hannagerste, wobei die Sämlinge bei der einen Versuchsanordnung parallel, das andere Mal senkrecht zur Stromrichtung gestellt wurden. Konnte er bei einer Stromdichte von 0,0001 Amp.-/cm² bei 15 Volt auch eine leichte Beschleunigung der Keimung feststellen, so traten bei einer Stromdichte von mehr als 0,0001 Amp./cm² und einem Spannungsgefälle von 150 Volt ausnahmslos Schädigungen auf. Ähnliche Versuche, jedoch die Pflanzenwurzel in einer Nährlösung, führten zu einer schädigenden Verkrümmung der Wurzel. Solche Erscheinungen gehören zum Gebiet des Galvanotropismus.

Daß die Erdladungen nicht gleichmäßig über die Erdoberfläche verteilt sind und als deren Folge elektrische Ausgleichsströmungen — besonders unter dem Namen Erdströme, „vagabundierende Ströme“ — auftreten, ist schon längst bekannt. Es ist durchaus nicht notwendig, daß etwa ein Gewitter oder auch Niederschläge der Anlaß der Ströme sei. Es gibt unter anderen Ursachen eine Reihe von Vorgängen auf der Sonne, die solche Störungen im Gefolge haben können. Da dieselben auch den Gang der erdmagnetischen Elemente beeinflussen, spricht man in gewissen Fällen direkt von „magnetischen Gewittern“. In räumlicher Ausdehnung ungleichmäßige Dissoziation erzeugt ein Konzentrationsgefälle, das ebenfalls Ausgleichströme hervorruft. Letzten Endes müssen wir auch die den Atomzerfall berührenden Phänomene und ihre Ursache zu Ausgleichströmungen hier erwähnen.

Alle diese durch terrestrische und außerterrestrische Vorgänge bedingten Ströme weisen — von gewissen lokalbedingten Ausnahmen abgesehen — Dichten auf, die das Pflanzenwachstum kaum beein-

flussen. Zudem wählen ihre Hauptintensitäten den der elektrischen Leitung einen geringeren Widerstand entgegensetzenden Untergrund, vor allem das Grundwasser, Erzgänge usw. Da die Leitung durch die Erde zu einem großen Teil „elektrolytisch" sein muß, werden auch entsprechende Zersetzungen im Erdreich stattfinden, die für die Bloßlegung mineralischer Nährstoffe von Bedeutung sein können.

Für den Lebensprozeß der Pflanze spielen diese Erdströme bei weitem nicht jene Rolle wie der Vertikalstrom. Und wie die Versuche von Loewenberg und Lipperheide zur Genüge darbringen, scheint eine weitere Ausdehnung derselben mit künstlich erzeugten galvanischen Erdströmen wenig Erfolg versprechend.

Die ersten grundlegenden Versuche mit hochgespannten Strömen verdanken wir dem intuitiven Geist Lemströms (31, 32 u. 21). Bei seinen in erster Linie luftelektrischer Forschung dienenden Nordlandreisen der Jahre 1868, 1871, 1882 und 1884 stach dem Blick des Naturforschers der intensive Wuchs der Cerealiengewächse jener nördlichsten Kulturzonen in die Augen. Trotz der kurzen Vegetationszeit übertraf ihr fortgeschrittenes Wachstum das der nämlichen Kulturen in weit südlicheren Breiten. Er glaubte diese Wachstumsintensivierung dem Einfluß der in diesen Gegenden häufig auftretenden Nordlichter zuschreiben zu müssen.

Diese Beobachtungen, obgleich sie durch andere physiologische Momente erklärt werden können, regten ihn zu seinen Elektrokulturversuchen an, die er mit dem Jahre 1885 begann. Die leitende Idee war, mit Hilfe einer Influenzmaschine hochgespannte Ströme zu erzeugen und diese mittels eines mit Spitzen versehenen Metallnetzes, welches über den Pflanzen ausgebreitet lag, die Luft künstlich zu ionisieren. Den einen Pol der Influenzmaschine legte er mittels Zinkplatten in die Versuchstöpfe. Schon gleich zu Anfang beschäftigte ihn nicht bloß die Frage nach dem Verhalten der elektrisierten zu den Kontrollpflanzen, sondern er prüfte gleich auch die Frage nach dem Einfluß der Stromrichtung auf das Pflanzenwachstum. Die Versuche führten im Laufe der Jahre zu in der Mehrzahl positiven Ergebnissen. Wachstumssteigerungen von 40% und mehr wurden gegenüber den Kontrollen erreicht. Nach Regelmäßigkeit und Höhe der Erträge waren die Versuchstöpfe mit dem positiven Pol am Luftleiter denjenigen mit umgekehrter Stromrichtung überlegen. Mit diesen Feststellungen gab sich Lemström nicht zufrieden, sondern er suchte nach einer Er-

klärung dieser Mehrerträge. Er glaubte, solche auf eine vermehrte und beschleunigte Zirkulation der Nährstoffe zurückführen zu müssen. Überhaupt lag ihm eine physikalische Erklärung näher und er schrieb daher physiologischen Reizwirkungen eine geringere Rolle zu. Ein Moment zur Stützung dieser Ansicht erblickte er vor allem in dem verschiedenen Verhalten von Flüssigkeitssäulen in Kapillaren. So findet unter der Einwirkung eines elektrischen Feldes ein Steigen von Flüssigkeiten in Kapillaren statt, welches auf eine Anreicherung des Meniskus an Ionen zurückzuführen ist. Es entsteht dann eine Störung des osmotischen Druckgefälles, und als Folge setzt eine Ausgleichsströmung ein. Dieser Vorgang wird allgemein als Elektroosmose bezeichnet. Daß dieser elektro-physikalische Vorgang im Nährstoffaufstieg der Pflanze eine Rolle spielen kann, machen Keimungsversuche wahrscheinlich, bei welchen die Wasseraufnahmefähigkeit des sich erst bildenden Wurzelwerkes noch zurücksteht. In den drei ersten Tagen nach der Keimung weist nämlich elektrisierte Weizen- und Gerstensaat ohne Ausnahme ein größeres Wachstum auf als die entsprechenden Kontrollen. Bei Fortsetzung der Versuche ist dann bei späteren Beobachtungen eher wieder ein Ausgleich festgestellt worden. Diese unsere Beobachtungen sind nur eine Bestätigung der Keimungsversuche, die schon Schellenberg im Jahre 1913 anstellte (3). Das rasche Wachstum in den ersten Tagen nach der Keimung kann in der beschleunigten Mobilisation der Nährstoffe durch Elektroosmose seine Erklärung finden. Stern (48) prüfte diese Ergebnisse Lemströms im Potometer nach, ohne daß es ihm gelang, eine Beschleunigung des Säftestromes nachzuweisen.

Auf Grund dieser bei Lemström positiv ausgefallenen Versuche, mittels künstlich erzeugter Ionen das Pflanzenwachstum zu fördern, erachteten zahlreiche Forscher die wissenschaftliche Erkenntnis der Elektrokultur für genügend abgeklärt, um dieselbe in die Praxis einzuführen. Prof. Oliver Lodge in Birmingham nahm in Verbindung mit Newman und unterstützt vom Ministerium für Landwirtschaft die Elektrokulturversuche in England nach verbesserten technischen Voraussetzungen auf (21). Angeregt durch diese Untersuchungen betrachtete der Elektrotechniker Breslauer (4) die Elektrokultur reif für den praktischen Großversuch. Mit Hilfe einer von ihm durchkonstruierten Hochspannungsquelle, deren Stromcharakteristik beinahe vollständig gleichgerichtete Stromimpulse aufwies, war es ihm möglich, eine Kulturfläche von 36 ha

einem starken elektrischen Felde zu unterwerfen. Die Gleichrichtung erfolgte mittels eines „Ventils", welches ein Zurückfließen der positiven Elektrizität verhindert haben soll. Es wurde durch eine einfache Funkenstrecke, bestehend aus Spitze und Platte, dargestellt. Da eine solche Funkenstrecke infolge von Luftströmungen, allmählicher Ionisierung des umgebenden Raumes usw. keine genügende Sicherheit bot, setzte er sie in ein Vakuum.

Die Technik der Gleichrichtung war zu jener Zeit noch kaum entwickelt. Die Spannung betrug ähnlich wie bei den Versuchen der Engländer um die 60000 Volt herum. Ein mächtiges, 5—8 m über dem Erdboden sich ausbreitendes Netz aus parallelen Drähten überspannte das Versuchsfeld. Waren seine Versuchsergebnisse nicht so eindeutig wie bei Lemström und den Engländern, so fielen sie doch in positiver Weise aus. Die zum Teil negativen Ergebnisse glaubt er dem geringeren Feuchtigkeitsgehalt seines Versuchsgebietes (Südschweden) zuschreiben zu müssen.

Neuere Ergebnisse, welche einen wachstumsfördernden Einfluß der Elektrokultur feststellen, stammen von Blackman (4), der große Freilandversuche vorwiegend mit Haferkulturen durchführte. Daneben bediente er sich zum Studium der Fragen der kritischen Stromintensitäten auch Laboratoriumsversuchen. In ähnlicher Weise studierten die amerikanischen Forscher Collins, Flint und MacLane (7) die Frage nach der optimalen Stromstärke. Bei Mais erhielten sie bei einer Stromintensität von 10^{-9} Amp. je Pflanze das höchste Wachstum.

Diesen positiven Versuchsergebnissen, die quantitativ allerdings bedeutende Schwankungen in den Mehrerträgen aufweisen, stehen in ebensolcher Zahl Elektrokulturversuche mit mehr oder weniger negativem Erfolg gegenüber. Auf Grund der von Breslauer entwickelten Elektrokulturmethode wurden in Hede-Wigenkoog (6), Holstein und in Halle (30) große Freilandkulturen angelegt, die wie auf dem Versuchsgut Mocheln des K. W.-Institutes für Landwirtschaft in Bromberg (35) und anderen ergebnislos verliefen. Nach Lipperheide wurde auf den mit Wechselstrom behandelten Parzellen sogar vermindertes Wachstum beobachtet.

Neben diesen mehr dem Allgemeinstudium der Elektrokultur gewidmeten Versuchen hat Lipperheide (35), angeregt durch R. Stoppel (49), sich mehr Fragen der Reizphysiologie zugewandt. Seine Versuchsanordnung weicht insofern von der bisher üblichen ab, als die Ionisierung der Luft nicht mittels elektrischer Feld-

wirkung unmittelbar über den Pflanzen erfolgt, sondern daß die Luft, isoliert vom gläsernen Versuchskasten, durch Funkenentladung ionisiert und durch einen Ventilator über die Versuchspflanzen geblasen wird.

Seine wesentlichsten Untersuchungen widmete er der Abhängigkeit der Schlafbewegung von *Phaseolus vulgaris* unter verschiedenen Außenfaktoren, von denen uns in diesem Zusammenhange vor allem der Einfluß der ionisierten Luft interessiert. Zusammenfassend hat sich ergeben, daß tatsächlich Beziehungen zwischen Ionisation der Luft und pflanzen-physiologischen Vorgängen existieren. Es zeigte sich dabei, daß gestörte Schlafbewegungen durch Zuführung von hoch leitfähiger Luft wieder normal werden. Ferner will er eine Ähnlichkeit zwischen der Leitfähigkeitskurve der Atmosphäre und dem Gang der Blattbewegung von *Phaseolus vulgaris* erkennen. So soll hochleitfähige Luft eine Hebung der Blätter bewirken. In ähnlicher Weise wird die Bewegungskurve der Blätter bei Einwirkung von Röntgenstrahlen und ultra-violettem Licht untersucht.

Für die Elektrokultur im besonderen sind dabei folgende Feststellungen Lipperheides von Interesse:

1. Erhöhte Ionisation der Luft wirkt fördernd auf das Pflanzenwachstum. Die Gesamtoberfläche der Blätter und das Trockengewicht wird bedeutend vergrößert.

2. Die Salzaufnahme der mit künstlich ionisierter Luft behandelten Pflanzen ist größer als die der nicht behandelten. Dies wird in Zusammenhang mit der stärkern Assimilation und Transpiration gebracht.

Zu ähnlichen Ergebnissen in bezug auf die Transpiration kommt auch Fräulein Henrici (20). Anschließend ergaben sich auf Grund von Versuchen gewisse Zusammenhänge zwischen optimalen Wachstumsbedingungen der ionisierten Pflanzen einerseits und der Lichtintensität und dem Feuchtigkeitsgehalt der Atmosphäre andererseits.

Diese Relationen sind insofern von Interesse, als große Lichtintensitäten bei stark ionisierter Luft sowohl im Gebirge als auch in der Ebene die Assimilation benachteiligen, während bei schwächerem Licht eine Assimilationssteigerung eintritt. Hoher Ionengehalt in trockener Atmosphäre soll schädlich wirken.

Überblicken wir diese mit wechselndem Erfolg durchgeführten Versuche in der Elektrokultur, so hat uns die wissenschaftliche

Erkenntnis seit Lemström nicht viel weiter gebracht. Die Kompliziertheit der sich überdeckenden Vorgänge und Einflüsse erschwerten von Anfang an eine klare Problemstellung. Durch anfängliche Erfolge angeregt, glaubte man, ohne die Mannigfaltigkeit der ursächlichen Zusammenhänge studiert zu haben, gleich aufs Ganze gehen zu dürfen und die Elektrizität in vollem Umfange als Produktionsfaktor in die pflanzliche Gütererzeugung einzuführen. Vollends bemächtigte sich noch die Spekulation der Elektrokultur. Elektro-Vegetometer und andere für Wissenschaft und Praxis unbrauchbare Apparate wurden vom Handel auf den Markt gebracht. Die Folge war eine natürliche Reaktionsbewegung. Das Für und Wider der Elektrokultur wurde eine Ansichtssache. Diese unerfreulichen Verhältnisse teilten sich auch störend allen wissenschaftlichen Forschungsarbeiten auf diesem Gebiete mit.

Nur wenige Institute, wie das Institut für Botanik an der Landwirtschaftlichen Hochschule Bonn-Poppelsdorf unter Professor Körnicke und vor allem das pflanzenphysiologische Institut der E. T. H. in Zürich unter der fördernden Leitung von Professor Jaccard, sind unbehindert dem sonst extensiven Entwicklungsgang bei der Elektrokultur der wissenschaftlichen Erforschung — dieser vorderhand noch rein ins Gebiet der Phyto-Elektrophysiologie fallenden Fragen — treu geblieben. Schon allein die Tatsache, daß die künstliche Elektrisierung in 90 % der Fälle eine Gewichtszunahme der Pflanzen und speziell der Körner bestimmt, macht das Problem auch im Hinblick auf eine eventuell spätere praktische Nutzanwendung eines weiteren Studiums wert (24 u. 25). Solange aber der Erfolg dieser Kulturmethode von Voraussetzungen abhängt, deren Wesen und ursächliche Zusammenhänge noch absolut unerforscht daliegen, solange kommt dem Laboratoriumsversuch nach wie vor eine Hauptbedeutung zu. Dies schließt den gleichzeitig ausgeführten Freilandversuch nicht aus. Im Gegenteil, er kann wertvolle von unliebsamen Laboratoriumseinflüssen befreite Ergänzungsergebnisse liefern. Zudem besitzt das Resultat großer Versuchsreihen zur Erhärtung wissenschaftlicher Ergebnisse wertvolle Beweiskraft.

II. Die Abgrenzung der Versuche.

Nach diesen zusammenfassenden Studien über frühere Versuche und Forschung auf dem Gebiete der Elektrokultur ist in erster Linie die Feststellung von Wichtigkeit, daß der pflanzliche Lebens-

prozeß an elektrische Effekte gebunden ist. Schon allein diese Tatsache rechtfertigt es, unabhängig von zukünftigen praktischen Erfolgsaussichten die Studien auf dem Gebiete der Elektrokultur rein aus wissenschaftlichem Interesse fortzusetzen.

Die Vielseitigkeit der damit zusammenhängenden Probleme verlangt aber gebieterisch nach einer Aufteilung des Stoffgebietes. Das Vorstudium zu meiner Arbeit wurde insofern aufs Nachhaltigste gefördert, als das pflanzenphysiologische Institut schon seit einigen Jahren den Problemen der Elektrokultur volle Aufmerksamkeit geschenkt hatte. Auf den wenigen Voraussetzungen aufbauend, prüfte Professor Jaccard vorerst die früheren Ergebnisse der Praxis durch eigene ausgedehnte Versuchsserien nach, um selbst die nötigen Unterlagen und Erfahrungen zu neuen Versuchen zu sammeln. Da von Anfang an die Bedeutung der Luftelektrizität und daher die künstliche Ionen-Anreicherung in der Phytosphäre für das Problem der Elektrokultur klar erkannt wurde, wurde es, ehe eine größere Differenzierung des Versuchsprogrammes vorgenommen wurde, für unumgänglich nötig erachtet, erst die technische Seite einer Lösung entgegenzuführen.

1. Galt es die Frage aufzuklären, ob die Ionen unmittelbar über der Pflanze, also mit Hilfe eines elektrischen Feldes zu erzeugen seien, oder ob eine gesonderte Ionenbildung in einem Ionisator größere Erfolgsaussichten bieten würde. Im Hinblick auf eine eventuell später vorzunehmende praktische Nutzanwendung der Elektrokultur bei Freilandkulturen und auch um die unnötige Komplizierung der Probleme durch die Berücksichtigung unkontrollierbarer Diffusionsströmungen sowie der bei der großen Intensität der elektrischen Entladung sich abwickelnden chemischen Umsetzung der Luft zu vermeiden, wurde von einer solchen Art der Ionenerzeugung, die für Versuche in geschlossenem Glaskasten, wie sie vor allem Lipperheide verwendete, ganz wertvolle Aufschlüsse bringen kann, abgesehen.

2. Die rastlose technische Entwicklung auf dem Gebiete der Hochspannungsmaschinen hat die Auswahl eines für die Elektrokultur in erster Linie geeigneten Apparatetypes nicht erleichtert und verlangte zum Studium der Auswahl der geeignetsten Stromquelle zahlreiche kostspielige und lang andauernde Versuche (22).

3. Neben dieser rein technischen Seite der Aufgabe galt es, den Einfluß der Höhe der Spannungen, der Stromart und Richtung auf das Pflanzenwachstum zu studieren. Den Möglichkeiten wurden

insofern Grenzen gesetzt, als es eigentlich erst im letzten Jahrzehnt der Technik gelang, die für den wissenschaftlichen Versuch notwendigen reinen Gleichströme mit praktisch konstanten Spannungs- und Stromamplituden zu liefern.

4. Die elektrische Feldwirkung und das Auftreten dunkler elektrischer Entladungen in der Atmosphäre übt auf letztere nicht bloß ionisierenden Einfluß aus, sondern sie führen vielmehr auch zu einer teilweisen chemischen Umformung gewisser Luftkomponenten. Dadurch werden Einflüsse biologischer Natur in der lebenden Pflanze hervorgerufen, und es scheinen Untersuchungen der Assimilation, der Atmung und der Wasserzirkulation besonders aufschlußreich zu sein.

5. Die künstliche Ionisierung der Atmosphäre konnte naturgemäß nur in engster Anlehnung an das Studium der atmosphärischen Elektrizität erfolgen. Der Technik war das Problem zugewiesen, die Ionenerzeugung praktisch zu lösen. Der Biologie stand die Frage nach der optimalen Ionendichte und Spannung zu. Darauf, daß dem qualitativen Einfluß der Reizwirkung eine größere Rolle zukommen muß als dem quantitativen elektrischen Energieumsatz, wurde schon von Lemström und später von Winterstein und Jaccard aufmerksam gemacht. Der Ionenanreicherung muß eine aktivierende Wirkung zugeschrieben werden, deren endgültige Erklärung noch offen steht.

Daß die Energiebilanz der während einer Kulturperiode über einem Kartoffelacker ausgestrahlten Elektrizitätsmenge mit dem Mehrertrag an pflanzlicher Stärke bei den Versuchspflanzen gegenüber den Kontrollpflanzen bei weitem nicht übereinstimmt, kann nicht erwartet werden und wurde erstmals von Winterstein durch eine Überschlagsrechnung gezeigt[1]).

---

[1]) Breslauer, Beeinflussung des Pflanzenwachstums durch ionisierte Luft, in „Bulletin des Schweiz. Elektrotechn. Vereins", Nr. 7, 1913. Bei der vollständigen Verbrennung der Stärke entstehen Kohlendioxyd und Wasser, wobei pro Kilogramm Stärke rund 4000 Kalorien frei werden. Wenn in der Pflanze unter Mitwirkung des Blattgrüns die Stärke aus diesen beiden anorganischen Stoffen Kohlendioxyd und Wasser gebildet wird, so muß hierzu die gleiche Energiemenge zur Stärkebildung verwendet werden. Diese Energie wird von der Sonne geliefert. Die Mehrproduktion der anderen organischen Stoffe bleibt unberücksichtigt. Bei einer mittleren Ernte entfallen auf 1 ha rund 250 dz Kartoffeln. Gute Kartoffeln enthalten 29% Trockengewicht. Der Stärkegehalt beträgt im Mittel 20% und bei einem mittleren Gehalt von $^1/_4$% Stickstoff ergibt sich ein Eiweißgehalt von ca. $1^1/_2$%. Der Rest entfällt auf andere organische Verbindungen Ange-

Rein von der energetisch technischen Seite dem Problem nähertreten zu wollen, erweist sich schon allein auf Grund dieser Überschlagsrechnung als wenig Erfolg versprechend. Weit näher rücken wir den tatsächlichen Verhältnissen, wenn wir nicht die gebildete Trockensubstanz, sagen wir, um mit unten aufgeführter Rechnung konform zu bleiben, die gebildete Stärke, mit der ausgestrahlten elektrischen Energie vergleichen, sondern die aufgenommenen Nährsalze, die Elektrolyte.

Wie Lipperheide (34) auf Grund von Kulturversuchen von *Phaseolus vulgaris* in Cronescher Nährlösung feststellte, waren schon nach einer verhältnismäßig kurzen Versuchsdauer eindeutige Unterschiede in der Aufnahme der Nährsalze zwischen Kontroll- und Versuchspflanzen aufzuweisen. Zu Versuchsanfang wiesen Kontroll- und Versuchsgefäße äquivalente Nährsalzverhältnisse auf. Nach dem Versuch wurde von jedem Gefäße 100 ccm Nährlösung entnommen und eingedampft. In folgender Tabelle sind die gewichtsanalytisch festgestellten Rückstände angeführt:

---

nommen nun, daß durch die elektrische Bestrahlung ein Mehrertrag von 20 %, also von 50 dz Kartoffeln erzielt würde, so berechnet sich ein Mehrertrag von 1000 kg Stärke.

Machen wir nun die Annahme, daß durch die elektrische Bestrahlung ein Mehrertrag von 1000 kg Stärke pro ha erzielt worden ist, so entspricht dieser Mehrertrag einer Verbrennungswärme von $1000 \times 4000 = 4 \times 10^6$ Kalorien; daraus berechnet sich eine Arbeitsleistung von $4 \times 10^6 \times 427$ m/kg $= 1{,}7 \times 10^9$, dies in Wattstunden ausgerechnet gibt

$$\frac{1{,}7 \cdot 10^9 \cdot 9{,}8}{60 \cdot 60} = 0{,}47 \cdot 10^7 = 4700 \cdot 10^3 \text{ Wattstunden.}$$

Es wäre also durch die Elektrokultur ein Mehrertrag von $4700 \cdot 10^3$ Wattstunden erzielt worden. Wieviel Energie würde nun in Form von elektrischer Energie zugeführt? Da auf Grund der Versuche von Dr. Breslauer die durch Strahlung zugeführte elektrische Energie nur 3 Watt pro ha beträgt und man 10 Stunden lang täglich während 150 Tagen bestrahlt, so ergibt dies $3 \cdot 10 \cdot 150$ Wattstunden $= 0{,}45 \cdot 10^3$ Wattstunden. Die durch Strahlung zugeführte elektrische Energie ist also etwa 10000 mal kleiner als diejenige, welche in der Pflanze in Form von verbrennbarer Substanz während des Wachstums aufgespeichert wurde."

Blackmann ist auf Grund von Maiskulturen zu ähnlichen Ergebnissen gekommen. Einem elektrischen Energieaufwand von 15 Kalorien steht eine Trockengewichtszunahme von 9000 Kalorien gegenüber.

Versuch	Menge der nicht aufgenommenen Nährsalze	
	Kontrolle g	Versuch g
1	0,200	0,185
2	0,216	0,199
3	0,215	0,180
4	0,215	0,197

Der Unterschied in der Menge der aufgenommenen Nährsalze liegt unbedingt außerhalb einer möglichen Fehlergrenze. Quantitativ wurden die Salze weiter nicht analysiert.

Diese mehr generelle Problembehandlung führt zu einer Zweiteilung des Untersuchungsgebietes und teilt sich auf:

1. in einen elektro-biochemischen Teil,
2. in einen physiologischen Teil.

Unsere nachfolgenden Untersuchungen befassen sich mit dem unter 1. umschriebenen Stoffgebiet. Da jedoch die technische Seite des Problems noch gewisse konstruktive Aufgaben offen ließ, so erfuhren unsere Untersuchungen naturgemäß eine Erweiterung nach der technischen Seite hin.

