

Aus der Forstlichen Bundesversuchsanstalt, Außenstelle für subalpine  
Waldforschung, Innsbruck

## Das Phytocyclon, eine neuartige, vollklimatisierte Gaswechsellmesskammer für Pflanzen<sup>1)</sup>

Von Walter Tranquillini

### Einleitung

Der Gaswechsel der Pflanzen schwankt mit den Außenfaktoren in weitesten Grenzen. Um ihren Einfluß zu erkennen, wird man Photosynthese, Respiration und Transpiration immer auch am natürlichen Standort untersuchen müssen. Doch ist es oft schwierig, hier die Zusammenhänge zwischen diesen Vorgängen und den kurzfristig sich ändernden Konstellationen der Außenfaktoren klar zu durchschauen. Daher bedarf diese Untersuchung der Freien jedenfalls der Ergänzung durch die Arbeit im Laboratorium, wo man die Pflanzen unter konstanten Bedingungen halten und nach Belieben nur den einen und anderen Faktor willkürlich ändern kann.

Die großen Fortschritte der Klimatisierungs- und Meßtechnik in den letzten Jahrzehnten ermöglichten den Bau immer leistungsfähigerer Versuchsanlagen. In dieser Arbeit wird ein Gerät beschrieben, das es m. W. erstmals gestattet, alle für den Gaswechsel ausschlaggebenden Außenfaktoren, sowohl der Luft- als auch der Bodenzone, gleichzeitig, jedoch völlig unabhängig voneinander, im ganzen ökologisch in Frage kommenden Bereich zu variieren und gleichzeitig die drei wichtigsten Gaswechsellvorgänge Photosynthese, Respiration und Transpiration zu messen.

### Fortschritte der Klimatisierungstechnik bei Gaswechsellmessungen unter künstlichen Umweltbedingungen

Um den Gaswechsel unabhängig von den Schwankungen der Außenhelligkeit bei verschiedenen Beleuchtungsstärken untersuchen zu können, wurden die Pflanzen schon seit langem künstlichen Lichtquellen ausgesetzt. In der Xenonhochdrucklampe, die RÜSCH und MÜLLER (1957) für die Photosyntheseforschung erstmals verwendeten, hatte man eine Lampe zur Verfügung, deren Licht hinsichtlich seiner Stärke und spektralen Zusammensetzung dem natürlichen Sonnenlicht sehr nahekommt. Damit gelang es, die Photosynthese auch im Starklichtbereich zu untersuchen.

Zur Regelung der Temperatur wurde die Gaswechsellmesskammer meist in ein Wasserbad getaucht, das anfänglich durch Zugabe von kaltem bzw.

<sup>1)</sup> Erweiterte Fassung eines Vortrages, gehalten auf der Botanikertagung in Frankfurt a. M. am 7. September 1966.

warmem Wasser (BOYSEN JENSEN 1932), später durch elektrische Heizvorrichtungen in Verbindung mit Kontaktthermometern auf einer bestimmten Temperatur gehalten wurde. Als es der Technik gelang, zunächst kleine (Luftthermostate), später auch größere Räume (Klimakammern) auf bestimmte Temperatur zu bringen und diese in engen Grenzen konstant zu halten, wurden die Meßkammern auch in solchen temperaturgeregelten Räumen exponiert (KRAMER und CLARK 1947, POLSTER 1955). Nun konnte man z. B. in Tiefkühltruhen den Gaswechsel auch bei tiefen Temperaturen studieren (PISEK und REHNER 1958). Seltener wurden hierfür die Meßkammern in Flüssigkeiten mit tiefem Erstarrungspunkt getaucht, die durch Kältemaschinen abgekühlt wurden (LANGE 1965).

Schwieriger war die Luftfeuchtigkeit in der Gaswechselkammer einstell- bzw. variierbar. Gerade dieser Faktor wurde bei den älteren Faktorenanalysen nicht berücksichtigt. Wie sich erst kürzlich wiederholt herausstellte, hat jedoch die Luftfeuchtigkeit nicht nur auf die Transpiration sondern auch auf die  $\text{CO}_2$ -Aufnahme einen bedeutenden Einfluß (NEUWIRTH 1962, DÖHLER und EGLE 1963, TRANQUILLINI 1963, BIERHUIZEN und SLATYER 1964 a).

Die Möglichkeit hierzu bot sich erst, als man die in die Meßkammer eintretende Luft klimatisierte, d. h. auf die gewünschte Temperatur und Feuchtigkeit brachte, indem man sie unmittelbar vor Eintritt in die Kammer über Wärme- und Wasserdampfaustauscher leitete (GAASTRA 1959, OORSCHOT und BELKSMA 1961, SLAVIK und ČATSKY 1963, BJÖRKMAN und HOLMGREN 1963, BIERHUIZEN und SLATYER 1964 b). Um zu vermeiden, daß die Temperatur und Feuchtigkeit in der Kammer durch Wärmeeinstrahlung und durch Transpiration der eingeschlossenen Pflanzen ansteigt, erfolgte die Regelung durch Geber, die innerhalb der Kammer angebracht waren. Noch eleganter ist die Methode, zusätzlich Kammerluft im geschlossenen Kreislauf über Wärme- und Feuchteaus-tauscher zu leiten und damit Temperatur- und Feuchtigkeitserhöhungen weitgehend auszuschließen (EGLE 1960, MOSS 1963, TRANQUILLINI 1963).

Dieses Prinzip wird auch bei den erst kürzlich entwickelten Küvetten für Freilandmessungen des  $\text{CO}_2$ - und  $\text{H}_2\text{O}$ -Umsatzes der Pflanzen angewandt, um das Küvettenklima an das Außenklima anzupassen (BOSIAN 1965, KOCH mündl. Mitteilung).

