



universität
wien

DIPLOMARBEIT

Titel der Diplomarbeit

Die Reproduzier- und Vergleichbarkeit von Messdaten
unterschiedlicher Messgeräte zur Messung der Transpira-
tion und des Wasserdampfdiffusionswiderstandes

Verfasst von

Dipl.-Ing. Edith Grüner

angestrebter akademischer Grad

Magistra der Naturwissenschaften (Mag.rer.nat.)

Wien, 2012

Studienkennzahl lt. Studienblatt:

A 444

Studienrichtung lt. Studienblatt:

Diplomstudium Ökologie (Stzw) UniStG

Betreuerin / Betreuer:

Ao. Univ.-Prof. Dr. Rudolf Maier



**Danke, an alle die mich bei
dieser Arbeit unterstützten.**

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
Zielsetzung	6
1. Spaltöffnungen	8
1.1 CO ₂ -Austausch durch die Stomata	10
1.2 Steuerung der Stomaweite	13
2. Energiestrahlung der Atmosphäre und des Bodens	18
2.1 Standortfaktoren	21
2.2 Energiebilanz eines Blattes	25
3. Wasser in der Pflanze	29
3.1 Diffusion und Osmose	29
3.2 Bodenwasser	35
4. Transpiration und Evaporation	37
4.1 Umweltfaktoren und ihr Einfluss auf die Transpiration	47
4.2 Wasserbilanz der Pflanze	50
5. Methoden der Transpirationsbestimmung	55
5.1 „Chemische“ Methoden	55
5.1.1 Kollodiummethode	55
5.1.2 Kobaltchlorürpapier	56
5.1.3 Jodbleilösung	56
5.2 Gravimetrische Methoden	56
5.2.1 Transpirationsapparat von Freeman	57
5.2.2 Transpirationsapparat nach Corbett	58
5.2.3 Selbst registrierender Transpirationsapparat nach L. und K. Linsbauer	58
5.2.4 Anderson`s Apparat zur Messung der Transpiration	59
5.2.5 Selbstregistrierendes Transpirometer von Ganong	60

5.2.6	Transpirometer von Blackman und Paine	61
5.2.7	Methode von Sampson und Allen	62
5.2.8	„Anwelk-Methode“ von Anton Arland	63
5.2.9	„Momentan-Methode“ von Otto Stocker	64
5.2.10	Lysimeter-Methode	66
5.3	Porometrische Methoden	66
5.3.1	Gasdiffusions-Porometer	67
5.3.2	Tritium-diffusions-Porometer	68
5.3.3	„Transient“-Porometer	69
5.3.4	„Null-balance“-Porometer	70
5.3.5	„Constant-flow“-Porometer	70
5.4	Weitere Methoden	71
5.4.1	„Polymettermethode“ von Cannon	72
5.4.2	Infrarot Gasanalysatoren	73
5.4.3	Taupunktspiegel	74
5.4.4	Dünnschicht Kapazitiv Sensoren	74
5.4.5	Xylemfluss Methode (Saftstrommessung)	74
5.4.6	Infrarot Thermographie	77
6.	Material und Methoden	80
6.1	Hedera helix	80
6.2	„Anwelk-Methode“ nach A. Arland, Berechnung der Transpiration	87
6.2.1	Bestimmung der Blattfläche	90
6.2.2	Berechnung der Transpiration	94
6.3	Untersuchung des Transpirationsverhaltens der Blattober- und Unterseite mittels Wägung	96
6.4	Vergleich der gravimetrischen Methode mit dem PMR-4 Porometer	97
6.4.1	PMR-4 Steady State Porometer	98
6.4.1.1	Aufbau und Technische Daten	98
6.4.1.2	Funktionsweise	99
6.4.1.3	Berechnung	100
6.5	Vergleich der gravimetrischen Methode mit dem PMR-4 Porometer	108

	und dem AP4 Porometer	
6.5.1	AP4 Porometer	108
6.5.1.1	Aufbau und Technische Daten	109
6.5.1.2	Funktionsweise	110
6.5.1.3	Berechnung	110
6.6	Infrarot Thermographie	116
7.	Ergebnisse	122
7.1	abgeänderte „Anwelk-Methode“	122
7.2	Transpirationsverhalten der Blattober- und Unterseite	140
7.3	Vergleich der gravimetrischen Methode mit dem PMR-4 Porometer	152
7.4	Vergleich der gravimetrischen Methode mit dem PMR-4 Porometer und dem AP4 Porometer	166
7.5	Vergleich des AP4 Porometers mit der Infrarot Thermographie	192
7.5.1	Versuch vom 05.11.2011 <i>Hedera helix</i>	192
7.5.2	Versuch vom 06.11.2011 <i>Polygonum aubertii</i>	198
7.5.3	Versuch vom 06.11.2011 <i>Hedera helix</i>	205
8.	Diskussion	216
9.	Literaturverzeichnis	255
10.	Anhang	
A	Datenblatt PMR-4	A1
	Datenblatt AP4	A2
	Datenblatt Thermokamera	A3
B	Zusammenfassung	B1
	Abstract	B2
C	Curriculum Vitae	C1

Einleitung

Der Begriff 'Ökologie' wurde von Ernst HAECKEL, 1906, in seinem Buch über die „Prinzipien der generellen Morphologie der Organismen“ wie folgt geprägt: „Unter Ökologie verstehen wir die gesamte Wissenschaft von den Beziehungen des Organismus zur umgebenden Außenwelt, wohin wir im weiteren Sinne alle „Existenzbedingungen“ rechnen können. Diese sind teils organischer, teils anorganischer Natur; sowohl diese als jene sind von der größten Bedeutung für die Form der Organismen, weil sie dieselben zwingen, sich ihnen anzupassen“.

Um das Verständnis der „Existenzbedingungen“ und der „Anpassung“ gerecht zu werden, schloss HAECKEL, 1906, die Physiologie, die Morphologie und die Chorologie (die Wissenschaft von der Verbreitung der Organismen) in die Ökologie mit ein (zitiert aus SCHULZE et al. 2002).

Die Pflanzenökologie ist somit die Wissenschaft von den Pflanzen und ihren Beziehungen sowie ihren Reaktionen auf die belebte und unbelebte Umwelt.

Um diese Beziehungen zu erfassen beziehungsweise den Einfluss von zum Beispiel Umweltparametern wie Temperatur, Strahlung, Luftfeuchte, Bodentyp und Bodenwassergehalt und vielen anderen zu untersuchen und zu Bestimmen bedarf es spezieller Messmethoden und ausgeklügelter Apparate die ihre Anwendung im Laboratorium als auch im Freiland finden.

Viele Messungen können aber nur unter Laboratoriumsbedingungen durchgeführt werden. Messungen unter Laboratoriumsbedingungen stellen veränderte Bedingungen zu den Standortbedingungen der Pflanze dar, womit auch das Messergebnis nicht unbedingt dem erwarteten Messergebnis entspricht, oder besser gesagt nicht die Reaktion der Pflanze im Freiland widerspiegelt, da sich das Messobjekt, die Pflanze, an die Umgebung, also das Laboratorium oder das Versuchsbehältnis anpasst und somit auf den Messeingriff reagiert.

Einleitung

Die Messungen unter Laboratoriumsbedingungen stellen den Ökologen und Pflanzenphysiologen auch vor das Problem der zu wählenden Messbedingungen, die Versuche müssen standardisiert werden, um eine Vergleichbarkeit und Nachvollziehbarkeit im wissenschaftlichen Sinne zu gewährleisten, die Bedingungen im Freiland sind vielschichtig, wechseln ständig und sind damit alles andere als standardisiert.

Aus diesen und vielen anderen Gründen wurden schon früh Freilandmethoden zur Bestimmung dieser und anderer Parameter beziehungsweise Reaktionen der Pflanzen auf die sich ändernden Umweltbedingungen entwickelt. Die Messmethoden sollten so nahe der Realität wie möglich das Befinden der Pflanze am Standort bestimmen, ohne einen all zu großen Eingriff im System zu bewirken.

Ein Beispiel für so ein Messsystem stellt die Messung der Transpirationsrate oder der Wasserdampfabgaberate durch die Pflanze am Standort dar. Die Transpirationsrate oder die Menge des abgegebenen Wasserdampfes beziehungsweise Wassers ermöglicht es, eine Aussage über den Wasserhaushalt der Pflanze zu tätigen. [Vereinfacht gesagt, wird eine Pflanze mit Wasserstress weniger Wasserdampf abgeben, also ihre Spaltöffnungen schließen und damit anders reagieren als eine Pflanze, die genügend Wasser zur Verfügung hat, und ihre Spaltöffnungen offen lässt.] Die Verfügbarkeit des Wassers hängt unter anderem auch von der Bodenwasserkapazität und damit dem Bodentyp, der Bodentemperatur und dem Bodensystem sowie der Luftfeuchtigkeit der Temperatur und vielen anderen Parametern ab. Um diese Wasserabgaberate am Standort bestimmen zu können wurden schon vor ca. hundert Jahren Messmethoden und Messgeräte entwickelt. Eine Zusammenstellung diverser Methoden findet sich im Teil Methoden der Transpirationsbestimmung.

Eine dieser Methoden ist die im Jahre 1929 von Otto STOCKER beschriebene Freilandmethode zur Bestimmung der Transpirationsrate von Pflanzen. Die verwendete Methode beruht darauf, dass mit einer mobilen Präzisionswaage abgetrennte Blätter oder Zweige

Einleitung

gewogen werden und nach einer etwa fünf minütigen Expositionszeit an der Pflanze wieder gewogen zu werden. Aus der Gewichts Differenz, und der Blattfläche lässt sich die Transpiration der Blattflächen berechnen. Der Vorgang wird mit unterschiedlichen Blättern oder Zweigen der Pflanze wiederholt, bis genügend Messungen vorliegen um eine Aussage über den Verlauf der Transpiration treffen zu können. Diese wird mit den Klimaparametern in Beziehung gebracht. Daraus ergibt sich ein Bild der Transpiration der Pflanze am Standort.

Diese und ähnliche Methoden wirken zwar auf den ersten Blick elegant und schlüssig, jedoch ist das Abtrennen der Blätter oder Sprosse ein massiver Eingriff in die Pflanze und bewirkt diverse physiologische Reaktionen (siehe IWANOFF-Effekt) welche das Messergebnis verfälschen können.

Um eben diese Eingriffe zu reduzieren, wurden im Laufe der Jahre unterschiedliche weniger invasive Methoden entwickelt. Diese porometrischen Methoden beruhen auf dem Prinzip, dass ein nicht abgetrennter Blattteil in eine Messkammer eingeschlossen wird. In dieser Kammer wird dann die von dem Blatt abgegebene Wasserdampfmenge bestimmt. Aus dieser wird mittels anderer Parameter wie Temperatur, Strahlung und Sättigungsdampfdruck mathematisch die Transpiration beziehungsweise in diesem Fall der stomatäre Widerstand oder Leitwert an der Messfläche berechnet.

Obwohl diese Messmethode im Vergleich zur gravimetrischen Methode nach O. STOCKER weniger destruktiv ist, die Pflanzenteile werden nicht abgetrennt sondern an der Pflanze gemessen, womit sich sicher einige Stress bedingte Reaktionen vermeiden lassen, ist es nicht auszuschließen, dass auch diese Methoden die Messwerte beeinflussen und damit nicht den „wahren Wert“ liefern, das heißt eine eindeutige Aussage über die Transpiration machen.

Somit befinden sich Messtechniker als auch Pflanzenphysiologen in dem schon alt

Einleitung

bekannten Dilemma, das jede Messung mit einer Messunsicherheit behaftet ist. Messen bedeutet Vergleichen, und um diesen Vergleich anstellen zu können, brauchen wir ein System definierter physikalischer Einheiten. Dabei müssen wir zwischen den definierten theoretischen Einheiten und den wirklichen, gemessenen Einheiten unterscheiden.

Die theoretischen Einheiten sind aus ihrer Natur heraus eine nicht fehlerbehaftete theoretische Quantität, im Vergleich dazu sind die gemessenen Einheiten durch eine Messapparatur entstanden und daher mit Fehlern behaftet. Damit pendelt der gemessene Wert innerhalb eines gegebenen Bereiches um den theoretischen fehlerfreien Wert, dieser gegebene Bereich wird als Bereich der Messunsicherheit bezeichnet. Diese Fehler können dabei systematischer Natur sein oder aber zufällig entstanden sein (GRABE 2005). Ein Fehler bedeutet aber nicht nur eine Abweichung des Messwertes vom „wahren Wert“ wie zum Beispiel bei einer Längenmessung, sondern kann auch den Einfluss der Messapparatur und der verwendeten Messtechnik auf das erwartete Messergebnis bedeuten.

Im Falle der pflanzenphysiologischen Messungen wie zum Beispiel der Transpirationsmessung gibt es keinen „wahren Wert“ im eigentlichen Sinne wie bei der bereits erwähnten Längenmessung, wo eine Strecke eine „wahre Länge“ hat, um die der Messwert im Bereich des Messfehlers pendelt. Hier geht es eher um den Einfluss der Messung auf das lebende System Pflanze welches auf gewisse Änderungen in seiner Umwelt reagiert. Bei der Messung mit einem Porometer, bei dem trockene Luft durchgeführt wird, vielleicht mit der Öffnung der Stomata, bei Reduktion der Strahlung durch die Küvettenwand vielleicht mit dem Schließen dieser.

Jeder messtechnische Eingriff in das System bringt automatisch eine Reaktion des Systems auf die Messung mit sich. Auch wenn die Messung unter idealisierten Bedingungen oder unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt wird, die Messung an sich verändert den ursprünglichen Zustand des zu messenden Systems und macht somit

Einleitung

den erhaltenen Messwert zu einem Momentanwert der unter den im Augenblick herrschenden Bedingungen erhalten wurde. Nähert man seine Messbedingungen immer mehr an die Realbedingungen, dass heißt an die Bedingungen am Standort an, nähert sich natürlich auch der Messwert immer mehr an die eigentlichen Bedingungen an, die Annäherung wird aber immer, alleine schon aus der Messtechnik heraus einen asymptotischen Verlauf zeigen.

Es ist also nicht besonders nutzbringend, „wahre Messwerte“ zu suchen und absolute Messwerte produzieren zu wollen. Der Weg führt eher über eine Vielzahl von Messungen, die Trends und Richtungen wiedergeben, kombiniert mit einem genauen Vergleich von gemessenen Umweltparametern und einer sorgfältigen Überprüfung der Ergebnisse, nur so kann die Reaktionsbreite eines lebenden Systems wie einer Pflanze halbwegs realistisch erfasst werden.

Zielsetzung

Wie bereits erwähnt, ist es nicht gerade einfach ein lebendes System wie zum Beispiel eine Pflanze am Standort messtechnisch zu erfassen, um genaue Aussagen über seinen Zustand zu machen. Genauer gesagt, sind die erhaltenen Werte Annäherungen an den eigentlichen Wert, oder Momentanaufnahmen unter den zum Zeitpunkt der durchgeführten Messung herrschenden Messbedingungen.

Bei vielen am Institut für Pflanzenphysiologie durchgeführten Messungen am Standort der Pflanzen mit unterschiedlichen Messsystemen zur Bestimmung der Transpirationsrate wurde festgestellt, dass sich die Werte nicht miteinander vergleichen lassen. Die unterschiedlichen Messmethoden liefern unter annähernd gleichen Bedingungen verschiedene Werte, wobei es fraglich ist, welche der unterschiedlichen Werte der Realität am nächsten kommt.

Bei den eingesetzten Messmethoden handelt es sich um die gravimetrische Methode von Otto STOCKER sowie um die Messung mit zwei unterschiedlichen Porometersystemen, nämlich mit dem PMR-4 der Firma PP Systems, welches ein „steady state“ Porometer ist und mit dem AP4 Porometer der Firma Delta-T Devices welches ein „transient“ Porometer ist (Erklärungen siehe Material und Methoden).

In dieser Arbeit werden die erwähnten drei unterschiedlichen Messmethoden eingesetzt, um einerseits das Transpirationsverhalten von *Hedera helix* als „Modellpflanze“ zu untersuchen sowie die aus den verschiedenen, teilweise parallel und unter definierten Glashausbedingungen durchgeführten Messungen erhaltenen Werte in Beziehung zu einander zu setzen und miteinander zu vergleichen. Dabei wird auch die von A. ARLAND 1955 entwickelte „Anwelk-Methode“ in abgewandelter Form (siehe Material und Methoden) eingesetzt um Parallelmessungen mit den Porometern machen zu können.

Zielsetzung

Anhand der aufgezeichneten Messwerte und Daten wird versucht, die in den Messmethoden auftretenden Differenzen der Ergebnisse zu erklären und zu begründen.

Als Alternative nicht invasive Methode wird die Infrarot Thermographie kurz vorgestellt. Dazu werden Vergleichsmessungen mit dem Porometer (AP4) und der Infrarot Thermographie unter Freilandbedingungen (einmal mit *Polygonum aubertii* und einmal mit *Hedera helix* im Topf) durchgeführt. Die Messwerte werden mit einander verglichen und in Beziehung zu einander gestellt.

1. Spaltöffnungen

Spaltöffnungen oder Stomata sind charakteristisch für cutinisierte Epidermen. Gehäuft finden sie sich meistens an Laubblattunterseiten, doch fehlen sie auch in den Epidermen von Sprossachsen und Blütenblättern fast nie. An Wurzeln kommen Spaltöffnungen dagegen nicht vor.

Jedes Stoma besteht aus zwei länglichen Schließzellen mit Chloroplasten, die nur an ihren Enden fest miteinander verbunden sind, während die mittleren Bereiche durch einen schizogen gebildeten Interzellularspalt, den Porus, voneinander getrennt sind. Der Porus stellt durch Epidermis und Cuticula hindurch die Verbindung zwischen Außenluft und einem besonders großen Interzellularraum des Mesophyll- beziehungsweise Rindengewebes her. Die Weite des Porus kann kurzfristig durch Verformung der Schließzellen reguliert werden. Der Spalt, der von den „Bauchwänden“ der Schließzellen begrenzt wird, ist umso weiter geöffnet, je höher der Turgor der Schließzellen ist. Die Stomata sind die entscheidenden Regulatoren des Gasaustauschs und der Transpiration. Selbst an Laubblattunterseiten, die in der Regel zwischen 100 und 500 Stomata pro mm² aufweisen, macht das Porenareal auch bei voll geöffneten Spalten nur 0,5 bis 2% der Blattfläche aus. Dennoch kann die stomatäre Transpiration bis über 23% der Evaporation (Verdunstung einer freien Wasseroberfläche) erreichen, andererseits allerdings auch bis auf 0 gedrosselt werden (BRESINSKY et al. 2008).

Die Schließzellen sind typische Idioblasten der Epidermen, sie weichen nach Form und Größe sowie in der Regel durch den Besitz stärkehaltiger Chloroplasten von den übrigen Epidermiszellen ab. Manchmal gilt das, weniger ausgeprägt – auch für ihre unmittelbaren Nachbarzellen, die dann als Nebenzellen bezeichnet werden. Spaltöffnungen und Nebenzellen bilden gemeinsam den Spaltenapparat (BRESINSKY et al. 2008).

Es können grundsätzlich drei Spaltöffnungstypen unterschieden werden, der Helleborus-Typ; zwischen zwei bohnenförmigen, an den Enden zusammenstoßenden Schließzellen

Spaltöffnungen

liegt der Porus. Die konvexen Schließzellenwände (Rückenwände) sind unverdickt, die konkaven Bauchwände haben zwei vorspringende Verdickungsleisten, die über und unter dem Zentralspalt einen Vor- und Hinterhof abgrenzen. Dieser ist über einen Interzellularraum (Atemhöhle) mit dem Interzellularsystem der Pflanze verbunden. Oft sind die Schließzellen mit den umgebenden Epidermiszellen durch besonders dünne Wandzonen (Hautgelenke) scharnierartig verbunden.

Die Schließzellen unterscheiden sich, wie schon erwähnt durch Chloroplastengehalt und Assimilationsreichtum von den Epidermiszellen. Unmittelbare Ursache des Öffnens (Schließens) sind Turgorerhöhungen (-senkungen) in den Schließzellen, wobei durch Zellwanddicke und -bau (Fibrillenverlauf) stärkere Krümmung (Streckung) der Schließzellen und damit Öffnen (Schließen) des Porus eintritt.

Nach dem gleichen Prinzip arbeiten auch die zwei weiteren, morphologisch deutlich verschiedenen Typen:

Der Gramineentyp ist bei Gräsern verbreitet. Die Schließzellen sind hantelförmig und nur in der Mitte verdickt (siehe Abb. 2). Bei Turgorerhöhung erweitern sich die Endabschnitte und drängen die starren Mittelstücke auseinander.

Der Mniumentyp, dieser kommt bei Farnen und Moosen vor. Bei Turgorerhöhung wird die Schließzelle mit dünner Bauchwand und verdickten übrigen Wänden höher, die Konvexkrümmung gegen den Spalt wird geringer und dieser öffnet sich.

Bei Trockenpflanzen (Xerophyten) sind die Stomata oft in die Epidermis eingesenkt, wodurch die Verdunstung weiter herabgesetzt wird. Bei Pflanzen feuchter Standorte (Hygrophyten) können sie schornsteinartig emporgehoben sein (VOGEL und ANGERMANN 1984).

Spaltöffnungen

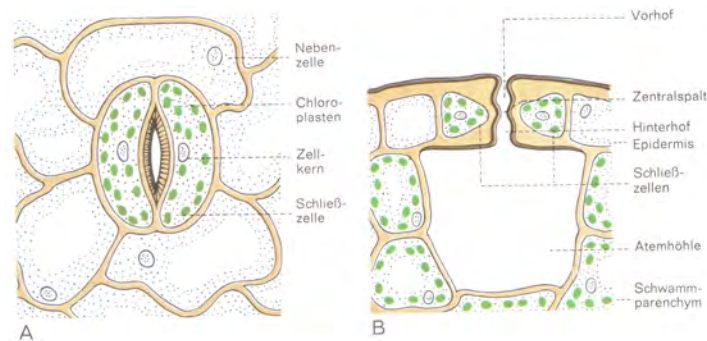


Abb. 1: Spaltöffnungsapparat: Aufsicht (A), Querschnitt (B)
(VOGEL und ANGERMANN 1984)

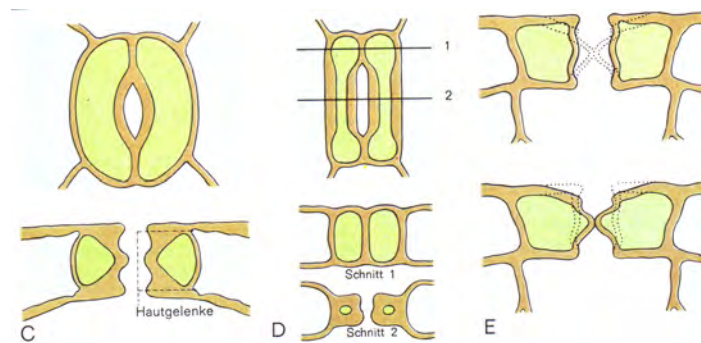


Abb. 2: Spaltöffnungstypen: Helleborustyp (C), Gramineentyp (D), Mniumentyp (E)
(VOGEL und ANGERMANN 1984)

1.1 CO₂- Austausch durch die Stomata

Die Diffusion des CO₂ aus der Atmosphäre zum Ort seines Verbrauches in den Chloroplasten ist ein entscheidender Teilprozess der Photosynthese. Bei stationärer Photosynthese entwickelt sich auf dieser Strecke ein CO₂-Konzentrationsgradient, dessen Steilheit von der Photosyntheseintensität abhängt. Entlang dieser Gradienten erfolgt im Licht ein Diffusionsfluss von CO₂. Da die der Blattepidermis aufgelagerte Cuticula weitgehend undurchlässig für CO₂ ist, erfolgt die Aufnahme praktisch ausschließlich durch die Stomata, welche entweder nur auf der Blattunterseite (hypostomatische Blätter) oder auf beiden Blattflächen angeordnet sind (amphistomatische Blätter).

Spaltöffnungen

Dem Nettostrom von CO_2 (I_{CO_2}) in ein Blatt mit der Fläche F stehen mehrere Diffusionsbarrieren im Wege. Nach dem 1. Fickschen Gesetz erhält man:

$$I_{\text{CO}_2} = -PF\Delta\text{CO}_2 \quad [1]$$

beziehungsweise

$$I_{\text{CO}_2} = \frac{(\text{CO}_2)_{\text{Atmosphäre}} - (\text{CO}_2)_{\text{Chloroplast}}}{r} \quad [2]$$

wobei $r = P^{-1}F^{-1}$ als Diffusionswiderstand in s/m^3 definiert ist, r^{-1} ist die Leitfähigkeit welche dem Produkt aus Blattfläche mal Permeabilitätskoeffizient, P entspricht. Diese Formulierung des 1. Fickschen Gesetzes ist direkt analog zum Ohmschen Gesetz. Folglich kann, wie beim Ohmschen Gesetz eine Auflösung des Gesamtdiffusionswiderstandes (r_{total}) in eine Summe von Einzelwiderständen erfolgen.

$$r_{\text{total}} = r_a + r_l + r_w + r_k \quad [3]$$

r_{total} = Gesamtdiffusionswiderstand in s/m^3

r_a = äußere Widerstand, bedingt durch die Dicke der CO_2 Grenzschicht an der Blattunterseite

r_l = Stomatawiderstand ist eine Funktion der Anzahl und Öffnungsweite der Stomata.

r_w = Widerstand den das CO_2 beim Übergang von der Gasphase in die flüssige Phase überwinden muss.

r_k = „chemische Widerstand“

r_w und r_k ergeben zusammen den Mesophyllwiderstand

Spaltöffnungen

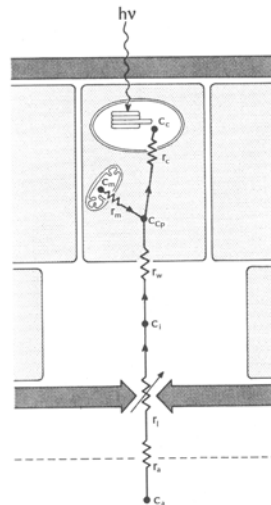


Abb. 3: Einfaches Modell des photosynthetischen CO₂-Transports von der Außenluft in die Chloroplasten. (SCHOPFER und BRENNICKE 2006)

Aus Abbild 3 wird der Diffusionsweg des CO₂ unter Einbezug der Atmungsprozesse ersichtlich. Der äußere Widerstand r_a ist durch die Dicke der CO₂-Grenzschicht an der Blattoberfläche bedingt. Diese bis zu mehreren Millimetern dicke, CO₂-verarmte Luftschicht vor den Stomata kann die Diffusion von CO₂ bei ruhiger Luft erheblich behindern. Sie hängt stark vom Wind, der Blattgestalt und der Morphologie der Blattoberfläche (zum Beispiel der Behaarung) im Bereich der Stomata ab.

Der Stomatawiderstand r_i ist eine Funktion der Anzahl und Öffnungsweite der Stomata, r_w ist der Widerstand, den das CO₂ beim Übergang von der Gasphase der Interzellularen in die wässrige Phase der Zellwände zu überwinden hat. Die Diffusionswiderstände der Zellmembranen und des Cytoplasmas sind meist vernachlässigbar klein. Obwohl er nicht Teil des Diffusionsprozesses ist, wird auch der durch die Aktivität der enzymatischen CO₂-Fixierung bedingte „chemische Widerstand“ r_k miteinbezogen. Die Summe r_w und r_k wird auch als Mesophyllwiderstand r_m bezeichnet. Während r_w und r_k für ein bestimmtes Blatt bei sättigenden Lichtbedingungen als konstant angesehen werden können, sind r_a und r_i hochgradig variabel. Der maßgebende Teilwiderstand bei ruhiger Luft ist r_a . Andererseits kann r_i den Gesamtwiderstand bei bewegter Luft maßgeblich bestimmen. Bei Stomataverschluss ist r_i annähernd r_{total} wobei r_{total} gegen Unendlich geht. Damit werden Stomata zu den entscheidenden Pforten, an denen unter natürlichen Bedingungen der

Spaltöffnungen

Nettofluss von CO_2 in das Blatt und gekoppelt damit der Nettofluss von H_2O aus dem Blatt heraus reguliert werden kann.

Die Regulation der stomatären Öffnungsweite dient dazu den stomatären Widerstand der jeweiligen Photosyntheseintensität anzupassen und nicht all zu groß werden zu lassen. Eine wichtige Rolle spielt hierbei die Tatsache, dass die Wasserdampfdiffusion in einer linearen Beziehung zur stomatären Leitfähigkeit (r_l^{-1}) steht, während die photosynthetische CO_2 -Aufnahme eine Sättigungskurve für CO_2 zeigt. Daher wird, zumindest bei höherer CO_2 -Konzentration im Blatt, die Transpiration durch einen hohen stomatären Widerstand viel stärker eingeschränkt als die Photosynthese. Auf diese Weise kann ein optimaler Kompromiss zwischen CO_2 -Assimilation und transpiratorischem Wasserverlust erzielt werden (SCHOPFER und BRENNICKE 2006).

1.2 Steuerung der Stomaweite

Im turgeszenten Blatt besteht bei nichtsättigenden Lichtbedingungen eine enge Korrelation zwischen stomatärer Öffnungsweite und Photosyntheseintensität. Das Wirkungsspektrum für die photonastische Stomaöffnung spiegelt im Prinzip das Absorptionsspektrum der Photosynthesepigmente wider. Bei normalem Tageslicht beeinflusst die CO_2 -Konzentration die Stomataweite relativ wenig. Unter diesen Bedingungen übernehmen Lichtsteuerungssysteme in den Schließzellen selbst die Kontrolle über die Stomaweite, wobei zwei Photoreaktionssysteme zusammenwirken. Ein System wird durch Lichtabsorption im Chlorophyll aktiviert (zum Beispiel durch rotes Licht) und schließt daher offenbar photosynthetische Reaktionen in den Schließzellenchloroplasten ein. Ein zweites, wesentlich empfindlicheres System arbeitet mit einem Blaulichtphotorezeptor (Phototropin) (SCHOPFER und BRENNICKE 2006).

In allgemeinen sind Stomata unempfindlich für Änderungen des Wasserpotentials im Blatt, solange ein bestimmter Schwellenwert des Wasserpotentials (Ψ), meist zwischen -0,5 und -1,8 MPa nicht unterschritten werden. Sinkt das Wasserpotential auf negativere Werte ab,

so schließen die Stomata schnell und meist vollständig, weitgehend unabhängig von der Intensität der Photosynthese. Unter diesen Bedingungen übernimmt der hydroaktive Regelkreis die Kontrolle über die Stomataweite. Dieses System hat offenbar die Funktion eines Sicherheitsventils für die Transpiration (SCHOPFER und BRENNICKE 2006).

Für die Signalübertragung spielt das Hormon Abscisinsäure (ABA) eine entscheidende Rolle. Im Experiment lässt sich durch ABA-Zufuhr ein rascher und vollständiger Spaltenschluss erzielen, der bei Entfernung von ABA wieder voll reversibel ist. Bei Unterschreiten des Wasserpotentialschwellenwertes geben die Mesophyllzellen bereits wenige Minuten später wirksame Mengen von ABA in den Apoplasten ab. Die ABA-Rezeptoren der Schließzellen sind sehr wahrscheinlich an der Außenseite der Plasmamembran lokalisiert und daher vom apoplastischen Raum aus direkt zugänglich. Bei einigen Pflanzen wurden Anhaltspunkte dafür gefunden, dass der CO₂-Regelkreis und der H₂O-Regelkreis über ABA funktionell verknüpft sind. Der CO₂-Regelkreis schließt die Stomata bei Erhöhung der CO₂-Konzentration nur dann, wenn eine geringe (im hydroaktiven System unterschwellige) ABA-Konzentration im Transpirationsstrom vorliegt, das bedeutet ABA macht die Stomata für CO₂ empfindlich. Umgekehrt sensibilisiert CO₂ die ABA-abhängige Schließbewegung. Dadurch wird die Flexibilität des gesamten Regelsystems erweitert und es findet eine gegenseitige Abstimmung zwischen Photosynthese und Wasserhaushalt statt (SCHOPFER und BRENNICKE 2006).

Stomata müssen funktionell als hydraulische Ventile aufgefasst werden. Ihre Öffnungsbewegung ist eine Art der osmotische Zellbewegung. Die durch Wasseraufnahme und Zellwanddehnung verursachte Bewegung ist in ihrer Geometrie durch den anatomischen Bau der Zellen und ihrer Fixierung im umgebenden Epidermisgewebe vorgegeben und ist daher in die Kategorie der Nastien einzuordnen. Ein selektiver Anstieg des Wasservolumens in den Schließzellen führt zur Öffnung. Das Schließen erfolgt, wenn die Volumenzunahme durch Wasserausstrom wieder rückgängig gemacht wird (elastische Kontraktion). Häufig sind die Schließzellen von zwei relativ großen Nebenzellen begleitet,

Spaltöffnungen

welche mit ihnen zusammen den Stomaapparat bilden. Die Nebenzellen haben meist Speicherfunktion für Ionen beziehungsweise Wasser und bilden ein nachgiebiges Widerlager für die Schließzellen. Im Laufe der Evolution haben sich verschiedene Typen von Stomaapparaten herausgebildet, welche sich in ihren anatomischen und mechanischen Eigenschaften unterscheiden (siehe Kapitel 1).

Bei allen Stomaapparaten wird die Öffnungsbewegung durch ein Absinken des Wasserpotentials in den Schließzellen relativ zur Umgebung ausgelöst, was einen passiven Einstrom von Wasser und damit eine Volumensvergrößerung zur Folge hat. Der Abfall des Wasserpotentials geht auf eine entsprechende Zunahme des osmotischen Drucks π durch Ionenimport unter den Einfluss der Öffnungssignale (Licht, niedrige CO_2 -Konzentration) zurück. Umgekehrt führen Schließsignale wie das ABA zu einem entsprechendem Wasserpotentialanstieg und zu einem Wasserausstrom aus den Schließzellen.

Die Hauptrolle bei der Erhöhung des osmotischen Druckes spielen Ionen. In mehr als 50 Arten konnte ein schneller Transport von K^+ zwischen Schließzellen und Nachbarzellen nachgewiesen werden. Die Elektroneutralität kann beim Maisstoma etwa zur Hälfte durch die gleichzeitige Aufnahme von Cl^- gewährleistet werden. Die Nebenzellen dienen hierbei als Speicher für K^+ und Cl^- . Bei *Vicia faba* hat man keine derartige Verschiebung von Cl^- gefunden. Hier übernehmen vorwiegend organische Säureionen (vor allem Malat), welche die Schließzellen selbst produzieren, die elektrische Neutralisation des einströmenden K^+ .

Es ist also die Akkumulation von KCl oder K_2 -Malat, die für die zur Öffnung führende π -Erhöhung in den Schließzellen dieser Pflanzen hauptsächlich verantwortlich ist.

Im adulten Zustand gibt es keine funktionsfähigen Plasmodesmen zwischen Schließ-, Neben- und regulären Epidermiszellen; der K^+ -Transport muss daher durch den Apoplasten (Zellwandraum) erfolgen. Der schnelle Import beziehungsweise Export von K^+ wird durch K^+ -selektive, spannungsabhängige Ionenkanäle ermöglicht, die an

Spaltöffnungen

Schließzellprotoplasten beziehungsweise isolierten Plasmamembranen nachweisbar sind. Öffnungssignale wie Licht, induzieren eine Öffnung von einwärts gerichteten K^+ -Kanälen durch Hyperpolarisierung. Schließsignale induzieren dagegen eine Öffnung von auswärts gerichteten K^+ -Kanälen durch Depolarisierung der Plasmamembran. Die der lichtinduzierten Öffnungsbewegung vorgehende Hyperpolarisierung geht mit einer gleichzeitigen Ausscheidung von H^+ ins Außenmedium einher (siehe Abb. 4).

Am Anfang der Wirkkette für die Öffnungsbewegung steht vermutlich die Aktivierung einer Protonenpumpe (Plasmamembran-ATPase) welche die K^+ -Influxkanäle durch Absenkung des Membranpotentials öffnet und gleichzeitig das elektrochemische Potenzial für den passiven Einstrom von K^+ liefert.

Beim ABA-induzierten Stomataverschluss kommt es zu einer Öffnung von auswärts gerichteten, und zur Schließung von einwärts gerichteten K^+ -Kanälen in der Plasmamembran der Schließzellen. An der Umsetzung des ABA-Signals in diese Permeabilitätsänderung der K^+ -Kanäle sind offenbar regulatorische Anioneneffluxkanäle beteiligt, die auf Veränderungen des cytoplasmatischen Ca^{2+} -Spiegels reagieren.

Die für die osmotische Adaptation verantwortlichen Ionentransportprozesse stehen in engen Zusammenhang mit dem besonderen Kohlenhydratstoffwechsel der Schließzellen. In den Chloroplasten dieser Zellen fehlen die Enzyme des Calvin-Zyklus oder sind teilweise inaktiv. Der Import von Zucker aus dem Mesophyll erlaubt jedoch die Synthese von Stärke. Anstelle der nur in Spuren vorkommenden RUBISCO kommt in den Schließzellen cytoplasmatische Phosphoenolpyruvatcarboxylase vor, welche eine lichtunabhängige Fixierung von CO_2 ermöglicht. Das Reaktionsprodukt Oxalacetat wird anschließend zu Malat reduziert. Bei der Öffnungsbewegung wird Stärke in den Schließzellen über die Glycolyse zu Phosphoenolpyruvat abgebaut und daraus unter CO_2 -Aufnahme Malat synthetisiert, dessen Pegel um ein Vielfaches ansteigt. Die Bildung von H_2 -Malat (Äpfelsäure) über diesen Weg hat zwei wichtige Aufgaben: erstens die

Spaltöffnungen

Bereitstellung von Malat²⁻ als Gegenion für das aufgenommene K⁺ und die Nachlieferung von H⁺ für die Protonenpumpe (intrazelluläre pH-Regulation) (SCHOPFER und BRENNICKE 2006).

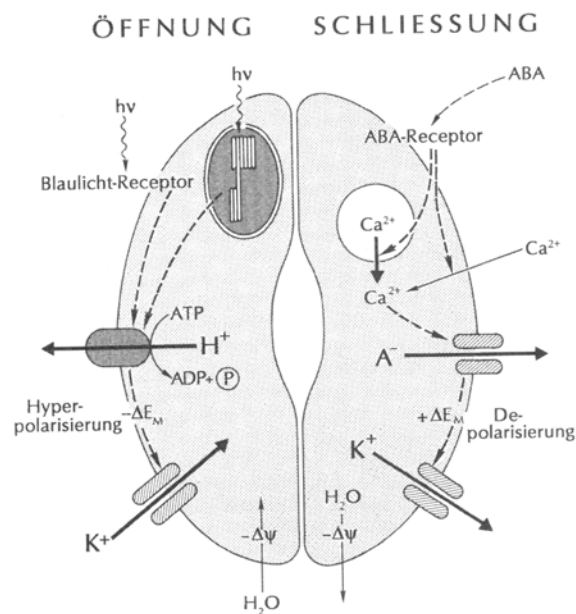


Abb. 4: Regulation der Ionentransportprozesse an der Plasmamembran der Schließzellen. (SCHOPFER und BRENNICKE 2006).

2. Energierastrahlung der Atmosphäre und des Bodens

Nur wenig mehr als 1% der eingestrahnten Sonnenenergie wird für den Stoffwechsel der Photosynthese verwendet. Die übrige Energie (ca. 700 bis 1000 W/m² bei voller Einstrahlung in Bodennähe) muss wieder abgegeben werden, denn die Pflanze ist ortsgebunden und absorbiert das kurzwellige Licht entsprechend ihrem Albedo (Rückstrahlung). Diese Energie kann nur durch die Abgabe von Wärme an die umgebende Luft (fühlbare Wärme) oder durch Verdunstung von Wasser (latente Wärme) umgesetzt werden. Die Wärmeleitung in den Boden ist zu langsam, um den Wärmehaushalt eines Blattes bei wechselnder Einstrahlung zu regulieren. Aus den Wärmeumsetzungen resultiert die Temperatur der Organe, insbesondere der Blätter und Blüten, oder die Temperatur von Oberflächen wie Stämmen und Boden (SCHULZE et al. 2002).

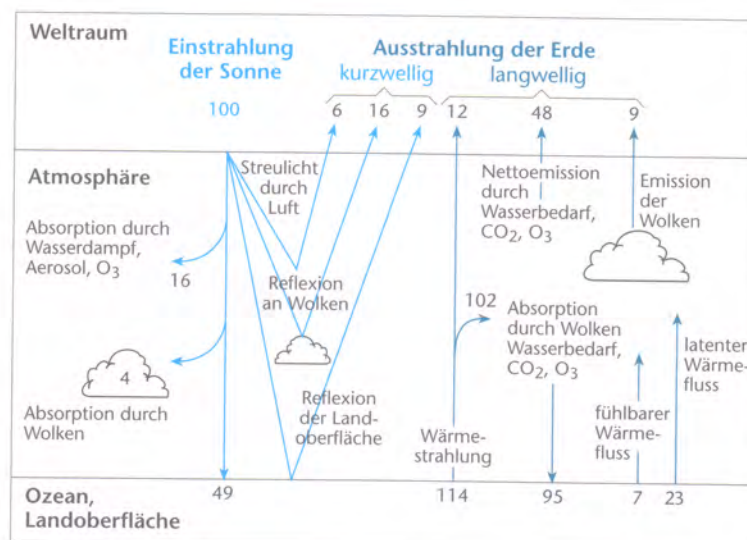


Abb. 5: Umsatz der Einstrahlung und Bilanz der Wärmestrahlung in der Atmosphäre (SCHULZE et al. 2002)

Diese Temperaturen müssen sich aber in bestimmten physiologischen Grenzen halten um Schäden zu vermeiden. Vielmehr sollte die Temperatur im Bereich des physiologischen Optimums der Stoffwechselvorgänge liegen, und diese können sowohl über als auch unter der Umgebungstemperatur sein. Pflanzen können durchaus in einem sehr weiten Bereich Organtemperaturen beeinflussen, so können Blätter in ariden Gebieten durch Verdunstung

Temperaturen erreichen die deutlich unter der Umgebungstemperatur liegen.

Der Wärmehaushalt der Pflanzen ist eng gekoppelt an die chemische Zusammensetzung und die physikalischen Transportprozesse in der Atmosphäre. Die Umsetzung der Sonnenenergie verändert nicht nur die klimatischen Bedingungen allgemein, sondern auch die klimatischen Bedingungen in der bodennahen Grenzschicht gegenüber der Atmosphäre. Es entstehen damit lokal und nach Gegebenheit unterschiedliche Mikroklimata (SCHULZE et al. 2002).

Wasserdampf und Kohlendioxid haben auf die Energiebilanz der Atmosphäre sowie der Pflanzen und somit auf den Wärmehaushalt entscheidenden Einfluss. Wasserdampf beeinflusst durch die Bildung von Wolken

- die Absorption und Reflexion in der Atmosphäre und damit die Einstrahlung der Sonnenenergie;
- über das Sättigungsdefizit die Verdunstung von der Erdoberfläche und der Pflanzendecke und damit die Vegetation;
- über die Temperaturabhängigkeit der Sättigung und über die Veränderung der Dichte die Transportvorgänge und der Atmosphäre (Wolkenbildung) und damit den Niederschlag.

Kohlendioxid beeinflusst

- durch Absorption und Ausstrahlung von langwelliger Strahlung den Wärmehaushalt der unteren Atmosphäre;
- die Photosynthese als Substrat.

Die Interaktion zwischen den optischen Eigenschaften und der Gaszusammensetzung der Atmosphäre wird aus Abbild. 6 klar.

Energiestrahlung der Atmosphäre und des Bodens

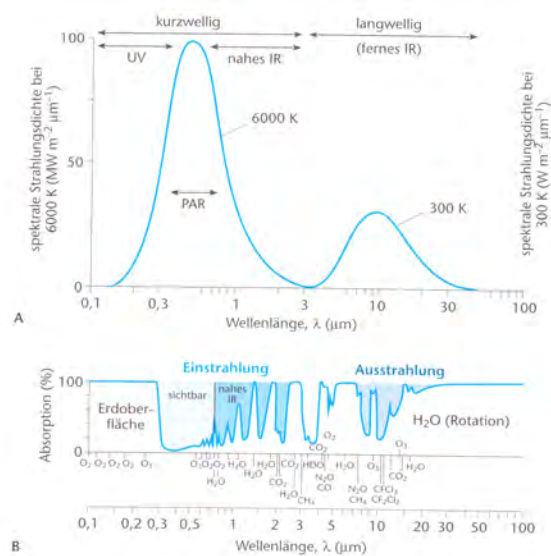


Abb. 6: Gaszusammensetzung und optische Eigenschaften der Atmosphäre (SCHULZE et al. 2002)

Die Einstrahlung der Sonne erfolgt im kurzwelligen Bereich bei ca. 6000 K mit einem Maximum bei etwa 0,6 μm Wellenlänge (sichtbares Licht). Die mittlere Einstrahlungsenergie an der oberen Grenze der Atmosphäre beträgt 1370 W/m² (Solarkonstante, gemessen in der Stratosphäre). Bedingt durch die Geometrie der Erde, liegt der mittlere Strahlungsfluss auf der Tageshemisphäre, gemittelt über die besonnte Hälfte der Erde, bei 340 W/m². Diese Einstrahlung wird ausgeglichen durch langwellige Ausstrahlung (Wärmestrahlung, I_l), die unter den Bedingungen der Erdatmosphäre bei 255 K in der Stratosphäre erfolgt.

Langwellige Strahlung folgt dem Stefan-Boltzmann'schen Gesetz

$$I_l = \sigma \cdot T^4 \quad [4]$$

wobei $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ die Stefan-Boltzmann-Konstante und T die Temperatur in Kelvin darstellen. Ohne Gegenstrahlung der Atmosphäre läge die mittlere Erdtemperatur bei -18°C (SCHULZE et al. 2002).

Die atmosphärischen Gase, insbesondere Wasserdampf und CO₂ bewirken, dass ein Teil

der eingestrahlten Sonnenenergie im kurzwelligen und nahen IR-Bereich absorbiert und reflektiert wird. In der Erdatmosphäre absorbiert vor allem Ozon im kurzwelligen Bereich (UV-Strahlung) während H_2O und CO_2 im nahen IR-Bereich absorbieren und somit die Einstrahlung auf ein schmales Einstrahlungsfenster mit einem Maximum im sichtbaren Bereich des Lichts begrenzen. Der Strahlungsgewinn wird durch Ausstrahlung im langwelligen IR-Bereich ausgeglichen, wobei Wasserdampf und CO_2 die langwellige Ausstrahlung der Erdoberfläche einschränken. Es bleibt zwischen 8 und 14 μm Wellenlänge nur ein schmales Ausstrahlungsfenster, in dem die Erdoberfläche Energie absorbiert beziehungsweise abgibt (SCHULZE et al. 2002).

Die Energiebilanz umfasst die Summe aller Wärmeflüsse, wobei vor allem der Wärmetransport, die Verdunstungswärme und der Bodenwärmestrom erfasst werden, die Bilanz muss insgesamt ausgeglichen sein.

$$\Phi_{nB} = R_{nB} - H - \lambda E - B - S - M = 0 \quad [5]$$

Hierbei kennzeichnet Φ_{nB} den Netto-Energiefluss an der Bodenoberfläche, R_{nB} die Strahlungsbilanz in Bodennähe. Der fühlbare Wärmefluss H ist proportional zur spezifischen Wärmekapazität der Luft und der Temperaturdifferenz zwischen Boden und Atmosphäre. λE ist der latente Wärmefluss, λ ist die zur Verdunstung von Wasser benötigte Energie und E kennzeichnet die Verdunstung (SCHULZE et al. 2002).

Allgemein ergibt sich die Energiebilanz wie folgt:

$$\begin{aligned} \text{Energiebilanz} = & \text{Strahlungsbilanz} - \text{fühlbarer Wärmefluss} - \text{latenter Wärmefluss} - \\ & \text{Bodenwärmestrom} - \text{Speicher} - \text{Metabolismus} = 0 \quad [6] \end{aligned}$$

2.1 Standortfaktoren

Das Klima der bodennahen Luftschichten wird durch die gleichen Prozesse gesteuert wie das Klima der Atmosphäre, nur treten hier in Abhängigkeit von der Bodenbeschaffenheit

und der Vegetation Extreme auf. Besonders gut lässt sich das anhand des Temperaturverlaufs des Bodens im Laufe eines Tagesganges darstellen.

Um Mitternacht herum führt die hohe langwellige Ausstrahlung zu einer Abkühlung. Bei vegetationslosen Bodenflächen können die Temperaturen in einer wolkenlosen Nacht um mehr als 10 K unter der Lufttemperatur (2 m über Boden) absinken. Mit Sonnenaufgang erwärmt sich der Boden zunehmend wobei die Erwärmung je nach Bodenbeschaffenheit unterschiedlich tief eindringt, zu Mittag kann die Temperaturdifferenz zur Umgebungstemperatur bis zu 20 K betragen, die Erwärmung erfolgt über Konvektion und Wärmeleitung im Bodenkörper. Bei Sonnenuntergang sinkt die Oberflächentemperatur wieder allmählich, im Bodenkörper steigt die Temperatur hingegen noch an, dies ist die Wärmewelle, die durch Wärmeableitung zu Mittag in den Boden gelangte.