Die stoffliche Abgrenzung für unsere Arbeiten und Untersuchungen sei daher die folgende:

1. Die Entstehung und Herkunft der Luftelektrizität und die Wahl und die technische Durchbildung der Hochspannungsquelle.

Ein kurzer Hinweis auf die Ionisatoren der Atmosphäre ist schon im Hinblick auf die Wahl der Stromquelle und Durchbildung des Luftleiters maßgebend.

2. Die Pflanze und ihr Einfluß auf die elektrische Leitfähigkeit der Atmosphäre.

Da der Pflanze die Rolle eines Konduktors zukommt, ergibt sich aus rein elektrostatischen Überlegungen, daß ihre oberflächliche Ausbildung einen maßgebenden Einfluß auf die Zerstreuung der Luftelektrizität ausübt. Bei Grannen, Haaren, Blattspitzen usw. tritt eine Verdichtung des elektrischen Feldes in Erscheinung, so daß diesen Organen im besonderen Maße die Aufgabe der Ionenfängerei zukommt.

3. Der Einfluß des elektrischen Feldes auf die Komponenten der Atmosphäre.

Diesen Untersuchungen muß besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden, denn der Chemismus der stillen elektrischen Entladungen in atmosphärischer Luft ist noch unvollkommen erforscht. Was die Feldeinwirkung auf die Komponenten der Atmosphäre, vor allem der Kohlensäure, anbelangt, sind wir kaum unterrichtet. Das Kohlensäureproblem speziell nach dieser Seite hin zu betrachten, ist auch insofern interessant, als M. D. Chouchak (5) auf Grund quantitativer Untersuchungen glaubt den Nachweis erbracht zu haben, daß beim positiven Pol an der Pflanze die Assimilation angeregt wird, da die Kohlensäure im Versuchsraum eine stärkere Abnahme erfuhr. Im weiteren ist neben der Frage der Ozonbildung vor allem die Stickstoffoxydation bei Gegenwart stiller elektrischer Entladung zu untersuchen. Daß bei genügender Intensität der stillen Entladung eine solche stattfindet, hat schon Ehrlich gezeigt, und die Bindung des Luftstickstoffes mit dem Sauerstoff bei Blitzschlägen ist allgemein bekannt. Wie in dieser Beziehung die Verhältnisse bei den ungleich schwächeren stillen elektrischen Entladungen liegen, muß erst untersucht werden.

Ein erster Hinweis auf den Chemismus der stillen elektrischen Entladung hat nach Winterstein (1) schon W. Loeb gegeben. Durch eingehende Versuche zeigte er, daß bei Einwirkung stiller elektrischer Entladung auf Kohlensäure und Wasser die Vorstufen des Zuckers entstehen. Unter ihrem Einfluß bildet sich nach Loeb aus dem Kohlendioxyd Kohlenmonoxyd und Sauerstoff.

$$2\ CO_2 = 2\ CO + O_2.$$

Das gebildete Kohlenmonoxyd reagiert unter Mitwirkung der elektrischen Entladung mit Wasser unter Entwicklung von Wasserstoff, wobei wieder Kohlensäure frei wird.

$$CO + H_2O = CO_2 + H_2$$

und der Wasserstoff verbindet sich mit dem Kohlenmonoxyd zu dem sog. Formaldehyd

$$H_2 + CO = H_2CO.$$

Damit wird also auf rein anorganischem Wege die Vorstufe des Zuckers gebildet.

4. Der Einfluß des elektrischen Feldes auf die Transpiration, die Reaktion der Pflanzensäfte und den Aschengehalt der Pflanzen.

Bei der biologisch-physiologischen Seite des Problems beschränken wir uns auf diese Hauptfragen. Die Untersuchungen über die Mineralstoffaufnahme sind dabei besonders geeignet, über die energetische Seite der Nährsalzaufnahme aufklärend zu wirken.

Eine weitere Ausdehnung der Versuche müßte uns dann zum Studium der Reizphysiologie, der Aktivierungsphänomene hinleiten, was außerhalb dem dieser Arbeit zugrunde gelegten Rahmen liegt.

5. Praktische Nutzanwendung der Elektrokultur?

Wissenschaftliche Untersuchungen, solange sie nicht zu abschließenden Ergebnissen und Ansichtsbildungen geführt haben, spekulativ auf ihre praktische Nutzanwendung hin zu deuten, bietet wenig Verlockendes. Die Praxis hat aber von jeher ein solches Interesse für die Elektrokultur gezeigt, daß es angebracht ist, sei es auch nur, um vor übereilten Versuchen und unnützen Kosten zu warnen, ihre zukünftigen Erfolgsaussichten im Rahmen unserer gegenwärtigen Erkenntnis zu besprechen. Ich komme damit auch einer Dankespflicht gegenüber der „Schweizerischen volkswirtschaftlichen Stiftung zum Studium technisch-ökonomischer Fragen" nach, die durch Bereitstellung von Mitteln unserem Institut gestattete, die Versuchseinrichtungen im notwendigen Rahmen zu schaffen.

III. Über die Entstehung und Herkunft der Luftelektrizität.

Wie schon einleitend betont, wollen wir bei unseren Versuchen keine vollständig neuen elektrischen Verhältnisse schaffen, sondern nur die schon bestehenden luftelektrischen Zustände auf eine für das Pflanzenwachstum optimale Höhe verstärken. Die Lösung dieser mehr praktischen Fragen setzt aber von vornherein ein eingehenderes Studium und Kenntnis der Ionisatoren der Atmosphäre voraus. Über das Vorhandensein der Luftelektrizität haben wir uns schon im I. Kapitel geäußert. Hier wollen wir kurz erwähnen, welchen Ursprung die atmosphärische Elektrizität gemäß heutiger Erkenntnis besitzt und welche Verteilung sie in der Atmosphäre einnimmt.

1. Die Absorption kosmischer Strahlung in der Atmosphäre und Ionisation derselben.

Bis in eine Höhe von 30 km läßt sich die Luftelektrizität mit Hilfe von Registrierballons erforschen. Wie die Verhältnisse weiter oben sind, unterliegt zum großen Teil den Mutmaßungen theoretischer Erörterungen und man ist daher auf indirekte Schlüsse angewiesen. Hier in diesen oberen und obersten Luftschichten,

in der Stratosphäre, spielen sich gewaltige energetische Umsetzungen ab, die mit intensivsten Ionisationserscheinungen zusammenfallen. Wie weit diese Vorgänge mit den elektrischen Ladungen der bodennahen Luftschichten im Zusammenhang stehen, ist noch nicht restlos geklärt. Wie Leitfähigkeits- und Potentialmessungen vom Ballon aus ergaben, scheint in der Troposphäre mit der Höhe eher eine Abnahme der Leitfähigkeit einherzugehen. So ergaben Messungen nach Simpson (45):

$\frac{dV}{dn}$ = 50—100 Volt/m	J[1]) + = 0,43	J — + 0,39
100—150	0,37	0,32
150—200	0,36	0,28
200—300	0,26	0,19
300—400	0,15	0,15
über 400	0,12	0,12

In größeren Höhen, von 3000 m an aufwärts beginnt dann als Ausdruck erhöhter Intensität der kosmischen Strahlung wieder eine Zunahme der Leitfähigkeit der Atmosphäre.

Nehmen wir, wie allgemein üblich, in größeren Höhen wie 12 km die Temperatur (— 53° C) als konstant an, so werden vertikale Luftströmungen infolge Temperaturausgleich über diese Schichtgrenze hinaus (Troposphäre-Stratosphäre) keine große Rolle mehr spielen und damit die Ionenverfrachtung als Folge von Konvektionsströmungen unwesentlich sein. Wir sind heute noch nicht in der Lage, den Anteil der in der Stratosphäre gebildeten Ionen an der Gesamtionenzahl der erdnahen Luftschichten abschließend zu beurteilen. Jedoch ist gewiß, daß die Ionisierung der obersten atmosphären Schichten durch außerterrestrische Strahlen in ihrer ganzen Mächtigkeit vonstatten geht.

Die für uns wesentlichsten Ionisatoren, die von außen her in die Lufthülle eindringen, werden wir in ihrem funktionellen Einfluß kurz charakterisieren.

aa) Das ultraviolette Spektrum.

Das ultraviolette Spektrum besitzt, wie wir aus der Natur der Strahlung schließen, besonders im Hinblick auf die Absorbierbarkeit und die tageszeitliche Verteilung, verschiedene Ursprungsquellen.

---

[1]) J = Ionenladung in 10^{-6} e. st. E. pro ccm.

Im Gegensatz zum ultravioletten Spektrum der Sonne ist die Absorption der kosmischen Strahlung verhältnismäßig gering. Ebenso ist die Intensität dieser Strahlung nach Millikan Tag und Nacht praktisch vollkommen gleich. Aus diesem Grunde erblickt er den Interzellularraum, den unermeßlichen, fast völlig leeren Raum zwischen den Sternen, als Ursprung der kosmischen Strahlung. Die Durchdringung derselben ist außerordentlich stark, da selbst eine Bleischicht von einem Meter Dicke sie nicht vollständig zu absorbieren vermag. Der gesamte ober- und unterirdische pflanzliche Lebensprozeß ist ihr restlos ausgesetzt. Über deren spezifische Beeinflussung auf das Pflanzenwachstum ist man aber noch gar nicht unterrichtet. Über die Rolle dieser nach Millikan unablenkbaren elektromagnetischen Wellenstrahlung als Ionisator der Atmosphäre läßt sich daher noch wenig aussagen.

Ganz anders das ultraviolette Spektrum der Sonne, dessen Frequenzen lange nicht an die der kosmischen Strahlung heranreichen. Schon Lenard (33) hat für die ultraviolette Strahlung der Sonne, ganz ähnlich wie für die γ-Strahlen des Radiums eine Volumionisation des durchstrahlten Gases auf Kosten der absorbierten Strahlungsenergie wahrscheinlich gemacht. Nach Mache (37) ist allerdings noch eine andere Deutung möglich, indem die beobachtete Ionisierung besonders der untersten Atmosphärenschichten nicht auf einem direkten Einfluß des Lichtes beruht, sondern vielmehr indirekt in der Weise zustande kommt, daß das Licht die in der Luft suspendierten ungeladenen Staubteilchen im Sinne des Hallwachseffektes[1]) beeinflußt. Die von den Staubteilchen ausgeschleuderten Elektronen verbinden sich mit den Molekülen des Gases zu Molionen und sind dann die negativen Träger, die Staubkerne die positiven Träger des Stromes.

Besitzen beide Erklärungen ursächliche Berührungspunkte, so kommt diejenige von Lenard den heutigen Ansichten der Physik näher.

Wie schon eingangs ausgeführt, spielt die intensive Ionisation der hohen und höchsten Luftschichten für die Leitfähigkeit in der Troposphäre voraussichtlich keine größere Rolle. Bei den geringen Geschwindigkeiten der vertikalen Luftströmungen in der Atmosphäre ist es kaum möglich, daß Luft aus diesen gewaltigen Höhen Primärladungen herunterbringt. Wir müssen vielmehr annehmen,

[1]) Vergl. S. 30 und 31.

daß die Ionen der Troposphäre einerseits vom ultravioletten Spektrum, dessen Energien allerdings in der Stratosphäre gewaltig eingebüßt haben, erzeugt werden, andererseits aber terrestrischen Ursprungs sind. Der Vollständigkeit halber müssen wir aber noch eine andere außerterrestrische Strahlung erwähnen.

bb) Korpuskularstrahlen.

Das Polarlicht wird durch die Annahme erklärt, daß elektrisch geladene Teilchen (Kathodenstrahlen, Kanalstrahlen) mit riesigen Geschwindigkeiten von der Sonne her in die Erdatmosphäre eindringen und in großen Höhen absorbiert werden (14). Abweichend von den Berechnungen von Lenard (34), der die Absorption dieser Korpuskularstrahlen in Höhen von 300 km, also in den obersten Atmosphärenschichten, in der Wasserstoffatmosphäre vor sich gehen läßt, glaubt man heute die Absorption wesentlich tiefer ansetzen zu müssen. Aus zahlreichen Messungen über die Höhe des Nordlichtes, das ja voraussichtlich seine Ursache im Zusammenprall dieser durch ungeheure Energien geladenen Korpuskeln mit den Gasmolekülen der Atmosphäre hat, können wir schließen, daß diese Strahlen in Höhen kurz oberhalb 100 km absorbiert werden. Über die Verteilung der Intensität dieser Strahlung über die Erdkugel läßt sich noch nichts Endgültiges sagen. Das häufige Auftreten der Nordlichterscheinungen an den Erdpolen läßt jedoch theoretisch eine Beeinflussung der Magnetpole der Erde und ihres Kraftfeldes auf die Richtung, die diese Korpuskularstrahlen der Sonne in ihrem Flug zur Erde hin wählen, sehr wohl erklären.

Die schon von Lemström ausgesprochene Vermutung, die trotz der kurzen Vegetationszeit außerordentlich intensiven Wachstumsvorgänge der nördlichsten Vegetationsgebiete der Erde mit Nordlichterscheinungen zusammenzubringen, ist auch heute nicht von der Hand zu weisen. Bei Behandlung des Einflusses der ionisierenden Wirkung des ultravioletten Sonnenspektrums und der absorbtiven Wirkung der Atmosphäre auf diese kürzesten Lichtwellen, muß sich die Absorption bei der Stellung der polaren Breiten zur Sonne besonders bemerkbar machen. Trotzdem die Luftsäule wegen der Rotation der Erde über den Polen weniger mächtig ist, als über dem Äquator, so ist der Weg, den die Lichtstrahlen durch die Atmosphäre zurücklegen müssen, länger. Diese beiden Einflüsse, Stellung des Ortes zur Sonne und größere Weglänge der Lichtquanten durch die Atmosphäre, reduzieren den ioni-

sierenden Einfluß des ultravioletten Sonnenspektrums für die polaren Breiten infolge Absorption viel mehr, als dies in südlicheren der Fall ist. Aus diesen Erwägungen ist daher sehr wohl die Vermutung abzuleiten, daß der ionisierenden Wirkung der Korpuskularstrahlen der Sonne für diese Gebiete ein bedeutend größerer Einfluß zukommt.

2. Terrestrische Ionisierung.

Haben wir in der kosmischen Strahlung den einen großen Ionisator unserer Atmosphäre kennengelernt, so spielen für die Ionisation, besonders der bodennahen Luftschichten, die Zerfallsprodukte der radio-aktiven Körper eine ganz hervorragende Rolle. Nach Greinacher (15) soll ein km³-Gestein ca. 5 kg Radium enthalten und daher dürfen wir die aus dem Erdboden austretenden Zerfallsprodukte, besonders der Emanation, als die anderen großen Ionisatoren der Atmosphäre betrachten. Nicht alle Mineralien sind jedoch gleichermaßen radiumhaltig. Strutt (50) hat den Radiumgehalt bei einer Anzahl von Gesteinsarten nach der Boltwoods-Methode bestimmt (Radiummengen pro Gramm Gestein in Gramm).

Eruptivgesteine.

Granit (Rhodesia)	$4{,}78 \cdot 10^{-12}$
Zirkon-Syenit (Norwegen)	$4{,}65 \cdot 10^{-12}$
Syenit (Ägypten)	$1{,}22 \cdot 10^{-12}$
Pechstein (Obsidian)	$1{,}03 \cdot 10^{-12}$
Dolerit (Insel Canna)	$0{,}62 \cdot 10^{-12}$
Basalt (Viktoriafälle)	$0{,}63 \cdot 10^{-12}$

Sedimentgesteine.

Oolith (Bath)	$2{,}92 \cdot 10^{-12}$
Ölführender Sandstein (Galizien) . .	$1{,}52 \cdot 10^{-12}$
Gault-Ton (Cambridge)	$10{,}1 \cdot 10^{-12}$

Im Mittel weisen die untersuchten Gesteine eruptiven und sedimentären Ursprungs $1{,}1 \cdot 10^{-12}$ bis $1{,}7 \cdot 10^{-12}$ Gramm Radium auf. und diese Werte sind etwas niedriger als die von Greinacher.

Sinkender Barometerstand erhöht die Leitfähigkeit, da mehr Emanation aus der Erde heraustritt. Sehr hohe Ionendichten erhalten wir z. B. in stagnierender Kellerluft. Neben diesen Zerfallsprodukten des Radiums kommt am Gesamtionengehalt der Atmosphäre auch denjenigen der anderen ca. 40 radio-aktiven

Körpern, wie Thorium, Uran, Polonium u. a., ein bedeutender Anteil zu. Der Träger der radio-aktiven Wirkung in der Luft, die Emanation, wurde erstmals von Elster und Geitel festgestellt. Sie wiesen nach, daß sich die positiv geladenen Zerfallsprodukte dieser Emanation auf negativ geladenen, in der Luft frei aufgestellten Körpern sammeln ließen. In gleicher Weise wirkt die negative Erdladung an Stelle hohen Potentialgefälles. So zeigt jeder Baumwipfel, jeder Getreidehalm und jede Granne einen Belag von radio-aktiver Induktion.

Leider fehlt es noch sehr an gleichzeitigen Messungen des Gehaltes der Atmosphäre an radio-aktiven Stoffen und andern freien Ionen. Anschließend bedarf auch die Influenzwirkung verschiedener Luftströmungen, das Zerspritzen von Wasser usw. als Ionisatoren der Atmosphäre der Erwähnung. Werden diese letzteren überwiegend mit negativen Ionen beladenen Träger (Wasserdampf, Staub) und das mit einem Überschuß positiver Ionen versehene Gas räumlich getrennt, so entstehen freie Ladungen, die unter Umständen zu so großen Spannungsdifferenzen führen können, daß es zu optisch sichtbaren Entladungserscheinungen kommt (Blitz).

Vollständigkeitshalber sei auch noch kurz auf den Hallwachs-Effekt oder lichtelektrischen Effekt hingewiesen. Hallwachs stellte unter dem Einfluß des Lichtes fest, daß gewisse Körper negative Ladungen mehr oder weniger rasch verlieren, wobei positive Ladungen haften bleiben. Elster und Geitel fanden dann an einer Reihe zum Teil sehr verbreiteter Mineralien, so an Kryolit, Schwerspat, Cölesterin, Aragonit, Stronzianit, Kalkspat, Feldspat, Granit, deutliche Spuren lichtelektrischer Wirkung. Die Ursache dieser photoelektrischen Zerstreuung ist das kurzwellige Sonnenspektrum.

3. Wiedervereinigung, Anlagerung und Zerstreuung der Ionen.

Der Ionisationszustand der Atmosphäre ist nicht allein eine Funktion der Ionenbildung. Er wird besonders durch die Wiedervereinigung (Molisierung) von positiven und negativen Ladungen, die Anlagerung (Adsorption) von Ionen an neutrale Moleküle oder Molekülgruppen und die Zerstreuung (Diffusion) der Ionen mitbestimmt. Es bildet sich auf Grund dieser Vorgänge ein verhältnismäßig stationärer elektrischer Zustand der Atmosphäre heraus, der allerdings täglichen und jahreszeitlichen Schwankungen

unterliegt. Hölzel (20) gibt für den jährlichen Verlauf des Potentialgefälles folgende Charakteristik (1914):

Jan.	März	Mai	Juni	Juli	Sept.	Nov.	Dez.	
356	372	121	104	167	173	252	281	Volt/cm

Mittel für Monate Dez. Jan. Febr. 319 Volt/cm
„ „ „ Mai Juni Juli Aug. 142 Volt/cm

Aufschlußreich ist ebenfalls der Verlauf des täglichen Potentialgefälles (19). Ich wähle dabei die Monate intensivster Vegetation heraus (1913):

Zeit in h:	1 h	3 h	5 h	7 h	9 h	11 h	13 h	15 h	17 h	19 h	21 h	23 h
Mai	74	75	89	127	172	140	123	114	119	141	132	133
Juni	96	69	89	139	150	136	99	97	84	78	105	112
Juli	139	126	137	168	252	208	174	143	134	142	175	173

Es ergibt sich für den täglichen Verlauf des Potentialgefälles eine einfache harmonische Periode mit einem Morgenminimum zwischen 3 und 5 Uhr und einem Hauptmaximum zwischen 10 und 12 Uhr. Aus obiger Tabelle läßt sich allerdings noch eine zweite Welle herauslesen mit einem flachen Nachmittagsminimum und einem kleinen Abendminimum. Hölzel führt diese zweite Welle auf die in den Nachmittagsstunden stärker auftretende Dunst- und Rauchentwicklung in der Atmosphäre zurück, wodurch der normale Gang im Potentialgefälle gestört wird.

Nach Mache hat schon Exner auf die Zusammenhänge zwischen Potentialgefälle und Dunstdruck hingewiesen und folgende gesetzmäßige Beziehung zwischen diesen beiden Größen gefunden:

$$\frac{dV}{dh} = \frac{a}{1 + b\,e'}$$

worin nach seiner Beobachtung a = 1410 und b = 1,15 zu setzen ist.

Darauf, daß Bewölkung, Regen und Gewitter die luftelektrischen Verhältnisse von Grund auf ändern, ist schon früher hingewiesen worden. Die Messungen, die zu obigen Tabellen führten, erfolgten nur an schönen Tagen.

IV. Die Wahl und technische Durchbildung der Hochspannungsquelle.

Professor Jaccard hat die Voraussetzungen, die der heutige Stand der Elektrokultur an die Stromquelle stellen zu müssen glaubt, in drei seiner Veröffentlichungen (23) näher umschrieben. In einer Abhandlung (21) wurde besonders zu den den praktischen Landwirt interessierenden Fragen Stellung genommen und die Erfolgsaussichten für die Praxis näher gewürdigt. Dabei wurde auch besonders die Technik der Kulturgestaltung näher behandelt.

Indem wir auf obige Publikationen verweisen, dürfen wir uns an dieser Stelle kurz halten und gestatten uns, nur ein knappes Resumé über die Methode zu geben, nach der wir für die ganze Dauer der Versuche die hochgespannten Ströme erzeugten. Bei der Wahl der Betriebsapparatur haben wir folgende Leitgedanken zugrunde gelegt (22):

1. Der Apparat mußte in erster Linie wissenschaftlichen Versuchen genügen. Dies bedingte, daß er bei den verschiedensten äußeren Bedingungen — wechselnder Luftfeuchtigkeit usw. — absolut konstant arbeitete, so daß luftelektrische Messungen vergleichbare Resultate lieferten.

2. Die Versuche besitzen aber nicht nur rein wissenschaftliches Interesse, sondern sie sollen daneben auch als Wegleitung dienen, um die Elektrizität als Förderungsfaktor in die Landwirtschaft einzuführen. Um die nötigen Voraussetzungen zu schaffen, muß der Apparat und die Anwendungsmethode ökonomisch arbeiten und die Bedienung muß dem Laien überlassen werden können.

3. Die Anlagekosten dürfen seiner praktischen Nutzanwendung nicht hinderlich sein.

4. Wahl des Apparates und seine Arbeitsweise.

Die Energietransformation erfolgt nach einer neuzeitlichen Methode. Da die elektrische Energie zur Hauptsache nur zur Erzeugung und Unterhaltung eines Feldes gebraucht wird, wird jede Apparatur, die mit großem inneren Energieaufwand arbeitet, die Wirtschaftlichkeit entscheidend beeinflussen. Ich nenne hier den relativ großen Energieverbrauch aller rotierenden Umformer, auch das Laden von Akkumulatorenbatterien mit verhältnismäßig großen Anlage- und Amortisationskosten. Alle diese Systeme verbrauchen ein Vielfaches der hier zur Nutzanwendung gelangenden elektrischen Energie zur Überwindung von Reibungswiderständen und anderer ins Gewicht fallender Verluste elektrischer Natur.

Verzinsung großer Anlagekosten, Unterhalt- und Wartespesen sind von entscheidendem Einfluß bei der Rentabilitätsberechnung.

Unsere Wahl fiel auf einen Glühkathodengleichrichter, der in den letzten Jahren besonders in der Radiotechnik weite Verbreitung erfuhr. Über die physikalischen Grundlagen, die seiner Arbeitsweise zugrunde gelegt sind, können wir uns kurz fassen; ich verweise hier auf das Handbuch der Radiologie von Marx. Wir treten hier nur soweit auf die Mechanik der Elektronenverdampfung und des Gleichrichtereffektes ein, als dies zur Erklärung des für unsere Zwecke konstruierten Hochspannungsgleichrichters notwendig ist.

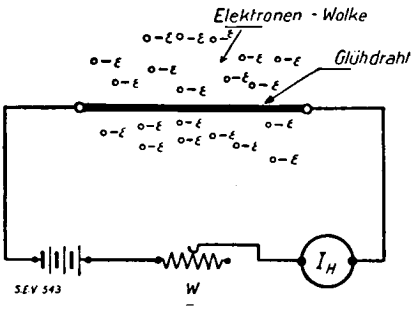


Abb. 1.