Der  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Luft wurde in der Regel bereits bei den ältesten Untersuchungen unter Kontrolle gehalten, weil er hauptsächlich für die Photosynthese von ausschlaggebender Bedeutung ist und im Laboratorium, zumal in Großstädten, stark schwankt. Durch die Verwendung von Preßluft zur Belüftung der Meßkammern, kommt man um diese Schwankungen herum (EGLE und SCHENK 1951, BRUN 1961). Mit Vorrichtungen zum Mischen von  $\text{CO}_2$ -frei gemachter Luft mit reinem  $\text{CO}_2$  kann nicht nur der  $\text{CO}_2$ -Gehalt konstant gehalten werden, es können auch damit verschiedene  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen erzeugt werden. Die durch den Gaswechsel der Pflanzen verursachten Veränderungen des  $\text{CO}_2$ -Gehaltes in der Kammer werden innerhalb der zulässigen Grenzen allgemein in Kauf genommen, weil daraus Photosynthese und Atmung berechnet werden können. Es besteht jedoch die Möglichkeit, den  $\text{CO}_2$ -Gehalt in der Kammer konstant zu halten, indem man den

CO<sub>2</sub>-Verbrauch kompensiert. Die hierzu jeweils notwendige Menge CO<sub>2</sub> dient als Maß für die Gaswechselintensität der Pflanzen (KOLLER und SAMISH 1964).

Die Strömungsgeschwindigkeit der Luft in der Gaswechselmeßkammer läßt sich leicht konstant halten. Der Einfluß verschiedener Luftbewegungen auf den Gaswechsel der Pflanzen wurde meist nur im Bereich kleiner Strömungsgeschwindigkeiten untersucht, einerseits weil die Förderleistung vieler Luftpumpen gering ist, andererseits weil die Messung des CO<sub>2</sub>- und H<sub>2</sub>O-Gaswechsels eine noch gut auswertbare Konzentrationsdifferenz der ein- und austretenden Luft voraussetzt. Hohe Strömungsgeschwindigkeiten, die in der Gaswechselkammer Wind erzeugen, wurden daher nur selten angewandt. Sie erfordern einen gasdichten, ringförmigen Windkanal, in dem die Gaswechselmeßkammer eingebaut ist (DENEKE 1931, TRANQUILLINI 1963), oder in die Meßkammer eingebaute Ventilatoren (OORSCHOT und BELKSMA 1961, MOSS 1963).

Zur definierten Wasserversorgung der Versuchsobjekte wurden entweder abgeschnittene Blätter bzw. Pflanzen während des Versuches durch die Stengelschnittfläche optimal mit Wasser versorgt (PISEK und WINKLER 1959) oder, im Falle eingetopfter Pflanzen, die Töpfe in Wasser gestellt und damit der Boden wassergesättigt gehalten (TRANQUILLINI 1963). Wollte man den Einfluß verschiedener Bodenfeuchtigkeit auf den Gaswechsel studieren, ließ man den Boden bis zu einem bestimmten Grad austrocknen und sättigte ihn nachher wieder (NEGISI und SATOO 1954, CLARK 1961), oder man hielt die Feuchtigkeit mehr oder weniger konstant, indem man in möglichst kurzen Zeitabständen das jeweils verdunstete Wasser wieder ersetzte (SIMONIS 1941).

Relativ selten wurde von der Möglichkeit Gebrauch gemacht, die Wasserversorgung der Versuchspflanzen durch Erhöhung des osmotischen Potentials einer Nährlösung stufenweise zu erschweren (JARVIS und JARVIS 1963).

Auf die großen Fortschritte der Gaswechselmeßtechnik in den letzten Jahrzehnten braucht hier nicht näher eingegangen zu werden, weil sie von anderer Seite bereits ausführlich dargestellt wurden (HUBER 1957, POLSTER 1961, POLSTER, WEISE und NEUWIRTH 1961, ČATSKY 1961).

Bei den Meßanlagen zur Faktorenanalyse im Laboratorium wird meist ein kontinuierlicher Luftstrom durch die Meßkammer geschickt und die CO<sub>2</sub>- und H<sub>2</sub>O-Konzentrationsdifferenz vor Eintritt und nach Austritt aus der Meßkammer bestimmt (offenes System). Seltener läßt man eine bestimmte Luftmenge in einem abgeschlossenen System zirkulieren und bestimmt die Zeit, bis die Konzentration um einen bestimmten Betrag ansteigt (DECKER 1959). Neuerdings wird auch ein kombiniertes System verwendet, dem sowohl kontinuierlich Frischluft zugesetzt wird, in dem jedoch zusätzlich die Kammerluft in einem geschlossenen Kreislauf zirkuliert (TRANQUILLINI 1963, MILLENDORFER und BORGHORST 1962, BOURDEAU und WOODWELL 1965).

### Aufbau und Funktion des Phytocyclons

Das Gerät wurde von der Firma RUTHNER, Industrieanlagen für Pflanzenbau GmbH in Wien, in Zusammenarbeit mit der Außenstelle für subalpine Waldforschung der Forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien entwickelt, erbaut und im Klimahaus auf dem Patscherkofel bei Innsbruck aufgestellt.

Die Versuchspflanzen werden in Plexiglastöpfe (Inhalt 200 oder 850 ccm) gesetzt und so in das Phytocyclon eingebracht, daß sich die oberirdischen Teile im Grünzonenkanal, die Töpfe mit der Erde bzw. der Nährlösung und den Wurzeln im Bodenzonenkanal befinden (Abb. 1). Hernach werden die Öffnungen für den Stengeldurchtritt abgedichtet und die beiden übereinanderliegenden, voneinander völlig getrennten Kanäle gasdicht verschlossen. So kann man die beiden Kanäle unabhängig voneinander klimatisieren und den Gaswechsel der Zweige und der Wurzeln getrennt messen.