Die Tagesamplitude der Bodenoberflächentemperatur und die Jahresdurchschnittstemperatur werden von den Bodenbedingungen, der Bodenbeschaffenheit und der Exposition sowie der Hangneigung beeinflusst.

Trockene Böden haben eine geringe Wärmeleitfähigkeit und erwärmen sich an der Oberfläche besonders stark beziehungsweise kühlen in der Nacht stark ab, da die Einstrahlung vor allen durch die langwellige Ausstrahlung des Bodens ausgeglichen wird und bei trockenen Böden dieser Wärmeumsatz sich auf ein geringes Bodenvolumen beschränkt. Im Gegensatz dazu weisen feuchte Böden eine hohe Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität auf. Sie haben daher eine geringere Tagesamplitude der Temperatur. Wegen der höheren Verdunstung sind sie aber im Jahresmittel kälter als trockene Böden.

Eine schwarze Bodenoberfläche aus Gestein oder Humus verstärkt die Strahlungsabsorption; ebenso ist auf weißen Mineralböden und bei Schneeeauflage die Reflexion erhöht. Schwarze organische Auflagen können selbst im alpinen Klima Bodenoberflächentemperaturen von 50°C erreichen.

Nordhänge erhalten in der nördlichen Hemisphäre weniger Einstrahlung als Südhänge, was bedeutet, dass sie sich mittags nicht so stark erwärmen. Südhänge erhalten ein Strahlungsmaximum entsprechend des Breitengrades des Standorts. Ein Hang kühlt aber in der Nacht weniger ab als die Talsohle, da die Kaltluft schwerer ist als die warmen Luftmassen und ins Tal abfließt. Auch ist die Strahlungsbilanz eines Hanges mit der Atmosphäre nachts günstiger, da die Einstrahlung von benachbarten Oberflächen größer ist als in der Ebene. Die klimatischen Unterschiede zwischen Nord- und Südhang können in der nördlichen und südlichen gemäßigten Zone so groß sein, dass sie die Vegetation differenzieren (SCHULZE et. al. 2002).

Die Temperaturen im Boden zeigen im Vergleich zu denen auf der Erdoberfläche eine geringere Amplitude. Entsprechend der feuchteabhängigen Wärmekapazität, welche von der Bodenfeuchte abhängig ist, verlaufen die Bodentemperaturen in Tages- und Jahresgang zeitlich versetzt zu der Lufttemperatur.

Das Strahlungsklima und der Temperaturverlauf der Bodenoberfläche werden besonders stark durch den pflanzlichen Bewuchs verändert.

Die Zusammensetzung der Vegetation bestimmt ihre Reflektionseigenschaften. Der Reflexionskoeffizient schwankt zwischen 30% für einen Birkenwald und 16% für einen Nadelwald. Die geringe Reflexion des Nadelwaldes ist an der borealen Nadelwaldgrenze klimawirksam; es wird mehr Strahlungsenergie absorbiert und damit mehr Wärmeenergie im Bestand gehalten als auf einer waldfreien Fläche. Das Auftreten von immergrünen Koniferen könnte damit eine Verschiebung der Nadelwaldgrenze nach Norden bewirken; der Effekt wird aber durch die Beschattung der Wurzel, welche das Auftauen im Frühjahr verzögert, kompensiert (SCHULZE et al. 2002).

Der größte Teil der Einstrahlungsenergie wird unabhängig von der Vegetationshöhe im Kronendach der Vegetation umgesetzt.

Dabei ist der Strahlungsumsatz wesentlich von der Blattfläche und der Blattstellung abhängig. Die Blattfläche wird quantifiziert durch den Blattflächenindex (LAI), der als Summe der projizierten Blattflächen pro Bodenfläche definiert wird. Unter der idealisierenden Annahme einer statistischen Verteilung der Blätter im Kronendach folgt die Extinktion des Strahlungsflusses dem Lambert-Beer'schen Extinktionsgesetz:

$$I = I_0 e^{-k \cdot LAI} [7]$$

wobei I den Strahlungsfluss an einer bestimmten Stelle in der Vegetation beschreibt; I_0 ist die Einstrahlung über der Vegetation, LAI beschreibt den Blattflächenindex über dem Messpunkt und k den Extinktionskoeffizienten. k variiert zwischen 0,5 für aufrechte Blätter (zum Beispiel Gräser) und 0,7 für horizontale Blätter wie Klee. Eine Reihe von Arten (insbesondere Leguminosen) sind zur Blattbewegung fähig, womit der LAI aktiv und variabel gesteuert werden kann. Die dichte Verteilung der Nadeln bei Koniferen hat eine verringerte Absorption des Lichtes mit der Kronendachtiefe und damit einen erhöhten LAI zur Folge (SCHULZE et al. 2002).

Die Extinktion des sichtbaren kurzwelligen Lichtes erfolgt in der Vegetationsdecke in Abhängigkeit vom LAI rascher als die Extinktion des langwelligen Energieflusses. Damit dringt die Wärmestrahlung tiefer in die Vegetation ein als der photosynthetisch aktive Teil der Strahlung. Die Vegetation kann die Blattfläche nur bis zur Auslöschung des sichtbaren Lichtes erhöhen, das heißt der maximale LAI wird bestimmt durch die Einstrahlung (verfügbares Licht) und den Blattwinkel. Auch bei voller Nutzung des sichtbaren Lichtes erreicht ein Teil der IR-Strahlung den Boden (SCHULZE et al. 2002).

Im Kronenraum einer Vegetationsdecke ändert sich mit der Umsetzung der Strahlung nicht nur die Temperatur, sondern fast alle übrigen meteorologischen Faktoren, insbesondere das Sättigungsdefizit und die Turbulenz. Wegen der Durchmischung der Atmosphäre im Kronenraum sind die Temperaturextreme sowohl am Tag als auch in der Nacht weniger

stark ausgeprägt als auf einer freien Bodenfläche. Die Gradienten im Bestand sind abhängig von der Rauigkeit (Struktur und Beschaffenheit) der Bestandesoberfläche. Im Nadelwald erfolgt die Absorption des Lichtes (bezogen auf die Kronenhöhe) langsamer als im Getreideacker, dafür dringt der Wind tiefer in das Kronendach ein; die Temperaturen und der Dampfdruck sind am Tage im Nadelwald ausgeglichener als im Getreideacker. Wegen der Unterschiede in der Kopplung an die Atmosphäre kommt es nur im Getreideacker im Laubdach zu einer deutlichen CO₂-Anreicherung. In der Nacht kehren sich die Gradienten von Temperatur, Luftfeuchte und CO₂ um (SCHULZE et al. 2002).

Im Laub abwerfenden Wald der gemäßigten Zone kommt es zu einem Wechsel in der Energie umsetzenden Oberfläche. Vor Laubaustrieb erreichen 40% der Einstrahlung den Boden, wobei die nächtliche Ausstrahlung durch das Kronendach der Zweige etwas reduziert wird. Damit erwärmt sich die organische Auflage des Bodens rasch, und es kommt zum Austrieb der Frühjahresgeophyten. Mit dem Laubaustrieb werden 90% der Energie im Kronendach umgesetzt. Damit bleibt der Waldboden verhältnismäßig kühl. Der Lichtgenuss reicht nicht für lichtliebende Arten und es kommt zu Entwicklung von Schatten ertragenden Pflanzen, die auch das diffuse Seitenlicht oder einen etwas anderen Spektralbereich nutzen können (SCHULZE et al. 2002).

Viele Pflanzen in der Krautschicht der Wälder sind darauf angewiesen, die durch Lücken im Kronendach entstehenden Lichtflecken auszunutzen. Im immergrünen Koniferenwald fehlt das kurze zeitliche „Fenster“, in dem die Sonneneinstrahlung den Boden erreicht. Die Beschattung des Bodens verzögert zum Beispiel auch die Schneeschmelze und damit den Beginn der Vegetationsperiode mit negativen Auswirkungen auf die Wasserbilanz.

Die langsame Erwärmung des Bodens kann im Koniferenwald die positive Auswirkungen auf die Wärmebilanz des Kronenraums kompensieren (SCHULZE et al. 2002).

2.2 Energiebilanz eines Blattes

Die Energiebilanz eines Blattes wird hier stellvertretend für die Energiebilanz eines jeden

Organs oder einer Oberfläche einer Pflanze behandelt Die Gesetzmäßigkeiten sind die gleichen wie sie bereits bei der Atmosphäre beschrieben wurden, nur das im Falle des Blattes noch der Austausch der Blattober- und Unterseite hinsichtlich der kurz- und langwelligen Rückstrahlung vom Boden und die Abstrahlung vom Boden zum Blatt getrennt berücksichtigt werden.

I_S kennzeichnet den Strahlungsfluss auf eine Fläche die senkrecht zur Sonneneinstrahlung steht, Φ_S ist der Netto-Strahlungsfluss auf eine beliebig orientierte Fläche, es ergibt sich somit

$$\Phi_S = \sin\beta \cdot I_S \quad [8]$$

wobei β der Winkel zwischen Sonnenstrahl und Objekt ist. Damit wird unter Vernachlässigung möglicher Wärmeableitung und Speicherung die Energiebilanz eines Blattes von der Absorption im Bereich des kurzwelligen Lichtes, von der Wärmeabstrahlung der Blattober und -unterseite, dem fühlbaren und latenten Wärmetransport und vom Metabolismus bestimmt.

$$\Phi_{n\text{Blatt}} = \Phi_S + \rho_{sB} \Phi_S \alpha_L + \sigma(T_{\text{atm}})^4 + \sigma(T_B)^4 - 2 \sigma (T_{\text{Blatt}})^4 - H - \lambda E - M = 0 \quad [9]$$

Die obige Energiebilanz ergibt sich somit zu:

$$\text{Energiebilanz} = \text{kurz- und langwellige Absorption} - \text{Wärmeabstrahlung} - \text{fühlbarer und latenter Wärmetransport} - \text{Metabolismus} = 0 \quad [10]$$

Der fühlbare Wärmestrom wird im Falle des Blattes zu

$$H = \frac{c_p \cdot (T_{\text{Blatt}} - T_{\text{atm}})}{r_b} \quad [11]$$

wobei der Grenzschichtwiderstand r_b proportional zur Länge des Blattes (l) und umgekehrt proportional zur Windgeschwindigkeit (v) ist:

$$r_b = \sqrt{\frac{l}{v}} \quad [12]$$

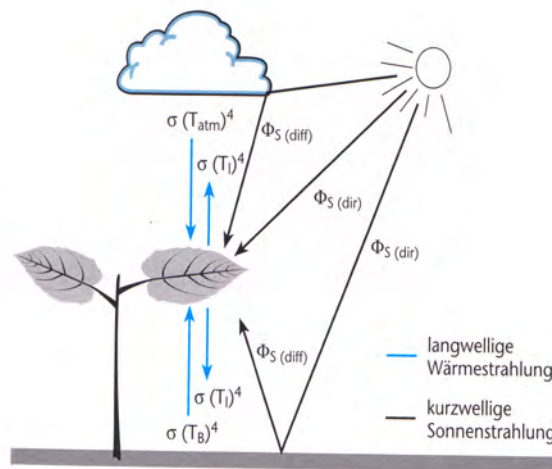


Abb. 7: Energiebilanz eines Blattes
(SCHULZE et al. 2002)

Unter Vernachlässigung der blattnahen Grenzschicht ist der latente Wärmestrom bei einem Blatt proportional zum Dampfdruckdefizit zwischen Blatt und Atmosphäre (D_l) und zur stomatären Leitfähigkeit (g_s):

$$\lambda E = D_l \cdot g_s \quad [13]$$

und g_s ist wiederum abhängig von D_l , wobei dieser Zusammenhang als physiologisch gesteuerte Reaktion bislang nur durch eine empirische Funktion dargestellt werden kann:

$$g_s = f(D_l) = \frac{1}{1 + \frac{D_l}{D_{l1/2}}} \quad [14]$$

wobei $D_{l1/2}$ dem Dampfdruckdefizit entspricht, bei dem die Stomata halb geschlossen sind. g_s wird in einer ventilierten Küvette gemessen. Die Leitfähigkeit eines nicht ventilierten Blattes ist entsprechend der Grenzschicht niedriger als g_s .

Die Gleichungen zur Energiebilanz eines Blattes zeigen, dass die Blatttemperatur zwar mit einer $\pm$ großen Genauigkeit messbar, aber nicht direkt berechenbar ist, denn sie ist sowohl von den physikalischen Gesetzen der Energiebilanz als auch von den physiologischen Reaktionen abhängig. Die Pflanze hat eine Fülle von Möglichkeiten, um die Blatttemperatur zu regulieren und somit extreme zu vermeiden.

Zu diesen Möglichkeiten gehören unter anderem:

die kurzfristigen (modulativen) Reaktionen, wie die Veränderung der Blattstellung, die Regulation der Stomata und damit die Kühlung durch Transpiration;

die modifikativen Reaktionen, durch Veränderungen der Blattgröße (Aufschlitzen der Blätter) und des LAI (Leaf Area Index); und schließlich die evolutiven Veränderungen wie die Änderung der Reflexionseigenschaften des Blattes zum Beispiel durch Behaarung oder Pigmentausstattung (SCHULZE et al. 2002).

3. Wasser in der Pflanze

Die Pflanze beziehungsweise die Pflanzenzelle besteht zum Großteil aus Wasser. Für die Betrachtung des Wasserzustandes der Zelle sind folgende Kompartimente wichtig, das Protoplasma welches im Durchschnitt 85-90% Wasser enthält, die Zellwand und die Vakuole.

In der Zelle kommt das Wasser als Konstitutionswasser in chemischer Bindung vor, als Quellungswasser (Hydratationswasser) ist es an Ionen, gelöste organische Substanzen und Makromoleküle angelagert, als Depotwasser füllt es die Vakuole aus und als interstitielles Wasser übernimmt es die Transportfunktionen in den Zellwänden, in Zellzwischenräumen und in Leitbahnen des Gefäß- und Siebröhrensystems (vasculäres Wasser).

Das Hydratationswasser macht etwa 5-10% des gesamten Wassers der Zelle aus, doch es ist in dieser Menge unbedingt lebensnotwendig. Der größere Teil des Quellungswassers im Protoplasma und in der Zellwand ist kapillar gebunden. Am leichtesten beweglich ist das Depotwasser in den Kompartimenten der Zelle die als Lösungsreservoir dienen. In Blättern ist mehr als die Hälfte des vorhandenen Wassers in dieser Weise gespeichert (LÖSCH 2001, LARCHER 2001).

3.1 Diffusion und Osmose

Unter Diffusion versteht man das Bestreben eines gasförmigen oder gelösten Stoffes, sich in dem zur Verfügung stehendem Raum oder Lösungsmittel gleichmäßig zu verteilen. Sie hat ihre Ursachen in der thermischen Bewegungsenergie der Moleküle. Die thermische Bewegungsenergie der Moleküle eines Lösungsmittels findet ihren Ausdruck in der Brownschen Molekularbewegung.

Werden zwei Lösungsmittel verschiedener Konzentration, von denen eines reines Wasser

sein kann, übereinander geschichtet, so diffundieren die Teilchen vom Ort höherer zum Ort der geringeren Konzentration. Die Diffusion folgt dem 1. Fickschen Diffusionsgesetz:

$$\frac{d_m}{d_t} = -D \cdot q \frac{\delta_c}{\delta_x} \quad [15]$$

Danach ist die Diffusionsrate, das heißt die in der Zeit d_t diffundierende Substanzmenge d_m , proportional dem Konzentrationsgradienten δ_c/δ_x , wobei δ_c in mol/cm^3 und δ_x in cm angegeben wird. q ist die Austauschfläche und D die Diffusionskonstante in cm^2/s . Das negative Vorzeichen beschreibt die Richtung des Vorganges.

Werden die beiden Lösungen durch eine permeable Membran getrennt, die sowohl das Lösungsmittel als auch den gelösten Stoff durchlässt, so ist die Gleichung um den Faktor P , die Permeabilitätskonstante der betreffenden Membran zu erweitern. Auch in diesem Fall ist die Diffusionsrate dem Konzentrationsgradienten proportional.

Als **Osmose** wird die Diffusion durch eine semipermeable Membran bezeichnet.

Eine semipermeable Membran ist zwar für das Lösungsmittel, nicht aber für den gelösten Stoff durchlässig. Werden nun zwei Lösungen unterschiedlicher Konzentration durch so eine Membran getrennt, wird dem Diffusionsbestreben der gelösten Moleküle oder Ionen Einhalt geboten. Infolgedessen verursacht das bestehende Diffusionspotential den Durchtritt des Lösungsmittels, im vorliegenden Fall des Wassers, durch die Membran zur Seite der höheren Konzentration. Der Wassereintritt in ein osmotisches System hat eine Volumenzunahme zur Folge, die einen Ausdehnungsdruck erzeugt, den osmotischen Druck (π).

Durch Messungen mit einem Osmometer wurden gewisse Gesetzmäßigkeiten ermittelt, diese wurden in der van't Hoffschen Theorie der Lösungen zusammengefasst:

- Bei konstanter Temperatur ist der osmotische Druck proportional der Konzentration.
- Bei konstanter Konzentration ist der osmotische Druck proportional der absoluten Temperatur.
- Äquimolare Lösungen, das sind Lösungen, die die gleiche Anzahl von Teilchen enthalten, sind isosmotisch (isotonisch). Dies gilt allerdings nur für ideale Lösungen. Bei Elektrolytlösungen, die weitgehend in ihre Ionen dissoziieren, sowie bei höher konzentrierten Nicht-Elektrolytlösungen erhält man abweichende Werte, die durch den osmotischen Koeffizienten (g) berücksichtigt werden müssen.

Insgesamt gilt für den osmotischen Druck somit die Beziehung

$$\pi = (c_1 - c_2) R \cdot T \quad [16]$$

wobei c_1 und c_2 die Konzentrationen der Innen- beziehungsweise Außenlösung in mol/l, T die absolute Temperatur und R die universelle Gaskonstante ist. π wird in Pascal angegeben. Für nicht ideale Lösungen gilt entsprechend

$$\pi = (c_1 - c_2) g \cdot R \cdot T \quad [17]$$

beziehungsweise wenn die Lösung reines Wasser ist,

$$\pi = c \cdot g \cdot R \cdot T \quad [18]$$

Während c die Molarität einer Lösung angibt, bezeichnet das Produkt $g \cdot c$ die Osmolarität. Bei einem Salz, das aus einem Kation und einem Anion besteht und zu 100% in seine Ionen dissoziiert, wäre die Osmolarität um den Faktor 2 höher als die Molarität, da doppelt so viele Teilchen in der Lösung vorliegen wie bei einem Nicht-Elektrolyten (NULTSCH 2001).

Zur Bestimmung des Wasserzustandes einer Zelle bedient man sich des volumetrischen Wasserpotentials Ψ_w . Dieses ist definiert als

$$\Psi_w = \frac{\mu_w - \mu_w^0}{V_w} \quad [19]$$

Dabei ist μ_w das (molale) chemische Potential des Wassers im betreffenden System in J/mol, μ_w^0 das ebenfalls molale chemische Potential reinen Wassers unter Standardbedingungen in J/mol, und V_w das partielle Molvolumen des Wassers im System in m³/mol. Das volumetrische Wasserpotential hat die Einheit Pascal welche einen Druck darstellt.

Da sich die absoluten Werte von Wasserpotentialen nicht ermitteln lassen, hat man das Wasserpotential des reinen Wassers unter Standardbedingungen gleich Null gesetzt. In jeder wässrigen Lösung irgendeines Stoffes ist folglich das Wasserpotential, der obigen Gleichung gemäß, kleiner als Null. Das Wasserpotential eines komplexen Systems wie es eine Pflanzenzelle darstellt, wird durch mehrere Komponenten bestimmt.

Das **Matrixpotential** Ψ_t ist das Quellungspotential der Zellwand in Abhängigkeit vom verfügbaren Wasser. Da die quellbaren Bestandteile der Pflanzenzelle praktisch nie den maximalen Quellungsgrad erreichen, ist der Wert des Matrixpotentials der Pflanzenzelle unter natürlichen Bedingungen negativ.

Das **osmotische Potential** Ψ_π : Obwohl die Plasmamembranen nicht für alle Substanzen streng semipermeabel sind, stellt doch die ausgewachsene Pflanzenzelle, zumindest bei Betrachtung kürzerer Zeiträume, ein osmotisches System dar. Das osmotische Potential ist aus dem oben angegebenen Grund stets negativ, im Gegensatz zum potentiellen osmotischen Druck π^* , der zwar numerisch gleich ist, aber kein negatives Vorzeichen hat. Die pflanzlichen Zellwände sind hingegen normalerweise sowohl für Wasser als auch für

die darin gelösten Stoffe durchlässig.

Überträgt man eine entspannte Pflanzenzelle in eine Lösung, so hängt die Frage, ob Wasser in die Vakuole aufgenommen wird oder aus dieser aus tritt, von der Differenz der osmotischen Potentiale des Zellinhalts und der Außenlösung ab.

In einem hypotonischem Medium, dessen Konzentration geringer ist als die des Zellinhalts (weniger negatives osmotisches Potential hat), strömt Wasser in die Vakuole hinein. Hierdurch entsteht ein hydrostatischer Innendruck, der Turgordruck P , auch als Druckpotential bezeichnet, der den Protoplasten gegen die Zellwand drückt. Diese wird so lange elastisch gedehnt, bis der sich entwickelnde Gegendruck, der Wandruck W , zahlenmäßig dem Turgordruck P gleich ist. In diesem Zustand ist das Druckpotential gleich dem Turgordruck und dem Wanddruck. Das Druckpotential ist größer als das des reinen Wassers unter Normalbedingungen (Atmosphärendruck) und erhält deshalb ein positives Vorzeichen. Die osmotische Wasseraufnahme führt zu einer Verdünnung des Zellinhalts und folglich zu einer Verminderung der Negativität des osmotischen Potentials.

Unter Berücksichtigung der vorgenannten Teilpotentiale lässt sich somit das Wasserpotential einer Pflanzenzelle Ψ_Z durch die folgende Wasserpotentialgleichung beschreiben:

$$\Psi_Z = \Psi_{\pi i} + \Psi_{\tau} + \Psi_P \quad [20]$$

in der obigen Gleichung ist,

$\Psi_{\pi i}$ das osmotische Potential des Zellinhalts

Ψ_{τ} das Matrixpotential, und

Ψ_P das Druckpotential (der Turgordruck).

Es werden alle Größen in der Einheit des Druckes (Pascal oder bar) angegeben.

Die an Pflanzenzellen gemessenen osmotischen Potentiale variieren in einem weiten

Bereich. Sie unterscheiden sich jedoch nicht nur von Pflanze zu Pflanze, sondern auch bei den verschiedenen Geweben und Organen einer Pflanze. Aber auch innerhalb von Organen und Geweben können sie von Zelle zu Zelle eine zu- oder abnehmende Tendenz zeigen. Schließlich können sie sich auch in Abhängigkeit von Entwicklungszustand und Jahresgang ändern.

Für Parenchymzellen der Wurzelrinde werden Werte zwischen -1,5 und -2 MPa angegeben. In den Sprossen werden die Werte mit zunehmender Entfernung von der Wurzel negativer, um in den Blättern Größenordnungen zwischen -2 und -4 MPa zu erreichen.

Beim Einbringen einer Zelle in ein Außenmedium bestimmten osmotischen Potentials stellt sich ein Gleichgewicht ein, so dass schließlich $\Psi_Z = \Psi_{\pi a}$ ist. Ist das Außenmedium reines Wasser ($\Psi_{\pi a} = 0$), so wird der Zustand der Wassersättigung (Vollturgescenz) erreicht, und Ψ_P wird numerisch gleich $\Psi_{\pi i}$. Da $\Psi_{\pi i}$ einen negativen Wert hat, ergibt sich als Summe beider Werte Null. In diesem Zustand kann osmotisch kein Wasser mehr aufgenommen werden. Andererseits ist die Zelle vollkommen entspannt, wenn $\Psi_{\pi a} = \Psi_Z = \Psi_{\pi i}$ ist, Zustand der Grenzplasmolyse. In diesem Fall entspricht die Wasserpotentialdifferenz dem vollen osmotischen Potential, wenn das Matrixpotential außer acht gelassen wird.

Im Gewebeverband der Zellen entsteht durch die Druck- und Zugwirkung von benachbarten Zellen die Gewebespannung. In diesem Fall wird der Wanddruck (W) durch einen zusätzlichen Außendruck (A) von benachbarten Zellen im Gewebe vermindert oder verstärkt. Dieser wirkt der Ausdehnung der Zellen entgegen oder unterstützt sie als negative Spannung. In diesem Falle entspricht $\Psi_P = W \pm A$ (NULTSCH 2001).

Wird eine Pflanzenzelle in ein hypertonisches Medium gebracht, so tritt so lange Wasser aus der Vakuole bis die Konzentrationen ausgeglichen sind. Die mit dem Wasseraustritt verbundene Volumenabnahme führt zunächst zu einer Entspannung der gedehnten

Zellwand. Ist diese entspannt, so löst sich der an der Vakuole anhaftende Plasmaschlauch bei deren weiteren Verkleinerung von der Zellwand ab. Dieser Vorgang wird als Plasmolyse bezeichnet.

Je nach Wandhaftung und Konsistenz des Plasmas erfolgt die Ablösung entweder glatt oder in unterschiedlichen Formen. Den Zustand in dem der Protoplast sich gerade von der Zellwand abzuheben beginnt bezeichnet man als Grenzplasmolyse. Die Zelle ist dabei auch im plasmolytischen Zustand lebensfähig. Wird sie in Wasser überführt so strömt dieses in die Zelle hinein bis der Zustand der Vollturgescenz erreicht ist und sich der Plasmaschlauch wieder an die Zellwand angelegt hat. Dieser Vorgang wird als Deplasmolyse bezeichnet (NULTSCH 2001).

3.2 Bodenwasser

Im Boden liegt das Wasser in verschiedener Bindung vor. Das Grundwasser ist für viele Pflanzen nicht erreichbar, da ihr Wurzelsystem nur die oberen Bodenschichten durchzieht. Das in diesen zurückgehaltene Haftwasser liegt teils in den Hydrathüllen der Bodenkolloide (Quellungswasser) gebunden vor, teils wird es als Kapillarwasser im Boden festgehalten. Da das Quellungswasser wegen der starken Bindung praktisch nicht verfügbar ist, stellt das Kapillarwasser die eigentliche Wasserquelle der Pflanzen dar (NULTSCH 2001).

Die Gesamtwassermenge im Boden ist meistens erheblich größer als die den Pflanzen tatsächlich zur Verfügung stehende Menge an Wasser. Das Bodenwasser allgemein kann in zwei Arten unterteilt werden, dem „Haftwasser“ welches in der oberen Bodenschicht gegen die Schwerkraft festgehalten wird und dem „Senkwasser“ das nach Niederschlägen oder bei Zuflüssen in die tieferen Bodenschichten sickert.

Die eigentliche Verfügbarkeit des Wassers hängt wiederum von der Stärke der Adhäsivkräfte und der Oberflächenstruktur der Bodenteilchen sowie der Porenwände ab.

Ist der relative Tonanteil der Bodenmatrix groß, liegt ein hohes Quellungsbeziehungswise Wasserfesthaltevermögen vor. Umgekehrt wird ein Sandboden, dessen Partikel viel weniger quellfähig sind weniger Wasser festhalten können aber dieses auch wieder leichter abgeben. Das Bodenwasser ist also, wie das Wasser in den pflanzlichen Zellen und Geweben, nicht völlig frei beweglich, und seine Verfügbarkeit für die Pflanzen hängt weniger von absoluten Wassermenge im Boden ab, als von dem energetischen Aufwand der nötig ist um das Wasser nutzen zu können (LÖSCH 2001).

Ein „Maß“ für diesen energetischen Aufwand ist das Bodenwasserpotential (Ψ_B) welches sich aus verschiedenen Komponenten zusammensetzt und je nach Bodenart

unterschiedlich groß sein kann.

$$(-)\Psi_B = (-)\Psi_t + (-)\Psi_\pi + (-)\Psi_g + (\pm)\Psi_p \text{ [21]}$$

$(-)\Psi_B$ = Bodenwasserpotential [MPa oder bar]

$(\pm)\Psi_p$ = hydrostatischer Druck auf das Porenwasser, meist vernachlässigbar gering [MPa oder bar].

$(-)\Psi_g$ = Schwerkraftkomponente des Wasserpotentials [MPa oder bar]

$(-)\Psi_\pi$ = Osmotische Komponente (Festlegung des Bodenwassers durch Ionen) [MPa oder bar]

$(-)\Psi_t$ = matrikales Potential, muss beim Wasserentzug aus den Bodenkolloiden überwunden werden. Kann in eine Quellungs- und eine kapillare Komponente unterschieden werden [MPa oder bar].

Gemäß Übereinkunft ist das chemische Potential von reinem Wasser gleich Null ist.

Unter diesen Komponenten ist Ψ_p , der hydrostatische Druck auf das Porenwasser meist vernachlässigbar gering, ebenso Ψ_g , die Schwerkraftkomponente des Wasserpotentials. Die osmotische Festlegung durch Ionen, welche Ψ_π prägt, kann zum Beispiel in Salzböden einen bedeutsamen Anteil am Gesamtwasserpotential annehmen. In „normalen“ Böden wie zum Beispiel einem Acker ist eher das Matrixpotential Ψ_t entscheidend. Diese muss bei Wasserentzug aus dem Bereich der Bodenkolloide überwunden werden. Im Prinzip kann das Matrixpotential in eine Quellungs- und eine Kapillarkomponente unterschieden

werden. Die Kapillarkomponente ist letztlich von der Oberflächenspannung des Wassers und dem Porendurchmesser abhängig (LÖSCH 2001).

Das von den Niederschlägen oder durch Bewässerung der Bodenoberfläche zugeführte Wasser wird, wie schon erwähnt teils als „Haftwasser“ gebunden, teils sickert es als „Senkwasser“ zum Grundwasser in die Tiefe.

Wenn maximale Quellung der Bodenkolloide erreicht ist, die kapillaren Bindungskapazitäten erschöpft sind und auch auf osmotischem Wege keine weitere Festlegung von Wasser gegen die Schwerkraft (Ψ_g) mehr möglich ist, wird der maximal mögliche Wassergehalt des Bodens erreicht sein. Diese Wassermenge, ausgedrückt in g Wasser pro 100 ml Bodenvolumen wird als „Feldkapazität“ des Bodens bezeichnet.

Die „Feldkapazität“ ist abhängig von den Bodeneigenschaften, aber auch von der herrschenden Temperatur: warme Böden enthalten geringere Wassermengen als kalte Böden gleicher Struktur.

Voraussetzung für einen Wasserübergang vom Boden zur Wurzel ist ein dahin gerichteter Wasserpotentialgradient. Hierbei ist das Wasserpotential der Pflanze von ihren osmotischen Verhältnissen und dem Ausmaß der Wasserabgabe an die Atmosphäre abhängig. Das Wasserpotential des Bodens kann in unterschiedlichen Wurzelhorizonten unterschiedlich sein, je nach vorliegenden Bodenbeschaffenheiten. Des weiteren sinkt die Bodenwasser-Verfügbarkeit überproportional mit abnehmendem Wassergehalt, das heißt mit abnehmendem Wasserpotential des Bodens. In vielen Böden ist Wasser somit einer der limitierenden Faktoren für intensives Pflanzenwachstum (LÖSCH 2001).

4. Transpiration und Evaporation

Wasser verlässt die Pflanze im Gradienten zwischen Boden und Atmosphäre als Wasserdampf, das heißt im gasförmigen Zustand. Der Phasenübergang erfolgt zum größten Teil an den Wänden der Interzellularen im Blattinneren, nur zu einem geringen Teil

an den Außenflächen des Sprosses und seiner Anhangsorgane.

Der Phasenübergang vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand ist ein energieverbrauchender Prozess, der einen entscheidenden Anteil am Ausgleich der pflanzlichen Energiebilanz hat (siehe Kapitel 2.2).

Das unter Energieaufwand vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand überführte Wasser ist als Wasserdampf Teil des Gasgemisches der Atmosphäre. Als solche trägt auch diese Gaskomponente mit ihrem Partialdruck p_i zum atmosphärischen Luftdruck bei und mit ihrer Konzentration c_i zur Dichte des gesamten Gasgemisches. Dalton's Gesetz der Partialdrücke besagt, dass in einer Gasmischung aus verschiedenen Komponenten der Gesamtdruck gleich der Summe der Partialdrücke ist: $P = \sum p_i$. Der Anteil des einzelnen Partialdampfdruckes am Gesamtdruck ist dann

$$x_i = \frac{p_i}{P} \quad [22]$$

p_i = Partialdruck eines Gases im Gasgemisch [MPa oder bar]

P = Gesamtdruck des Gasgemisches [MPa oder bar]

Mit Hilfe der allgemeinen Gasgleichung

$$PV = nRT \quad [23]$$

P = Gesamtdruck des Gasgemisches [MPa oder bar]

V = Volumen [m^3]

n = Teilchenmenge/Stoffmenge [mol]

R = universelle Gaskonstante = 8,3144 J/(mol·K)

T = Temperatur in Kelvin

Wasser in der Pflanze

lässt sich entsprechend eine Beziehung zwischen Konzentration und dem Partialdampfdruck des Gases aufstellen:

$$c_i = \frac{\text{Masse}_i}{V} = \frac{n_i \cdot M_i}{V} = \frac{p_i \cdot M_i}{RT} \quad [24]$$

c_i = Konzentration des Stoffes i, [g/m³]

V = Volumen [m³]

n_i = Teilchenmenge/Stoffmenge der Teilchen i, Molfraktion

R = universelle Gaskonstante 8,3144 J/(mol·K)

T = Temperatur in Kelvin

M_i = Molmasse des Stoffes

Diese für jede Komponente i eines Gasgemisches geltenden Beziehungen können für den Fall des Wasserdampfes wie folgt formuliert werden:

$$c_w = \frac{e \cdot M_w}{RT} = \frac{2,17}{T} \cdot e \quad [25]$$

c_w = die Massenkonzentration des Wasserdampfes in der Atmosphäre, wird als „absolute Feuchte“ bezeichnet [g/m³].

e = aktueller Dampfdruck [Pa]

M_w = Molmasse des Wassers [g/mol]

R = universelle Gaskonstante = 8,3144 J/(mol·K)

T = Temperatur in Kelvin

Der Wasserzustand der Luft kann auch als deren Wasserpotential quantifiziert werden. Für Luft deren Wasserdampfgehalt im Gleichgewicht mit reinem, flüssigem Wasser der gleichen Temperatur steht ist $\Psi_{\text{flüssig}} = \Psi_{\text{Wasserdampf}} = 0$ MPa. In diesem Fall ist die Luft wasserdampfgesättigt. Es herrscht dann der „Sättigungsdampfdruck“ e^* vor, wobei e^* in stark nicht-linearer Weise von der Temperatur abhängig ist.

Wasser in der Pflanze

Ist ein Luftraum nicht wasserdampfgesättigt, hat er ein negatives Wasserpotential, gemäß der Wasserpotentialgleichung ($\Psi_w = (\mu_w - \mu_w^\circ)/V_w$), (siehe auch Gleichungen [19] und [20]) ergibt sich:

$$\Psi_L = \frac{RT}{V} \ln e/e^* \quad [26]$$

Ψ_L = Wasserpotential des Luftraumes

R = universelle Gaskonstante = 8,3144 J/(mol·K)

T = Temperatur in Kelvin

V = Volumen [m³]

e = aktueller Dampfdruck [Pa]

e* = Sättigungsdampfdruck [Pa]

Wird der Quotient e/e* auf e* = 100% bezogen, wird er als „relative Feuchte“ bezeichnet.

Eine weitere Größe, die das Ausmaß der Differenz zwischen tatsächlich vorhandenem Wasserdampf und dem Sättigungswert quantifiziert, ist das „Dampfdruckdefizit“ δ_e .

$$\delta_e = e^* - e \quad [27]$$

e = aktueller Dampfdruck [Pa]

e* = Sättigungsdampfdruck [Pa]

Wesentliche Grundlage für die beiden letztgenannten Größen zur Beschreibung des Wasserdampfgehaltes unterschiedlicher Kompartimente relativ zum gegebenen Sättigungswassergehalt ist das Vorliegen von isothermen Bedingungen (LÖSCH 2001).

Da zwischen der Temperatur des Luftraumes und der zur Wasserdampfsättigung nötigen Menge an Wassermolekülen eine eindeutige Beziehung vorliegt, kann zur Charakterisierung der Luftfeuchteverhältnisse auch die „Taupunkttemperatur“ herangezogen werden. Dies ist diejenige Temperatur, bei der die gegebene

Wasserdampfmenge gerade zur Sättigung führt. Ihre weitere Erhöhung bei gleich bleibender Temperatur würde zum Kondensieren von flüssigem Wasser führen (LÖSCH 2001).

Aus dem in der Regel wasserdampfgesättigten Interzellularraum eines Blattes diffundiert Wasserdampf in großen Mengen in die die Pflanze umgebende, meist nicht wasserdampfgesättigte Luft. Außerhalb des Blattes prägen die atmosphärischen Faktoren wie Wind, Übergangwiderstände, Temperatur und andere in beträchtlichen Ausmaß die Menge und die Transportweise der die Pflanze verlassenden Wasserdampfmoleküle.

Ein bestimmender Faktor sind beim Übertritt in die Atmosphäre die Leitfähigkeit und der Widerstand den die Grenzschichten dem Teilchentransport (Wasserdampfmoleküle) entgegensetzen.

Die Treibende Kraft des Teilchenstromes ist der Konzentrationsgradient (dc_i/dx) zwischen den beiden Kompartimenten zwischen denen der Fluss stattfindet. Dieser Konzentrationsgradient trennt die Teilchen über eine Distanz l voneinander die sie überwinden müssen um einen Konzentrationsausgleich zu erreichen.

Daraus ergibt sich die allgemeinen Transportgleichung, die für die Praxis mit Konzentrationsangaben wie folgt verwendet wird:

$$J_i = D_i \cdot \frac{c_{i1} - c_{i2}}{l} \quad [28]$$

J_i = Massenflussdichte der Teilchen [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]

D_i = Diffusionskoeffizient

c_{i1} und c_{i2} = Teilchenkonzentration in den getrennten Kompartimenten [kg/m^3]

l = Distanz zwischen den Kompartimenten [m]

dabei sind c_{i1} und c_{i2} die Teilchenkonzentrationen in den beiden Kompartimenten die über die Distanz l voneinander getrennt sind. D_i ist der Diffusionskoeffizient und J_i die sich ergebende Massenflussdichte.

Der Teilchenfluss ist direkt proportional der Leitfähigkeit (g), [diese ergibt sich aus D_i/l] des Transportweges und invers zum Widerstand (r).

Wird der Teilchenfluss als Massenflussdichte, zum Beispiel in $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ und die den Transport treibende Kraft als Konzentrationsdifferenz, $\text{kg} \cdot \text{m}^3$, ausgedrückt ergibt sich die Dimension m/s für die Leitfähigkeit [$g = J/c = (\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})) / (\text{kg}/\text{m}^3) = \text{m/s}$] (LÖSCH 2001).

In der Nähe einer Oberfläche wird die strömende Luft durch die Rauigkeit dieser gebremst und in ihrem Strömungsverlauf beeinflusst. Dabei kommt es zu einem je nach Luftbewegung beziehungsweise Windgeschwindigkeit konvektivem oder turbulentem Wasserdampftransport. Im Falle des konvektiven Wasserdampftransportes führen lokale Temperaturunterschiede mit der Folge unterschiedlich dichter Luftmassen zu ausgleichenden Luftströmungen. Durch diese kommt es zum Ersatz feuchterer Luftmassen durch trockene Luftmassen beziehungsweise zum Ausgleich von Dampfdruckgefällen (LÖSCH 2001).

Beim turbulenten Wasserdampftransport kommt es zu einer Verwirbelung von Luftpaketen und somit zu einer erheblichen Verstärkung und Beschleunigung des Teilchentransports. Die Größenordnungen der turbulenten Diffusionsraten liegen in etwa eine Zehnerpotenz höher als die Diffusionsraten der reinen durch die Molekularbewegung bedingten konvektiven Diffusion (LÖSCH 2001).

Der an eine Oberfläche angrenzende Bereich in welchem die durchschnittliche Luftbewegungsgeschwindigkeit deutlich reduziert ist wird als „laminare Grenzschicht“ bezeichnet. Die Dicke der laminaren Grenzschicht (boundary layer) eines Blattes hängt vom jeweiligen Abstand zur Anblaskante der Luftströmung, der Windgeschwindigkeit und der Strömungsviskosität der Luft ab. Der Übergang von laminarer in turbulente Strömungs-

verhältnisse ist graduell und von der Größe des Blattes genauso abhängig wie von seiner Oberflächenstruktur. Auch wird die Dicke der laminaren Grenzschicht selber von Faktoren wie Blattgröße, Blattform und Blattaufteilung (Fiederblätter) bestimmt (LÖSCH 2001).

Der Wasserdampfübergang von den Evaporationsflächen an den Zellwänden in den Interzellularen ebenso wie von den Verdunstungsflächen an der Blattoberfläche in die laminare Grenzschicht hinein folgt ausschließlich den Prinzipien der molekularen Diffusion. Auch die Bewegung der Wasserdampfmoleküle durch die laminare Grenzschicht hindurch erfolgt noch weitgehend auf diffusivem Wege. Erst an ihrer Peripherie überwiegt zunehmend der turbulente Transport, und die Abfuhr von Luftpaketen prägt die Wasserdampfabgabe vom Blatt in den freien Luftraum (LÖSCH 2001).

Im Gegensatz zur Blattunterseite hypostomatischer Blätter, wo die Stomata die Wasserabgabe regeln, ist die, mit einer Cuticula geschützte Blattoberseite weitgehend undurchlässig für Wasserdampf. Jedoch ist die lipophile und damit wasserabweisende Schicht der Cuticula keine völlig impermeable Barriere zwischen der Pflanze und der Umgebung. Es erfolgt vielmehr ein geringer cuticulärer Wasserverlust an die Atmosphäre, die Cuticula wird von gelösten Stoffen passiert und auch die Stoffaufnahme in die Blätter auf dem Weg durch die Cuticula kann von Bedeutung sein.

Die Diffusivität der Cuticula für Wasser ist jedoch um ein Vielfaches geringer als die von Luft. Bei völlig geschlossenen Stomata, wenn nur eine cuticuläre Wasserabgabe an die umgebende Luft möglich ist, kommt die cuticuläre Transpiration auf Raten von 0,3% bei Sukkulente bis etwa 6% bei Kräutern, der Umsatzmengen, die bei maximaler Transpiration gemessen werden können.

Durch die Verdunstungsbarriere der Cuticula wird der Wasserdampfaustausch zwischen der Pflanze und ihrer atmosphärischen Umwelt zum größten Teil auf die Stomata kanalisiert, wo auf physiologischem Wege eine Dosierung der Wasserabgabe möglich ist

(LÖSCH 2001).

Die Regelung der Spaltöffnungen ist eine Folge der Änderungen des Schließzellenturgors. Diese wird durch die Verlagerung, Anreicherung und Verschiebung von Osmotika, die aus metabolischen Umsätzen resultieren, bewirkt. Eines dieser wichtigen und hoch mobilen Osmotika ist das Kaliumion. Die Notwendigkeit der Ladungsneutralisierung zieht bei Veränderungen der Kaliummenge in den Schließzellen meist begleitende Protonen- oder Anionenverschiebungen nach sich (LÖSCH 2001).

Als anionische Osmotika im Schließzellenstoffwechsel fungieren Malat und Chlorid. Die Anreicherung oder Abreicherung dieser anorganischen Osmotika geschieht in den Schließzellenvakuolen. Die osmotische Balance zwischen dem Vakuolenkompartiment und dem Cytoplasmakompartiment der Schließzellen wird teilweise durch Zuckerumsätze in letzterem garantiert. Auch Malat kann in mäßigem Umfang für diesen Zweck verfügbar werden; osmotisch inerte Speichersubstanz für diese organischen Osmotika ist Stärke, die in den Schließzellenchloroplasten an- und abgereichert werden kann (siehe Kapitel 1.2).

Im Gegensatz zu der oben beschriebenen „aktiven“ Stomatabewegungen, das sind Bewegungen denen ein metabolischer Prozess, wie die aktive Verschiebung von Ionen und anderen Osmotika zugrunde liegt, kommt es auch zu sogenannten „passiven“ Stomatabewegungen, diese kommen durch Veränderungen der Druckverhältnisse im Epidermisverband zustande (LÖSCH 2001).

Als Beispiel soll hier der IWANOFF-Effekt dienen. Durch unterschiedliche Zellvolumina der Epidermiszellen und der Schließzellen kann es im Falle einer Turgorreduzierung im gesamten Blatt beziehungsweise im Epidermisverband dazu kommen, dass die sich im Volumen verkleinernden Epidermis- und Nebenzellen die Schließzellen passiv auseinander ziehen. Trotz der Turgorabnahme auch im Stomataapparat kommt es so zu einer Poruserweiterung, die meist jedoch nur vorübergehend ist. Vielfach tritt diese

Phänomen beim Abschneiden von Blättern auf und zieht somit eine kurzzeitige Erhöhung der Transpiration nach sich (LÖSCH 2001).

Der Wassertransport durch die Spaltöffnung kann als Stofftransport durch einen Porus beschrieben werden. Dabei erfolgt die Diffusion zunächst durch substomatäre Höhlungen („Hinterhöfe“), durch stomatäre Poren und schließlich durch die Blattgrenzfläche in die freie Atmosphäre (LÖSCH 2001).

Dabei ist die Form, Anordnung und Anzahl der Spaltöffnungen entscheidend für die transportierte Wassermenge.

Bei Porusweiten von etwa 0,05 bis 0,1 μm wird die Diffusion zum Beispiel dadurch vermindert, dass die aus dem Blatt heraus diffundierenden Wassermoleküle mit der Poruswandung häufiger als mit anderen Gasmolekülen kollidieren und so an kinetischer Energie beim Übertritt vom Kompartiment höherer Konzentration in dasjenige mit geringerer Konzentration verlieren. Bei Spaltweiten größer als 0,1 μm herrscht ungehinderte Diffusion. Förderlich wirkt sich für den Dampfaustritt aus dem Porus in die das Blatt umgebende laminare Grenzschicht der „Randeffekt“ aus (siehe Abb. 8 und 9).

Nach der Passage des Spaltes verläuft die Diffusion der Teilchen nicht nur senkrecht von der Blattoberfläche weg, sondern auch schräg in den Raum über die von der Cuticula überzogenen Schließ- und Epidermiszellen. Es verringert sich so die Kollisionswahrscheinlichkeit der Moleküle, ihre individuelle Bewegungsenergie bleibt erhalten. Auf die Gesamtheit der Teilchen wirkt weiterhin voll die durch solche Kollisions-Energieverluste reduzierte Druckdifferenz zwischen dem Innen- und Außenraum des Blattes.