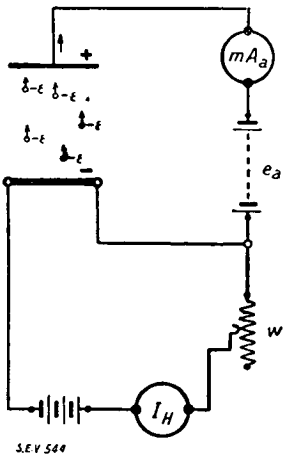


Abb. 2.

Bekanntlich sind die Träger der Elektrizität, die frei im Kristallgitter des Leiters umherwandern, Elektronen. Bei gewöhnlicher Temperatur können die Elektronen die Oberfläche des Leiters nicht verlassen, da sie bei der geringen ihnen innewohnenden kinetischen Energie immer wieder durch die Influenzwirkung zum Leiter zurückgezogen werden. Der Glüheffekt führt nun zu einem Verdampfen der Elektronen, die sich in einer Wolke um den Glühdraht herum anordnen (Abb. 1). Die Menge der emittierten Elektronen hängt von der Temperatur des Glühdrahtes ab. Diese wird durch einen sich im Heizstromkreis befindenden, veränderlichen Widerstand reguliert und zweckmäßigerweise durch ein Ampèremeter kontrolliert. Die Elektronen als Träger negativer Elektrizität fliegen im Potentialgefälle von der Glühkathode zur Anode (Abb. 2). Ist die Spannung konstant und genügend hoch, so wächst der durchfließende Strom i_a mit der Glühdrahttemperatur, die durch den Heizstrom I_H reguliert wird. Diese Regulierbarkeit gestattet

eine sehr ökonomische Handhabung des Apparates. Diese Abhängigkeit der Stromamplitude ist durch Abb. 3 dargestellt. Die Betriebsart einer Glühkathodenröhre läßt ohne weiteres die Gleichrichterwirkung einer solchen Röhre erkennen. Die Netzspannung, im vorliegenden Fall 110 Volt Wechselstrom, wird durch einen Transformator auf 2200 Volt gespannt. Die Frequenz beträgt 50 Perioden pro Sekunde. Bei Benützung nur einer Röhre wird nur der Stromimpuls ausgenützt, der mit negativem Vorzeichen an der Kathode liegt. Damit jedoch beide Stromimpulse einer Periode ausgenützt werden, wird der zweite umgekehrt und dem vorher-

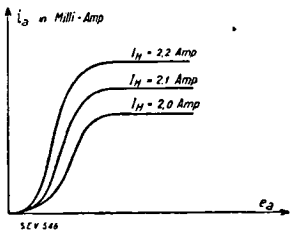


Abb. 3.

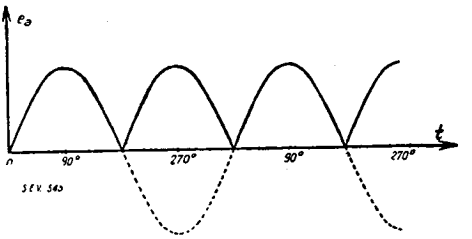


Abb. 4.

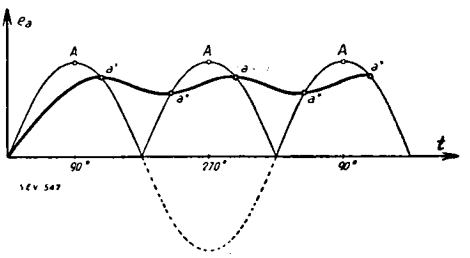


Abb. 5.

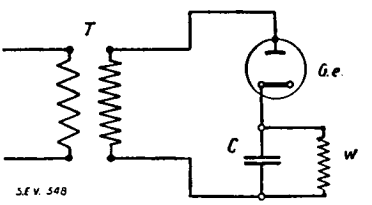


Abb. 6.

gehenden nachgeschickt. So entsteht ein pulsierender Gleichstrom mit voller Stromausnützung (Fig. 4). Dieser reine pulsierende Gleichstrom besitzt die Eigenschaft, 100 mal in der Sekunde das Potentialgefälle von 0—2000 Volt zu durchlaufen. Dieses Wechselfeld mit gleichem Vorzeichen muß ausgeglättet werden, so daß die Spannung in Funktion der Zeit, dem Idealfalle möglichst nahe kommt, d. h. konstant bleibt. Dies wird vor allem durch Einschalten von Kondensatoren parallel zum elektrischen Feld erreicht (Abb. 5). Während der Dauer der Spannungszunahme ladet sich der Kondensator C (Abb. 6) auf und erreicht in a', dem Schnittpunkt mit der Spannungskurve des Transformators, seinen höchsten Wert. Jetzt möchte sich der Kondensator durch die

Röhre entladen, doch hier kommt ihre Ventilwirkung zur Geltung. Eine Entladung des Kondensators ist nur durch das Feld möglich und hat zur Folge, daß die über ihm liegende Spannung sinkt (Abb. 6, Feld als hochohmiger Widerstand W angegeben). Die Entladung beginnt in a′ und dauert bis zu dem Moment, wo das wieder ansteigende Potential der Wechselspannung mit der über dem Kondensator liegenden Spannung den gleichen Wert erreicht, in a″. Die Amplitudenschwankung wird um so geringer, je größer

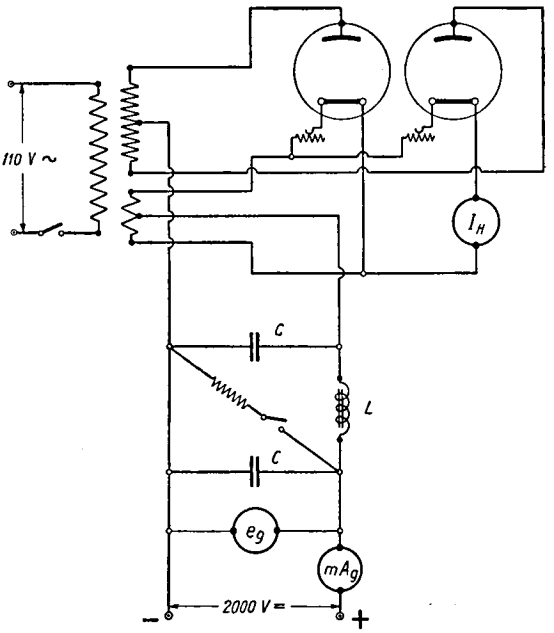


Abb. 7.

C bei konstantem i_a gewählt wird. Bei dem geringen Stromverbrauch ist die Schwankung sehr gering. Die prozentuale Spannungsschwankung ist annähernd (13):

$$dV = 100 \frac{2T}{T + \frac{V}{i} \cdot C}$$

T = Dauer der Periode
C = Ausgleichskapazität
V = Spannung
i = Entladestrom.

5. Technische Durchführung. Der Kerntransformator, für Dauerbetrieb dimensioniert, besitzt neben einer Sekundärwicklung für die Hochspannung eine zweite zur Entnahme des Heizstromes.

Dies hat den Vorteil, die gleiche Stromquelle für Heizung und Feld benützen zu können. Die Wechselstromheizung bietet auch noch den Vorteil, daß der Glühdraht gleichmäßiger beansprucht wird. Zur Glättung des gleichgerichteten Stromes gelangt ein System von Kapazitäten C und Selbstinduktion L zur Anwendung. Zur Überwachung des Gleichstromes dienen Präzisionsvolt- und Milliampèremeter. Um das Bedienungspersonal oder Drittpersonen nach Schluß der Bestrahlung nicht zu gefährden, werden die Kondensatoren über einem hochohmigen Widerstand entladen. (Schaltung siehe Schema Abb. 7). Alle Apparate befinden sich in einem Gestell aus Eisen, das durch Eternitplatten staubfrei abgeschlossen ist. Die Frontplatte aus Hartgummi trägt die Schaltinstrumente mit den beiden Ampère- und Voltmetern. Die Stromentnahme geschieht von oben mittels Durchführungsisolatoren. Abb. 8 zeigt eine Ansicht des Apparates.

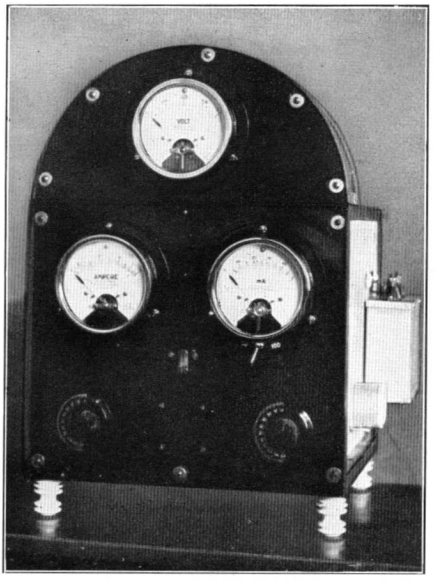


Abb. 8.

Im Laufe unserer mit diesem Apparat ausgeführten Versuche ergab sich jedoch die Notwendigkeit, größere Spannungen zu Hilfe zu nehmen. Wie wir im folgenden Abschnitt im einzelnen darlegen werden, zeigt es sich besonders bei größeren Versuchsanordnungen als unzweckmäßig, den Elektrodenabstand auf nur 2—3 cm ansetzen zu dürfen, um überhaupt noch eine genügende Ionisation der Atmosphäre zu erhalten. Bei Cerealien z. B. liegt derselbe noch in der mittleren Abweichung des Zuwachses der einzelnen Keimlinge, und die Folgen sind Verbrennungen an den längsten Blattspitzen. Auch wenn der Luftleiterabstand täglich neu eingestellt wurde, konnte man kaum um derartige Verbrennungen herumkommen. Der kurze Elektrodenabstand führte im weiteren zum Auftreten des Ionenstoßes an den Pflanzen mit seinen für ein ungestörtes Pflanzenwachstum schädlichen Folgen (vergl. Kap. V).

Die Herstellung eines neuen Hochspannungsgleichrichters wurde daher zur Notwendigkeit, wobei gegenüber der früheren Konstruktion wesentliche Vereinfachungen möglich wurden. Die maximale Gleichspannung beträgt jetzt 20000 Volt. So zeigte es sich als belanglos, ob wir eine oder beide Halbperioden des Wechselstromes ausnützen. Ein etwas größerer Kondensator überbrückt bei der ohnehin nur geringen Leistungsausnützung der von der Glühkathodenröhre gelieferten Gleichstromenergie mit Leichtigkeit

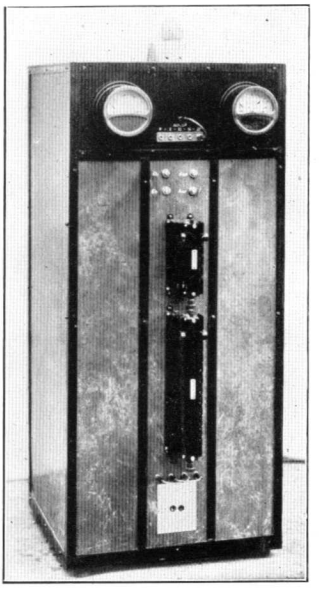


Abb. 9.

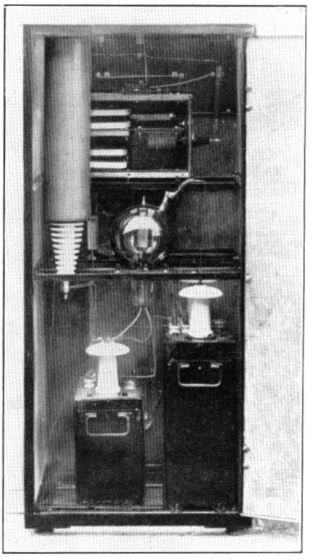


Abb. 10.

den Spannungsabfall während der Zeitdauer, da die positive Amplitude der Wechselspannung am Glühdraht liegt. Damit lassen sich besonders für den Betrieb nicht unerhebliche Ersparnisse erzielen, so braucht nur die Amortisation einer Ventilröhre in Rechnung gestellt zu werden. Bei diesen hohen Spannungen fällt ihr Anschaffungspreis. der zwischen 150 und 200 Franken liegt, erheblich ins Gewicht. Aber auch der innere Arbeitsaufwand, der in Form von Heizenergie verbraucht wird, verringert sich damit um die Hälfte[1]). Der Anteil der Heizungsenergie, der für eine Lampe

[1]) Bei den im Sommer 1932 durchgeführten Terrassenversuchen gelangte eine ausgediente Coolige-Röntgenröhre als Gleichrichter zur Verwendung, die für unsere Zwecke einwandfrei arbeitete.

100 Watt beträgt, ist auch bei reichlicher Berechnung der Isolationsverluste auf der Hochspannungsseite 5—10 mal größer als die bei 20000 Volt verbrauchte Hochspannungsenergie, die in elektrische Strahlungsenergie umgesetzt wird.

Auf Grund dieser Überlegungen entstand der im Bild wiedergegebene Hochspannungsgleichrichter. Die Sekundärspannungen können innerhalb 4—20000 Volt bei einem Entladestrom von 5 Miliampère beliebig gewählt werden. Ebenso mußte den herrschenden Spannungsverhältnissen des stadtzürcherischen Lichtnetzes entsprechend der Primärkreis für die Spannungen 110 und 220 Volt gebaut werden.

Um trotz den relativ hohen Sekundärspannungen die Bedienung möglichst gefahrlos zu gestalten, wird der Apparat mittels Niederspannungsrelais betätigt.

V. Die Pflanze und ihr Einfluß auf die Leitfähigkeit der Atmosphäre.

Wir haben uns schon in Kap. I „Luftelektrizität und Pflanzenwachstum" über die Abhängigkeit der Intensität des Vertikalstromes $i = d\frac{dV}{dH}$ näher ausgesprochen. Dieser ist eine Funktion der Feldstärke und der Leitfähigkeit der Atmosphäre. Wie zahlreiche Messungen früherer Forscher ergaben, haben in normalen Fällen mit einem luftelektrischen Vertikalstrom von 1,5 bis $2{,}0 \times 10^{-16}$ Amp./cm^2 zu rechnen. Diese Zahl stellt einen Durchschnitt dar und trägt dem naturbedingten Formenreichtum der oberirdischen Pflanzenorgane in ihrer Eigenschaft als Elektrizitätszerstreuer keine Rechnung. Die Haare, Blattspitzen, Grannen usw. begünstigen bekanntlich gewisse physikalische Effekte, die rückwirkend den pflanzlichen Energiehaushalt und Stoffumsatz beeinflussen.

Unsere diesbezüglichen Untersuchungen werden sich im folgenden mit der Frage der Pflanze und ihrem Einfluß auf die Leitfähigkeit der Atmosphäre befassen und zwar sowohl bei normalen luftelektrischen Verhältnissen, als ganz besonders in Gegenwart eines künstlich erzeugten elektrischen Feldes.

Die lokale Stromdichte des Vertikalstromes hängt naturgemäß von der Ausbildung der Elektroden ab. Diese werden dargestellt durch die Pflanze als Kathode und den als Ionenzerstreuer über den Pflanzen aufgehängten Luftleiter als Anode. Bei sonst gleicher

Feldspannung kann die künstliche Ionenproduktion überhaupt null oder bei Eintritt stiller elektrischer Entladung, als Folge der Spitzenwirkung, ganz gewaltige Beträge erreichen. Die Intensität der Entladung hängt bei unseren Versuchen einerseits von der Feldstärke als variable Größe und andererseits von der Spitzenschärfe der Ionenzerstreuer, ausgedrückt durch den Öffnungswinkel φ der Spitzen, ab.

Gelangen an Stelle der Spitzen Sprühdrähte zur Verwendung, so ist die Ionenzerstreuung von dem Radius ϱ des Sprühdrahtes sowie seiner Länge abhängig. Die Townsendsche Theorie liefert für die Abhängigkeit des Entladestromes i von der Entladungsspannung V die Beziehung (51 und 52)

$$V - V_0 = \frac{i \cdot A^2 \cdot \ln \frac{A}{(\varphi)}}{2 \cdot v \cdot V_0}.$$

V_0 ist die kritische Spannung, v die Ionenbeweglichkeit, A der mittlere Elektrodenabstand.

Die Durchführung der Versuche erfolgte in der Weise, daß wir mit verschiedenen Pflanzen unter Änderung des $\frac{dV}{dh}$ den Vertikalstrom i bestimmten. Als Meßinstrument diente ein Elster-Geitelsches Blattelektrometer. Die Eichung erfolgte nach der Methode von Lutz (35), nur daß der Einfachheit halber zur Erzeugung der Hilfspotentiale an Stelle eines bekannten Widerstandes eine Akkumulatorenbatterie Verwendung fand. Die Eichung verfolgte von Anfang an nicht den Zweck, für die späteren Messungen absolute Werte errechnen zu können, sondern uns jenes Skalenteils des Elektrometers zu vergewissern, welche eine lineare Charakteristik aufweist. Die Eichkurve war, soweit sie für die Messungen in Betracht kam, eine Gerade, mit mehr oder weniger Steigung, je nach der Größe der angewandten Kompensationsladung.

Für unsere Versuche spielen absolute Werte eine untergeordnete Rolle, da sie ja in erster Linie Vergleichen unter sich zu dienen haben. Wir rechnen daher beim praktischen Versuch mit dem Skalaausschlag pro Minute.

1. Durchführung der Versuche.

Über die Versuchsanordnung verweise ich auf die schematische Skizze in Abb. 11. Die Feldrichtung blieb dauernd dieselbe, d. h. der Luftleiter wies gegenüber der Pflanze eine positive Ladung

auf. Als Anode diente ein quadratisches Drahtnetz von 16 cm Seitenlänge und einer Maschenweite von 3 mm. Es wurden 4 Parallelversuche nach der gleichen Anordnung im Laboratorium des Institutes durchgeführt. Der Unterschied lag in der verschiedenen Wahl der Kathode:

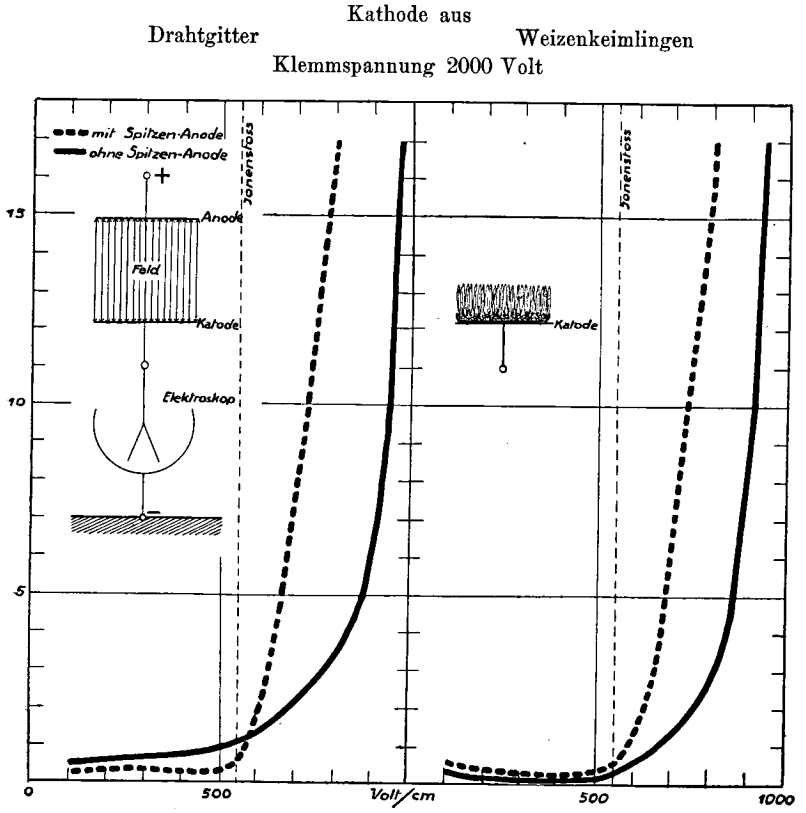


Abb. 11. Stromfluß im elektrischen Feld als Funktion des Elektrodenabstandes.

1. Kathode aus einem Drahtgitter der Anode entsprechend.
2. Kathode aus 40 Weizenkeimlingen in einer Petrischale 4—6 Tage vorgekeimt, ca. 6 cm hohe Keimblätter.
3. Kathode aus 40 abgeschnittenen Gerstenähren, in ein mit Wasser angefülltes Becherglas gestellt.
4. Kathode aus 40 abgeschnittenen Weizenähren, in ein mit Wasser angefülltes Becherglas gestellt.

Versuch a: Die Anode besteht aus dem oben beschriebenen verzinkten Drahtgitter.

Versuch b: Die Anode wie a, jedoch mit 25 Spitzen versehen. Öffnungswinkel φ der Spitzen 2—3 Bogengrade.

Jedem Versuch vorangehend wurde der Isolationsgrad des Elektroskopes gemessen. Um übereinstimmende Vergleiche zu erhalten, erfolgten die Isolationsmessungen mit aufgesetztem Draht-

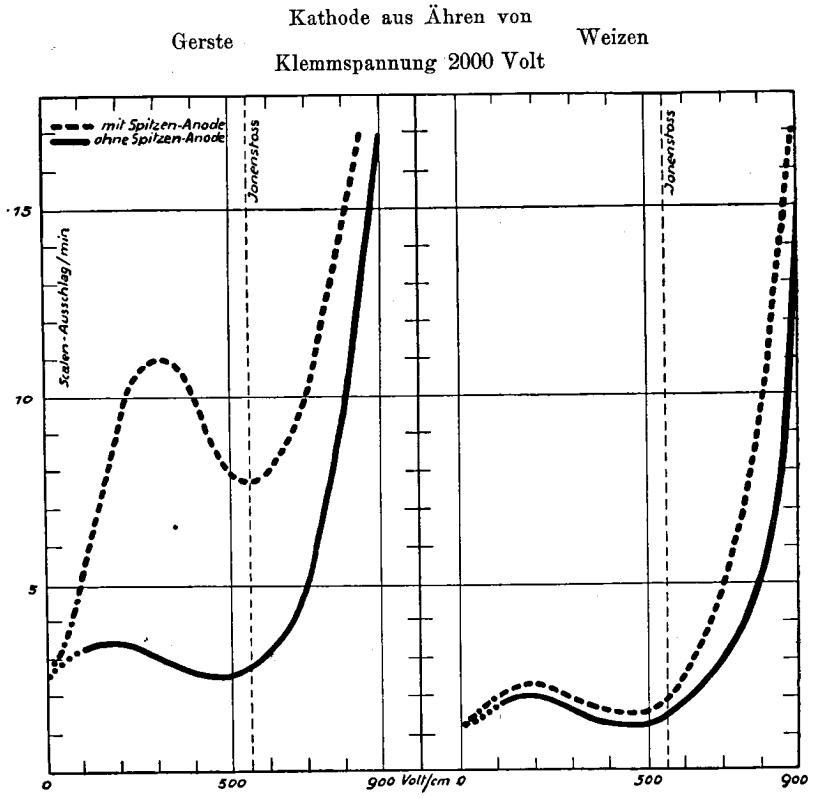


Abb. 12. Stromfluß im elektrischen Feld als Funktion des Elektrodenabstandes.

gitter. Der Ladungsverlust betrug durchgehend 0,2 Skalenteile/Minute. Dann erfolgte das Aufsetzen der Versuchspflanzen und die Messung der Zerstreuungsverluste nach vorherigem Aufladen des Systems mit negativer Elektrizität (Ebonitstab). Dieser Ladungsverlust ist in den Meßtabellen aufgeführt. Bei den eigentlichen Versuchsmessungen mit angelegter Spannung messen wir nicht den Ladungsverlust, sondern den Vertikalstrom als Funktion des zunehmenden Skalenausschlages. Die erhaltenen Werte sind in den Abb. 11 u. 12 aufgezeichnet.

Der Verlauf der Kurvenbilder ist nicht ohne weiteres verständlich und bedarf einer näheren Erläuterung.

Wir betrachten zuerst das Gemeinsame. Der Stromdurchgang — mit und ohne Spitzen an der Anode — weist den nämlichen Verlauf auf bis zu dem Punkte, wo die Ionen anfangen zu stoßen, was bei unserer Versuchsaufstellung übereinstimmend bei 530 Volt/cm eintritt. Die b-Kurven lassen diesen Punkt deutlich erkennen. Bei den a-Kurven, ohne Spitzen, hinkt der Strom um 100—300 Volt/cm hinter der b-Kurve nach. Der Grund liegt in der Oberflächenausbildung des verzinkten Drahtnetzes, das mikroskopisch kleine Spitzen aufweist, die sukzessive, je nach ihrer Schärfe als Ionenzerstreuer in Erscheinung treten.

Als weitere auf den ersten Blick unerklärliche Tatsache darf der Verlauf der Kurven überhaupt angesehen werden. Es sei daher erneut darauf hingewiesen, daß derselbe nicht nur allein von der Spannung pro cm abhängt, sondern auch vom Raum, der zwischen der Kathode und Anode liegt. Und zwar spielt der Konduktorabstand in zweifacher Hinsicht eine bestimmende Rolle:

1. Bevor das Phänomen der Spitzenwirkung auftritt und der Ionenstoß in Erscheinung tritt, kommen zur Elektrizitätsleitung einzig die freien Ionen der Atmosphäre in Betracht. Diese fliegen im elektrischen Feld zu den Konduktoren hin und entladen sich. Innerhalb der Grenzen, die im vorigen Kapitel erwähnt wurden, besitzt die normale Leitfähigkeit der Atmosphäre, also die Ionenzahl pro ccm, eine gewisse Konstanz und damit hängt die Stromintensität vor allem von dem Raum ab, der vom elektrischen Feld bei entsprechender Spannung eingeschlossen wird. Da bei der Kurvenaufnahme die Spannungsänderung durch Verschieben des Elektrodenabstandes erfolgt, so muß nach anfänglichem Steigen ein Sinken der Stromintensität eintreten, wie dies besonders schön bei der Kurve der Weizenkeimlinge zu sehen ist.

