

4316

# Ueber die freie Kohlensäure im Boden

Von

**Dr. Joseph Moeller.**

---

Seitdem man angefangen hat der chemischen Zusammensetzung des Bodens und ihren physikalischen Eigenschaften Aufmerksamkeit zu schenken, findet man in der einschlägigen Litteratur die Angabe, dass der Boden reich sei an Kohlensäure. Es schien diess so selbstverständlich, dass lange Zeit hindurch Niemand an die Beweisführung dachte und als Boussingault und Lewy ihre Versuche veröffentlichten, fanden sie so wenig Beachtung, als würde durch dieselben ein Axiom bestätigt worden sein. Ihre Resultate finden sich aller Orten abgedruckt; aber weder Agriculturchemiker noch Physiologen wurden durch die Thatsache, dass die Bodenluft unter Umständen mehr als 200mal so viel Kohlensäure enthält als die atmosphärische Luft, dass jene immer beträchtlich reicher an Kohlensäure gefunden wurde als diese, zu eingehenderen Forschungen angeregt. Erst Pettenkofer griff die Thatsache auf und erkannte ihre hohe Bedeutung für die Hygiene. Er und nach ihm Fleck und Fodor machten nun ausgedehnte Beobachtungen über den Kohlensäuregehalt der Bodenluft und über die Schwankungen, denen derselbe unterworfen ist, an Oertlichkeiten, welche in Fragen der Gesundheitslehre von hervorragender Wichtigkeit sind.

Zur Lösung dieser Fragen dürfte auch die Kenntniss des Kohlensäuregehaltes der Luft in den Culturböden beitragen, und dieser Factor sollte nicht übersehen werden, wo man die Bedeutung der meteorischen Erscheinungen erkannt hat und ihren Einfluss studirt.

Auch über den Werth der Kohlensäure für die Vegetation, über die Frage, ob die Kohlensäure durch die Wurzel aufgenommen werde, sind meines Erachtens die Acten noch nicht geschlossen, wengleich die einschlägigen Untersuchungen mit seltener Einhelligkeit die Frage verneinen und beweisen, dass die in der atmosphärischen Luft enthaltene Kohlensäure den Bedarf der Pflanzenwelt an Kohlenstoff vollkommen zu decken vermag.

Ich kann mich nicht verwinden zu glauben, dass die in ungeheurer Menge in der Bodenluft angehäuften Kohlensäure nicht auch als directes Nahrungsmittel den Pflanzen diene, sondern nur auf Umwegen ihnen zu Gute komme.

Ehe man an die Bearbeitung dieser und ähnlicher Fragen gehen kann, ist es wünschenswerth über den Gehalt der Bodenluft an Kohlensäure, über die Abgabe derselben an die Atmosphäre unter verschiedenen tellurischen und meteorischen Einflüssen, über die Bedingungen ihrer Entstehung, über die Ursachen ihrer Schwankungen nach Tages- und Jahres-

zeiten unterrichtet zu sein. In den vorliegenden Blättern ist nur der Einfluss einiger Factoren behandelt worden und, wie es in der Natur des Gegenstandes liegt, auch diese nicht erschöpfend. Gewiss sind neben diesen und manchen Factoren, die wir gar nicht ahnen, auch die Strömungen der Luft, der Luftdruck, die Bewegungen des Grundwassers der Berücksichtigung in hohem Grade würdig. Es scheinen mir die Schwierigkeiten, diese in den Rahmen des Experimentes zu bannen, fast unübersteiglich. Vielleicht gelingt es durch lange fortgesetzte Beobachtungen an verschiedenen Orten die wirkenden Kräfte und das Mass ihrer Wirkung zu ergründen.

Sie angeregt zu haben, möge nicht das geringste Verdienst dieser bescheidenen Beiträge sein.

### **Zur Methode der Untersuchung.**

Die Titirmethode zur quantitativen Bestimmung der Kohlensäure wird so allgemein geübt, dass es vielleicht der Entschuldigung bedarf, wenn ich in Folgendem einige Verfahrungsweisen beschreibe, die ich bei meinen Untersuchungen befolgt habe.

Keine Methode der Untersuchung ist absolut vollkommen. An einem neuen Objecte, unter neuen Verhältnissen geübt, erfährt sie Modificationen, die häufig auf die Gestaltung der Resultate von wesentlichem Einflusse sind. Berühren sie auch nicht das Wesen der Methode, so sind doch auch scheinbare Nebensächlichkeiten geeignet, die Präcision der Resultate zu fördern oder sie tragen zum mindesten zur klaren Beurtheilung derselben bei oder sie dienen zur mechanischen, selbst geistigen Entbürdung des Experimentators.

Für die Wahrheit dieser Sätze spricht einfach die jedem Experimentator bekannte Thatsache, dass die ersten Versuche meist unzuverlässige Resultate ergeben und dass man erst dann die Vertrauen erweckende Sicherheit des Vorgehens erwirbt, bis man die zahlreichen Nebenumstände nach ihrem wahren Werthe würdigen gelernt hat. Die genauesten Angaben sind nicht im Stande anfängliche Misserfolge gänzlich hintanzuhalten. Sie auf ein geringes Mass zu reduciren, ist der Zweck dieses Capitels.

Zum Ansaugen der Luftproben benützte ich Aspiratoren einer Construction, deren Mittheilung ich Dr. Max Möller verdanke. Einhalsige Flaschen wurden mit doppelt durchbohrten Pfropfen verschlossen, durch deren Bohrungen je ein kurzes und ein langes rechtwinkelig gebogenes Glasrohr gezogen war. Das lange, bis nahe an den Boden der Flasche reichende Glasrohr, ist an seinem unteren Ende kurz U-förmig gebogen aus folgendem Grunde. Wenn das Rohr gerade abgeschnitten endigt, so wird durch die Saugwirkung mehr Flüssigkeit in das Glasrohr gehoben als beabsichtigt wird. Das Niveau der Flüssigkeit in der Flasche sinkt unter das Niveau des Glasrohres und beide sind durch eine Wassersäule verbunden bis diese in Folge ihrer Schwere abgetrennt wird. Das Glasrohr entleert sich vollständig und sein unteres Ende steht ausser Contact mit der Flüssigkeit. Die Menge der nachgesaugten Flüssigkeit hängt ab von der Stärke der Saugwirkung und von mehreren physikalischen Eigenschaften der Flüssigkeit, Factoren, die nur ausserordentlich schwer in Rechnung gezogen werden können. Da aber die Menge der ausströmenden Flüssigkeit das Maass für die nachgesaugte Luft ist, so ist es nicht nur eine unerlässliche Forderung jene genau zu kennen, sondern auch sie constant zu erhalten. Beide Bedingungen werden erfüllt, wenn man die Mündung des Glasrohres nach oben kehrt. Sowie die Flüssigkeit in das Niveau der Mündung gesunken ist, tritt

diese aus der Flüssigkeit heraus und sie kann nicht mehr nachgesaugt werden. Ueberdiess steht bei dieser Einrichtung das Abflussrohr immer unter Wasser, es wird daher ein Aufsteigen von atmosphärischer Luft schon im Anfange des Versuches verhindert.

Pfropfen und Glasröhren müssen luftdicht schliessen und überdiess unbeweglich fest gestellt sein (am einfachsten durch Zuschmelzen mit einer Harzmasse, an der Sprünge leicht zu erkennen sind und zur Correctur auffordern) weil durch etwaiges Heben oder Senken des langen Glasrohres die zum Abfließen bestimmte Flüssigkeit vermehrt oder verringert wird. Die freien Enden der langen Glasröhren an je einem Flaschenpaare werden mittelst Kautschukschlauches verbunden, der eine Schraubeklemme trägt, um das Lumen des Schlauches verengern und so den Abfluss reguliren zu können.

Ich benützte Aspiratoren mit 250 CC., 500 CC., 1 Liter und 8 Liter Fassungsraum, letztere ausschliesslich bei Bestimmungen des Kohlensäuregehaltes der atmosphärischen Luft, erstere bei Bodenarten, welche ausserordentlich reich an Kohlensäure waren. Wenngleich man auch kleine Aspiratoren dazu benützen kann, um beliebig grosse Luftmengen einzusaugen, indem man abwechselnd die eine oder die andere Flasche als Sauger, beziehungsweise als Reservoir benützt, so ist es doch zweckmässig grössere Aspiratoren zu wählen, wo man grössere Gasmengen untersuchen will, weil sie neben grösserer Genauigkeit auch den nicht zu unterschätzenden Vortheil gewähren, dass sie längere Zeit sich selbst überlassen bleiben, beispielsweise die ganze Nacht über in Gang erhalten werden können.

Eine fundamentale Forderung für die Richtigkeit der Resultate ist, dass die durch die absorbirende Flüssigkeit streichende Luft hinreichend lange mit ihr in Berührung bleibt, um alle Kohlensäure abgeben zu können. So selbstverständlich diese Forderung ist, scheinen mir doch die Autoren, welche vor mir sich mit dieser Art von Untersuchungen beschäftigt haben, ihr nicht hinreichende Aufmerksamkeit geschenkt zu haben. Wenn, wie angeführt wird, 8 Liter und mehr Luft in 2 Stunden aspirirt werden, so ist es nach meinen Erfahrungen höchst unwahrscheinlich, dass die Luft ihrer Kohlensäure gänzlich beraubt worden war, man erhielt zu kleine Werthe. Ich habe durch eine Reihe von Versuchen die Zeit festzustellen gesucht, welche nöthig ist, damit ein in Blasen durch eine alkalische Flüssigkeit streichendes Luftquantum seine Kohlensäure abgibt, bin aber zu keinem exacten Resultate gekommen, weil viel von der Grösse der Luftblasen abhängt, und wenn diese auch nahezu gleich herzustellen sind, doch durch häufiges Confluiren jede Berechnung zu Schanden machen und weil ein vollkommen gleichmässiger Gang der Aspiratoren nicht zu erzielen ist. Davon habe ich mich aber mit aller Bestimmtheit überzeugt, dass keine Kohlensäure die absorbirende Flüssigkeit ungebunden verlässt, wenn die Luft in etwa erbsengrossen Blasen und in dem Tempo durch das Absorptionsrohr zieht, dass 1000 CC. drei Stunden Zeit erfordern. Als Absorptionsröhren verwendete ich die von Pettenkofer angegebenen mit einem Fassungsraum für 50 und 100 CC. Flüssigkeit. Erstere haben die beiläufige Länge von 30, letztere von 40 Cm.

Wenn man die Bodenluft von bestimmter Tiefe untersuchen will, ist man genöthigt Röhren in den Boden zu versenken, und Pettenkofer und Andere haben diese Röhren bis in das Laboratorium fortgeleitet, wo sich die Absorptionsröhren und Aspiratoren aufgestellt befanden. Wenngleich ich für die Bequemlichkeit dieses Verfahrens nicht stumpf bin, habe ich doch Anstand genommen von demselben Gebrauch zu machen.

Mit der Anwendung der Röhren ist ein Fehler unvermeidlich, weil die in ihnen enthaltene Luft mit in Rechnung gezogen wird, obwohl sie verschieden sein kann von der durch

dieselbe angesaugten Bodenluft. Der Fehler wird um so kleiner ausfallen, je kürzer das Rohr, je enger das Lumen und je grösser das aspirirte Luftquantum. Da aber, wie ich noch später ausführen werde, der letzte Factor nicht nach Belieben gesteigert werden darf, habe ich das Verhältniss zwischen der im Rohr eingeschlossenen und der aspirirten Luftmenge dadurch günstiger gestaltet, dass ich möglichst enge Glas- oder Bleiröhren wählte und sie in geringer Höhe vom Boden an Ort und Stelle mit dem Absorptionsrohre verband.