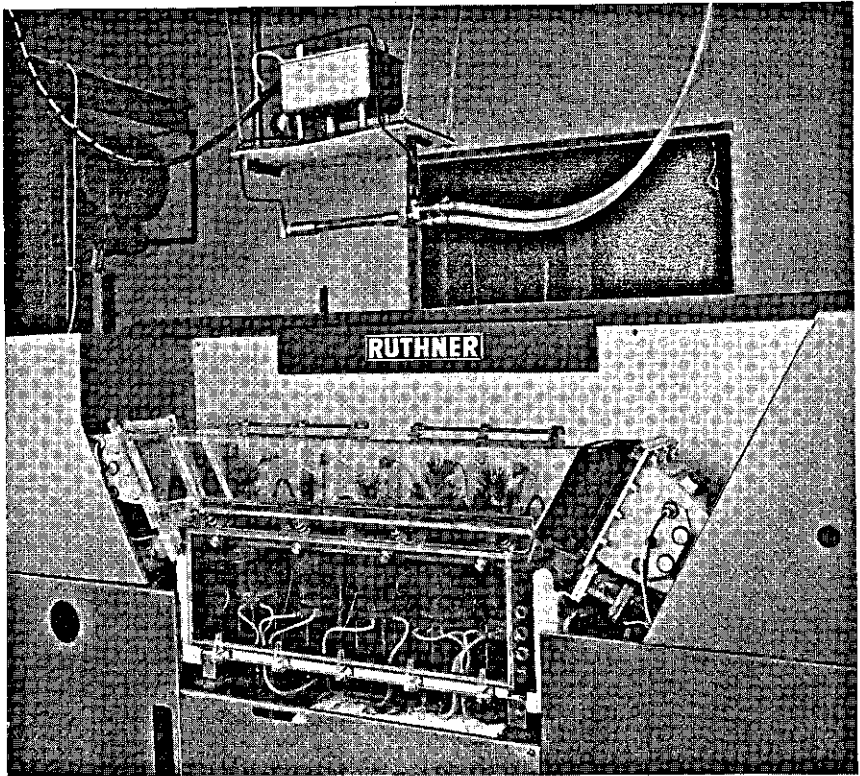


Abb. 1. Teilansicht des RUTHNER-Phytocyclons und der Beleuchtungseinrichtung (Xenonhochdrucklampe) über der zweiteiligen Pflanzenkammer. Die Sprosse der Versuchspflanzen ragen in den Grünzonenkanal, die Plexiglastöpfe stehen im Bodenzonenkanal. Die beiden übereinander liegenden Kanäle können unabhängig voneinander klimatisiert, der Gaswechsel in den beiden Kanälen getrennt gemessen werden.

### 1. Die Klimatisierung der Pflanzenkammer

Die Pflanzen werden durch eine außerhalb des Kanals angebrachte Osram-Xenonhochdrucklampe XBF 6000 beleuchtet. Die Beleuchtungsstärke wird durch die Entfernung der Lampe geregelt. Sie läßt sich bis 100 000 Lux

steigern (Entfernung Lampe — Pflanzen 50 cm), ohne daß die Lufttemperatur im Kanal nennenswert ansteigt.

Die Luft im Grünzonenkanal wird durch einen Ventilator im geschlossenen Kreislauf umgewälzt (Abb. 2). Durch Änderung der Ankerspannung kann die Drehzahl des Ventilators und damit die Windgeschwindigkeit im Bereich zwischen 0 und 30 m/sec stufenlos eingestellt werden.

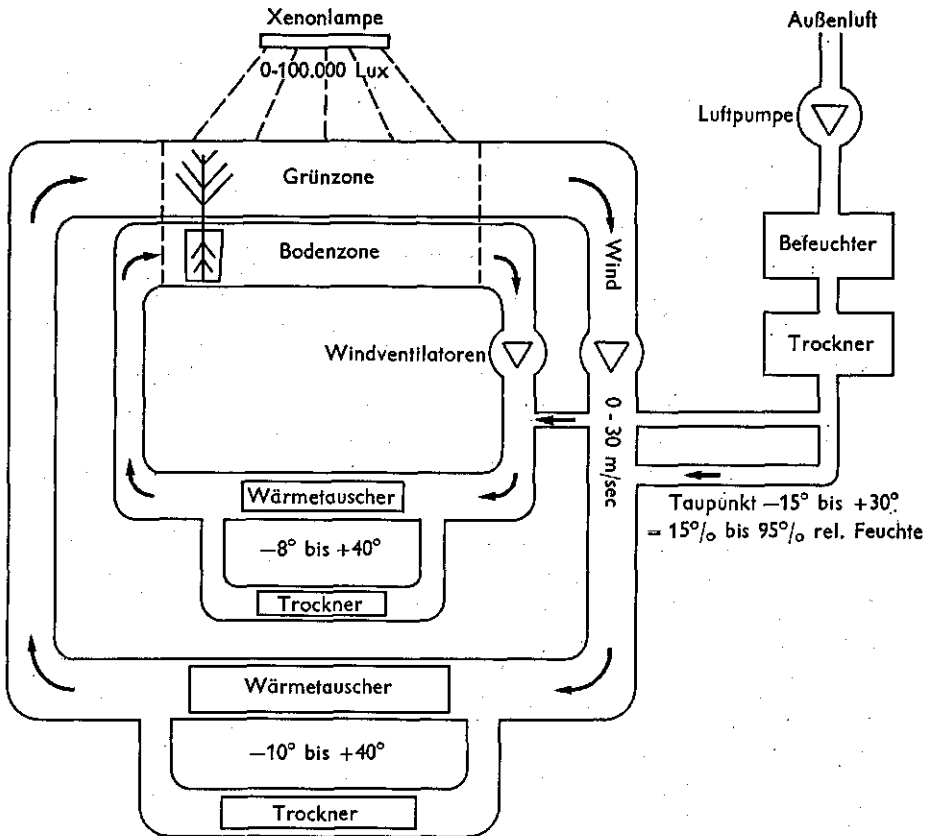


Abb. 2. Vereinfachtes Funktionsschema der Klimatisierung des Grünzonen- und Bodenzonenkanals und erreichbare Grenzwerte im Phytocyclon. (Aus der „Umschau“ in Wissenschaft und Technik 66, 818 [1966].)