2. Der Verlauf der Kurvenbilder bei den Weizen- und Gerstenähren weist nun insofern eine interessante Charakteristik auf, als wir hier mit intensiven unselbständigen Gasentladungen rechnen müssen. Die Zunahme der Stromintensität wird u. E. dadurch bewirkt, daß die aus den negativ geladenen Grannenspitzen ausströmenden Elektronen auf ihrem Weg zur Anode die Gasmoleküle ionisieren und neue Elektronen befreien. Die Folge ist eine beträchtliche Zunahme des Gesamtstromes. Wohl steigt mit zunehmendem Potentialgefälle die Sprühentladung. Bei unserer Ver-

suchsanordnung ist die Elektrodenspannung konstant und die Erhöhung des Spannungsgefälles wird ausschließlich durch Verkürzen des Abstandes zwischen Luftleiter und Pflanze erreicht. Proportional mit der Verkürzung des Elektrodenabstandes verringern wir aber gleichzeitig das eingeschlossene Luftvolumen. Daher tritt bei einem Punkt, der bei den letzten beiden Kurvengruppen mit ihrem ersten Strommaximum zusammenfällt, der Moment ein, wo die Sprühentladung wohl weiterhin zunimmt, die unselbständige Gasentladung infolge Kleinerwerden des Luftraumes aber derart abfallende Werte annimmt, daß der Gesamtstrom trotz zunehmendem Potentialgefälle zurückgeht. Erst das Einsetzen des Ionenstoßes bringt den Kurvenverlauf zur Umkehr. Dieselben Beobachtungen gelangen uns auch bei den ersten Versuchen, wo die Kathode aus einem Drahtgitter bestand. Nur glaubten wir, nicht darauf bauen zu dürfen, da die erhaltenen Messungen innerhalb des normalen Fehlerbereiches lagen. Erst die Fortsetzung unserer Versuche mit den Ähren brachte dann die Bestätigung, daß die Abweichung anderen Ursprungs war.

Läßt man den Elektrodenabstand konstant und stellt den Feldstrom i als f (e) dar, so erhalten wir folgende Stromcharakteristik:

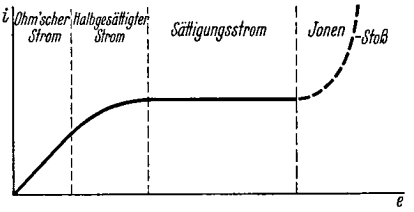


Abb. 13.

Diese stimmt unter Berücksichtigung des über den Einfluß des Konduktorabstandes Gesagten mit unseren beiden ersten Kurvengruppen überein, wenn wir berücksichtigen, daß bei unseren Versuchen die Verstärkung der Feldintensität durch Verkürzen des Elektrodenabstandes erreicht wurde, wogegen beim obigen Diagramm die Klemmspannung e die Variable darstellt.

Die Auslösung der Spitzenwirkung ist nicht allein eine Funktion der Spitzenschärfe und der Feldstärke, sondern des Elektrodenabstandes (Pflanze-Luftleiter). Die Intensität der Zerstreuung nimmt dabei mit dem Quadrate der Entfernung ab.

Die uns für diese Versuche zur Verfügung stehenden Spitzen waren in ihrer Schärfe insofern etwas ungünstig gewählt, als Ionen-

stoß und Spitzenentladung am positiven Pol fast zur nämlichen Zeit eintrat, und die beiden Phänomene sich in ihrer Auswirkung auf den Stromfluß überdeckten. Wir haben daher anschließend die Frage der Auslösung der Ionenzerstreuung aus den positiv aufgeladenen Spitzen im Hinblick auf die Ausbildung des Luftleiters noch besonders untersucht. Es gelangten dabei weniger Spitzen als Platindrähtchen verschiedenen Durchmessers in ihrer Eigenschaft als Elektrizitätszerstreuer zur Untersuchung.

So übereinstimmend der weitere Verlauf aller Kurvenbilder im Gebiete der eigentlichen Stoßionisation ausfällt, so verschieden ist die Charakteristik im Gebiete kleinerer Feldspannungen zwischen 0 und 550 Volt/cm. Der Verlauf der beiden ersten Kurvengruppen scheint in diesem Gebiete überhaupt nichts Gemeinsames mit den Gersten- und Weizenkurven aufzuweisen. Und letztere wiederum besitzen wohl die nämliche Charakteristik, wobei die Gerste bedeutend stärkere Ausschläge zeigt. Diese Unterschiede lassen sich nur auf die spezifische Wirkung der Grannen und ihrer Form zurückführen, stimmt doch die Ährenzahl bei beiden überein.

Verbinde ich das Elektrometer mit den ausgezeichnet gegen die Erde isolierten Versuchspflanzen und lade dieselben mit einem Ebonitstab auf das nämliche Potential auf, so verhalten sich die gefundenen Entladegeschwindigkeiten der 6 Tage alten Gerstenlinge : den Weizenähren : den Gerstenähren = 1 : 6 : 12. Diese Beziehungen sind sehr auffallend. Ohne dieses Resultat allzu spekulativ zu deuten, könnte man annehmen, daß die kurze Vegetationszeit der Gerste — Hochgebirge, nördliche und südliche Gerstenzone — in Verbindung mit diesem luftelektrischen Verhalten in irgendwelchem Zusammenhang steht. Obwohl die Weizengranne an und für sich in eine feinere Spitze ausläuft als die Gerstengranne, so ist letztere bedeutend länger und weist einen weniger groben Bau auf. Anderseits wies der Aschengehalt aus Weizengrannen 85,2% CaO und 2,4% SiO_2 der Gesamtasche auf, während bei den Gerstengrannen 81,2% CaO und 4,6% SiO_2 der Gesamtasche ausmachte. Nur lieferte die Veraschung lufttrockener Gerstengrannen vier- bis fünfmal mehr Aschenbestandteile, so daß der Mineralstoffgehalt bedeutend größer ist als bei entsprechenden Mengen Weizengrannen. Ob wir den verschiedenen Einfluß der Ionenzerstreuung mit der Ausbildung der Grannen und ihrem Mineralstoffgehalt in Verbindung bringen dürfen, ist allerdings noch eine offene Frage. Möglicherweise kommt den Grannen-

spitzen eine gewisse Rolle als Kondensationspunkte für radio-aktive Stoffe zu. Ein Moment, auf das wir schon in Kap. III bei Behandlung der terrestrischen Ionisierung hinwiesen.

Um das Einsetzen der Spitzenwirkung rein physikalisch zu studieren, haben wir mit unserem neuen Hochspannungsgleichrichter diese Verhältnisse an Sprühdrähten verschiedener Dicke 0,01 mm; 0,02 mm; 0,05 mm untersucht. Dieselben wurden in der Achse eines Metallzylinders von 4 cm Radius gegen denselben isoliert angebracht. Zur Aufnahme der Strom-Spannungscharakteristik diente ein Elektrometer mit einem Meßbereich bis zu 10^{-6} Amp.

Positiver Pol am Sprühdraht.

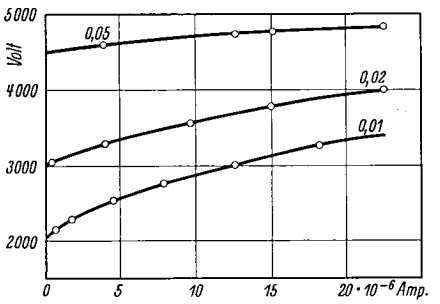


Abb. 14.
Strom-Spannungscharakteristik.

Negativer Pol am Sprühdraht.

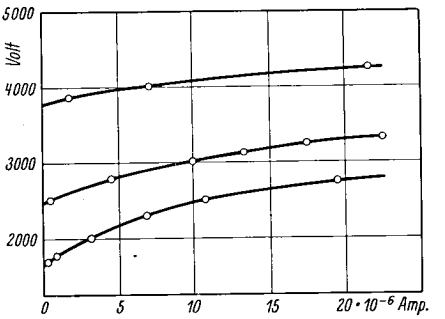


Abb. 15.
Strom-Spannungscharakteristik.

Im dunkeln Versuchsraum zeigte die positive Entladung eine gleichmäßige, den Draht umschließende Glimmschicht, die bei der negativen Entladung sich in einzelne Glimmpunkte auflöste. Die einzelnen Meßpunkte schwanken um diese, durch die Kurven dargestellten Stromspannungslinien.

2. Schlußfolgerung.

Wie können wir nun diese Versuchsergebnisse für die Elektrokultur auswerten? Für die Technik der Elektrokultur sind unstreitig die beiden letzten Versuchsgruppen mit den Gersten- und Weizenähren am aufschlußreichsten. Sie bringen den Beweis, daß die epidermale, oberirdische Ausbildung der Pflanzenorgane für die Erhöhung der Leitfähigkeit von ausschlaggebendem Einfluß ist. Der natürliche Ionisationsgrad, der die Pflanze unmittelbar umhüllenden Atmosphäre ist dabei je nach Ort, Alter und Ausbildung der Organe verschieden. Der optimale Ionisationszustand der

Atmosphäre im elektrischen Feld wird zu einem wesentlichen Teil von der Intensität der Ionenbildung abhängig sein. Sobald Ionenstoß eintritt, vervielfacht er sofort die Leitfähigkeit der Luft. Er führt aber in der Mehrzahl der Fälle zu Schädigungen an den

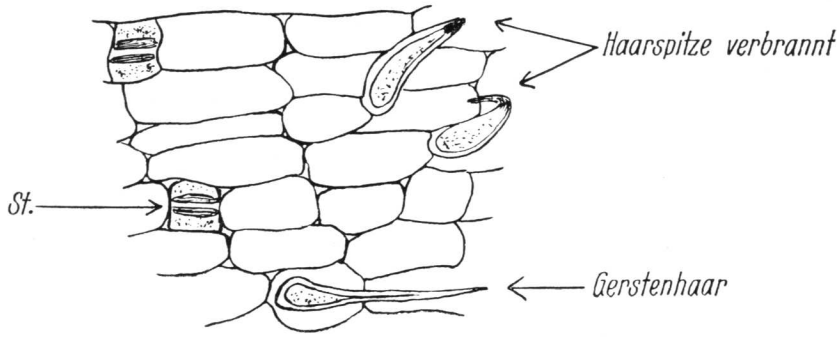


Abb. 16.

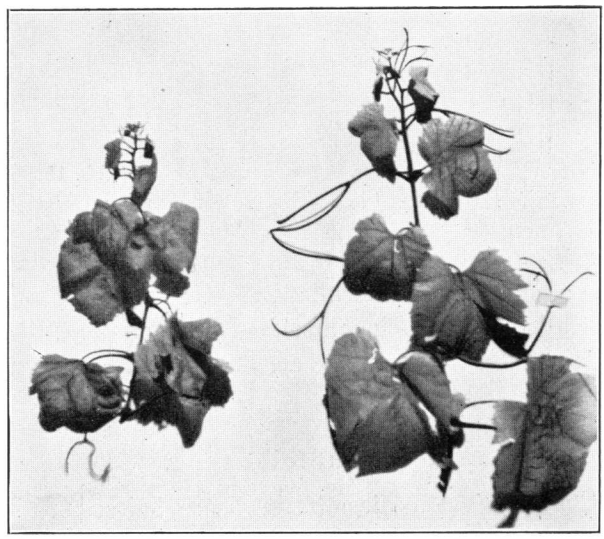


Abb. 17. *Vitis vinifera* L. Elektrische Kontrolle.

Pflanzenorganen. Der Grad der Zerstörung ist verschieden. Von kaum bemerkbaren Rückbildungen an epidermalen Organen, besonders Haaren (vergl. Abb. 16) und Blattspitzen beginnend, treten bei länger dauernder Einwirkung bei gewissen Pflanzen Rückbildungen auf, die bis zu kümmerlichen Wuchsformen führen (vergl.

Abb. 17 *Vitis vinifera*). Die Blattoberfläche ist dezimiert, die Chlorophyllbildung zurückgesetzt und was weiterhin interessant ist, der Internodienabstand um $^1/_3$ bis $^1/_2$ verkürzt. Die Rückbildung der Greiforgane ist bis auf kümmerliche Ansätze eine vollständige. Eigentliche hypertrophe Wuchsformen konnten wir jedoch nicht feststellen. Steigern wir die Intensität des Stromdurchganges noch mehr, dann treten direkte Verbrennungserscheinungen an den Blattspitzen auf und in den meisten Fällen wird dann Plasmolyse beobachtet.

Sehen wir bei *Vitis vinifera* durch zu große Stromintensitäten deutlich kümmerliche Wuchsausbildung, so können wir bei der Tomate gerade das umgekehrte Verhalten beobachten. Ihre Hauptwuchsrichtung erfuhr eine Ausdehnung zu der Anode hin, obwohl dadurch ihre Blätter in vermehrtem Maße elektrischen Verbrennungen ausgesetzt wurden. Der Abstand des positiv aufgeladenen Luftleiters, der aus weitmaschigem Drahtgitter bestand und die längs einem Draht gezogenen Weinstöcke halbkreisförmig umschloß, blieb immer der nämliche. Es muß hier noch ausdrücklich erwähnt werden, daß bei diesen Versuchen Feldspannungen zur Anwendung gelangten, die ausnahmslos sekundäre Entladungsvorgänge auslösten.

Kommen wir auf die Entladungsdiagramme unserer einleitenden Versuche zurück und vergleichen die dort zugrunde gelegten Ionisationsverhältnisse mit den obigen, so liegen diese alle rechts der 530 Volt-Linie, also im Gebiete der Stoßionisation. Die Ionisation durch Stoß setzt aber Feldstärken voraus, die, wie besonders eindrücklich beim Versuch mit *Vitis vinifera* hervorgeht, Schädigungen im Pflanzenwachstum hervorrufen. Der Leitfähigkeitsgrad der Luft schafft daher an und für sich nicht optimale Wachstumsbedingungen, denn Stoßionisation ist schädlich. Dies setzt voraus, daß wir wohl die Ionenbildung in der Atmosphäre durch ununterbrochene Neubildung zu steigern trachten, die Geschwindigkeit der Ionen zwischen Pflanze und Luftleiter aber innerhalb der Grenze verbleibt, wo eine Stoßionisation ausgeschlossen ist. Diese Voraussetzung ruft, so paradox es auf den ersten Blick erscheinen mag, nach hohen Klemmspannungen. Diese müssen so groß sein, daß die Spannungsdifferenz zwischen aufgeladenem Konduktor und dem Potential der ihn umgebenden Lufthülle ausreicht zur Unterhaltung stiller elektrischer Entladungen. Für die Menge der produzierten Ionen und den Moment, wo die stille elektrische Entladung beginnt, kommt

der Form und Ausbildung des Konduktors — Spitzen, Grannen, Haare usw. — an beiden Polen maßgebende Bedeutung zu. Da nun aber die Pflanze als Kathode das Potential der Erde besitzt und die bodennahen Luftschichten wohl im normalen luftelektrischen Spannungsgefälle 1 m, 2 m, 3 m über dem Boden eine Spannungsdifferenz, einen elektrostatischen Wert, von einigen Hundert Volt gegenüber der Erde aufweisen, so fällt dieser Unterschied gegenüber den einigen Zehntausend Volt des Luftleiters kaum in Betracht. Um schädliche Ionisationseinflüsse der Atmosphäre von der Pflanze fernzuhalten, müssen wir die Zone des intensivsten Ionisationsvorganges von der Pflanze weg hinauf zum Luftleiter verlegen. Der Ausbildung desselben ist daher schon wegen seiner funktionellen Bedeutung als Hauptionisator besondere Aufmerksamkeit zu schenken, um so mehr, als der Moment, wo die stille elektrische Entladung beginnt, am positiven Pol später einsetzt als am negativen. Die Höhe des Luftleiters über der Pflanze, also der Elektrodenabstand, muß, wie aus diesen Ausführungen hervorgeht, von folgenden drei Punkten abhängig sein:

1. Der Minimalabstand zwischen Luftleiter und Pflanze ist bei gegebener Klemmspannung vom Spannungsgefälle abhängig. Die elektrische Feldstärke an der Pflanzendecke muß unterhalb des Punktes liegen, wo die Ionengeschwindigkeiten Werte annehmen, daß dieselben anfangen zu stoßen, d. h. Atome zertrümmern.

2. Die gebildeten positiven Ionen sollen durch die Pflanze entladen werden und sich möglichst wenig in der Luft mit negativen Ionen zu neutralen Aggregaten vereinigen. Die elektrische Feldintensität dürfen wir daher nicht unter einen gewissen Wert sinken lassen und damit wird auch dem Maximalabstand des Luftleiters bei konstanter Klemmspannung eine gewisse Grenze gesetzt.

3. Die Stromcharakteristik bei den Weizen- und Gerstenähren verlangt ferner eine Rücksichtnahme auf das Phänomen der unselbständigen Gasentladungen, die bei festem Elektrodenabstand, also konstantem eingeschlossenem Luftraum, bis zu einem gewissen Wert mit der Zunahme des Potentialgefälles steigen und dann spannungskonstant bleiben. Diese in Punkt 3 aufgeführten Verhältnisse dürften während einer Kulturperiode insofern eine dauernde Nachprüfung verlangen, als der Umfang der unselbständigen Gasentladungen ebenfalls von der Größe des Primäreffektes, besonders der Intensität der Elektronenzerstreuung, abhängig sind.

VI. Der Einfluß des elektrischen Feldes auf die Komponenten der Atmosphäre.

A. Ozonbildung.

Das Ozonisierungsproblem bietet bei der großen Zahl der Bildungsmöglichkeiten dieses Gases für seine Erforschung zahlreiche Schwierigkeiten. Wir lassen von vornherein die thermischen, chemischen und auch photochemischen Bildungsprozesse außerhalb unserer Betrachtungen und studieren von den zahlreichen elektrischen Strahlungsformen und Entladungsvorgängen nur die stille elektrische Entladung in ihrem Einfluß auf die Ozonbildung. Aber auch hier ist der Bildungsprozeß außerordentlich kompliziert und wie schon Jahn (26) und Fischer (12) nachgewiesen haben, unterliegt der Chemismus der Ozonbildung nicht einfachen energetischen Gesetzen, da wir es meist mit einigen nebeneinander laufenden, resp. überdeckenden chemischen und physikalischen Reaktionen zu tun haben. Die Forschungen von Möller (38) und Herrschler (19) über die Ozonbildung bei der stillen elektrischen Entladung lassen sich dahin zusammenfassen, daß im Ionenstrom das Sauerstoffmolekül dissoziert oder aber durch Energieanreicherungen reaktionsfähiger gemacht wird. Für uns spielt das Bildungsphänomen des Ozons an sich keine Rolle. Ja selbst über die Struktur des Ozonmoleküls gehen die Ansichten noch auseinander. Im Hinblick auf unsere späteren Untersuchungen ist dagegen wesentlich

1. welche Mengen Ozon unter bestimmten Verhältnissen in einem gewissen Zeitraum gebildet werden, und
2. welche Rolle dem Ozon im pflanzlichen Leben zukommt.

Vor der Versuchsaufnahme war die Ozonnachweismethode zu wählen. Die volumetrische Methode bietet durch das einfache Auswägen eines gewissen Volumens Sauerstoff technische Vorteile. Es darf nicht außer acht gelassen werden, daß in diesem Falle nur reine Ozon-Sauerstoffgemische zur Anwendung gelangen dürfen. Im Hinblick auf den Zweck der Versuche haben wir aber mit atmosphärischer Luft zu experimentieren. Wir wählten daher zum Ozonnachweis die Jod-Kaliummethode nach Schönbein. Obwohl die älteste, darf sie bei richtiger Anwendung als die genaueste angesprochen werden.

$$2\,KJ + O_3 + H_2O = J_2 + O_2 + 2\,KOH.$$

Besondere Sorgfalt ist auf die absolut neutrale Reaktion der Jod-Kaliumlösung zu legen, da sonst mit einem Jodüberschuß infolge Bildung von H_2O_2 zu rechnen ist. Das Aufnahmegefäß der KJ-Lösung in Form einer Waschflasche wird daher zum Zurückdrängen der schädlichen Alkalität vorher mit verdünnter Schwefelsäure oder besser mit Borsäure angesäuert. Die JK-Lösung nachher mit $\frac{n}{10}$ $Na_2S_2O_3$ zurücktitriert.

Die Durchführung der Versuche erfolgte in drei Serien in einem abgeschlossenen zylindrischen Gefäß, 15600 cm^3 fassend. Unten im Glaszylinder liegt steriler angefeuchteter Sand als Kathode. Die in der Zylinderachse verschiebbare Anode besteht aus einem mit Spitzen versehenen Eisenring. Über die zeitliche Zunahme des Ozongemisches bis zu einer gewissen Grenzkonzentration sind wir durch die Arbeiten von Herrschler und Fischer hinreichend orientiert. Es bildet sich nach einem gewissen Zeitraum ein Gleichgewicht zwischen Ozonisierung und Desozonisierung, das man als Grenzkonzentration bezeichnet. Diese ist abhängig vor allem von der Temperatur, dem Druck, dem Wassergehalt und der Intensität der Entladung. Uns interessiert vor allem die Frage nach der Intensität der Entladung in Abhängigkeit des Elektrodenabstandes in ihrem Einfluß auf die Ozonbildung.

Durchführung des Versuches: Spannung 12000 Volt, Einwirkungsdauer 15 Minuten. Nach dieser Zeit wird die Spannung weggenommen und die Zylinderatmosphäre durch die oben erwähnte mit KJ-Lösung angefüllte Waschflasche hindurchgesogen und die Lösung titriert.

Elektrodenabstände: Versuch 1 = 5 cm
„ 2 = 10 „
„ 3 = 15 „

Relative Luftfeuchtigkeit 48—54%, Temperatur 17—18,5° C.

	1. Versuch	2. Versuch	3. Versuch
Menge Ozon in g	0,084	0,0215	0,0026
„ „ „ g	0,0096	0,0205	0,0031
„ „ „ g	0,082	0,0227	0,0022
Im Durchschnitt der drei Versuchsserien	0,0873	0,0216	0,00263

Wir haben es bei diesen Ozonmengen bei obigen Entladungsintensitäten bereits mit Grenzkonzentrationen zu tun.

Ein größeres Spannungsgefälle wie 2000 Volt/cm kommt wegen der dadurch bei den Pflanzenorganen in Erscheinung tretenden Verbrennungen nicht in Betracht. Andererseits sind wir bei einem solchen Spannungsgefälle noch nicht bei der absoluten Grenzkonzentration angelangt.

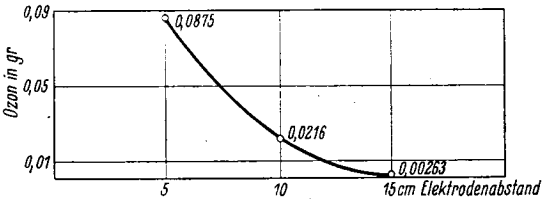


Abb. 18. Ozonbildung in Abhängigkeit von der Entladungsintensität.

Die nämlichen Versuche, jedoch mit Pflanzen ausgeführt, ergaben um ca. $^1/_3$ bis $^1/_2$ geringere Mengen Ozon. Dies muß auf den höheren Feuchtigkeitsgehalt als Folge der intensiven Transpiration der Pflanzen zurückzuführen sein (86 %—92 % relative Luftfeuchtigkeit). Uns interessieren letzten Endes nicht die absoluten Ozonkonzentrationen, sondern die unter bestimmten Verhältnissen zu erwartende Einwirkung des Ozons auf das Pflanzenwachstum.

Diese Versuche im Glaszylinder sowie zahlreiche weitere im Laufe der Untersuchung durchgeführte Kulturversuche in großen, oben mit einem Glasdeckel abgeschlossenen Wannen (38 · 30 · 58 cm) führten durchgehend zu schädigenden Wirkungen des Ozons und zwar besonders auf die assimilierenden Organe. Bei Spannungsgefällen von 2000—3000 Volt/cm und starken durch Spitzen hervorgerufenen stillen Entladungen konnten bei Leguminosen schon nach einem Tag bei 6stündiger elektrischer Bestrahlung und bei acht Tage alter Weizensaat nach 3 Tagen fleckige, braungelbe Zellpartien festgestellt werden, die abstarben (35). Konnte diese Erscheinung bei geringerem Spannungsgefälle und daher dünnerer Ozonatmosphäre auch nicht mehr beobachtet werden, so trat durchgehend bei den assimilierten Organen eine Bleichung ein. Wiesen sonst die unter der elektrischen Feldwirkung stehenden Pflanzenblätter im Gegensatz zu der grüngelben Farbe bei den Kontrollpflanzen eine sattgrüne Färbung auf, so wird nach dieser Zeit an

Stelle des Grün das Gelb vorherrschend. Die Chlorophyllose, denn mit einer solchen Erscheinung haben wir es zu tun, kann ihre Erklärung nur in der Oxydationswirkung des Ozons und teilweise des ebenfalls sich bildenden H_2O_2 finden. Der Chemismus der Ozoneinwirkung, besonders auf die assimilierenden Organe der Pflanze, ist noch wenig erforscht. Man könnte verstehen, daß die oxydierende Wirkung des Ozons von einer gewissen Konzentration an, die Assimilation, welche ein endogener Reduktionsprozeß ist, beeinträchtigen würde.