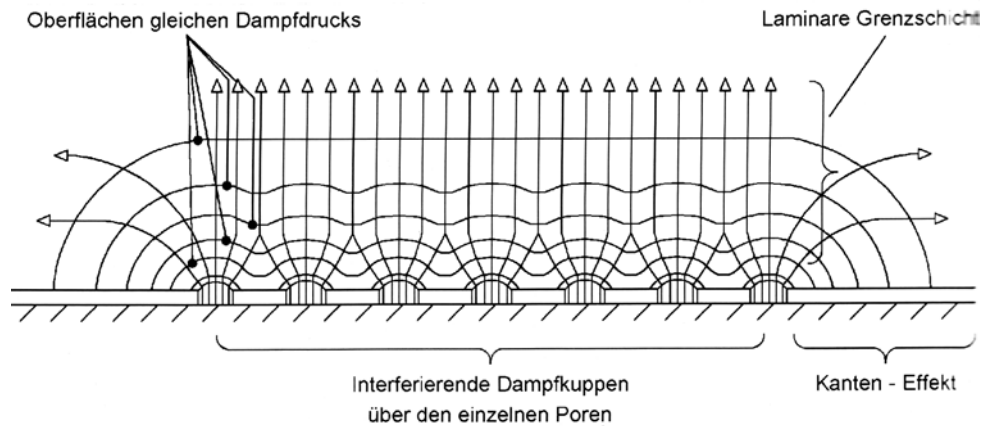


Abb. 8: Ausbildung der Grenzschicht über eine transpirierende Blattfläche (LÖSCH 2001)

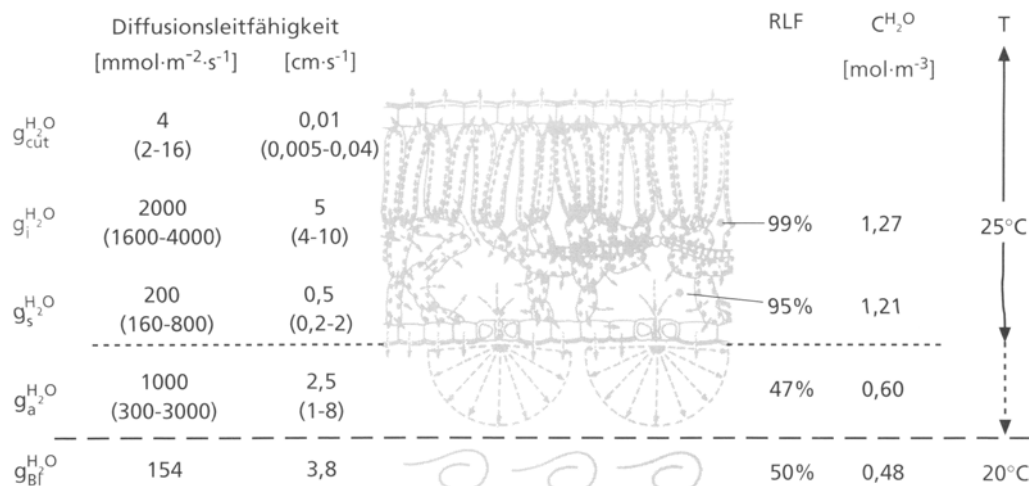


Abb. 9: Widerstände und Leitfähigkeiten innerhalb der Grenzschicht über eine transpirierende Blattfläche (LARCHER 2001)

Aus dieser Dampfdruck- beziehungsweise der Wasserdampfkonzentrationsdifferenz und dem Wassermolekülfluss lässt sich für die einzelne Spaltöffnung ein Widerstands- oder Leitfähigkeitswert berechnen. Dieser wird bestimmt durch die Porusdimension beziehungsweise durch den Öffnungszustand des Porus sowie die Tiefe des Passageweges der substomatären Höhlung und die herrschenden Luftbedingungen. Für die Gesamtheit der Stomata einer Einheitsblattfläche kann unter Berücksichtigung der Flächendichte der Stomata ein Leitwiderstand errechnet werden, welcher transpirationsprägend ist. Der Blattwiderstand errechnet sich somit zu

$$r = \frac{\frac{d}{\pi ab} + \frac{\ln(4a/b)}{\pi a}}{D \cdot n} \quad [29]$$

a = halbe Poruslänge

b = halbe Porusbreite

d = Tiefe des Porus

n = Flächendichte der Stomata

D = Diffusionskoeffizient von Wasser bei entsprechender Temperatur

Zwischen der Öffnungsweite der Stomata und der Blattleitfähigkeit besteht eine Proportionalität, der Blattwiderstand steht zur Spaltenweite in reziproker Beziehung. Bei Hochrechnungen vom Einzelblatt auf den Wasserdampfaustausch von Beständen kann unter angemessener Berücksichtigung der mikrometeorologischen und bestandesstrukturellen Gegebenheiten eine Bestandesleitfähigkeit berechnet werden (LÖSCH 2001).

4.1 Umweltfaktoren und ihr Einfluss auf die Transpiration

Die aktuellen Öffnungszustände der Stomata ergeben sich als Resultat aus dem Zusammenspiel der verschiedenen Einwirkfaktoren, welche synergetisch oder antagonistische Wirkungen haben können. Beispiele dieser Faktoren sind Licht, Wasserpotential, Dampfdruckverhältnisse, Luftfeuchte Temperatur oder CO₂-Gehalt. Jede dieser Faktoren bewirkt im Einzelnen eine Änderung der Stomatazustände, im Zusammenwirken können die Reaktionsintensitäten abgeändert sein (LÖSCH 2001).

Strahlung im PAR-Bereich ist in der Regel förderlich für das Öffnen der Stomata. Dabei genügen, vorausgesetzt alle anderen Faktoren liegen innerhalb günstiger Bereiche, Lichtintensitäten unter 150 µmol Photonen pro m² und Sekunde um ein maximales Öffnen der Spalten hervorzurufen. Bei amphistomatischen Blättern reagieren die Stomata auf der Blattunterseite im allgemeinen empfindlicher auf eine Veränderung des Lichtangebotes als

die auf der Oberseite. Lichtabhängige Spaltenbewegungen erfolgen in der Regel bei Blättern krautiger Pflanzen schneller als bei Holzgewächsen. Das Lichtangebot ist einer der wesentlichen steuernden Faktoren, wodurch es bei Tagesanbruch zur Öffnung der Stomata kommt, während der Nacht aber die Spalten stark verengt werden oder ganz schließen.

Am Standort der Pflanzen wird selbst im Unterwuchs stets Licht im gesamten Spektralbereich der PAR einwirken, wobei es morgens zu einem eher größeren Blaulichtanteil kommt der sich im Laufe des Tages eher zu dem Rotlichtanteil verschiebt, weshalb Spaltöffnungen sehr sensitiv auf Blaulicht reagieren und eher träger auf Rotlichtanteile (LÖSCH 2001).

Erhöhte CO_2 -Konzentrationen im Blattinneren führen zum Spaltenschluss; der Abbau eines erhöhten CO_2 -Pegels durch die Photosynthese ermöglicht die Öffnung der Spalten. Die Blatt externe CO_2 -Konzentration wirkt sich auf den Öffnungszustand der Stomata weniger deutlich aus (LÖSCH 2001).

Turgorverlust der Schließzellen führt zur Stomataverengung. Turgorverlust des gesamten Blattes könnte über einen abgesenkten Schließzellenturgor in entsprechender Weise Spaltenschluss hervorrufen.

Es ist zwischen kurzfristigen und langfristigen Absenkungen des Wasserpotentials zu unterscheiden, denn nicht jede Absenkung des Wasserpotentials ist mit einer Veränderung der Blattleitfähigkeit verbunden. Die starken Absenkungen der Blattwasserpotentiale im Tagesgang auch bei gut Wasser versorgten Pflanzen führen nicht unbedingt zu einem Schließen der Stomata, vorausgesetzt alle anderen Faktoren stehen günstig. Nur langfristig abgesenkte Blattwasserpotentiale führen zu erhöhten Blattwiderständen. Unter Wassermangel wird ABA in den Blättern und Wurzeln freigesetzt und verstärkt neu synthetisiert. Dieses Phytohormon bewirkt Änderungen im Osmotikahaushalt und damit

Änderungen in den Turgorverhältnissen der Zellen (LÖSCH 2001).

Ein hohes Dampfdruckdefizit zwischen Blatt und Luft kann die Transpiration beträchtlich erhöhen. Spaltenverengung und damit Erhöhung des Diffusionswiderstandes der Blätter wirkt dem entgegen und hält die Mesophyll-Wasserverluste in erträglichen Grenzen.

Die Spaltweitenverengung unter dem Einfluss erhöhter Dampfdruckgradienten zwischen Blatt und Luft hat zur Folge, dass die diesem Gradienten eigentlich proportionale Transpirationsrate nicht in gleicher Intensität ansteigt. Bei Taxa mit empfindlicher Luftfeuchtereaktion der Stomata flacht dieser Anstieg vielmehr mit zunehmender Lufttrockenheit ab und geht in einen Sättigungsverlauf über (LÖSCH 2001).

Wie bei jedem physiologischem Prozess zeigt sich auch bei der Stomatabewegung eine Abhängigkeit von der jeweils herrschenden Temperatur. Typischerweise bewirkt eine Temperatursteigerung bei sonst unveränderten Randbedingungen eine Spaltenerweiterung, allerdings nur bis zu einem artspezifisch unterschiedlich hoch liegenden Optimum (LÖSCH 2001).

Im Gegensatz zu dem bisher beschriebenen Prozess der Transpiration welcher als eine Lebensfunktion der Pflanze betrachtet werden kann, ist die Evaporation nicht an die Lebensfähigkeit gebunden. Sie stellt den rein physikalischen Vorgang der Verdunstung von feuchten Oberflächen dar.

Eine freie Wasserfläche gibt in der Zeiteinheit pro Flächeneinheit um so mehr Wasserdampf ab, je steiler das Dampfdruckgefälle zur Luft in einiger Entfernung von dieser Fläche ist. Ein Dampfdruckgefälle entsteht, wenn an der Verdunstungsfläche der Wasserdampfgehalt der Luft höher ist als in einiger Entfernung von dieser Fläche.

Eine Verdunstung bei unbegrenzter Wassernachführung und unbehinderter Abdiffusion des Wasserdampfes nennt man potentielle Verdunstung oder Evaporationsvermögen.

Die tatsächliche, aktuelle Verdunstung von feuchten Oberflächen, zum Beispiel Böden, ist meist geringer als die potentielle Verdunstung, weil Wasser kaum jemals völlig ungehindert nachströmt (LARCHER 2001).

Die Evaporation wird im einzelnen bestimmt durch die meteorologischen Parameter wie Globalstrahlung, Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Wind sowie durch die Topographie, den Vegetationsbesatz, dem Chemismus des Wassers und vielen anderen Parametern (LÖSCH 2001).

Aus den Prozessen der Transpiration, der geregelten Wasserabgabe und der Evaporation, der Verdunstung, ergibt sich die Gesamtheit der Wasserabgabe von pflanzlichen Oberflächen, offenen Wasserflächen und feuchtigkeitshältigen Böden in einem Landschaftsraum, die Evapotranspiration. Sie kann von mehreren km^2 bis zu einigen dm^2 großen Flächen variieren und wird von der insgesamt verfügbaren Wassermenge, dem Wassersättigungsdefizit der Atmosphäre, der zur Verdunstung verfügbaren Energie, sowie von der Höhe der Transportwiderstände zwischen Boden, Wasser und Atmosphäre geprägt (LÖSCH 2001).

4.2 Wasserbilanz der Pflanze

Wasseraufnahme, Wasserleitung und Wasserabgabe sind die Grundvorgänge des Wasserhaushalts, die wenigstens langfristig aufeinander abgestimmt sein müssen. Wie sehr Einnahmen und Ausgaben zu einem gegebenen Zeitpunkt ausgeglichen sind, erkennt man aus dem Vergleich zwischen den in einem bestimmten Zeitintervall aufgenommenen und verdunsteten Wassermengen. Die Differenz zwischen Absorption minus Transpiration zeigt als Wasserbilanz die Richtung und das Ausmaß einer Ablenkung von Gleichgewicht an.

Die Wasserbilanz wird negativ, sobald der Wassernachschub den Wasserbedarf der

Transpiration nicht mehr deckt. Verengen sich infolge der Unterbilanz die Spaltöffnungen und nimmt die Transpiration bei gleichmäßig weiterbestehender Wasseraufnahme ab, so wird die Wasserbilanz ausgeglichen, nachdem sie vorübergehend in positive Werte ausgeschwungen ist (LARCHER 2001).

Die Wasserbilanz einer Pflanze pendelt also ständig zwischen einer positiven und einer negativen Abweichung hin und her, wobei zwischen kurzzeitigen Oszillationen und langfristigen Bilanzstörungen zu unterscheiden ist. Durch kurzfristige Schwankungen drückt sich das Einschwingen der verschiedenen Regelmechanismen des Wasserhaushalts, vor allem das Spiel der Spalten, aus. Stärkere Abweichungen erfährt die Wasserbilanz im Tagesablauf, vor allem aber im Wechsel von Tag und Nacht (LARCHER 2001).

Während des Tages kommt es fast immer zu einer Verschlechterung der Wasserbilanz, die erst abends oder im Laufe der Nacht wieder ausgeglichen wird. Bei beginnender Unterbilanz in den Blättern wird vorübergehend durch Wasserverschiebung aus wasserreichen Geweben in anderen Pflanzenteilen (zum Beispiel das Rindenparenchym) eine erste Abhilfe geboten. An Baumstämmen lassen sich dann tageszeitliche Dicken-schwankungen messen. Auch saftreiche Früchte dienen der Pflanze als Wasserspeicher und schrumpfen und schwellen synchron zum Verlauf der Wasserbilanz. In Trockenzeiten erholt sich der Wasserhaushalt über Nacht nicht mehr vollständig, die Unterbilanz wächst von Tag zu Tag bis der nächste Regen fällt (jahreszeitliche Wasserbilanzschwankungen) (LARCHER 2001).

Die Wasserbilanz lässt sich berechnen, wenn die durch die Pflanze aufgenommene und transpierte Wassermenge zahlenmäßig bekannt ist. Unter Freilandbedingungen sind derartige Messungen, insbesondere die genaue Erfassung der Wasseraufnahme durch die Wurzeln, schwierig und aufwendig. Einfacher wird eine negative Wasserbilanz als Abnahme des Wassergehaltes und des Wasserpotentials erkannt und so die Bilanzlage

der Pflanze am Standort indirekt ermittelt.

Eine Verschlechterung der Wasserbilanz ist durch fortlaufende Wassergehaltsbestimmung messbar. Der jeweils aktuelle Wassergehalt (W_{akt}) muss auf eine Standardgröße bezogen werden, die einen definierten Wasserzustand kennzeichnet. Eine solche Größe ist zum Beispiel der Wassergehalt der Blätter im Zustand der Sättigung (W_{sat}). Der Wassergehalt zu einem bestimmten Beobachtungszeitpunkt kann als Wassersättigungsgrad (RWC) in Prozent des Sättigungswassergehaltes angegeben werden:

$$\text{RWC} = \frac{W_{\text{akt}}}{W_{\text{sat}}} = 100 [\text{Prozent}] \quad [30]$$

Ein Maß für Wassermangel ist das Wassersättigungsdefizit (WSD), welches sagt wie viel Wasser einem Gewebe auf volle Sättigung fehlt:

$$\text{WSD} = \frac{W_{\text{sat}} - W_{\text{akt}}}{W_{\text{sat}}} \cdot 100 [\text{Prozent}] \quad [31]$$

Wassergehaltsschwankungen wirken sich auch auf die Zellsaftkonzentration und den Turgor der Zellen aus. Auch diese Faktoren können zur Untersuchung des Wasserzustandes herangezogen werden (LARCHER 2001).

Gemäß ihrer Fähigkeit, kurzfristige Schwankungen in der Wasserversorgung ab zu puffern, werden (nach WALTER 1931) wechselfeuchte (poikilohydre) und eigenfeuchte (homoiohydre) Pflanzen unterschieden.

Poikilohydre Pflanzen gleichen ihren Wasserhaushalt weitgehend dem Feuchtigkeitszustand ihrer Umgebung an. So besitzen manche Algen und Flechten kleine Zellen ohne Zentralvakuole, die beim Austrocknen sehr gleichmäßig und ohne nachhaltige

Störung der Feinstruktur des Protoplasmas, also ohne Verlust der Lebensfähigkeit schrumpfen. Mit Abnahme des Wassergehaltes erlahmen die verschiedenen Lebensfunktionen. Nach dem Wiederaufquellen nehmen diese Pflanzen ihre Stoffwechseltätigkeit wieder auf.

Homoiohydre Pflanzen leiten sich von den Grünalgen mit vakuolisierten Zellen ab. Eine große Zentralvakuole ist das gemeinsame Merkmal aller homoiohydren Pflanzen. Durch das innere wässrige Milieu wird das Protoplasma von den wechselhaften Außenbedingungen weniger abhängig, sein Wasserzustand ist durch den Wasservorrat in der Vakuole stabilisiert. Die große Vakuole hat aber den Verlust der Austrocknungsfähigkeit zur Folge. Durch die Abdichtung der Sproßoberfläche mit der Cuticula und durch die Regulierbarkeit der Transpiration wird der Wasserhaushalt so unter Kontrolle gehalten, dass, das Protoplasma ungestört durch plötzliche Feuchtigkeitsänderungen anhaltend aktiv bleiben kann (LARCHER 2001).

Abgesehen von den oben erwähnten Grundtypen kommen noch nach dem funktionellen Verhalten am Standort variierende Typen des Wasserhaushaltes beziehungsweise der Wasserbilanz vor.

Hydrostabile Pflanzen halten ihre Bilanz weitgehend unter Kontrolle, weil ihre Spalten sehr empfindlich auf Wassermangel reagieren und weil sie in der Regel ein weit ausgreifendes und leistungsfähiges Wurzelwerk haben. Bilanzstabilisieren wirken auch Wasserspeicher in Wurzeln oder Speicherorganen. Beispiele sind Wasserpflanzen, Sukkulente und Schattenkräuter.

Hydrolabile Pflanzen riskieren größere Wasserverluste und eine stärkere Zunahme der Zellsaftkonzentration. Solche Pflanzen sind tolerant gegen starke Schwankungen des Wasserpotentials und gegen temporäres Welken. Sie erholen sich auch schnell, weil sie in der Regel ein günstiges Wurzel/Spross Verhältnis entwickeln und ein leistungsfähiges

Wasser in der Pflanze

Wasserleitungssystem besitzen. Beispiele sind krautige Pflanzen sonniger Standorte, Steppengräser und manche Vertreter der Pioniergehölze (LARCHER 2001).

5. Methoden der Transpirationsbestimmung

Die hier beispielhaft angeführten „chemischen“ und gravimetrischen Methoden sind groß teils historisch und werden heute, bis auf ein, zwei Ausnahmen, wie die Momentan-Methode von Otto STOCKER (1929) und der Lysimeter-Methode nicht mehr angewendet. Anders bei den porometrischen Methoden, die auch heute noch Anwendung finden und die gravimetrischen Methoden in der Freilandpraxis groß teils ersetzen.

5.1 „Chemische“ Methoden

Bei diesen Methoden dient der Farbumschlag eines Indikators als Anzeige für die Transpiration. Dabei wird die Zeit bis zum Farbumschlag, die Geschwindigkeit und die Intensität des Farbumschlages im Verhältnis zu einer Kontrolle bestimmt.

5.1.1 Kollodiummethode

Diese, 1901 von BUSCALIONI und POLLACCI entwickelte Methode, beruht auf der Eigenschaft des Kollodiums, seine Transparenz zu verlieren, sobald es mit einer minimalen Menge Wasser in Berührung kommt.

Zur Bestimmung der Transpiration wird eine Lösung aus Kollodium in Alkohol dünn-schichtig auf die Blattfläche aufgetragen. Der Alkohol verdunstet und die Kollodiumschicht trübt sich je nach Menge und Geschwindigkeit der Wasserabgabe durch das Blatt. Aus der Geschwindigkeit und Stärke der Trübung lässt sich ein Schluss auf die relative Transpiration (Unter der relativen Transpiration von Pflanzen und Pflanzenteilen versteht man das Verhältnis ihrer absoluten Transpirationsgrößen umgerechnet auf die gleiche Oberflächen- oder Gewichtseinheit der transpirierenden Teile und die gleiche Zeit. LIVINGSTON B. E. (amerikanischer Pflanzenphysiologe) bezeichnet als relative Transpiration eines Blattes (RT), Ober- oder Unterseite, das Verhältnis zwischen der absoluten Transpirationsgröße (T) und der Evaporationsrate (E) einer freien Wasserfläche unter denselben äußeren Bedingungen, reduziert auf dieselbe Oberflächen- und

Zeiteinheit; $RT = T/E$, wobei T immer kleiner E sein muss.) ziehen. Durch Abziehen der Schicht können die Öffnungszustände der Stomata zum Zeitpunkt des Auftrags beziehungsweise Austrocknens des Kollodiums sichtbar gemacht werden (BURGERSTEIN 1920).

5.1.2 Kobaltchlorürpapier

Hierbei wird an die Blattflächen jeweils ein Stück Kobaltchlorürpapier angelegt und die Zeit für den Farbumschlag von blau (trocken) zu rot (feucht) gemessen. Als Kontrolle für die Umschlagsdauer ohne Blatt wird ein entsprechend großes Stück des Papiers frei aufgehängt und dessen Farbumschlagsdauer mit gemessen.

Aus der Gewichts Differenz des blauen zum roten, feuchten Papier kann man sich ausrechnen wie viel mg pro cm^2 und Zeit das Blatt an Wasserdampf abgibt, wenn bekannt ist wie viel mg Wasserdampf pro cm^2 das Papier benötigt um vollständig Farbe zu wechseln (BURGERSTEIN 1920).

5.1.3 Jodbleilösung

GRAFE verwendete im Jahre 1914 anstelle des Kobaltchlorürpapiers ein in Jodbleilösung getauchtes Filterpapier, welches er mit einer Blattklammer an der Blattober- und Unterseite befestigte. Das Filterpapier verfärbt sich mit zunehmender Wasseraufnahme gelb (BURGERSTEIN 1920).

5.2 Gravimetrische Methoden

Die Bestimmung der Transpiration erfolgt mit diesen Methoden, von denen nicht alle als Feldmethode zu verstehen sind, entweder durch die Gewichtszunahme einer hygroskopischen Substanz, oder durch direktes Wägen des Blattes oder einer ganzen Pflanze, teilweise mit kontinuierlicher Gewichts aufzeichnung. Aus der Gewichts Differenz wird die Menge des abgegebenen Wassers berechnet.

5.2.1 Transpirationsapparat von FREEMAN

Diese Methode der quantitativen Bestimmung der Verdunstungsgröße, beruht auf der Gewichtszunahme hygroskopischer Substanzen. Der Apparat besteht aus einer großen Glasflasche, die als Aspirator dient, zwei mit Phosphorsäureanhydrid gefüllten U-Röhren und einem als „Transpirationskammer“ dienenden, beiderseits verschließbaren Glaszylinder, in dem der Pflanzenteil, mit dem Spross in Verbindung bleibend eingeschlossen wird. Die einzelnen Teile sind durch Schläuche und Glasröhren mit einander verbunden. Der durch die Pflanze abgegebene Wasserdampf wird in die zwei U-Röhren geleitet und führt dort zu einer Gewichtszunahme. Aus der Gewichts-differenz der beiden U-Röhren vor und nach dem Versuch wird das Gewicht des von dem Pflanzenteil abgegebenen Wassers bestimmt. Der in der Luft enthaltene Wasserdampf wird in einem Parallelversuch mit zwei U-Röhren ohne Pflanze bestimmt, diese werden für die gleiche Zeitdauer wie der Transpirationsversuch exponiert. Aus den Gewichts-differenzen kann dann analog zur Transpirationsmessung die Luftfeuchte bestimmt werden, welche dann bei der Berechnung der Transpirationsgröße in Abzug gebracht wird (BURGERSTEIN 1920).

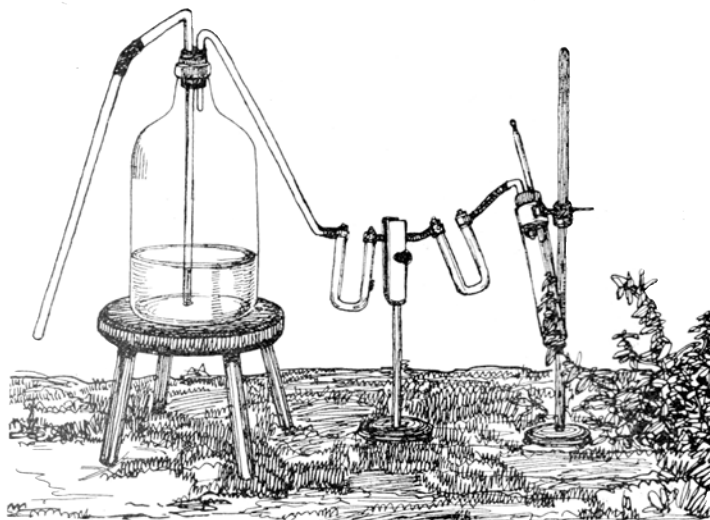


Abb. 10: Transpirationsapparat nach FREEMAN (BURGERSTEIN 1920)

5.2.2 Transpirationsapparat nach CORBETT

CORBETT verwendet ein großes Noeholsonsches Areometer (eine hydrostatische Waage mit der man nach dem Archimedisches Prinzip das spezifische Gewicht oder die Dichte eines Körpers bestimmen kann), auf dessen Platte die Versuchspflanze gestellt wird. Die Platte ist durch einen Hebel mit der Schreibtrommel verbunden. Zur Vermeidung von Temperaturänderungen des Wassers, welche die Dichte beeinflussen, wird das Wassergefäß mit einem zweiten Wasserbehälter umgeben, durch welches ein Wasserstrom von konstanter Temperatur geleitet wird (BURGERSTEIN 1920).

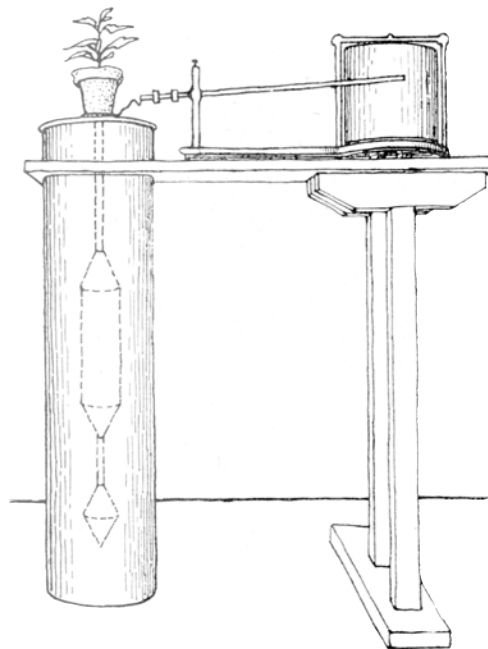


Abb. 11: Transpirationsapparat nach CORBETT (BURGERSTEIN 1920)

5.2.3 Selbst registrierender Transpirationsapparat nach L. und K. LINSBAUER

Bei diesem, 1911 von den Gebrüdern LINSBAUER konstruiertem Messapparat, hängt am unteren Ende einer Spiralfeder, an zwei Schnüren geneigt, eine Epruvette, die mit Wasser gefüllt, die Versuchspflanze trägt. Die Wasserschicht ist mit einer Schicht Olivenöl nach oben abgeschlossen um Verdunstung zu vermeiden. Die beiden Schnüre sind durch

ein dreieckiges Metallblättchen, das eine lange Registriernadel trägt, mit der Spiralfeder verbunden. Hebt sich die Eprouvette infolge der Wasserabgabe durch die Pflanze, so sinkt die Spitze der Nadel, welche auf der Schneide des Trägers 1 als Drehachse ruht (siehe Abbild 15), nach abwärts. Der mit einer berußten Papierfläche bedeckte Zylinder ist exzentrisch auf der Achse eines Uhrwerks festgeschraubt, das eine volle Umdrehung in 30 Minuten durchführt. Die Nadel markiert somit halb stündliche Transpirationsraten (BURGERSTEIN 1920).

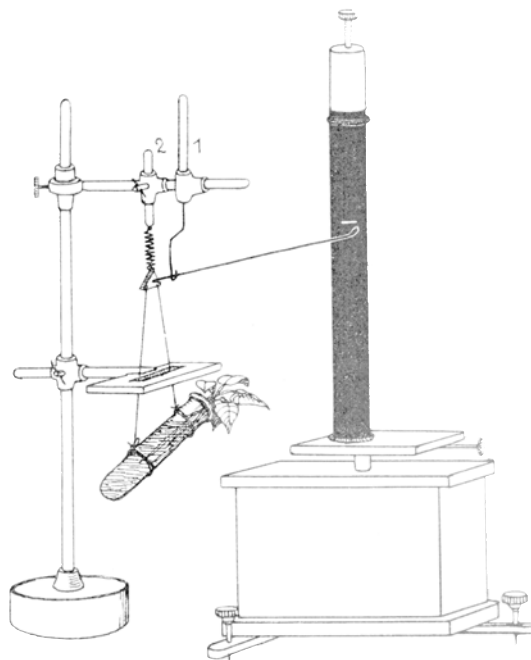


Abb. 12: Selbst registrierender Transpirationsapparat (BURGERSTEIN 1920)

5.2.4 ANDERSON'S Apparat zur Messung der Transpiration

ANDERSON ermittelte die Transpirationsgröße nicht durch direkte Wägung der Versuchspflanzen, sondern, ähnlich wie FREEMAN, durch das Wägen hygroskopischer Substanzen. Dabei wird durch eine die Pflanze überdeckende Glasglocke ein trockener Luftstrom geleitet, welcher dann Gefäße passiert, die mit Chlorkalzium oder mit konzentrierter Schwefelsäure gefüllt sind. Die Gewichtszunahme dieser hygroskopischen Substanzen entspricht dem Gewicht des von der Pflanze emittierten Wasserdampfes.

Zur Bestimmung des jeweiligen Gewichtes, resp. zur Gleichgewichtsherstellung der Registrierwaage verwendet ANDERSON Stahlkügelchen von gleichem Gewicht. Diese befinden sich in einem oberhalb der Tara-Waagschale angebrachten, schraubenförmig gedrehten Rohr, das am unteren Ende einen Verschluss und eine Tasche für je ein Kügelchen hat. Die andere Waagschale ist mit einer Batterie verbunden. Sobald diese Schale infolge der Gewichtszunahme des Chlorkalziums bis zu einer gewissen Tiefe sinkt, wird ein Stromkreis geschlossen; dadurch wird die Klappe an dem Rohr geöffnet und ein Kügelchen fällt auf die Tara-Waagschale. Damit wird der Gleichgewichtszustand wieder hergestellt, der Stromkreis unterbrochen, die Rohröffnung geschlossen und ein neues Kügelchen fällt in die Tasche (BURGERSTEIN 1920).

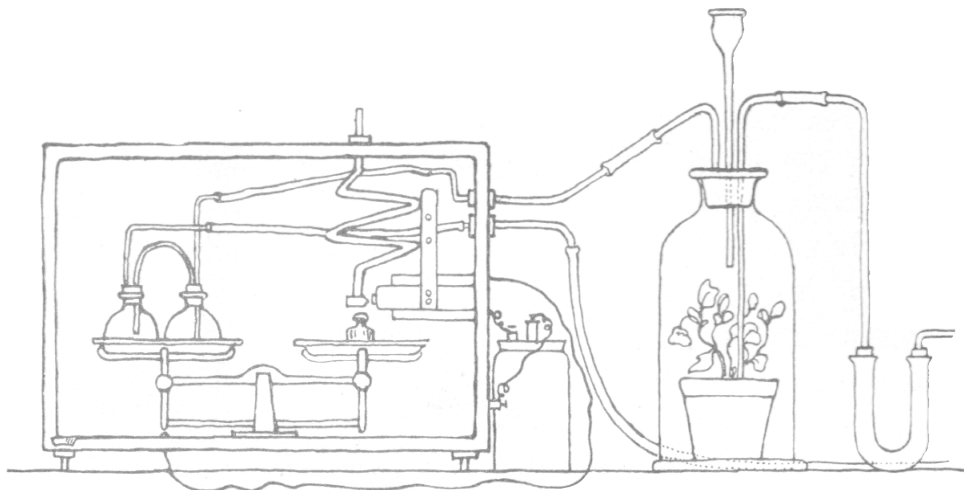


Abb. 13: ANDERSON'S Apparat zur Messung der Transpiration (BURGERSTEIN 1920)

5.2.5 Selbstregistrierendes Transpirometer von GANONG

GANONG benützte bei seinem Transpirometer ebenfalls eine schraubenförmige Gleitröhre, die etwa 250 Stahlkügelchen zu je 1 g Gewicht enthielt, und am unteren Ende mit einer Klappe verschließbar war. Die Versuchspflanze wurde auf die Schale einer analytischen Waage gestellt und diese aus tariert. Verliert die Pflanze infolge der Transpiration an Gewicht, so hebt sich die Schale und berührt in einer bestimmten Höhe eine Draht, der einen Stromkreis schließt. Dadurch wird ein Elektromagnet erregt, der die

Klappe an der Kugelhöhre hebt; ein Grammkügelchen fällt in das auf der anderen Waagschale stehende Gefäß, wodurch die Waage wieder ins Gleichgewicht kommt und der Stromkreis unterbrochen wird. Sobald ein Kügelchen aus der Spiralröhre herabgefallen ist, zeichnet eine Schreibfeder auf dem Registrierpapier einer rotierenden Trommel einen Strich. Die Trommel macht in 24 Stunden eine Umdrehung (BURGERSTEIN 1920).



Abb. 14: Selbstregistrierendes Transpirometer von GANONG (BURGERSTEIN 1920)

5.2.6 Transpirometer von BLACKMAN und PAINE

Dieses 1914 konstruierte Transpirometer beruht auf dem kombinierten Prinzip von ANDERSON und GANONG. Zum Gewichtsausgleich der Waage werden nicht Stahlkügelchen, sondern Wassertropfen von bestimmter Größe verwendet. Wenn sich infolge der Transpiration der Pflanze die eine Waagschale entsprechend gehoben hat, tauchen Platinspitzen in Quecksilber, wobei ein elektrischer Stromkreis geschlossen wird;

durch ein Solenoid wird das horizontal Rohr weggezogen, aus der (auf einem Stativ stehenden) Flasche fallen Wassertropfen direkt auf die Topferde. Kommt die Waage wieder ins Gleichgewicht, so wird ein anderer Stromkreis geschlossen und durch ein zweites Solenoid das Rohr wieder in die frühere Position gebracht. Die Platinspitzen sind durch Schrauben so regulierbar, dass der Apparat für einen größere oder kleinere Zahl von Tropfen eingerichtet werden kann.

Eine Trommel mit sechs Registrierfedern ermöglicht vergleichende Messungen von Transpiration und Evaporation (BURGERSTEIN 1920).

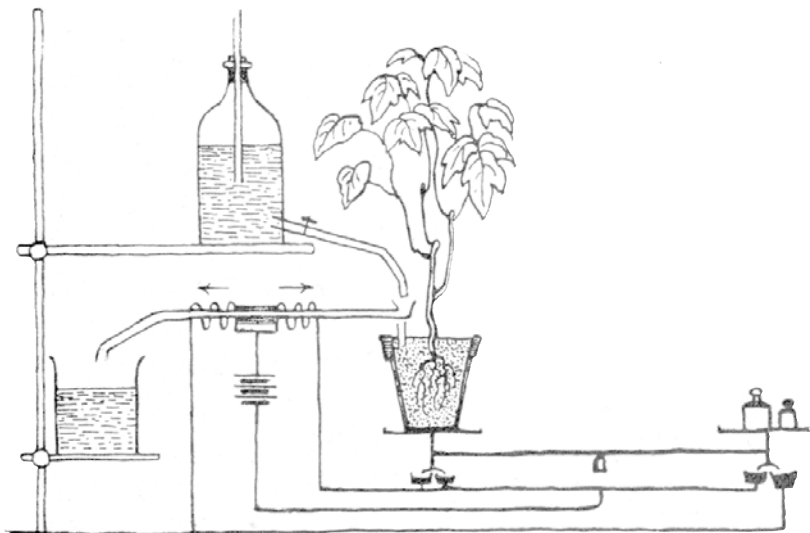


Abb. 15: Transpirometer von BLACKMAN und PAINE (BURGERSTEIN 1920)

5.2.7 Methode von SAMPSON und ALLEN

Diese denkbar einfache Methode wurde 1909 von den oben genannten Autoren zur Transpirationsbestimmung an abgeschnittenen beblätterten Sprossen verwendet. In eine mit Wasser gefüllte Flasche wurde durch ein Loch im Korken der Spross gesteckt, die Gewichtsabnahme galt als Maß für die durch den Spross abgegebene Wassermenge (BURGERSTEIN 1920).

5.2.8 „Anwelk-Methode“ nach Anton ARLAND

ARLAND (1955) verwendete die „Anwelk-Methode“ um den Einfluss von Umweltparametern, wie Nährstoffgehalt des Bodens (Düngung bei seinen Untersuchungen an Kulturpflanzen), Temperatur, Lichtverhältnisse und vieles mehr zu untersuchen. Dabei wurde aus dem Komplex der Freilandbedingungen dem Faktor Wasser besondere Bedeutung beigemessen, dieser wurde dann in den Versuchen konstant gesetzt.

Die Versuchspflanzen wurden in Töpfen bei unterschiedlichen Wasserverhältnissen gezogen und für den „Anwelkversuch“ mit der Wurzel entnommen. Der Wurzelballen oder die Wurzeln wurden dann, entweder verpackt oder in Parafin getaucht um Wasserverluste über diesen Weg zu vermeiden. Vor den Versuchen wurden die Pflanzen gewogen, nach einer durchschnittlichen „Anwelkdauer“ von etwa 30 Minuten (Diese Zeit empfiehlt ARLAND als optimal für Pflanzenarten unseres Klimages), wurden sie erneut gewogen. Die Gewichts Differenz wurde auf das Frischgewicht bezogen.

Dabei muss darauf geachtet werden, dass sich weder Temperatur noch Lichtverhältnisse während des Versuches ändern und dass jede der untersuchten Pflanzen den gleichen Bedingungen exponiert ist.

ARLAND (1955) bezeichnete dieses Verfahren auch als Test für die physiologische Elastizität der Pflanze und leitete aus der Intensität der Transpiration Aussagen über den Zustand der Pflanze ab.

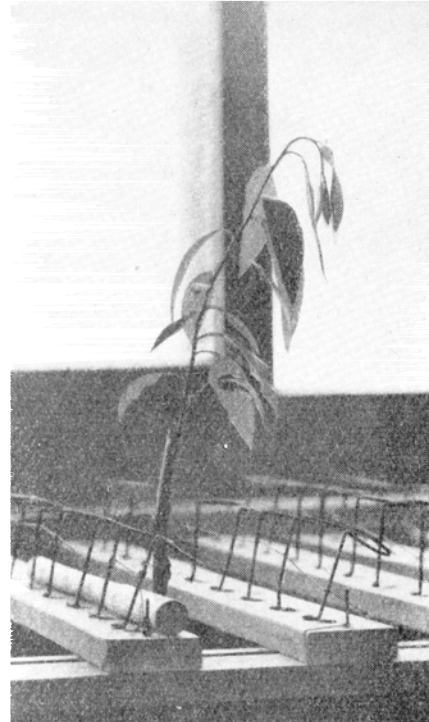
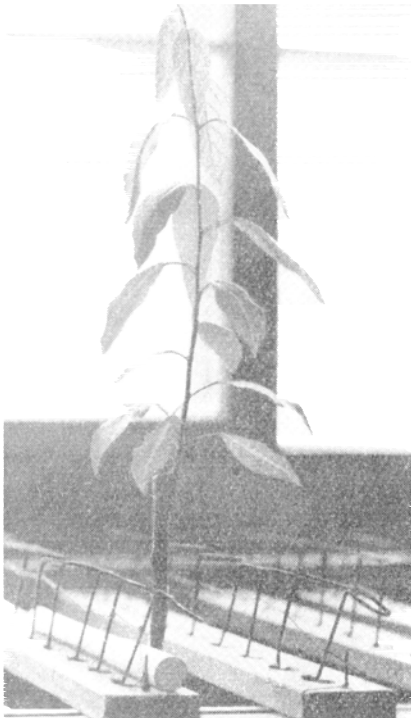


Abb. 16: „Anwelk-Methode“ nach ARLAND *Populus trichocarpa* eine ½ Stunde nach Anwelkbeginn und 1 Stunde nach Anwelkbeginn (BURGERSTEIN 1920)

5.2.9 „Momentan-Methode“ von Otto STOCKER

Die Transpirationsbestimmung am Standort verläuft in folgenden Arbeitsschritten:

- Abschneiden des zu untersuchenden Pflanzenteils.
- Erste Wägung, Feststellung der Anfangszeit.
- Zurückbringen des Pflanzenteiles an seinen Standort und Exposition dort unter den früheren Standortbedingungen.
- Zweite Wägung, Feststellung der Schlusszeit.

Die Genauigkeit von Momentanbestimmungen ist in erster Linie begrenzt durch die unvermeidliche Störung der Außenbedingungen während der Wägung. Eine Verkürzung und Verringerung dieser Störungen bedingt eine kürzere Versuchsdauer und somit eine höhere Genauigkeit des Versuches.

Praktisch muss also gefordert werden, dass erstens der Weg zwischen Waage und Expositionsort möglichst kurz ist, und das zweitens die Wägung möglichst schnell vor sich geht. Aus dem zweiten Grund ergibt sich, dass für die Wägung eine spezielle, schnell schwingende Waage verwendet wird, die ein rasches und genaues (bis auf etwa 1/5 mg) Bestimmen der Gewichtsänderungen ermöglicht.

Somit beträgt die Expositionszeit durchschnittlich 2 Minuten, der ganze Versuch dauert ca. 3 Minuten.

Die Evaporation wird ebenfalls mit Hilfe der Momentan-Methode bestimmt. Dabei wird ein befeuchtetes, rundes Stück Löschpapier mit ca. 5 cm Durchmesser (Durchschnittsgröße vieler Blattarten) mit einer Klammervorrichtung am Standort des Pflanzenteiles exponiert.

Expositionszeit und Wägemethode sind gleich wie bei der Transpirationsbestimmung.

Nach jedem Versuch wird eine neue Löschpapierscheibe verwendet.

Für die Berechnung der Evaporationsversuche wird der Durchmesser der gequollenen Scheibe nochmals genau bestimmt, zur Bestimmung der Evaporation wird dann die Flächensumme aus Ober- und Unterunterseite genommen.

Um die Wasserabgabe der Pflanzenteile untersuchen zu können, werden die Gewichtsanteile der Stengel und die Fläche der Blätter, des Blattes mithilfe eines Planimeters bestimmt. Die Stengel werden als Zylinderfläche berechnet. Verholzte Stengel und Stengelteile werden in der Berechnung vernachlässigt. Dagegen wird im allgemeinen bei saftigen, grünen Stengelteilen eine Anrechnung von 40% der Fläche angemessen sein.

Wie bei den Evaporationsmessungen und deren Berechnung wird auch bei der Berechnung der Transpiration immer mit beiden Flächen, der Ober- und Unterseite gerechnet. Die Angabe des Wasserverlustes erfolgt in $\text{mg/dm}^2\cdot\text{min}$ (STOCKER 1929).

5.2.10 Lysimeter-Methode

Um den gesamten Wasserverlust einer ganzen Pflanze zu bestimmen werden eingetopfte Pflanzen gewogen. Diese Methode ist die direkteste und exakteste um den Gesamtwasserverlust schnell zu ermitteln und wird heute auch noch eingesetzt. Das gleiche Prinzip kann auch im Freiland angewendet werden indem ein Lysimeter installiert wird. Dieses besteht aus einem ungestörtem Teil Boden mit den darauf wachsenden Pflanzen, der in einem Behälter eingeschlossen, auf einer Waage aufliegt. Bei schwereren Pflanzen oder größeren Erdbereichen kann eine hydraulische Waage verwendet werden.

Um die Transpiration ermitteln zu können, müssen einige Punkte beachtet werden; ein Gewichtsverlust kann durch Wasserabgabe der Pflanzen und des Bodens aber auch den Verlust von Biomasse oder Boden erfolgen. Gewichtszunahmen können eine Folge von Regenwasseransammlung, Schneeablage oder Druckänderungen im Boden sein.

Bei längeren Beobachtungszeiträumen müssen die Biomassegewinne aus der Photosynthese (Kohlenstoffeinbau) mit berücksichtigt werden. Des weiteren muss bedacht werden, dass der freie kapillare Wasseraustausch mit dem umgeben Boden durch das Behältnis unterbunden ist, es muss deshalb ein geeignetes Drainage-Bewässerungssystem zum Wasseraustausch eingebaut werden.

Je nach Empfindlichkeit der eingebauten Drucksensoren können bei solchen Lysimetersystemen Genauigkeiten von 0,06 bis 0,02 mm Wassersäule pro m² Bodenfläche erreicht werden (PEARCY et al. 1991).

5.3 Porometrische Methoden

Eines der allerersten Porometer war der 1911 von DARWIN und PERTZ konstruierte Apparat zur Bestimmung der Aperturweite von Spaltöffnungen. Mit diesem Apparat konnten kontinuierliche Serien von Beobachtungen, als auch wiederholte Beobachtungen am gleichen Blatt durchgeführt werden.

Das Prinzip, welches diesem Apparat zugrunde liegt, beruht darauf, die Veränderungen der stomatären Spaltweite durch Registrierung der Veränderungen eines durch ein lebendes Blatt gesogenen Luftstromes abzuschätzen.

Das Porometer besteht aus einem T-Glasrohr, das mit seinem vertikalen und graduierten Teil in ein mit Wasser gefülltes Gefäß taucht, während die Horizontalteile je einen Schlauch tragen; von letzteren ist einer an den hohlen Stiel einer kleinen Glasglocke befestigt, deren breiter Basisrand an die Spaltöffnungsführende Seite des Versuchsblattes luftdicht angekittet wird. Der zweite Schlauch ist mit einem Quetschhahn verschließbar und dient dazu, am Beginn des Versuches Wasser mittels Saugspannung bis zu einer gewünschten Höhe zu bringen.

Infolge des Unterdruckes in der Röhre wird durch die (geöffneten) Stomata Luft in die Glasglocke gezogen und die Wassersäule im Rohr sinkt. Die Zeit die verstreichen muss, damit die Wassersäule in der graduierten Röhre um eine bestimmte Zahl von Teilstrichen fällt, gibt das Maß für die relative Öffnungsweite der Spalten an.

Das Steigrohr hat gewöhnlich einen solchen Durchmesser, dass 1 cm seiner Länge ca. 0,1 cm³ entsprechen (BURGERSTEIN 1920).

5.3.1 Gasdiffusions-Porometer

Die Messung mit dem Gasdiffusionsporometer beruht auf der Diffusion eines anderen Gases als Wasserdampf durch das Blatt. Das Gas diffundiert dabei durch das Blatt, ähnlich wie beim Darwinschen Porometer. Verwendet wurden Gase wie, Wasserstoff, Stickstoffdioxid, Helium oder auch radioaktiv markiertes Argon. Dabei wird die Zeit bestimmt die das Gas benötigt um von der einen Blattkammer in die Messkammer, durch das Blatt zu diffundieren. Die Kalibrierung erfolgt mit einer Platte mit Löchern bekannten Widerstandes mit denen der Blattwiderstand verglichen wird.

Gasdiffusionsporometer messen die Widerstände der oberen Epidermis, der Interzellularen und der unteren Epidermis in Serie (PEARCY et al. 1991).

5.3.2 Tritium-diffusions-Porometer

Bei diesem Gerätetyp wird die Diffusionsrate von Tritium haltigem Wasser durch das Blatt bestimmt. Die Methode wird mit der Messung der Photosyntheserate kombiniert wobei trockene $^{14}\text{CO}_2$ haltige Luft durch kaltes Tritium haltiges Wasser geleitet wird bevor es in die Messküvette kommt. Nachdem das Blatt für eine bestimmte Zeit exponiert wurde, wird die Menge an ^3H und ^{14}C bestimmt.

Transpirationsmessungen und die Berechnung von Leitfähigkeiten (für Wasserdampf) einzelner Blätter basieren heute groß teils auf der Messung des zusätzlichen durch das Blatt abgegebenen Wasserdampfes in einem abgeschlossenen oder das Blatt teilweise umschließenden Behältnis. Dabei können zwei unterschiedliche Systeme zur Anwendung kommen.

In einem „offenen“ System strömt die Luft durch das Behältnis, die Transpirationsrate des Blattes ergibt sich aus der Differenz des Wasserdampfgehaltes von zugeführter zu abgeführter Luft, sowie der Durchflussrate der Luft und der Blattfläche.

Ein „geschlossenes“ System umschließt für kurze Zeit das Blatt oder die Blattfläche mit einem Behältnis in welchem sich ein Feuchtesensor befindet. Die Transpirationsrate ist in diesem Fall eine Funktion des steigenden Wasserdampfgehaltes im Behältnis.

Allgemein können zur Transpirationsbestimmung drei unterschiedliche Porometertypen eingesetzt werden:

„transient“ Porometer, diese messen den Anstieg des Wasserdampfgehaltes in einem am Blatt befestigten Behältnis.

„null-balance“ Porometer, hier wird die Luftfeuchte durch Zufuhr trockener Luft in die Blattkammer konstant gehalten beziehungsweise die durch das Blatt abgegebene

Wasserdampfmenge ausgeglichen.

„constant- flow“ Porometer, bei diesen Geräten wird nach Einstellen eines Fließgleichgewichtes („steady state“) die Zunahme des Wasserdampfgehaltes in der Blatkammer gemessen (PEARCY et al. 1991).

5.3.3 „Transient“-Porometer

Die ersten Porometer waren von dieser Type, eines der ersten Modelle wurde 1964 von WALLIHAN entwickelt. Trotz unterschiedlicher Bauarten und Weiterentwicklungen ist das Messprinzip bis heute unverändert geblieben. Eine Blatkammer mit einem Feuchtesensor wird an das Blatt geklemmt und die Zeit gemessen die verstreicht bis der Feuchtegrad zwischen zwei voreingestellten Werten liegt.

Eine weitere Messmöglichkeit ist es die Feuchteänderung innerhalb eines definierten Zeitrahmens zu Bestimmen.