Die Luft der Grünzone wird durch einen von Sole (Äthylenglykol) durchströmten Wärmetauscher (Lamellenkondensator mit großer Oberfläche), der im Luftstrom des Kanals liegt, auf die gewünschte Temperatur gebracht. Sie läßt sich im Bereich von  $-10^{\circ}$  bis  $+40^{\circ}$  mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$  regeln. Die Temperatur wird von zwei elektrischen Widerstandsthermometern, die vor und hinter der Pflanzenkammer im Kanal angebracht sind, gemessen und von einem Temperaturregler angezeigt. Je nach dem eingestellten Sollwert, wird die Sole, die ständig durch den Wärmetauscher fließt, geheizt oder gekühlt. Die Kühlung erfolgt durch Zusatz von kalter

Sole aus einem Kaltsolebehälter, der von einer Kältemaschine (20 000 cal bei  $-10^{\circ}$  Expansionstemperatur) auf  $-20^{\circ}$  gehalten wird.

Nach demselben Prinzip wird auch die Temperatur der Bodenzone, d. h. des Bodens bzw. der Wurzeln der Pflanzen von einem eigenen Wärmetauscher, Regler und Solekreislauf im selben Bereich geregelt.<sup>1)</sup>

Zur Einstellung der Feuchtigkeit der Luft in der Grünzone wird die dem Kanal zugeführte Frischluft durch ein Gefäß mit Wasser geleitet, wobei sie sich mit Wasserdampf sättigt (Abb. 2). Je nach der Temperatur des Wassers, die durch einen weiteren Solekreislauf bestimmt wird, läßt sich der Taupunkt der in den Kanal eintretenden Luft zwischen  $+2^{\circ}$  und  $+30^{\circ}$  genau einstellen. Ist trockene Luft erwünscht (Taupunkt bis  $-15^{\circ}\text{C}$ ), wird der Wasserdampf der Frischluft an einem Trockner (Lamellenkühler) ausgefroren. Im mittleren Temperaturbereich läßt sich auf diese Weise die relative Luftfeuchtigkeit zwischen 15 und 95 % mit einer Genauigkeit von  $\pm 2\%$  ( $0,3^{\circ}$  Taupunkt) regeln.

Die Bodenzone, der parallel zur Grünzone dieselbe feuchtegeregelte Frischluft zugeführt wird, hat daher in der Regel dieselbe Feuchtigkeit wie die Grünzone. Will man aber z. B. den Boden rasch austrocknen, kann ein Teil der Luft der Bodenzone über einen mit Kaltsole durchflossenen Lamellenkühler geleitet und damit getrocknet werden. Dieser Trockenbypass der Bodenzone wird durch einen eigenen Feuchteregler in Funktion gesetzt.

Zur definierten Durchlüftung des Bodens wird mit Hilfe einer Pumpe 0 bis 1 Liter Luft pro Stunde und Liter Bodenvolumen durch die fünf Töpfe gedrückt. Die Luftmenge läßt sich durch Regelung der Laufzeit der Pumpe innerhalb dieses Bereiches einstellen.

Die Bodenfeuchtigkeit in den Töpfen wird mit fünf geeichten Gipsblöcken gemessen<sup>2)</sup> und von einem Schreiber registriert. Der Einfluß der Bodentemperatur auf diese Registrierung wird durch einen „Naßblock“ kompensiert (RENTSCHLER 1956). Die Meßspannung des Schreibers wird auf einen Regler übertragen, der demnach jeweils denselben Ausschlag zeigt. Auf diesem Regler kann der gewünschte Bodenfeuchtigkeitssollwert eingestellt werden. Bei dessen Unterschreitung wird durch eine Pumpe eine einstellbare Menge Wasser aus einem Behälter diskontinuierlich über Düsen den Töpfen von oben zugesetzt. Bei Erreichung bzw. Überschreitung des Sollwertes wird die Wasserzufuhr automatisch unterbrochen.

Abgesehen von den Schwierigkeiten, die bei der Messung der Bodenfeuchtigkeit durch Gipsblöcke auftreten, ist die Regelung der Bodenfeuchtigkeit nach diesem Prinzip problematisch, weil einerseits der Istwertgeber (Gipsblock), den man meist in der Mitte des Topfes exponiert, nicht für das gesamte Bodenvolumen repräsentativ ist, und andererseits das Wasser über die Bodenoberfläche zugegeben wird, wodurch sich Feuchtegradienten im

1) Schon WASSINK (1957) hat einen von RICHARDSON verwendeten zweiteiligen Thermostaten beschrieben, in dem die Sprosse und die Wurzeln von Pflanzen bei verschiedener Temperatur gehalten werden können. MOSS (1963) verwendet eine Gaswechsellmeßanlage, in der die Wurzeltemperatur unabhängig von der Sproßtemperatur konstant gehalten werden kann.

2) Für die Überlassung von Spezial-Gipsblöcken L und M des Instituts für Physik und Meteorologie in Stuttgart-Hohenheim bin ich Herrn Dr. SCHREIBER dankbar.

Topf einstellen, die sich bei der relativ langsamen Beweglichkeit des Wassers im Boden, zumal im trockenen Boden, nicht ausgleichen können.