Elektrokulturversuche in abgeschlossenen Räumen bei ungenügender Lufterneuerung ermangeln gerade wegen dieser auf die Dauer schädigenden Einwirkungen des Ozons auf die assimilierenden Organe eindeutiger Beweiskraft. Konnten für gewisse Untersuchungen die Wannenversuche nicht umgangen werden, so verwendeten wir vorzugsweise junge Weizen- und Gerstensaat. Dank den vorhandenen reichlichen Reservestoffen konnten dann die Versuche 4—5 Tage andauern, ohne daß merkliche Schädigungen durch die Ozoneinwirkung auftraten.

Ozonbestimmungen im Gewächshaus, Laboratorium und im Freien ergaben keine außerhalb der Fehlergrenze der Nachweismethode liegenden Ozonmengen. Die natürliche Lufterneuerung ist hier im allgemeinen zu groß, als daß nachweisbare Schädigungen im Pflanzenwachstum eintreten könnten.

B. Stickoxydbildung.

Schon verschiedentlich wurde die Ansicht ausgesprochen, daß die wachstumsfördernde Wirkung heftiger Gewitter ihre Ursache in der durch die elektrischen Entladungen hervorgerufenen Stickstoffoxydation haben. Durch das gleichzeitige Auftreten von Ozon werden dann die gebildeten Nitrosegemische vorwiegend NO und NO_2 zu N_2O_5 oxydiert. Das Stickstoffpentoxyd löst sich gierig im Wasserdampf der Luft und fällt mit dem Gewitterregen als Salpetersäure auf die Fluren. Nähere diesbezügliche analytische Untersuchungen sind uns über die Stickoxydbildung durch die Gewitter nicht bekannt.

Bei den Elektrokulturversuchen im elektrischen Feld haben wir mit stillen elektrischen Entladungen zu rechnen. Die Intensität der Entladungen ist einerseits gegeben durch die Größe des Spannungsgefälles der elektrischen Feldwirkung und diese hängt andererseits von der Oberflächengestaltung der Elektroden (Spitzen

usw.) ab. Spitzenentladungen können dabei sowohl am Luftleiter wie auch an den pflanzlichen Organen vorkommen.

Hautefeuille und Chappuis (18) untersuchten erstmals ein abgeschlossenes ruhendes Luftvolumen bei Einwirkung stiller elektrischer Entladung auf eine eventuell eintretende Stickstoffoxydation, ohne über den Vorgang der Bildung sich dabei weiter ein Bild zu machen. Einige Jahre später setzten Shenstone und Evans (44) diese Versuche fort und kamen zum Ergebnis, daß die Nitrierung nicht bloß ein elektrischer Effekt sein kann, sondern, daß dem gleichzeitig gebildeten Ozon für die unbeständigen Stickoxyde die Rolle eines Oxydators zukommt. Die untersalpetrige Säure ($NO_2 \rightleftarrows N_2O_4$) wird bei Gegenwart von Ozon sofort zu Stickstoffpentoxyd oxydiert. Weitere Untersuchungen von Warburg (56), Ehrlich und Ruß (11) haben dann über die N-Oxydation bei trockener Luft und im abgeschlossenen Siemensrohr zu abschließenden Ergebnissen geführt. Aus zahlreichen Versuchen erhielten sie bei Verwendung von atmosphärischer Luft übereinstimmend ein Stickoxydmaximum von 4 % auf das Volumen des Endgases bezogen.

Die Erreichung eines so beträchtlichen Wertes wird aber nicht auf eine hohe Lage des elektrischen Stickoxydgleichgewichtes zurückgeführt, sondern ist auf die schon von frühern Forschern vermutete Koppelung elektrischer und chemischer Wirkungen hervorgerufen, indem im Überschuß vorhandenes Ozon, wie oben erwähnt, das gebildete NO zu N_2O_5 oxydiert und damit eine Nachbildung von Stickoxyd erzwingt. Die Stickoxydbildung scheint sich dabei so lange fortzusetzen, als Ozon im Überschuß vorhanden ist. Unsere Versuche über die Ozonbildung haben aber gezeigt, daß die Ozonbildung bei fixierten Versuchsbedingungen eine gewisse Grenzkonzentration nicht übersteigt. Diese hängt in bezug auf die Oxydationswirkung des Ozons wiederum von den vorhandenen Sauerstoffvolumen ab.

Das stickoxydbildende Phänomen der stillen elektrischen Entladung im Hinblick auf seine Bedeutung bei der Elektrokultur setzt die Abklärung folgender Fragen voraus:

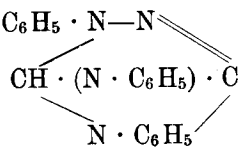
1. Entsteht bei den verhältnismäßig schwachen elektrischen Entladungsvorgängen überhaupt eine feststellbare Stickoxydbildung?

2. Wenn ja, wird sie durch die Luftfeuchtigkeit beeinflußt

Bei der Wahl der Nachweismethode mußte darauf Rücksicht genommen werden, daß Basen als Absorptionsmittel des NO_3-Restes auch die Kohlensäure der Luft binden. Die Kohlensäure der Luft

vorher zu bestimmen und im Resultat zu berücksichtigen, führt, wie Vorversuche zeigten, zu nicht einwandfreien Resultaten, da unter den gewählten Versuchsbedingungen die zu bestimmenden Stickoxyde innerhalb der Fehlergrenze liegen. Die Absorption der HNO_3 an KOH und deren Titration, die allein zu praktischen Ergebnissen führt, kam wegen der Kohlensäure der Luft nicht in Betracht. Ein quantitativer Stickoxydnachweis läßt sich wohl in reinen Stickstoff-Sauerstoffgemischen, nicht aber in Luft durchführen.

Es blieb nichts anderes übrig, als uns auf einen rein qualitativen Nachweis zu beschränken. Diphenylamin, ein gebräuchliches Laboratoriumsreagens auf NO-Verbindungen wird auch von andern oxydierenden Stoffen blau gefärbt und kann wegen des gleichzeitigen Auftretens von Ozon und Wasserstoffsuperoxyd nicht in Frage kommen. Anders verhält es sich mit Nitron



Dieses Diphenylendanilo-dihydrotriazol in Essigsäure gelöst, gibt bei Spuren von HNO_3 erst einen flockig weißen Niederschlag, der nachher auskristallisiert.

Gemäß unserem Versuchsprogramm experimentierten wir zuerst mit vorgetrockneter Luft. Die Trockeneinrichtung bestand in einer mit P_2O_5-Kristallen angefüllten Waschflasche, durch welche die Luft hindurchgesogen wurde, bevor sie in den 3500 cm^3 fassenden Versuchszylinder gelangte. Jeder Einzelversuch dauerte 6 Stunden; d. h. so lange wurde durch die elektrische Entladung auf die Zylinderluft eingewirkt, bevor das Gasgemisch durch eine zweite mit dem Salpetersäure-Reagens angefüllte Waschflasche gesaugt wurde. Als Elektrode diente am negativen Pol eine runde Messingscheibe von 6 cm Durchmesser. Der positive Pol besteht aus 36 in einer Ebene angeordnete Spitzen.

Die ersten Versuchsserien galten der NO-Bildung in Abhängigkeit der Stromdichte (s. Tabelle S. 49).

Diese Versuche brachten in bezug auf die Stickoxydation ein positives Ergebnis. Sie dürfen insofern als Ergänzung der Versuche von Ehrlich und Ruß gelten, als die NO-Bildung in Abhängigkeit der Entladungsintensität bis zu einer gewissen Grenzkonzentration zunimmt. Ein Vergleich der Versuchsergebnisse 1—7

Versuch Nr.	Sekundärspannung Volt	Spannung Volt/cm	Elektrodenabstand	Stromdichte Milliamp.	Endtemperatur	Niederschlag
1	12 000	600	20	—	18,5	Keine Ausscheidung
2	12 000	1 200	10	—	19,2	„ „
3	12 000	1 500	8	0,1	19,8	Leichte Opaleszenz
4	12 000	2 000	6	0,2	20,3	Vereinzelte Kristallablagerungen
5	12 000	3 000	4	0,5	20,4	Leicht flockige Ablagerung
[1]) 6	12 000	4 000	3	1,5	19,7	Flockige Ablagerungen
7	12 000	6 000	2	7	18,2	Starke flockige Ablagerungen
8	12 000	12 000	1	50	23	desgl.

läßt wohl für die betr. Entladungsintensität, nicht aber für das eingeschlossene Gasvolumen auf ein früheres Stickoxydgleichgewicht schließen. Eine Gegenüberstellung der filtrierten und gewogenen Niederschläge von Versuch

7 . . . . . 0,0674 g
8 . . . . . 0,0641 g

lassen dagegen bereits einen Grenzwert der Ozonbildung erkennen, der uns die Grenzkonzentration des NO-Gemisches anzeigt.

Elektrokulturversuche mit lebenden Pflanzen setzen besonders im Hinblick auf den Feuchtigkeitsgehalt der Luft normale Wachstumsbedingungen voraus, wobei von der Außenluft abgeschlossene Versuchsräume, wie Treibhäuser oder gar Glaskästen usw. relative Luftfeuchtigkeitsgrade aufweisen, die an die 100 % heranreichen. Bei unserem atlantischen Klimatypus müssen wir bei Freilandkulturen im Durchschnitt mit 50 % relativer Luftfeuchtigkeit rechnen. Die anschließende Versuchsserie wurde in atmosphärischer Luft durchgeführt. Ihr Feuchtigkeitsgehalt variierte zwischen 53 und 56 %.

Versuchsdauer 6 Stunden.

[1]) Die unter dem Strich aufgeführten Versuche weisen Stromintensitäten auf, die ausnahmslos die Pflanze schädigen.

Versuch Nr.	Sekundärspannung Volt	Spannung Volt/cm	Elektrodenabstand	Stromdichte Milliamp.	Endtemperatur	Niederschlag
1	12 000	600	20	—	19,4	keine Ausscheidung
2	12 000	1 200	10	—	18,9	„ „
3	12 000	1 500	8	—	19,0	„ „
4	12 000	2 000	6	0—0,1	19,8	„ „
5	12 000	3 000	4	0,3	20,1	„ „
6	12 000	4 000	3	0,7	19,2	„ „
[1]) 7	12 000	6 000	2	2,8	18,8	keine Ausscheidung
8	12 000	12 000	1	35,8	19,1	Vereinzelte Kristallanhäufungen am Boden der Waschflasche

Der Feuchtigkeitsgehalt der Luft setzt bei sonst gleichen Bedingungen die Stickstoffoxydation stark zurück. Erst bei der größten Stromintensität stellen wir eine Stickoxydbildung fest. Das Ergebnis aus dieser Versuchsgruppe läßt die Bedeutung der NO-Oxydation für die Pflanzenernährung und daher als wachstumsfördernder Faktor bei der Elektrokultur stark zurücktreten. Dies um so mehr, als bei stillen elektrischen Entladungen, wo die Stromdichte 0,05—0,01 Milliampère übersteigt, an den assimilierenden Organen Schädigungen auftreten. Bei Stromdichten, die außerhalb der Schadengrenze liegen, wurden innerhalb des gewählten Zeitraumes keine sichtbaren Mengen NO gebildet.

Zur Kontrolle obiger Versuche haben wir noch folgendes Experiment durchgeführt: Als Anode gelangte die nämliche Spitzenelektrode zur Verwendung. Als Kathode diente direkt die in einer Schale aufgestellte in CH_3COOH gelöste Nitronlösung. Bei einer Stromintensität von 4 Milliampère konnte nach 12 Stunden mit bloßem Auge noch keine Reaktion festgestellt werden. Versetzte man jedoch die zum Versuch verwendete Reaktionslösung mit einem Tropfen $\frac{n}{10}$ NHO_3, so traten sofort die für den NO_3-Nachweis charakteristischen Kristalle auf. Neue Reaktionslösung mit einem Tropfen $\frac{n}{10}$ HHO_3 versetzt, führte zu einem flockigen Niederschlag.

[1]) Die unter dem Strich aufgeführten Versuche weisen Stromintensitäten auf, die für die Pflanze schädlich sind.

Diese Feststellung machte es zur Notwendigkeit, daß der stillen elektrischen Entladung ausgesetzte Salpetersäurereagens im Ultramikroskop zu untersuchen. Der Befund fiel positiv aus. Im Lichtkegel traten die charakteristischen Beugungsscheibchen der Ultramikronen auf. Diese Ultramikronen stellen Kriställchen dar, denen die Rolle von Kristallisationszentren zukommt. Eine schwache Opaleszenz der Flüssigkeit ließ denn auch schon rein makroskopisch den Rückschluß auf die Heterogenität des Flüssigkeitssystems zu.

Über den Einfluß des Feuchtigkeitsgehaltes bei Einwirkung stiller elektrischer Entladungen auf ein ruhendes Luftgemisch darf zusammenfassend gesagt werden, daß bei großer Intensität der elektrischen Entladung eine, wenn auch reduzierte Stickstoffoxydation stattfindet. Stille Entladungen von dieser Intensität führen jedoch zu Verbrennungen am Pflanzenorganismus. Möglicherweise führen auch schwächere Entladungen zu einer sehr beschränkten Stickoxydbildung. Unsere technisch chemische Reaktionsmethode ließ uns diese aber nicht nachweisen. Welcher negative Einfluß dem Feuchtigkeitsgehalt bei der Oxydierung des Stickstoffs zukommt, ist eigentlich noch wenig abgeklärt und bedarf noch eines umfassenden Studiums. Ist es die geringe Leitfähigkeit der Luft oder führt das in reichlichem Maße sich bildende H_2O_2 auf den Chemismus der Stickstoffoxydation eine bestimmende Wirkung aus. Über die Bedeutung des Ozons und die Beeinflussung der Stickstoffoxydation haben wir uns an anderer Stelle eingehend geäußert.

Wesentlich für dieses Ergebnis ist, daß, wenn überhaupt bestimmbare Mengen Stickstoffverbindungen gebildet werden sollten, die Energiebilanz bei diesem durch die stille elektrische Entladung hervorgerufenen Bildungsprozeß gegenüber der Salpeterbildung im Lichtbogen der Stickstoffwerte eine sehr schlechte Ausnützung der zugeführten elektrischen Energien darstellen würde.

C. Die Differenzierung der Kohlensäureatmosphäre im elektrischen Feld.

a) Der Zweck der Untersuchungen.

M. D. Chouchak (5) findet auf Grund quantitativer Untersuchungen, je nachdem, ob der positive oder negative Pol einer Hochspannungsquelle an der Pflanze liegt, eine verschieden große Assimilation! Sowohl bei Mais als bei *Casuarina* konstatierte er dann eine größte Abnahme des CO_2-Gehaltes der Atmosphäre,

wenn der positive Pol an der Pflanze liegt; daraus schließt er auf eine erhöhte Assimilation. Mit dem negativen Pol an der Pflanze oder bei ausgeschalteter Spannung ist, bei gleicher Lichtintensität und Zeiteinheit, eine bedeutend geringere CO_2-Abnahme in der Atmosphäre konstatiert worden.

Dabei die Elektrokultur ausschließlich als Kohlensäureproblem betrachten zu wollen, wäre nicht angängig, denn schon Lemström (32) kam auf Grund von Topfkulturen zu einem entgegengesetzten Resultat, daß nicht bei einem negativ aufgeladenen Luftleiter Maximalerträge erzielt werden, sondern daß sich bei einem positiven Potential des Luftleiters gegen die Erde, der größte Zuwachs erzielen läßt. Daraus ersehen wir deutlich die Kompliziertheit des Problems und wie wenig die wissenschaftliche Erkenntnis in den letzten 30 Jahren das Dunkel über das Wesen der Elektrokultur zu lichten vermochte.

Um das hier in diesem Kapitel zu untersuchende Kohlensäureproblem in seinen Grundelementen zu behandeln, betrachten wir den Einfluß des elektrischen Feldes auf die Kohlensäureverteilung in der Atmosphäre erst als physikalisches Problem für sich. Dabei drängen sich vor allem zwei Fragen in den Vordergrund:

1. Kann die Kohlensäureverteilung durch ein elektrisches Feld in der Atmosphäre überhaupt beeinflußt werden?
2. Wenn ja, kann durch Änderung des Feuchtigkeitsgehaltes der Atmosphäre und der Feldstärke Größe und Richtung derselben beeinflußt werden?

b) Versuchsanordnung.

Als Stromquelle diente unser Hochspannungsgleichrichter. Die Spannung kann beliebig zwischen 4000 und 20000 Volt gewählt werden. Gleichstrom ist nicht pulsierend, also ohne eine praktische ins Gewicht fallende periodische Änderung der Spannungsamplitude.

Die Versuchsatmosphäre befand sich in einem Glaszylinder von 70 cm Höhe und einem Volumen von 3000 ccm. Die Lufterneuerung geschah mittels eines Glasrohres von außen her. Es wurde also nicht Luft von dem Raume verwendet, in dem diese Versuche durchgeführt wurden. Eine solche Atmosphäre ist in ihrer Zusammensetzung starken Schwankungen unterworfen, die keine brauchbaren Resultate liefern würde. Fünf längs der Zylinderachse angeordnete Öffnungen im Glasgefäß gestatteten eine beliebige Luftprobeentnahme. Die Elektroden sind runde Messing-

bleche von 5,5 cm Durchmesser. Zu diesen Versuchen wurde immer die gleiche Spannung von 12000 Volt verwendet, was bei dem festen Elektrodenabstand einem Spannungsgefälle von 240 Volt pro cm entsprach. Spitzenelektroden als auch größere Felddichten wurden absichtlich nicht gewählt, um das Phänomen der Spitzenwirkung und der Stoßionisation von Anfang an auszuschließen. Diese letzteren Vorgänge führen in der Atmosphäre zu ganz neuartigen Ionisationsverhältnissen, die die Untersuchungen nur komplizieren würden. Früher angestellte Versuche haben deutlich gezeigt, wie sich bei stillen elektrischen Entladungen große Mengen von O_3 und H_2O_2 bilden und unter gewissen Voraussetzungen auch feststellbare Mengen von Stickoxyden auftreten. Bei der angewendeten volumetrischen Kohlensäurebestimmung, wo die Kohlensäure durch K (OH) gebunden wird, könnten die gebildeten Stickstoffverbindungen das Resultat unter gewissen Umständen maßgebend beeinflussen. Bei der Wahl der Feldstärke wurde darauf Rücksicht genommen, damit diese elektrochemischen Umsetzungen ein Minimum betrugen und, was vor allem wichtig ist, konstant blieben. Wie die erhaltenen Resultate zeigen werden, kommen sie zum Studium der Frage der Kohlensäurebeeinflussung durch das elektrische Feld nicht mehr in Betracht, da ihre Größen in den meisten Fällen innerhalb der Fehlergrenze liegen.

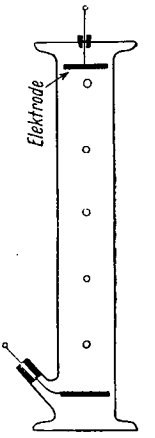


Abb. 19.

Die vorzugsweise volumetrische Kohlensäurebestimmung erfolgte nach der von Lundegård entwickelten Methode, die dann mit einem von Dr. Gut (17) im pflanzenphysiologischen Laboratorium der E.T.H. bis zur höchsten technischen Vollkommenheit durchkonstruierten Apparat ausgeführt wurde. Mit Hilfe dieses Apparates war es möglich, innerhalb von 10 Minuten eine Kohlensäurebestimmung durchzuführen. Seine Handhabung verlangt eine gewisse Übung, gewährleistet aber sehr exakte Resultate. Bei einer Versuchsserie wurde die Kohlensäure an Barytwasser gebunden und der Niederschlag durch Titration ermittelt.

c) Durchführung der Versuche.

Als Experimentierluft diente ausschließlich atmosphärische Luft. Wie vorher gezeigt, wurde sie durch ein Zuführungsrohr von außen her in den Versuchszylinder geleitet. Die Aufzählung

der Versuche geschieht in der Reihenfolge, wie sie ausgeführt wurden. Wir bekommen so eine Kette von Teilergebnissen und Schlußfolgerungen, die zum nächsten Versuche hinweisen. Alle Versuche wurden wenigstens dreimal unter den möglichst gleichen Bedingungen wiederholt. Bei den oft kleinen zahlenmäßigen Unterschieden, wo die Werte in der Nähe der Fehlergrenze liegen, bewahrt uns nur eine äußerst kritische Einstellung gegenüber den erhaltenen Zahlenwerten vor Trugschlüssen.

Vorher dürfte es für uns wertvoll sein, die Art und Weise, wie uns die Kohlensäure in der Atmosphäre entgegentritt, rasch zu untersuchen.

1. Als Kohlendioxyd $(CO)_2$, in Gasform.

2. An den Wasserdampf der Luft gelagert; dabei dissoziiert ein Teil der Kohlensäuremoleküle vorzugsweise nach der Gleichung

$$H_2CO_3 = H^+ + (HCO_3)^-$$

H_2CO_3 ist eine sehr starke Säure, da wir aber die Konzentration auf alles CO_2 beziehen, ist sie schwach, da der größte Teil nicht dissoziiert, sondern als CO_2 im Wasser gelöst ist. Der Grad der Dissoziation wächst mit der Temperatur.

Bei dem Wasserdampf in der Atmosphäre haben wir es mit großen Molekülhaufen zu tun, die durch die Ionen der Luft oder auch durch dissoziierte CO_2-Moleküle teilweise aufgeladen werden und damit der elektrischen Feldwirkung gehorchen.

Wie sind nun aber diese Wassertröpfchen geladen?

Wie schon oben gezeigt, dissoziiert das CO_2-Molekül in H^+ $(HCO_3)^-$. Das negative Anion gibt ihm, wie der Versuch nachher beweist, eine negative Ladung, währenddessen die umgebende Luft positiv influenziert wird. Ein Versuch von Thomson (52) hat diese Tatsache schon um die Jahrhundertwende in sehr anschaulicher Weise bestätigt. Durch Zusatz von einigen Hunderttausendstel von Schwefelsäure in destilliertem Wasser und Zerstäubung derselben wurde die Luft stark positiv elektrisiert, das heißt die Wassertröpfchen sind negativ aufgeladen.

Für die auszuführenden Versuche, die uns ja über den Einfluß des elektrischen Feldes auf die Kohlensäureatmosphäre orientieren sollen, geben die Ausführungen von Kap. III die theoretischen Grundlagen.

Die gasförmigen Kohlensäureionen der Atmosphäre, mit den an den Wasserdampf gebundenen dissoziierten Kohlensäuremolekülen,

lassen sich durch die oben beschriebene Untersuchungsmethode nicht getrennt betrachten. Ebenso ist es nicht möglich, Werte über das Verhältnis der positiv und negativ aufgeladenen gasförmigen Kohlensäureionen zu erhalten, da die andern Ionen der Atmosphäre summarisch zur Geltung kommen. Eindeutigere Ergebnisse dürfen wir dagegen bei der in der Atmosphäre dissoziierten Kohlensäure erwarten. Hier ist die Richtung der Ladung mit dem Dissoziationsvorgang gegeben. Durch Beeinflussung des Feuchtigkeitsgehaltes der Luft, ihrer Temperatur und dem Kohlensäuredrucke können wir die Verhältnisse nach verschiedenen Gesichtspunkten ändern. Wir wollen aber diese mehr den Physiker interessierenden Fragen nur soweit verfolgen, als sie für unsere Untersuchungen von Bedeutung sind.