Es ist ein sehr misslicher Umstand, dass man nicht im Stande ist, den Ort genau zu umschreiben, woher die aus der Tiefe aspirirte Luft stammt. Gewiss entstammt nur ein geringer Theil der aspirirten Luft dem Orte, wo das Rohr mündet, der grössere Theil wird aus entfernteren Gebieten herbeigezogen, und ebenso gewiss vergrössert sich das Gebiet in geradem Verhältniss zur Menge der angesaugten Luftmenge. Wo es sich also um die Bestimmung des Kohlensäuregehaltes der Luft einer bestimmten Region handelt, müssen möglichst geringe Luftproben zum Zwecke der Analyse aspirirt werden. Es wird weiterhin noch ein Grund für die Zweckmässigkeit dieses Vorganges angeführt werden.

Als Absorptionsflüssigkeit verwendete ich eine Lösung von Chlorbaryum und Aetzbaryt in destillirtem Wasser in dem Verhältnisse 1 : 10 : 1000. Da der Consum dieser Lösung ein beträchtlicher ist, bereitete ich mir in der Regel 10 Liter derselben und hatte dabei den Vortheil, immer eine klare Lösung in Vorrath zu haben, indem ich den zu einem Versuche nothwendigen Bedarf mittels Hebers in eine kleinere Flasche abhob. Die Lösung ist stark alkalisch, und man kann sie aus Ersparungsrücksichten beträchtlich verdünnen, wenn man im Vorhinein weiss, dass die zu untersuchende Luft nicht allzureich an Kohlensäure ist. Es ist hier der Ort, die Frage nach der Empfindlichkeit schwach alkalischer Lösungen zu ventiliren, mit andern Worten, ob das Absorptionsvermögen der Barytlösung nicht leidet, nachdem sich ein grosser Theil ihres Alkali mit der Kohlensäure verbunden hat. Ich habe in Fällen, wo ich es mit ausserordentlich kohlenensäurereichen Gasgemengen zu thun hatte, was sich sofort aus der Menge des niedergeschlagenen kohlen-sauren Baryts verräth, die Vorsicht gebraucht, grosse Absorptionsröhren, concentrirte Lösungen zu nehmen, und überdiess ein zweites Absorptionsrohr einzuschalten. In diesem blieb die Barytlösung vollkommen klar, während die Lösung im ersten Rohre durch den abundanten Niederschlag der Kalkmilch glich. Sowie in jenem die ersten Spuren von Trübung bemerkbar wurden, begann sich diese zu klären, indem der Niederschlag sich zu Boden senkte und die Untersuchung lehrte, dass sie nahezu vollständig gesättigt war. Diese Thatsache gilt selbstverständlich nur dann, wenn die Aspiration nach den oben angeführten Rücksichten regulirt worden war, und unter dieser Voraussetzung ist sie sehr bedeutungsvoll. Sie leistet Gewähr für die exacte Bestimmung der Kohlensäure, so lange die Barytlösung alkalisch ist.

Der Verdacht, dass ein Theil der Kohlensäure ohne gebunden worden zu sein, die Barytlösung verlassen hätte, entsteht erst dann, wenn diese beim Titriren sich sehr nahe an der Neutralitätsgrenze stehend erweist.

Ich darf nicht unerwähnt lassen, dass die Barytlösung an der Luft ihren Titre leicht verändert, daher jedesmal bevor sie in Verwendung genommen wird, auf ihre Alkalicität zu prüfen ist.

Zur Bestimmung des Alkaligehaltes benützt man Oxalsäure. Auch von der Titri-flüssigkeit bereite ich einen grösseren Vorrath, indem ich 28.7 Gr. reiner, wasserfreier Oxal-säure in 1 Liter destillirten Wassers löse. Ein Raumcentimeter dieser Lösung zeigt 10 Mgr. Kohlensäure an. Zum Gebrauche wird die Lösung auf das zehnfache Volumen gebracht.



Es hält ungemein schwer, gute, übereinstimmend calibrirte Büretten zu bekommen, und bei aller Sorgfalt sind Veränderungen der Titrirflüssigkeit nicht vollkommen zu vermeiden und können zu beträchtlichen Fehlerquellen werden, wenn man, wie bei den gewöhnlichen Mohr'schen Büretten, oft nachfüllen und dazwischen aufmerksam verkorken muss.

Ich empfehle daher dringend, nur Büretten nach Rammelsberg zu verwenden, und darauf zu achten, dass im Verlauf einer Versuchsreihe die Massflasche nicht frisch gefüllt zu werden brauche.

Als äusserst empfindlicher Indicator hat sich mir die alkoholische Lösung der Rosolsäure bewährt. Eine Spur derselben verleiht ansehnlichen Mengen der alkalischen Flüssigkeit lebhaft rothe Färbung, welche bei eintretender Neutralität in eine helle Mostfarbe umschlägt.

Endlich habe ich noch einige Bemerkungen zu machen über die Umrechnung der durch die massanalytische Methode direct bestimmten Gewichtsmengen der Kohlensäure in Volumspercente. Zu diesem Ende müssen die erhaltenen Gewichtsmengen der Kohlensäure auf das Volumen bei 0° und 760 Mm. Luftdruck berechnet und ebenso das Luftvolum, in dem jene enthalten waren, auf das Volumen bei 0° und normalem Barometerstand reducirt werden.

Die Reduction einer gegebenen Luftmenge auf ihr Volumen bei 0° und 760 Mm. Druck ist eine etwas umständliche Rechnung. Ich füge daher die zu meinem Gebrauche angefertigte Tabelle bei, welche die auf 0° und 760 Mm. Druck reducirten Volumina von 1000 CC. Luft bei 1°—30° C. und bei 730—760 Mm. Druck enthält.

## Versuche über die Quellen der Kohlensäure und ihre Vertheilung in der Bodenluft.

Woher stammt der nachgewiesene Reichthum der Bodenluft an Kohlensäure? Entweder die Kohlensäure entsteht im Boden selbst aus der Zersetzung organischer Substanzen, oder der Boden bezieht sie von aussen her, indem er die Eigenschaft besitzt, aus dem Gasgemische der Atmosphäre Kohlensäure zu verdichten, oder es concurriren beide Ursachen.

Es ist nicht zweifelhaft, dass der Boden, wie andere poröse Körper, Gase zu condensiren vermag. Eingehend wurde diese Eigenschaft für Sauerstoff, Ammoniak und Wassergas studirt. Es wurde auch wiederholt nachgewiesen, dass das Absorptionsvermögen verschiedener Körper für verschiedene Gase verschieden ist, wie aber der Boden sich zur atmosphärischen Kohlensäure verhält, war bisher nicht Gegenstand directer Untersuchungen.

Wenn ein nennenswerther Theil der Kohlensäure der Bodenluft auf Anhäufung der in minimalen Mengen aus der Atmosphäre aufgenommenen Kohlensäure beruht, so muss auch in Bodenarten, welche jeder organischen Beimengung entbehren, die Luft an Kohlensäure reicher sein, als die über ihnen befindliche Luftschichte, und es muss möglich sein, in einem abgeschlossenen Bodenquantum die Kohlensäure zu verringern, sogar sie ganz zu entfernen, wenn demselben bloß kohlenstofffreie Luft zugeführt wird.

Pettenkofer fand bei seinen Untersuchungen der atmosphärischen und Bodenluft aus der libyschen Wüste, dass in der letzteren die Kohlensäure nie 1 pro mille erreichte, in zwei Fällen sogar in geringerer Menge vorhanden war als in der atmosphärischen Luft, welche denselben Kohlensäuregehalt besass, wie die Luft in unseren Thälern und auf hohen Bergen.

Wenngleich beim Sammeln, Aufbewahren und Transportiren der Wüstenluft im Hinblick auf die geplante Untersuchung die grösste Sorgfalt beobachtet wurde, so können

Bedenken gegen die volle Beweiskraft der Versuche nicht wohl zurückgewiesen werden.

Ich suchte daher die Frage auf folgende Weise zu lösen:

Sorgfältig gewaschener und ausgeglühter Quarzsand wurde in einem 0.4 M. hohen, 0.1 M. weiten Glascylinder gefüllt, welcher mit einer Kautschukplatte luftdicht verschliessbar war. Durch die Kautschukplatte wurden zwei im rechten Winkel gebogene Glasröhren geschoben. Die eine reichte bis nahe an den Boden des Cylinders und wurde mit dem Absorptionsrohre verbunden. Die zweite reichte etwas unter das Niveau des Sandes und trug einen Kaliapparat. Die Fugen zwischen dem Cylinderrande und den Glasröhren mit der Kautschukplatte wurden mit Baumwachs verklebt und überdiess mit geschmolzener Harzmasse ausgegossen.

Die ersten drei Liter Luft, welche aufgesaugt wurden, enthielten 1.2 Mgr. = 0.65 Kohlensäure auf 1000 Volumina Luft.

Die folgenden drei Liter Luft waren bereits frei von Kohlensäure.

Während der Zusammenstellung des Versuches war der Sand hinreichend mit der atmosphärischen Luft in Berührung gestanden, im Cylinder selbst befand sich atmosphärische Luft. Die ersten aufgesaugten Mengen mussten daher Kohlensäure enthalten. Dass sie so wenig enthielten und dass in den unmittelbar darauf aspirirten drei Litern Luft keine Kohlensäure mehr nachweisbar war, zeigt, dass die Luft in rein mineralischem Boden zum mindesten nicht viel reicher an Kohlensäure ist als die Atmosphäre. Zugleich erfuhr ich, dass mein Versuchsmaterial keine Quellen zur Bildung von Kohlensäure besass, und dass mein Apparat verlässlich sei, weil der Luftzutritt ausser durch Kali streichend, wirksam hintangehalten wurde.

Um zu erfahren ob auch aus humösen Bodenarten die Kohlensäure durch Aspiration entfernt werden kann, wenn der Zutritt der atmosphärischen Kohlensäure verhindert wird, wiederholte ich den Versuch mit der Modification, dass ich statt des ausgeglühten Quarzsandes gewöhnliche Gartenerde verwendete. Ich fand

in 3 Liter Luft	22.8 Mgr.
3	18.0
3	24.8
2	22.0
3	25.6
2	21.6
2	19.2
2	22.8

Die vorstehenden acht Bestimmungen vertheilen sich auf 14 Tage. Sie lehren:

1. Bodenarten, welche organische Beimengungen enthalten, besitzen eine stetige Quelle zur Bildung von Kohlensäure.
2. Die Bildung der Kohlensäure erfolgt nicht gleichmässig, doch sind die Schwankungen nicht bedeutend, wenn die äusseren Bedingungen gleich bleiben.
3. Werden aus einer abgeschlossenen Bodenmenge hintereinander grössere Mengen Luft aspirirt, so verarmt der Boden an Kohlensäure, weil die Bildung derselben nicht gleichen Schritt hält mit der durchstreichenden Luft.

Diese Erfahrung ist von höchster methodischer Wichtigkeit. Sie ist eine Handhabe zur Kritik vieler Daten und beleuchtet manche Widersprüche der Autoren. Sie weist an, dass

man nur kleine Quantitäten Luft auf einmal aspiriren soll, ein Rath, den schon Fodor aus dem Grunde gegeben hat, weil man bei grossen Mengen die Orientirung über das angesaugte Gebiet verliert.

Die ausgiebige Durchlüftung (mit dem zwanzigfachen Volumen etwa) der gegebenen Erdmenge konnte eine Verminderung des Kohlensäuregehaltes der Bodenluft nicht herbeiführen. Die aspirirte Kohlensäure wurde rasch wieder ersetzt, es mussten daher die Bedingungen für ihre Neubildung reichlich vorhanden sein. Die Aspiration wurde unterbrochen, der Zutritt von atmosphärischer Luft jedoch nur durch den Kaliapparat frei gehalten.