Zur Regelung der Bodenfeuchtigkeit dürfte sich die sogenannte „Sandwich-Methode“ (ZUR und SHMUELI 1965) besser eignen, die darauf beruht, daß flache Bodenkörper seitlich über eine semipermeable Membrane mit einer Lösung bekannten osmotischen Potentials (z.B. Carbowax) Wasser austauschen können.

## 2. Die Messung des Gaswechsels der Versuchspflanzen im Phytocyclon

### a) CO<sub>2</sub>-Gaswechsel

Da das Klimahaus in 2000 m Seehöhe liegt, wo der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Außenluft (Entnahme 12 m über dem Boden) nahezu konstant ist (290 bis 310 ppm), wurde auf eine Regelung des CO<sub>2</sub>-Gehaltes der in den Kanal eintretenden Frischluft verzichtet. Es ist jedoch möglich, mittels einer Mischvorrichtung Luft mit beliebiger CO<sub>2</sub>-Konzentration in den Kanal einzuführen. Die von einem Kompressor geförderte Frischluftmenge läßt sich in weiten Grenzen beliebig einstellen. Die CO<sub>2</sub>-Differenz zwischen Frischluft und Kanalluft wird mit einem URAS laufend bestimmt. Sie ist bei gleichbleibender Gaswechselintensität wegen des großen Volumens des Kanals erst nach ein bis zwei Stunden konstant (Abb. 3). Vorversuche ergaben, daß von der Oberfläche des Kanals und des in ihm angebrachten Wärmetauschers kein CO<sub>2</sub> gebunden oder freigesetzt wird. Die CO<sub>2</sub>-Differenz ist daher lediglich von der Frischluftmenge, jedoch nicht von der Geschwindigkeit der Luftzirkulation im Kanal abhängig. Auf diese Weise kann der Gaswechsel auch bei hohen Windgeschwindigkeiten exakt bestimmt werden.

Analog dazu läßt sich mit einer dritten Meßstelle die CO<sub>2</sub>-Abgabe der Töpfe in der Bodenzone messen und daraus die Wurzelatmung berechnen, wenn man die Atmung des undurchwurzelten Bodens im Vorversuch unter genau denselben Bedingungen bestimmt (EIDMANN 1943). Damit ergibt sich die Möglichkeit, den CO<sub>2</sub>-Umsatz ganzer Pflanzen bei verschiedenen, streng kontrollierten Umweltbedingungen zu erfassen.

### b) Transpiration

Die Feuchtigkeit in der Grünzone wird durch die Wasserabgabe der eingeschlossenen Pflanzen im Vergleich zu jener der eintretenden Frischluft erhöht. Diese Erhöhung des Taupunktes im Kanal dient zur Messung der Transpiration der Pflanzen. Damit die Feuchtigkeit im Kanal trotz der Wasserdampfabgabe möglichst konstant bleibt, wird ein Teil der Grünzonenluft über einen Trockner geleitet, dessen Oberfläche genau die Taupunkttemperatur der eintretenden Frischluft hat (Abb. 2). Dies wird dadurch erreicht, daß dieser „Transpirationstrockner“ von demselben Solekreislauf durchflossen wird wie der Befeuchter der Frischluft. An diesem Trockner fällt der durch Transpiration abgegebene Wasserdampf aus und die Luft wird der Grünzone wieder mit Frischluftfeuchtigkeit zugesetzt. Die Luftmenge, die über den Transpirationstrockner geleitet wird, läßt sich im Bereich zwischen 30 und 3000 Liter/Stunde einstellen und wird durch Staublenden mit einem Linien-