Bei Gerätetypen ohne Ventilation ist das Diffusionsverhalten stark von der Geometrie der Blatkammer, der Reaktionszeit des Feuchtesensors und dem Verhalten des Blattes abhängig. Um den Einfluss der Blatkammergeometrie, das Sensorverhalten und die Absorption von Wasserdampf an den Kammerwänden auszugleichen, wird das Gerät mit einer Kalibrierplatte kalibriert. Diese Kunststoffplatte enthält eine definierte Anzahl unterschiedlich großer Poren (Löcher) deren Diffusionswiderstand bekannt ist. Zum Kalibrieren wird ein feuchtes Filterpapier über die Platte gelegt. Porometer mit einem eingebauten Belüfter können nicht auf diese Weise kalibriert werden, sondern müssen mit nassen Flächen kalibriert werden (Auf Details wird hier nicht weiter eingegangen.) Ein Beispiel eines solchen Porometers ist das AP4 von Delta-T Devices. Bei diesem Gerät ist ein kleiner Lüfter eingebaut der, nach einer Messung die Blatkammer mit trockener Luft ausbläst, um dann eine weitere Messung durchzuführen. Insgesamt werden 4-5 solcher Messzyklen durchgeführt, bis die erhaltenen Werte eine Wiederholbarkeit zeigen (PEARCY et al. 1991).

5.3.4 „Null-balance“-Porometer

Das „null-balance“ Porometer benützt einen trockenen Luftstrom durch die Blattkammer um den durch das Blatt abgegebenen Wasserdampf auszugleichen. Es wird dadurch ein Fließgleichgewicht („steady state“) der Luftfeuchte in der Blattkammer erreicht.

Zur Berechnung der Transpiration werden folgende Werte gemessen; die Feuchte der einströmenden Luft, die Feuchte der Luft in der Blattkammer, die Strömungsgeschwindigkeit der in Blattkammer einströmenden Luft, die Blattfläche, die Lufttemperatur und die Blatttemperatur. Das „null-balance“ Porometer hat einige Vorteile gegenüber dem „transient“ Porometer. Da das Fließgleichgewicht der Feuchte in den meisten Fällen bei Feuchtigkeiten die der Umgebungsfeuchte entsprechen erreicht werden kann, können Fehler die durch die Absorption von Wasserdampf entstehen gering gehalten werden.

Die Kalibrierung des Feuchtesensors erfolgt über gesättigte Salzlösungen, mit denen unterschiedliche Feuchtigkeiten eingestellt werden können.

Ein Beispiel eines solchen Gerätes ist das LI- 1600 der Firma LICOR Inc. aus den USA.

Bei diesem Gerät wird ein Strom trockener Luft mithilfe einer Pumpe und eines Trocknungsmittels (Silicagel) durch die Blattkammer geblasen, die Durchflussgeschwindigkeit wird mit einem Masseflussmeter bestimmt. Der Durchfluss wird elektronisch mittels Ventile so geregelt, das die Feuchtwerte den durch den Bediener eingestellten Werten entsprechen. Meistens wird die Umgebungsfeuchte mittels der offenen Blattkammer gemessen und dieser Wert dann als Einstellwert genommen.

Eine Messung dauert zwischen 15 Sekunden und 1 Minute, während der Messung werden die Blatt- und die Lufttemperatur sowie die Feuchte und die Durchflussrate mit bestimmt (PEARCY et al. 1991).

5.3.5 „Constant-flow“-Porometer

Im Gegensatz zu den „null-balance“ Porometern, wo der Luftstrom, beziehungsweise der Durchfluss geregelt wird, bis sich ein Gleichgewicht einstellt bei dem dann die Feuchte

gemessen wird, wird bei diesem Porometertyp der Durchfluss konstant gehalten. Nachdem sich ein Gleichgewicht eingestellt hat, wird die Feuchte in der Blattkammer gemessen.

Der Nachteil bei diesem Gerätetyp liegt darin, dass die unterschiedliche Feuchtigkeit der Blätter, sowie Änderungen des Dampfdruckes zu einer Absorption oder Desorption von Wasserdampf in der Blattkammer führen können. Dadurch kann es zu fehlerhaften Leitwertmessungen kommen, auch könne die Stomata auf die Dampfdruckänderungen mit Öffnungsweitenänderungen reagieren.

Ein Vorteil dieser Systeme ist jedoch, dass es möglich ist neben der Wasserdampfabgabe auch die CO_2 Abgabe zu Bestimmen und damit auch Aussagen über die Photosyntheserate zu tätigen (PEARCY et al. 1991).

Bei den „null-balance“ und „constant-flow“ Porometern wird die Transpiration/Leitwert durch Messung der Änderung der Wasserdampfmenge, der Durchflussrate und den Temperaturen der Luft und des Blattes bestimmt, beziehungsweise diese physikalischen Größen fließen in die Berechnung ein.

Bei den „transient“ Porometern erfolgt die Ermittlung des Leitwertes durch Vergleich mit einem berechneten Wert aus einer Kalibrierplatte (PEARCY et al. 1991).

5.4 Weitere Methoden

Neben den oben beispielhaft erwähnten „chemischen“, gravimetrischen und porometrischen Methoden, kamen und kommen noch einige andere Methoden zur Transpirationsbestimmung zum Einsatz.

5.4.1 „Polymettermethode“ von CANNON

Diese 1905 entwickelte Methode besteht darin, die Transpiration durch die Bestimmung der Differenz in der absoluten Feuchtigkeit eines bekannten abgeschlossenen Luftvolumens in dem sich die Versuchspflanze (oder Teile derselben) befindet, zu messen. Hierzu dient ein Hygrometer. Es wird neben die Pflanze gestellt, worauf beide mit einer entsprechend großen Glasglocke überdeckt werden. Das genannte Polymeter enthält ein Haarhygrometer und ein Thermometer. Das Hygrometer gibt die relative Feuchtigkeit an und ist mit einer Skala versehen, mittels welcher die Temperatur für den Taupunkt approximativ bestimmt wird. Auf dem Thermometer ist auch der maximale Dampfdruck für die jeweilige Temperatur verzeichnet. Aus diesen Angaben lässt sich die absolute Feuchtigkeit unter der Glasglocke am Beginn und am Ende des Versuches berechnen.

Diese Methode lieferte zwar keine besonders genauen Ergebnisse, lies sich aber zur Schätzung der Wasserabgabe gering transpirierender Pflanzen wie etwa Wüstenpflanzen relativ gut einsetzen. Um die Wasserabgabe der Bodenfläche (bei Freilandversuchen) auszuschließen, wurde dieser mit einem wasserdichten Stoff abgedeckt (BURGERSTEIN 1920).

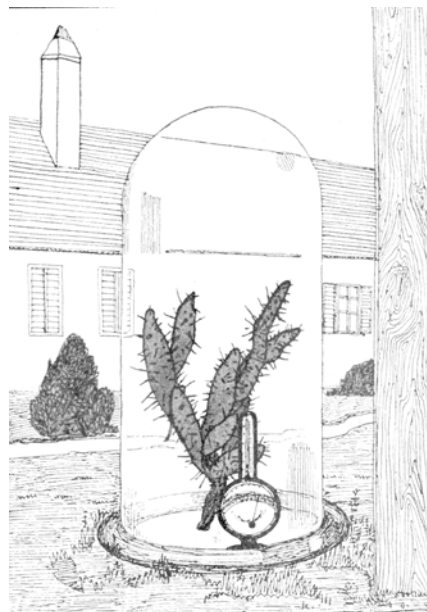


Abb. 17: „Polymettermethode“ von CANNON (BURGERSTEIN 1920)

5.4.2 Infrarot Gasanalysatoren

Infrarot Gasanalysatoren werden in der Ökophysiologie hauptsächlich zur Bestimmung der CO₂-Konzentration verwendet, können aber mit einer umgebauten Analysekammer (enthält Ammoniak und nicht Luft) auch zum Nachweis von Wasserdampf eingesetzt werden (PEARCY et al. 1991).

Das Messprinzip beruht darauf dass, das eingesaugte Gasgemisch beziehungsweise die Luft in einer IR-Zelle von einem Lichtstrahl geeigneter Wellenlänge durchstrahlt wird. Die Energie der Moleküleigenschwingungen- und rotationen wird durch die Absorption des IR-Lichtes dann erhöht, wenn die Frequenz der Strahlung genau der Eigenfrequenz dieser Molekülschwingungen- und rotationen entspricht (Resonanz vorliegt). Dadurch ergibt sich eine sehr hohe Selektivität für verschiedene Gase. Ein zweiter Lichtstrahl, der nicht durch das Gasgemisch (Luft) geleitet wird, dient als Referenzstrahl. Aus dem Verhältnis der absorbierten Strahlung und des Referenzstrahles wird die Gaskonzentration ermittelt. (SCHUMANN, analytische Messtechnik, www.schumann-analytics.de)

Somit bieten Infrarot Gasanalysatoren eine sehr empfindliche und accurate Methode zur Bestimmung der abgegebenen Wasserdampfesmenge an.

Analysatoren welche den absoluten Wassergehalt messen können werden bei hohen bis höheren Transpirationsraten eingesetzt, bei geringer Transpirationsrate wie etwa bei Wüstenpflanzen und einigen Koniferen können differential Analysatoren eingesetzt werden, mit diesen kann dann der Wasserdampfgehaltsunterschied zwischen einströmender und austretender Luft in einer die Pflanze beinhaltenden Versuchskammer gemessen werden.

Um eine Berechnung der Transpiration durchführen zu können, müssen natürlich auch die anderen Parameter wie Temperaturen, Windgeschwindigkeiten, Übergangswiderstände, Luftfeuchten und so weiter mitbestimmt werden (PEARCY et al. 1991).

5.4.3 Taupunktspiegel

Auch hier dient der Taupunktspiegel, wie der Gasanalysator, zur Erfassung des durch die Pflanze abgegebenen Wasserdampfes, alle anderen oben bereits erwähnten Umweltparameter müssen zusätzlich mitbestimmt werden.

Taupunktspiegel funktionieren indem ein Spiegel mit einem kleinen Peltierelement gekühlt wird. Der Kondensationspunkt wird durch eine Lichtquelle und einen Photodetektor bestimmt. Dabei streut das kondensierte Wasser den Lichtstrahl so, das weniger Licht vom Detektor empfangen wird, als wenn kein Wasser vorhanden wäre. Die bei Kondensation herrschende Spiegeltemperatur wird mit einem Platindrahtwiderstandsthermometer gemessen (PEARCY et al. 1991).

5.4.4 Dünnschicht Kapazitiv Sensoren

Sie bestehen aus einer dünnen Schicht eines hygroskopischen Polymerfilms der zwei Metallelektroden trennt, die auf einem Glasplättchen als Stütze aufliegen. Die erste Elektrode liegt auf einem Glasplättchen, gefolgt von einer 1 µm dicken Polymerfilmschicht auf welcher die zweite Elektrode mit einer Dicke von ca. 0,02 µm aufliegt. Durch diese können Wassermoleküle durch diffundieren, durch die Poren des Polymerfilms treten und die elektrische Kapazität des Sensors verändern. Die Änderung der Sensorkapazität wird im Vergleich zu einer Referenzkapazität gemessen. Bei Luftfeuchtigkeiten über 80% zeigen diese Sensoren eine zunehmende Hysterese, da es zu einer Absorption von Wasserdampf kommt, die bewirkt das der ausgegebene Wert sich noch über längere Zeiträume ändert. Hauptsächlich wird dieser Sensortyp in die Blatträume von Porometern zur Feuchtebestimmung eingebaut (PEARCY et al. 1991).

5.4.5 Xylemfluss Methode (Saftstrommessung)

Die Messung des Xylemflusses ist eine der unmittelbarsten Methoden um den Wasserfluss vom Wurzelsystem zum Blattdach zu untersuchen.

Messungen an ganzen unverletzten Pflanzen wurde erstmals von HUBER und SCHMIDT 1932 (zitiert nach PEARCY et al. 1991) durchgeführt, sie entwickelten auch die „heat pulse method“ bei der die Geschwindigkeit des Wasserflusses im Xylem gemessen wird.

Um die Gesamtmenge des durchströmenden Wassers zu Berechnen, muss die Fläche des leitenden Gewebes bekannt sein, dies ist aber praktisch nahezu unmöglich, da es nicht feststellbar ist welche und wie viele Gefäße tatsächlich Wasser transportieren.

Um diese Ungenauigkeiten zu minimieren wurde die „heat balance“ method 1960 von VIEWEG und ZIEGLER (zitiert nach PEARCY et al.) entwickelt. Hierbei wird die spezifische Wärmekapazität von Wasser genutzt um den Temperaturgradienten konstant zu halten. Diese Methode ermöglicht kontinuierliche als auch Langzeitbeobachtungen im Freiland.

Xylemflussgeschwindigkeiten (V) können gemessen werden, indem man ein Heizelement in einer Entfernung (D) unter einem Temperatursensor in das hydroaktive Xylem einbringt. Die Flussgeschwindigkeit wird durch die Messung des Zeitintervales (t) zwischen einem Heizimpuls und der Detektion einer Temperaturerhöhung am Sensor bestimmt.

Somit kann die Flussgeschwindigkeit wie folgt berechnet werden;

$$V = \frac{D}{t} \quad [34]$$

Ist der Wassergehalt der leitenden Xylemgefäße bekannt, kann die mittlere Durchflussrate durch den untersuchten Stammschnitt berechnet werden.

Diese Berechnung beinhaltet jedoch einige Unbekannte. Es ist fast unmöglich die Anzahl der tatsächlich leitenden Gefäße zu bestimmen, da einerseits die Wandreibung der

einzelnen Gefäße unterschiedlich ist, und zweitens es zu erheblichen Unterschieden zwischen der Leitfähigkeit älterer und jüngere Gefäße kommt. Auch können sich Gefäße während der Messung verstopfen oder Embolien bilden, womit es zusätzlich erschwert wird den eigentlichen Anteil der leitenden Gefäße als auch die wahre Entfernung zwischen Heizquelle und Temperatursensor zu bestimmen.

Um das Problem der Flächenbestimmung zu umgehen, wurde ein Verfahren entwickelt, bei dem die spezifische Wärmekapazität des Wassers genutzt wird, um die Menge des durch strömenden Wassers zu bestimmen.

Prinzipiell können zwei Methoden eingesetzt werden, die „constant heating“ Methode und die „null balance“ Methode.

Bei erster wird das Xylemwasser andauernd mit einer bestimmten Energiezufuhr erwärmt. Die Temperaturerhöhung, die in einer definierten Entfernung oberhalb der Wärmequelle gemessen wird, kann zur Berechnung des Wasserflusses herangezogen werden.

Ein Problem dieser Methode ist die Überhitzung bei wenig Wasserfluss wie etwa in der Nacht und die ungenaue Auflösung der Temperaturdifferenzen bei sehr hohen Wasserdurchflussraten, wenn die Transpirationsrate sehr hoch ist und die Temperaturdifferenzen sehr gering. Die Berechnung der Durchflussmenge ist unabhängig von der Querschnittfläche des leitenden Gewebes, da hier der Massefluss als Grundlage zur Berechnung dient und nicht die Durchflussgeschwindigkeit, wie bei der „heat pulse“ Methode.

Die zweite Methode arbeitet mit einer voreingestellten Temperaturdifferenz von 1-2 K zwischen einer Referenztemperatur unterhalb der Heizquelle und der von einem Sensor gemessenen Maximaltemperatur am Ort der maximalen Wärmezufuhr. Die zugeführte Heizenergie wird so geregelt, das die eingestellte Temperaturdifferenz unabhängig vom Xylemfluss konstant gehalten wird. Der Vorteil liegt hier darin, das die eingebrachte Energiemenge in die Heizer direkt proportional zum Massefluss im Xylem ist, unabhängig

von der leitenden Gewebefläche. Weiters kommt es zu keiner Überhitzung und somit Schädigung des Leitgewebes. Ein Problem ist der Erhalt eines gleichmäßigen Temperaturfeldes, zum Beispiel bei Sonneneinstrahlung oder bei dünn stämmigen Pflanzenarten (PEARCY et al. 1991).

5.4.6 Infrarot-Thermographie

Gegen Ende der 90'er Jahre wurden erste Untersuchungen zur Anwendbarkeit bildgebender Methoden im Bereich der Pflanzen- und Ökophysiologie durchgeführt, darunter auch zur Freilandanwendung der Infrarot Thermographie. Diese bis dato hauptsächlich in der Technik eingesetzte Methode zur Bestimmung von Temperaturunterschieden mittels einer Infrarotkamera stellte sich als durchaus praktikable Lösung und Alternative zu den bereits eingesetzten Methoden heraus. Vor allem im Bereich der Landwirtschaft und des großflächigen Ackerbaues kommt diese Methode zur Bewässerungsüberwachung zum Einsatz.

Da die Infrarot Thermographie ohne Berührung der Pflanze oder des Blattes arbeitet, wird der Einfluss durch die Messapparatur auf Null reduziert.

Das Grundprinzip der Infrarot Thermographie beruht auf der Tatsache, dass jeder Körper mit einer Temperatur über dem absoluten Nullpunkt ($-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$) eine Eigenstrahlung aussendet. Diese Eigenstrahlung ist durch die in jedem Körper vorhandene innere mechanische Molekülbewegung bedingt. Die Intensität dieser Bewegung hängt von der Temperatur des Körpers ab. Zusammen mit der Molekülbewegungen treten auch Ladungsbewegungen auf, durch welche der Körper Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung aussendet. Ein Großteil dieser ausgesendeten Strahlung liegt im infraroten, das heißt langwelligem Bereich des Spektrums zwischen einem λ von $0,78\text{ }\mu\text{m}$ und $1000\text{ }\mu\text{m}$. Der für die Pflanzenthermographie interessante Wellenlängenbereich liegt zwischen $8\text{ }\mu\text{m}$ und $14\text{ }\mu\text{m}$ beziehungsweise $12\text{ }\mu\text{m}$. Da diese Strahlung den Gesetzen der Optik gehorcht, kann sie durch ein entsprechendes

Linsensystem und entsprechende Detektoren als Wärmebild sichtbar gemacht werden.

Das Abstrahlverhalten unterschiedlicher Körper hängt von ihren physikalischen Eigenschaften wie Temperatur, Emissionsgrad, Reflexionsgrad und Absorptionsgrad ab (FOUAD und RICHTER 2006).

Das Strahlungsgesetz eines schwarzen Körpers besagt, dass die absorbierte Strahlung gleich der abgegebenen Strahlung ist, da sich die Temperatur per Definitionem nicht ändern darf und ein thermisches Gleichgewicht mit der Umgebung vorliegt.

Daraus ergibt sich das 1879 beziehungsweise 1884 von STEFAN und BOLTZMANN formulierte Stefan – Boltzmann Gesetz welches besagt, dass die von einem schwarzen Körper ausgehende spezifische Ausstrahlung M nur von der Innentemperatur des schwarzen Körpers abhängig ist (FOUAD und RICHTER 2006).

$$M \text{ [W/m}^2\text{]} = \sigma \cdot T^4 = C_s \cdot (T/100)^4 \text{ [35]}$$

M = Ausstrahlung in W/m^2

σ = Stefan-Boltzmannsche Konstante = $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \text{ K}^4\text{)}$

C_s = Strahlungskoeffizient des schwarzen Körpers = $5,67 \text{ W/(m}^2 \text{ K}^4\text{)}$

T = absolute Temperatur $T[\text{K}] = 273,15 + \theta \text{ [}^\circ\text{C]}$

Die spezifische Ausstrahlung M gibt die über das gesamte Wellenlängenspektrum aufsummierte Energiemenge wieder. Somit kann die Verteilung der Schwarzkörperstrahlung über die Wellenlänge ermittelt werden. Dieser Zusammenhang zwischen der Objekttemperatur des schwarzen Strahlers und der spezifischen Ausstrahlung in Abhängigkeit von der Wellenlänge wurde 1900 von Max PLANCK abgeleitet (FOUAD und RICHTER 2006).

Aus den beiden Gesetzen ergibt sich, dass sich das spezifische Strahlungsmaximum mit steigender Absoluttemperatur zu immer kürzeren Wellenlängen verschiebt. Die Lage der

spezifischen Ausstrahlungsmaxima, das heißt die Wellenlänge bei der ein Körper die größte Ausstrahlung aufweist, kann mit Hilfe des Wienschen Verschiebungsgesetzes berechnet werden:

$$\lambda_{\max} = \frac{2898 \text{ K} \cdot \mu\text{m}}{T} \quad [36]$$

$\lambda_{\max}$ = Wellenlänge, bei der das Ausstrahlungsmaximum erreicht ist [μm]

T = absolute Temperatur T[K] = 273,15 + θ [$^{\circ}\text{C}$]

Trifft elektromagnetische Strahlung auf einen realen Körper, werden Strahlungsanteile absorbiert (in Wärme umgesetzt) oder reflektiert, bei durchlässigen Körpern kann ein Teil transmittiert (durchgelassen) werden.

Je nach den jeweiligen Stoffkenngrößen des Körpers und der jeweiligen Wellenlänge werden die Anteile an absorbierter, reflektierter oder transmittierter Strahlung unterschiedlich sein.

Da ein realer Körper immer weniger Strahlung emittiert als ein schwarzer Körper kann dessen Emissionsverhalten mit Hilfe des Kirchhoffschen Gesetzes beschrieben werden, welches besagt das bei einem Körper im thermischen Gleichgewicht der Absorptionsgrad gleich dem Emissionsgrad ist, wobei die absolute Größe des Absorptions- Emissionsgrades von dem vorliegenden Wellenlängenbereich abhängig ist (FOUAD und RICHTER 2006).

Da die Infrarot Thermographie auf Entfernung, berührungslos erfolgt, sind die Einflüsse der Umgebung mit zu berücksichtigen. Durch die Atmosphäre/Luft kann es zu molekularer Absorption durch Wasserdampf kommen. Auch CO_2 kann durch molekulare Absorption Fehler verursachen.

Des Weiteren ist die Streuwirkung von Molekülen und Schwebstoffen zu beachten.

Es muss auch darauf geachtet werden, dass die Hintergrund- und Umgebungsstrahlung genau bestimmt wird um Fehler zu vermeiden (FOUAD und RICHTER 2006).

6. Material und Methoden

6.1 Hedera helix

Als Versuchspflanze wurde hauptsächlich der Efeu (*Hedera helix*) gewählt.

Dies aus folgenden Gründen, er steht als immergrünes Gehölz das ganze Jahr über zur Verfügung, lässt sich vegetativ vermehren, was bedeutet, dass man bewurzelte Blätter ziehen und diese in einem kleinen Topf gleich für die Versuche nehmen kann. Seine Blätter sind robust, glatt und damit für Versuche mit diversen Blattkammern und Porometern geeignet, da sich der Einfluss der Blattstruktur (Behaarung, Zerteilung) ausschließen lässt. Da der Efeu eine schattentolerante Pflanze ist, kann auch bei diffuserem oder schwächerem Licht gemessen werden.

Die Auswahl der Porometertypen erfolgte nach dem Aspekt der Vergleichbarkeit zwischen zwei unterschiedlichen Messprinzipien und der gravimetrischen Messmethode, wobei auch diese zwei unten beschriebenen Gerätetypen am Institut regelmäßig Verwendung finden und die resultierenden Messergebnisse damit auch praktische Relevanz haben.

Eine Waage der Firma Sartorius Typ BP 221S mit einer 10^{-4} g-Auflösung wurde gewählt, um auch sehr geringe Änderungen des Gewichtes der Blätter erfassen zu können. Des Weiteren verfügt dieser Waagentyp eine RS232 Schnittstelle, womit es möglich wird, mit einem Computer mit entsprechendem Programm, den Gewichtsverlauf in Echtzeit mit zu loggen.

Hedera helix



Abb. 18: *Hedera helix*, Sonnenblätter und blütentragende Sprosse



Abb. 19: *Hedera helix*, Sonnenblätter, Schattenblätter (unten) und blütentragende Sprosse

Die Gattung *Hedera* umfasst 15 Arten. In Europa kommen 3 Arten vor, nur eine davon ist in Mitteleuropa heimisch. Der Efeu gehört zur Familie der Araliengewächse (Araliaceae).

Die meisten der 700 Arten aus 55 Gattungen sind tropische Bäume und Sträucher. In Nordamerika und Ostasien dringen mehrere Arten bis weit in die gemäßigten Zonen vor (DIERSCHKE 2005).

Der Efeu gehört zu den wenigen immergrünen Laubgehölzen unserer mitteleuropäischen Flora. Außerdem ist er der einzige heimische Wurzelkletterer. Er gilt in Mitteleuropa als laurophylls Tertiärrelikt. Er kommt in drei Erscheinungsformen vor. Unter klimatisch eher ungünstigen Bedingungen wächst er dicht am Boden, wo er im Winter unter Laub und Schnee vor stärkeren Frösten geschützt ist. Diese Bodenform fügt sich als immergrüner, holziger Chamaephyt problemlos in die Krautschicht unserer Wälder ein und kann sich mit am Ende weiter wachsenden und einwurzelnden Kriechtrieben vegetativ ausbreiten. Unter günstigeren Klimabedingungen, vor allen ohne starke Winterfröste, zum Beispiel im atlantisch getönten westlichen Mitteleuropa bis Westeuropa, auch in feuchteren Bereichen des Mittelmeergebietes, klettert der Efeu mit sprossbürtigen Haftwurzeln als Phanerophyt bis über 20 m hoch in die Bäume, auf Felswände oder Ruinen (DIERSCHKE 2005).

Die Sprosse sind zweigestaltig, Kriech- und Klettersprosse sind zunächst abgeflacht, dicht mit Sternhaaren bekleidet. Unterseits ist er mit büschelig oder bandartig angeordneten, kurzlebigen, etwa 5 mm langen, verholzenden Haftwurzeln versehen.

Die Laubblätter sind zweizeilig angeordnet, mit 1,5 bis 10 cm langen Stielen. Ihr Umriss ist stumpf dreieckig, das Blatt ist drei bis fünf lappig, oberseits dunkelgrün, am Grund herzförmig. Die Aderung ist fingerförmig.

Blütentragende Sprosse sind rundlich und stets ohne Wurzeln, mit wechselständigen, ungelappten, rauten- oder fast herzförmigen lang zugespitzten Blättern. Es liegt somit Heterophyllie vor.



Abb. 20: Heterophyllie bei *Hedera helix*, links Blatt eines Klettersprosses, rechts Blatt von eines blütentragenden Sprosses

Beide Blattparten sind hypostomatisch, die Spaltöffnungen finden sich auf der Blattunterseite, die Oberseite des Blattes ist durch eine dicke Cuticulaschicht gegen Wasserverlust geschützt. Die Spaltöffnungen sind vom Heleborustyp und unregelmäßig über die Blattfläche verteilt.

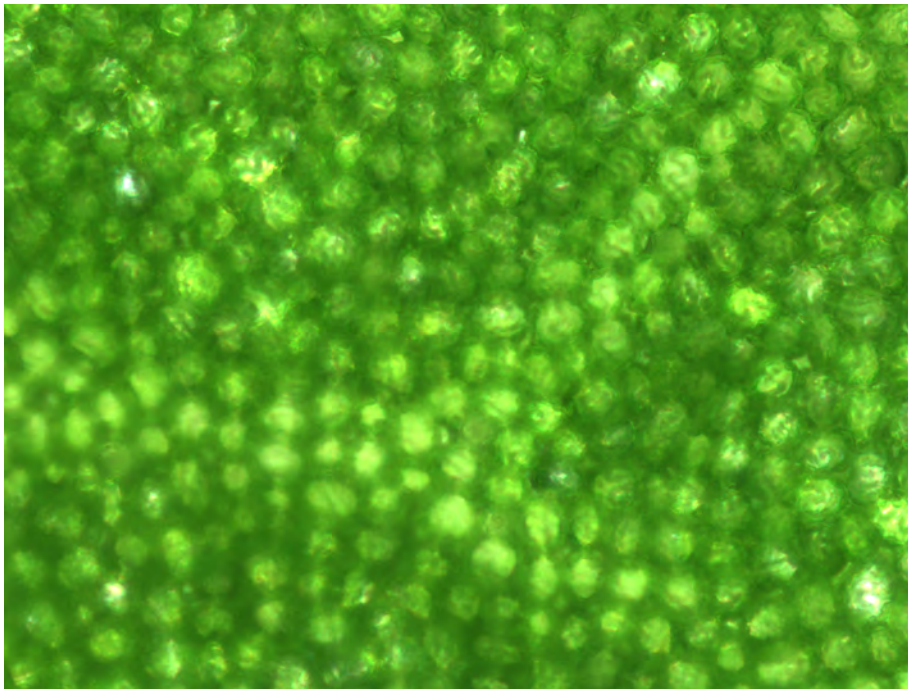


Abb. 21: Blattoberseite (Lichtmikroskop 200 fache Vergrößerung)

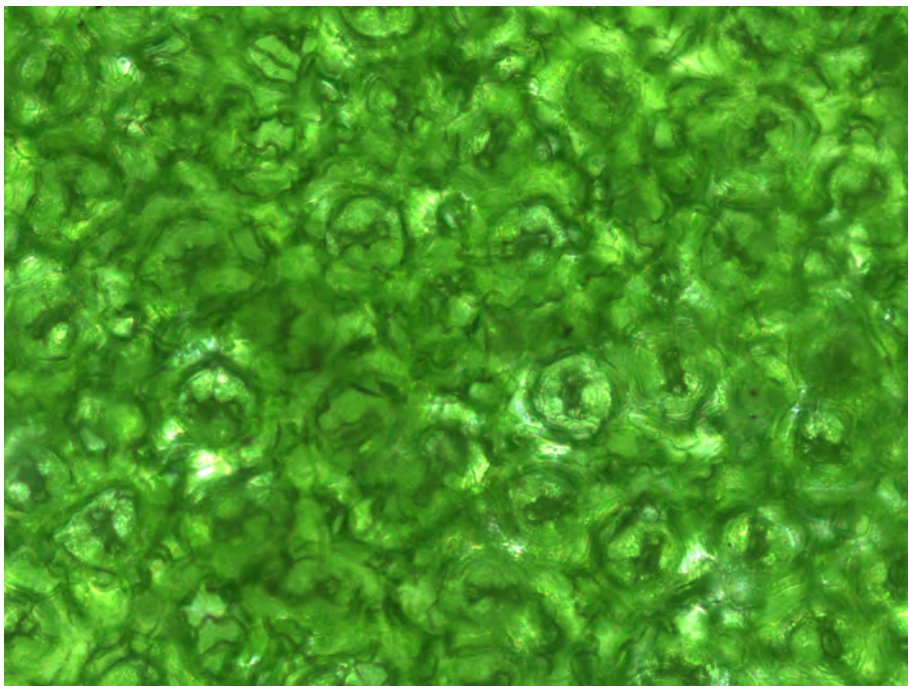


Abb. 22: Blattunterseite mit Spaltöffnungen (Lichtmikroskop 400 fache Vergrößerung)

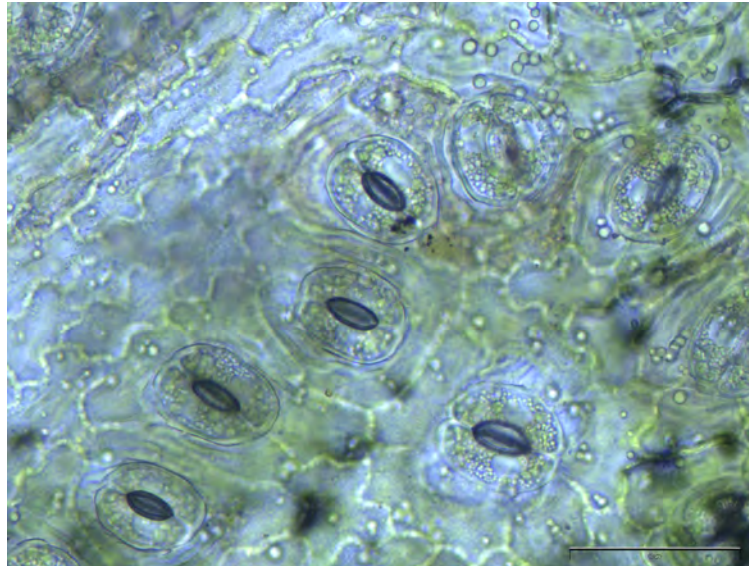


Abb. 23: *Hedera helix* Spaltöffnungen (Lichtmikroskop, Schnitt 400 fache Vergrößerung)

Blüten sind zwittrig, fünf zählig, in endständigen 6-10 cm langen Rispen mit doldigen Teilblütenständen. Die Kelchblätter sind unscheinbar ca. 0,5 mm groß, Kronblätter sind 4 mm lang, lanzettlich und gelbgrün. Die Staubblätter sind 3 mm lang und aufrecht. Zwischen Staubblättern und Griffel befindet sich eine breitkegelige, reichlich Nektartröpfchen abgebende Nektarscheibe. Der Fruchtknoten ist halbunterständig, fünffächrig und wächst zu einer blauschwarzen runden Steinfrucht.

Bestäubt wird der Efeu von Insekten. In der Blütezeit von September bis Oktober dient der Efeu vielen Bienen, Wespen, Hummeln und sogar Schmetterlingen als letzte Nahrungsquelle vor dem Winter. Die Früchte reifen von Februar bis April und dienen den einheimischen Vogelarten als Nahrungsquelle. Somit erfolgt die Fruchtverbreitung hauptsächlich durch Vögel.

Der Efeu ist relativ anspruchslos bezogen auf Wasser- und Nährstoffversorgung, meidet in Mitteleuropa aber sehr saure und nasse Standorte, während er im atlantischen Westen eine breitere Standortamplitude besitzt. Von ELLENBERG wird er als Halbschattenpflanze mit Schwergewicht in tieferen (bis submontan- temperaten) Bereichen unter allgemein

ozeanischem Klima auf frischen Böden und gegenüber Säuregrad und Stickstoffversorgung indifferent eingestuft (ELLENBERG et al. 1992). Die Ansprüche an die Bodenfeuchtigkeit scheinen noch eher geringer, da der Efeu teilweise gut auf warm-trockenen Waldstandorten wächst. In Westeuropa kommt *Hedera helix* in fast allen Laubwäldern von nass bis trocken und sauer bis basenreich vor.

Bezüglich seines Lichtanspruches ist *Hedera helix* genügsam und kommt mit geringem Lichtangebot zurecht. Er hält sich noch im stark schattigen Unterwuchs von sommergrünen Laubwäldern, bevorzugt aber die lichtereren Bereiche, wo er höhere Biomasse und Deckung entwickelt.

Zum Temperaturbedürfnis beziehungsweise zur Frostresistenz liegt der Temperaturbereich bei -10 bis -15 °C für laurophylle Arten in Mitteleuropa zu denen auch *Hedera helix* zählt. Eher zum Problem wird der gefrorene Boden, bei längerem Bodenfrost kommt es zur Frostdrocknis.

Hedera helix kommt von Europa bis Westasien vor, bevorzugt in feuchten und winter milden Lagen, vor allen in Buchen-Eichen- und Auenwäldern; in Südosteuropa in Kastanienwäldern; auf frischen, nährstoffreichen, lockeren neutralen bis mäßig sauren Lehm- und Mullböden. In Mitteleuropa vor allem im Westen und Süden, in den Mittelgebirgen bis 800 m, in den Nordalpen bis 1200 m ansteigend (HECKER 1998, DIERSCHKE 2005).

6.2 „Anwelk-Methode“ nach A. ARLAND, Berechnung der Transpiration

Um das stomatäre „Verhalten“ vom Efeu einschätzen zu können, wurden anfangs Versuche mit einer leicht abgeänderten „Anwelk-Methode“ nach A. ARLAND durchgeführt. Abgewandelt in dem Sinne, dass die Blätter ohne Wurzel gewogen wurden. Mit den aus diesen Versuchen ermittelten Daten wurden die Parameter für die folgenden Versuche festgelegt.

Der Efeu lag im Fall dieser Versuche nicht als ganze Pflanze oder als Sprossteil, sondern als einzelnes bewurzelter Blatt in einem kleinen Topf mit Erde vor. Damit wurde gewährleistet, dass die Blätter in etwa die gleiche Größe, sowie das gleiche Alter hatten.

National Instruments stellt Mess- und Simulationssoftware für Industrie und Forschung her. Da es als Anwender auch möglich ist, sich über Module Programme nach Bedarf zu schreiben und Anwendungen für eigene Bedürfnisse zu optimieren, wurden für die Gewichtserfassung und die Bildauswertung Programme von diesem Anbieter verwendet. Mit der Software Lab-View wurde das Programm zur Echtzeit Erfassung der Gewichtsänderung der transpirierenden Blätter erstellt. Die Waage wurde zur Datenerfassung mit der RS232 Schnittstelle mit dem Computer verbunden, dieser loggt die Gewichtsänderungen im 2 oder 5 Sekundentakt in Echtzeit mit und speichert diese in einem Textfile ab. Die Textfiles können dann in das Programm Excel zur weiteren Bearbeitung und Auswertung geladen werden.

Die Versuche wurden alle im Glashaus bei 45 % Luftfeuchtigkeit und 25 °C Lufttemperatur durchgeführt. Zusätzlich wurden Temperatur und Luftfeuchte noch mit einem Humichip (Firma Vaisala) der in die Waagenabdeckung gehängt wurde überprüft. Als Beleuchtung diente hauptsächlich das Tageslicht, im Winter wurde eine Zusatzbeleuchtung von vier Leuchtstoffröhren tagsüber dazu geschaltet.

Material und Methoden

Vor Beginn einer Messreihe wurde die korrekte Funktion der Waage mittels eines Kalibriergewichtes überprüft, der Wert wurde notiert, eventuelle Abweichungen aufgeschrieben.

Das Blatt wurde an der Stängelbasis nahe bei der Erde abgeschnitten, um einen so lang wie möglichen Stängelteil zur Befestigung zu haben, die Schnittwunde wurde mit Vaseline verschlossen. Anschließend wurde das Blatt in eine Halterung aus Draht auf der Waage eingehängt und das Computerprogramm zum Erfassen der Gewichtsänderung gestartet. Es wurde dabei darauf geachtet diese Schritte so schnell wie möglich durchzuführen, um einen eventuell vorkommenden IWANOFF-Effekt (LÖSCH 2001) beobachten zu können.

Während der Messung war einer der seitlichen Teile sowie der obere Teil der Waagenabdeckung aus Glas geöffnet, um zu verhindern, dass sich die Luftfeuchte in der Waage erhöht und sich dadurch die Wasserdampfabgabe des Blattes ändert. Luftfeuchte und Temperatur wurden, wie schon erwähnt, in der Waage zusätzlich noch mit einem Humichip gemessen. Der Versuchsaufbau wurde zwischen 25 und 45 Minuten (Anlehnung ARLAND 1955) belassen, innerhalb dieser Zeit registrierte das Computerprogramm die Gewichtsänderung alle 2 später alle 5 Sekunden. 5 Sekunden wurden später gewählt, da bei zwei Sekunden viel zu große Datenmengen entstanden und auch die Störungsanfälligkeit der Messung durch zum Beispiel Luftströmungen im Glashaus weniger wurde.

Es wurden auf gleiche Weise auch längere Versuche durchgeführt, wobei der Versuchsaufbau bis zu einer Stunde oder länger belassen wurde. Auch wurde versucht, den Unterschied zwischen verschlossener und nicht verschlossener Wundstelle (Schnittstelle) heraus zu arbeiten, indem etliche Messungen ohne vorhergehendes Bestreichen der Schnittstelle mit Vaseline gemacht wurden.

Bei den Versuchen wurde darauf geachtet, dass die Blätter gut gegossen waren, meistens

wurden diese zwischen 9:00 und 10:00 Vormittags durch die Gärtner gegossen. Es wurde nur davon ausgegangen, dass wenn die Blätter ca. 1 bis 2 Stunden vor Versuchsbeginn gut gegossen wurden, sie auch genug Wasser zur Verfügung hatten und folglich auch transpirierten.

Die Strahlung wurde in diesen Fall nicht immer aufgezeichnet, bei einigen Versuchen stand später ein entsprechender PAR-Sensor (SKY) mit Datenlogger (Firma Delta-T Devices) zur Verfügung. Dann wurde die Strahlung mit aufgezeichnet, um den Einfluss dieser auf die Transpirationsrate abschätzen zu können.

Des weiteren wurde zwecks Vergleichbarkeit darauf geachtet, dass stets ähnliche Blätter, mit einer $\pm$ gleichen Größe und Alter verwendet wurden, auch hier erwiesen sich die bewurzelten Blätter als vorteilhaft.

Parallel zu diesen Messungen mit Blättern wurden auch Messungen mit Modellblättern aus nassem Filterpapier durchgeführt, um einen Vergleich zwischen Transpiration als aktivem Prozess und der rein passiven Evaporation zu erhalten. Bei den Evaporationsversuchen als auch bei den Wägungen wurde auf die Lichtverhältnisse geachtet, dass die Modelle und Blätter nicht im direkten Sonnenlicht stehen sondern beschattet werden und die Lichtverhältnisse denen der Versuchsblätter entsprechen. Die Blätter wurden ca. eine Stunde vor Beginn der Versuche zur Akklimatisation immer neben die Waage gestellt.

Nach der Messung wurden die Blätter mit Datum und Versuchsnummer für die Flächenbestimmung beschriftet.

6.2.1 Bestimmung der Blattfläche

National Instruments Vision Assistant und Particle Analyses ist ein Programm zur Auswertung von Bilddaten.

Die Funktion Particle Analyses die in dieser Arbeit zur Bestimmung der Blattflächen benützt wird, besteht aus einer Reihe von Operationen und Analysefunktionen, die Informationen über Teile in einem Bild liefern. Ein Teil (Particle) ist eine zusammenhängender Bereich von nicht Null (0) Bildpunkten. Diese Bereiche können aus einem grau Werte Bild extrahiert werden, in dem der Bereich mit der Funktion „Treshold“ dem Vordergrund oder Hintergrund zugeordnet werden. Die als Null (0) definierten Bildpunkte werden dem Hintergrund zugeordnet, die als 1 definierten sind im Vordergrund. In einem binären Bild, sind die Hintergrund Bildpunkte immer Null (0) und jeder Bildpunkt der nicht Null (0) ist, also 1 ist Teil des binären Objektes.

Durch Ausführen der Funktion „Particle Analyses“ können zusammen gehörende Bereiche mit Gruppierungen von Bildpunkten selektiert vermessen, zum Beispiel ihre Fläche berechnet werden.

Da zur Berechnung der Transpiration die Blattflächen benötigt werden, wurden diese im nächsten Schritt bestimmt.

Dazu wurde zuerst ein Photo eines mit Auto CAD vorgefertigten 1 cm · 1 cm Rasters gemacht, dieses dient dazu die Größe des Blattes später mittels Bildbearbeitungsprogramm bestimmen zu können. Danach wurde das Blatt unter einer Glasplatte (damit es wirklich flach aufliegt) mit einem weißen Blatt Papier als Hintergrund photographiert. Dieses Bild wurde mitsamt dem schon vorher photographierten Raster in das Bildbearbeitungsprogramm Vision Assistant von National Instruments geladen und mit diesem die Blattfläche bestimmt.

Um einen Vergleich zu bekannten Flächen zu haben, wurden mit Hilfe von Auto-Cad

Material und Methoden

definierte Objekte mit blattähnlicher Form gezeichnet (siehe Abb. 25), deren Flächen dann noch einmal zusammen mit den Blattflächen bestimmt wurden. Aus der Flächenabweichung dieser Objekte (mit bekannter Fläche) konnte dann ermittelt werden, um wie viel Prozent die Blattflächen bei den einzelnen Flächenbestimmungen schwanken können, das heißt wie groß die $\pm$ Abweichungen der Messung sein können.

Diese Art der Blattflächen Bestimmung wurde für alle folgenden Versuche wo eine Bestimmung der Blattfläche erforderlich war, beibehalten.

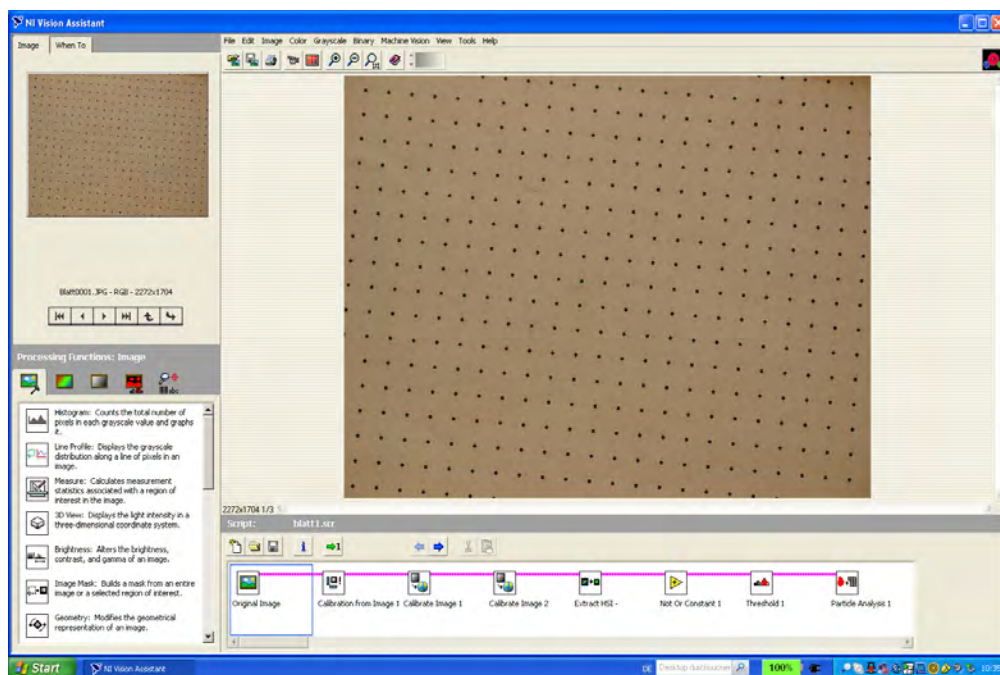


Abb. 24: Mit dem Zeichenprogramm Auto-Cad erstelltes maßstabsgetreues Raster

Das mit dem Zeichenprogramm Auto-Cad gezeichnete und maßstabsgetreu ausgedruckte Raster wurde photographiert und in das Bildbearbeitungsprogramm geladen (Abb. 24). Mit der Programmfunktion „original Image“ wird das 1·1 cm Raster kalibriert. Die durch die Optik des Photoapparates entstandene Verzerrung des Bildes wird durch Wahl der nicht linearen Entzerrung entzerrt. Mit der „Treshhold“ Funktion werden die zu bestimmenden Bildpunkte in den Vordergrund gesetzt, die restlichen Bildpunkte werden als Hintergrund

Material und Methoden

definiert.

Der Vordergrund erscheint rot, die Hintergrundelemente sind schwarz, es liegt somit ein binäres Bild vor, Rot = 1, Schwarz = 0. Danach werden die Abstände der Rasterpunkte in X- und Y-Richtung in cm definiert. Durch Ziehen einer Geraden, die über die Bilddiagonale alle Punkte mit einander verbindet wird die Kalibrierachse festgelegt. Danach werden die Kalibrierdaten gespeichert.

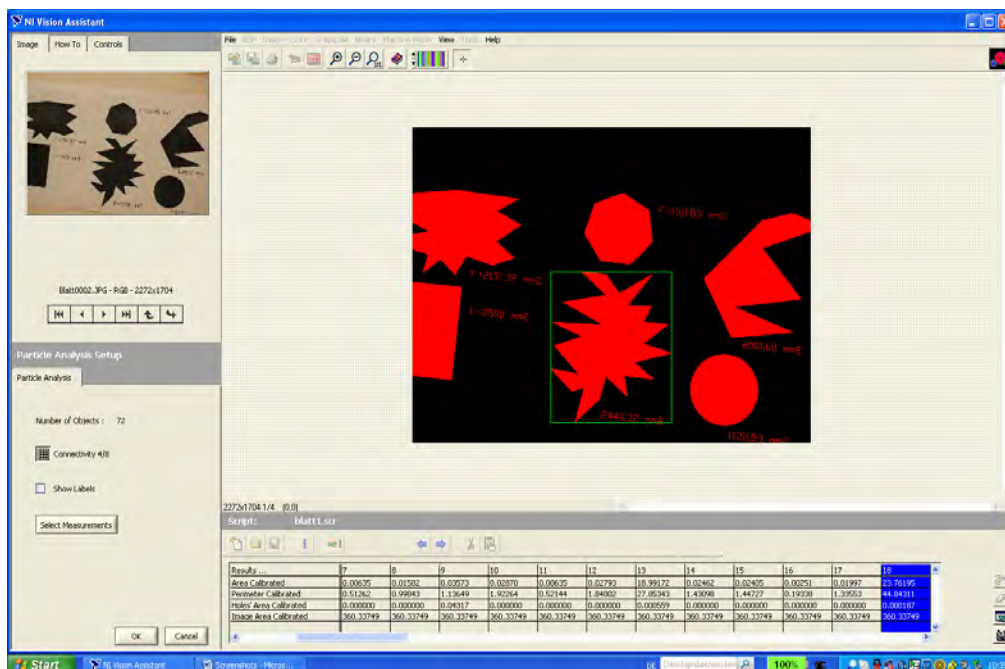


Abb. 25: Kalibrierformen zur Berechnung der Abweichung der Flächenbestimmung

Nun wird das Bild mit den Kalibrierformen geladen und mittels „Particle Analyses“ werden die Flächen berechnet. Dazu werden die Daten vom Rasterbild in das neue Bild eingefügt beziehungsweise überlappt, dies erfolgt mit der Funktion „Calibration from Image 1“ und mit „Calibrate Image“ wird das Bild für die Berechnung von realen Einheiten eingerichtet. Danach wird das Farbbild durch Extraktion der drei Farben (Rot, Grün, Blau) in ein Grauwertebild umgewandelt. Als nächster Schritt werden die Farben invertiert. Mit der „Threshold“ Funktion werden die Bildpunkte in der Vorder- Hintergrund gesetzt, es liegt ein Rot (1), schwarzes (0) Bild vor wo die roten Bereiche mit der Funktion „particle analyses“

Material und Methoden

berechnet werden und im Fall der Kalibrier- beziehungsweise Blattflächen in cm^2 ausgegeben werden.