Nach 20 Tagen wurden wieder einige Portionen Luft zu je 250 CC. aspirirt, die geringe Menge desshalb, weil vorauszusehen war, dass die Kohlensäure in der Zwischenzeit sich angehäuft haben würde. Die Voraussetzung fand in der That ihre Bestätigung. Durch die erste Portion wurde die Barytlösung, trotzdem sie einen sehr hohen Titre hatte, gesättigt, es kann daher nicht gesagt werden, wie viel überschüssige Kohlensäure entwichen war. In der zweiten Portion waren noch 78·4 Mgr. = 177 Vol., in der dritten Portion 21·2 Mgr. = 46 Vol. CO<sub>2</sub> nachweisbar. Die Kohlensäurebildung hatte also durchaus keine Abnahme erfahren und es war auch nicht zu hoffen, dass dieses Ziel auf diesem Wege erreicht werde. Ich führe diesen Versuch nur an, weil er zeigt, dass in gewöhnlichem Ackergrund fast unerschöpfliche Quellen für die Bildung von Kohlensäure vorhanden sind, und dass die Diffusion der Kohlensäure in die Atmosphäre ausserordentlich langsam vor sich geht; denn trotzdem im vorliegenden Falle die Luft über der Erde ursprünglich frei von Kohlensäure war, hatte sich dieses Gas doch in so bedeutender Menge in der Bodenluft angehäuft. Es verminderte sich aber rasch, sobald die Luft in Bewegung gesetzt wurde: ein bedeutsamer Fingerzeig für den Einfluss der Luftströmungen auf die Durchlüftung des Bodens.

Es haben aber eine ganze Reihe von Versuchen, die zu anderen Zwecken angestellt wurden und die im Verlaufe Erwähnung finden werden, auf das Sicherste nachgewiesen, dass man jeden beliebigen Boden von der freien Kohlensäure befreien kann, wenn demselben kohlenstofffreie Luft zugeführt wird, nur muss in ihm die Neubildung von Kohlensäure auf irgend eine Weise hintangehalten werden.

In welcher Abhängigkeit steht aber der Kohlensäuregehalt der Bodenluft zu jenem der atmosphärischen Luft? Diffundirt die atmosphärische Luft durch den Boden ohne in ihrem Mischungsverhältnisse alterirt zu werden oder besitzt der Boden eine Absorptionsfähigkeit für Kohlensäure und verhalten sich in dieser Beziehung rein mineralische Böden ebenso wie fruchtbare Erde?

Um diese Fragen zu beantworten, benützte ich den Apparat aus dem ersten Versuche, entfernte das Kalirohr und brachte ihn ins Freie, in einen von Fichten beschatteten Theil des Gartens. Von dem Sande wusste ich, dass er keine Kohlensäure enthielt, was ich aus ihm aspirirte musste aus der atmosphärischen Luft stammen. Daneben stellte ich einen Apparat zur Bestimmung der Kohlensäure unmittelbar aus der Atmosphäre auf. Beide Apparate wurden gleichzeitig in Thätigkeit gesetzt.

In der Zeit vom 8. Juni bis 11. Juli wurden täglich Bestimmungen gemacht, die sehr wechselnde Resultate ergaben. Mitunter war der Gehalt an Kohlensäure gleich, ob die Luft durch Sand gestrichen oder unmittelbar aspirirt war. In anderen Fällen zeigten sich Schwankungen in der einen wie in der anderen Richtung, aus denen mir nur die Regelmässigkeit auffiel, dass die Luft ärmer an CO<sub>2</sub> war, wenn der Sand feucht geworden war.



Es schien mir durchaus plausibel, dass der feuchte Sand einen Theil der Kohlensäure aus der durchziehenden Luft zurückhalte. Um mich dessen zu vergewissern und um zu erfahren, ob die gefundenen Schwankungen nicht etwa von anderen Einflüssen abhängig seien, stellte ich die weiteren Versuche im Laboratorium an. Ich trocknete den Sand wieder in der Platinschale, füllte die Flasche und verband das Zuleitungsrohr mit einem Schwefelsäureapparat, um auch das geringste Feuchtwerden des Sandes zu verhüten.

Ich aspirirte 3 Liter Luft durch den Sand und gleichzeitig 3 Liter Luft aus der Atmosphäre, nachdem sie ebenfalls durch Schwefelsäure gestrichen war. In beiden Luftquantitäten erwies sich der Kohlensäuregehalt gleich, nämlich 0·8 Vol. pro mille.

Der Quarzsand in absolut trockenem Zustande besitzt demnach die Fähigkeit nicht, Kohlensäure zu verdichten.

Nicht so einfach gestaltet sich dieser Versuch mit fruchtbarer Erde. Wir haben bereits gesehen, dass in dieser die Entwicklung der Kohlensäure sehr lebhaft und nicht mit solcher Regelmässigkeit stattfindet, dass die etwa aus der Luft aufgenommene Kohlensäure mit Bestimmtheit auf ihren Ursprung zurückgeführt werden könnte. Es ist diess nur dann möglich, wenn die chemischen Prozesse in der Erde zum Stillstande gebracht werden und diess geschieht durch absolute Entziehung des Wassers. Im anderen Falle kann fruchtbare Erde niemals in die Lage kommen Kohlensäure aus der Atmosphäre aufzunehmen, weil sie selbst an diesem Gase viel reicher ist.

Ich nahm daher Composterde und setzte sie durch 3 Tage im Trockenkasten der Temperatur des siedenden Wassers aus. Noch warm füllte ich sie in eine Flasche, durch deren Pfropfen zwei Glasröhren gezogen waren und verschloss dieselbe luftdicht. Das kürzere Glasrohr wurde mit einem Kalirohr verbunden und an dieses schloss sich ein Schwefelsäureapparat. Die durchziehende Luft war so absolut trocken und frei von Kohlensäure. Aber auch in der Erde selbst war kaum eine Spur freier Kohlensäure; denn nachdem ich durch mehrere Tage continuirlich durch dasselbe Absorptionsrohr hatte Luft streichen lassen, zeigte sich die Barytlösung nicht einmal leise getrübt.

Nun entfernte ich das Kalirohr und belliess den Schwefelsäureapparat, so dass die nun durchziehende Luft wasserfrei, aber sonst von normaler Zusammensetzung war. Wenn sie Kohlensäure an die Erde abgeben sollte, so muss dieser Verlust an der austretenden Luft sich constatiren lassen durch den Vergleich mit dem Kohlensäuregehalt der Luft zur selben Zeit im selben Raume. Ein geringer, vielleicht kaum messbarer Verlust muss unter allen Umständen eintreten, weil im geschlossenen Raume der Flasche eine kleine Menge kohlenstoffreicher Luft sich befindet.

Die Apparate waren vom 31. Juli bis 10. August in Thätigkeit. Viermal wurde diese unterbrochen, die in der Zwischenzeit absorbirte Kohlensäure bestimmt und auf die bekannte Luftmenge reducirt. In der Tabelle ist der Kohlensäuregehalt für je 1 Liter Luft in Milligrammen angegeben. Die Aspiratoren arbeiteten so langsam, dass innerhalb 24 Stunden nur 2—3 Liter abflossen.

Datum	Luftdruck	Temperatur	Mgr. CO <sub>2</sub> in 1 Liter	
			atm. Luft	Bodenluft
31. Juli	750·1	19·4		
1. August	746·0	19·4	0·62	0·38
2.	740·6	19·9		
3.	744·4	17·4		
4.	743·0	18·2	0·82	0·67
5.	748·5	18·0		
6.	749·5	18·8	1·00	0·80
7.	746·4	19·7		
9.	742·3	20·0	0·90	0·80
10.	745·1	19·8		

Es zeigt sich demnach, dass die atmosphärische Luft, nachdem sie durch humöse Erde gestrichen war, einen Theil ihrer Kohlensäure eingebläst hatte. Zu Beginn, da die Erde gar keine freie Kohlensäure enthielt, war der Verlust am bedeutendsten, ermässigte sich allmähig und am Schlusse, da die Erdpartikelchen ihre Kohlensäurehüllen besaßen, betrug er nur ein Minimum. Immerhin besitzt die humöse Erde für Kohlensäure ein sehr geringes Absorptionsvermögen, dem groben Quarzsande fehlt dasselbe, wie wir gesehen haben, ganz und es wäre wünschenswerth das Verhalten der verschiedenen Bodenarten in dieser Beziehung kennen zu lernen. Hier, wo es sich nur um Feststellung allgemeiner Grundsätze handelt, genügt es zu wissen, dass es überhaupt Bodenarten gibt, welche das Bestreben haben Kohlensäure zu verdichten.

Unsere Resultate zeigen manche Analogieen mit den von Schübler für Wasserdampf gefundenen Thatsachen. Die untersuchten Erden zeigten ein sehr verschiedenes Absorptionsvermögen für Wassergas, nur Quarzsand absorbirte keines. Die Verdichtung erfolgt anfangs mit grosser Intensität und nimmt stetig aber gleichfalls nicht regelmässig ab.

Ob das den Erdpartikelchen adhärende Wasser, d. h. ob feuchte Erde auf rein physikalischem Wege Kohlensäure aus der Luft absorbirte, kann nur an einem Materiale in Erfahrung gebracht werden, welches nicht nur frei von Kohlensäure ist, sondern dieses Gas auch nicht zu bilden vermag, weil in letzterem Falle, wie schon erwähnt, das durch den Chemismus entstandene von dem absorbirten Gase nicht zu trennen wäre.

Ich besass ein passendes Material in dem aus den vorigen Versuchen bekannten Quarzsand, überzeugte mich durch eine Vorprobe, dass er wirklich keine Kohlensäure enthielt und brachte mittelst einer Pipette 50 CC. destillirtes, eben ausgekochtes Wasser in die Flasche. Der Versuch brachte ein ganz unerwartetes Resultat. Durch 14 Tage wurden 30 Liter aspirirt, je aus der Atmosphäre und aus dem befeuchteten Sande. Siebenmal wurde die jeweilig abgeflossene Luft auf ihren Kohlensäuregehalt geprüft und wie die Tabelle lehrt, zeigte die Luft, nachdem sie durch den Sand gestrichen war, sich wenig verschieden von der Atmosphäre mit Beziehung auf ihren Gehalt an Kohlensäure.

Mgr. CO <sub>2</sub> in 1 Liter		Differenz	Luftquantum
atm. Luft	Bodenluft		
1·0	0·9	— 0·1	2 Liter
1·2	1·1	— 0·1	2
0·8	1·0	+ 0·2	6
0·6	1·1	+ 0·5	8
1·0	1·1	+ 0·1	4
0·9	1·0	+ 0·1	4
0·9	1·0	+ 0·1	4

Es ist bemerkenswerth, dass die ersten Luftmengen einen Theil ihrer Kohlensäure an den Sand abgegeben hatten und, dass in der Folge die aus dem Sande aspirirte Luft immer reicher an Kohlensäure erschien als ehe sie mit dem Sande in Berührung gekommen war. Allerdings bewegen sich die Differenzen nur in Myriagrammen; aber weil die Versuche mit der peinlichsten Sorgfalt vorgenommen wurden, möchte ich die Resultate doch nicht über Bord werfen, sondern mich nach einer Erklärung umsehen. Unerklärlich scheinen auf den ersten Blick beide zu sein. Man hätte erwartet, dass der befeuchtete, kohlensäurefreie Sand zum mindesten den grösseren Theil der Kohlensäure aus der durchstreichenden Luft absorbiren würde und nachdem er mit dem Gase gesättigt, hätten Schwankungen in Abhängigkeit von der Temperatur und dem Luftdruck eintreten sollen. Nun scheint allerdings Kohlensäure absorbirt worden zu sein, aber in einer Menge, die zur Sättigung der vorhandenen Wassermenge weitaus nicht ausreichte<sup>1)</sup>, und woher kommt späterhin der andauernd höhere Gehalt an Kohlensäure in der Bodenluft? Beide Erscheinungen weiss ich nur unter der Annahme zu deuten, dass die in der Luft suspendirten Organismen und organischen Reste im feuchten Sande Kohlensäure entwickelten. Ihre Menge war im Anfange zu gering, als dass sie vereint mit der eintretenden Luft zur Sättigung des Wassers ausgereicht hätte, deshalb war die austretende Luft noch ärmer an Kohlensäure als die zugeführte. Als aber mit der Menge der zugeführten Luft auch die Quellen der Kohlensäure vermehrt wurden, zeigte sich ein Ueberschuss an Kohlensäure in der austretenden Luft.