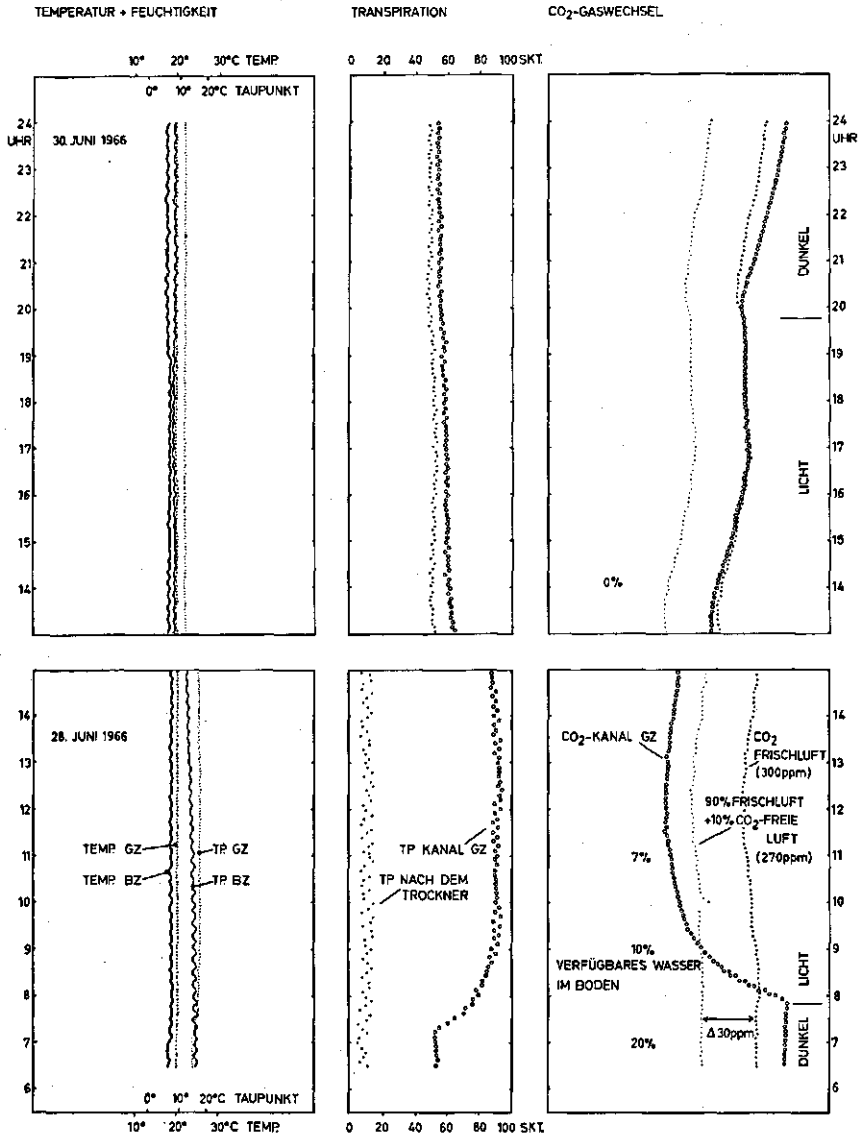


Abb. 3. Ausschnitte aus Originalregistrierungen bei Hell- und Dunkelperioden während abnehmender Bodenfeuchtigkeit. Links: Luft- und Bodentemperatur sowie Taupunkt (Luftfeuchte) in der Grünzone (GZ) und Bodenzone (BZ). Mitte: Taupunkt in der Grünzone und nach Durchgang der Kanalluft durch den Transpirationstrockner. Die Taupunktsdifferenz ( $0,1^\circ/\text{Skt}$ ) ist ein Maß für die Transpiration der Pflanzen. Rechts:  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Frischluft und der Luft im Grünzonenkanal. Die  $\text{CO}_2$ -Konzentrationsdifferenz ist ein Maß für den  $\text{CO}_2$ -Gaswechsel der oberirdischen Teile der 5 *Pinus cembra*-Pflanzen. Mit einer dritten Meßstelle wird fortlaufend auch der  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Frischluft registriert, nachdem ihr mittels einer WÖRTHOFF-Gasmischpumpe 10 %  $\text{CO}_2$ -frei gemachte Luft zugesetzt wurde. Dadurch läßt sich nicht nur die Empfindlichkeit des  $\text{CO}_2$ -Analysators laufend messen (kontinuierliche Eichung), sondern auch stets kontrollieren, ob der  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Luft im Kanal durch die  $\text{CO}_2$ -Aufnahme der Pflanzen nicht zu stark abnimmt.



schreiber registriert. Dadurch kann unabhängig von der dem Kanal von außen zugeführten Frischluftmenge und damit von der Genauigkeit der CO<sub>2</sub>-Differenzmessung die Taupunktserhöhung selbst bei starker Transpiration niedrig gehalten werden. Zur Messung der Taupunktdifferenz zwischen Frischluft und Kanalluft wird abwechselnd eine Luftprobe vor und nach Durchgang durch den Trockner über eine Lithiumchlorid-Taupunktzelle geleitet, welche die Taupunktdifferenz auf einem Schreiber mit einer Genauigkeit von 0,1 °/Skt registriert.

**Beispiel für die Anwendung des Phytocyclons:  
Photosynthese, Respiration und Transpiration bei zunehmender  
Austrocknung des Bodens**

Um die Eignung des Phytocyclons für Faktorenanalysen des Gaswechsels zu prüfen, wurden zahlreiche Versuche durchgeführt, von denen hier nur einer beschrieben werden soll.

Die Versuchspflanzen (*Pinus cembra* L.) standen während des ganzen Versuchszeitraums (26. Juni bis 1. Juli) unter folgenden Bedingungen:

Tabelle 1

Beleuchtungsstärke	35 000 lux
Lufttemperatur der Grünzone	20 °C
Taupunkt der Grünzone:	
bei guter Wasserversorgung, daher hoher Transpiration: im Dunkeln	15° (73 % rel. F.)
im Licht	18° (86 % rel. F.)
bei Bodentrockenheit, daher niedriger Transpiration	12° (60 % rel. F.)
Bodentemperatur	19 °C
Taupunkt der Bodenzone:	
bei feuchtem Boden	16° (82 % rel. F.)
bei trockenem Boden	9° (51 % rel. F.)
Windgeschwindigkeit	1 m/sec
Bodendurchlüftung	0

Der Boden in den Töpfen war bis zum 27. Juni 8 Uhr wassergesättigt. Von diesem Zeitpunkt ab erhielt er kein Wasser mehr. Die Beleuchtung wurde zeitweise ausgeschaltet, um auch die Atmung und die Dunkeltranspiration messen zu können.

Abbildung 3 zeigt zwei Ausschnitte aus den Originalregistrierungen. Am 28. Juni enthält der Boden um 7 Uhr noch 20 % verfügbares Wasser, um 11 Uhr nur mehr 7 %. In der Dunkelperiode sind Atmung und Transpiration konstant. Nach Einschalten der Beleuchtung dauert es etwa zwei Stunden, bis das neue CO<sub>2</sub>- und Taupunktgleichgewicht erreicht ist. Die Transpiration im Licht ist etwa doppelt so hoch wie im Dunkeln. Die unter diesen Bedingungen erreichten Photosynthese- und Transpirationswerte sind kaum niedriger als zu Beginn des Versuches bei voller Wassersättigung des Bodens. Dies läßt darauf schließen, daß die ausgereiften Nadeln unserer Pflanzen bei

rascher Austrocknung des Bodens nicht sofort in Unterbilanz geraten (vgl. TRANQUILLINI 1965).

Ab 29. Juni 9 Uhr enthält der Boden kein verfügbares Wasser mehr. Die Pflanzen erleiden nun rasch zunehmende Wasserdefizite und schränken Transpiration und Photosynthese energisch ein. Am 30. Juni bringt die Photosynthese bei sonst unveränderten Klimabedingungen<sup>1)</sup> zunächst noch schwachen Nettogewinn; ab 19 Uhr keinen mehr (Kompensation).