Nach erfolgreicher Berechnung der Kalibrierflächen werden die Blattbilder eingefügt und mit den beschriebenen Funktionen in angegebener Abfolge berechnet, siehe Abb. 26 und 27.

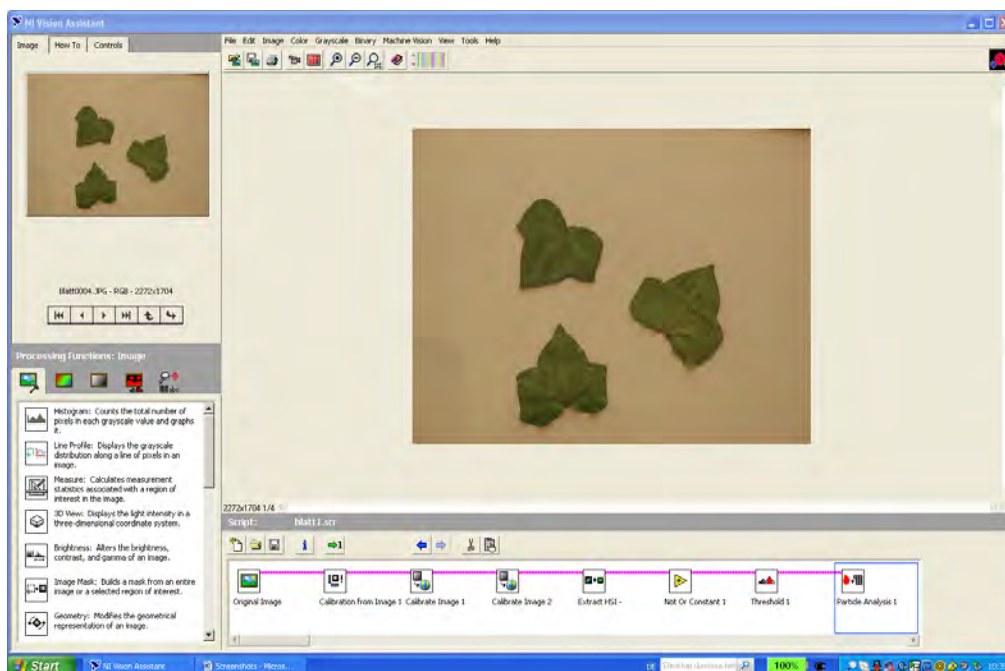


Abb. 26: Blattbilder zur Flächenbestimmung

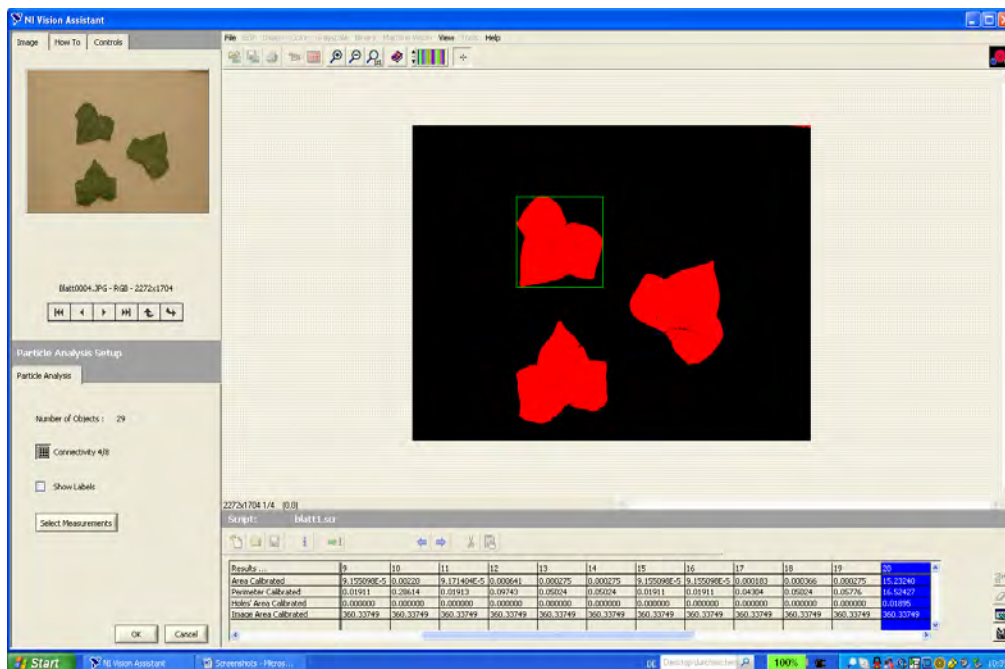


Abb. 27: Berechnete Blattflächen

6.2.2 Berechnung der Transpiration

Die aus den Messungen gewonnen gravimetrischen Daten wurden, um die Kurven zu Glätten, da die Waage während der Messung auf Störungen empfindlich reagiert, über 1, 2, 5 und 10 Minuten gleitend gemittelt. Eine genaue Betrachtung der Kurven ergab, dass eine gleitende Mittelung erstens zu einer Verschiebung der Kurven führte, und zweitens, dass eine Mittelung über mehr als eine Minute zu sehr glättet, also das Messdaten verloren gehen. Deshalb wurde über eine Minute wie folgt gemittelt: es wurden immer sechs Werte unterhalb und oberhalb des Minutenwertes in die Mittelung einbezogen. Eine Kontrolle der Kurven ergab eine Überlappung der Mittelwertkurven über 2, 5 und 10 Minuten mit den über eine Minute gemittelten Kurven. Diese Methode zur Mittelung wurde für alle Versuche, wo eine Mittelung notwendig war, beibehalten.

Aus den ein Minuten Werten wurde eine Masse Kurve erstellt, um einen ersten Trend im Gewichtsverlauf des Blattes beurteilen zu können, etwa um sehen zu können, ob die Messung überhaupt funktioniert hat oder ob etwas bei der Datenaufzeichnung schief gegangen ist. Durch Erschütterungen kommt es zum Beispiel zu 0-Stellen in der Messung.

Sind zu viele solcher „Fehler“ muss die Messung verworfen werden, da nur bis zu einem gewissen Grad interpoliert werden kann.

Aus den gemittelten Gewichtswerten wurde dann, die Transpiration nach folgenden Formeln (STOCKER 1956) berechnet:

$$\text{Transp.} = \frac{\text{FG} - \text{EG}}{2A \cdot t} \quad [37]$$

Transp. = Transpiration [$\text{mg cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$]

FG = Frischgewicht (Anfangsgewicht) [g]

EG = Endgewicht [g]

A = Blattfläche [cm^2]

t = Zeit in Minuten

$$\text{Transp.} = \frac{\text{FG} - \text{EG} \cdot 6}{2A \cdot t} \quad [38]$$

Transp. = Transpiration [$\text{g dm}^{-2} \text{ h}^{-1}$]

FG = Frischgewicht (Anfangsgewicht) [mg]

EG = Endgewicht [mg]

A = Blattfläche [cm^2]

t = Zeit in Min.

Die prozentuelle Transpiration sowie die relative Transpiration lassen sich wie folgt berechnen:

$$\text{Transp.} = \frac{\text{FG} - \text{EG}}{\text{FG oder (TG)} \cdot t} \cdot 100 \quad [39]$$

Transp. = Transpiration in % FG (TG)

FG = Frischgewicht (Anfangsgewicht) [g]

Material und Methoden

EG = Endgewicht [g]

TG = Trockengewicht [g]

t = Zeit in Minuten

$$\text{Transp.}_{\text{rel}} = \frac{\text{Transpiration}}{\text{Evaporation}} \quad [40]$$

Für die Kurven sowie die Ergebnisse der Transpirationsversuche wurde die Transpiration in $\text{g}/(\text{dm}^2 \cdot \text{h})$ durch Multiplikation mit dem Faktor 1,542 noch in $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ umgerechnet um eine bessere Vergleichbarkeit mit den Messwerten der Porometer zu haben, die Messwerte der Porometer wurden ebenfalls in $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ umgerechnet.

Die Evaporation wurde wie die Transpiration aus den oben angeführten Formeln berechnet, nur wurde in allen Fällen mit zwei Seiten gerechnet, als Anfangsgewicht dient das Nassgewicht des gut abgetropften Filterpapierblattes.

Ausgewertet wurden die Daten nach folgenden Aspekten: die Gesamttranspiration innerhalb der gesamten Versuchsdauer, der prozentuelle Massenverlust während der gesamten Versuchsdauer für jedes Blatt, die Anfangs- und Endtranspirationsrate, sowie die relative und prozentuelle Transpiration bezogen auf das Anfangsgewicht. Die Blätter wurden untereinander verglichen um Trends, Ähnlichkeiten und die stomatären Reaktionen besser zu erfassen. Anhand dieser Ergebnisse wurde die Versuchszeit für die weiteren Versuche gewählt.

6.3 Untersuchung des Transpirationsverhaltens der Blattober- und Unterseite mittels Wägung

Für diese Versuche wurde eine Versuchszeit von 25 bis 30 Minuten gewählt. Diese wurde mit den vorhergehenden Messungen bestimmt. Innerhalb dieser Zeitspannen reagieren die Stomata mit langsamen Schließen, was sich aus den Messkurven heraus lesen lässt.

Nach circa 30 Minuten flachen die Kurven ab, der geringe Gewichtsverlust, sowie die sinkende Transpirationsrate gehen schließlich in einen wahrscheinlich rein cuticulär bedingten Wasserverlust über.

Die Blätter wurden jeweils auf der Ober- oder Unterseite mit einem Pinsel mit Vaseline dünn bestrichen, danach, wie in den vorgehenden Versuchen abgetrennt, die Schnittstelle ebenfalls mit Vaseline bestrichen und an der Drahthalterung auf der Waage befestigt. Als Kontrollversuch wurde ein Blatt beidseitig mit Vaseline bestrichen. Wieder blieben die seitliche und die obere Waagenabdeckung geöffnet. Der Computer wurde zur Erfassung der Gewichtsänderung gestartet.

Anschließend wurden die Blattflächen bestimmt und die Transpirationsraten sowie die Evaporation des Modellblattes, wie schon beschrieben, berechnet.

Ausgewertet wurden die Daten mit Hinblick auf Unterschiede in der Transpiration zwischen der Blattoberseite und der Blattunterseite. Da der Efeu hypostomatisch ist, er hat nur auf der Blattunterseite Spaltöffnungen, ist zu erwarten, dass die Menge an abgegebenem Wasserdampf geringer ist, wenn die Unterseite des Blattes mit Vaseline verschlossen ist. Da die Oberseite der Efeublätter auch eine dicke Cuticula hat, ist der Wasserverlust über diesem Weg wahrscheinlich eher gering bis sehr gering. Das Kontrollblatt dürfte dagegen keinen Wasserverlust zeigen.

Es wurden daher die Differenzen zwischen Blattoberseite und Blattunterseite miteinander verglichen und als Kurven und auch als prozentuelle Werte dargestellt. Des Weiteren wurden die Werte mit den Daten aus den vorhergehenden „Anwelk-Versuchen“ verglichen.

6.4 Vergleich der gravimetrischen Methode mit dem PMR-4 Porometer

Um einen Vergleich mit der gravimetrischen Methode zu haben, wurden Versuche mit der Waage und mit dem PMR-4 Steady State Porometer durchgeführt. Dabei wurde bei der Wägemethode das Blatt, wie bei der „Anwelk-Methode“ gewogen und die Transpiration nach Gleichung [37] und [38] für eine und beide Blattseiten berechnet. Im Vergleich dazu wurde mit dem PMR-4 Porometer die Blattunter- und Oberseite gemessen. Diese Werte wurden für die Wägung und die Porometrie für jede Blattseite und für beide Blattseiten als Messkurven dargestellt.

6.4.1 PMR-4 Steady State Porometer

Das PMR-4 Steady State Porometer der Firma PP-Systems ist ein „continuous flow“ Porometer bei dem, wie schon in Kapitel 5.3 beschrieben, der Durchfluss eingestellt und während des Versuches konstant gehalten wird. Spezifikationen und Abbildung siehe Anhang A1.

6.4.1.1 Aufbau und technische Daten (PP-SYSTEMS 2002)

Das Gerät besteht aus einem Aluminiumgehäuse welches die Trockeneinheit, die Luftpumpen, eine LCD-Anzeige, die Spannungsversorgung inklusive Batterie sowie die Steuer- und Regelelektronik enthält, und aus der Blattkammer die aus einer speziellen Aluminiumlegierung gefertigt ist, der eine sehr geringe Absorption und Adsorption gegenüber Wasserdampf zeigt.

In der Blattkammer befindet sich ein durchsichtiges Fenster aus speziell beschichtetem Glas durch welches das gemessene Blatt Licht bekommt. Des Weiteren befinden sich in der Blattkammer noch zwei kapazitive Feuchtesensoren, ein PT-100-Platindraht Widerstandsthermometer, sowie ein PAR Sensor zur Messung der photosynthetisch aktiven Strahlung. Die Kammer ist mit einem Luftschlauch am Gerätegehäuse angeschlossen und wird mit einem getrocknetem Luftstrom konstant durchströmt.

Um den Luftstrom zu messen, befinden sich im Gehäuse noch Sensoren zum Messen des

Luftvolumens beziehungsweise der Luftgeschwindigkeit.

Gerätespezifikationen:

- Blattkammerfenster Größe: 25 mm x 5 mm
- Blattkammerfenster mit Interferenzfilter, welches Strahlung groß teils unter 700 nm (< 50% Transmission bei 710 nm) durchlässt.
- Messbereich der Stomataleitfähigkeit: 0-9,999 mmol/(m²·s)
- Messgenauigkeit: < 40 µmol/(m²·s) = 10%
> 40 µmol/(m²·s) = 20%
- Feuchtemessung: 2 kapazitive Feuchtesensoren
- Temperaturmessung: liniarisiertes Thermistor Netzwerk
- Kalibrierengenauigkeit der Messung der relativen Feuchte Absolut: 2%
Differenziell: 1%
- PAR Sensor Messbereich: 400 nm bis 700 nm
- PAR Sensor Genauigkeit: 10 µmol/(m²·s)
- Luftzufuhrregelung: Durchfluss von 0 – 200 ml/min

6.4.1.2 Funktionsweise (PP-SYSTEMS 2002)

Das mit der Blattkammer eingeklemmte Blatt oder Blattteil gibt bei der Transpiration Wasserdampf ab. Dieser, in die Blattkammer abgegebene Wasserdampf führt zu einer Änderung der Wasserdampfkonzentration in der Blattkammer, welche von Feuchtesensoren gemessen wird. Da die Blattkammer mit einem konstanten Luftstrom mit bekannter Feuchte und Durchflussgeschwindigkeit durchströmt wird, kann aus der in die Blattkammer einströmenden Feuchte die am Anfang gemessen wird, und aus der die Blattkammer verlassenden Feuchte die wieder gemessen wird, die stomatäre Leitfähigkeit bestimmt werden. Dazu ist es notwendig dass, das transpirierende Blatt ein Gleichgewicht mit der durchströmenden Luft erreicht, das heißt, das Blatt liefert so viel Feuchtigkeit nach, wie gerade durch den Luftstrom abgeführt wird, der Messwert ändert

sich dann nur mehr wenig. Um den Einfluss der Umgebungsbedingungen zu berücksichtigen, werden noch die Blattkammertemperatur sowie die auf das Blatt treffende Strahlung gemessen. Aus diesen Messwerten werden dann die stomatäre Leitfähigkeit und die Transpiration berechnet.

6.4.1.3 Berechnung (PP-SYSTEMS 2002)

Unter der gegebenen Bedingung, dass die Luft, welche die Blattkammer verlässt, repräsentativ, der in dieser herrschenden Luftfeuchte ist und damit die Wasserdampfabgabe des Blattes widerspiegelt, ergibt sich die Transpirationsrate wie folgt:

$$E = (\chi_a - \chi_i) \cdot Q \quad [41] \quad \text{wobei}$$

$$E = \frac{A \cdot (\chi_l - \chi_a)}{(r_l + r_a)} \quad [42]$$

ist. Werden beide Gleichungen zusammengeführt und nach r_l aufgelöst, ergibt sich:

$$r_l = \frac{A \cdot \left(\frac{\chi_l - \chi_a}{\chi_a - \chi_i} \right)}{Q - r_a} \quad [43]$$

E = Transpirationsrate [$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] oder [$\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]

A = Blattfläche in der Blattkammer [cm^2]

χ_a = Wasserdampfkonzentration in der Luft [g/m^3] oder [mol/m^3]

χ_i = Wasserdampfkonzentration der in die Blattkammer einströmenden Luft [g/m^3] oder [mol/m^3]

χ_l = Wasserdampfkonzentration im Blatt die sich im Gleichgewicht mit freiem Wasser bei Blattemperatur befindet. [g/m^3] oder [mol/m^3]

Q = Durchflussrate der in die Blattkammer strömenden Luft [m^3/s]

r_a = Grenzschichtwiderstand beim Übergang von der Blattoberfläche, wo der Gasaustausch über Diffusion statt findet zum Bereich wo turbulente Strömung vorherrscht. [s/m]

r_l = Widerstand der Blattepidermis, Summe aus dem cuticulären und stomatären Widerstand.

Material und Methoden

Diese Gleichung, die bei allen „offenen“ Küvetten angewendet werden kann, gibt den Widerstand der Blattepidermis gegenüber Wasserdampfabgabe wieder. Zusätzlich muss noch die Blatttemperatur und die Temperatur des Feuchtesensors in der Küvette gemessen und in die Berechnung einbezogen werden, es ergibt sich dann die

Energiebilanzgleichung:

$$\frac{\rho \cdot C_p \cdot (T_a - T_l)}{r_H} + \sigma \cdot (T_{CH}^4 - T_l^4) + \alpha \cdot I + \frac{\lambda \cdot (\chi_a - \chi_l)}{(r_a + r_l)} = 0 \quad [44]$$

hierbei beschreibt der erste Teil die fühlbare Wärme, der zweite Term die langwellige Strahlung, der dritte Term gibt den Anteil an kurzwelliger Strahlung an und der letzte Term den Anteil der latenten Wärme.

T_l = Blatttemperatur [$^{\circ}\text{C}$]

T_a = Lufttemperatur [$^{\circ}\text{C}$]

T_{CH} = Küvettemperatur [$^{\circ}\text{C}$]

ρ = Dichte der Luft [kg/m^3]

C_p = spezifische Wärme der Luft [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]

I = Gesamtmenge an kurzwelliger Strahlung die auf das Blatt trifft [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]

σ = Stefans Konstante

α = Anteil der absorbierten kurzwelligen Strahlung (Konvertierungsfaktor) [$\text{W m}^{-2} / \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$]

λ = latente Wärme der Verdunstung von Wasser [J/kg]

χ_a = Wasserdampfkonzentration in der Luft [g/m^3] oder [mol/m^3]

χ_l = Wasserdampfkonzentration im Blatt die sich im Gleichgewicht mit freiem Wasser bei Blatttemperatur befindet. [g/m^3] oder [mol/m^3]

r_a = Grenzschichtwiderstand beim Übergang von der Blattoberfläche, wo der Gasaustausch über Diffusion statt findet zum Bereich wo turbulente Strömung vorherrscht. [s/m]

r_l = Widerstand der Blattepidermis, dieser setzt sich aus dem cuticulärem und dem stomatärem Widerstand zusammen. [s/m]

r_H = gesamter Widerstand des Blatt - Wärmeaustausches [s/m]

Aus dieser umfangreichen Energiebilanzgleichung des Blattes in der Küvette wird dann der stomatäre Widerstand und aus diesem (als Kehrwert) die stomatäre Leitfähigkeit berechnet. Dabei ist zu beachten, dass einige Werte in der Gleichung als Annäherungen eingesetzt werden, andere Werte, wie zum Beispiel r_a und r_H wurden extern, über die Verdunstung eines Modellblattes aus Papier bestimmt (MARSHALL und WOODWARD 1985).

Um einen Vergleich mit den bis jetzt durchgeführten Messungen zu haben, wurde auch diese Messreihe im Glashaus unter 45% Luftfeuchte und 25°C mit Tageslicht durchgeführt.

Es wurden wie schon in den beschriebenen Versuchen bewurzelte Blätter in einem Topf mit Erde verwendet.

Vor Beginn der Messungen wurde das Porometer eingestellt. Nach dem Einschalten des Gerätes wurde der Feuchtesensor angeglichen. Dies erfolgt indem bei geschlossener Messkuvette ohne Blatt der Feuchteregler des Gerätes so eingestellt wird, dass die Feuchtigkeit in etwa in dem zu erwartendem Messbereich liegt, oder zumindest in etwa Umgebungesfeuchte liegt (Vergleich mit Humichip). Damit wird sicher gestellt, dass die Messwerte in einem realistischen Bereich sind.

Nach Einstellen des Feuchtemessbereiches kann nun die Durchflussrate durch die Messkuvette eingestellt werden. Dazu wird der Durchfluss erst einmal so eingestellt, dass er in etwa 75 ml/min beträg. Danach wird ein typisches Versuchsblatt in die Messküvette eingeklemmt und mit der Regelung für den Durchfluss und dieser so eingestellt, dass die Feuchtedifferenz zwischen Eingangsluft und ausgehender Luft ca. 10% beträgt. Dabei ist zu beachten, dass der Durchfluss zumindest 30 ml/min betragen muss. Eine Verringerung der Durchflussrate führt zu einer Erhöhung der Differenz.

Nachdem die Durchflussrate eingestellt ist, muss noch die Feuchtigkeit in der Küvette abgeschätzt, beziehungsweise ihr Bereich eingestellt werden. Der eingehende Luftstrom kann durch das Um- oder Durchleiten von unterschiedlichen Luftmengen durch ein Trocknungsmittel, im Vergleich zur Umgebungsfeuchtigkeit, herunter getrocknet werden. Durch die Verwirbelungen in der Messküvette, ist die austretende Luftfeuchte annähernd ident mit der in der Küvette herrschenden und das Blatt umgebenden Luftfeuchte. Daher sollte die eingehende Luftfeuchte so eingestellt werden, dass die ausgehende Feuchte in etwa der Umgebungsfeuchte entspricht.

Jetzt kann mit den Messungen begonnen werden. Dabei ist darauf zu achten, dass die Messung nicht zu lange dauert, das Blatt sollte nicht länger als ca. 15 bis 30 Sekunden in der Messkammer verweilen, oder aber zumindest nur so lange, bis sich die Messwerte stabilisiert haben, dies ist an einer langsamen Änderung der Werte zu erkennen. Es ist aber auch nicht ratsam gleich die ersten Werte zu nehmen, da sie am Anfang der Messung, das heißt, unmittelbar nach einklemmen des Blattes in die Messküvette, noch sehr schwanken.

Vor dem Abtrennen des Blattes wurde eine Messung mit dem Porometer gemacht. Die Porometermessungen wurden grundsätzlich immer auf beiden Blattseiten, Ober- und Unterseite durchgeführt, um Vergleichswerte zu den anderen Versuchen zu haben.

Danach wurde das Blatt abgetrennt und die Wundstelle durch eintauchen in Vaseline so schnell wie möglich verschlossen, es wurde wieder eine Messung mit dem Porometer gemacht um die Reaktion des Blattes auf das Abtrennen zu erfassen, dann wurde das Blatt gewogen und abschließend in eine Drahthalterung auf seinen ursprünglichen Platz gestellt. Dies ist wichtig, da die Pflanze sonst auf mögliche Änderungen der Lichtverhältnisse oder Luftströmungen mit einem Schließen der Spaltöffnungen reagieren kann.

Nun wurden in fünf Minuten Intervallen die Porometermessung und die Wägung wiederholt und das Blatt dabei immer wieder nach den Messungen an seinen Platz gestellt. Bei der Porometermessung tauchte bald das Problem auf, dass man darauf zu achten hat nicht immer an den gleichen Stellen zu messen, da das zu einer Änderung des Öffnungszustandes der Spaltöffnungen führen könnte, so wurde versucht die Messkammerpositionen auf dem Blatt möglichst ohne Überlappungen zu verteilen.

Die Porometerwerte wurden mit der REC-Taste im Gerät gespeichert, die Wägungen, bei denen auch immer einige Sekunden gewartet wurde bis der Messwert stabil war, wurden in einer Messwertetabelle eingetragen. Die Versuchszeit lag zwischen 20 und 30 Minuten.

Nach Ende der Messserie wurden die gespeicherten Daten mit dem Transfer Programm des Porometers über die RS232 Schnittstelle auf den PC übertragen und gespeichert. Dazu wurde die Funktion „Dump Data“ verwendet. Die ausgelesenen Daten weisen folgendes Format auf:

PAR in $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$

% RH in %

% RH out %

Temperatur in $^{\circ}\text{C}$

Flow in ml/min

g_s (Stomatal Conductance) $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$

Bei der Porometrie werden die Daten zur CO_2 Bilanz nicht mit erfasst und ausgegeben.

Da das Gerät den Leitwert, also g_s ausgibt, muss der Transpirationswert mit Hilfe der anderen Daten, eingehende und ausgehende Feuchte, dem Durchfluss und der Temperatur berechnet werden. Dies geschieht mit folgender Formel, beziehungsweise Methode: (persönliche Information von Chris Bergweiler und J. Parkinson von PP Systems).

Zunächst wird der benötigte Wert mit der Basisgleichung berechnet, die Einheit dieser ist $[\text{ml}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})]$. Um diese Berechnung durchführen zu können, muss als Erstes X_s der Sättigungsdampfdruck berechnet werden:

$$X_s = 6,1121 \cdot \text{EXP}(T_{\text{leaf}} \cdot (18,564 - (T_{\text{leaf}}/254,4)) / (T_{\text{leaf}} + 255,57)) \cdot (RH_{\text{in}}/100) \quad [45]$$

mit dem Sättigungsdampfdruck kann mit nachstehender Gleichung weiter gerechnet werden,

$$\frac{((RH_{\text{outc}} - RH_{\text{ing}}) \cdot 10^{-2}) \cdot X_s \cdot V}{(A_{\text{MK}} \cdot ATMP)} \quad [46]$$

RH_{outc} = die herauskommende relative Luftfeuchte (RH_{out}) [%]

RH_{ing} = die eingehende relative Luftfeuchte (RH_{in}) [%]

X_s = ist der Sättigungsdampfdruck welcher der jeweiligen Temperatur und Luftfeuchte (RH_{in}) entspricht, in [mb].

V = der Luftstrom durch die Messkuvette (Flow) [ml/min]

A_{MK} = Fläche der Messkuvette [cm^2] = 1,25 (PMR-4)

$ATMP$ = zur Zeit der Messung herrschender Luftdruck, Geräte Ausgabe Wert [mb]

Da das PMR-4 Porometer die Porometertemperatur (T_c) nicht ausgibt, wird für diese die vom Gerät ausgegebene Blatttemperatur T_{leaf} eingesetzt. Die Differenz zwischen Blatt- und Küvettentemperatur ist geringer als 1°C und dadurch hält sich der mit dieser Annahme gemachte Fehler sehr gering.

Mit Hilfe der nächsten Gleichung [47] erfolgt die Umwandlung von $\text{ml}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ in die Einheit $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$.

$$\text{Wert} = \text{Ergebnis der Basisgleichung} \cdot \frac{10^4}{60 \cdot 22,414} \quad [47]$$

Material und Methoden

Für diesen Wert findet nun eine Temperaturkorrektur und im nächsten Schritt eine Druckkorrektur statt. Die Druckkorrektur ergibt schließlich den gewünschten Transpirationswert (E) in mmol/(m²·s).

Temperaturkorrektur:

$$\text{Temp.korr.Wert} = \text{Wert} \cdot \frac{273,15}{273,15 + T_{\text{leaf}}} \quad [48]$$

Druckkorrektur:

$$E = \text{Temp.korr.Wert} \cdot \frac{\text{ATMP}}{1013,25} \quad [49]$$

ATMP ist in diesem Falle wieder der vom Gerät ausgegebene Messwert des Luftdruckes zum Zeitpunkt der Messung.

Es ergeben sich somit zusammengefasst folgende Schritte:

$$E = \frac{(R_o - R_i) * \chi_s \text{ (mb)} * V \text{ ml}}{1.25 \text{ cm}^2 * P \text{ (mb)} \text{ min}} \times \frac{P}{1013.25} \times \frac{273.15}{273.15 + T_c} \times \frac{1 \text{ mole}}{22.414 \text{ liter}} \times \frac{10^4 \text{ cm}^2}{\text{m}^2} \times \frac{\text{min.}}{60 \text{ sec}} \times \frac{\text{liter}}{10^3 \text{ ml}} \times \frac{10^3 \text{ mmol}}{\text{mole}} \quad [50]$$

R_o = Feuchte der ausströmenden Luft [%]

R_i = Feuchte der einströmenden Luft [%]

χ_s = Sättigungsdampfdruck [mb]

V = Durchflussrate [ml/min]

Es wurde die Transpiration des ganzen Blattes durch Addition der Transpiration von Blattunter- und Blattoberseite berechnet, sowie die Transpiration der einzelnen Blattseiten, also Blattoberseite und Blattunterseite. Für die Wägungen (siehe Kapitel 6.2 und 6.3) wurde einmal nur mit einer Blattfläche und einmal mit der doppelten Blattfläche, Blattober-

Material und Methoden

und Blattunterseite gerechnet.

Um die Berechnung besser darzustellen, wird ein Beispiel aus den Messungen noch einmal einzeln, das heißt Schritt für Schritt, durchgeführt.

Die ausgelesenen Messwerte für die erste Messung am 19.10.2009 lauten;

$$RH_{in} = 33,8 \%$$

$$RH_{out} = 37,3 \%$$

$$T_{leaf} = 25,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Flow} = 75,7 \text{ ml/min}$$

$$\text{ATMP} = 1000 \text{ mb}$$

Berechnung von X_s :

$$X_s = 6,1121 \cdot \text{EXP}(25,1 \cdot (18,564 - (25,1/254,4)) / (25,1 + 255,57)) \cdot (33,8/100) = 10,8 \text{ mb [51]}$$

Basisgleichung:

$$\frac{((37,3 - 33,8) \cdot 10^{-2}) \cdot 10,8 \cdot 75,7}{1,25 \cdot 1000} = 0,02 \text{ ml} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1} \quad [52]$$

Umwandlung in $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$:

$$0,02 \cdot \frac{10^4}{60 \cdot 22,414} = 0,17 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \quad [53]$$

Temperaturkorrektur:

$$0,17 \cdot \frac{273,15}{273,15 + 25,1} = 0,16 \quad [54]$$

Druckkorrektur:

$$E = 0,16 \cdot \frac{1000}{1013,25} = 0,15 \quad [55]$$

Die Transpiration (E) beträgt somit **0,15 mmol/(m²·s)** für die erste Messung vom ersten Versuch am 19.10.2009.

6.5 Vergleich der gravimetrischen Methode mit dem PMR-4 Porometer und dem AP4 Porometer

Nachdem bei der vorhergehenden Versuchsreihe die Wägung mit dem PMR-4 Porometer verglichen wurde, wird in dieser Versuchsreihe auch das AP4 Porometer verwendet. Mit den Porometern wurde in dieser Versuchsreihe immer nur die Blattunterseite gemessen. Bei der Wägung wurde die Transpiration immer für eine Blattfläche berechnet.

6.5.1 AP4 Porometer (DELTA-T DEVICES 2004)

Dieses Gerät der Firma Delta-T Devices Ltd ist von seiner Funktionsweise der Gruppe der „transient“ Porometer zu zuordnen. Das Gerät misst die Zeit die vergeht, bis das Blatt in der Kammer genügend Wasserdampf abgegeben hat um die Luftfeuchtigkeit um einen fixen Betrag zu ändern. Dieser Wert wird dann mit den Werten der Kalibrierplatte verglichen und aus diesen der Leitwert berechnet. Spezifikationen und Abbildung siehe Anhang A2.

Diese Messung wird mehrmals durchgeführt, nachdem die Blattkammer mit trockener Luft gespült wurde, bis die Wiederholbarkeit der Messung gegeben ist.

6.5.1.1 Aufbau und technische Daten (DELTA-T DEVICES 2004)

Der Porometerkopf aus Kunststoff, der wie eine große Zange mit der Messküvette auf das Blatt geklemmt wird, beinhaltet in der Küvette einen Feuchtesensor, zwei Mikrochip-Thermistore zum Messen der Küvetten- und Blatttemperatur und auf der Oberseite der Zange einen Lichtsensor. Als Verbindung zum Basisgerät, welches die Luftpumpe, die Batterie, sowie die Anzeige und die Elektronik enthält, dient ein Gummischlauch über dem die getrocknete Luft in die Küvette gespült wird.

Im Gerät selbst dient Silicagel als Trocknungsmittel, über dieses wird die Luft geleitet bevor sie in die Küvette gepumpt wird.

Im Kopf befinden sich zwei unterschiedlich große Messküvetten, die mit durchsichtigem Kunststoff bedeckt sind.

Gerätespezifikationen:

- Küvettengröße 1: 2,5 x 17,5 mm
- Küvettengröße 2: 6,0 mm Durchmesser
- stomatärer Leitfähigkeits-Messbereich: 5,0-1200 mmol/(m²·s), Auflösung 0,1-10 und 0,25-30,0 mm/s, Auflösung 0,01-0,1.
- stomatärer Widerstands Messbereich: 0,2-40 s/cm, Auflösung 0,01-0,1
- Feuchtesensor: Vaisala 1518 HM, Dünnschicht kapazitiver Sensor,
- Messbereich 0-100%, Auflösung 0,1
- Temperatursensor: Betatherm 100 K mikrochip Thermistor mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ bei 25°C und $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ bei 0°C sowie bei 50°C .
- Küvettentemperatur Messbereich: -5 bis $+55^{\circ}\text{C}$, Auflösung 0,1, Genauigkeit $\pm 0,7^{\circ}\text{C}$
- Blatttemperatur in Messküvette: -5 bis $+5^{\circ}\text{C}$, Auflösung 0,1, Genauigkeit $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$
- Lichtsensor: ungefilterte GaAsP Photodiode, Messbereich 0-2500 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$
- Druckbereich: 600-1200 hPa

6.5.1.2 Funktionsweise (DELTA-T DEVICES 2004)

Die Messküvette, in die das Blatt geklemmt wird, enthält wie schon gesagt Feuchte und Temperatursensoren. Durch die Wasserdampfabgabe des Blattes, ändert sich die Luftfeuchte in der Messkammer. Die Zeit die verstreicht, bis die Feuchte in der Kammer um 2,3% gestiegen ist, wird gemessen, dies ist die „transit time“.

Diese Zeit ist aber auch von den schon vor der Messung herrschenden Feuchtebedingungen in der Blattkammer abhängig, aus diesem Grund wird nach der Messung die Kammer mit trockener Luft gespült und die Messung wiederholt. Generell werden drei bis vier Messzyklen benötigt, um eine Vergleichbarkeit der Messwerte und stabile Küvettenbedingungen zu erhalten.

Das Porometer wird mit einer Lochplatte kalibriert. In dieser sind Löcher mit einer genauen Dimension gebohrt. Der Widerstand wurde für diese Löcher mit einer Finite-Elementen-Analyse berechnet. Die Kalibrierung erfolgt, indem immer eine andere Größe von Löchern mit einem feuchten Filterpapier in das Gerät geklemmt wird und die „transit time“ gemessen wird. Nach dem Prinzip je größer die Poren, oder je weiter offen die Stomata, desto weniger Widerstand und umgekehrt werden dann die mit dem Blatt gemachten Messungen berechnet und mit den Kalibrierwerten der Lochplatte verglichen.

6.5.1.3 Berechnung (DELTA-T DEVICES 2004)

Der Widerstand des Blattes lässt sich aus folgender Gleichung berechnen:

$$r_{\text{leaf}} = \frac{\delta t \cdot (1 - \varnothing)}{(L + L') \cdot \delta \cdot \varnothing} - \frac{4 \cdot (L + L')}{\pi^2 \cdot D} \quad [56]$$

r_{leaf} = Widerstand des Blattes in gewählter Einheit (siehe Gerätespezifikationen).

L = die Länge der Messküvette: 7 mm

L' = die „Messküvettenlänge“ die sich durch die Absorption von Wasserdampf an der Wand dieser ergibt.

Wird durch die Kalibrierung mit der Lochplatte für die gegebenen Bedingungen bestimmt. [mm]

$\varnothing$ = Wert der relativen Luftfeuchte um welche das Porometer arbeitet, ist ein eingestellter Wert. [%]

Material und Methoden

$\delta\varnothing$ = eingestellter Änderungswert für Luftfeuchtigkeit = 2,3 %

δt = transit time, wird vom Gerät direkt gemessen. [s]

D = Diffusionskoeffizient von Wasserdampf in Luft.

L' wird wie folgt berechnet:

$$L' = b(0) \cdot \exp(-0,009 T_{\text{cup}}) \cdot (\delta t_f)^{b(1)} \cdot \exp(b(2) [\ln(\delta t_f)]^2) \quad [57]$$

T_{cup} = Messküvettemperatur [°C]

δt_f = korrigierte transit time [s]

$b(0)$, $b(1)$ und $b(2)$ sind konstante Charakteristika vom Porometerkopf.

Die obige Gleichung zur Berechnung von L' wird bei der Kalibrierung als auch bei der Messung des Blattwiderstandes eingesetzt. Bei der Kalibrierung wird L' für alle sechs Plattenpositionen und der korrigierten „transit time“ mit Hilfe der Gleichung [57] berechnet. Dabei werden die theoretisch berechneten Lochwiderstände bei der gemessenen Temperatur mit der Korrektur für die gemessene Blatttemperatur in der Küvette verwendet. Aus diesen Berechnungen errechnet das Gerät dann die Parameter $b(0)$, $b(1)$ und $b(2)$ für die gegebenen Umgebungsbedingungen und setzt diese in Gleichung [57] zur Berechnung von L' ein.

Der berechnete Wert von L' wird bei der Messung für die gemessene „transit time“ und Küvettemperatur in Gleichung [56] eingesetzt und so der Widerstand bestimmt. Dieser Widerstandswert wird noch für isothermale Küvettenbedingungen korrigiert und in den gewünschten Einheiten auf der Geräteanzeige ausgegeben.

Da sich der Diffusionskoeffizient von Wasserdampf in Luft mit der Temperatur ändert, ist für diesen in Gleichung [56] angeführten Term D auch eine Korrektur nötig.

Im Gerät wird folgende Berechnung dazu eingesetzt:

$$D=(0,212+0,0015 T) \cdot \frac{1000}{P} \quad [58]$$

T = [°C]

P = hPa oder mbar

Wie die schon durchgeführten Versuchsreihen, wurde auch diese Versuchsreihe im Glashaus bei 25°C und 45 % Luftfeuchte und Tageslicht durchgeführt. Als Versuchspflanzen wurde diesmal aber ein Topfefeue verwendet.

Vor Beginn einer Messreihe wurden die Parameter am AP4 eingestellt und das Gerät kalibriert.

Zum Einstellen der in die Messkammer eingehenden Luftfeuchtigkeit, welche in etwa die der Umgebungsfeuchtigkeit haben soll, wurde diese mit einem Humichip gemessen und als „set value“ eingegeben, also 45%. Dann wurden die zur Messung, beziehungsweise zur späteren Umrechnung geeigneten Ausgabeeinheiten eingestellt, der Leitwert in cm/s. Das Gerät wurde dann mit der Lochscheibe und einem auf diesem befestigten feuchten Filterpapier (dieses sollte zumindest eine Stunde vor Beginn der Messungen auf die Lochscheibe geklebt werden und dann in der luftdichten Plastiktasche zum „Einstellen“ belassen werden) kalibriert. Dabei wurden die einzelnen Lochscheibenpositionen der Reihe nach durch gemessen. Das Gerät erstellt aus diesen Werten eine Kalibrierkurve und vergleicht diese mit einer im Gerät gespeicherten, aus Modellen errechneten Kurve, die Abweichung zwischen dem „idealen“ Werten und den gemessenen Werten wird als Fehler in Prozent angegeben, dieser sollte so gering wie möglich sein. Ist er zu groß, muss nochmals kalibriert werden.

Vor Beginn der Messungen wurden am Vortag Blätter abgetrennt und ins Wasser gestellt. Die Blätter wurden dann nach dem Herausnehmen aus dem Wasser und dann alle fünf Minuten abwechselnd gewogen und mit beiden Porometern (AP4 und PMR-4) gleichzeitig

porometriert. Die Versuchsdauer betrug zwischen 20 und 30 Minuten. Das Blatt wurde zwischen den Messungen in ein Gestell aus Draht gehängt, das an gleicher Stelle stand wie das Blatt vor Beginn der Messungen. Die Bedingungen beim Messen waren denen am Aufstellungsort gleich. Zusätzlich wurden noch die Blattemperatur mit einem Infrarotthermometer (Firma Fluke) sowie die Luftfeuchte und Umgebungstemperatur mit einem Humichip (Vaisala) gemessen.

Bei der Messung mit den Porometern wurde darauf geachtet, die Lichtsensoren an den Geräten so zu halten, dass die Lichtbedingungen die wiedergeben, welche das Blatt zum Zeitpunkt der Messung hatte. Auch wurde auf eine möglichst geringe Überlappung der Porometer-Messpositionen geachtet. Es wurden vier bis fünf Messzyklen (mit dem AP4 Porometer) gemacht, oder so lange gemessen, bis die Werte eine nur geringfügige Abweichung zeigten (die Messzeit sollte aber so kurz wie möglich gehalten werden, um eine Anpassung der Spaltöffnungen an das Messkammerklima zu verhindern), diese Werte wurde gespeichert.

Da die vorhergehenden Messungen ergaben, dass die Oberseite des Efeublattes kaum zur Transpiration beiträgt, wurde in dieser Versuchsreihe nur auf der Blattunterseite gemessen. Auch ergab ein Versuch, bei dem die Blattoberseite mit dem AP4-Gerät gemessen wurde, dass es mit diesem Gerät oft gar nicht möglich war eine Transpiration beziehungsweise einen Leitwert zu messen.

Da auch das AP4 nicht die Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ausgibt, sondern in unserem Fall den Leitwert in cm/s muss, wie auch beim PMR-4 eine Umrechnung aus den Eingangs- und Ausgangsdaten erfolgen.

Dazu diente folgende Grundgleichung:

$$E = c_v (\Phi_{\text{Leaf}} - \Phi_{\text{Cup}}) \quad [59]$$

Material und Methoden

E = Wasserdampfdichte im Messkopf (flux density of water vapour) $[g/(m^2 \cdot s)]$

c_v = Conductance (Leitwert) in m/s, das Gerät gibt cm/s aus.

Φ_{Leaf} = Dampfdichte (absolute Luftfeuchtigkeit) bei Blattemperatur- und relativer Feuchte $[g/m^3]$.

Φ_{Cup} = Dampfdichte (absolute Luftfeuchtigkeit) bei Messkammertemperatur und relativer Feuchte $[g/m^3]$.

Für die folgenden Berechnungen, und auch in der oberen Formel [59], wird die relative Feuchtigkeit im Blatt mit 100% eingesetzt. Dies erfolgt aus der Annahme, dass bei einem mit Wasser gut versorgtem Blatt und geringer Luftströmung, die Luft in den Spaltöffnungsvorhöfen mit Wasserdampf gesättigt ist. Da bei den durchgeführten Versuchen die Blätter immer relativ gut mit Wasser versorgt waren, und die Luftströmung im Glashaus gering ist oder zumindest nicht im Bereich der Versuchsblätter und des Versuchsaufbaues ist, kann mit dieser Annahme gerechnet werden.

Das zwischen Blattnnerem und der Umgebungsluft herrschende Potentialgefälle des Wasserdampfes treibt die Diffusion vom Blatt zur Messkammer an, und wird durch die Öffnungsweite der Spaltöffnungen reguliert.

Mit Hilfe der MAGNUS-Formel (SONNTAG 1990) kann der Sättigungsdampfdruck (der Druck der dampfförmigen Phase eines Stoffes, wenn die flüssigförmige und dampfförmige Phase im Gleichgewicht sind) für gegebene Temperatur berechnet werden.

$$E_w(t) = 6,112 \text{ hPa} \cdot \exp. \frac{17,62 \cdot t}{243,12 + t} \quad [60]$$

$E_w(t)$ = Sättigungsdampfdruck bei gegebener t °C.

6,112 hPa oder 6,1078 hPa = Letzterer Wert findet Anwendung im naturwissenschaftlichen Bereich.

17,62 oder 17,08085 = Koeffizienten, letzterer wird eingesetzt, wenn oben 6,1078 hPa eingegeben wurde.

243,12 °C oder 234,175 °C = Temperaturwerte für entsprechende Koeffizienten und Drücke. Wurden 6,1078 hPa gewählt, so ist 234,175 °C einzusetzen.

t = gemessene Temperatur [°C]

Material und Methoden

Mit dem Sättigungsdampfdruck aus der MAGNUS-Formel kann mit Hilfe der bekannten relativen Luftfeuchtigkeit unter zu Hilfenahme der Formel:

$$\varphi = \frac{e}{E} \cdot 100 \quad [61]$$

φ = Relative Luftfeuchtigkeit [100%]

e = Dampfdruck [hPa]

E = Sättigungsdampfdruck (entspricht e^*) [hPa]

der Dampfdruck e berechnet werden.

Die relative Luftfeuchtigkeit ist das Verhältnis vom Partialdruck des Wasserdampfes (Dampfdruck) zum Sättigungsdampfdruck des Wasserdampfes bei $t^\circ\text{C}$.

Mit den berechneten Werten des Dampfdruckes und des Sättigungsdampfdruckes kann schließlich die absolute Feuchte (Dampfdichte) für die Messkammer und das Blatt berechnet werden.

Die Dampfdichte ergibt sich aus folgender Formel:

$$\rho = \frac{e}{R \cdot T} \quad [62]$$

ρ = Dampfdichte in $[\text{g}/(\text{m}^3)]$

R = individuelle Gaskonstante des Wassers $461,52 \text{ J}/(\text{kgK})$

T = Temperatur in Kelvin

e = Dampfdruck [hPa]

t = Temperatur in $^\circ\text{Celsius}$

Durch Umformen der oberen Formel erhält man bei bekannter Temperatur und bekanntem Dampfdruck die Dampfdichten für Messkammer und Blatt.

$$\rho = \frac{e}{R \cdot T} = \frac{e}{R \cdot (T + t^{\circ} \text{C})} = \frac{\frac{e}{T}}{R \cdot (1 + \frac{t^{\circ} \text{C}}{T})} = \frac{\frac{e}{R \cdot T}}{1 + \frac{t^{\circ} \text{C}}{T}} \quad [63]$$

$$\rho = \frac{\frac{e}{461,52 \cdot 273,15} \frac{\text{kg}}{\text{J}}}{1 + \frac{t^{\circ} \text{C}}{273,15}} = \frac{7,93 \cdot 10^{-6} \cdot e}{1 + \frac{t^{\circ} \text{C}}{273,15}} \frac{10^3 \text{ g}}{10^{-2} \text{ hPa m}^3} = \frac{0,793 \cdot e}{1 + \frac{t^{\circ} \text{C}}{273,15}} \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

Diese können in die Grundgleichung [59] eingesetzt und somit die Transpiration in g/(m²·s) berechnet werden. Aus den g/(m²·s) errechnet man dann g/(dm²·h) und aus diesem Wert schließlich durch Multiplikation mit dem Faktor 1,542 die mmol/(m²·s). Dieser ergibt sich aus der Umrechnung von Gramm Wasser pro dm²·h zu mmo/(m²·s).

6.6 Infrarot Thermographie

Die folgenden Versuche wurden am 05.11.2011 und 06.11.2011 mit drei Topfpflanzen (*Hedera helix*), sowie einer frei wachsenden verholzenden Kletterpflanze (*Polygonum aubertii*) am Gelände der Technischen Universität Wien (Aspanggründe in 1030 Wien) unter Freilandbedingungen durchgeführt.

Der Efeu wurde am Tag vor Versuchsbeginn gut gegossen und zum Akklimatisieren hinaus gestellt.

Auf der Versuchspflanze wurden 3 bis 6 Blätter ausgewählt, diese wurden für die Thermographie folgendermaßen vorbereitet.