In unseren Versuchen beobachteten wir zuerst die Veränderungen der Kohlensäureatmosphäre vor, während und nach der Feldeinwirkung. Da die Frage der Feldrichtung und ihr Einfluß auf ein optimales Pflanzenwachstum noch nicht gelöst ist, wurden die Versuche speziell nach dieser Richtung ausgedehnt, ohne bei der beschränkten Problemstellung jetzt schon ein abschließendes Resultat erwarten zu wollen. Die Veränderung des Feuchtigkeitsgehaltes der Atmosphäre gibt uns einen Einblick in die Lösungs- und Dissoziationsverhältnisse der Kohlensäure. Die Temperatur wurde konstant gehalten und betrug 18° C. Der Kohlensäuregehalt war durch den Gehalt der Atmosphäre gegeben. Derselbe schwankte allerdings beträchtlich. Unterschiede bis zu 0,05 Volumprozent von einem Tag zum andern wurden dabei gemessen, was Variationen von mehr als 100% der Kohlensäure in der Atmosphäre ausmacht. Die aus den erhaltenen Werten aufgetragenen Kurven gaben bei den Parallelversuchen aber trotzdem einen kongruenten Verlauf. Für einen Versuch wurden ca. 4—5 Stunden benötigt. Öfters vorgenommene Stichproben zeigten innerhalb dieser Zeitspanne nur unwesentliche Abweichungen im Kohlensäurgehalt der Außenluft, was bei der langsamen Lufterneuerung im Glaszylinder, beträgt sie doch pro Ablesung nur ein Sechzigstel, nicht ins Gewicht fällt. Da die Versuche im land- und forstwirtschaftlichen Gebäude der eidgenössischen technischen Hochschule durchgeführt wurden, das am unteren Teil des Zürichberghanges, mitten in der Stadt, liegt, wurde von Anbeginn der Versuche mit diesen Schwankungen gerechnet.

d) Der Verlauf der Kohlensäurekonzentration der atmosphärischen Luft im elektrischen Feld bei Änderung ihres Feuchtigkeitsgehaltes.

Wir untersuchten den Verlauf bei mittlerem Feuchtigkeitsgehalt, bei voller Sättigung und getrockneter Luft.

Tabelle I.

Verlauf der CO_2-Konzentration im elektrischen Felde.

I. Atmosphärische Luft.

Temperatur 18° C, Relative Luftfeuchtigkeit 47%, Ablesungen alle 12 Minuten.

Anfang	Ende	Differenz	CO_2-Prozent	Bemerkungen
1. K 9248	8844	0404	0,0808	Kontrollablesungen
2. K 9258	8860	0398	0,0796	
				Spannung: 12000 Volt
3. 9248	8871	0377	0,0754	
4. 9272	8922	0350	0,0700	Kohlensäureentnahme
5. 9263	8940	0323	0,0646	am positiven Pol, oben
6. 9323	9902	0321	0,0642	
				ausgeschaltet
7. K 9226	8821	0405	0,0810	Kontrollablesungen
8. K 9276	8870	0406	0,0812	
9. 9044	8678	0366	0,0732	Spannung: 12000 Volt
10. 9257	8950	0307	0,0614	
11. 9264	8958	0306	0,0612	Polwechsel
				ausgeschaltet
12. K 9237	8838	0399	0,0798	Kontrollablesung

Differenz im Kohlensäuregehalt, ausgedrückt in Prozent der Anfangsablesung:

a) an der positiven Elektrode 19,7%,

b) an der negativen Elektrode 21,6%.

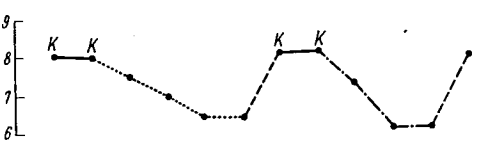


Abb. 20.

Kohlensäuregehalt in Volumprozent der Atmosphäre mal 100.
Abstand zwischen 2 Punkten = 12 Minuten.

Das vorliegende Diagramm stellt den Verlauf der Kohlensäurekonzentration dar. Auf der Vertikalen ist der Kohlensäuregehalt in Volumprozenten zur Gesamtatmosphäre aufgetragen. Die Horizentale trägt die zeitliche Verschiebung des Kohlensäuregehaltes in Intervallen von 12 Minuten. Wie oben angegeben, haben wir einen mittleren relativen Feuchtigkeitsgehalt von 47 Volumprozent.

Nachdem die Kontrollmessungen Werte aufwiesen, die innerhalb einer Fehlergrenze von ± 5% liegen, wurde die Spannung von 12000 Volt mit dem positiven Pol oben an die Elektroden gelegt. 3 cm von der oberen Elektrode entfernt wurde die Luftprobe entnommen und dabei eine kontinuierliche Kohlensäureabnahme festgestellt. Das Minimum ist nach ca. 40 Minuten erreicht, weitere Ablesungen zeigten in den nächsten 30 Minuten keine Veränderung in der Kohlensäuremenge. Die durchschnittliche Abnahme im Kohlensäuregehalt beträgt 19,7% der Anfangsmenge; die Resultate der drei übrigen Parallelversuche mitverwertet, ergaben eine Verminderung von 19,9%.

Nach Wegnahme der Spannung und nach Entleerung der Zuführungsleitung zum Kohlensäurebestimmungsapparat wurden mehrere Kontrollablesungen gemacht. Schon die erste Bestimmung ergab eine Wiederherstellung der früheren Kohlensäuremenge im Versuchszylinder. Die vor uns liegende Tabelle weist allerdings einen gegenüber den Anfangskontrollen erhöhten Wert auf, der aber innerhalb der Fehlergrenze liegen kann; bei den anderen Parallelversuchen ist die Zunahme in zwei Fällen 0,35 Volumprozent, der andere um 0,15 Volumprozent höher als die Anfangskontrollablesungen. Wir werden später nochmals auf diese Abweichungen zurückkommen müssen, obwohl sie aus dem oben erwähntem Grunde jetzt noch nicht interpretiert werden sollen.

Bei gleicher Versuchsanordnung wurde die Spannung, jetzt mit umgekehrten Vorzeichen, wieder angelegt. Auch hier konstatierten wir eine Abnahme in der Kohlensäurekonzentration. Das Minimum ist nicht, wie vorher bei der dritten Ablesung, sondern schon bei der zweiten erreicht und liegt um 21,6% tiefer als die Anfangsablesung; im Durchschnitt aller vier Parallelversuche um 21,5 %. Nach Ausschalten des Stromes stellte sich die Kohlensäure wieder auf die Höhe der früheren Kontrollablesungen ein.

Tabelle II.

Verlauf der CO_2-Konzentration im elektrischen Felde.

II. Wassergesättigte atmosphärische Luft.

Temperatur 18° C, Relative Luftfeuchtigkeit 95%, Ablesungen alle 12 Minuten.

Anfang	Ende	Differenz	CO_2-Prozent	Bemerkungen
1. K 9301	8813	0488	0,0976	Kontrollablesungen
2. K 9295	8811	0484	0,0968	
3. 9281	8820	0461	0,0922	Spannung: 12000 Volt Kohlensäureentnahme am positiven Pol, oben
4. 9268	8852	0416	0,0832	
5. 9304	8910	0394	0,0788	
6. 9275	8879	0396	0,0792	
7. K 9262	8779	0483	0,0966	ausgeschaltet Kontrollablesungen
8. K 9278	8792	0486	0,0972	
9. 9303	8905	0404	0,0808	Spannung: 12000 Volt
10. 9321	8946	0375	0,0750	
11. 9278	8897	0381	0,0762	Polwechsel
12. 9310	8932	0378	0,0756	
13. 9231	8747	0484	0,0968	ausgeschaltet Kontrollablesung

Differenz im Kohlensäuregehalt, ausgedrückt in Prozent der Anfangsablesung:
a) an der positiven Elektrode 19,2%,
b) an der negativen Elektrode 22,1%.

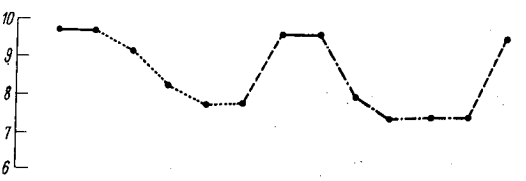


Abb. 21. Kohlensäuregehalt in Volumprozent der Atmosphäre mal 100. Abstand zwischen 2 Punkten = 12 Minuten.

Der Versuchszylinder umschloß wasserdampfgesättigte, atmosphärische Luft. Der Verlauf des Diagramms entspricht vollständig der Kurve aus Tabelle I. In der ersten Versuchsphase liegt der positive Pol oben, wo auch die Luftproben für die Dauer des ganzen Versuches entnommen werden. Die Kohlensäure im Versuchszylinder senkt sich innerhalb dreier Kontrollmessungen um 19,2%, was auch dem Durchschnitt aller drei Parallelversuche entspricht. Beim Wegnehmen der Spannung, Wiederherstellung der früheren Kohlensäureatmosphäre auf die gleiche Höhe der anfänglichen Kontrollresultate. Der Durchschnitt der drei Parallelversuche scheint eher

etwas tiefer zu liegen. Die positive Elektrode überzog sich dabei mit einer dünnen Schicht aus Kondensationswasser, daran erkenntlich, daß das polierte Messingblech den Glanz verlor und ein matt angehauchtes Aussehen annahm.

Wurden die Pole gewechselt und die Spannung angelegt, so wurde wieder ein der Kurve aus Tabelle I analoges rasches Sinken der Kohlensäuremenge im Versuchszylinder festgestellt. Der Rückgang an der negativen Elektrode betrug 22,1%, im Durchschnitt der drei Parallelversuche 21,9%. Die Mehrabnahme des Kohlensäuregehaltes am negativen Pol, ausgedrückt in Prozenten der Gesamtkohlensäuremenge der durchschnittlichen Anfangskontrollablesungen, betrug in:

Tabelle I 1,6%
Tabelle II. . . . 2,7%.

Obwohl sich hier verschiedene Fragen herausbildeten, die vielleicht vor einer weiteren Verfolgung des gestellten Problems bearbeitet werden sollten, will ich dem vorgezeichneten Gang der Untersuchung nicht vorgreifen.

Tabelle III.

Verlauf der CO_2-Konzentration im elektrischen Felde.

III. Atmosphärische Luft mit $CaCl_2$ getrocknet.

Temperatur 18° C, Relative Luftfeuchtigkeit 9%, Ablesungen alle 12 Minuten.

Anfang	Ende	Differenz	CO_2-Prozent	Bemerkungen
1. K 9255	8958	0297	0,0594	Kontrollmessungen
2. K 9320	9017	0303	0,0606	
3. 9296	8948	0348	0,0696	Spannung: 12000 Volt
4. 9316	8986	0330	0,0660	Kohlensäureentnahme am positiven Pol, oben
5. 9318	8991	0327	0.0654	
6. 9325	8996	0329	0,0658	
7. 9116	8801	0315	0,0630	ausgeschaltet
8. 9341	9022	0319	0,0638	Kontrollmessungen
9. 9311	8897	0414	0,0828	Spannung: 12000 Volt
10. 9342	9018	0334	0,0668	Polwechsel
11. 9314	8977	0337	0,0674	CO_2-Eentnahme oben
12. 9304	9982	0322	0,0644	Kontrollmessung

Differenz im Kohlensäuregehalt, ausgedrückt in Prozent der Anfangsablesung:
a) an der positiven Elektrode 9,7%,
b) an der negativen Elektrode 12,5%.

So sehr die Kurvenbilder aus Tabelle I und II in der Charakteristik einander entsprechen, so grundverschieden ist der Verlauf des Diagramms aus Tabelle III und läßt den dominierenden Einfluß, der der Luftfeuchtigkeit bei der Dissoziation des Kohlensäuremoleküls und damit der Ionenbildung in der Atmosphäre zukommt, deutlich veranschaulichen. Die Versuchsanordnung und Durchführung entsprach genau dem Vorgehen bei der Aufstellung der beiden vorhergehenden Versuchsserien. Die Feuchtigkeit wurde der Atmosphäre durch ein Trockenmittel entzogen. Zur Verwendung gelangte chemisch reines $CaCl_2$, das auf dem Grund des Versuchszylinders in einer Uhrschale aufgestellt war.

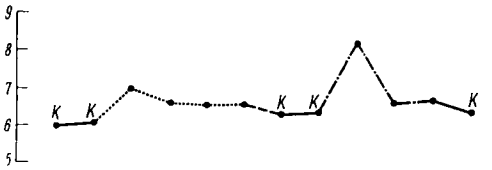


Abb. 22. Kohlensäuregehalt in Volumprozent der Atmosphäre mal 100. Abstand zwischen 2 Punkten = 12 Minuten.

Das Diagramm aus Tabelle III Abb. 22 nimmt gegenüber den vorigen Kurven einen vollständig anderen Verlauf. Schon die Kontrollversuche ergaben voneinander abweichende Werte, die jedoch vom Kohlensäuregehalt der Außenluft anfänglich unwesentlich abwichen. Nach Anlegen der Spannung nahm die Menge der bestimmten „Kohlensäure" zu, wobei ein charakteristischer Spitzenausschlag mit Einschalten des Stromes erfolgte, der schon bei der nächstfolgenden Messung sich auf einer gewissen Höhe stabilisierte. An der positiven Elektrode betrug die Abweichung von dem durchschnittlichen Wert der Kontrollen 9,7%, an der negativen Elektrode 12,5%. Parallelversuche ergaben ähnliche Kurvenbilder, teilweise jedoch mit stärkeren Abweichungen. Auffallend ist das schwankende Ansteigen der Meßresultate bei den Kontrollbestimmungen, was deutlich darauf hinweist, wie wir mit dem Kalziumchlorid einen veränderlichen Faktor in unser Untersuchungsgefäß hineinbrachten.

Zusammenfassend dürfen wir gleich zweierlei über diese letzte Versuchsserie aussagen:

1. Die Kohlensäure läßt sich bei trockener Atmosphäre durch ein elektrisches Feld nicht beeinflussen. Dem Wasserdampf kommt als Lösungsmittel der Kohlensäure und als Ionenträger eine ent-

scheidende Bedeutung zu. Ein Teil des im Wasserdampf gelösten Kohlendioxyds dissoziiert und macht die negativen Ionen vorherrschend, was dadurch zum Ausdruck kommt, daß in atmosphärischer Luft mit mittlerem Feuchtigkeitsgehalt ein Fünftel der Gesamtkohlensäure der Luft der elektrischen Feldwirkung unterworfen wird.

2. Auf eine vollständige Begründung des Verlaufes der Kurve aus Tabelle III möchte ich mich nicht festlegen, da das für unsere Untersuchungen Wertvolle in den Ausführungen zum ersten Punkt enthalten ist. Der nicht gerade offensichtliche Verlauf der Kurve hat neben dem Verschwinden der dissoziierten Kohlensäure seine Begründung voraussichtlich darin, daß durch das Aufspalten des $CaCl_2$-Moleküls durch Hinzutritt von Wasser

$$CaCl_2 + 2\,HCl = Ca(OH)_2 + 2\,HCl$$

Ionen entstehen, die zum Teil in die Atmosphäre dringen und die Meßresultate beeinflussen. Das HCl-Molekül mit einem Molekulargewicht von 13 ist gegenüber demjenigen der Luft, das zwischen 28 und 29 liegt, klein. Es tritt daher leicht in Gasform in die Atmosphäre ein. Unsere Bestimmungsmethode verwendet zur Bindung der Kohlensäure K (OH), die das gasförmige Salzsäuremolekül bindet und damit das Meßresultat beeinflußt. Daher die relativ großen Schwankungen in den Kontrollmessungen. Mit Anlegen der Spannung kann die Feldwirkung diesen Vorgang noch verstärken. Ebenso beeinflußt die Bildung und das Auftreten von Ozon, Wasserstoffsuperoxyd und der Stickstoffverbindungen, die allerdings zum Teil das Vorkommen von Wasserdampf erfordern, der aber immer noch in Spuren vorhanden ist, das Resultat der Messung. Das Auftreten dieser chemischen Verbindungen muß daher als Ursache dieser scheinbaren Kohlensäurevermehrung angesehen werden. Das Prinzip des Apparates gestattet wohl äußerst feine Meßresultate, die aber immer die Summe aller vorkommenden Anionen darstellt.

Diese letzteren, an elektrische Erscheinungen gebundenen chemischen Umsetzungen treten auch schon in den unter I und II festgehaltenen Untersuchungsergebnissen auf. Ihre Wirkungen auf dieselben wurden aber überdeckt durch die viel größere Menge an Kohlensäure, die unter jenen Verhältnissen den Gesetzen des elektrischen Feldes gehorchte.

Wir haben bis jetzt die Versuche, deren Resultate in Tabelle I und II festgehalten sind, in dem Punkte abgebrochen, als nach

Anlegen der Spannung sich die Kohlensäureatmosphäre auf einer neuen Höhe stabilisierte. Die Frage, ob dieses neue Niveau bei Fortsetzung des Versuches andauert, blieb bis jetzt offen. Ferner können wir über die räumliche und zeitliche Verteilung der Kohlensäure im Glaszylinder während der Dauer der Feldeinwirkung nichts aussagen, mit Ausnahme der Tatsache, daß wir am negativen Pol immer geringere Mengen feststellten als am positiven, und diese geringeren Werte nach kürzerer Zeit sich einstellten. Auch werde ich, wenn mir das nachfolgend zu beschreibende Experiment die Antwort auf obige Fragen gibt, durch den Versuch einer physikalischen Begründung kurz auf die Ursache dieser räumlichen Verteilung eingehen.

Tabelle IV.

Verlauf der CO_2-Konzentration im elektrischen Felde.

IV. Atmosphärische Luft.

Temperatur 18° C, relative Luftfeuchtigkeit 53%.

Anfang		Ende	Differenz	CO_2-Prozent	Bemerkungen
1.	9416	9054	0,0362	0,0724	Spannung: 12000 Volt
2.	9420	8996	0,0424	0,0848	Kohlensäureentnahme
3.	9401	9880	0,0521	0,1042	oben, am pos. Pol
4.	9396	9055	0,0341	0,0682	Kohlensäureentnahme
5.	9438	9096	0,0342	0,0684	unten am neg. Pol
6.	9145	8652	0,0493	0,0986	ausgeschaltet
7.	9256	8769	0,0487	0,0974	Kontrollablesungen
8.	9082	8599	0,0483	0,0966	
9.	9088	8609	0,0479	0,0958	

Kohlensäuremenge bei Versuchsbeginn 0,0936 Volumprozent.

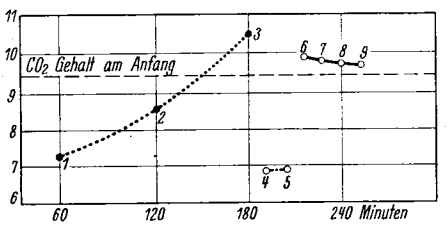


Abb. 23.

Kohlensäuregehalt in Volumprozent der Atmosphäre mal 100.

Tabelle IV zeigt uns die Fortsetzung einer Anordnung einer der Tabelle I entsprechenden Versuchsserie. Die Luftprobeentnahme

findet oben am positiven Pol statt. Die Kohlensäuremenge hat sich in der 60. Minute auf 0,0724 Volumprozent stabilisiert. Alle 12 Minuten wird 50 ccm Frischluft durchgesogen, die Messungen jedoch nur alle 60 Minuten durchgeführt. Von der 60. Minute, seit Einschalten des Stromes an, beginnt sich die Kohlensäureatmosphäre um den positiven Pol zu verdichten und erreicht nach 150 Minuten den Anfangsbestand von 0,0936 Volumprozent.

Nach 180 Minuten brechen wir die Probeentnahme am positiven Pol ab und bestimmen die Kohlensäuremenge unmittelbar am negativen Pol, der sich am Fuße des Glaszylinders befindet. Die Messungen bewegen sich auf der nämlichen Höhe wie bei Einschalten des Stromes zu Anfang des Versuches.

Die Spannung wurde weggenommen. Das erste Meßresultat ergibt gegenüber den Anfangskontrollwerten eine erhöhte Kohlensäuremenge von 5,3% im Zylinder. Dieser Wert sinkt langsam bei den weiteren Resultaten und nähert sich dem anfänglichen Kohlensäuregehalt von 0,0936 Volumprozent. Durch die Feldwirkung trat eine Separierung der Kohlensäure im Glaszylinder ein. Die fortlaufende Luftprobeentnahme bewirkte eine langsame Erneuerung mit Frischluft. Das Zurückhalten der dissoziierten Kohlensäure an der positiven Elektrode mußte daher zu einer Anreicherung der CO_2-Atmosphäre des Glaszylinders führen, was in den letzten Kontrollmessungen sehr deutlich zum Ausdruck kommt. Die mit den weiteren Messungen verbundene Durchlüftung führt, nach Ausschalten des Stromes, wieder zu einer langsamen Annäherung des Kohlensäuregehaltes des Zylinders an denjenigen der Außenluft. Damit hatten die in Tabelle I aufgeführten Abweichungen der Kontrollmessungen ihre Begründung gefunden.

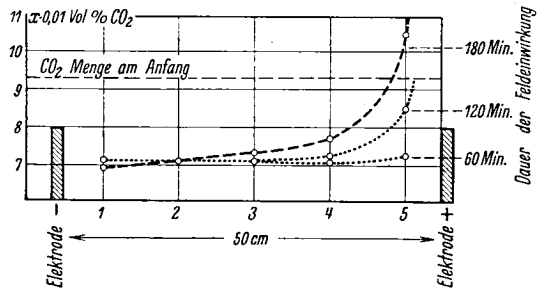


Abb. 24.

Räumliche Verteilung der CO_2 längs der Zylinderachse.

Um von der Verteilung der Kohlensäureatmosphäre im Zylinder ein richtiges Bild zu bekommen, untersuchte ich atmosphärische Luft bei einem mittleren relativen Feuchtigkeitsgehalt von 56%. Dank der längs der Zylinderwand angebrachten fünf Öffnungen konnte die Luftprobeentnahme ohne Störung der Luftsäule durchgeführt werden. Die Messungen erfolgten in Intervallen von 12 Minuten. Wir konstatierten eine mit der Zeit fortlaufende Zunahme der Kohlensäure, die am positiven Pol beginnt, sich verstärkt und langsam gegen den negativen Pol hin sich anreichert.

Wir dürfen diese Ausführungen nicht abschließen, ohne noch des Phänomens der „Elektronenaffinität" des CO_2-Moleküls Erwähnung getan zu haben (vergl. Kap. I). Die Feldstärke zwischen den beiden runden, scheibenförmigen Elektroden — alle scharfen Kanten und Spitzen wurden geflissentlich vermieden — ließen keine Ionen-, besonders Elektrodenzerstreuung zu und führte damit zu einer absolut homogenen, gleichmäßigen Feldwirkung. Wiederholte Kontrollen mit Hilfe eines dazwischen geschalteten Elektrometers brachten regelmäßig eine Bestätigung obiger Annahme. Absolut ließ sich natürlich eine Aufladung des CO_2-Moleküls mit negativer Elektrizität nicht vermeiden; denn innerhalb der Luftsäule müssen wir mit beständigen Zirkulationsströmungen rechnen, die das Gasgemisch mit den Elektroden in Berührung bringt. Ein großer Einfluß scheint jedoch in diesen Versuchen dem mit negativer Elektrizität behafteten CO_2-Moleküle nicht zuzukommen, sonst käme dieses in den Meßresultaten zum Ausdruck.

Zum Abschluß dieser vorerst rein physikalischen Untersuchung zur Elektrokultur wurde an Stelle der metallenen positiven Elektrode $Ba(OH)_2$ verwendet. Zur Kontrolle erfolgte die Aufstellung eines zweiten separaten Zylinders, auf dessen Grund sich ebenfalls eine Schale mit 30 ccm n/4 $Ba(OH)_2$ befand. Nach 2 Stunden 20 Minuten ließ sich im Bariumhydroxyd des ersten Versuchszylinders bereits eine Trübung feststellen, die im andern Gefäß nach 6 Stunden noch nicht auftrat. Gleichzeitig vorgenommene Kohlensäurebestimmungen der Zylinderatmosphäre ergaben die vorauszusehende Tatsache, daß eine Zunahme der Kohlensäure um die als positive Elektrode ausgebildete Schale mit Bariumhydroxyd, ähnlich der in Tabelle IV gezeigten, nicht eintrat. Ich bin mir natürlich der Unexaktheit dieser Methode wohl bewußt, warum ich auch die nachher erhaltenen gewichtsanalytischen Mengen der durch das $Ba(OH)_2$ gebundenen Kohlensäure nicht aufführe. Mit

den unvermeidbaren Luftströmungen wird naturgemäß auch die nicht der Feldeinwirkung unterworfene Kohlensäure in Berührung mit dem Bariumhydroxyd gebracht und gebunden. Für unsere Zwecke genügt die rein makroskopische Feststellung, daß im Bariumhydroxyd des Versuchszylinders schon nach 2 Stunden 20 Minuten eine deutlich sichtbare Trübung eintrat, während bei demjenigen des Kontrollzylinders sich keine derartige Feststellung machen ließ.

e) Versuchsergebnisse und Schlußfolgerungen.

Zusammengefaßt sei kurz folgendes gesagt:

Rund 20% der Kohlensäure in der atmosphärischen Luft unterliegt der elektrischen Feldeinwirkung. Maßgebender Einfluß kommt dabei der Luftfeuchtigkeit zu. Das Wassertröpfchen dient einem Teil der Kohlensäure als Lösungsmittel, von der wieder ein Teil dissoziiert. Kohlensäure in trockener Luft unterliegt, solange sonst keine Ionisierung eintritt, nach den Versuchsergebnissen kaum der elektrischen Feldeinwirkung. Sonst scheint dem Feuchtigkeitsgehalt keine bestimmende Rolle für die Verschiebung obiger Prozentzahl zuzukommen, da die Werte zwischen Versuch I und II nur unwesentlich voneinander abweichen. Die Versuchsergebnisse führen zu folgender biologisch interessanten Frage: Obwohl in hoch ionisierter Luft bei einer positiven Feldrichtung zwischen Luftleiter und Erde die Kohlensäureatmosphäre der unmittelbar die Blattoberfläche berührenden Luftschicht nur $^4/_5$ der übrigen Kohlensäuredichte aufweist, zeigen bisher alle mit einem Mehrertrag abgeschlossenen Elektrokulturversuche diese Feldverhältnisse. Damit ist der Beweis erbracht, daß der Mehrertrag bei der Elektrokultur sich nicht auf ein Kohlensäureproblem zurückführen läßt (vergl. Kap. VI).