Als Pettenkofer die Luft im Geröllboden Münchens untersuchte, wo, wie er selbst bemerkt, jede Verunreinigung ausgeschlossen war, die zu Kohlensäure-Entwicklung Veranlassung geben könnte und in ihr namhaft mehr Kohlensäure fand als in der atmosphärischen Luft, schien es ihm wahrscheinlich, dass es organische Prozesse im Boden sind, welche die Kohlensäure bilden und die letztere ist nicht der Ausdruck für die Intensität des Kohlensäure bildenden Processes, sondern nur für die Differenz der Kohlensäure bildenden und verzehrenden Thätigkeit niedriger Organismen. Später, gelegentlich der Mittheilung seiner Untersuchung der Luft aus der libyschen Wüste, sagt derselbe Autor: Wahrscheinlich stammt die Kohlensäure von organischen Stoffen, die mit dem Regen in die Tiefe geführt

<sup>1)</sup> Ich erinnere, dass das Bodenwasser mit Kohlensäure nicht gesättigt ist, auch wenn der Boden einen Ueberschuss von Kohlensäure enthält. Die festen Theile des Bodens verhindern die vollständige Sättigung, ja sie treiben sogar aus gesättigtem Wasser die Kohlensäure aus (Mulder).

werden und dort verwesen. Wo also nicht vulcanische oder mineralische Quellen der Kohlensäure sind, gehören zum Kohlensäuregehalt der Bodenluft organische Substanz und Wasser.

Dass humöse Böden durch langsame Verbrennung Kohlensäure liefern, ist bestimmt nachgewiesen. Fodor hat direct gezeigt, dass die Bodenluft in dem Masse an Sauerstoff ärmer wird als zur Bildung von Kohlensäure verbraucht worden ist.

Die folgenden Versuche werden zeigen, wie durch die Zufuhr organischer Substanz der Kohlensäuregehalt der Bodenluft gesteigert wird.

Ich nahm 30 Gramm frische, geschnittene Blätter von *Carpinus Betulus* und mischte sie mit 1700 Gr. von jenem Quarzsand, von dem bekannt ist, dass in ihm keine Kohlensäure-Entwickelung stattfindet. Die Mischung füllte ich in eine Flasche, durch deren Propfen zwei Glasröhren luftdicht gezogen waren. Die eine trägt den Kaliapparat, die andere dient zur Verbindung mit dem Absorptionsrohr.

Auf dieselbe Weise stellte ich einen Versuch mit 30 Gr. frisch gesammelten, grob zerschnittenen Schwarzföhren-Nadeln zusammen.

Den Gang der Kohlensäure-Entwickelung zeigt folgende Zusammenstellung:

Luftquantum	Gehalt an CO <sub>2</sub> in Mgr.	
	aus Laub	aus Nadeln
1000 CC.	27·8	22·8
—	51·2	31·8
—	66·4	63·8
2000 CC.	190·0	127·6
—	214·4	135·2
—	234·4	188·0

Es hatte demnach im Mittel ein Liter Luft:

aus frischem Laub	87·1 Mgr. CO <sub>2</sub>
aus frischen Nadeln	63·2

aufgenommen.

Da bei diesen Versuchen jede andere Quelle der Kohlensäurebildung als die grünen Pflanzentheile ausgeschlossen ist (die während der Zusammenstellung der Versuche in den Apparat gelangte atmosphärische Luft kommt wohl nicht in Betracht), so zeigen sie dass grüne Pflanzentheile, unter die Erde gebracht, sofort beträchtliche Mengen Kohlensäure entwickeln. In dem Masse als die Verwesung (Gährung) fortschreitet, steigert sich die Bildung von Kohlensäure. Sie ist lebhafter bei Laub, weniger intensiv bei den der Verwesung länger widerstehenden Nadeln.

Ist einmal bewiesen, dass die Bodenluft durch Verwesung organischer Substanzen mit Kohlensäure geschwängert wird<sup>1)</sup>, so schwindet dieser Entstehungsursache der Kohlensäure

<sup>1)</sup> Corenwinder fand in einem mit Stalldünger und 3300 Kg. Oelkuchen pro Hectare gedüngten Lehm-boden innerhalb 24 Stunden 15·7 Liter Kohlensäure per Quadratmeter.

gegenüber jede andere an Bedeutung. Es kann nur theoretisches Interesse beanspruchen ob mikroskopische Organismen bei ihrem Lebensprocesse einen Ueberschuss an Kohlensäure produciren, ob organische Stoffe oder unmittelbar Kohlensäure aus der Atmosphäre durch den Regen in die Erde geschwemmt werden, ob endlich der Boden auch freie Kohlensäure aus der Luft zu binden vermag.

Alle diese Momente können nur in absolut unfruchtbarem Grunde auf den Kohlensäuregehalt der Bodenluft von nennenswerthem Einflusse sein.

Nachdem wir die Ursachen des reichen Kohlensäuregehaltes der Bodenluft kennen gelernt haben, müssen wir nach den Gründen fragen, welche die Schwankungen im Kohlensäuregehalt der Bodenluft herbeiführen. Sowie wir vorhin die vulcanischen oder mineralischen Quellen der Kohlensäure aus der Betrachtung ausschlossen, weil ihre Bedeutung nur an bestimmten Oertlichkeiten zu Tage tritt, so können wir auch hier aus demselben Grunde die in chemische Verbindungen eintretende (wie z. B. die Bildung von Bicarbonaten, wo Carbonate im Boden vorhanden sind) oder die aus ihnen austretende (wie z. B. die Zerlegung der Carbonate im Erdinnern) Kohlensäure sowie die aus dem Chemismus lebender Organismen resultirende Veränderung des Gasgemisches unberücksichtigt lassen und nur die allgemein wirksamen Momente in Erwägung ziehen.

Theoretisch ist es zulässig zu denken, dass der Boden bis auf eine gewisse, jedenfalls mässige Tiefe unter dem directen Einflusse der Sonnenstrahlen seines Wassergehaltes beraubt wird, dadurch die Fähigkeit verliert Kohlensäure zu bilden, die durch Verdunstung freigewordene Kohlensäure diffundirt mit der atmosphärischen Luft in dem Verhältniss, dass auf je 1 Volum der austretenden Kohlensäure 1·235 Volumina Luft eintreten und es kann dahin kommen, dass die Bodenluft eines umschriebenen Bezirkes ebensoviel Kohlensäure enthält als die atmosphärische Luft.

Man hat in praxi bisher einen solchen Bezirk, wo die reichlich fliessenden Quellen der Kohlensäure im Boden erschöpft worden wären, nicht entdeckt. Die Schwankungen im Kohlensäuregehalt der Bodenluft bewegen sich innerhalb weiter Grenzen, aber alle Analysen haben den Reichthum der Bodenluft an Kohlensäure dargethan, und dass dieser in erster Linie bedingt wird von der im Boden angehäuften organischen Substanz, zeigen direct die oben angeführten Versuche mit Laub und Nadeln.

Aber auch in einem Boden, welcher reichlich mit organischer Substanz versehen ist, wird die Menge der Kohlensäure schwanken je nach der Intensität mit der die Verwesung fortschreitet, und es ist ganz wol möglich, dass ein reich gedüngter Boden unter Umständen relativ arm an Kohlensäure ist.

Wenn der Wechsel der atmosphärischen Luft behindert, der verbrauchte Sauerstoff nicht ersetzt wird, muss ein Stillstand in der Kohlensäurebildung eintreten.

Mangel an Feuchtigkeit hebt die Humificirung auf.

Endlich wird der Oxydationsprocess nur innerhalb bestimmter Temperaturgrenzen stattfinden.

Ueber das Verhalten reichgedüngter Böden bei absolutem Ausschluss der atmosphärischen Luft belehrte mich ein Versuch, zu dem ich die oben verwendete Mischung des Quarzsandes mit frischem Laub und Nadeln benützte. Ich wusste von ihr, dass sie ungeheure Mengen von Kohlensäure lieferte. Wenn die Bildung derselben fort dauerte, ihr Austritt aber behindert wurde, so musste sich bald ein Ueberdruck geltend machen, der sich an einem eingeschalteten Manometer messen liesse, oder wenn ihr der Austritt nur durch eine

absorbierende Lösung gestattet würde, dann müsste sich ihre Menge direct bestimmen lassen. Ich schlug zuerst den letzteren Weg ein, weil ich durch ihn auch über einen etwaigen Ueberdruck Aufschluss erhalten konnte.

Das eine Glasrohr wurde abgeschmolzen, das andere im rechten Winkel gebogene mit einem zweiten rechtwinkelig gebogenen Röhrrchen verbunden, und das freie nach abwärts gerichtete Ende durch den Pfropfen einer aufrecht stehenden Eprouvette bis nahe an den Boden gezogen. Alle Verbindungsstellen wurden mit Harzmasse ausgegossen. In der Eprouvette befand sich eine titrirte Barytlösung.

Unmittelbar nach Fertigstellung des Apparates zeigte sich in dem in die Barytlösung tauchenden Glasrohr eine Niveauerhöhung um 5 Millimeter, die offenbar vom Einsetzen des Pfropfes herrührte. Dadurch wurde nämlich die Luft in der Eprouvette unter höheren Druck gebracht als die Luft in der Flasche. Am zweiten Tage hatte sich eine kleine Menge kohlen-sauren Baryts niedergeschlagen.

Allmählig glich sich der Niveauunterschied der Flüssigkeit in der Eprouvette und im Glasrohre aus und nachdem drei Wochen der Apparat sich selbst überlassen worden war, stand die Flüssigkeit in dem Glasrohre unter dem Spiegel in der Eprouvette und zwar um 25 Millimeter in der Flasche, welche die Nadeln enthielt, und um 9 Millimeter an der Flasche, welche das Laub barg.

Die Analyse ergab, dass aus dieser 4.75 CC., aus jener 2.25 CC. Kohlensäure absorbiert worden waren, ein Quantum, das fast zu gering erscheint, wenn man berücksichtigt, dass die Kohlensäurebildung lebhaft im Gange war, und nur erklärlich wird durch den Umstand, dass die Luft im Apparate von allem Anfange an arm an Sauerstoff, sehr reich an Kohlensäure war und dass die letztere unbewegt blieb, und nur durch eine kaum 0.5 □ Cm. grosse Fläche mit der absorbirenden Flüssigkeit in Berührung stand.

In jedem Falle war aber die Entwicklung der Kohlensäure von dem Augenblicke an sistirt, wo der im Apparat noch vorhandene Sauerstoff verbraucht war.

Zu allem Ueberfluss brachte ich noch die Flaschen mit Quecksilbermanometern in Verbindung, unter der Vorsicht, dass nicht mehr Luft eintreten konnte als in dem einen Schenkel des Manometers enthalten war. Auf diese Art gelangte allerdings, da das Manometer 10—12 CC. fasste, etwa 1 CC. Sauerstoff in den Apparat, eine Menge, durch welche das Resultat wohl nicht alterirt werden kann.

Nach 30 Tagen war auch nicht die geringste Niveaudifferenz zu bemerken.

Die Zusammenstellung der Apparate gestattete sie mit Absorptionsröhren zu verbinden ohne dass Luft eintrat. Die Entwicklung von Kohlensäure hätte sich so durch die in die Barytlösung eintretenden Gasblasen verrathen müssen. Es geschah aber nichts dergleichen. Erst als die Aspiratoren in Thätigkeit gesetzt wurden, wurde ein kohlen-säurereiches Gasgemenge aus den Flaschen gehoben, wie nicht anders zu erwarten stand. Nachdem etwa 60 CC. abgeflossen waren, standen die Aspiratoren stille und ich öffnete nun eine Minute lang die Verbindung der Flaschen mit Luft. Diess genügte um eine enorme Kohlensäureentwicklung einzuleiten.

Dass die Entwicklung von Kohlensäure im Boden ohne Zutritt von Sauerstoff unmöglich sei, dazu bedurfte es keines Beweises.

Bekanntlich aber finden bei der Humificirung der Vegetabilien auch Desoxydationsprocesse statt und es ist strittig ob der hierbei gelieferte Sauerstoff zur Bildung von Wasser oder zur Oxydation des Kohlenstoffes verwendet wird. Mein Versuch spricht für die erstere,

von Saussure vertretene Anschauung, da für die Production der Kohlensäure atmosphärischer Sauerstoff unerlässlich erscheint.