Die anschließende CO<sub>2</sub>-Messung im Dunkeln zeigt deutlich, daß auch die CO<sub>2</sub>-Abgabe (Atmung) bei stark angespannter Wasserbilanz merkbar schwächer geworden ist als bei guter Wasserversorgung.

Die Transpiration ist an diesem Tag ebenfalls sehr gering und ab 19 Uhr wohl fast nur mehr cuticulär. Ein Vergleich der Dunkeltranspiration bei stark angespannter Wasserbilanz mit der bei guter Wasserversorgung läßt den Schluß zu, daß sich die Spalten bei optimalem Wasserzustande der Pflanzen im Dunkeln weniger fest schließen als bei Dürre.

Diese Versuchsbeispiel sollte nicht nur die Funktion des Phytocyclons anschaulich vor Augen führen sondern auch zeigen, daß damit die noch immer sehr lückenhaften Kenntnisse über die Abhängigkeit des Gaswechsels der Pflanzen von den Außenfaktoren rasch erweitert werden können. Die große Bedeutung solcher Untersuchungen zur Beurteilung der Stoffproduktion und des Wasserhaushaltes der Pflanzen rechtfertigt die Verwendung der beschriebenen, technisch hochentwickelten und daher kostspieligen Apparatur.

### Zusammenfassung

Das Phytocyclon ermöglicht die Messung von Photosynthese, Respiration und Transpiration ganzer Pflanzen in zwei getrennten Luftkanälen bei künstlichen, streng kontrollierbaren Umweltbedingungen. Alle wichtigen Außenfaktoren sowohl der Luft-(Grün-)zone als auch der Bodenzone wie Licht, Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit (CO<sub>2</sub>-Gehalt) und Wind; Bodentemperatur, Bodendurchlüftung und Bodenfeuchtigkeit können unabhängig voneinander im ganzen ökologisch in Frage kommenden Bereich mit hoher Genauigkeit geregelt werden.

Der CO<sub>2</sub>-Umsatz der ober- und unterirdischen Organe der Pflanzen wird mit einem URAS gemessen. Zur Bestimmung der Transpiration wird die Taupunktdifferenz zwischen eintretender Frischluft und Kanalluft herangezogen. Durch die Verwendung eines kombinierten Luftströmungssystems (geringer Frischluftdurchsatz, mittlerer Luftdurchsatz durch den Transpirationsbypass, hoher Luftdurchsatz durch den Windkanal) lassen sich die Gaswechselprozesse selbst bei starkem Wind bis 30 m/sec exakt messen.

Als Anwendungsbeispiel wird ein Versuch beschrieben, wie der Gaswechsel von *Pinus cembra*-Pflanzen bei zunehmender Austrocknung des Bodens, jedoch sonst weitgehend konstanten Bedingungen, verläuft.

<sup>1)</sup> Infolge der stark eingeschränkten Transpiration ist nun der Taupunkt der Kanalluft etwas niedriger. Dasselbe gilt auf Grund der geringeren Evaporation des nunmehr trockenem Bodens für die Luftfeuchtigkeit der Bodenzone (vgl. Tab. 1).

## Literaturverzeichnis

- BIERHUIZEN, J. F., and R. O. SLATYER, Photosynthesis of cotton leaves under a range of environmental conditions in relation to internal and external diffusive resistances. *Austr. J. biol. Sci.* 17, 348—359 (1964a).
- —, and — —, An apparatus for the continuous and simultaneous measurement of photosynthesis and transpiration under controlled environmental conditions. CSIRO, Div. Land Res. Reg. Surv. Techn. Paper 24, 1—16 (1964b).
- BJÖRKMAN, O., and P. HOLMGREN, Adaptability of the photosynthetic apparatus to light intensity in ecotypes from exposed and shaded habitats. *Physiol. Plant.* 16, 889—914 (1963).
- BOSIAN, G., Control of conditions in the plant chamber: fully automatic regulation of wind velocity, temperature and relative humidity to conform to microclimatic field conditions. In: *Methodology of plant eco-physiology. Proc. Montpellier Symp.* Ed. F. E. Eckardt, UNESCO 1965, S. 233—238.
- BOURDEAU, P. F., and G. M. WOODWELL, Measurements of plant carbon dioxide exchange by infra-red absorption under controlled conditions and in the field. In: *Methodology of plant eco-physiology. Proc. Montpellier Symp.* Ed. F. E. Eckardt, UNESCO 1965, S. 283—289.
- BOYSEN JENSEN, P., *Die Stoffproduktion der Pflanzen.* Jena 1932.
- BRUN, W. A., Photosynthesis and transpiration from upper and lower surfaces of intact banana leaves. *Plant Physiol.* 36, 399—405 (1961).
- ČAŤSKÝ, J., (Neue Geräte und Verfahren zur Feststellung der Intensität der Photosynthese bei Kulturpflanzen). *Sbornik CSAZV Rostl. výroba* 7, 781—798 (1961) (Tschechisch).
- CLARK, J., Photosynthesis and respiration in White Spruce and Balsam Fir. State Univ. Coll. Forestry, Syracuse, NY 1961. 1—72.
- DECKER, J. P., Some effects of temperature and carbon dioxide concentration on photosynthesis of *Mimulus*. *Plant Physiol.* 34, 103—106 (1959).
- DENEKE, H., Über den Einfluß bewegter Luft auf die Kohlensäureassimilation. *Jb. wiss. Bot.* 74, 1—32 (1931).
- DÖHLER, G., und K. EGLE, Über die Beziehungen zwischen Wassergehalt, Chloroplastenfluoreszenz und CO<sub>2</sub>-Gaswechsel bei einzelligen Grünalgen. *Beitr. Biol. Pfl.* 39, 123—145 (1963).
- EGLE, K., Methoden der Photosynthesemessung. Landpflanzen. In: *Handbuch der Pflanzenphysiologie*, Bd. 5/1, S. 115—163. Berlin—Göttingen—Heidelberg 1960.
- —, und W. SCHENK, Die Anwendung des Ultrarotabsorptionsschreibers in der Photosyntheseforschung. *Ber. dtsh. bot. Ges.* 64, 181—197 (1951).
- EIDMANN, F. E., Untersuchungen über die Wurzelatmung und Transpiration unserer Hauptholzarten. *Schriftenr. Akad. dtsh. Forstwiss.* 5, 1—144 (1943).
- GAASTRA, P., Photosynthesis of crop plants as influenced by light, carbon dioxide, temperature and stomatal diffusion resistance. *Meded. Landbouwhogeschool Wageningen* 59, 1—68 (1959).
- HUBER, B., Neue Ergebnisse der pflanzlichen Gaswechselschreibung. *Ber. dtsh. bot. Ges.* 70, 455—461 (1957).
- JARVIS, P. G., and M. S. JARVIS, The water relations of tree seedlings. III. Transpiration in relation to osmotic potential of the root medium. *Physiol. Plant.* 16, 269—275 (1963).
- KOLLER, D., and Y. SAMISH, A null-point compensating system for simultaneous and continuous measurement of net photosynthesis and transpiration by controlled gas-stream analysis. *Bot. Gaz.* 125, 81—88 (1964).