Ein Blatt wurde 10 min. vor Versuchsbeginn mit Wasser nass gespritzt, dabei wurde darauf geachtet, dass die umgebenden Blätter nicht nass wurden. Ein weiteres Blatt wurde beidseitig mit durchsichtiger Vaseline bestrichen. Zwei Blätter wurden nur gekennzeichnet und nicht abgetrennt. Zwei Blätter wurden kurz vor dem Versuch abgetrennt und mit Krokodilklemmen wieder an ihren ursprünglichen Platz gehängt.

Vor Beginn der Aufnahmeserie wurden zwei weitere Blätter aus unmittelbarer Nähe der schon abgetrennten Blätter entnommen. Diese wurden im Abstand von 2, 3 oder 5 Minuten (je nach Versuchsserie) porometriert.

Die Aufnahmezeit der Thermokamera und die Zeit der Porometermessung wurden synchronisiert um möglichst zum gleichen Zeitpunkt Messwerte zu erhalten. Die Versuchszeit betrug 45 Minuten bis zu einer Stunde. Neben den Messungen mit dem Porometer (AP4) und der Thermokamera (NEC H2640) (mit einer Messgenauigkeit von $\pm 2^{\circ}\text{C}$ oder 2% in einem Temperaturbereich von 0 bis 40°C mit Standardlinse und einer Entfernung von 50 cm, Spektralbereich von 8 bis $13\text{ }\mu\text{m}$, Pixelanzahl 640 (H) und 480(V), siehe Datenblatt Anhang A3), wurden noch alle 3 Minuten Luftfeuchtigkeit und Temperatur mit einem Humichip (Vaisala) sowie die Globalstrahlung mit einem Pyranometer (Kipp und Zone, CMP3) gemessen.

Die Emissivität für die Betrachtung der Blätter wurde auf 0,95 gestellt (JONES und LEINONEN 2004).

Bei der Aufstellung der Thermokamera ist auf die Schärfe des Bildes zu achten. Des weiteren ist es wichtig darauf zu achten, dass alle Blätter die gemessen werden in der gleichen optischen Ebene liegen, und den gleichen Neigungswinkel zur Kamera und zu Strahlung haben. Die Hintergrundstrahlung wurde durch das Unschärfstellen der Kamera und Aufnahme des Hintergrundes ermittelt.

Das Abtrennen der Blätter für die Porometrie war notwendig, da bei der Messung direkt an der Versuchspflanze die Störung durch Wärmestrahlung (Körperwärme) eine Aufwärmung des Versuchsobjektes bewirkt und somit zu fehlerhafte Blatttemperaturen geführt hätte.

Nach Ende der Versuchszeit wurden die Thermobilder mit der Software IRmotion (ebs Automatisierte Thermographie und Systemtechnik GmbH) ausgewertet. Dabei wurden die Temperaturen für die Blattflächen ermittelt und eingetragen. Im Gegensatz zu den komplexen Berechnungsverfahren von Jones (JONES und LEINONEN 2004) wurden bei

diesen Versuchen die Temperaturen manuell ausgelesen beziehungsweise berechnet. Dazu wurde ein Fenster über einen möglichst großen Blattbereich gezogen (dieses erfasst mehrere Pixel mit unterschiedlichen Temperaturen) aus diesen wurde dann ein Temperaturmittel durch die Software errechnet.

Aus den Temperaturdifferenzen der abgetrennten Blätter, sowie der gekennzeichneten Blätter und dem nassen Blatt (100% Transpiration darstellend) und dem mit Vaseline bestrichenen Blatt (0% Transpiration darstellend) wurden der I_G und der CWSI berechnet und mit dem Leitwert der Porometermessungen verglichen.

CWSI und I_G Stellen die „thermal indices“ dar (LEINONEN et al. 2006, LEINONEN und JONES 2004).

Diese errechnen sich aus den Temperaturdifferenzen des Blattes mit Vaseline und des mit Wasser besprühten Blattes.

$$CWSI = (T_{Plant} - T_{wet}) / (T_{dry} - T_{wet}) \quad [64]$$

CWSI = Crop Water Stress Index

T_{Plant} = Temperatur des abgetrennten oder nicht abgetrennten Blattes. [$^{\circ}C$]

T_{wet} = Temperatur des mit Wasser besprühten Blattes. [$^{\circ}C$]

T_{dry} = Temperatur des mit Vaseline beidseitig versiegelten Blattes [$^{\circ}C$]

$$I_G = (T_{dry} - T_{Plant}) / (T_{Plant} - T_{wet}) \quad [65]$$

I_G = Index für Leitwert

T_{Plant} = Temperatur des abgetrennten oder nicht abgetrennten Blattes. [$^{\circ}C$]

T_{wet} = Temperatur des mit Wasser besprühten Blattes. [$^{\circ}C$]

T_{dry} = Temperatur des mit Vaseline beidseitig versiegelten Blattes. [$^{\circ}C$]

Material und Methoden

Die Leitwerte, Indizes und der CWSI wurden anschließend graphisch zueinander in Beziehung gestellt.

Es wurde versucht die von JONES und LEINONEN gefundene Linearität zwischen den Leitwerten und dem I_G auch bei *Hedera helix* und *Polygonum aubertii* unter den gegebenen Bedingungen nachzuweisen.

Die Indizes der nicht abgetrennten Blätter wurden als Kontrolle und Referenz ebenfalls berechnet und als Vergleich auch graphisch dargestellt.

Abbilder 28 bis 31 geben die Versuchsaufbauten für den 05 und 06.11.2011 wieder.



Abb. 28: Versuchsaufbau am 05.11.2011, *Hedera helix*



Abb. 29: Versuchsaufbau am 05.11.2011, Thermokamera (NEC/Avio Infrared Technologies)



Abb. 30: Versuchsaufbau am 05.11.2011, gekennzeichnete Blätter



Abb. 31: Versuchsaufbau am 06.11.2011, *Polygonum aubertii*

7. Ergebnisse

7.1 Abgeänderte „Anwelk-Methode“

Nach den im Kapitel Material und Methoden beschriebenen Methoden wurden folgende Messungen durchgeführt, siehe Tabelle 1 der dargestellten Ergebnisse.

Die dargestellten Werte geben den Masseverlust (Wasserdampf) und die Wasserdampfabgabe in g/m^2 der Blattfläche (nur mit einer Seite berechnet) wieder. Der maximale Wert beträgt 6,1% der Blattmasse mit 32 g/m^2 abgegebener Wasserdampfmenge. Der kleinste Wert ist 0,5% der Blattmasse und $2,0 \text{ g/m}^2$. Im Mittel verlieren die Versuchsblätter 2,1% ihrer Masse als Wasserdampf während der Versuchszeit.

Bei den Ergebnissen von Tabelle 1 vom 12.12.2008, 22.12.2008 und 16.01.2009 ist die Schnittstelle mit Vaseline versiegelt bei den anderen Versuchen wurde die Schnittstelle offen gelassen.

Ursprünglich wird zur Berechnung der Transpiration die zweifache Blattfläche herangezogen, wird zum Beispiel für die Berechnung des Wasserverlustes (Masseverlust) und der Wasserdampfabgabe nur eine Blattfläche eingesetzt, ergibt sich im Vergleich zu den Berechnungen mit beiden Blattflächen keine Änderung (siehe Abb. 33 und 34).

So verliert ein Blatt mit $66,1 \text{ cm}^2$ im Laufe der 35 Minuten Versuchsdauer $15,7 \text{ g/m}^2$ an Wasserdampf oder 2,5% seiner Masse (Tab. 1, Versuch Nr. 5 vom 10.12.2008). Ein anderes Blatt mit $43,3 \text{ cm}^2$ verliert im Laufe der 35 Minuten 2,8% seiner Masse und $7,0 \text{ g/m}^2$ (Tab. 1, Versuch Nr. 2 vom 30.01.2009).

Die Transpiration ist ein durch die Öffnungszustände und Anzahl der Spaltöffnungen geregelter Prozess und keine unregelmäßige Abgabe an Wasserdampf wie bei der Evaporation (Abb. 35). Das Blatt ist zwischen den Spaltöffnungen und auf der Oberseite

Ergebnisse

mit einer Cuticulaschicht gegen Wasserverlust überzogen. Die Anzahl und der Öffnungszustand der Spaltöffnungen wird wiederum durch die Umgebungsfaktoren der Pflanze bestimmt.

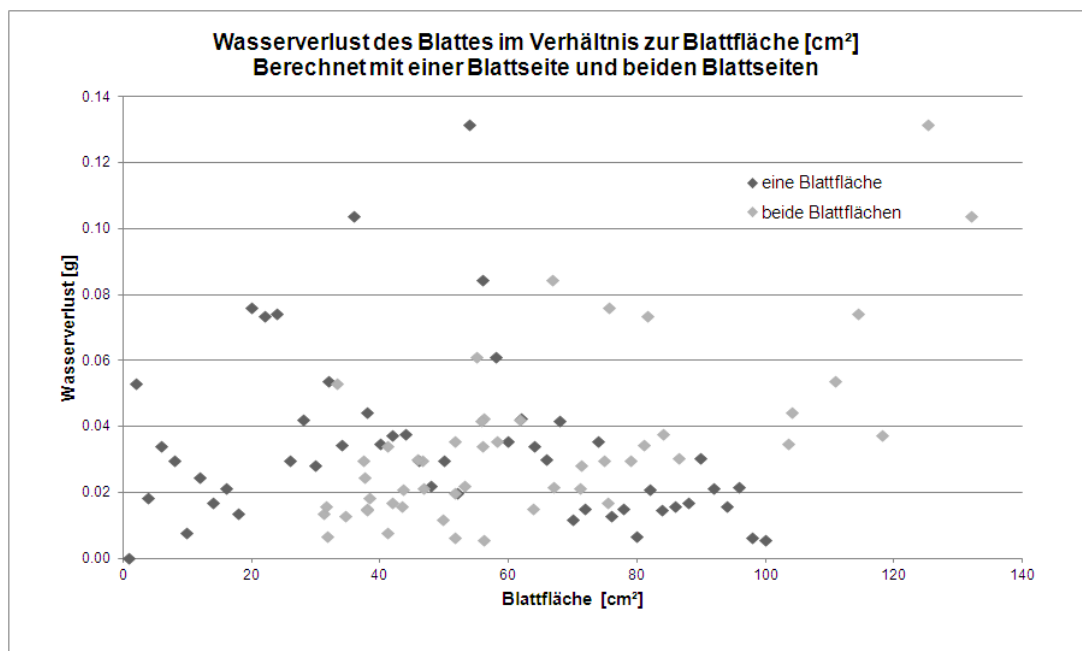


Abb. 33: Abgeänderte „Anwelk-Methode“ Wasserverlust des Blattes berechnet mit einer und mit beiden Blattseiten

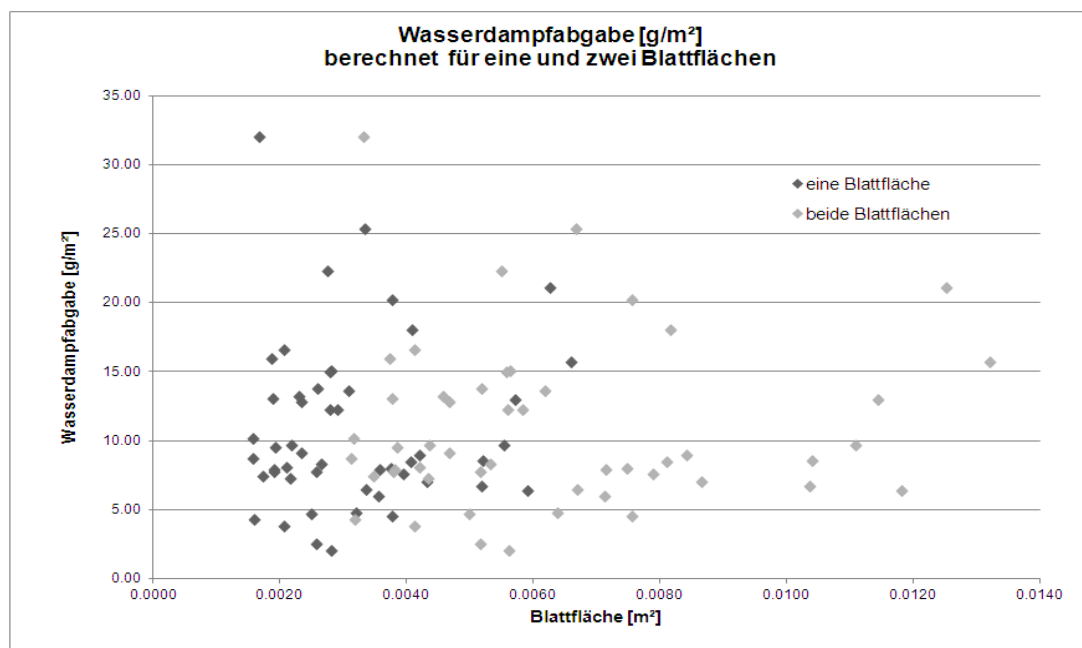


Abb. 34: Wasserdampfabgabe, Abgeänderte „Anwelk-Methode“, für eine und beide Blattflächen berechnet

Ergebnisse

Messung Nr.	Datum	Mess-	Zeit [hh:mm:ss]	Messdauer [hh:mm:ss]	Gewicht [g]	Masse-Differenz [g]	Masse-Verlust [%]	Blattfläche [cm²]	Wasserdampfabgabe [g/m²]
1	07.05.2008	Anfang	11:37:56	01:06:05	0.88	0.053	6.1	16.6	32.0
		Ende	12:44:01		0.82				
2	07.05.2008	Anfang	12:59:26	01:01:25	0.94	0.018	1.9	19.2	9.5
		Ende	14:00:51		0.93				
1	14.05.2008	Anfang	10:48:01	01:11:45	7.49	0.034	0.5	20.6	16.6
		Ende	11:59:46		7.46				
2	14.05.2008	Anfang	12:16:21	01:08:25	0.84	0.030	3.5	18.7	15.9
		Ende	13:24:46		0.82				
1	28.05.2008	Anfang	10:36:26	00:17:45	0.89	0.008	0.9	20.6	3.8
		Ende	10:54:11		0.89				
2	28.05.2008	Anfang	11:03:06	01:03:15	0.90	0.025	2.7	18.8	13.1
		Ende	12:06:21		0.88				
1	30.05.2008	Anfang	10:07:48	01:13:58	0.86	0.017	2.0	21.0	8.0
		Ende	11:21:46		0.84				
2	30.05.2008	Anfang	11:25:52	00:37:10	1.01	0.021	2.1	23.4	9.1
		Ende	12:03:02		0.99				
3	30.05.2008	Anfang	13:16:56	00:49:06	0.80	0.014	1.7	15.6	8.7
		Ende	14:06:02		0.79				
1	05.12.2008	Anfang	10:52:12	01:01:10	3.14	0.076	2.4	37.8	20.2
		Ende	11:53:22		3.06				
2	05.12.2008	Anfang	11:58:12	01:01:00	3.18	0.073	2.3	40.8	18.0
		Ende	12:59:12		3.11				
3	05.12.2008	Anfang	13:03:37	00:41:50	3.84	0.074	1.9	57.2	13.0
		Ende	13:45:27		3.76				
5	05.12.2008	Anfang	14:22:02	00:31:35	2.94	0.030	1.0	39.5	7.5
		Ende	14:53:37		2.91				
1	10.12.2008	Anfang	09:28:46	00:32:30	1.38	0.042	3.0	30.9	13.6
		Ende	10:01:16		1.34				
2	10.12.2008	Anfang	10:04:01	00:31:50	2.51	0.028	1.1	35.7	7.9
		Ende	10:35:51		2.48				
3	10.12.2008	Anfang	10:38:36	00:32:00	2.71	0.054	2.0	55.4	9.7
		Ende	11:10:36		2.65				
4	10.12.2008	Anfang	11:12:31	00:33:40	2.08	0.034	1.7	40.6	8.5
		Ende	11:46:11		2.04				
5	10.12.2008	Anfang	11:47:51	00:35:20	4.22	0.104	2.5	66.1	15.7
		Ende	12:23:11		4.11				
1	12.12.2008	Anfang	10:19:08	00:32:35	2.80	0.044	1.6	52.0	8.5
		Ende	10:51:43		2.75				
2	12.12.2008	Anfang	10:55:18	00:30:40	2.41	0.035	1.4	51.8	6.7
		Ende	11:25:58		2.38				
3	12.12.2008	Anfang	11:29:38	00:31:35	3.04	0.037	1.2	59.1	6.3
		Ende	12:01:13		3.00				
4	12.12.2008	Anfang	12:05:08	00:30:45	2.42	0.038	1.6	42.1	9.0
		Ende	12:35:53		2.39				
5	12.12.2008	Anfang	12:38:03	00:32:45	0.93	0.030	3.2	23.3	12.8
		Ende	13:10:48		0.90				
6	12.12.2008	Anfang	13:12:43	00:30:10	1.15	0.022	1.9	26.6	8.3
		Ende	13:42:53		1.13				
7	12.12.2008	Anfang	13:44:53	00:31:20	1.62	0.030	1.8	37.4	8.0
		Ende	14:16:13		1.59				
8	12.12.2008	Anfang	14:17:53	00:29:50	1.29	0.020	1.5	25.8	7.7
		Ende	14:47:43		1.27				
1	22.12.2008	Anfang	09:39:08	01:01:55	2.71	0.132	4.9	62.6	21.0
		Ende	10:41:03		2.58				
2	22.12.2008	Anfang	10:43:03	01:01:25	1.65	0.085	5.1	33.4	25.3
		Ende	11:44:28		1.56				
3	22.12.2008	Anfang	11:46:28	01:04:15	1.34	0.061	4.6	27.5	22.2
		Ende	12:50:43		1.27				
1	30.12.2008	Anfang	11:55:08	00:31:30	0.98	0.036	3.6	25.9	13.7
		Ende	12:26:38		0.95				
2	30.12.2008	Anfang	12:30:38	00:29:45	1.17	0.042	3.6	28.1	15.1
		Ende	13:00:23		1.12				
3	30.12.2008	Anfang	13:03:53	00:33:20	1.80	0.034	1.9	28.0	12.2
		Ende	13:37:13		1.76				
1	16.01.2009	Anfang	11:27:07	00:35:25	0.84	0.030	3.6	22.9	13.2
		Ende	12:02:32		0.81				
2	16.01.2009	Anfang	12:05:02	00:31:50	1.61	0.042	2.6	27.9	15.0
		Ende	12:36:52		1.56				
3	16.01.2009	Anfang	12:39:02	00:32:05	1.27	0.012	0.9	24.9	4.7
		Ende	13:11:07		1.26				
4	16.01.2009	Anfang	13:13:02	00:32:25	2.12	0.015	0.7	31.9	4.8
		Ende	13:45:27		2.10				
5	16.01.2009	Anfang	13:48:12	00:45:15	1.78	0.036	2.0	29.2	12.2
		Ende	14:33:27		1.75				
1	23.01.2009	Anfang	11:28:33	00:33:40	0.31	0.013	4.2	17.4	7.4
		Ende	12:02:13		0.29				
2	23.01.2009	Anfang	12:03:58	00:31:10	0.47	0.015	3.2	19.0	7.9
		Ende	12:35:08		0.46				
4	23.01.2009	Anfang	13:16:53	00:30:55	0.31	0.007	2.2	15.9	4.3
		Ende	13:47:48		0.31				
5	23.01.2009	Anfang	13:49:23	00:30:55	0.52	0.021	4.0	21.9	9.7
		Ende	14:20:18		0.50				
6	23.01.2009	Anfang	14:22:13	00:30:55	0.47	0.015	3.1	19.0	7.7
		Ende	14:53:08		0.46				
7	23.01.2009	Anfang	14:54:48	00:35:25	0.50	0.016	3.2	15.8	10.1
		Ende	15:30:13		0.49				
1	30.01.2009	Anfang	11:21:32	00:31:25	0.99	0.017	1.7	37.8	4.5
		Ende	11:52:57		0.97				
2	30.01.2009	Anfang	11:54:42	00:35:25	1.09	0.030	2.8	43.3	7.0
		Ende	12:30:07		1.06				
3	30.01.2009	Anfang	12:31:32	00:31:25	0.83	0.021	2.6	35.6	6.0
		Ende	13:02:57		0.81				
4	30.01.2009	Anfang	13:05:02	00:31:40	0.52	0.016	3.0	21.7	7.2
		Ende	13:36:42		0.51				
5	30.01.2009	Anfang	13:38:07	00:50:45	0.67	0.022	3.2	33.5	6.4
		Ende	14:28:52		0.65				
1	13.02.2009	Anfang	11:59:38	01:00:30	0.51	0.006	1.3	25.8	2.5
		Ende	13:00:08		0.50				
2	13.02.2009	Anfang	13:01:58	01:09:05	0.71	0.006	0.8	28.1	2.0
		Ende	14:11:03		0.70				

Tab. 1: Ergebnisse der Abgeänderten „Anwelk-Methode“, Masseverluste in [g] und [%]

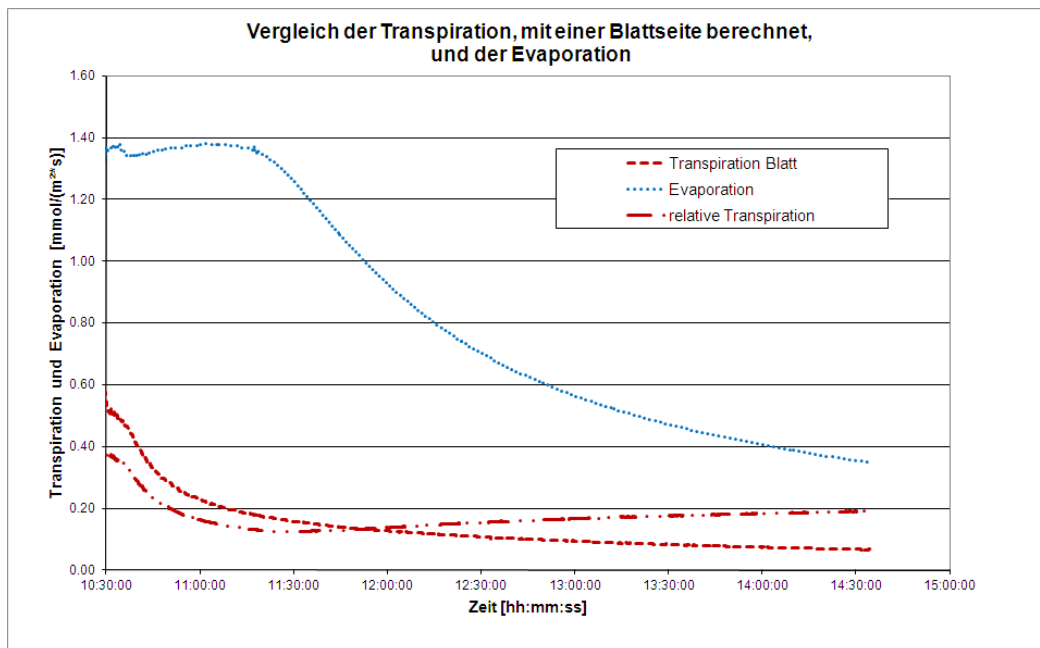


Abb. 35: Vergleich Transpiration zu Evaporation eines „Modellblattes aus Filterpapier

Anders verhält es sich bei der Berechnung der Transpiration, wo die Transpiration bei Halbierung der Fläche verdoppelt wird, was sich aus der Formel ergibt. Da *Hedera helix* nur auf einer Seite, auf der Blattunterseite, Spaltöffnungen besitzt, erscheint es aus dieser Sicht logischer, für die Berechnung der Transpiration ebenfalls nur eine Seite heran zu ziehen. Einen Vergleich der aus den „Anwelk-Methode“ Versuchen berechneten Transpirationen mit beiden Blattseiten (ursprünglich nach Otto STOCKER 1929) und nur mit einer Blattseite liefern Tabellen 2 und 3.

Tabellen 2 und 3 geben das „Transpirations Verhalten“ der bewurzelten Blätter unter den im Abschnitt Methoden beschriebenen Bedingungen wieder. Die Versuchsdauer erstreckt sich von siebzehn Minuten bis zu über einer Stunde. Im Durchschnitt wurde jedoch die Versuchsdauer von ca. 30 Minuten eingehalten. Einzelne Transpirationswerte wurden für 1 Minute, 2, 5, 10, 20, 30, 40, 50 und 60 Minuten nach Abtrennen und Aufhängen des Blattes in der Waage berechnet, die Transpiration zu Versuchsende wurde ebenfalls bestimmt. Die Minutenwerte wurden dann über alle Versuche des Tages gemittelt, auch die Transpirationswerte zu Versuchsende wurde über die Versuche an einem Tag gemittelt.

Ergebnisse

Betrachtet man zum Beispiel den Versuch Nr. 2 vom 14.05.2008 der Tabelle 2, so sieht man einen markanten Trend. Die Transpiration hat einen Anfangswert von 0,223 mmol/(m²·s) nach der ersten Minute. Nach 5 Minuten liegt der Wert bei 0,203 mmol/(m²·s). Nach 20 Minuten ist der Wert 0,177 mmol/(m²·s). Nach 50 Minuten noch 0,125 mmol/(m²·s) und nach sechzig Minuten liegt der Wert bei 0,114 mmol/(m²·s).

Noch deutlicher ist diese Verringerung beim Versuch Nr. 1 vom 16.01.2009 zu sehen, hier startet die Transpiration bei einem Wert von 0,262 mmol/(m²·s) um nach 10 Minuten auf einen Wert von 0,192 mmol/(m²·s) zu fallen. Nach 30 Minuten liegt der Wert bei 0,179 mmol/(m²·s).

Die Ergebnisse vom ersten Versuch am 13.02.2009 zeigen wieder ein anderes Bild. Die Anfangstranspiration liegt bei 0,018 mmol/(m²·s) nach 5 Minuten bei 0,011 mmol/(m²·s) und zu Versuchsende bei 0,019 mmol/(m²·s). Hier waren die Spaltöffnungen wahrscheinlich schon bei Versuchsbeginn geschlossen oder am Schließen, da innerhalb der Versuchszeit keine Änderung festzustellen ist.

Ergebnisse

Datum	Versuch Nr.	Zeit		Abgeänderte "Anwelk-Methode" Transpiration in mmol/m ² s nach Minuten (mit beiden Blattseiten berechnet)										Versuchsdauer [hh:mm:ss]	gesamte Transpiration [mmol/m ² s]
		von	bis	1	2	5	10	15	20	30	40	50	60		
07.05.2008	1	11:37:56	12:44:01	0.250	0.361	0.256	0.245	0.215	0.217	0.233	0.225	0.228	0.230	01:06:05	0.224
07.05.2008	2	12:59:26	14:00:51	0.169	0.048	0.125	0.132	0.104	0.096	0.067	0.077	0.073	0.071	01:01:25	0.071
07.05.2008	MW			0.209	0.205	0.190	0.189	0.160	0.157	0.150	0.151	0.150	0.151		0.148
14.05.2008	1	10:48:01	11:59:46	0.292	0.225	0.220	0.207	0.198	0.191	0.157	0.133	0.122	0.114	01:11:45	0.106
14.05.2008	2	12:16:21	13:24:46	0.223	0.272	0.203	0.203	0.191	0.177	0.155	0.136	0.125	0.114	01:08:25	0.108
14.05.2008	MW			0.257	0.248	0.212	0.205	0.195	0.184	0.156	0.135	0.123	0.114		0.107
28.05.2008	1	10:36:26	10:54:11	0.045	0.011	0.081	0.106	0.099						00:17:45	0.097
28.05.2008	2	11:03:06	12:06:21	0.221	0.209	0.211	0.189	0.167	0.152	0.129	0.116	0.106	0.098	01:03:15	0.096
28.05.2008	MW			0.133	0.110	0.146	0.147	0.133	0.152	0.129	0.116	0.106	0.098		0.097
30.05.2008	1	10:07:48	11:21:46	0.044	0.110	0.075	0.097	0.096	0.088	0.075	0.066	0.061	0.067	01:13:58	0.050
30.05.2008	2	11:25:52	12:03:02	0.237	0.198	0.245	0.178	0.165	0.142	0.122				00:37:10	0.113
30.05.2008	3	13:16:56	14:06:02	0.207	0.177	0.183	0.186	0.142	0.139	0.110	0.102			00:49:06	0.082
30.05.2008	MW			0.163	0.162	0.168	0.154	0.134	0.123	0.102	0.084	0.061	0.067		0.082
05.12.2008	1	10:52:12	11:53:22	0.037	0.141	0.186	0.180	0.182	0.179	0.175	0.170	0.161	0.154	01:01:15	0.153
05.12.2008	2	11:58:12	12:59:12	0.102	0.102	0.120	0.161	0.168	0.168	0.165	0.156	0.146	0.137	01:01:00	0.137
05.12.2008	3	13:03:37	13:45:27	0.105	0.146	0.162	0.152	0.162	0.160	0.159	0.146			00:41:50	0.143
05.12.2008	5	14:22:02	14:53:37	0.176	0.100	0.096	0.101	0.114	0.112	0.112				00:31:35	0.116
05.12.2008	MW			0.105	0.122	0.141	0.148	0.156	0.155	0.153	0.157	0.153	0.145		0.137
10.12.2008	1	09:28:46	10:01:16	0.299	0.202	0.245	0.221	0.198	0.197	0.194				00:32:35	0.190
10.12.2008	2	10:04:01	10:35:51	0.117	0.130	0.122	0.115	0.114	0.113	0.114				00:31:53	0.114
10.12.2008	3	10:38:36	11:10:36	0.117	0.117	0.108	0.111	0.116	0.123	0.138				00:32:00	0.140
10.12.2008	4	11:12:31	11:46:11	0.160	0.131	0.116	0.108	0.106	0.108	0.115				00:33:40	0.123
10.12.2008	5	11:47:51	12:23:11	0.168	0.172	0.169	0.172	0.179	0.188	0.207				00:35:20	0.208
10.12.2008	MW			0.172	0.150	0.152	0.146	0.143	0.146	0.154					0.155
12.12.2008	1	10:19:08	10:51:43	0.071	0.084	0.089	0.098	0.108	0.124	0.121				00:32:35	0.119
12.12.2008	2	10:55:18	11:25:58	0.089	0.058	0.061	0.054	0.065	0.080	0.100				00:30:40	0.100
12.12.2008	3	11:29:38	12:01:13	0.055	0.063	0.061	0.070	0.076	0.083	0.092				00:31:35	0.091
12.12.2008	4	12:05:08	12:35:53	0.077	0.071	0.075	0.075	0.105	0.110	0.133				00:30:45	0.134
12.12.2008	5	12:38:03	13:10:48	0.277	0.287	0.214	0.200	0.193	0.191	0.184				00:32:45	0.179
12.12.2008	6	13:12:43	13:42:53	0.035	0.026	0.056	0.076	0.095	0.112	0.127				00:30:10	0.124
12.12.2008	7	13:44:53	14:16:13	0.124	0.105	0.094	0.098	0.105	0.109	0.117				00:31:20	0.119
12.12.2008	8	14:17:53	14:47:43	0.108	0.099	0.082	0.090	0.098	0.109	0.119				00:29:50	0.119
12.12.2008	MW			0.104	0.099	0.091	0.095	0.106	0.115	0.124					0.123
22.12.2008	1	09:39:08	10:41:03	0.185	0.170	0.120	0.115	0.125	0.136	0.159	0.159	0.163	0.159	01:01:55	0.157
22.12.2008	2	10:43:03	11:44:28	0.402	0.332	0.246	0.186	0.180	0.195	0.227	0.213	0.176	0.171	01:01:25	0.192
22.12.2008	3	11:46:28	12:50:43	0.252	0.202	0.168	0.166	0.187	0.212	0.217	0.195	0.161	0.165	01:04:15	0.161
22.12.2008	MW			0.279	0.235	0.178	0.155	0.164	0.181	0.201	0.189	0.166	0.165		0.170
30.12.2008	1	11:55:08	12:26:38	0.286	0.241	0.204	0.206	0.235	0.242	0.206				00:31:30	0.204
30.12.2008	2	12:30:38	13:00:23	0.296	0.255	0.194	0.197	0.217	0.229	0.232				00:29:45	0.232
30.12.2008	3	13:03:53	13:37:13	0.083	0.116	0.112	0.108	0.126	0.152	0.173				00:33:20	0.171
30.12.2008	MW			0.222	0.204	0.170	0.170	0.192	0.208	0.204					0.202
16.01.2009	1	11:27:07	12:02:32	0.262	0.232	0.198	0.192	0.194	0.189	0.179				00:35:25	0.174
16.01.2009	2	12:05:02	12:36:52	0.299	0.265	0.226	0.214	0.215	0.215	0.221				00:31:50	0.216
16.01.2009	3	12:39:02	13:11:07	0.074	0.074	0.067	0.067	0.072	0.073	0.068				00:32:05	0.068
16.01.2009	4	13:13:02	13:45:27	0.029	0.065	0.061	0.059	0.063	0.067	0.067				00:32:25	0.069
16.01.2009	5	13:48:12	14:33:27	0.222	0.190	0.146	0.124	0.114	0.118	0.130	0.097			00:45:15	0.114
16.01.2009	MW			0.177	0.166	0.139	0.131	0.131	0.132	0.133	0.097				0.128
23.01.2009	1	11:28:33	12:02:13	0.053	0.080	0.080	0.120	0.114	0.119	0.107				00:33:40	0.100
23.01.2009	2	12:03:58	12:35:08	0.219	0.170	0.131	0.151	0.154	0.147	0.119				00:31:10	0.118
23.01.2009	4	13:16:53	13:47:48	0.087	0.073	0.081	0.081	0.081	0.086	0.065				00:30:55	0.064
23.01.2009	5	13:49:23	14:20:18	0.254	0.233	0.186	0.184	0.183	0.175	0.148				00:30:55	0.144
23.01.2009	6	14:22:13	14:53:08	0.171	0.134	0.127	0.153	0.141	0.135	0.115				00:30:55	0.115
23.01.2009	7	14:54:48	15:30:13	0.440	0.308	0.193	0.188	0.184	0.169	0.148				00:35:25	0.134
23.01.2009	MW			0.204	0.166	0.133	0.146	0.143	0.138	0.117					0.112
30.01.2009	1	11:21:32	11:52:57	0.024	0.012	0.037	0.073	0.074	0.072	0.067				00:31:25	0.067
30.01.2009	2	11:54:42	12:30:07	0.118	0.091	0.066	0.101	0.107	0.106	0.096				00:35:25	0.092
30.01.2009	3	12:31:32	13:02:57	0.169	0.123	0.088	0.100	0.105	0.103	0.093				00:31:25	0.079
30.01.2009	4	13:05:02	13:36:42	0.064	0.096	0.128	0.137	0.131	0.123	0.107				00:31:40	0.108
30.01.2009	5	13:38:07	14:28:52	0.014	0.083	0.099	0.123	0.098	0.096	0.079	0.068	0.060		00:50:40	0.052
30.01.2009	MW			0.078	0.081	0.084	0.107	0.103	0.100	0.088	0.068	0.060			0.080
13.02.2009	1	11:59:38	13:00:08	0.018	0.036	0.011	0.014	0.016	0.023	0.021	0.021	0.023	0.019	01:00:30	0.019
13.02.2009	2	13:01:58	14:11:03	0.066	0.016	0.016	0.015	0.020	0.012	0.015	0.015	0.015	0.014	01:09:05	0.013
13.02.2009	MW			0.042	0.026	0.014	0.015	0.018	0.018	0.018	0.018	0.019	0.016		0.016

Tab. 2: Abgeänderte „Anwelk-Methode“ Transpirationswerte für beide Blattseiten

Tabelle 3 gibt genau die selben Daten wieder, nur wurde zur Berechnung der Transpiration nur eine Blattfläche herangezogen. Es ist zu ersehen, dass sich die Werte verdoppeln, wie

Ergebnisse

sich aus der Formel (siehe Gleichungen [37] und [38]) ergibt.

Natürlich müssen auch die sich ändernden Strahlungsbedingungen im Laufe des Tages sowie auch die unterschiedlichen Strahlungsverhältnisse im Laufe des Jahres betrachtet werden. Um die möglichen Auswirkungen der Strahlung zu erfassen, wurde bei einigen Versuchen ein PAR Logger verwendet.

Ergebnisse

Datum	Versuch	Zeit		Abgeänderte "Anwelk-Methode" Transpiration in mmol/m²s nach Minuten (mit einer Blattseiten berechnet)										Versuchsdauer [hh:mm:ss]	gesamte Transpiration [mmol/m²s]
	Nr.	von	bis	1	2	5	10	15	20	30	40	50	60		
07.05.2008	1	11:37:56	12:44:01	0.500	0.723	0.512	0.489	0.430	0.434	0.465	0.450	0.456	0.461	01:06:05	0.448
07.05.2008	2	12:59:26	14:00:51	0.337	0.096	0.250	0.265	0.209	0.193	0.133	0.154	0.145	0.143	01:01:25	0.144
07.05.2008	MW			0.419	0.410	0.381	0.377	0.319	0.313	0.299	0.302	0.301	0.302		0.296
14.05.2008	1	10:48:01	11:59:46	0.584	0.449	0.440	0.413	0.395	0.382	0.315	0.266	0.244	0.228	01:11:45	0.213
14.05.2008	2	12:16:21	13:24:46	0.445	0.544	0.406	0.406	0.383	0.354	0.310	0.272	0.249	0.228	01:08:25	0.216
14.05.2008	MW			0.515	0.497	0.423	0.410	0.389	0.368	0.312	0.269	0.247	0.228		0.214
28.05.2008	1	10:36:26	10:54:11	0.090	0.022	0.162	0.211	0.198						00:17:45	0.195
28.05.2008	2	11:03:06	12:06:21	0.442	0.417	0.422	0.378	0.334	0.304	0.259	0.232	0.211	0.196	01:03:15	0.192
28.05.2008	MW			0.266	0.220	0.292	0.295	0.266	0.304	0.259	0.232	0.211	0.196		0.193
30.05.2008	1	10:07:48	11:21:46	0.088	0.220	0.150	0.194	0.191	0.176	0.150	0.131	0.123	0.133	01:13:58	0.100
30.05.2008	2	11:25:52	12:03:02	0.475	0.396	0.490	0.356	0.330	0.285	0.244				00:37:10	0.227
30.05.2008	3	13:16:56	14:06:02	0.414	0.355	0.367	0.373	0.284	0.278	0.221	0.204			00:49:06	0.164
30.05.2008	MW			0.326	0.324	0.336	0.308	0.268	0.246	0.205	0.168	0.123	0.133		0.164
05.12.2008	1	10:52:12	11:53:22	0.073	0.281	0.372	0.360	0.364	0.359	0.349	0.340	0.322	0.307	01:01:15	0.306
05.12.2008	2	11:58:12	12:59:12	0.204	0.204	0.240	0.322	0.336	0.336	0.330	0.313	0.292	0.274	01:01:00	0.273
05.12.2008	3	13:03:37	13:45:27	0.210	0.291	0.323	0.304	0.323	0.320	0.319	0.292			00:41:50	0.286
05.12.2008	5	14:22:02	14:53:37	0.351	0.199	0.192	0.201	0.228	0.225	0.223				00:31:35	0.233
05.12.2008	MW			0.210	0.244	0.282	0.297	0.313	0.310	0.305	0.315	0.307	0.290		0.274
10.12.2008	1	09:28:46	10:01:16	0.598	0.404	0.491	0.443	0.397	0.393	0.389				00:32:35	0.381
10.12.2008	2	10:04:01	10:35:51	0.233	0.259	0.244	0.231	0.228	0.227	0.229				00:31:53	0.228
10.12.2008	3	10:38:36	11:10:36	0.234	0.234	0.217	0.222	0.231	0.247	0.275				00:32:00	0.280
10.12.2008	4	11:12:31	11:46:11	0.319	0.262	0.233	0.217	0.211	0.216	0.230				00:33:40	0.231
10.12.2008	5	11:47:51	12:23:11	0.336	0.343	0.339	0.344	0.357	0.376	0.415				00:35:20	0.415
10.12.2008	MW			0.344	0.300	0.305	0.291	0.285	0.292	0.308					0.307
12.12.2008	1	10:19:08	10:51:43	0.142	0.169	0.178	0.196	0.216	0.248	0.243				00:32:35	0.239
12.12.2008	2	10:55:18	11:25:58	0.179	0.116	0.121	0.107	0.131	0.161	0.200				00:30:40	0.200
12.12.2008	3	11:29:38	12:01:13	0.110	0.125	0.122	0.139	0.152	0.166	0.183				00:31:35	0.183
12.12.2008	4	12:05:08	12:35:53	0.154	0.143	0.150	0.150	0.210	0.220	0.267				00:30:45	0.267
12.12.2008	5	12:38:03	13:10:48	0.555	0.575	0.428	0.400	0.386	0.383	0.367				00:32:45	0.358
12.12.2008	6	13:12:43	13:42:53	0.070	0.052	0.111	0.153	0.190	0.224	0.254				00:30:10	0.256
12.12.2008	7	13:44:53	14:16:13	0.247	0.210	0.188	0.195	0.211	0.219	0.235				00:31:20	0.238
12.12.2008	8	14:17:53	14:47:43	0.215	0.197	0.165	0.179	0.196	0.219	0.238				00:29:50	0.238
12.12.2008	MW			0.209	0.198	0.183	0.190	0.211	0.230	0.248					0.247
22.12.2008	1	09:39:08	10:41:03	0.369	0.340	0.239	0.229	0.250	0.272	0.318	0.318	0.325	0.317	01:01:55	0.314
22.12.2008	2	10:43:03	11:44:28	0.803	0.665	0.493	0.371	0.360	0.389	0.453	0.426	0.351	0.342	01:01:25	0.384
22.12.2008	3	11:46:28	12:50:43	0.504	0.403	0.336	0.333	0.374	0.424	0.435	0.390	0.322	0.329	01:04:15	0.321
22.12.2008	MW			0.559	0.469	0.356	0.311	0.328	0.362	0.402	0.378	0.333	0.329		0.340
30.12.2008	1	11:55:08	12:26:38	0.572	0.483	0.408	0.411	0.470	0.484	0.412				00:31:30	0.409
30.12.2008	2	12:30:38	13:00:23	0.592	0.510	0.388	0.395	0.434	0.457	0.465				00:29:45	0.465
30.12.2008	3	13:03:53	13:37:13	0.165	0.232	0.225	0.215	0.251	0.304	0.346				00:33:20	0.342
30.12.2008	MW			0.443	0.408	0.340	0.340	0.385	0.415	0.408					0.405
16.01.2009	1	11:27:07	12:02:32	0.525	0.464	0.396	0.384	0.388	0.378	0.358				00:35:25	0.348
16.01.2009	2	12:05:02	12:36:52	0.597	0.531	0.451	0.428	0.429	0.430	0.441				00:31:50	0.432
16.01.2009	3	12:39:02	13:11:07	0.149	0.149	0.134	0.134	0.144	0.147	0.136				00:32:05	0.136
16.01.2009	4	13:13:02	13:45:27	0.058	0.130	0.122	0.119	0.126	0.133	0.134				00:32:25	0.138
16.01.2009	5	13:48:12	14:33:27	0.444	0.381	0.292	0.247	0.228	0.236	0.259	0.194			00:45:15	0.228
16.01.2009	MW			0.355	0.331	0.279	0.262	0.263	0.265	0.266	0.194				0.257
23.01.2009	1	11:28:33	12:02:13	0.107	0.160	0.160	0.240	0.227	0.237	0.213				00:33:40	0.201
23.01.2009	2	12:03:58	12:35:08	0.438	0.341	0.263	0.302	0.308	0.294	0.238				00:31:10	0.235
23.01.2009	4	13:16:53	13:47:48	0.174	0.145	0.163	0.163	0.163	0.171	0.130				00:30:55	0.127
23.01.2009	5	13:49:23	14:20:18	0.508	0.466	0.373	0.368	0.367	0.349	0.296				00:30:55	0.288
23.01.2009	6	14:22:13	14:53:08	0.341	0.268	0.253	0.307	0.283	0.270	0.231				00:30:55	0.229
23.01.2009	7	14:54:48	15:30:13	0.879	0.616	0.387	0.375	0.367	0.337	0.295				00:35:25	0.268
23.01.2009	MW			0.408	0.333	0.266	0.292	0.286	0.277	0.234					0.225
30.01.2009	1	11:21:32	11:52:57	0.049	0.024	0.073	0.147	0.149	0.144	0.134				00:31:25	0.134
30.01.2009	2	11:54:42	12:30:07	0.235	0.182	0.132	0.203	0.214	0.213	0.192				00:35:25	0.185
30.01.2009	3	12:31:32	13:02:57	0.338	0.247	0.177	0.200	0.210	0.205	0.185				00:31:25	0.158
30.01.2009	4	13:05:02	13:36:42	0.128	0.192	0.256	0.273	0.262	0.245	0.215				00:31:40	0.216
30.01.2009	5	13:38:07	14:28:52	0.028	0.166	0.199	0.246	0.197	0.192	0.158	0.136	0.120		00:50:40	0.104
30.01.2009	MW			0.155	0.162	0.167	0.214	0.206	0.200	0.177	0.136	0.120			0.159
13.02.2009	1	11:59:38	13:00:08	0.036	0.072	0.021	0.029	0.031	0.047	0.042	0.042	0.045	0.038	01:00:30	0.038
13.02.2009	2	13:01:58	14:11:03	0.132	0.033	0.033	0.030	0.040	0.025	0.030	0.030	0.031	0.027	01:09:05	0.027
13.02.2009	MW			0.084	0.052	0.027	0.029	0.035	0.036	0.036	0.036	0.038	0.033		0.032

Tab. 3: Abgeänderte „Anwelk-Methode“ Transpirationswerte für eine Blattseite

Versuche 1 bis 5 vom 05.12.2008 (siehe Abb. 36 bis 39) zeigen den Verlauf der Trans-

Ergebnisse

piration innerhalb einer Versuchszeit von 30 Minuten bis zu ca. 1 Stunde. Am Verlauf der Kurven zu erkennen ist, dass die Transpiration in einigen Fällen Versuch 3 und 5 (Abb. 38 und 39) relativ hoch anfängt, um dann ab zu fallen, beim Versuch Nr. 2 (Abb. 37) verläuft sie ansteigend, beim ersten Versuch (Abb. 36) zeigt sich so etwas wie ein IWANOFF-Effekt (siehe Diskussion).