Unter natürlichen Verhältnissen kommt eine vollkommen behinderte Communication der Bodenluft mit der Atmosphäre nicht leicht vor, wohl aber sind verschiedene Bodenarten für Gase in verschiedenem Grade durchdringlich. Um wenigstens ein allgemeines Urtheil darüber zu gewinnen, wie durch diese physikalische Eigenschaft des Bodens die Vertheilung der Kohlensäure in der Bodenluft beeinflusst wird, stellte ich einige Versuche mit typischen Erden im Freien an. Ich liess im Mariabrunner Versuchsgarten vier Beete von 1 Meter im Quadrat und 0·5 Meter Tiefe ausheben und füllte diese mit wechselnden Lagen von Nadelstreu, Wellsand und Thon, u. z.

I.	II.	III.	IV.
Thon	Wellsand	Thon	Wellsand
Wellsand	Thon	Nadelstreu	Nadelstreu
Nadelstreu	Nadelstreu	Wellsand	Thon

Als vierte, unterste Schichte wurde der natürliche Boden, sandiger Lehm, belassen. Die Nadelstreu wurde in einer Schichte von 10 Cm., der Wellsand und Thon in 20 Cm. Mächtigkeit genommen. Vier Glasröhren wurden in jedes Beet so versenkt, dass das im Boden befindliche Ende in halber Höhe je einer Schichte zu liegen kam und von seinen Nachbarn mindestens 30 Cm. allseitig entfernt war. So stand zu erwarten, dass die angesaugten Gebiete einander nicht berührten, und zur weiteren Vorsicht wurde für jeden Versuch nur je ein halber Liter Luft aspirirt.

In der Zeit des Versuches (23.—31. August) herrschte unausgesetzt schönes Wetter. Das Versuchsfeld war der Sonne exponirt und die Aspiration der Luft erfolgte um die Mittagszeit. So weit bei Versuchen im Freien die äusseren Bedingungen als gleiche gelten können, war es hier der Fall.

	Bodenart	Tiefe in Metern	Kohlensäure in 1000 Vol. <sup>1)</sup>			
I	Thon	0·10	8·0		9·0	
	Sand	0·30	10·8	9·6	13·6	14·0
	Nadelstreu	0·45	15·8	18·4	17·6	17·8
II	Sand	0·10	4·0		4·9	
	Thon	0·30	37·0	26·2	30·0	
	Streu .	0·45	38·2	31·6	33·7	
III	Thon	0·10	20·0	19·8		
	Streu	0·25	19·3	15·3	15·1	
	Sand	0·40	20·2	16·8		
IV	Grund	0·60	15·9	11·7	12·4	
	Sand	0·10	8·5		7·7	
	Streu .	0·25	7·2	10·4	9·0	
	Thon	0·40	18·9	20·4	18·9	

<sup>1)</sup> Die Zahlen der verticalen Reihen beziehen sich auf gleichzeitige Bestimmungen.

Auf den ersten Blick fällt die grosse Verschiedenheit im Kohlensäuregehalte der verschiedenen Bodenarten auf. Diese hat indessen nichts Ueberraschendes. Daneben sehen wir aber auch, dass der Kohlensäuregehalt in derselben Bodenart sehr bedeutenden Schwankungen unterworfen ist, und wir wollen versuchen, die Abhängigkeit derselben von der Natur der Bodenschichten aus den tabellarischen Daten abzuleiten. In dem Beete I und II befindet sich die Quelle der Kohlensäure — als solche kann die Nadelstreu gegenüber den beiden an organischen Substanzen überaus armen Schichten gelten — bedeckt von Sand und Thon, so dass einmal der Thon, das andere Mal der Sand die unmittelbare Decke bildet. Im ersten Falle (II) ist sowohl die Streu- als die Thonschichte reich an Kohlensäure, der sie bedeckende Sand ebenso arm an ihr. Man darf daher vermuthen, dass die in der Streu sich entwickelnde Kohlensäure leicht in den Thon eindringt, diesen aber nur schwer und in geringer Menge verlässt. Der Sand erhält wenig Kohlensäure und diffundirt unmittelbar mit der atmosphärischen Luft. Im zweiten Falle (I) bildet Thon die Oberfläche. Er erhält die Kohlensäure durch Vermittlung des Sandes und behält sie zum grössten Theile. Sein Einfluss erstreckt sich aber auch in der Richtung, dass er dem leicht diffundirbaren Sande einen grösseren Gehalt an Kohlensäure sichert. Der Sand befindet sich zwischen zwei Schichten, von denen die untere das Gas zuführt, die obere es nur in geringer Menge abgibt, daher erklärt sich, dass bei dieser Lagerung der Bodenarten der Kohlensäuregehalt nach oben stetig abnimmt.

Die Zahlen der Tabelle III zeigen die conservirende Eigenschaft des Thons in überzeugender Weise. Bis in die Tiefe von 40 Cm. ist der Kohlensäuregehalt der Bodenluft wenig verschieden, gleichgiltig aus welchem Materiale der Boden geschichtet ist, indem durch die Thondecke die Abgabe der Kohlensäure an die Luft gehemmt wird und, dass im Gegensatze zu I der Thon reicher an Kohlensäure ist, beruht darauf, dass die Streu sich unmittelbar unter ihm befindet. Der Grund enthält weniger Kohlensäure.

Die Tabelle IV gibt Aufschluss über den Vorgang der Diffusion selbst. Derselbe erfolgt offenbar nach allen Richtungen des Raumes. Der Sand, den wir aus den Versuchen II bereits als eine das Gas sehr leicht durchlassende Bodenart kennen, behält hier nahezu denselben Kohlensäuregehalt wie die unter ihm befindliche Streulage, weil, so leicht die Kohlensäure an die Luft abgegeben wird, ebenso leicht der Verlust wieder von unten her ersetzt wird. Dort war der Sand von der Kohlensäurequelle durch Thon geschieden, einer Bodenart, welche begierig Gase aufnimmt, aber dieselben ebenso energisch festhält. Diese Eigenschaft macht es erklärlich, dass in der Anordnung IV der Thon sogar reicher an Kohlensäure ist, als die Streuschichte.

Auf den Gehalt der Bodenluft an Kohlensäure ist die Durchlässigkeit der Bodenschichten für Gase und die Art ihrer Schichtung demnach von hervorragendem Einflusse, so dass unter Umständen sogar humificirende Schichten geringeren Kohlensäuregehalt aufweisen können als andere, in denen erwiesenermassen Kohlenstoffverbindungen sehr spärlich vorhanden sind. Wenn man diesen Thatsachen begegnet, ohne die Ursache derselben zu kennen, so liegt es sehr nahe, die Bedeutung der im Boden enthaltenen organischen Substanzen als Quelle der Kohlensäurebildung zu unterschätzen.

Die Durchlässigkeit der Bodenschichten für Gase übt ihren Einfluss auf den Kohlensäuregehalt der Bodenluft ohne Frage auch in der Weise, dass durch sie der Zutritt von Sauerstoff, die fundamentale Bedingung der Oxydationsprocesse, regulirt wird. Wie sich



dieser Einfluss geltend macht, ob bis dahin, dass die Bildung der Kohlensäure merklich alterirt werden kann, darüber geben diese Versuche keinen Aufschluss, bei denen dem Gasaustausche von den Seiten her kein Hinderniss gesetzt war.

Zur Entscheidung dieser Frage schien mir ein in kleinerem Massstabe ausgeführter Versuch zu genügen.

Ich füllte einen 0·4 Meter hohen Recipienten zur Hälfte mit Düngererde und zur Hälfte mit Thon. Aus jeder der beiden Schichten wurden gleiche Luftmengen, gleichzeitig und abgesondert aufgefangen und ihr Gehalt an Kohlensäure bestimmt. — Es enthielten:

3 Liter Luft aus Erde	19·6 Mgr.,	aus Thon	11·2 Mgr. CO <sub>2</sub> ,
2	37·6		18·4
2	72·8		28·0
1	51·2		15·2

Es war somit in beiden Schichten die Kohlensäure in Zunahme begriffen. Nachdem wir wissen, dass der bei der Zersetzung der Kohlehydrate sich ausscheidende Sauerstoff zur Bildung der Kohlensäure nicht verwendet wird, so ist diess ein sicherer Beweis, dass durch die 20 Cm. mächtige Thonschichte die atmosphärische Luft in genügender Menge diffundiren konnte. Die Steigerung erhärtet weiter die oben ausgesprochene Ansicht, dass der Thon den Austritt der Kohlensäure erschwert.

Welch wichtige Rolle das Wasser bei der Bildung der Kohlensäure im Boden spielt, hat schon der Versuch gezeigt, in welchem durch Trocknen der Düngererde bei 100° die Entwicklung der Kohlensäure gänzlich zum Stillstande gebracht worden war. Dass aber auch durch blosse Einwirkung der Sonnenstrahlen der Erde so viel Feuchtigkeit entzogen werden kann, dass in ihr keine Kohlensäure mehr entsteht, zeigen folgende drei Versuche.

Ich dörte Weissbuchenlaub und Schwarzföhrennadeln an der Sonne und mischte je 5 Gr. davon mit 300 Gr. gleichfalls getrockneten Quarzsandes. Zugleich wurden 300 Gr. an der Sonne getrocknete Composterde genommen. Diese drei Erdproben wurden in gleicher Weise verschlossen, nachdem das Luft zuführende Rohr mit dem Kaliapparat verbunden war.

Wie rasch und vollständig die eingeschlossene Luft an Kohlensäure erschöpft wurde, ist unmittelbar aus der Tabelle ersichtlich.

Datum	Luftquantum	CO <sub>2</sub> in 1000 Theilen		
		Laub	Nadeln	Compost
13. Juli	1 Liter	0·87	2·60	
14.		0·55	0·99	4·38
16.				2·32
20.		0·43	0·00	0·87
21.		0·00		0·00
27.		0·00	0·00	0·00

Nun brachte ich mittels einer Pipette je 50 CC. destillirtes, eben ausgekochtes Wasser in die Gefässe und begann sofort Luft zu aspiriren.

Datum	Luftquantum	CO <sub>2</sub> in 1000 Vol.		
		Laub	Nadeln	Compost
27. Juli	1 Liter	5·45	1·30	4·58
28.	1	1·30	0·87	9·98
29.	2 <sup>1)</sup>	48·97 <sup>1)</sup>	13·54 <sup>1)</sup>	45·94 <sup>1)</sup>
30.	1	36·84	10·83	20·04
31.	1	49·29	13·00	21·66

Es erhellt sonach, dass der Boden durch Austrocknen an Kohlensäure verarmt bis dahin, dass er derselben vollkommen entbehrt, wenn die Zufuhr des Gases abgeschnitten ist. Das Letztere kommt wohl in der Natur nicht vor, aber es ist immerhin beachtenswerth, dass unter Umständen auch reich gedüngte Böden ihren Bedarf an Kohlensäure nicht selbst produciren, sondern auf den Bezug von aussen angewiesen sind. Die Aermlichkeit dieser Bezugsquellen wurde aber bereits nachgewiesen, und so ergibt sich daraus eine bisher nicht gewürdigte Folge des Austrocknens der Erde: Verarmung an Kohlensäure. Man möge über die Bedeutung der freien Kohlensäure im Boden für die Vegetation welcher Meinung immer sein, sie möge von den Wurzeln direct aufgenommen werden oder andere Nährstoffe aufschliessen — über ihre Nothwendigkeit besteht kein Zweifel. Wenn sie nun periodisch in unzureichender Menge vorhanden ist, so muss die Ernährung der Pflanzen wesentlich alterirt werden. Die schädliche Wirkung kräftiger und anhaltender Insolation auf Keimlinge und flachwurzelige Pflanzen ist nicht allein die Folge übermässiger Erwärmung und Wasserentziehung, die Pflanzen verschmachten nicht nur, sie verhungern auch.