VII. Der Einfluß des elektrischen Feldes auf die Transpiration und auf die Wasserstoffionen-Konzentration und den Aschengehalt der Pflanzen.

Galten unsere Untersuchungen in den früheren Kapiteln vorwiegend elektro-physikalischen und elektro-chemischen Fragen auf dem Gebiete der Elektrokultur, wobei eigentlich die Pflanze nur mittelbar in den Bereich unserer Erörterungen hineingezogen wurde, so gilt es nun, dieselbe in ihrem elektro-physiologischen Verhalten

näher zu studieren. Wir lassen dabei bewußt den reizphysiologischen Teil (vergl. Kap. II) außerhalb unserer Untersuchungen und befassen uns mit den viel näher liegenden Problemen der Transpiration, dem Verlauf der Wasserstoffionen-Konzentration der Nährlösungen und des Pflanzensaftes sowie dem Aschengehalt der einer elektrischen Feldeinwirkung unterworfenen Pflanzen.

1. Der Einfluß auf die Transpiration.

Die Versuche über den Einfluß hochleitfähiger Luft auf die Transpiration führten wir mit Tabakpflanzen in Pfefferscher Nährlösung durch. Anschließend untersuchten wir auch die Verschiebungen in der Wasserstoffionen-Konzentration. Als Versuchsgefäße gelangten Akkumulatorengläser zur Verwendung, die mit einem Holzdeckel verschlossen wurden. Die Durchführung der Pflanzenwurzel erfolgte durch ein rundes Loch im Deckel. Ein Agarpfropfen sorgte für Halt und Abschluß. Eine zweite mit einem Korkpfropfen verschlossene Öffnung gestattete die Probeentnahme und das Nachfüllen der Gefäße mit Wasser oder Nährlösung. Zudem wurde die Außenwand des Gefäßes mit einer Staniolhülle versehen. Ein Transpirationsversuch dauerte 24 Stunden. Während dieser Zeit blieb also die Hochspannung beständig eingeschaltet. Die Bestimmung der transpirierten Flüssigkeitsmenge erfolgte durch eine mittelbar vor- und nachher durchgeführte gewichtsanalytische Messung. Kontroll- und Versuchspflanzen wurden auf der Gartenterrasse des Pflanzenphysiologischen Institutes unter sonst gleichen Insolations-, Wind- und Temperaturverhältnissen aufgestellt. Von einer Durchführung der Transpirationsversuche in einem geschlossenen Raum haben wir bewußt abgesehen. Wasseraufnahme und Verdunstung werden dabei durch die künstlich beeinflußten Witterungselemente, wie Temperatur, Feuchtigkeitsgehalt und Luftströmungen maßgebend verändert. Es wurde von Anfang an darauf Gewicht gelegt, daß Versuchs- und Kontrollpflanzen in bezug auf Aussehen und Blattoberfläche einander möglichst entsprachen. Zudem lösten sich zur Überprüfung der Ergebnisse der ersten Versuchsserie die Kontroll- und Versuchspflanzen mit ihren ursprünglichen Nährlösungen in einem Zyklus ab. Zur besseren Übersichtsgestaltung in den Tabellen führen wir nur die absoluten verdunsteten Wassermengen auf.

Transpirierte Wassermenge von Tabakpflanzen in 24 Stunden

Juni 1930	Kontrolle		Negativer Luftleiter		Positiver Luftleiter	
	Gefäß 1	Gefäß 2	Gefäß 3	Gefäß 4	Gefäß 5	Gefäß 6
1.—2.	7,6	5,8	6,7	6,9	8,4	8,8
2.—3.	6,8	5,2	5,9	5,8	8,1	8,0
3.—4.	5,9	4,1	5,6	5,2	7,4	7,8
5.—6.	8,1	6,2	7,3	8,1	9,7	9,5
	Gefäß 3	Gefäß 4	Gefäß 5	Gefäß 6	Gefäß 1	Gefäß 2
7.—8.	5,8	6,1	6,2	6,1	9,7	6,9
9.—10.	6,0	5,7	6,5	6,0	8,6	7,3
10.—11.	6,9	7,1	7,5	6,9	9,7	7,9
11.—12.	5,4	5,2	6,7	6,3	8,5	7,0
	Gefäß 5	Gefäß 6	Gefäß 1	Gefäß 2	Gefäß 3	Gefäß 4
12.—13.	6,3	6,5	6,7	5,5	7,5	7,0
15.—16.	5,2	6,4	6,9	4,7	8,0	8,3
18.—19.	5,9	5,3	7,0	3,4	7,2	8,5
20.—21.	5,1	6,8	6,0	4,2	6,9	8,9

Damit wir die mittleren täglichen Mengen des verdunsteten Wassers, der unter den verschiedenen elektrischen Bedingungen transpirierenden Pflanzen bekommen, addiere ich die Hauptvertikalkolonnen obiger Tabelle und dividiere durch die doppelte Anzahl Versuchstage:

Kontrolle	Negativer Luftleiter	Positiver Luftleiter
6,01 g	6,17 g	8,15 g

Die Messungen bringen den Beweis, daß die Transpiration bei einer positiven Feldwirkung zur Erde sich erhöht. Die umgekehrte Feldwirkung, obwohl die Leitfähigkeit der Luft dadurch ebenfalls erhöht wird, scheint dagegen nach diesen Versuchen keine Vermehrung der Transpiration zur Folge zu haben. Die Transpirationszunahme bei hellem Wetter konnte allerdings nicht in dem Maße beobachtet werden wie bei Lipperheide (35). Möglicherweise darum, weil unsere Versuche im Freien, die andern dagegen im abgeschlossenen Raum stattfanden.

Vergleichen wir die Feststellungen über die Ionenaffinität (Kap. III) mit obigen Versuchsergebnissen, so finden wir darin die

theoretische Erklärung für die Transpirationszunahme ausgedrückt. Die ausgezeichnete Elektronenaffinität des Wasserdampfes schafft unter der Voraussetzung, daß der Luftleiter positiv und die Pflanze negativ aufgeladen ist, optimale Transpirationsbedingungen. Nehmen wir ein Blatt, das sich in höchster Assimilationstätigkeit befindet, so ist für den Umfang der Assimilation insofern eine Grenze gesetzt, als die dabei freiwerdenden Wassermengen erst verdunstet werden müssen. Es wird sich vermutlich in der Intensität der Assimilation ein gewisser Gleichgewichtszustand einstellen, der einerseits abhängig ist von der zugeführten Sonnenenergie und andererseits von der Menge verdunstenden Wassers. Eine Erhöhung der Assimilation über einen gewissen Grad hinaus kann wohl zu einer Verschließung der Spaltöffnungen führen, was automatisch den Zutritt der Kohlensäure zum Assimilationsgewebe verlangsamt. In gleicher Weise wie der Wasserdampf besitzt auch die Kohlensäure Elektronenaffinität.

Aufschlußreich ist es, ebenfalls die Lage der Wasserspalten mit diesen Verhältnissen in Verbindung zu bringen. Diese befinden sich vorherrschend an der Spitze des Blattes, dem Ort der intensivsten Ionenzerstreuung. Dies ist ein besonders begünstigendes Moment für die Erhöhung der Transpiration.

2. Der Einfluß auf die Reaktion der Nährlösung.

Die Messungen über die Verschiebung in der Wasserstoffionenkonzentration der Nährlösungen wurden in Fortsetzung der vorgängig behandelten Transpirationsversuche durchgeführt. Die Zusammensetzung der Nährlösung erfolgte nach den Angaben von Pfeffer. Abweichend davon wurde jedoch nicht destilliertes Wasser, sondern gewöhnliches Leitungswasser aus der städtischen Wasserversorgung verwendet. Kontrollmessungen erbrachten beim letztern eine viel größere Konstanz des pH als beim destillierten Wasser, dessen Werte häufig eine stark ins Gewicht fallende Azidität aufwiesen. Die pH-Werte des Leitungswassers variierten dagegen unwesentlich zwischen 7,03 und 7,09. Ein weiterer ausschlaggebender Vorteil lag ferner in seiner günstigen Pufferwirkung. Dieses Verhalten des aqua fontane muß dem Kalkgehalt sowie der darin gelösten Kohlensäure zugeschrieben werden. Die relativ große Pufferung des Leitungswassers als Lösungsmittel für die Nährlösung verschaffen ihm bei der ohnehin sehr schwachen Salzkonzentration eine bemerkenswerte Stabilität in der Wasserstoff-

ionen-Konzentration. Eine Eigenschaft der Nährlösung, die bei den Tage und Wochen andauernden Versuchen sehr erwünscht ist. Die Regelmäßigkeit im pH-Verlauf müssen wir daher direkt diesem Umstande zuschreiben.

Bei unseren Versuchen kann es sich natürlich nicht darum handeln, die Verschiebung in der Wasserstoffionen-Konzentration im Verlaufe des vier Wochen andauernden Versuches in Beziehung mit der Ursache der Ionenaufnahme zu betrachten. Uns interessiert in erster Linie das Verhalten der Pflanze resp. ihrer Nährlösung in Abhängigkeit zur elektrischen Feldrichtung:

Die Verschiebung der Wasserstoffionenkonzentration der Nährlösung in pH.

I. Kontrolle		II. Negativer Luftleiter		III. Positiver Luftleiter	
Gefäß 1	Gefäß 2	Gefäß 3	Gefäß 4	Gefäß 5	Gefäß 6
6,92	6,83	6,90	6,86	6,58	6,59
6,93	6,80	6,92	6,91	6,59	6,61
6,97	6,81	6,95	6,90	6,56	6,55
6,91	6,79	6,94	6,95	6,49	6,51
6,88	6,80	6,92	6,97	6,52	6,50
6,79	6,82	6,90	6,85	6,38	6,49
6,75	6,70	6,84	6,92	6,30	6,42
6,65	6,73	6,88	6,85	6,28	6,35

Die Veränderungen des pH in den drei Versuchsgruppen sind grundsätzlicher Art. Sowohl die Nährlösung der Kontrollen als ganz besonders derjenigen der unter einer positiven Feldwirkung gestandenen Kulturen machen einen fortlaufenden Versäuerungsprozeß durch. Das pH der Nährlösungen der unter einer negativen Feldwirkung gestandenen Kulturen weist dagegen für die ganze Dauer der Versuche überhaupt keine ins Gewicht fallende Verschiebung auf.

Ergaben unsere fortlaufenden Messungen über den Verlauf des pH in ganz besonderem Maße bei Versuchsgruppe III, positives Luftfeld, eine deutliche Verschiebung zur Azidität hin, so sei hier doch ausdrücklich festgestellt, daß diese in keiner Weise äquivalenten Mengen der tatsächlich von der Pflanze aufgenommenen Nährsalzionen entsprechen muß. Ja selbst dort, wo die Ionenaufnahme mit der pH-Veränderung parallel geht, letztere mehrmals

eine Größenordnung erreicht, die der Mehraufnahme von Kationen oder Anionen entspräche. Die Dissoziationskonstante des Wassers bei 18° C beträgt $0{,}73 \cdot 10^{-14}$, d. h. es sind $0{,}86 \cdot 10^{-7}$ g oder 0,000086 mg äquivalente H-Ionen und ebensoviele mg äquivalente OH-Ionen im Liter anwesend. Kann sich das pH verschieben, so bleibt das Produkt $[H^+] \cdot [OH^-]$ konstant. Wie schon Mevius (38) anführte, werden innerhalb des pH-Bereiches von etwa pH 3 bis pH 9 nicht einmal Milliäquivalente H- und OH-Ionen erreicht. Überhaupt müssen wir uns immer vergegenwärtigen, daß das pH der negative Exponent der Wasserstoffionenkonzentration C_H darstellt. Ein lineares Steigen bzw. Fallen des pH führt daher keine lineare Veränderung der Konzentration der H- bzw. der OH-Ionen mit sich, weil das pH nicht die Wasserstoffionenzahl selbst, sondern deren negativer Logarithmus ist. Trotzdem also die H- bzw. OH-Ionenkonzentrationen mit einer pH-Einheit um das Hundertfache fallen bzw. steigen, sind die absoluten Mengen außerordentlich gering, und ein beobachtetes Fallen oder Steigen des pH bei einseitiger Ionenaufnahme geht mit der äquivalenten Aufnahme bzw. Abgabe von H- oder OH-Ionen nicht parallel. Große Differenzen des pH innerhalb des biologischen Bereiches müssen daher im Grunde genommen nur kleine absolute Verschiebungen der H^+-OH^--Mengen im Gefolge haben. Ein nicht unwesentlicher Einfluß kommt dann ebenfalls in ihrer Wirkung auf die pH-Verschiebung der Pufferung der Lösung, wie den Konzentrationen im allgemeinen zu. Wie Pirschle und Mengdehl (43) nachweisen, unterliegt das Verhältnis der von der Pflanze aufgenommenen OH-Ionen zu den H-Ionen einer stetigen Veränderung sowohl nach der Zeit als ganz besonders auch nach den verfügbaren Mineralsalzen in der Nährlösung, also nach ihrer Konzentration. Aber auch anderen Forschern wie Mevius, Pirschle (42), Kappen (28) u. a. gelang es nicht, zwischen der Verschiebung der Wasserstoffionenkonzentration in der Nährlösung und der Menge aufgenommener Ionen durch die Pflanze ein Äquivalentverhältnis zu finden. Der Ionenaustausch als Folge des normalen luftelektrischen Vertikalstromes führt naturgemäß zu einer vermehrten Ausscheidung von H-Ionen an der Wurzel. Allerdings ist die Forschung über die Rolle, die den H- und OH-Ionen der Pflanze wegen ihrer schweren Permeierbarkeit als Austauschionen zukommt, noch geteilter Meinung. Vergleichen wir die über die ganze Dauer des Versuches sich gleichbleibenden Wasserstoffionenkonzentrationen der Versuchs-

gruppe II mit dem pH von III, so könnte man mit einiger Berechtigung vermuten, daß die Behauptung über das schlechte Permeieren wohl für die OH-Ionen, nicht oder weniger für die H-Ionen zutrifft (57). Da wir aber die Pufferwirkung der Nährlösung nicht kennen, so läßt sich nichts Bestimmtes darüber aussagen. In bezug auf die mögliche Ausscheidung der H-Ionen läßt sich nur noch sagen, daß das Aufschließen der mineralischen Nährstoffe und ihre Überführung in eine für die Pflanze aufnahmefähige Form in wirksamster Weise durch Ausscheidung von Säuren aus den Wurzeln, besonders von CO_2, erfolgt. Dabei soll auch die hydrolytische gesteinsaufschließende Wirkung des Wassers erwähnt werden. H-Ionenabsonderung als Folge der natürlichen elektrischen Feldwirkung kommt auch hier in Betracht.

3. Der Einfluß auf die Wasserstoffionenkonzentration des Pflanzensaftes.

Beim vorhergehenden Abschnitt konnten wir mit Interesse feststellen, wie die Nährlösung der elektrisierten Pflanzen im Laufe der Zeit bei einer positiven Feldwirkung allmählich saurere Werte annimmt. In diesem Abschnitt suchen wir Aufschluß zu erhalten über die Reaktionsverhältnisse der Pflanzenpreßsäfte. Damit verlassen wir die den Pflanzenkörper umhüllenden Medien und dringen in die Pflanze selbst ein.

Um uns von vornherein ein klares Bild von der Versuchsmethode zu machen, sei vorerst kurz auf diese selbst eingegangen. Durch das Auspressen krautiger Pflanzenorgane (vorwiegend Blätter und junge Stengelpartien) erfolgt eine Vernichtung der Zellstruktur und damit die Bloßlegung der Plasmamassen. Diese bleiben auch außerhalb des Zellverbandes noch eine Zeitlang am Leben, atmen, setzen also Stoffe um. Da sie in unmittelbarer Berührung mit dem Luftsauerstoff stehen, ist die Oxydation eine viel intensivere. Das Herauspressen des Pflanzensaftes stellt gegenüber dem Leben der Pflanze den denkbar gröbsten Eingriff dar, durch den der normale Chemismus des Pflanzensaftes und seine Reaktionsverhältnisse nicht unerheblich beeinflußt werden. Die pH-Messungen dürfen wir daher nur relativ bewerten, und auch so halten wir auf eine strenge Methodik bei der Gewinnung des Preßsaftes. Besonders zwischen dem Moment des Auspressens und dem Zeitpunkt der Ausführung der Messungen wurde durchgehend ein Zeitunterschied von einer halben Stunde eingehalten. Preßsäfte, die über 2 Stunden

aufgestellt wurden, zeigten gegenüber der ersten Messung meist eine wesentliche Abweichung.

Besondere Aufmerksamkeit mußte auch auf die Gleichaltrigkeit des Materials gelegt werden, wie junge und alte Blätter, dann ebenfalls auf die zu verwendenden Organe überhaupt. Schon Gustafson (16) zeigte, daß ältere Blätter höhere pH-Werte aufweisen als junge Blätter.

Unsere Untersuchungen über die Reaktionsverhältnisse der Pflanzensäfte wurden mit *Vitis vinifera* sowie *Solanum lycopersicum* durchgeführt. Die Feldeinwirkung erfolgte während einer ganzen Vegetationsperiode. Die pH-Messungen wurden dagegen nur während des Monats August 1931 durchgeführt. Der Luftleiter ist wie bei allen übrigen Feldversuchen positiv aufgeladen. Die pH-Messungen selbst wurden elektrometrisch durchgeführt. Zur Verwendung gelangten Mikrogläser. Diese gestatteten noch mit Preßsaftmengen von 2—300 cmm absolut einwandfreie Resultate. Das Material zum Auspressen bestand, wie erwähnt, ausschließlich aus jungen Blättern und Trieben. Die Blattproben wurden jeweils morgens und abends gepflückt und die Vorbereitungen und Messungen in oben beschriebener Weise durchgeführt. In nachstehender Tabelle sind die pH-Werte dieser Messungen eingetragen:

August 1931	Tageszeit	*Vitis vinifera*			*Solanum lycopersicum*		
		Versuch pH	Kontrolle pH	Differenz pH	Versuch pH	Kontrolle pH	Differenz pH
10.	morgens	3,63	3,39	0,24	5,59	5,37	0,22
	abends	3,96	3,71	0,25	6,30	6,00	0,30
13.	morgens	3,91	3,68	0,23	5,61	5,37	0,24
	abends	4,07	3,84	0,23	6,51	6,26	0,25
14.	morgens	3,79	3,51	0,28	5,97	5,74	0,23
	abends	4,12	3,89	0,23	7,14	6,92	0,22
17.	morgens	3,67	3,45	0,22	5,70	5,29	0,31
	abends	3,99	3,78	0,21	6,98	6,71	0,27

Was ohne weiteres beim Vergleich als bemerkenswert in die Augen springt ist, das Folgende:

1. Im Durchschnitt der Messungen ist der Preßsaft bei der Rebe um volle 2 pH saurer als bei der Tomate. Die geringe Azidität bei den Solanaceen scheint überhaupt Familienmerkmal zu sein. Und entsprechend verhalten sich auch die Ansprüche

gegenüber dem Boden. Liebt die Rebe einen kalkreichen Boden als Standort, so zieht z. B. die Kartoffel wie auch die Tomate saure Bodenreaktion schon im Hinblick auf eine größere Widerstandskraft gegenüber Krankheiten vor (Schorf usw.). Es hat den Anschein, als ob in diesem entgegengesetzten Verhalten der optimalen Aziditätsverhältnisse des Pflanzensaftes und des Bodens lebenswichtige Wechselbeziehungen bestünden.

2. Betrachten wir den Reaktionsverlauf der Versuchs- und Kontrollpflanzen für sich, so fällt die durchgehend geringere Azidität der ersteren gegenüber den letzteren auf. Am bemerkenswertesten ist dabei die Konstanz im Unterschied des pH, und zwar nicht nur innerhalb derselben Art, sondern bei beiden Versuchspflanzen. Bevor wir uns über dieses Ergebnis näher äußern, wollen wir uns

3. über den täglichen Verlauf der Azidität kurz aussprechen. Bei Kontrollen und Versuchspflanzen nimmt die Azidität im Laufe

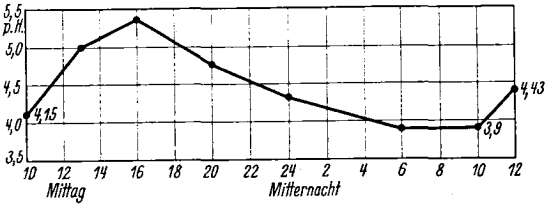


Abb. 25. Täglicher Verlauf der Wasserstoffionenkonzentration in *Bryophyllum* (nach Gustafson).

des Tages ab, nähert sich dem Neutralpunkte, ja bei *S. lycopersicum* ergibt eine Messung bei den Versuchspflanzen einen deutlichen alkalischen Wert. Die täglichen Unterschiede in der Wasserstoffionenkonzentration weisen dabei ganz beträchtliche Werte auf, und absolut gemessen, vermögen sie die Einflüsse der elektrischen Feldeinwirkung besonders bei Tomaten um einen 5—6 fachen Betrag zu überdecken. Weniger bei *Vitis vinifera*, wo der tägliche Unterschied ebenfalls eindeutig ausfiel, aber der Spielraum in der Wasserstoffionenkonzentration in engeren Grenzen blieb. Schon Gustafson fand einen ähnlichen täglichen Verlauf des pH in *Bryophyllum calicinum* (46).

Im weiteren fand Gustafson eine Abhängigkeit des täglichen Reaktionsverlaufes von den äußeren Witterungseinflüssen, besonders ob Sonnenschein oder Nebel herrschte. Prof. Jaccard bringt den Reaktionsverlauf in direkten Zusammenhang mit der Intensität der Assimilation.

Vergleichen wir den in seinen täglichen Minimal- und Maximalausschlägen unregelmäßigen Verlauf der Wasserstoffionenkonzentration der Kontrollpflanzen mit dem konstanten alkalischen Meßzuschlag von 0,2—0,3 pH bei den Versuchspflanzen, so taucht ohne weiteres die Gewißheit auf, daß wir es hier mit zwei sich überdeckenden Vorgängen zu tun haben. Je tiefer wir in den Lebenshaushalt der Pflanze eindringen, um so mehr überrascht uns der hoch entwickelte differenzierte Bau ihrer Organe und deren physiologische Funktionen. Auf unsere früheren Versuchsergebnisse und Überlegungen aufbauend, trennen wir scharf zwischen den Wasserleitungsbahnen unddem eigentlichen Assimilationsgewebe.

Die Wasserleitungsbahnen mit der langsam aufsteigenden Wassersäule und den in ihr enthaltenen Elektrolyten, den Mineralstoffen sowie eventuell hydrophyler Kolloide sind die Träger der Ionen und vermitteln zur Hauptsache den Ladungsausgleich. Wie die künstliche elektrische Feldwirkung den natürlichen Ionenhaushalt des Nährsalzaufstieges schon rein physikalisch beeinflußt, haben wir im einleitenden Kapitel behandelt. Wir haben dort gezeigt, daß bei einem positiv geladenen Luftleiter zur Erde schon rein durch die dadurch bedingte Auswahl der Elektrolyte eine Verschiebung der Wasserstoffionenkonzentration der aufsteigenden Wassersäule erfolgen muß. Berücksichtigen wir noch die außerordentlich geringen Wasserstoffionenkonzentrationen, so können schon geringe Veränderungen das pH merklich verschieben. Die Versuche haben unsere Vermutungen bestätigt. Die Meßergebnisse haben daher gleichzeitig auf ein wichtiges physikalisches Phänomen hingewiesen, d. h. die amphoteren Elektrolyte und ihre Rolle im Lebenshaushalt der Pflanze. Die ununterbrochene Einwirkung des elektrischen Feldes müßte eine stetige Verschiebung der Reaktion von der Azidität weg zur Alkaleszenz hin im Gefolge haben. Unsere Versuchsmessungen zeigen, daß dem aber nicht so ist. Die Verschiebung macht im Durchschnitt nur 0,25 pH aus, wir wollen sie den Alkaleszenzfaktor nennen. Diese Ergebnisse lassen sich durch zwei Hinweise zusammenfassen:

1. Die Wasserstoffionenkonzentration des aufsteigenden Wasserstromes besitzt eine für die Pflanzen zulässige Variationsbreite zur Alkaleszenz hin, die trotz weiter andauernder elektrischer Einwirkung, was gleichbedeutend mit einer vermehrten Aufnahme von OH-Ionen ist, konstant bleibt.