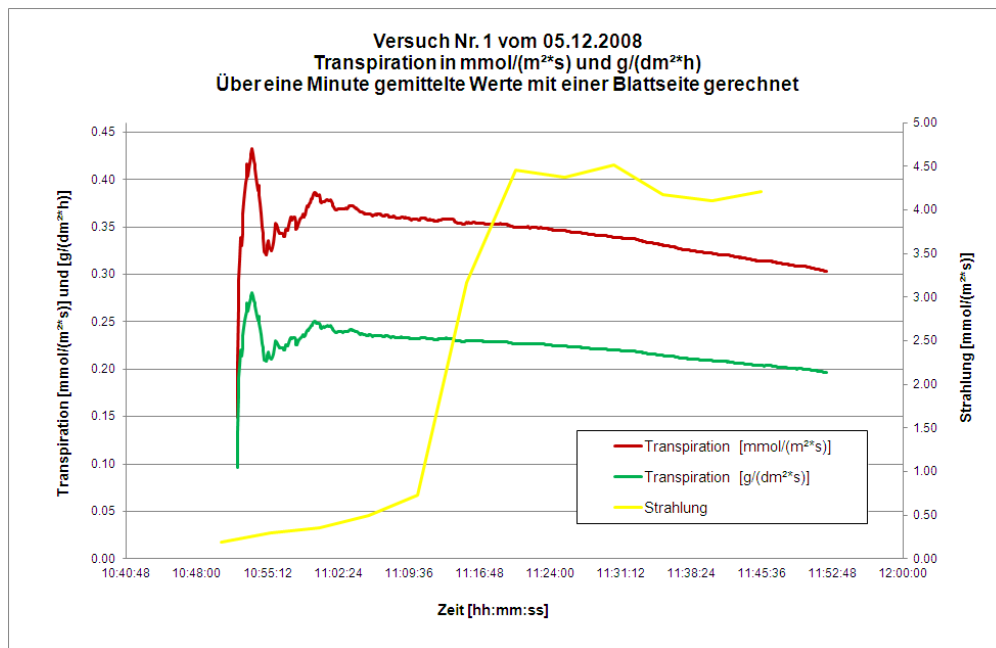


Abb. 36: Versuch Nr. 1 (05.12.2008): Vergleich der Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ und $\text{g}/(\text{dm}^2\cdot\text{h})$, eine Blattseite

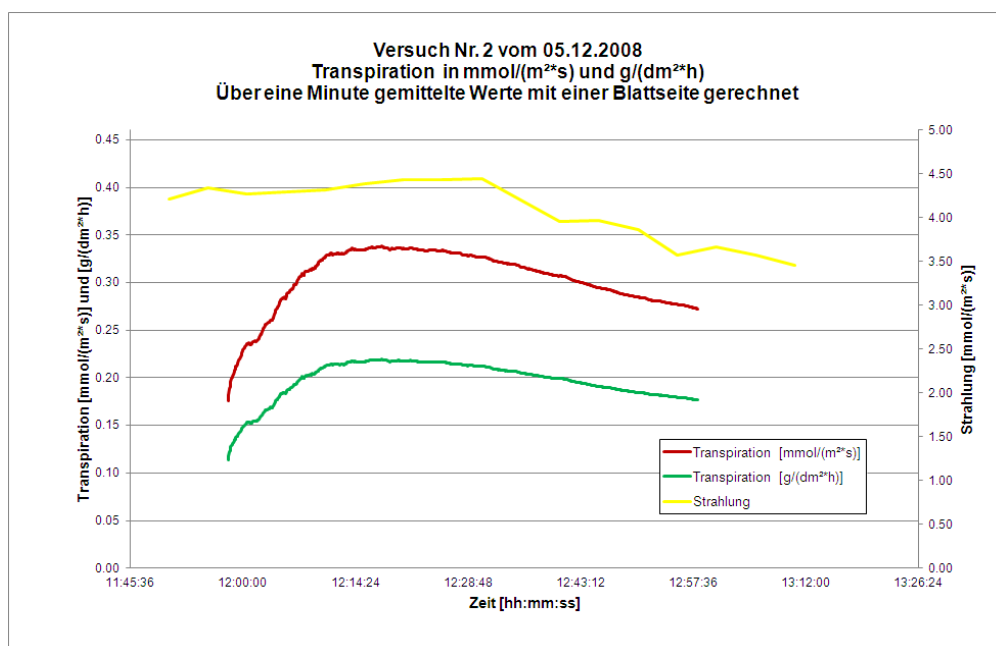


Abb. 37: Versuch Nr. 2 (05.12.2008): Vergleich der Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ und $\text{g}/(\text{dm}^2\cdot\text{h})$, eine Blattseite

Ergebnisse

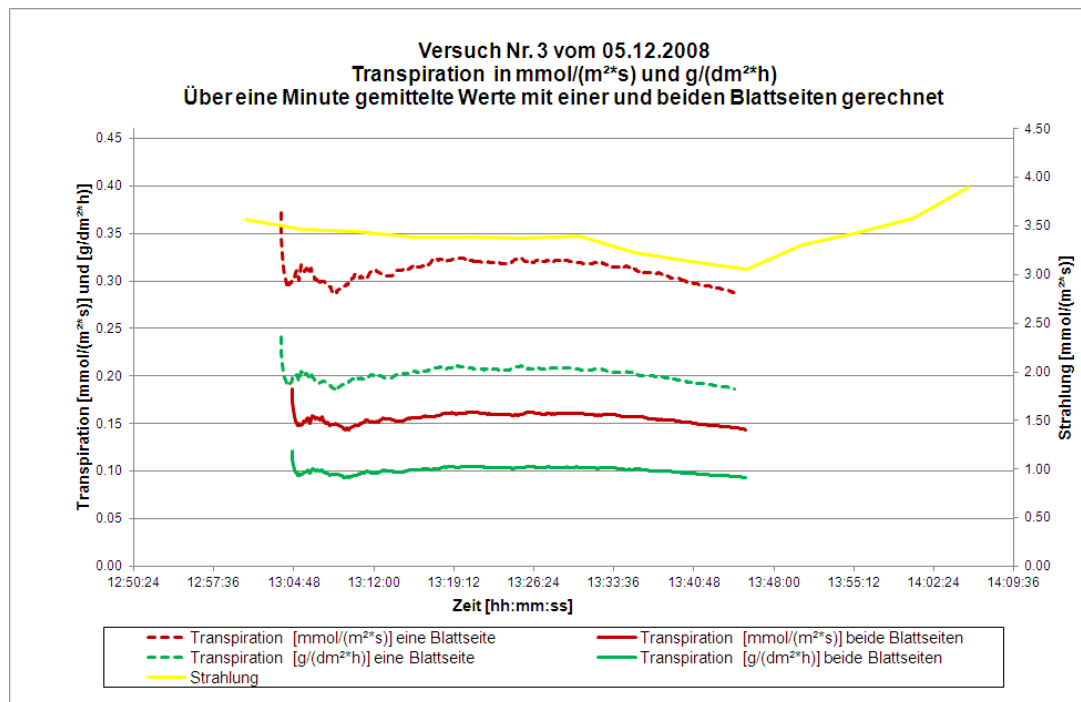


Abb. 38: Versuch Nr. 3 (05.12.2008): Vergleich der Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ und $\text{g}/(\text{dm}^2\cdot\text{h})$, eine und zwei Blattseiten

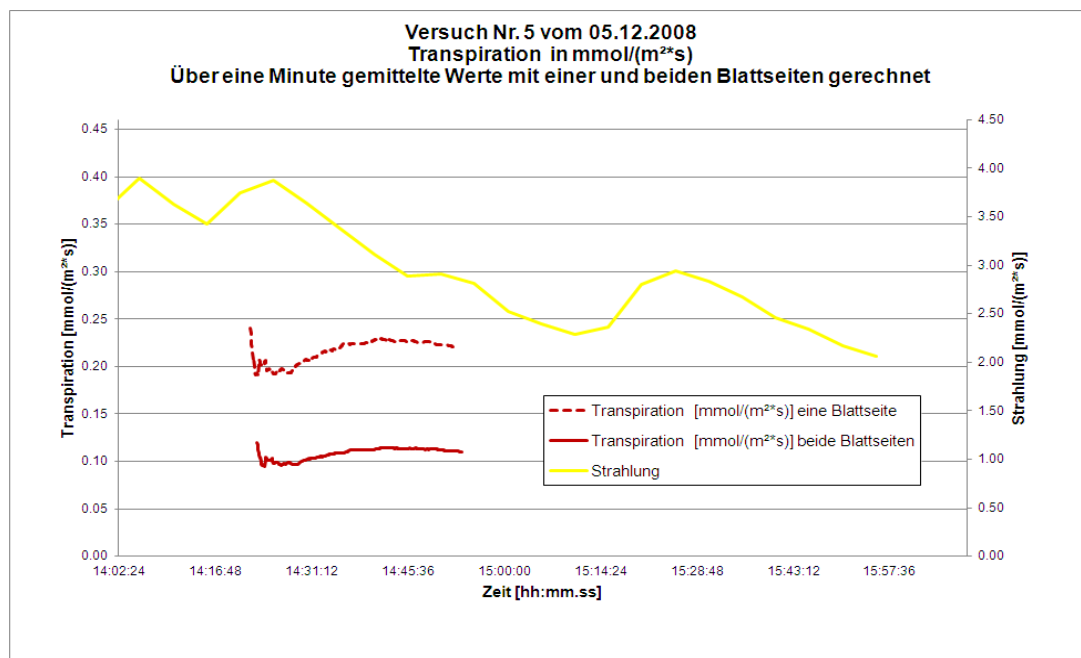


Abb. 39: Versuch Nr. 5 (05.12.2008): Vergleich der Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ für eine und zwei Blattseiten

Ergebnisse

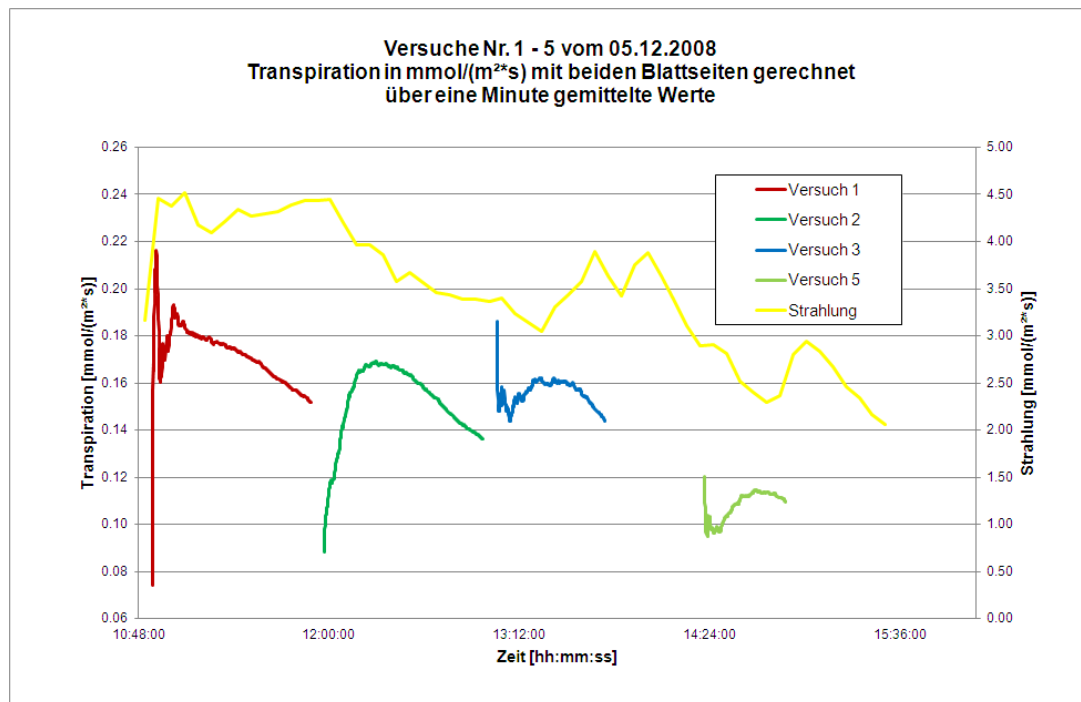


Abb. 40: Versuche Nr. 1 bis 5 vom 05.12.2008:
 Vergleich der Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, zwei Blattseiten

Der Zusammenhang mit der Strahlungsintensität geht aus den Diagrammen (Abb. 36 bis 39) nicht eindeutig hervor, so zeigt zum Beispiel die erste Messung (Abb. 36) überhaupt keinen Verlauf mit der Strahlungsintensität, dagegen zeigt sich ein Zusammenhang bei Versuch 2 (Abb. 37). Fasst man die Versuche in ein Diagramm (Abb. 40) über den Versuchstag zusammen ist ein leichter Trend zum Einfluss der Strahlung zu erkennen. Mit abnehmender Strahlung wird die Transpiration auch allgemein geringer, siehe so bei Versuch Nr. 5, der mit einer maximalen Transpiration von $0,12 \text{ mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ die geringste Transpiration aufweist (Abb. 40). Es ist aber hier zu bedenken, dass die Versuche mit Einzelblättern durchgeführt wurden, von denen jedes doch eine andere physiologische „Startbedingung“ hat, obwohl darauf geachtet wurde, dass alle gleich gegossen waren und die gleichen Lichtverhältnisse hatten.

Aus den Versuchen vom 12.12.2008 zeigen die ersten drei (Abb. 41 bis 43) keinen Zusammenhang zur Strahlungsintensität. Bei den restlichen Versuchen 4 bis 8 (Abb. 44 bis 48) kann anhand der Kurven ein leichtes Abnehmen der Transpiration bei Verringerung

Ergebnisse

der Strahlung beobachtet werden, jedoch ist dies nicht ganz eindeutig. Ebenso zeigt die Zusammenstellung der Versuche über den gesamten Tag hinweg (Abb. 49) zwar einen Trend, ist aber nicht eindeutig. Es zeigt sich aber bei den Versuchen Nr. 6 und Nr. 8 vom 12.12.2008 (Abb. 46 und 48) wieder eine Art IWANOFF-Effekt, die Transpiration steigt, um dann wieder langsam ab zu sinken.

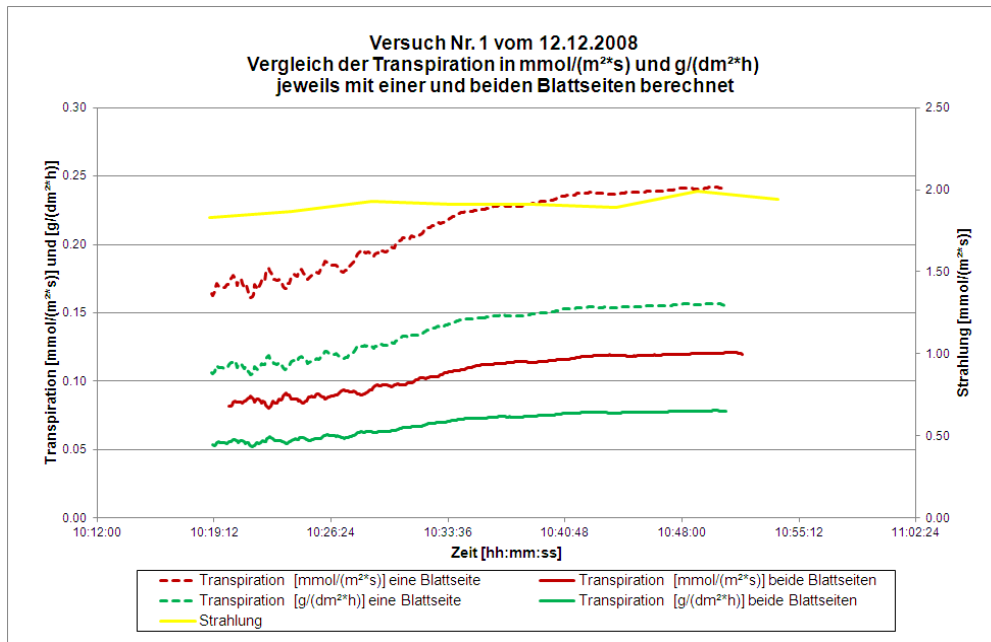


Abb. 41: Versuch Nr. 1 (12.12.2008): Vergleich der Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ und $\text{g}/(\text{dm}^2\cdot\text{h})$ für eine und zwei Blattseiten

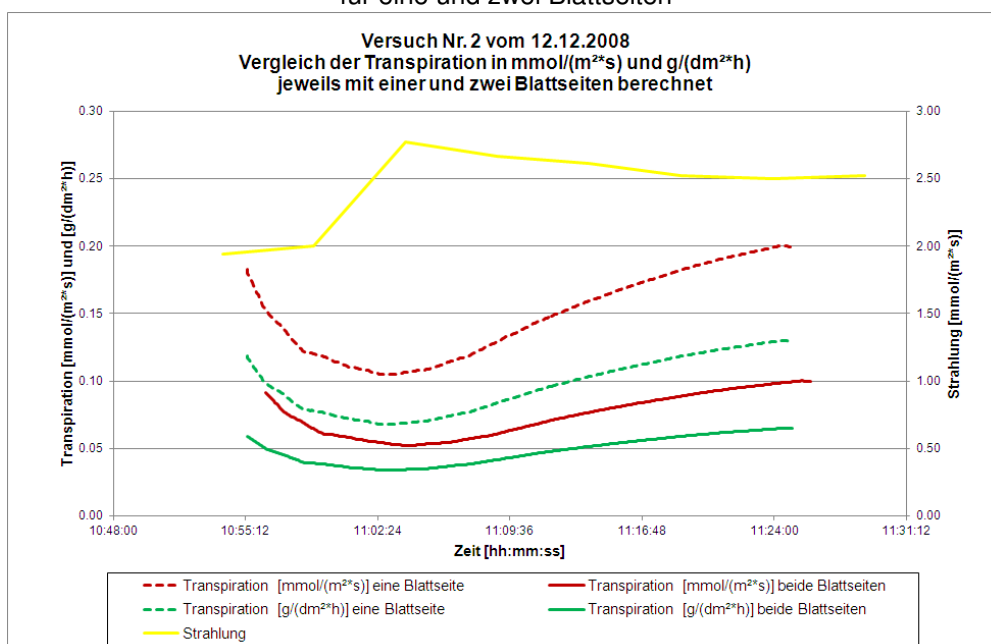


Abb. 42: Versuch Nr. 2 (12.12.2008): Vergleich der Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ und $\text{g}/(\text{dm}^2\cdot\text{h})$ für eine und zwei Blattseiten

Ergebnisse

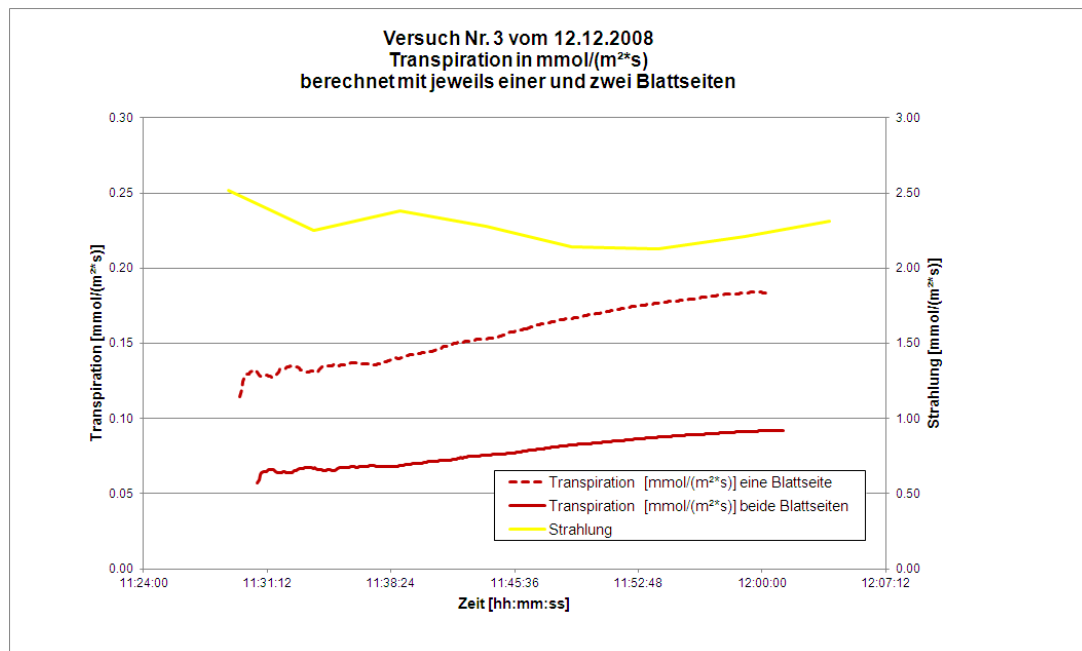


Abb.43: Versuch Nr. 3 (12.12.2008): Vergleich der Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ für eine und zwei Blattseiten

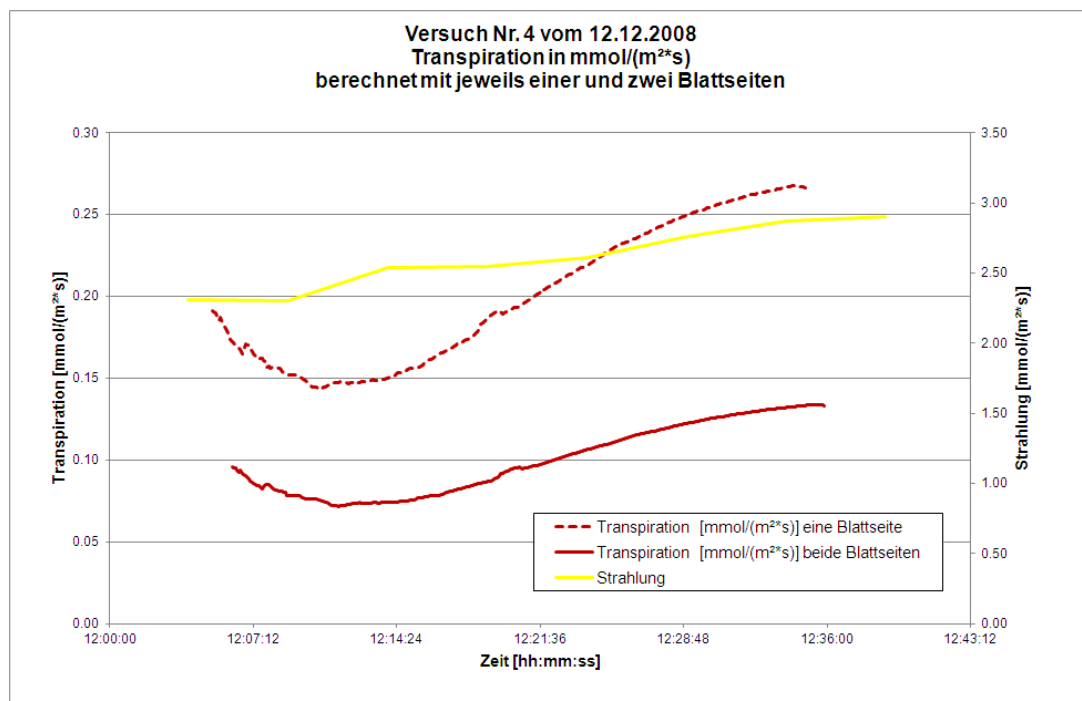


Abb. 44: Versuch Nr. 4 (12.12.2008): Vergleich der Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ für eine und zwei Blattseiten

Ergebnisse

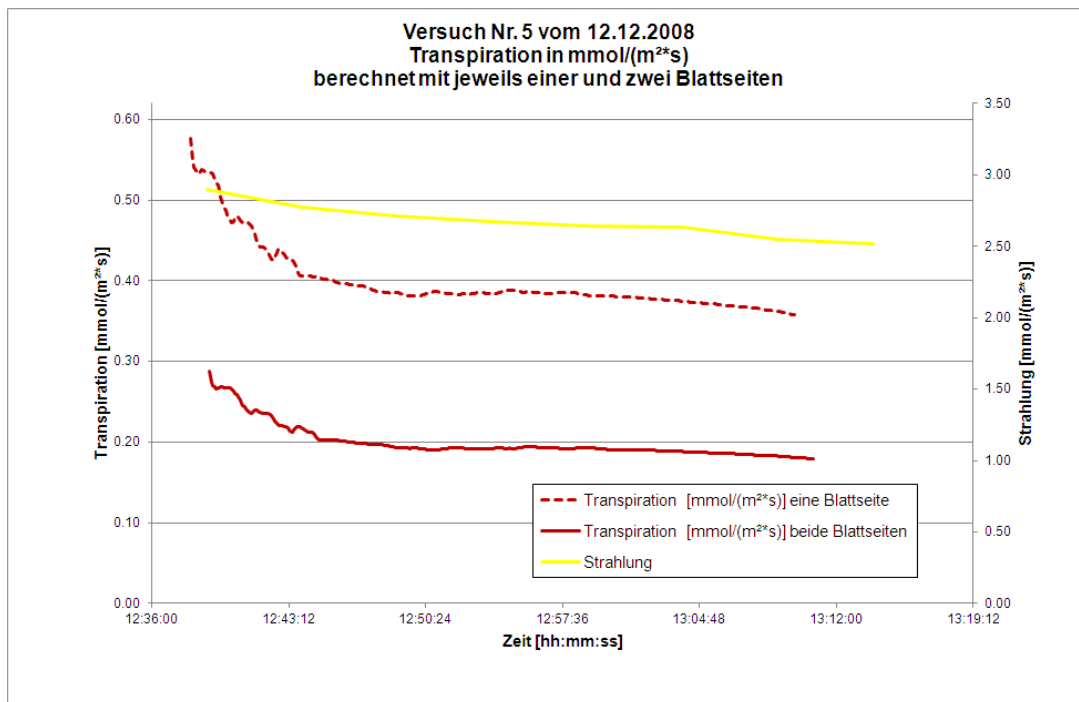


Abb. 45: Versuch Nr. 5 (12.12.2008): Vergleich der Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ für eine und zwei Blattseiten

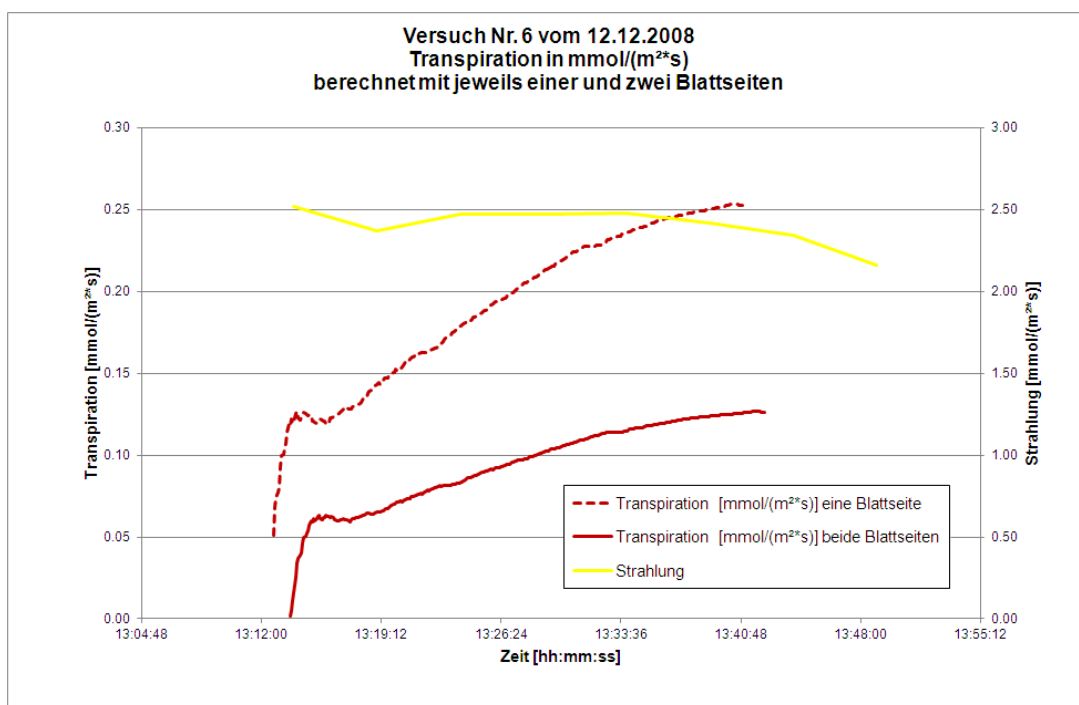


Abb. 46: Versuch Nr. 6 (12.12.2008): Vergleich der Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ für eine und zwei Blattseiten

Ergebnisse

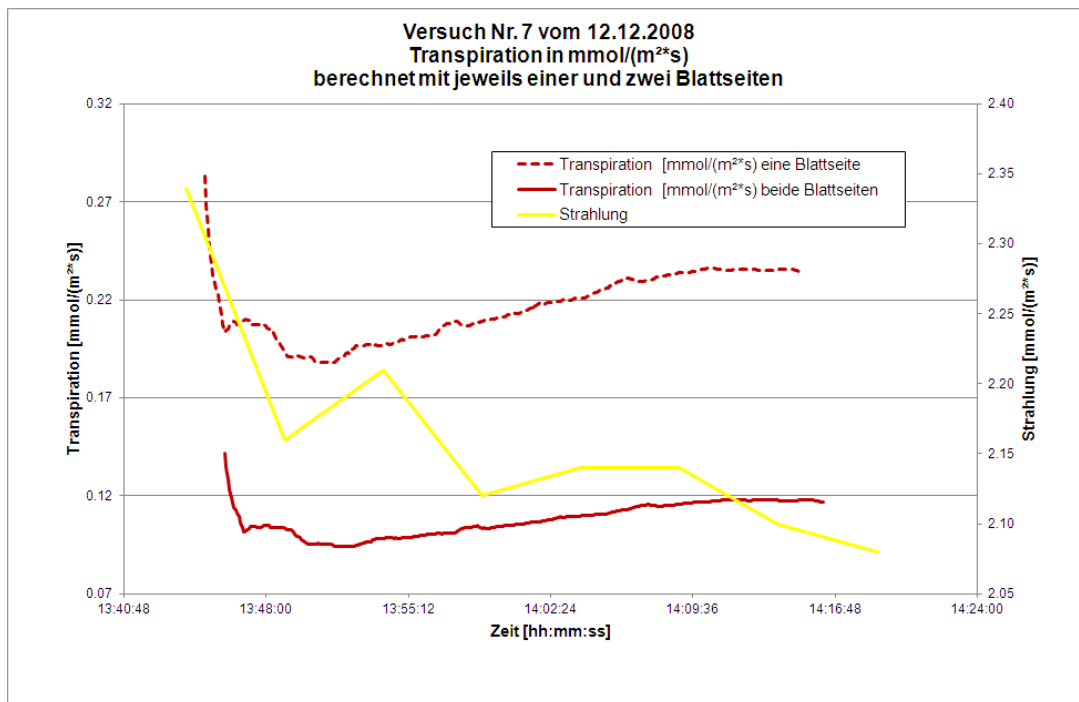


Abb. 47: Versuch Nr. 7 (12.12.2008): Vergleich der Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ für eine und zwei Blattseiten

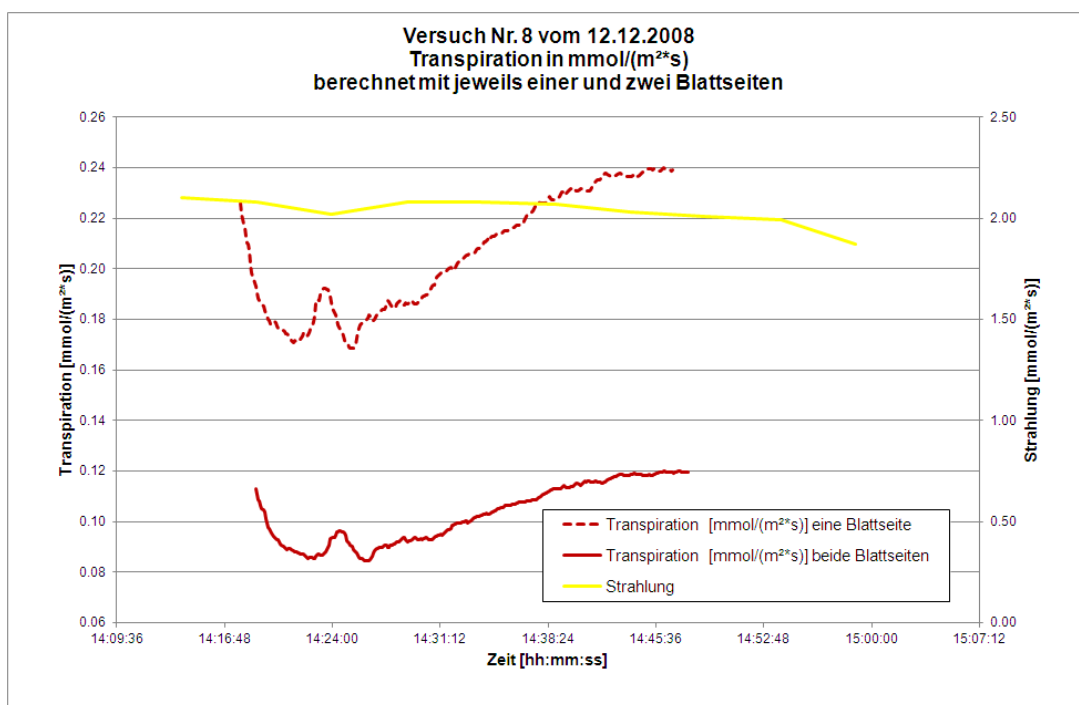


Abb. 48: Versuch Nr. 8 (12.12.2008): Vergleich der Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ für eine und zwei Blattseiten

Ergebnisse

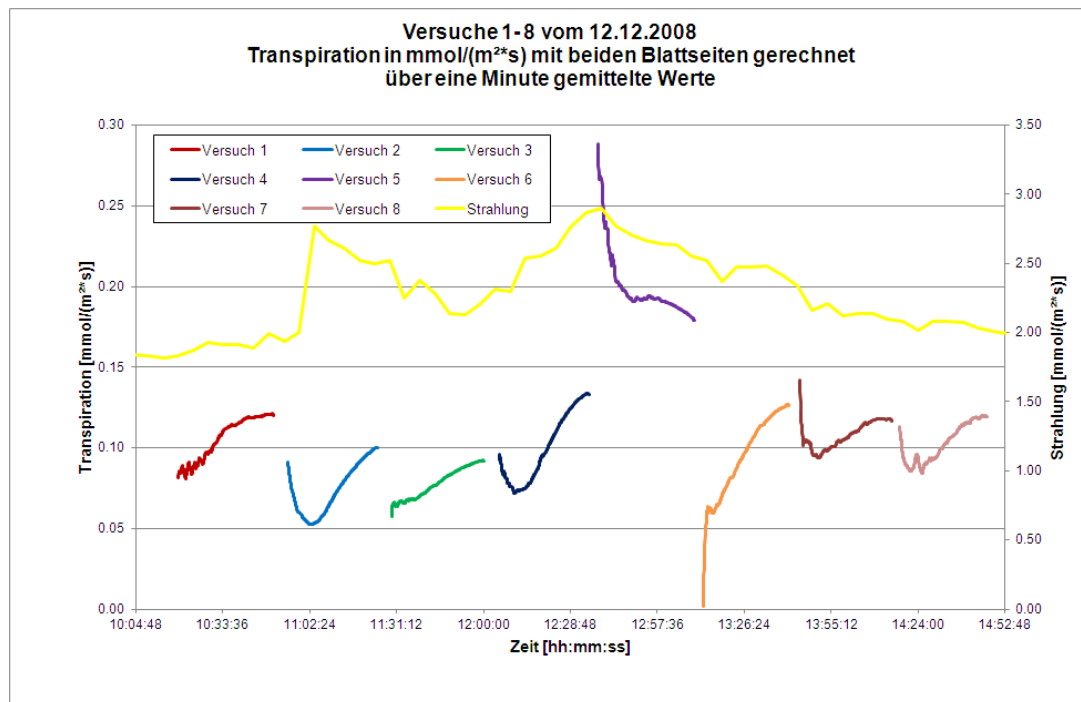


Abb. 49: Versuche Nr. 1 bis 8 vom 12.12.2008: Vergleich der Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, zwei Blattseiten

Die Versuchsreihe vom 22.12.2008 (Abb. 50 bis 52) zeigt hier schon eher eindeutigeren Verläufe der Transpiration mit der Strahlung. So kann bei Versuch Nr. 3 (Abb. 52) ein Anstieg der Transpiration mit steigender Strahlungsintensität beobachtet werden. Zu bedenken ist aber immer, dass diese Versuche im Dezember durchgeführt wurden und die Strahlungsbedingungen eher ungeeignet sind, um hier eindeutige Zusammenhänge herauslesen zu können.

Um den möglichen Einfluss von den Parametern Luftfeuchte und Temperatur noch zu überprüfen, wurden diesen Parameter zusätzlich mit einem Sensor in der Waagenabdeckung gemessen, obwohl diese während der Messung offen war, um kein eigenes Klima in der Waage zu erzeugen. Der Verlauf der Messkurven (Abb. 53) zeigt, dass die Bedingungen in der Waage nicht wesentlich von den Umgebungsbedingungen des Glashauses abweichen.

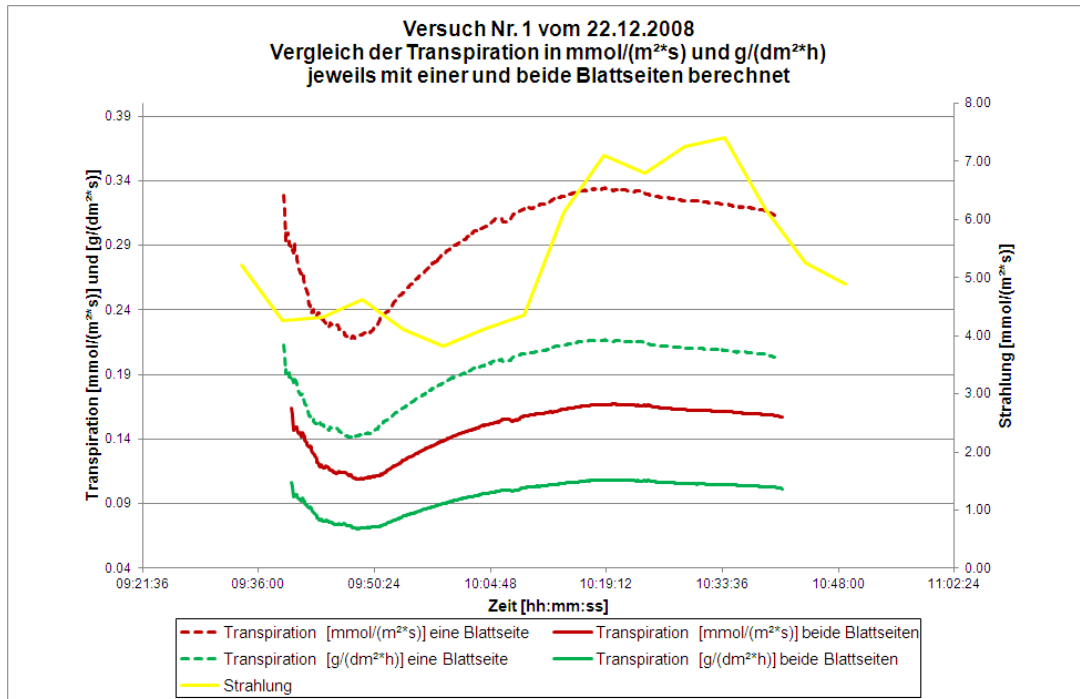


Abb. 50: Versuch Nr. 1 (22.12.2008): Vergleich der Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ und $\text{g}/(\text{dm}^2\cdot\text{h})$ für eine und zwei Blattseiten

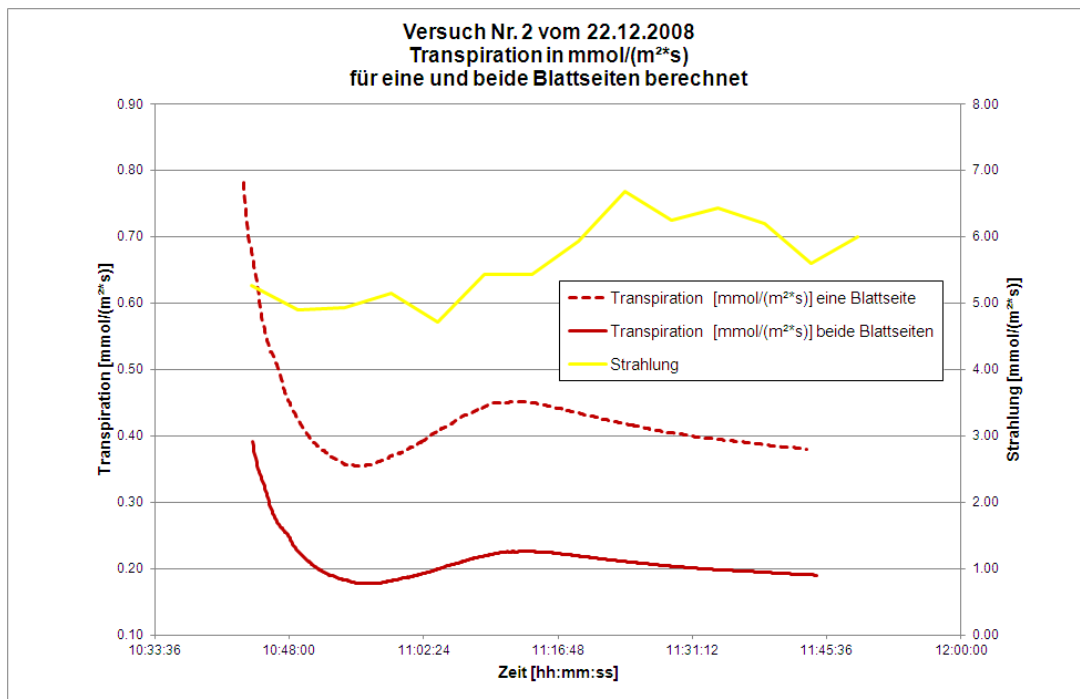


Abb. 51: Versuch Nr. 2 (22.12.2008): Vergleich der Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ für eine und zwei Blattseiten

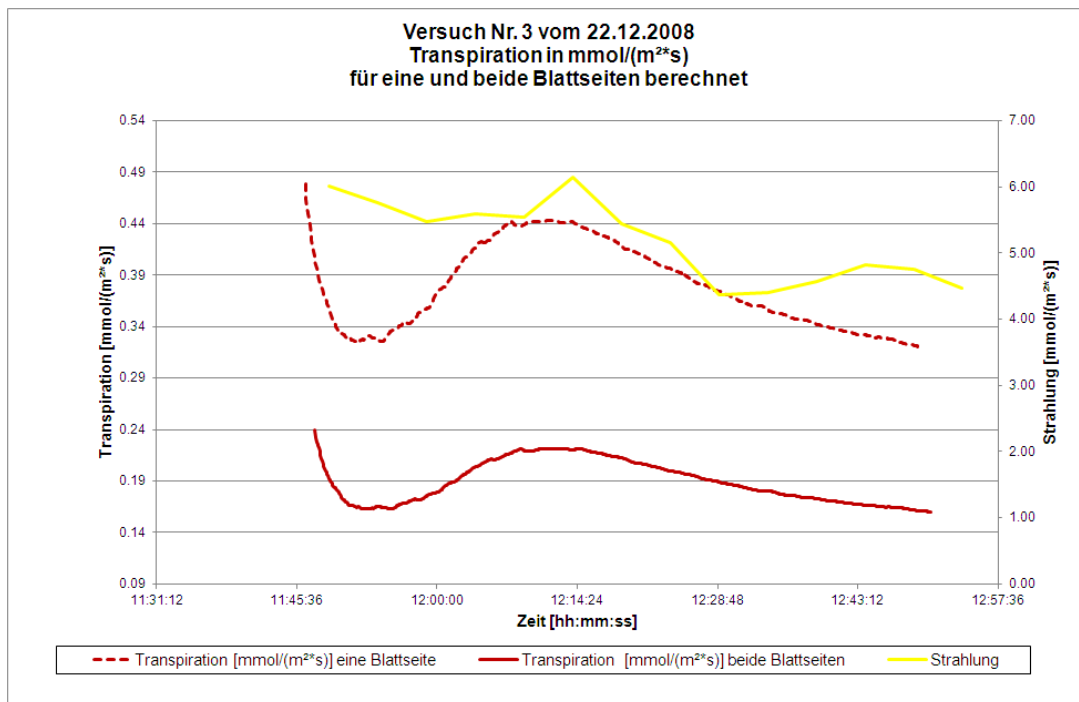


Abb.52: Versuch Nr. 3 (22.12.2008): Vergleich der Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ für eine und zwei Blattseiten

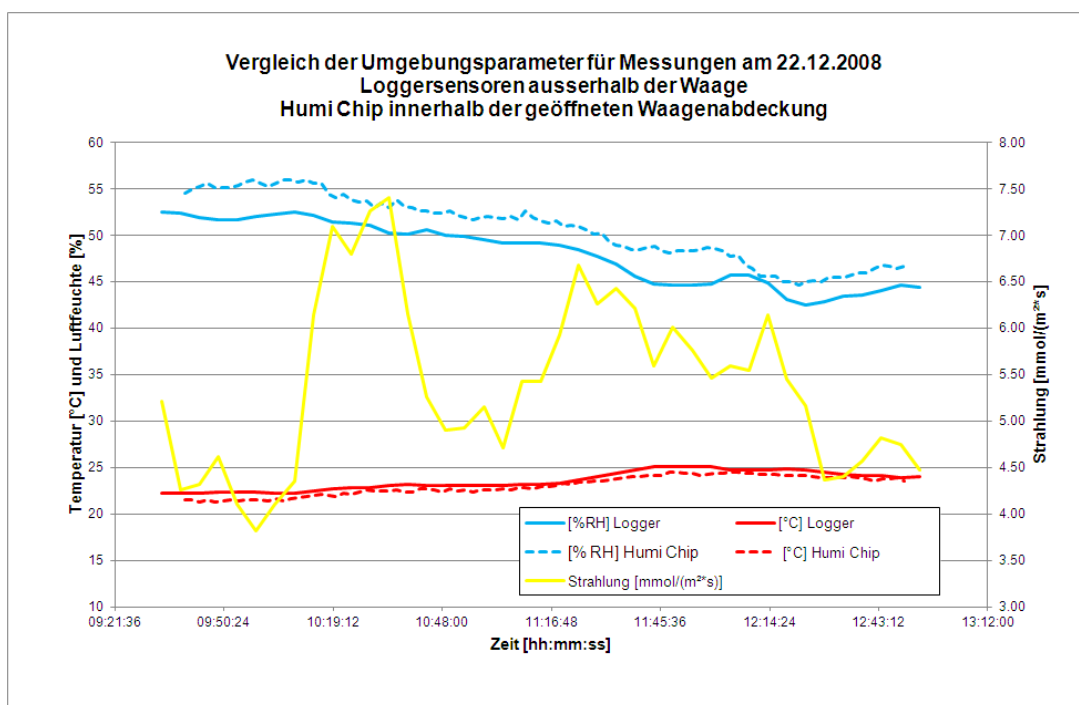


Abb. 53: Umgebungsparameter der Messungen von 22.12.2008

7.2 Transpirationsverhalten der Blattober- und Unterseite

Wie im Abschnitt Methoden beschrieben, wurde das Transpirationsverhalten der Blattober- und Unterseite durch bestreichen der jeweiligen Blattseite mit Vaseline untersucht. Die Ergebnisse werden in den nachfolgenden Messkurven (Abb. 54 bis Abb. 59) und Tabellen 4 bis 7 dargestellt. Dabei ist die rote durchgehende Linie die Transpiration der Blattoberseite, in den Diagrammen bezeichnet als Blattunterseite versiegelt, die rote strichlierte Linie dagegen stellt die Transpiration der Blattunterseite dar, bezeichnet als Blattoberseite versiegelt.

Abbild 54 stellt die Versuche 1 und 2 vom 20.02.2009 dar. Dabei ist interessant, dass auch bei der versiegelten Blattunterseite die „Transpiration“ (in diesem Fall kann diese nicht so bezeichnet werden), auch auf einem relativ hohen Niveau anfängt, relativ hoch aus der Sicht heraus, dass mit $0,10 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ die folgenden Transpirationsraten doch im unteren Bereich liegen. Dann verläuft sie nach einem kleinen Anstieg auf sehr geringem Niveau weiter bis zu Versuchende.