Auch absolute Trockenheit des Bodens kommt unter natürlichen Verhältnissen nicht vor; denn erstlich erwärmt sich der Boden niemals bis zur Siedhitze, und zweitens besitzt er in seinen tieferen Lagen eine nie versiegende Wasserquelle. Dennoch reicht die unter natürlichen Verhältnissen eintretende Verarmung des Bodens an Wasser hin, um die consecutive Verarmung an Kohlensäure zur Anschauung bringen zu können.

An einem sehr warmen Augusttage versenkte ich zur Mittagszeit ein kurzes Gabelrohr 3 Cm. tief an einer unbewachsenen Stelle einer Wiese, die allseitig den Sonnenstrahlen preisgegeben ist.

Die Temperatur der Luft im Schatten betrug 32·7 °  
 Erdoberfläche                    „   34·0 °  
 Erde in 10 Cm. Tiefe   21·5 °

Ich aspirirte 0·5 Liter Luft und bestimmte ihren Kohlensäuregehalt mit 1·6 Vol. pr. m.

<sup>1)</sup> Die Werthe bestehen aus folgenden Summanden:

29. Juli	{	1 Liter	28·17	7·58	26·44
		1 „	20·80	5·96	19·50
		2 Liter	48·97	13·54	45·94

Ein neuer Beweis für den oben ausgesprochenen Satz, dass das Resultat getrübt wird, wenn hintereinander grössere Quantitäten Luft aspirirt werden. Die Reihe zeigt eine fortwährende Steigerung der Kohlensäure-Entwicklung, eine scheinbare Abnahme dann, wenn die Luft aufgesaugt wird bevor die Kohlensäure wieder ersetzt werden konnte. Um vergleichbare Werthe zu erhalten, ist es demnach erforderlich immer die gleichen Luftmengen und in gleichen Zeitintervallen zu untersuchen.

Am folgenden Tage hatte die Luft 31·1", die Erdoberfläche 32·4 " und die Erde in 10 Cm. Tiefe 23·0°.

Die Bodenluft enthielt 2·08 Vol. pr. m. Kohlensäure. Unmittelbar nach dieser Bestimmung bewässerte ich den Boden und aspirirte eine neue Luftprobe. Sie enthielt 3·7 Vol. pr. m. Kohlensäure, also nahe die doppelte Menge.

Kehren wir zur Erörterung der Tabelle zurück.

Der Bewässerung folgt die Entwicklung der Kohlensäure unmittelbar auf dem Fusse; aber erst am dritten Tage waren, ich möchte sagen, alle chemischen Schleussen eröffnet. Von da an zeigt sich eine mässige, aber continuirliche Steigerung in der Entwicklung der Kohlensäure. Uebereinstimmend mit einigen oben angeführten Versuchen findet man auch hier, dass aus Laub sich die grösste Menge Kohlensäure bildet. Nadeln produciren etwa ein Drittel, vegetabilische Düngererde etwa die Hälfte der Menge unter gleichen äusseren Einflüssen.

Diese beiden Versuchsreihen zeigen zwar, dass die Gegenwart von Wasser ein unbedingt Erforderniss für die Bildung von Kohlensäure im Boden ist; aber sie geben keinen Aufschluss darüber, in welcher Beziehung die Quantität des Wassers zur Intensität der Kohlensäure-Entwicklung steht und doch bestehen zweifelsohne solche Relationen. Bei der ungeheuren Mannigfaltigkeit in der Zusammensetzung der Bodenarten und bei der Unmöglichkeit alle übrigen bei der Bildung der Kohlensäure concurrirenden Einflüsse auszuschliessen oder wenigstens gleich zu setzen, scheint mir die Schwierigkeit unüberwindlich, jene Beziehungen durch ein allgemein giltiges Gesetz auszudrücken. Die Wassermenge, welche einem Boden geboten sein muss, wenn in diesem die Kohlensäure-Entwicklung ihr Maximum erreichen soll, wird ebenso variabel sein, wie die Zusammensetzung der Bodenarten es ist, und man wird sich begnügen müssen, sagen zu können, ob sich die Entwicklung der Kohlensäure mit der Menge des zugeführten Wassers steigert, und wie sich der Boden in dieser Beziehung gegen einen Ueberschuss von Wasser verhält.

Gäbe es einen Boden, in welchem die chemischen Prozesse sich so gleichmässig abspielten, dass in der Zeiteinheit bestimmte Mengen von Kohlensäure entwickelt würden, so könnten jene Fragen mit Leichtigkeit beantwortet werden. Selbst unfruchtbare Böden entsprechen dieser Anforderung nicht, haben dagegen den Nachtheil, dass die in ihnen enthaltenen Kohlensäuremengen sehr gering, Fehlerquellen daher umso grösser sind. Frisch gedüngte Böden sind zwar ungeheuer reich an Kohlensäure, aber ihre Entwicklung steigert sich unter nicht controllirbaren Einflüssen. Am meisten für den Versuch geeignet erwies sich mir eine Düngererde, in welcher der Process der Verwesung schon durch mehrere Jahre andauerte. Ich überzeugte mich durch eine Reihe von Vorversuchen, dass in ihr die Entwicklung der Kohlensäure verhältnissmässig stetig stattfand. Wurde (im lufttrockenen Zustande) die in ihr enthaltene Luft in regelmässigen Zeiträumen von 24 zu 24 Stunden aspirirt, so enthielt sie 19—22 Vol. pro mille Kohlensäure, also ebensoviel etwa als die im vorigen Versuche verwendete Düngererde nachdem sie befeuchtet worden war.

Nach Beendigung des letzten Vorversuches, welcher 19·1 pr. m. Kohlensäure ergab, tränkte ich die Erde mit Wasser und wie vorhin wurde von 24 zu 24 Stunden je ein Liter Luft aspirirt.

Der Kohlensäuregehalt steigerte sich sofort auf 26·2, 40·7, 49·1 Vol. pr. m. Am vierten Tage war er wieder auf das Normale gesunken und betrug an sieben aufeinander folgenden Tagen 21·8, 20·1, 20·1, 19·6, 20·1, 20·4, 20·1 Vol. pr. m.

Zunächst ist die oben angedeutete Möglichkeit, dass durch überschüssiges Wasser die Bildung der Kohlensäure gestört werden könnte, ausgeschlossen. Trotzdem der Boden über sein Fassungsvermögen getränkt war, zeigte sich kein verminderter Kohlensäuregehalt der Bodenluft.

Stetig und rasch ansteigend erreichte der Kohlensäuregehalt das Maximum (nahe fünf Percent) und sank dann plötzlich und unvermittelt auf das Mass, welches der Bodenmischung eigenthümlich zu sein scheint, wie aus dem Umstande geschlossen werden darf, dass dasselbe im lufttrockenen Zustande und reichlich getränkt unverändert blieb. Um dieses Mass zu produciren, genügt offenbar eine geringe Feuchtigkeit des Bodens, und eine Erhöhung desselben wird durch reichliche Bewässerung für die Dauer nicht erzielt.

Die rapide Steigerung des Kohlensäuregehaltes der Bodenluft und der plötzliche Abfall desselben, wenn dem Boden grössere Wassermengen zuströmen, lässt eine zweifache Erklärungsweise zu.

Man kann sich vorstellen, dass die Kohlensäurehüllen den Erdpartikelchen so fest adhäriren, dass sie an die durchstreichende Luft nicht abgegeben, wohl aber verdrängt werden, wenn grössere Wassermassen zwischen die Moleküle eindringen und ihren Zusammenhang lösen. Nach dieser Erklärungsweise würde reichliche Wasserzufuhr auf die Bildung der Kohlensäure ohne Einfluss sein. Durch jene würde nur auf mechanischem Wege die bereits gebildete, aber durch Molekularkräfte festgehaltene Kohlensäure frei gemacht und der durchstreichenden Luft beigemischt werden.

Es wäre aber auch die Annahme möglich, dass gewisse Bodenbestandtheile nur bei reichlich verfügbarem Wasser aufgeschlossen werden. Jene Bestandtheile sind wohl je nach der Bodenart in wechselnder aber doch begrenzter Menge vorhanden und so wird nach dieser wie nach der vorigen Erklärungsweise der unvermittelte Rückgang des Kohlensäuregehaltes ad normam verständlich.

Halten wir die aus all diesen Versuchen über den Einfluss des Wassergehaltes des Bodens auf den Kohlensäuregehalt gewonnenen Erfahrungen zusammen, so ergeben sich folgende Thatsachen.

1. Im absolut trockenen Boden ist die Luft nicht reicher an Kohlensäure als in der Atmosphäre.
2. Schon durch die blossе Insolation kann dem Boden so viel Wasser entzogen werden, dass die Entwicklung der Kohlensäure in ihm gehemmt wird.
3. Andererseits genügt ein sehr geringer Wassergehalt des Bodens, bei dem dieser noch nicht feucht genannt wird, um in ihm dieselbe Kohlensäuremenge zu produciren, als wenn er mit Wasser gesättigt wäre.
4. Wenn ein vorher lufttrockener Boden reichlich bewässert wird, so stellt sich eine vorübergehende, aber beträchtliche Steigerung im Kohlensäuregehalte der Bodenluft ein.

Die Schwankungen im Kohlensäuregehalte der Bodenluft, soweit sie vom Wassergehalte des Bodens abhängen, sind demnach eine Folge der Wasserentziehung durch lebhaftes Insolation, oder eine Folge atmosphärischer Niederschläge.

Die evaporirenden Wirkungen der Insolation sind mit den thermischen untrennbar verknüpft, werden daher später, wenn von dem Einflusse der Temperaturschwankungen auf den Kohlensäuregehalt der Bodenluft die Sprache sein wird, Erwähnung finden.

Hier mögen nur einige Bemerkungen über die Wirkung der atmosphärischen Niederschläge auf die Menge und die Vertheilung der Kohlensäure Platz finden.

Sehr nahe unter der Oberfläche bleibt der Boden unter allen Umständen feucht, und es wird die Kohlensäurebildung gleichmässig im Gange bleiben, da, wie wir gesehen haben, ein mässiges plus oder minus von Wasser sie unberührt lässt. Die atmosphärischen Niederschläge werden daher eine unmittelbare Wirkung nur auf die oberflächlichen Schichten ausüben und in dem Masse als das Wasser versickert, werden immer tiefere Schichten zur lebhafteren Entwicklung von Kohlensäure angeregt, bis endlich der Wasserzfluss zu gering ist, um eine Wirkung hervorzubringen.<sup>1)</sup> Wann dieser Punkt erreicht sein wird, hängt ebensoviel von der Menge der Niederschläge als von der Durchlässigkeit des Bodens ab. Der Einfluss der Niederschläge auf die Bildung der Kohlensäure ist gewiss bedeutend; aber er scheint mir übertroffen zu werden von dem Einflusse, den sie auf die Bewegung des Gases ausüben. Sie möchte ich für die vorzüglichste Ursache des bedeutenden Kohlensäuregehaltes der tieferen Schichten auch unfruchtbarer Bodenarten halten. Da wo sie auch unfähig sind die Bildung des Gases zu fördern, setzen sie es ab, nachdem sie sich während ihres Durchganges durch Schichten, die reich an demselben waren, geschwängert haben. Indem sie sich in Zeitläufen wiederholen, während welcher der Gasaustausch, durch eine mächtige Erdschichte gestört, nicht hat vollendet werden können, sind sie eine continuirliche Quelle der Kohlensäure für die Tiefen der Erde und wahrscheinlich ist ein grosser Theil der in diesen aufgespeicherten Kohlensäure nicht mineralischen Ursprunges, sondern das Product der Zersetzung jener Organismen, die sich aus ihr aufgebaut haben. Die atmosphärischen Niederschläge sind das Vehikel, durch welches die Kohlensäure nach unten geführt wird, der Transport des Gases in centrifugaler Richtung erfolgt mit dem aufsteigenden Wasserströme, den die abdunstende Erdoberfläche unterhält.

So lange die Kohlensäure vom Wasser absorbiert ist, gehört sie nicht in das Gebiet unserer Betrachtungen, die sich nur auf die freie Kohlensäure der Bodenluft erstrecken; aber das Wasser dunstet ab, mit ihr Kohlensäure, und es fragt sich nur, ob beide Vorgänge mit der gleichen Intensität stattfinden, oder ob nicht etwa Kohlensäure frei geworden, im Boden zurückgehalten wird.