- KRAMER, P. J., and W. S. CLARK, A comparison of photosynthesis in individual Pine needles and entire seedlings at various light intensities. *Plant Physiol.* 22, 51—57 (1947).
- LANGE, O. L., Der CO<sub>2</sub>-Gaswechsel von Flechten bei tiefen Temperaturen. *Planta* 64, 1—19 (1965).
- MILLENDORFER, H., und A. J. W. BORGHORST, Analogonverfahren bei pflanzenphysiologischen CO<sub>2</sub>-Messungen. Sitz. ber. Österr. Akad. Wiss., Math.-naturwiss. Kl. Abt. II, 171, 93—101 (1962).
- MOSS, D. N., The effect of environment on gas exchange of leaves. In: *Stomata and water relations in plants*. Ed. I. ZELITCH, New Haven, 86—101 (1963).
- NEGISI, K., and T. SATOO, The effect of drying of soil on apparent photosynthesis, transpiration, carbohydrate reserves and growth of seedlings of Akamatu (*Pinus densiflora* SIEB. et ZUCC.). *J. Jap. Forest. Soc.* 36, 66—71 (1954).
- NEUWIRTH, G., Ökologische Beziehungen des Gaswechsels im Vorwald. Tagungsber. Nr. 53, Dtsch. Akad. Landw. wiss. Berlin, 97—123 (1962).
- OORSCHOT, J. L. P., and M. BELKSMA, An assembly for the continuous recording of CO<sub>2</sub>-exchange and transpiration of whole plants. *Weed Res.* 1, 245—257 (1961).
- PISEK, A., und G. REHNER, Temperaturminima der Netto-Assimilation von mediterranen und nordisch-alpinen Immergrünen. *Ber. dtsh. bot. Ges.* 71, 188 bis 193 (1958).
- , und E. WINKLER, Licht- und Temperaturabhängigkeit der CO<sub>2</sub>-Assimilation von Fichte (*Picea excelsa* LINK), Zirbe (*Pinus cembra* L.) und Sonnenblume (*Helianthus annuus* L.). *Planta* 53, 532—550 (1959).
- POLSTER, H., Vergleichende Untersuchungen über die Kohlendioxidassimilation und Atmung der Douglasie, Fichte und Weymouthskiefer. *Arch. Forstwes.* 4, 689—714 (1955).
- , Neuere Ergebnisse auf dem Gebiet der standortsökologischen Assimilations- und Transpirationsforschung an Forstgewächsen. *Sitzungsber. dtsh. Akad. Landw. wiss. Berlin* 10, 1—43 (1961).
- , G. WEISE und G. NEUWIRTH, Fortschritte in der Verwendung von URAS-Geräten zu Laboratoriums- und Freilandmessungen des CO<sub>2</sub>-Stoffwechsels und der Transpiration. *Biol. Beitr.* 1, 105—118 (1961).
- RENTSCHLER, W., Ein Registriergerät für die Bodenfeuchtemessung mit der Gipsblockmethode. *Netherlands J. Agric. Sci.* 4 (1956).
- RÜSCH, J., und J. MÜLLER, Die Verwendung der Xenon-Hochdrucklampe zu Assimilationsversuchen. *Ber. dtsh. bot. Ges.* 70, 489—500 (1957).
- SIMONIS, W., Über den Einfluß des Bodenwassergehaltes auf die Kohlensäureassimilation und den Ertrag bei Einjährigen. *Ber. dtsh. bot. Ges.* 59, 52—68 (1941).
- SLAVIK, B., and J. ČATSKY, Differentially measuring infrared analyzer with an air-conditioned exposure chamber for photosynthetic rate measurements. *Biol. Plant.* 5, 135—142 (1963).
- TRANQUILLINI, W., Die Abhängigkeit der Kohlensäureassimilation junger Lärchen, Fichten und Zirben von der Luft- und Bodenfeuchte. *Planta* 60, 70—94 (1963).
- , Über den Zusammenhang zwischen Entwicklungszustand und Dürre-resistenz junger Zirben (*Pinus cembra* L.) im Pflanzgarten. *Mitt. forstl. Bundes-Vers. anst. Mariabrunn (Wien)* 66, 241—271 (1965).
- WASSINK, E. C., The study of plant growth in controlled environments. In: *Control of the plant environment*, Ed. J. P. HUDSON, London, 36—57 (1957).
- ZUR, B., and E. SHMUELI, The maintenance of constant soil water potential in a plant-soil system. *First Rept. Res.* 66—72, Rehovot, Israel 1965.