2. Ein solcher Zustand kann nur möglich sein, wenn andere Einflüsse die Rolle des Ionenausgleiches übernehmen, und das sind die amphoteren Elektrolyte. Es hat den Anschein, daß diese Hormonen ähnlichen Stoffe im Moment, wo die Abweichung der Reaktion vom optimalen, der betreffenden Pflanzenart am meisten zusagenden, Wert erfolgt, durch Abspalten von OH- und H-Ionen die Wasserstoffionenkonzentration innerhalb zusätzlicher Werte reguliert.

Kommen wir wieder zurück zu den außerordentlichen Schwankungen der Wasserstoffionenkonzentration in bezug auf den gesamten Pflanzensaft, so scheint der zulässige Variationsbereich der Reaktion im Assimilationsgewebe innerhalb viel weiterer Grenzen zu liegen als bei den Wasserleitungsbahnen, die bei ihrem bedeutend kleineren elektrischen Widerstand in erster Linie für die Leitung des luftelektrischen Vertikalstromes in Frage kommen. Schon rein diese Überlegungen öffnen dem Studium der inneren Sekretion im Pflanzenkörper, vor allem dem Wesen und Verhalten der amphoteren Elektrolyte, ein vielversprechendes Untersuchungsgebiet.

4. Der Einfluß der ionisierten Luft auf den P_2O_5-, K_2O- und Eiweißgehalt der Pflanzen.

Wir beschränken unsere Untersuchungen über das weitläufige Gebiet der Mineralstoffaufnahme von Anfang an auf das Studium dieser wenigen in der Überschrift angedeuteten Teilfragen. Es galt weniger die Mineralstoffaufnahme an sich zu untersuchen, obwohl wir uns unter Zugrundelegung unserer diesbezüglichen Versuchsergebnisse gestatten werden, im Schlußabschnitt dieses Kapitels darauf einzugehen, als vergleichsweise über den Mineralstoffgehalt der Kontroll- und Versuchspflanzen Aufschluß zu erhalten.

Wir wählten die direkte Methode des Mineralstoffnachweises, d. h. wir untersuchten nicht die Nährlösungen auf die Menge der nicht aufgenommenen Nährsalze, sondern wir veraschten eine bestimmte Menge lufttrockenen Pflanzenmaterials und bestimmten einerseits die darin enthaltenen Mengen an zitratlöslicher Phosphorsäure (56) sowie des Kaligehaltes nach Mitscherlich (56). Der Eiweißgehalt wurde über die N-Nachweismethode von Kieldahl (56) berechnet. Daß die Mineralstoffaufnahme der Pflanzen bei hochionisierter Luft tatsächlich größer ist, hat schon Lipperheide mit seinen Versuchen gezeigt, indem er die Nahrlösungen eindampfte

und die Summe der Nährsalzrückstände gewichtsanalytisch bestimmte.

Zu unseren diesbezüglichen Untersuchungen standen uns Karotten zur Verfügung, die auf der Versuchsterrasse des Pflanzenphysiologischen Institutes in weiten Trögen während einer ganzen Vegetationsperiode kultiviert wurden.

	Versuch	Kontrolle
Frischgewicht	2690,0 g	2030,0 g
Trockengewicht	339,0 g	250,5 g
Wassergehalt	2350,4 g	1779,5 g
Trockengewicht in Prozent des Frischgewichtes	12,63%	12,31%

Wesentlich ist weniger das kaum ins Gewicht fallende relativ größere Trockengewicht als die absoluten, mengenmäßigen Unterschiede zugunsten der elektrischen Pflanzen[1]).

Zu den einzeln durchgeführten Mineralstoffanalysen wurden zu je drei Parallelanalysen je 10 g luftgetrocknete Karottenblätter verwendet. Die Durchführung derselben erfolgte nach den aus-

[1]) Nach Abschluß der vorliegenden Arbeit ermöglichte das freundliche Entgegenkommen von Herrn Prof. Jaccard die Anlage einer neuen aufschlußreichen Versuchsserie. Diese wurde im Sommer 1932 auf der ausgedehnten Versuchsterrasse des pflanzenphysiologischen Institutes durchgeführt und basierte in ihren Anordnungen auf den Versuchsergebnissen vorliegender Arbeit. Die Spannung wurde auf 30000 Volt Gleichstrom erhöht und der Luftleiter 50—60 cm von den Vegetationsspitzen entfernt aufgehängt. Zur Unterhaltung einer intensiven Ionenzerstreuung wurde er mit zahlreichen nadelscharfen Spitzen versehen. Als Versuchspflanzen dienten Gerste und Weizen.

Nachfolgend die Ernteergebnisse. Der Ertrag der Versuchsserien ist auf den Ertrag der Kontrollserien bezogen.

	frisch		trocken	
	Kontrolle	Versuch	Kontrolle	Versuch
Weizen	100	108	100	107
Gerste	100	134	100	136

Der Wasseranteil von Versuchs- und Kontrollpflanzen läßt keine Vergleiche zu. Auffallend ist dagegen besonders bei Gerste die Ertragszunahme der Versuchsserie. Bei Weizen scheinen sowohl die Versuchs- wie Kontrollpflanzen unter der Keimfähigkeit des Saatgutes zu leiden.

Im übrigen können diese Versuche als weitere Bestätigung früherer Versuchsergebnisse gewertet werden.

probierten Methoden gemäß Wiegner „Agrikulturchemisches Praktikum".

Versuchsserie	Versuch		Kontrolle	
	K_2O	P_2O_5	K_2O	P_2O_5
1	249,7 mg	73,5 mg	246,6 mg	84,9 mg
2	230,6 mg	87,0 mg	243,3 mg	81,4 mg
3	242,1 mg	82,8 mg	238,5 mg	70,0 mg

Den Stickstoffgehalt betrachten wir am besten in seiner Beziehung zum pflanzlichen Eiweiß und drücken denselben in Prozenten zum Trockengewicht aus.

	Versuch	Kontrolle
Wassergehalt der lufttrockenen Karottenblätter	12,15 %	10,4 %
Eiweißgehalt 1	7,74 %	7,78 %
Eiweißgehalt 2	7,35 %	7,25 %
Eiweißgehalt 3	7,89 %	7,80 %

Wesentliche Unterschiede im Mineralstoffgehalt zwischen Versuchs- und Kontrollpflanzen zeigen die Analysenresultate nicht. Wohl ergaben die im elektrischen Feld gewachsenen Karotten, gemessen am Trockengewicht, gegenüber den Kontrollen einen Mehrertrag von 25,5 %. Eine Vergrößerung der Mineralstoffaufnahme scheint sich dabei weniger in einer Anreicherung je Gewichtseinheit Pflanzenkörper auszudrücken als in einer vermehrten Neuproduktion an pflanzlicher Substanz überhaupt. Lipperheide analysierte den Mineralstoffgehalt in der Pflanze zwar nicht, er konstatierte dagegen ebenfalls eine Vergrößerung der Blattoberfläche und des Trockengewichtes bei den Versuchspflanzen (34):

	Blattoberfläche	Trockengewicht
Kontrolle	21,18 qcm	0,6147 g
Versuch	40,89 qcm	1,0856 g

Zur abschließenden Charakterisierung, daß sich die vermehrte Ionenaufnahme in einer Substanzanreicherung des Pflanzenkörpers ausdrückt, soll folgendes Ernteergebnis an Tomaten dienen. Der Luftleiter besteht aus positiv aufgeladenen Stacheldrahtringen über den einzelnen Tomatenpflanzen.

	Versuch 4 Tomatenstöcke	Kontrolle 4 Tomatenstöcke
Pflanze und Früchte . . .	7,295 kg	5,920 kg
Stauden ohne Früchte . .	3,430 kg	3,450 kg
Früchte	3,865 kg	2,470 kg
Anzahl reife Früchte . . .	52 Stück	27 Stück
Anzahl unreife Früchte . .	46 „	38 „
Total der Früchte	98 Stück	65 Stück
Durchschnittliches Gewicht je Frucht	38,3 g	38,6 g

Die Versuchspflanzen weisen wohl einen viel größeren Fruchtansatz auf, das durchschnittliche Einzelfruchtgewicht bleibt aber das gleiche. Die Tomatenstöcke wurden über die ganze Vegetationsdauer einzeln in Töpfen gezogen. Eine Freilandkultivierung wäre der Allgemeinentwicklung wohl förderlicher gewesen und hätte, wenn auch kaum den Fruchtansatz, so doch die Größenausbildung der Früchte beeinflußt.

Das nämliche Gewicht der Stauden ist eine Zufälligkeit.

5. Schlußfolgerungen.

Der beschränkte Rahmen unseres Versuchsprogramms ließ uns von Anfang an keine abschließenden Resultate in bezug auf die qualitative und quantitative Ionenaufnahme der Pflanze erwarten. Wohl brachten sie abklärende Teilergebnisse im besonderen über die Transpiration, die Reaktionsverschiebungen des pH in der Nährlösung und im Pflanzenpreßsaft, sowie Einblick in den Mineralstoffgehalt der unter den verschiedenen luftelektrischen Bedingungen gewachsenen Pflanzen.

Offen steht noch die Frage über die eigentliche Mechanik der Ionenauswahl. Der Umstand, daß die Leitung der aus dem Boden aufgenommenen Stoffe vorwiegend durch die toten Zellröhren der Gefäße erfolgt, spricht nicht dagegen, ein gewisses chemisches und elektrolytisches Wahlvermögen der Zelle auszunehmen, da die Substanzen mindestens durch mehrere Zellschichten hindurchgehen müssen, ehe sie in die Leitungsbahnen gelangen. Die an die Zone der Wurzelhaare angeschlossenen Zellagen, ganz besonders aber die Endodermiszellen, üben ein wichtiges qualitatives und quantitatives Wahlvermögen aus. Aber auch an den Konzentrations-

bereich des Protoplasmas dieser Zellen müssen erhöhte Anforderungen gestellt werden, was wiederum nach der gegenwärtigen Erkenntnis eine starke Pufferung des Zellsaftes voraussetzt. Ebenso zeigt der osmotische Wert zwischen dem Wasserleitungsgewebe und den an das Wurzelhaar angeschlossenen Zellen meistens einen ganz wesentlichen Unterschied, ja Ursprung (55) spricht direkt von einem „Endodermissprung". Es ist das Nächstliegende, diese Rolle der Gegenwart amphoterer Elektrolyte zuzuweisen, die in der Lage sind, durch eine wahlweise Abgabe von H- und OH-Ionen die Wasserstoffionenkonzentrationen des Plasmas innerhalb letaler Grenzen zu erhalten. Ob der Puffer allen aufzunehmenden Nährstoffkonzentrationen gerecht zu werden vermag, ist eine offene Frage, und möglicherweise läßt sich der starke Wechsel in den eigentlichen aktiven Saugpartien der Wurzel, bis zu einem gewissen Grade, mit der aus obigen Ausführungen herzuleitenden kurzen Lebensdauer dieser Zellpartien erklären.

Das Wahlvermögen, welches die Mizellarstruktur der Zellmembran und vor allem die Plasmahaut der eindringenden Außenlösung entgegenstellt, dürfte nach heutiger Ansicht wiederum dem Umladevermögen der Zellkolloide zuzuschreiben sein, wobei Hand in Hand eine Veränderung des elektrischen Zellpotentials einhergeht. Über die Größe und die Richtung der innerhalb der Zelle sich abspielenden elektrischen Ladungsvorgänge und Konzentrationsverschiebungen ist man noch getrennter Meinung, es ist wünschenswert, daß dem Studium dieser Fragen in Zukunft vermehrte Aufmerksamkeit geschenkt wird.

Auch den Interzellularen ist nach Nathansohn (40) für den anorganischen Stoffkreislauf in der Pflanze ein elektives Festhalte- und Ausscheidevermögen für gewisse Mineralstoffe zuzuschreiben. Wie bei Pirschle und Mengdehl (43) bei ihren Versuchen über die Ionenaufnahme aus Salzlösungen eine äquivalente Aufnahme von Kationen und Anionen aus den Nährlösungen nicht zu beobachten war, so haben auch unsere Versuche nur eine Bestätigung ihrer Ergebnisse gebracht. Daraus dürfte die Feststellung für eine Aufnahme der Mineralien in Ionenform und nicht in Molekülform resultieren.

Auf alle Fälle müssen wir in bezug auf die Salzaufnahme Pantanelli (41) zustimmen. „Die elektrokapillare Ionenadsorption aus stark verdünnten Lösungen stellt den normalen Mechanismus der Salzaufnahme dar und wird vom unversehrten Plasma ent-

sprechend reguliert. Der osmotische Durchgang der Salzmoleküle ist ein pathologischer Absorptionsmechanismus, welcher bei hohen Grenzkonzentrationen außerhalb des Regulationsvermögens einsetzt."

VIII. Praktische Nutzanwendung der Elektrokultur.

Versuchsprogramm und Durchführung der Versuche nahmen von Anfang an weniger Rücksicht auf die Bedürfnisse einer späteren praktischen Nutzanwendung der Elektrokultur. Sie dienten vielmehr der Erforschung der elektrochemischen und elektrophysiologischen Vorgänge in der Phytosphäre und in der Pflanze bei Gegenwart hoch leitfähiger Luft. Obwohl unsere Versuche in mehr als einer Richtung abklärende Ergebnisse gezeitigt haben, so wäre es bei der außerordentlichen Kompliziertheit der Probleme, die sich namentlich in einer Überdeckung zahlreicher Einzelvorgänge äußern, verfrüht, uns über zukünftige praktische Erfolgsaussichten der Elektrokultur in abschließender, positiver oder negativer Form festzulegen. In diesem Sinne können wir uns nur dem schon von P. Jaccard an die Praxis gerichteten Worte anschließen (21 u. 22), „daß wohl die künstliche Elektrisierung der Kulturen imstande ist, in der Mehrzahl der Versuche die Erträge zu steigern, daß wir aber die Landwirtschaft vor verfrühten Hoffnungen warnen müssen." Ein Mehrertrag garantiert an sich noch nicht den wirtschaftlichen Erfolg der Kulturmethode, eine Tatsache, die ganz besonders auch bei der Elektrokultur zutrifft. Die Apparaturen und der Betrieb verlangen große Aufwendungen, und solange es nicht gelingt, durch die Versuchsgestaltung bestimmenden Einfluß auf die Größe und Richtung des Mehrertrages zu erlangen, solange haben wir den zukünftigen praktischen Erfolgsaussichten der Elektrokultur mit einiger Reserve zu begegnen. Dabei muß im Interesse einer allseitigen Abklärung der durch die Laboratoriumsversuche erhaltenen Resultate der groß angelegten Freilandkultur wieder vermehrte Aufmerksamkeit geschenkt werden. Nur diese liefert uns unabhängig von störenden Laboratoriumseinflüssen die Beweise für die Richtigkeit der auf Grund früherer Versuche erhaltenen Ergebnisse und daraus gezogener Schlußfolgerung.

Um die Praxis vor übereilten Versuchen zu warnen, sei hier die Feststellung gemacht, daß die Freilandkulturen wohl im Interesse einer vermehrten Abklärung erwünscht sind, diese aber

heute noch in engster Anlehnung an die Versuchslaboratorien durchgeführt werden sollten. Dessenungeachtet kann auch der an eine seriöse Versuchsdurchführung gewohnte Praktiker für die Erforschung der Elektrokultur wertvolle Hilfsdienste leisten. In diesem Sinne möchten wir denn auch die nachfolgenden Richtlinien, wie sie sich aus unseren Versuchen herleiten lassen, aufgefaßt wissen:

1. Unsere Untersuchungen haben gezeigt, daß jedes normale Pflanzenwachstum an elektrische Vorgänge gebunden ist. Das normale luftelektrische Feld ist dabei im besonderen Maße berufen, durch den dadurch bedingten Vertikalstrom qualitativen und quantitativen Einfluß auf den Mineralstoffhaushalt der Pflanze auszuüben. Wir trachteten daher von Anfang an danach, unsere Versuche in engster Anlehnung an diese natürlichen luftelektrischen Verhältnisse durchzuführen. Es gilt nicht neue Phänomene in den pflanzlichen Wachstumsprozeß hineinzubringen, sondern schon bestehende Zustände zu verstärken und, wenn möglich, optimal zu gestalten. Abweichend von der Versuchsdurchführung Lipperheides, der ausschließlich in einem separaten Ionisator erzeugte hochionisierte Luft über die Pflanze leitete, hielten wir an dem schon von Lemström in die Elektrokultur eingeführten elektrischen Feld fest und erzeugten die Ionen durch entsprechende Ausbildung und Oberflächengestaltung des Konduktors, des Luftleiters. Dieser wurde in Anlehnung des normalen luftelektrischen Potentialgefälles positiv gegenüber der Erde aufgeladen.

2. Ein wesentliches Moment bildet die Höhe und Art der Spannung. Aus Gründen, die wir schon in Kap. IV näher behandelt haben, muß die Spannung so hoch gewählt werden, daß bei zweckmäßigster Ausbildung des Luftleiters (Spitzen, Sprühdrähte) die Feldstärke zwischen ihm und den ihn umgebenden Luftteilchen so groß ist, daß eine Ionenzerstreuung eintritt. Dies ist notwendig, damit für das Pflanzenwachstum schädliche Nebenerscheinungen, wie sie vor allem durch die Stoßionisation auftreten, verhindert werden.

3. Die Rolle, die der epidermalen Ausbildung der Pflanzenorgane in ihrem Einfluß auf die negative Elektrizitätszerstreuung zukommt, haben unsere Untersuchungen besonders bei den verschiedensten Getreidearten gezeigt. Der erhöhte Einfluß auf die Transpiration muß als Folge der Elektronenaffinität des Wasserdampfes und des sich bildenden elektrischen Windes angesprochen werden.

4. Uns über die mögliche zukünftige Versuchsgestaltung aussprechend, sind wir der Ansicht, daß sich die Versuchsspannungen wieder jenen Höhen zuzuwenden haben, wie sie schon von Breslauer zur Anwendung gelangten. Eine Spannung von 20000 Volt dürfte dabei die untere Grenze für Feldversuche darstellen. Bei der Ausbildung des Luftleiters haben wir ein Hauptaugenmerk auf seine Rolle als positiven Ionenzerstreuer zu richten. Wir empfehlen dabei weniger das Anbringen von Spitzen als vielmehr von Sprühdrähten.

Literaturverzeichnis.

1. Breslauer, Beeinflussung des Pflanzenwachstums durch ionisierte Luft. Diskussionsvortrag. Bulletin des Schweiz. Elektrotechn. Vereins, Nr. 7, 1913.
2. Breslauer, Die Elektrokultur im Jahre 1909. Deutsche Landwirtschaftliche Presse, 1910, S. 50.
3. Aufsatz zum Vortrag von Dr. Max Breslauer über Elektrokultur im „Bulletin", Nr. 8, 1911, des Schweiz. Elektrotechn. Vereins.
4. Blackmann, Field Experiments in Electro-Culture. Journ. of Agric. Science, Vol. XIV, II. Teil, April 1924.
5. Chouchak, M. D., L'Assimilation Chlorophylienne de l'acide carbonique par les feuilles vertes dans un champs électrique. Revue générale de botanique, 1929, Paris, p. 465.
6. Clausen-Heide, Die Erfolge der Elektrokultur in Hede-Wigenkogg, Wochenblatt für Schleswig-Holstein, 1911, Jahrg. 61.
7. Collins, Electric stimulation of Plant Growth. Journal of Agricultural Research, Vo. 38, Nr. 11, 1929, U.S.A.
8. Daunderer, Physik. Zeitschrift, **8**, 281, 1907.
9. Ebert, Physik. Zeitschrift, **6**, 617, 1905.
10. —, Physik. Zeitschrift, **3**, 338, 1902.
11. Ehrlich u Russ, Über den Verlauf der Stickstoffoxydation bei elektrischen Entladungen in Gegenwart von Ozon. Wien 1911.
12. Fischer, Berliner B. 39/940, 2557, 363', 40/443, 1111, 1907.
13. —, F., Zeitschrift für technische Physik, **9**, 612, 1931.
14. Försterling u. Lassen, Die Ionisation der Atmosphäre. Zeitschrift für techn. Physik, **10**, 1932.
15. Greinacher, Ionen und Elektronenlehre der Gase. Bern 1923.
16. Gustafson, Gradient in Plants. Amerik. Journ. of Botany, XI, 1—6, 1924.
17. Gut, Le gaz carbonique dans l'atmosphère forestière. Diss. Zürich E.T.H., p. 14 et s.
18. Hautefeuille u. Chappuis, Journ. Chem. Soc. 73, 1898.
19. Herrschler, Studien zu dem Problem der Ozonbildung, 1926.
20. Hölzel, Luftelektrisches Potentialgefälle und Gewittervorhersage. Leipzig 1919.

21. Jaccard, P., Was können wir von der Elektrokultur erwarten? Schweiz. landw. Monatshefte Nr. 6, 1927.
22. —, Hochspannungsgleichrichter für Elektrokultur. Bull. des Schweiz. Elektrotechn. Vereins Nr. 14, 1928.
23. —, Que pouvons-nous attendre de l'électroculture? Bull. Soc. vaud. sc. nat. Lausanne. Vol. 56, p. 333—354, 1927.
24. —, Expériences d'électroculture I. Verhandlung der 100. Jahresversammlung der schweiz. Naturforsch. Gesellschaft in Lugano 1917?
25. — et L. Farny, Expérien ces d'électroculture II. Verhandlung der 105. Jahresversammlung der schweiz. Naturforsch. Gesellschaft in Luzern 1922?
26. Jahn, Zeitschr. f. anorg. Chemie, **60**, 337, 1908.
27. Kanitz, Zeitschr. Physiolog. Chemie, Bd. 47, 477, 1908.
28. Kappen, Bodenacidität, Berlin 1929, Verlag Springer.
29. Kostytschew, Lehrbuch der Pflanzenphysiologie, 1926.
30. Kühn, J., Bisheriges Ergebnis der auf dem Versuchsfelde des Landwirtschaftlichen Instituts der Universität Halle angestellten Elektrokulturversuche. Ber. aus d. Landw. Inst. d. Univ. Halle, **20**, 1911.
31. Lemström, S., Expériences sur l'influence de l'éctricité sur les végétaux. Helsingfors 1890.
32. —, Elektrokultur, Berlin 1902.
33. Lenard, Ph., Annalen der Physik. 1900, S. 486ff.
34. — u. Ramsauer, Über die Wirkung sehr kurzwelligen Lichtes und über eine sehr reiche Quelle dieses Lichtes. Berichte Heidelberger Akademie 1909, II.
35. Lipperheide, C., Neuere Untersuchungen über den Einfluß der Elektrizität auf Pflanzen. Angewandte Botanik, Bd. IX, S. 561, 1927.
36. Lutz, Münchener Berichte, 333, 1911.
37. Mache u. Schweidler, Die atmosphärische Elektrizität. Braunschweig 1909, S. 113.
38. Mevius, Reaktion des Bodens und Pflanzenwachstum. München 1927.
39. Möller, Physik. Zeitschrift, 13/729, 1912.
40. Nathanson, Über Regulationserscheinungen im Stoffaustausch. Jahrb. für wissenschaftl. Botanik, **38**, 1903.
41. Pantanelli, Über Ionenaufnahme. Protoplasma, **7**, 1929, S. 129—137.
42. Pirschle, Nitrate und Amonsalze als Stickstoffquellen für höhere Pflanzen bei konstanter Wasserstoffionenkonzentration. Berichte der Deutschen Botanischen Gesellschaft, **47**, 1929.
43. — u. Mengdehl, Ionenaufnahme aus Salzlösungen durch höhere Pflanzen. Jahrb. f. wissenschaftl. Bot., Leipzig 1931.
44. Shenstone u. Evans, Journ. Chem. Soc. 73, 1898.
45. Simpson, Phil. Trans A. 205, 61 (1905).
46. Small, Hydrogen-ion concentration in Plant Cells and Tissues. Berlin 1929.
47. Spiro, Hofmeisters Beiträge, Bd. V, 1904.
48. Stern, K., Über elektroosmotische Erscheinungen und ihre Bedeutung für pflanzenphysiologische Fragen. Zeitschr. f. Botanik, XI, 1919.
49. Stoppel, R., Die Abhängigkeit der Schlafbewegung von *Phaseolus multiflorus* von verschiedenen Außenfaktoren. Zeitschr. f. Botanik, 1916.

50. Strutt, R. J., Proc. Roy. Soc. (A) 77, 472 und 78, 150 (1906).
51. Stutz, Messungen des luftelektrischen Vertikalstromes nach Wilson. Freiburg 1930 (Diss.).
52. Thomson, Conduction of electr. through gases. Cambridge 1903.
53. Townsend, Ionisation der Gase in Marx. Handbuch der Radiologie.
54. —, Phyl. Mag., S. 83, 1914.
55. Ursprung u. Blum, Berichte der Deutschen Botanischen Gesellschaft, **39**, S. 70, 1921.
56. Warburg, Ann. d. Physik (4), 23, 204, 1907.
57. Wenk, F., Eine botanische Polaritätstheorie. Jahrbuch für wissenschaftliche Botanik, 4. Heft, 1932.
58. Wiegner, Anleitung zum agrikulturchemischen Practicum.
59. Wilson, Proced. of the Cambridge. Phil. Society, Vol. 13, 184 u. 363.
60. Wollny, Über die Anwendung der Elekrizität bei Pflanzenkultur. München 1883.