Das physikalische Gesetz über die Diffusion der Gase durch poröse Scheidewände lehrt, dass die Geschwindigkeiten mit welchen die Gase diffundiren sich umgekehrt verhalten wie die Quadratwurzeln aus ihren specifischen Gewichten. Das specifische Gewicht der Luft, mit welcher sowohl die Kohlensäure als der Wasserdampf diffundirt, gleich 1 gesetzt, ist das specifische Gewicht der Kohlensäure = 1.52021, das spec. Gew. des Wasserdampfes = 0.62207. Es wird also das Volumen des austretenden Wasserdampfes 1.43mal grösser sein als das der eintretenden Luft, während das Volumen der austretenden Kohlensäure nur 0.81mal grösser ist. Mit andern Worten, die Geschwindigkeit, mit welcher die Kohlensäure mit Luft diffundirt, ist nahezu um die Hälfte kleiner als die des Wasserdampfes. Wenn daher die Bodenfeuchtigkeit verdunstet, wird ein Theil der von ihr absorbierten Kohlensäure frei und bereichert die Bodenluft.

Es wird gelehrt, dass die Verwesung bei Temperaturen unter 0° sistirt wird und dass sie umso lebhafter fortschreitet, je höher die Erwärmung steigt.

<sup>1)</sup> Es ist auch zu erwägen, dass die Luft nur bis zu einer gewissen Tiefe in den Boden eindringen kann und mit zunehmender Tiefe nimmt jedenfalls die Wirkung der atm. Luft auf die Bestandtheile des Bodens ab. Mulder bemerkt schon, dass die Luft, welche den Boden bei trockenem Wetter erfüllt, durch den Regen in die Tiefe getrieben wird und hier ihre oxydirende Wirkung ausübt.

Wenngleich die Bildung von Kohlensäure eine unmittelbare Folge, ein Symptom des Verwesungsprocesses ist, so darf doch nicht ohneweiters auf den Parallelismus beider Vorgänge geschlossen werden.

Ich hielt es daher für geboten, experimentell zu prüfen, wie sich die Entwicklung der Kohlensäure in verschiedenen erwärmten Böden verhält. Beobachtungen im Freien können nicht zur nöthigen Klarheit führen, weil andere die Einsicht störende Factors nicht eliminiert werden können, gewiss auch unerkannt bleiben.

Die mir durch zahlreiche Analysen bereits vertraute Composterde wurde wieder herangezogen und durch längere Zeit der Gang der Kohlensäure-Entwicklung in ihr beobachtet. Wenn von 24 zu 24 Stunden ein Liter Luft aspirirt wurde, enthielt dieser im Mittel 20 CC. Kohlensäure und die Schwankungen betrug wenig mehr als 0·1 Percent. Die Temperatur im Laboratorium ist sehr constant. Die Differenz zwischen dem Minimum- und Maximum-Thermometer erreichte höchstens zwei Centigrade.

Die Erwärmung geschah durch Zuleitung erwärmter Luft in die Erde, die Abkühlung, indem das Gefäß mit der Erde in das Wasserbad und in Eismischungen gestellt wurde. Dabei wurde die Erzielung einer bestimmten Temperatur nicht angestrebt, sondern die jeweilig sich einstellende an dem in die Erde gesenkten Thermometer abgelesen.

T <sup>o</sup>	+ 19·4	19·1	Vol. Kohlensäure pro mille
	+ 25·2	24·7	
	+ 32·0	24·9	
	+ 31·4	32·9	
	+ 31·5	34·0	
	+ 16·0	20·3	
	+ 4·0	12·5	
	+ 18·5	17·9	
	+ 19·0	21·2	
	— 9—11	10·2	
	+ 20·7	20·1	
	+ 20·8	20·4	
	+ 60·0	43·2	

Diese Ziffern zeigen unwiderleglich den Zusammenhang zwischen der Temperatur und der Energie der Kohlensäure-Entwicklung, und zwar ist mit der Steigerung jener eine Erhöhung dieser verbunden und umgekehrt.

Auffallend scheint nur, dass bei der durch eine Kältemischung hervorgebrachten Abkühlung der Erde auf — 9 bis — 11 Grad die Bodenluft noch immer beträchtliche Mengen von Kohlensäure aufnahm.

Es stimmt diess mit den Beobachtungen von Fodor überein, welcher auch die Luft in gefrorenem Boden reich an Kohlensäure fand. Der Einwand liegt nahe, dass diese nicht im gefrorenen Boden sich gebildet habe, sondern schon von früher her in ihm enthalten gewesen oder aus nicht gefrorenen Bezirken angesaugt worden sei.

Den Einwand rechtfertigen die Resultate folgenden Versuches. Ich setzte 600 Gramm Düngererde in eine Kältemischung von Eis und Kochsalz und bestimmte die Kohlensäuremenge, die sie an einen Liter durchstreichende Luft abgab, mit 50·4 Mgr.

Die Nacht über war das Eis aufgethaut, ich erneuerte die Kältemischung und sorgte dafür, dass die eingesetzte Erde durch 10 Stunden gefroren blieb.

Die während dieser Zeit durchgeleitete Luft wurde viermal auf ihren Gehalt an Kohlensäure geprüft.

Die erste Portion (ein Liter) aus der noch aufgethauten Erde ergab 44·4 Mgr., die folgenden 9·6, 5·4, 0·4 Mgr. Kohlensäure.

Es war noch viel Eis vorhanden und am Morgen des dritten Tages hatte die Erde noch die  $T^0 = + 8^0$ .

Ich setzte sie sofort in die Kältemischung und erhielt in dem ersten Liter Luft 15·2 Kohlensäure. Zwei folgende Luftproben, die ich in Intervallen von zwei Stunden aspirirte, enthielten 0·8 und 0·4 Mgr. Kohlensäure, also kaum mehr als die atmosphärische Luft.

Welches ist nun der Antheil, den die Temperaturdifferenzen des Bodens auf den Gehalt desselben an Kohlensäure nehmen?

Von den Wärmequellen der Erde kommt für uns die aus dem Inneren der Erde an die Oberfläche geleitete Wärme nicht in Betracht, da sie die Temperaturen jener Erdschichten, mit denen wir es zu thun haben, in kaum messbarer Weise beeinflusst. (Erst in der Tiefe von 31 Metern steigt die Temperatur des Bodens in Folge der Centralwärme um  $1^0$  C.)

Auch die durch chemische Vorgänge in der Erde frei werdende Wärme entzieht sich unserer Berücksichtigung aus den oben bereits angeführten Gründen, wenngleich sie mitunter in ausschlaggebender Weise wirksam sein mag. Nur die in der Erde fortgeleiteten Wärmestrahlen der Sonne können unserer Betrachtung zu Grunde gelegt werden. Durch sie wird die Oberfläche der Erde ungleich stärker erwärmt als die Luft. Die oberste Schichte der Erde kann eine Temperatur von 50 und mehr Graden erreichen, oder die Temperatur der Luft sinkt unter den Gefrierpunkt, während die Erdoberfläche sich unter dem Einflusse der Sonnenstrahlen um mehrere Grade über Null erwärmt. <sup>1)</sup>

Die Leitung der Wärme in die tieferen Schichten der Erde erfolgt aber so langsam, dass in einer Tiefe von zwei Metern die Unterschiede in der mittleren Temperatur des einen

<sup>1)</sup> Einige thermometrische Daten über den Wiesengrund, in welchem viele der angeführten Versuche angestellt wurden, sind vielleicht nicht unwillkommen.

Alle Ablesungen fanden Mittags statt.

Datum	T e m p e r a t u r					
	der Luft	des Bodens, Tiefe in Cm.				
		1	10	20	30	40
25. Aug.	26·8	31·0	23·0	20·0	19·5	19·0
27. "	25·2	24·0	21·5	19·5	19·0	19·0
28. "	35·4	38·0	23·5	20·0	19·0	19·0
29. "	32·7	34·0	21·5	19·5	19·3	19·2
30.	31·1	32·4	23·0	21·5	20·0	19·5
31. "	30·4	34·0	24·0	21·0	20·0	19·6
1. Sept.	15·2	17·0	16·2	16·0	16·0	19·5
11. "	26·1	28·0	16·5	14·7	14·6	15·0
12.	28·2	30·0	16·5	14·5	14·5	15·0

und des folgenden Monates unmerkbar werden, dass schon in 0·5 Meter Tiefe das Thermometer durch die Tagesschwankungen der Temperatur der oberflächlichen Schichten nicht beeinflusst wird.

Die Tiefe, in welcher der Boden eine von der Temperatur der Atmosphäre unabhängige, constante Temperatur besitzt, ist je nach dem Klima verschieden. Sie ist am geringsten da, wo die Maxima und Minima der Temperatur nur wenig von einander abstehen; also in den Tropen und in den Polarländern. In unseren Gegenden erhält die Erde etwa in einer Tiefe von 25 Metern die Temperatur constant. Von da nach aufwärts concurrirt an der Bodentemperatur noch ein zweiter Factor: die Lufttemperatur, und zwar um so mehr und um so rascher je mehr man sich der Erdoberfläche nähert.

Ich erinnere an diese bekannten Thatsachen, um zu zeigen, dass der Einfluss der Temperatur auf die Entwicklung der Kohlensäure und auf die Locomotion des Gases im Boden von verhältnissmässig untergeordneter Bedeutung ist.

Die im Boden innerhalb kurzer Zeiträume vorkommenden Temperaturschwankungen sind sehr stabil, besonders im Vergleiche mit den bedeutenden Differenzen der Lufttemperatur innerhalb 24 Stunden. Nur in den oberflächlichen Bodenschichten wird eine Beschleunigung, respective eine Verlangsamung in der Entwicklung der Kohlensäure durch thermische Einflüsse bemerkbar werden, wobei allerdings zu berücksichtigen ist, dass gerade in diesen die grösste Masse oxydirbarer Substanzen enthalten zu sein pflegt. Andererseits hat aber die Erwärmung des Bodens an der Oberfläche den Verlust an Feuchtigkeit im Gefolge, und wir haben gesehen, bis zu welchem Grade der Verarmung an Kohlensäure dieser Mangel führen kann, ein sicherer Beweis für die Prävalenz dieses Factors. Von dem Umstande, ob das verdampfte Wasser hinreichend rasch sich wieder ersetzt, wird es abhängen, ob die nachwirkende Erwärmung noch die Bildung der Kohlensäure wird begünstigen können. Geschieht diess nicht, und in jedem Falle bis zum Eintritt dieser Periode wird die Kohlensäure aus den tieferen Schichten nach oben strömen und die Intensität dieses Stromes wird weniger von der Differenz im Partialdrucke oder von den Temperaturdifferenzen im Boden als von den physikalischen Eigenschaften des Bodens abhängen, wie diess ja auch beim Gasaustausche zwischen Boden und Atmosphäre der Fall ist. Eine Strömung der Kohlensäure in entgegengesetzter Richtung (nach abwärts) kommt sicher auch vor, aber seltener und in geringerer Intensität.

### Beobachtungen in Culturböden.

Die im vorigen Capitel entwickelten Anschauungen müssen durch die Befunde unter natürlichen Verhältnissen bestätigt werden, sollen sie Anspruch auf Beachtung erheben können. Um sie zu prüfen, habe ich die Daten benützt, die ich selbst an einigen Oertlichkeiten gesammelt und bei denen ich die Umstände, welche auf den Gehalt der Bodenluft an Kohlensäure massgebend sein mochten, registriert habe.

Die erste Localität war eine Wiese, welche seit Jahren nicht gedüngt worden war. Sie besteht aus kalkreichem, eisenhaltigem Lehmboden, der in einer Tiefe von 1·5 Meter auf grobem Kalkschotter ruht, in dessen Zwischenräumen blauer Thon in geringer Mächtigkeit angetroffen wird. Im weiten Umkreise befinden sich keine bewohnten Räumlichkeiten.



In den Wiesengrund versenkte ich Bleiröhren in Tiefen von 2, 1·5, 1·0, 0·5 Meter, und nach einigen Wochen erst begann ich die Analysen der Luft, deren Ergebnisse in der folgenden Tabelle enthalten sind.

Datum	CO <sub>2</sub> in 1000 Vol.			
	2 M.	1·5 M.	1·0 M.	0·5 M.
24. Juni	11·5	12·7	12·7	14·6
25.	12·4	10·6	9·8	8·5
28.	8·9	14·3	14·3	10·6
29.	18·9 (?)	13·9	14·5	14·5
30. „	11·9	13·4		
2. Juli		12·7		
4.	9·9	9·9	11·9	13·4
5.	10·4	11·3	9·1	
6.	13·9	11·6	12·0	13·6
7.	13·7	11·1	11·1	14·3
8.	11·2	13·4	12·8	10·4
9.	11·7	12·9		13·7
11.	11·5	13·0	13·0	13·0
12.	11·6	13·0	11·5	13·2
13.	12·4	12·2	13·4	13·4
14.	13·9	13·9	14·6	14·3

Lehrreicher sind die in der folgenden Tabelle niedergelegten Parallelversuche.

Auf derselben Wiese, 20 Meter von einander entfernt, liess ich zwei Thermometerpaare eingraben, die 1 und 2 Meter tief reichten. Den Thermometerkugeln correspondirten die Mündungen von Bleiröhren, die zugleich eingesetzt wurden, so dass die Luft aus bestimmter Tiefe bei bekannter Bodentemperatur aspirirt wurde. Den einen Versuchsort beliess ich in natürlichem Zustande, den anderen düngte ich oberflächlich mit einer 10 Cm. hohen Schichte alter Nadelstreu. Auch hier wurde mit dem Beginn der Versuche gewartet, bis mit Sicherheit anzunehmen war, dass die natürlichen Verhältnisse zurückgekehrt waren.

Datum	Luftdruck 0° red.	Temperatur		Wiesen- grund	Tiefe in Metern	T°	CO <sub>2</sub> pro mille	Anmerkung	
		Max.	Min.						
18. Juli	739·2	19·9	13·7	ungedüngt	1	16·2	14·2	nach mehr- stündigem Regen	
					2	13·0	13·2		
				gedüngt	1	21·4	10·5		
					2	15·4	12·49		
20.	741·3	21·8	12·4	ungedüngt	1	16·2	12·3		
					2	13·1	11·9		
				gedüngt	1	18·4	9·0		
					2	14·0	11·1		
21.	743·9	27·7	15·5	ungedüngt	1	16·1	13·2	nach voraus- gegangenem Regen	
					2	13·1	12·7		
				gedüngt	1	17·8	10·2		
					2	13·9	10·5		
23.	743·5	27·5	13·3	ungedüngt	1	16·0	10·3		heiter
					2	13·2	13·1		
				gedüngt	1	17·3	14·3		
					2	13·7	12·4		
24.	740·9	31·2	17·1	ungedüngt	1	16·1	12·3		
					2	13·3	12·6		
				gedüngt	1	17·3	17·2		
					2	13·7	12·9		
26.	744·7	19·0	14·0	ungedüngt	1	16·6	14·6	nach heftigem Gewitter	
					2	13·3	14·9		
				gedüngt	1	17·6	11·3		
					2	13·7			
27.	743·0	22·7	14·9	ungedüngt	1	16·7	14·1		
					2	13·3	13·3		
				gedüngt	1	17·5	11·1		
					2	13·7	10·1		

Endlich machte ich noch einige Versuche im Walde. Es ist ein junger Buchenbestand auf sehr tiefgründigem Lehmboden, der der Humusdecke fast gänzlich entbehrt in Folge ausgiebiger Streunutzung. Die begonnenen Ablesungen der Bodentemperatur mussten aufgelassen werden — weil die Bodenthermometer geraubt wurden.

Datum	Luftdruck auf 0° red.	Temperatur		Tiefe in Metern	CO <sub>2</sub> pro mille Vol.
		der Luft	des Bodens		
23. Juli	743·5	27·5	14·4	0·5	2·6
			13·5	1·0	20·6
24.	740·9	31·2	14·4	0·5	2·5
			13·4	1·0	19·9
27.	743·1	22·7	15·0	0·5	2·0
			13·6	1·0	23·7
12. Septemb.	745·9	26·1		0·5	14·4
				1·0	15·0
13.	746·1	27·4		0·5	16·4
				1·0	17·1
				0·5	17·6
				1·0	14·2

Schon die blosse Uebersicht der ersten Tabelle zeigt, dass der Kohlensäuregehalt der Bodenluft in den Tiefen von 0·5—2 Meter nicht wesentlich verschieden ist.

Noch auffallender wird dieses Factum, wenn man die Mittelwerthe berechnet; denn dann ergibt sich

für die Tiefe von	2 Meter	12·25	pr. m. CO <sub>2</sub>
	1·5	12·5	
	1·0	12·3	
	0·5	12·8	

Man kann also angesichts dieser Beobachtungsreihe von einer gesetzmässigen Zunahme des Kohlensäuregehaltes der Bodenluft mit wachsender Tiefe nicht sprechen und die Beobachtungen, aus welchen diese Gesetzmässigkeit erschlossen wurde, erweisen sich als unvollständig. Die Luft des Waldbodens wurde zwar in tieferen Schichten ungleich reicher an Kohlensäure gefunden als in einer Tiefe von einem halben Meter. Dagegen zeigten wieder die Analysen der Bodenluft einer Wiese in ihrem gedüngten und im nicht gedüngten Theile Schwankungen nach jeder Richtung hin.

Angesichts dieser Thatsachen kann zwar die Regel festgehalten werden, dass der Kohlensäuregehalt in der Tiefe grösser ist; aber man darf nicht übersehen, dass die Regel nicht seltene Ausnahmen erfährt, welche in erster Linie wohl von den physikalischen Eigen-

schaften der Bodenschichten und von ihrem Gehalte an organischen Substanzen abhängen. Die Ausnahmen müssen umso auffälliger zu Tage treten, da wir nicht im Stande sind in jene Tiefen vorzudringen um zu erfahren, dass die Regel doch möglicherweise in ihr Recht eintritt.

In vielen Fällen werden wir nach dem bisherigen Stande unseres Wissens, gar nicht im Stande sein, die Ursache der Abweichungen von der Regel zu erkennen, geschweige, dass wir aus gegebenen Daten a priori auf den Kohlensäuregehalt in bestimmten Schichten werden schliessen können.

Den Grund der Erscheinung im vorliegenden Falle, suche ich in der Schichtung des Bodens. In dem groben Gerölle diffundiren die Gase mit solcher Leichtigkeit, dass eine periodisch in ihn gelangende grössere Kohlensäuremenge sich für die Dauer nicht behaupten kann. Im Grossen und Ganzen wird der Kohlensäuregehalt in ihm nur wenig von dem der umlagernden Schichten abweichen.

Die in derselben Tiefe vorkommenden Differenzen können nicht befremden, da innerhalb der Beobachtungszeit wiederholt Regengüsse vorkamen, nach denen constant ein grösserer Kohlensäuregehalt in 0·5 M. Tiefe gefunden wurde. Am folgenden Tage war ebenso regelmässig die Kohlensäure in den tiefen Lagen vermehrt, während sie in den oberen Schichten ihren Stand behauptete oder bereits gesunken war.

Ziemlich deutlich lassen sich auch in der zweiten Tabelle die Wirkungen der Regenfälle verfolgen. Nach denselben finden wir den Kohlensäuregehalt vermehrt, ihn aber bald wieder vermindert, weil bei den herrschenden hohen Temperaturen und der consecutiven raschen Wasserabgabe der oberen Schichten eine lebhafte Strömung der Kohlensäure nach oben veranlasst wurde.

Eine im hohen Grade auffallende Erscheinung ist es, dass im gedüngten Boden die Werthe für den Kohlensäuregehalt kleiner sind als im nicht gedüngten Grunde, wie aus der folgenden Zusammenstellung der Mittelwerthe erhellt.

	1 M.,	2 M. tief.
gedüngt	11·9	11·6
ungedüngt	13·0	13·1

Dass durch die Zufuhr organischer Substanz die Bildung von Kohlensäure gesteigert werden müsse, ist so einleuchtend und durch die Versuche wurde dieses Agens als so einflussreich nachgewiesen, dass man sich nach einer Erklärung dieses widersprechenden Befundes umsehen muss. Ich weiss keine andere zu geben, als dass die in der oberflächlich gelagerten Düngerschichte sich reichlich entwickelnde Kohlensäure an die Atmosphäre abgegeben wird, und dass es längere Zeit und wiederholter, ausgiebiger Niederschläge bedarf, damit die Kohlensäure in die Tiefe geführt werde. Dafür scheint zu sprechen, dass am 23. und 24. Juli nach vorausgegangenen Regengüssen sich eine namhafte Steigerung des Kohlensäuregehaltes in 1 M. Tiefe einstellt, nachdem schon vorher ebenso wie im ungedüngten Boden eine mässige Steigerung zu beobachten war. Dass diese Steigerung in der Tiefe von 2 M. in geringerem Masse zum Ausdrucke kommt und dass sie nicht anhält, muss ich consequenterweise der hier befindlichen Geröllschichte zuschreiben. Leider ist die Wirkung des Gewitters am 26. nach 6 heissen Tagen nicht mehr ersichtlich. Als ich den Versuch unterbrach, hatte ich für die gesammelten Daten noch keine Deutung.

Sehen wir nun nach dem Einfluss, den die Düngung auf die Temperatur des Bodens nimmt. In dem ungedüngten Boden schwankt die Temperatur in 1 Meter Tiefe von  $16\cdot0^{\circ}$  bis  $16\cdot7^{\circ}$ , in 2 M. Tiefe von  $13\cdot0^{\circ}$  bis  $13\cdot3^{\circ}$ .

In Folge der Düngung stieg die Temperatur in 1 M. Tiefe bis  $21\cdot4^{\circ}$  und in 2 M. Tiefe auf  $15\cdot4^{\circ}$ , fiel dann allmähig ab, behauptete aber immer noch einen höheren Stand mit  $17\cdot3^{\circ}$  bis  $17\cdot6^{\circ}$  in 1 M. und mit  $13\cdot7^{\circ}$  in 2 M. Tiefe. Die Differenzen sind also höchst unbedeutend, sie erreichen in keinem Falle 1 Grad. Zur selben Zeit kamen sehr bedeutende Schwankungen in der Lufttemperatur vor, mit dem Minimum  $12\cdot4^{\circ}$  und dem Maximum  $31\cdot2^{\circ}$ .

Eine Beziehung zwischen dem Kohlensäuregehalte der Bodenluft und der Temperatur der Luft oder jener des Bodens, ist durchaus nicht erkennbar.

Wenn bei gleich hoher Bodentemperatur der Kohlensäuregehalt sinkt und steigt, wenn bei dem niedrigsten Stande der Temperatur im gedüngten Boden der Werth für den Kohlensäuregehalt die höchste Ziffer erreicht und dann wieder fällt, wenn bei der höchsten Lufttemperatur der Kohlensäuregehalt im ungedüngten Boden um ein wenig kleiner ist als bei der niedrigsten Lufttemperatur u. dgl. m.; dann darf wohl der Schluss gezogen werden, dass der Kohlensäuregehalt der Bodenluft schon in einer Tiefe von 1 M. durch die Temperaturdifferenzen innerhalb kurzer Zeiträume kaum beeinflusst wird. Die Bodentemperaturen sind da schon sehr constant und die Lufttemperaturen wirken in ihren Extremen zu kurze Zeit, als dass sie mehr als die Oberfläche in Mitleidenschaft ziehen könnten.

---

# ZOBODAT - [www.zobodat.at](http://www.zobodat.at)

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Mitteilungen der forstlichen Bundes-Versuchsanstalt Wien](#)

Jahr/Year: 1878

Band/Volume: [1\\_1878](#)

Autor(en)/Author(s): Moeller Josef

Artikel/Article: [Über die freie Kohlensäure im Boden 121-148](#)