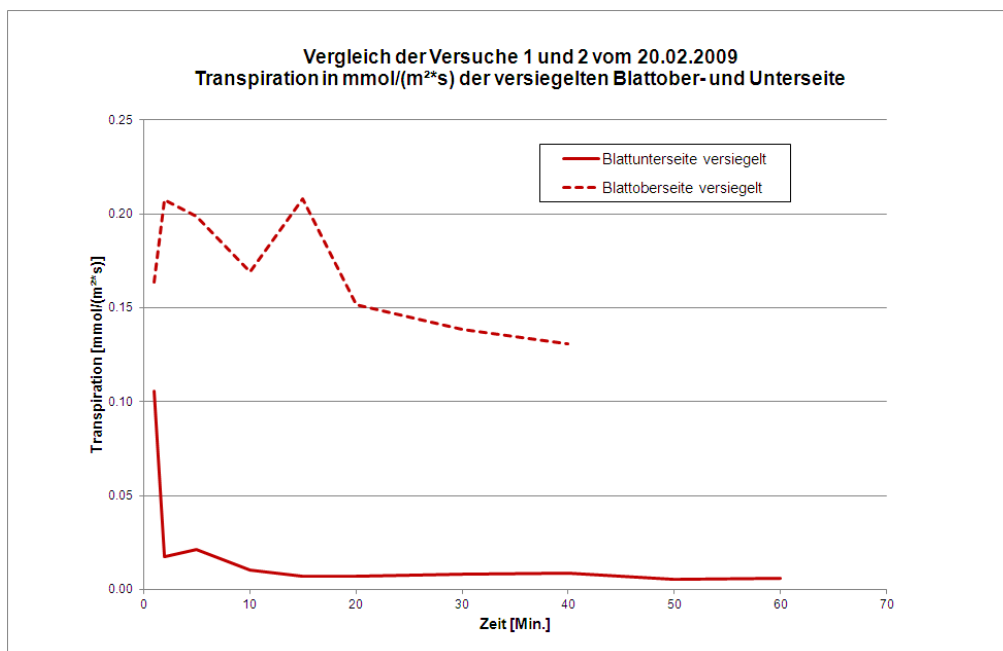


Abb. 54: Versuch Nr. 1 & 2 (20.02.2009): Vergleich der Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ der Blattober- und Unterseite

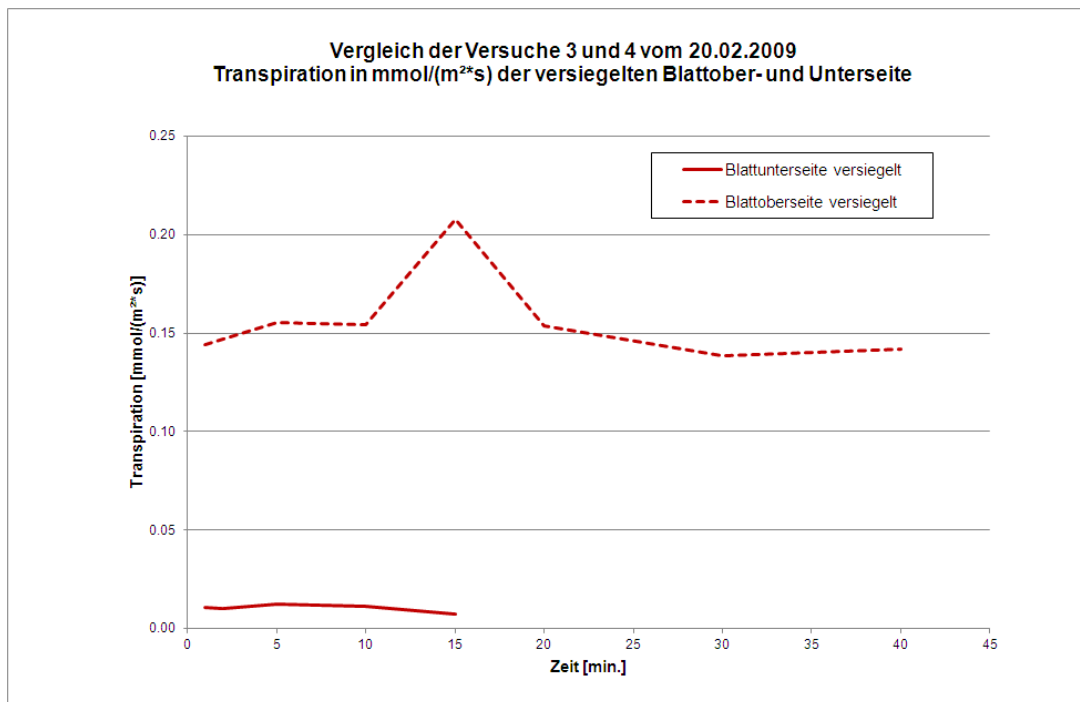


Abb. 55: Versuch Nr. 3 & 4 (20.02.2009): Vergleich der Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ der Blattober- und Unterseite

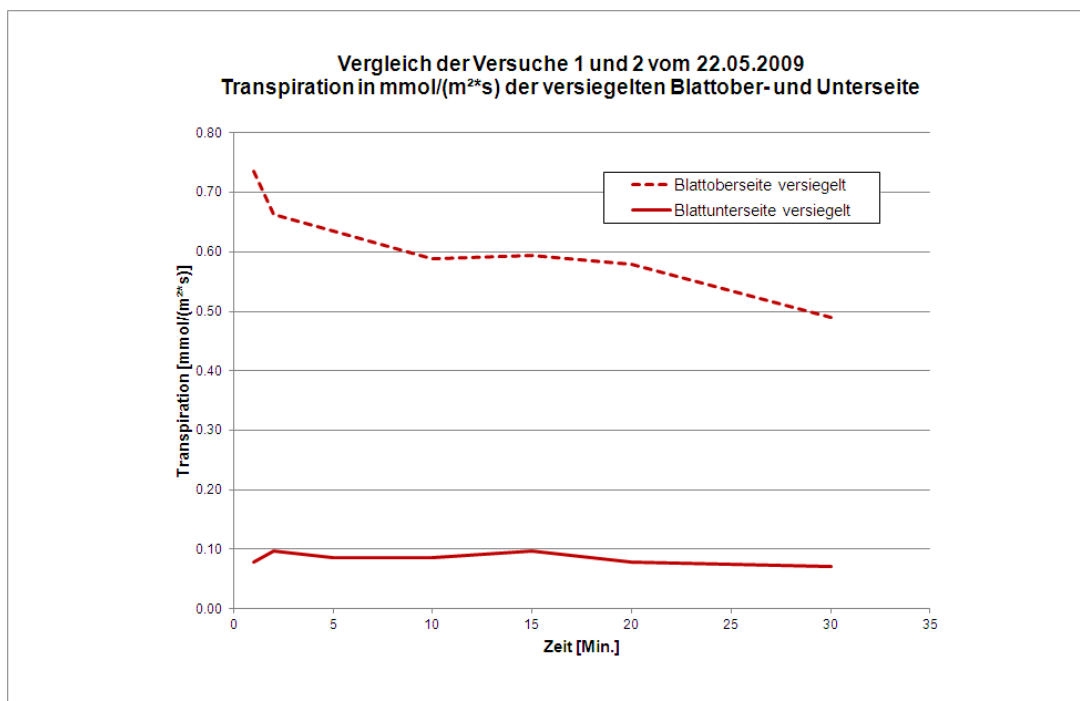


Abb. 56: Versuch Nr. 1 & 2 (22.05.2009): Vergleich der Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ der Blattober- und Unterseite

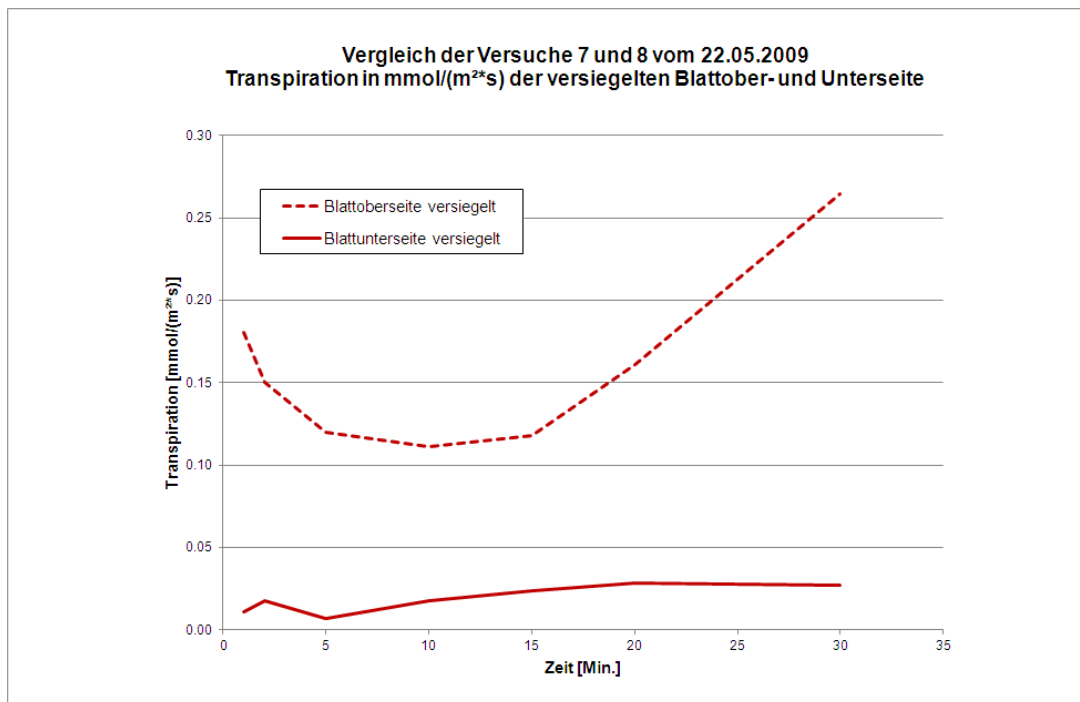


Abb. 57: Versuch Nr. 7 & 8 (22.05.2009): Vergleich der Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ der Blattober- und Unterseite

Der relativ hohe Anfangswert der Blattoberseiten „Transpiration“ im Versuch 1 und 2 vom 03.07.2009 (Abb. 58) rührt eher von Schwingungen der Waage zu Messanfang oder vom „Setzungsverhalten“ der Vaseline her. Wenn diese durch die Wärme etwas flüssiger wird kommt es zu einem langsamen „Kriechen“ was bei einer empfindlichen Waage durchaus Auswirkungen haben kann.

STÅLFELT (1932) hat auch über die Eigenschaft der anfänglich schnellen Änderung des Messwertes berichtet, er führte es auch auf ein „Setzungsverhalten“ der Vaseline zurück, da die Messwerte aber auch bei Messungen ohne Vaseline eine schnelle Änderung der Werte zeigten, muss dies nicht unbedingt die einzig mögliche Ursache sein.

Versuch 1 und 2 vom 03.07.2009 (Abb. 58) und Versuch 3 und 4 vom 03.07.2009 (Abb. 59) zeigen aber auch schön den Verlauf der abnehmenden Transpiration, nach einem kurzen Anstieg fallen die Kurven mit zunehmender Versuchsdauer ab.

Ergebnisse

Aus den Abbildern 54 bis 59 wird klar, dass die Blattoberseite fast gar nichts zur Gesamttranspiration beiträgt. Die Kurven verlaufen alle deutlich unter der Messkurve die die Transpiration der Blattunterseite darstellt.

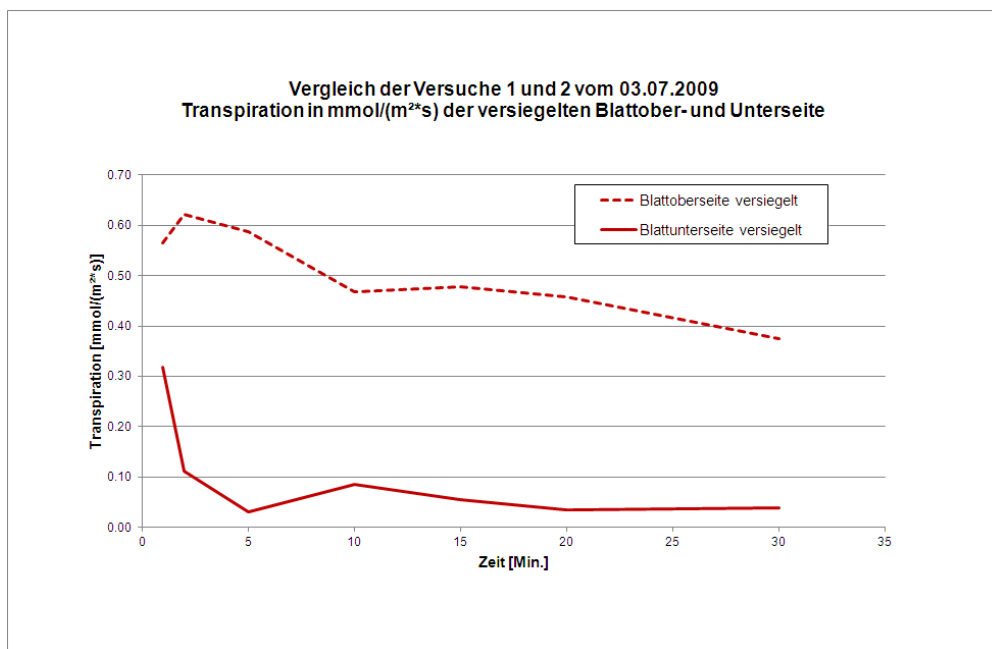


Abb. 58: Versuch Nr. 1 & 2 (03.07.2009): Vergleich der Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ der Blattober- und Unterseite

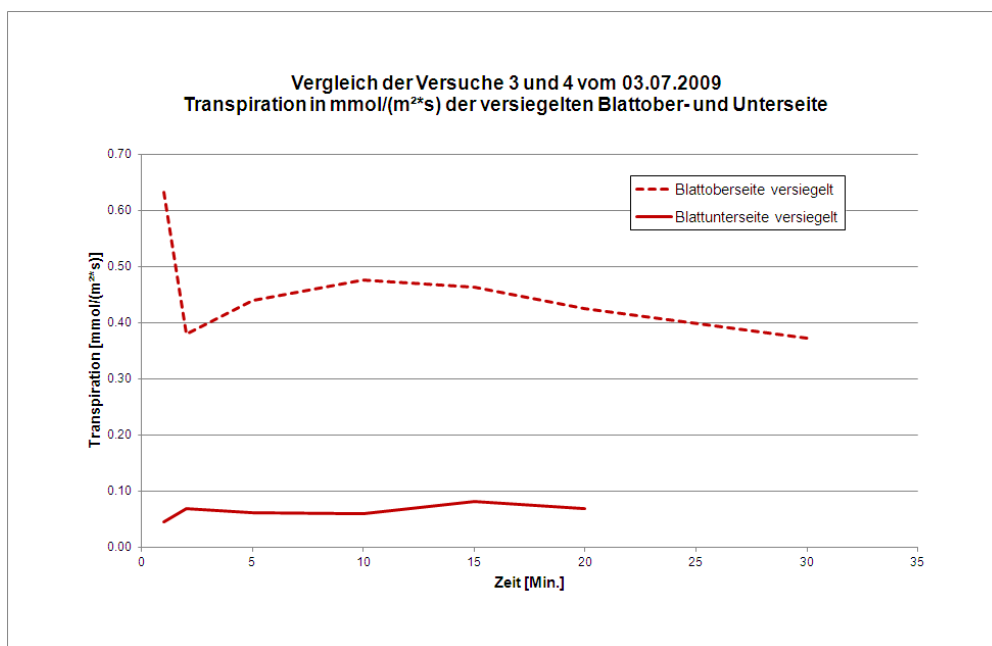


Abb. 59: Versuch Nr. 3 & 4 (03.07.2009): Vergleich der Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ der Blattober- und Unterseite

Ergebnisse

Ansonsten ist hauptsächlich die Blattunterseite für den Wasserdampfverlust verantwortlich. Dies wird auch aus den nachfolgenden Tabellen 4 und 5 deutlich.

In Tabelle 4 wird der Masseverlust (Wasserabgabe) in g und die Wasserdampfabgabe in g/m^2 der Unterseite des Blattes dargestellt. Die Blattoberseite ist bei diesen Versuchen mit einer dünnen Schicht Vaseline versiegelt. Das Maximum des Masseverlustes liegt bei 5,1%, was etwa den 6,1% aus der abgewandelten „Anwel- Methode“ entspricht, der Mindestwert liegt bei 0,5% was auch den Werten aus der abgeänderten „Anwel- Methode“ entspricht. Aus dem geringen Masseverlust kann auf ein Schließen der Spaltöffnungen geschlossen werden.

Da vor Aufnahme der Versuche der Schließzustand der Spaltöffnungen unbekannt ist, kann es durchaus sein, dass bei manchen Versuchsblättern die Spaltöffnungen schon vor Versuchsbeginn geschlossen sind. Dies zeigt sich dann in einem geringen Masseverlust, einer sehr flach verlaufenden Messkurve oder einer sehr geringen Transpirationsrate. Verdeutlicht wird dies durch Tabelle 5, wo diesmal die Blattunterseite mit Vaseline versiegelt wurde. Hier liegt der geringste Masseverlust bei 0,1% und der höchst Wert bei 0,9%.

Auch die Wasserdampfabgabe in g/m^2 zeigt den Unterschied zwischen der Blattober- und Unterseite. So liegt der Maximalwert der Wasserdampfabgabe bei $25,9 \text{ g/m}^2$. Vergleicht man dazu die Blattoberseite so liegt der Maximalwert des Masseverlustes bei $4,4 \text{ g/m}^2$.

Ergebnisse

Messung Nr.	Datum	Mess-	Zeit [hh:mm:ss]	Messdauer [hh:mm:ss]	Gewicht [g]	Masse-Differenz [g]	Masse-Verlust [%]	Blattfläche [cm²]	Wasserdampfabgabe [g/m²]	Seite versiegelt
2	20.02.2009	Anfang	13:00:20	01:10:20	0.63	0.0230	3.7	22.6	10.2	OS
		Ende	14:10:40		0.60					
4	20.02.2009	Anfang	15:03:10	01:08:30	0.50	0.0171	3.4	16.4	10.4	OS
		Ende	16:11:40		0.48					
2	04.03.2009	Anfang	11:13:18	00:31:15	0.74	0.0060	0.8	31.6	1.9	OS
		Ende	11:44:33		0.73					
4	04.03.2009	Anfang	12:23:48	00:40:20	0.36	0.0020	0.6	14.8	1.3	OS
		Ende	13:04:08		0.36					
6	04.03.2009	Anfang	13:41:13	00:31:15	0.52	0.0067	1.3	20.0	3.3	OS
		Ende	14:12:28		0.51					
2	06.03.2009	Anfang	11:30:03	00:31:20	0.54	0.0029	0.5	22.4	1.3	OS
		Ende	12:01:23		0.54					
4	06.03.2009	Anfang	12:43:38	00:32:25	0.55	0.0090	1.6	27.3	3.3	OS
		Ende	13:16:03		0.54					
6	06.03.2009	Anfang	13:52:13	00:30:55	0.36	0.0058	1.6	15.2	3.8	OS
		Ende	14:23:08		0.35					
1	11.03.2009	Anfang	09:28:00	00:30:10	0.66	0.0036	0.5	20.9	1.7	OS
		Ende	09:58:10		0.65					
3	11.03.2009	Anfang	10:34:55	00:35:05	0.58	0.0036	0.6	22.7	1.6	OS
		Ende	11:10:00		0.57					
5	11.03.2009	Anfang	12:43:40	00:31:40	0.49	0.0011	0.2	15.5	0.7	OS
		Ende	13:15:20		0.49					
1	22.05.2009	Anfang	11:25:05	00:36:15	1.24	0.0541	4.4	31.4	17.2	OS
		Ende	12:01:20		1.19					
3	22.05.2009	Anfang	12:37:50	00:29:55	2.75	0.0850	3.1	56.6	15.0	OS
		Ende	13:07:45		2.66					
5	22.05.2009	Anfang	13:41:05	00:31:20	1.89	0.0628	3.3	44.6	14.1	OS
		Ende	14:12:25		1.83					
7	22.05.2009	Anfang	14:44:25	00:30:35	1.73	0.0274	1.6	30.8	8.9	OS
		Ende	15:15:00		1.70					
1	27.05.2009	Anfang	10:40:24	00:30:25	1.83	0.0249	1.4	38.7	6.4	OS
		Ende	11:10:49		1.81					
3	27.05.2009	Anfang	12:13:24	00:30:30	1.72	0.0196	1.1	38.4	5.1	OS
		Ende	12:43:54		1.71					
1	05.06.2009	Anfang	11:50:15	00:30:40	1.64	0.0575	3.5	28.7	20.0	OS
		Ende	12:20:55		1.58					
3	05.06.2009	Anfang	12:56:10	00:30:45	1.85	0.0111	0.6	58.6	1.9	OS
		Ende	13:26:55		1.84					
5	05.06.2009	Anfang	14:01:50	00:29:45	1.78	0.0293	1.6	41.5	7.1	OS
		Ende	14:31:35		1.76					
1	19.06.2009	Anfang	11:22:05	00:30:40	1.79	0.0462	2.6	35.4	13.0	OS
		Ende	11:52:45		1.74					
2	19.06.2009	Anfang	11:56:15	00:30:40	1.00	0.0076	0.8	18.4	4.1	OS
		Ende	12:26:55		0.99					
3	19.06.2009	Anfang	12:29:55	00:31:20	1.55	0.0316	2.0	30.2	10.5	OS
		Ende	13:01:15		1.52					
1	26.06.2009	Anfang	10:47:50	00:30:03	1.45	0.0734	5.1	28.4	25.9	OS
		Ende	11:17:53		1.38					
3	26.06.2009	Anfang	11:50:35	00:30:15	1.67	0.0594	3.5	32.3	18.4	OS
		Ende	12:20:50		1.62					
5	26.06.2009	Anfang	12:53:35	00:30:15	1.05	0.0451	4.3	20.4	22.1	OS
		Ende	13:23:50		1.01					
6	26.06.2009	Anfang	13:25:00	00:35:35	1.33	0.0140	1.0	24.1	5.8	OS
		Ende	14:00:35		1.32					
1	03.07.2009	Anfang	10:35:45	00:29:25	1.22	0.0299	2.5	24.5	12.2	OS
		Ende	11:05:10		1.19					
3	03.07.2009	Anfang	11:39:15	00:31:00	1.40	0.0458	3.3	36.6	12.5	OS
		Ende	12:10:15		1.35					
5	03.07.2009	Anfang	12:43:00	00:30:20	1.43	0.0398	2.8	30.4	13.1	OS
		Ende	13:13:20		1.39					
6	03.07.2009	Anfang	13:14:45	00:30:15	2.29	0.0812	3.5	47.0	17.3	OS
		Ende	13:45:00		2.21					
8	03.07.2009	Anfang	14:17:45	00:29:55	1.14	0.0398	3.5	25.9	15.4	OS
		Ende	14:47:40		1.10					
10	03.07.2009	Anfang	15:21:15	00:34:20	1.34	0.0394	2.9	34.7	11.4	OS
		Ende	15:55:35		1.30					
1	10.07.2009	Anfang	10:35:52	00:30:35	1.369	0.0345	2.5	30.7	11.2	OS
		Ende	11:06:27		1.335					
3	10.07.2009	Anfang	11:41:32	00:30:10	1.282	0.0153	1.2	31.5	4.9	OS
		Ende	12:11:42		1.267					
5	10.07.2009	Anfang	12:45:32	00:30:25	1.895	0.0493	2.6	40.2	12.3	OS
		Ende	13:15:57		1.846					
7	10.07.2009	Anfang	13:49:42	00:29:55	1.140	0.0467	4.1	26.9	17.3	OS
		Ende	14:19:37		1.093					
9	10.07.2009	Anfang	14:53:42	00:30:50	0.979	0.0381	3.9	27.3	14.0	OS
		Ende	15:24:32		0.941					

Tab.4: Masseverlust und Wasserdampfabgabe der Blattunterseite in g/m² und %, (OS = Oberseite versiegelt)

Ergebnisse

Messung Nr.	Datum	Mess-	Zeit [hh:mm:ss]	Messdauer [hh:mm:ss]	Gewicht [g]	Masse-Differenz [g]	Masse-Verlust [%]	Blattfläche [cm ²]	Wasserdampfabgabe [g/m ²]	Seite versiegelt
1	20.02.2009	Anfang Ende	11:43:35 12:55:45	01:12:10	0.705 0.704	0.0014	0.2	26.3	0.5	US
3	20.02.2009	Anfang Ende	14:15:05 15:00:35	00:45:30	0.690 0.688	0.0013	0.2	22.3	0.6	US
1	04.03.2009	Anfang Ende	10:39:53 11:10:08	00:30:15	0.729 0.726	0.0029	0.4	28.9	1.0	US
3	04.03.2009	Anfang Ende	11:47:48 12:18:18	00:30:30	0.418 0.418	0.0004	0.1	20.9	0.2	US
5	04.03.2009	Anfang Ende	13:07:28 13:38:08	00:30:40	0.548 0.547	0.0015	0.3	19.7	0.8	US
1	06.03.2009	Anfang Ende	10:56:23 11:27:13	00:30:50	0.602 0.601	0.0014	0.2	29.8	0.5	US
3	06.03.2009	Anfang Ende	12:05:33 12:40:43	00:35:10	0.452 0.451	0.0012	0.3	23.2	0.5	US
5	06.03.2009	Anfang Ende	13:18:28 13:49:08	00:30:40	0.432 0.429	0.0030	0.7	20.5	1.5	US
2	11.03.2009	Anfang Ende	10:01:35 10:32:20	00:30:45	0.527 0.526	0.0008	0.2	16.3	0.5	US
4	11.03.2009	Anfang Ende	11:12:45 11:43:10	00:30:25	0.542 0.541	0.0004	0.1	21.2	0.2	US
6	11.03.2009	Anfang Ende	13:18:25 13:49:10	00:30:45	0.345 0.345	0.0006	0.2	13.7	0.4	US
2	22.05.2009	Anfang Ende	12:03:35 12:33:35	00:30:00	0.813 0.808	0.0054	0.7	23.6	2.3	US
4	22.05.2009	Anfang Ende	13:09:30 13:39:15	00:29:45	1.360 1.357	0.0030	0.2	36.3	0.8	US
6	22.05.2009	Anfang Ende	14:13:55 14:43:20	00:29:25	1.880 1.877	0.0026	0.1	39.0	0.7	US
8	22.05.2009	Anfang Ende	15:16:15 15:47:30	00:31:15	1.880 1.876	0.0038	0.2	41.5	0.9	US
2	27.05.2009	Anfang Ende	11:13:59 12:10:09	00:56:10	1.995 1.988	0.0061	0.3	35.7	1.7	US
4	27.05.2009	Anfang Ende	12:47:59 13:18:54	00:30:55	1.983 1.976	0.0077	0.4	46.1	1.7	US
2	05.06.2009	Anfang Ende	12:24:30 12:54:55	00:30:25	1.629 1.621	0.0081	0.5	31.7	2.6	US
4	05.06.2009	Anfang Ende	13:30:20 14:00:30	00:30:10	2.077 2.073	0.0042	0.2	45.1	0.9	US
4	19.06.2009	Anfang Ende	13:04:40 13:34:35	00:29:55	1.496 1.491	0.0054	0.4	28.1	1.9	US
5	19.06.2009	Anfang Ende	13:36:15 14:06:55	00:30:40	2.378 2.370	0.0073	0.3	39.8	1.8	US
6	19.06.2009	Anfang Ende	14:08:25 14:40:35	00:32:10	2.632 2.627	0.0051	0.2	46.3	1.1	US
2	26.06.2009	Anfang Ende	11:19:35 11:49:15	00:29:40	1.959 1.948	0.0118	0.6	34.0	3.5	US
4	26.06.2009	Anfang Ende	12:22:10 12:52:20	00:30:10	2.307 2.301	0.0060	0.3	38.9	1.5	US
2	03.07.2009	Anfang Ende	11:06:25 11:37:10	00:30:45	1.583 1.581	0.0021	0.1	29.1	0.7	US
4	03.07.2009	Anfang Ende	12:11:20 12:41:40	00:30:20	1.846 1.836	0.0103	0.6	45.5	2.3	US
7	03.07.2009	Anfang Ende	13:46:25 14:16:40	00:30:15	0.934 0.933	0.0015	0.2	25.3	0.6	US
9	03.07.2009	Anfang Ende	14:49:20 15:19:15	00:29:55	2.467 2.457	0.0097	0.4	46.4	2.1	US
2	10.07.2009	Anfang Ende	11:09:42 11:39:42	00:30:00	1.106 1.097	0.0095	0.9	21.7	4.4	US
4	10.07.2009	Anfang Ende	12:13:17 12:43:42	00:30:25	1.065 1.058	0.0077	0.7	21.5	3.6	US
6	10.07.2009	Anfang Ende	13:17:47 13:47:42	00:29:55	1.242 1.237	0.0049	0.4	24.5	2.0	US
8	10.07.2009	Anfang Ende	14:21:27 14:51:22	00:29:55	1.476 1.466	0.0098	0.7	26.5	3.7	US
10	10.07.2009	Anfang Ende	15:30:07 16:01:57	00:31:50	3.206 3.197	0.0091	0.3	63.6	1.4	US

Tab.5: Masseverlust und Wasserdampfabgabe der Blattoberseite in g/m² und %, (US = Unterseite versiegelt)

Ergebnisse

Tabellen 6 und 7 geben die Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, einmal für die Blattunterseite und einmal für die Blattoberseite, wieder. Zwischen den beiden Werten der Gesamttranspiration liegen eine Zehnerpotenz Differenz. In beiden Tabellen sind die hellrot hinterlegten Werte, negative Werte die durch die Schwingungen der Waage und der damit verbundenen Schnittstellenproblematik zustande kommen. Wenn die Waage zu sehr schwingt, werden die Werte schnell wechselnd übertragen und irgendwann kann die Schnittstelle (RS 232) diese Werte nicht mehr schnell genug an den Computer übertragen, es steht dann als Messwert eine Null oder irgendein „nonsense“ Wert, zum Beispiel ein negativer Wert. Auf den Gesamtverlauf der Messung haben solche „Fehler“ solange sie nicht all zu oft auftreten keinen Einfluss, man kann sie auch durch Interpolation durch reelle Werte ersetzen, da die Messwerte alle fünf Sekunden vorliegen.

Die Tabelle 7 mit den Werten für die versiegelte Unterseite enthält viel mehr dieser negativen Werte als die Tabelle 6 für die versiegelte Oberseite, da der Gewichtsverlust so gering ist, dass sich die Schwingungen der Waage hier mehr bemerkbar machen.

Ergebnisse

Datum	Versuch Nr.	Zeit		Transpiration in mmol/m ² s nach Minuten (Blattoberseite versiegelt)										Versuchsdauer [hh:mm:ss]	gesamte Transpiration [mmol/m ² s]
		von	bis	1	2	5	10	15	20	30	40	50	60		
20.02.2009	2	13:00:20	14:10:40	0.00	0.00	0.05	0.16	0.21	0.20	0.17	0.21	0.15	0.14	01:10:20	0.13
20.02.2009	4	15:03:10	16:11:40	-0.23	-0.06	0.03	0.14	0.15	0.16	0.15	0.21	0.15	0.14	01:08:30	0.14
20.02.2009	MW			-0.11	-0.03	0.04	0.15	0.18	0.18	0.16	0.21	0.15	0.14		0.14
04.03.2009	2	11:13:18	11:44:33	-0.03	0.01	0.04	0.04	0.05	0.06	0.06				00:31:15	0.06
04.03.2009	4	12:23:48	13:04:08	0.06	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.04	0.03			00:40:20	0.04
04.03.2009	6	13:41:13	14:12:28	-0.18	-0.07	0.03	0.08	0.11	0.11	0.10				00:31:15	0.10
04.03.2009	MW			-0.05	-0.02	0.03	0.05	0.07	0.07	0.07	0.03				0.07
06.03.2009	2	11:30:03	12:01:23	0.12	0.19	0.04	0.02	0.02	0.04	0.04				00:31:20	0.04
06.03.2009	4	12:43:38	13:16:03	0.07	0.07	0.09	0.11	0.11	0.10	0.09				00:32:25	0.10
06.03.2009	6	13:52:13	14:23:08	0.18	0.06	0.07	0.12	0.11	0.12	0.11				00:30:55	0.12
06.03.2009	MW			0.12	0.10	0.07	0.08	0.08	0.09	0.08					0.09
11.03.2009	1	09:28:00	09:58:20	-0.04	0.07	0.03	0.05	0.05	0.05	0.05				00:30:20	0.05
11.03.2009	3	10:34:55	11:10:00	-0.20	-0.08	-0.04	0.02	0.03	0.04	0.04				00:35:05	0.05
11.03.2009	5	12:43:40	13:15:20	-0.60	-0.33	-0.06	-0.05	-0.01	0.01	0.02				00:31:40	0.02
11.03.2009	MW			-0.28	-0.11	-0.02	0.01	0.02	0.03	0.04					0.04
22.05.2009	1	11:25:05	12:01:20	0.74	0.66	0.64	0.59	0.59	0.58	0.49				00:36:15	0.23
22.05.2009	3	12:37:50	13:07:45	0.64	0.40	0.26	0.18	0.22	0.31	0.46				00:29:55	0.46
22.05.2009	5	13:41:05	14:12:25	0.17	0.29	0.36	0.38	0.43	0.43	0.41				00:31:20	0.42
22.05.2009	7	14:44:25	15:15:00	0.18	0.15	0.12	0.11	0.12	0.16	0.26				00:30:35	0.27
22.05.2009	MW			0.43	0.38	0.34	0.32	0.34	0.37	0.41					0.35
27.05.2009	1	10:40:24	11:10:49	0.81	0.66	0.57	0.38	0.30	0.25	0.19				00:30:25	0.19
27.05.2009	3	12:13:24	12:43:54	0.53	0.39	0.22	0.13	0.10	0.10	0.15				00:30:30	0.15
27.05.2009	MW			0.67	0.52	0.40	0.26	0.20	0.17	0.17					0.17
05.06.2009	1	11:50:15	12:20:55	0.48	1.92	0.47	0.79	0.85	0.71	0.60				00:30:40	0.62
05.06.2009	3	12:56:10	13:26:55	0.27	0.12	0.06	0.03	0.05	0.07	0.06				00:30:45	0.06
05.06.2009	5	14:01:50	14:31:35	-0.04	0.07	0.08	0.15	0.20	0.22	0.22				00:29:45	0.22
05.06.2009	MW			0.24	0.70	0.20	0.33	0.37	0.33	0.29					0.30
19.06.2009	1	11:22:05	11:52:45	0.71	0.47	0.50	0.40	0.40	0.41	0.38				00:30:40	0.40
19.06.2009	2	11:56:15	12:26:55	0.55	0.08	0.15	0.14	0.11	0.13	0.13				00:30:40	0.13
19.06.2009	3	12:29:55	13:01:15	0.58	0.43	0.32	0.25	0.28	0.30	0.31				00:31:20	0.32
19.06.2009	MW			0.61	0.32	0.32	0.27	0.26	0.28	0.27					0.28
26.06.2009	1	10:47:50	11:17:55	0.91	0.83	0.91	1.07	0.97	0.91	0.80				00:30:05	0.77
26.06.2009	3	11:50:35	12:20:50	0.63	0.60	0.45	0.54	0.64	0.66	0.56				00:30:15	0.55
26.06.2009	5	12:53:35	13:23:50	0.41	0.52	0.60	0.72	0.77	0.77	0.69				00:30:15	0.66
26.06.2009	MW			0.65	0.65	0.66	0.78	0.79	0.78	0.68					0.66
03.07.2009	1	10:35:45	11:05:10	0.57	0.62	0.59	0.47	0.48	0.46	0.38				00:29:25	0.38
03.07.2009	3	11:39:15	12:10:15	0.63	0.38	0.44	0.48	0.46	0.42	0.37				00:31:00	0.37
03.07.2009	5	12:43:00	13:13:20	0.15	0.37	0.35	0.49	0.57	0.49	0.39				00:30:20	0.40
03.07.2009	6	13:14:45	13:45:00	0.61	0.73	0.57	0.65	0.64	0.64	0.53				00:30:15	0.53
03.07.2009	8	14:17:45	14:47:40	0.39	0.48	0.46	0.58	0.60	0.60	0.47				00:29:55	0.47
03.07.2009	10	15:21:15	15:55:35	0.32	0.32	0.28	0.27	0.31	0.32	0.31				00:34:20	0.35
03.07.2009	MW			0.45	0.48	0.45	0.49	0.51	0.49	0.41					0.42
10.07.2009	1	10:35:52	11:06:27	0.39	0.29	0.35	0.40	0.33	0.32	0.32				00:30:35	0.35
10.07.2009	3	11:41:32	12:11:42	0.18	-0.12	0.01	0.03	0.10	0.12	0.14				00:30:10	0.15
10.07.2009	5	12:45:32	13:15:57	0.85	0.26	0.29	0.32	0.38	0.43	0.38				00:30:25	0.38
10.07.2009	7	13:49:42	14:19:37	0.45	0.52	0.51	0.49	0.51	0.53	0.53				00:29:55	0.53
10.07.2009	9	14:53:42	15:24:32	0.92	0.63	0.66	0.62	0.57	0.52	0.43				00:30:50	0.43
10.07.2009	MW			0.56	0.32	0.36	0.37	0.38	0.38	0.36					0.37

Tab.6: Transpiration der Blattunterseite in mmol/(m²·)

Ergebnisse

Datum	Versuch Nr.	Zeit		Transpiration in mmol/m²*s nach Minuten (Blattunterseite versiegelt)											Versuchsdauer [hh:mm:ss]	gesamte Transpiration [mmol/m²*s]
		von	bis	1	2	5	10	15	20	30	40	50	60			
20.02.2009	1	11:43:35	12:55:45	0.11	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	01:12:10	0.01	
20.02.2009	3	14:15:05	15:00:35	-0.17	-0.08	-0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01			00:45:30	0.01	
20.02.2009	MW			-0.03	-0.03	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01		0.01	
04.03.2009	1	10:39:53	11:10:08	-0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03				00:30:15	0.03	
04.03.2009	3	11:47:48	12:18:18	-0.35	-0.16	-0.05	-0.02	-0.01	0.00	0.01				00:30:30	0.01	
04.03.2009	5	13:07:28	13:38:08	-0.19	-0.09	-0.01	0.02	0.02	0.02	0.03				00:30:40	0.02	
04.03.2009	MW			-0.19	-0.08	-0.01	0.01	0.01	0.01	0.02					0.02	
06.03.2009	1	10:56:23	11:27:13	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02				00:30:50	0.01	
06.03.2009	3	12:05:33	12:40:43	0.04	0.00	-0.02	0.00	0.00	0.01	0.02				00:35:10	0.02	
06.03.2009	5	13:18:28	13:49:08	0.05	0.05	0.03	0.05	0.05	0.05	0.05				00:30:40	0.05	
06.03.2009	MW			0.03	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03					0.03	
11.03.2009	2	10:01:35	10:32:20	-0.40	-0.14	-0.03	0.00	0.02	0.01	0.01				00:30:45	0.02	
11.03.2009	4	11:12:45	11:43:10	0.09	0.04	0.05	0.02	0.03	0.02	0.01				00:30:25	0.01	
11.03.2009	6	13:18:25	13:49:10	-0.27	-0.13	-0.08	-0.03	-0.01	0.01	0.02				00:30:45	0.01	
11.03.2009	MW			-0.19	-0.08	-0.02	0.00	0.01	0.01	0.01					0.01	
22.05.2009	2	12:03:35	12:33:35	0.08	0.10	0.09	0.09	0.10	0.08	0.07				00:30:00	0.07	
22.05.2009	4	13:09:30	13:39:15	0.10	-0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03				00:29:45	0.03	
22.05.2009	6	14:13:55	14:43:20	-0.02	-0.02	0.02	0.01	0.03	0.02	0.02				00:29:25	0.02	
22.05.2009	8	15:16:15	15:47:30	-0.07	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.03				00:31:15	0.03	
22.05.2009	MW			0.02	0.02	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04					0.04	
27.05.2009	2	11:13:59	12:10:09	-0.26	-0.05	-0.02	-0.02	0.00	0.01	0.02	0.03	0.03		00:56:10	0.05	
27.05.2009	4	12:47:59	13:18:54	-0.32	-0.01	0.00	0.02	0.04	0.04	0.05				00:30:55	0.05	
27.05.2009	MW			-0.29	-0.03	-0.01	0.00	0.02	0.02	0.04					0.05	
05.06.2009	2	12:24:30	12:54:55	0.32	0.12	0.08	0.10	0.08	0.08	0.08				00:30:25	0.08	
05.06.2009	4	13:30:20	14:00:30	-0.06	-0.02	0.00	0.03	0.02	0.03	0.03				00:30:10	0.03	
05.06.2009	MW			0.13	0.05	0.04	0.06	0.05	0.05	0.05					0.05	
19.06.2009	4	13:04:40	13:34:35	0.13	0.12	0.07	0.04	0.05	0.05	0.06				00:29:55	0.06	
19.06.2009	5	13:36:15	14:06:55	0.02	0.01	0.18	0.09	0.04	0.06	0.06				00:30:40	0.06	
19.06.2009	6	14:08:25	14:40:35	0.24	0.13	0.05	0.04	0.05	0.04	0.04				00:32:10	0.03	
19.06.2009	MW			0.13	0.09	0.10	0.06	0.04	0.05	0.05					0.05	
26.06.2009	2	11:19:35	11:49:15	0.05	0.15	0.09	0.11	0.09	0.11	0.11				00:29:40	0.10	
26.06.2009	4	12:22:10	12:52:20	-0.14	0.07	0.03	0.00	0.03	0.04	0.05				00:30:10	0.05	
26.06.2009	6	13:25:00	14:00:35	0.11	-0.19	0.09	0.02	0.07	0.12	0.14				00:35:35	0.17	
26.06.2009	MW			0.01	0.01	0.07	0.04	0.07	0.09	0.10					0.11	
03.07.2009	2	11:06:25	11:37:10	0.32	0.11	0.03	0.09	0.06	0.03	0.04				00:30:45	0.03	
03.07.2009	4	12:11:20	12:41:40	-0.20	-0.08	0.04	0.07	0.06	0.06	0.08				00:30:20	0.07	
03.07.2009	7	13:46:25	14:16:40	0.44	0.18	0.07	0.03	0.03	0.02	0.02				00:30:15	0.02	
03.07.2009	9	14:49:20	15:19:15	0.02	0.11	0.00	0.08	0.05	0.07	0.06				00:29:55	0.06	
03.07.2009	MW			0.14	0.08	0.04	0.07	0.05	0.05	0.05					0.05	
10.07.2009	2	11:09:42	11:39:42	0.30	0.09	0.13	0.14	0.14	0.13	0.14				00:30:00	0.14	
10.07.2009	4	12:13:17	12:43:42	0.90	0.28	0.30	0.14	0.18	0.14	0.10				00:30:25	0.11	
10.07.2009	6	13:17:47	13:47:42	-0.15	0.34	0.02	0.08	0.04	0.06	0.06				00:29:55	0.06	
10.07.2009	8	14:21:27	14:51:22	-0.80	-0.02	-0.01	0.04	0.07	0.07	0.11				00:29:55	0.11	
10.07.2009	10	15:30:07	16:01:57	0.44	-0.01	0.12	0.05	0.06	0.05	0.04				00:31:50	0.04	
10.07.2009	MW			0.14	0.13	0.11	0.09	0.10	0.09	0.09					0.09	

Tab.7: Transpiration der Blattoberseite in mmol/(m²·)

Ergebnisse

Die Abbilder 60 bis 62 stellen den Masseverlust sowie die Wasserdampfabgabe der Blattoberseite im Vergleich zur Blattunterseite dar. Auch aus diesen geht hervor, dass die Blattunterseite nicht viel zur Gesamttranspiration beiträgt. Der geringe Verlust über die Cuticula ist im Falle dieser Versuchsserie zu vernachlässigen.

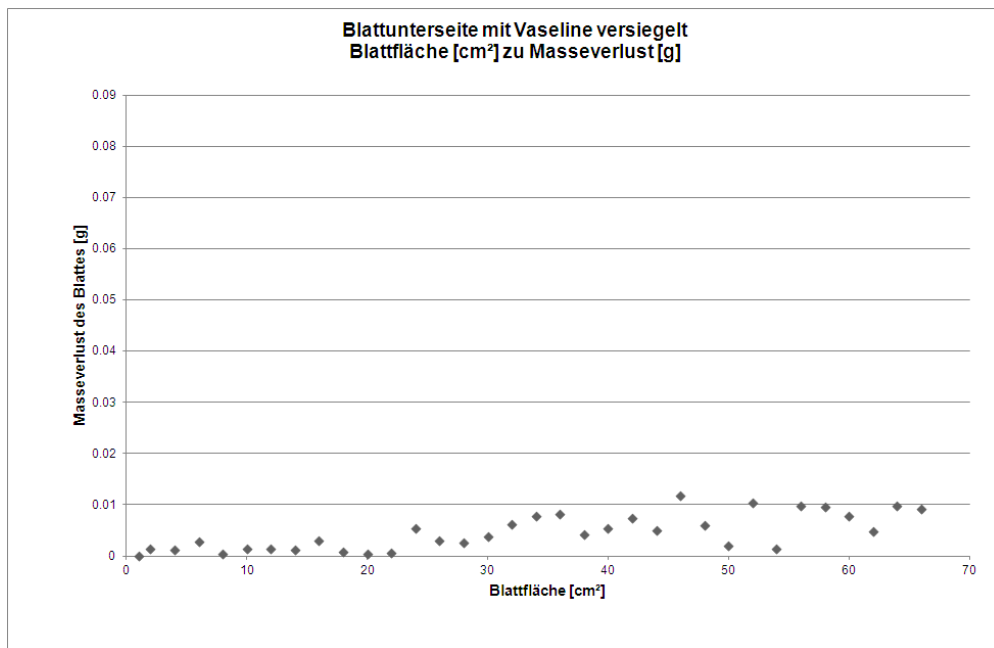


Abb. 60: Masseverlust der Blattoberseite in g

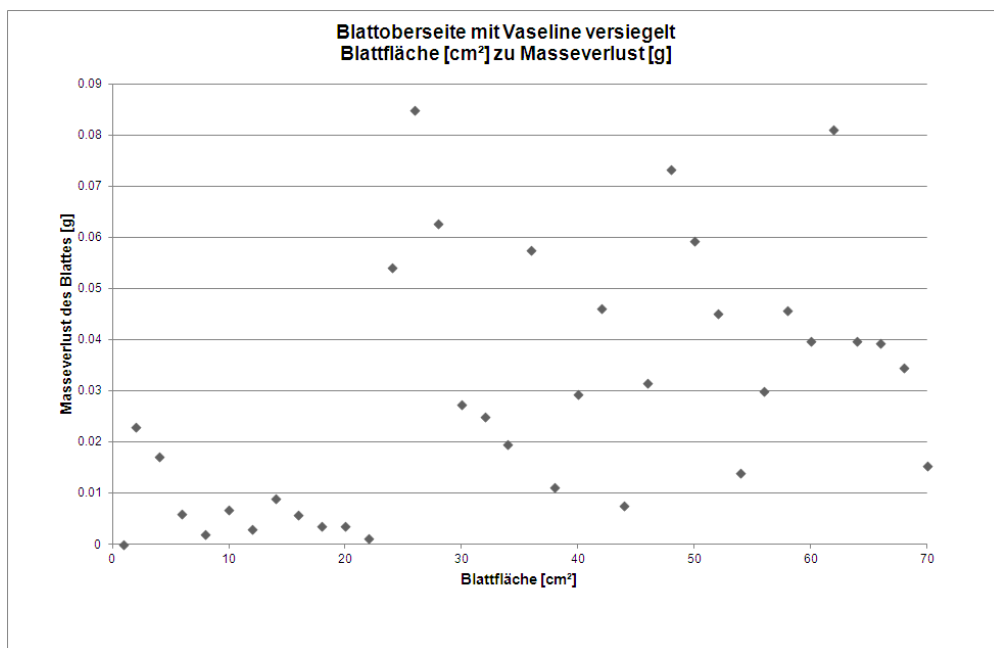


Abb. 61: Masseverlust der Blattunterseite in g

Ergebnisse

Abbild 62 gibt die Wasserdampfabgabe, der einmal mit Vaseline versiegelten Blattunterseite und einmal der Blattoberseite, wieder. Aus dem Diagramm wird ersichtlich, dass die Blattoberseite bis maximal 5 g/m² Wasserdampf abgibt (im Diagramm als Blattunterseite versiegelt gekennzeichnet) im Vergleich zur Unterseite mit maximal 25 g/m².

Die Werte der versiegelten Blattoberseite (transpirierende Blattunterseite) zeigen eine wesentlich größere Streuung, als die Werte der versiegelten Blattunterseite. Dies resultiert aus den unterschiedlichen Öffnungszuständen der Spaltöffnungen zu Beginn des Versuches, sowie aus den sich im Laufe des Versuches ergebenden Schließ- und Öffnungszuständen.

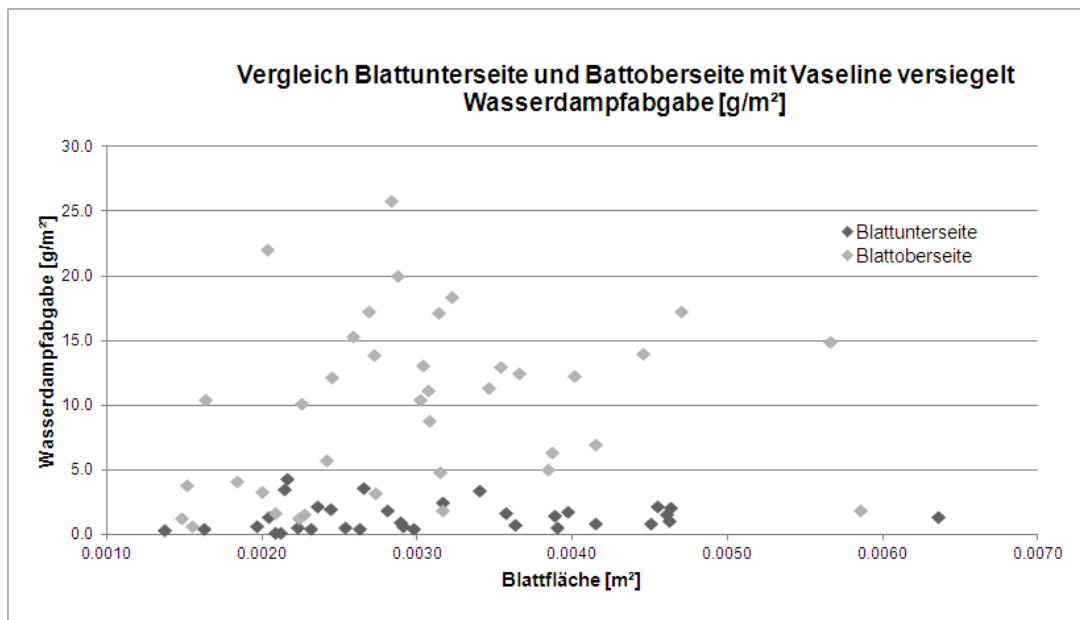


Abb. 62: Wasserdampfabgabe der Blattunterseite im Vergleich zur Blattoberseite in g/m²

7.3 Vergleich der gravimetrischen Methode mit dem PMR-4 Porometer

Die hier angeführten Abbilder 63 bis 82 geben den Verlauf der Vergleichsmessungen der Wägungen und dem PMR-4 Porometer wieder. Die Transpirationsraten der Wägungen wurden einmal mit einer und einmal mit beiden Blattseiten berechnet. Mit dem Porometer wurde die Blattunter- und Oberseite gemessen, die Werte dann einzeln und als Summe der beiden Blattseiten dargestellt.

Der Versuch Nr. 1 vom 24.07.2009 (Abb. 63) ist in der Hinsicht ungewöhnlich, da in diesem Fall die Blattoberseite bei der Porometermessung höhere Werte liefert als die der Wägung. Da die Tendenz der Kurven der Wägung sowie der blattunterseitigen Messung eher auf ein Schließen der Spaltöffnungen deutet, ist es interessant wieso die Blattoberseite im Porometer relativ „hohe“ Werte liefert.

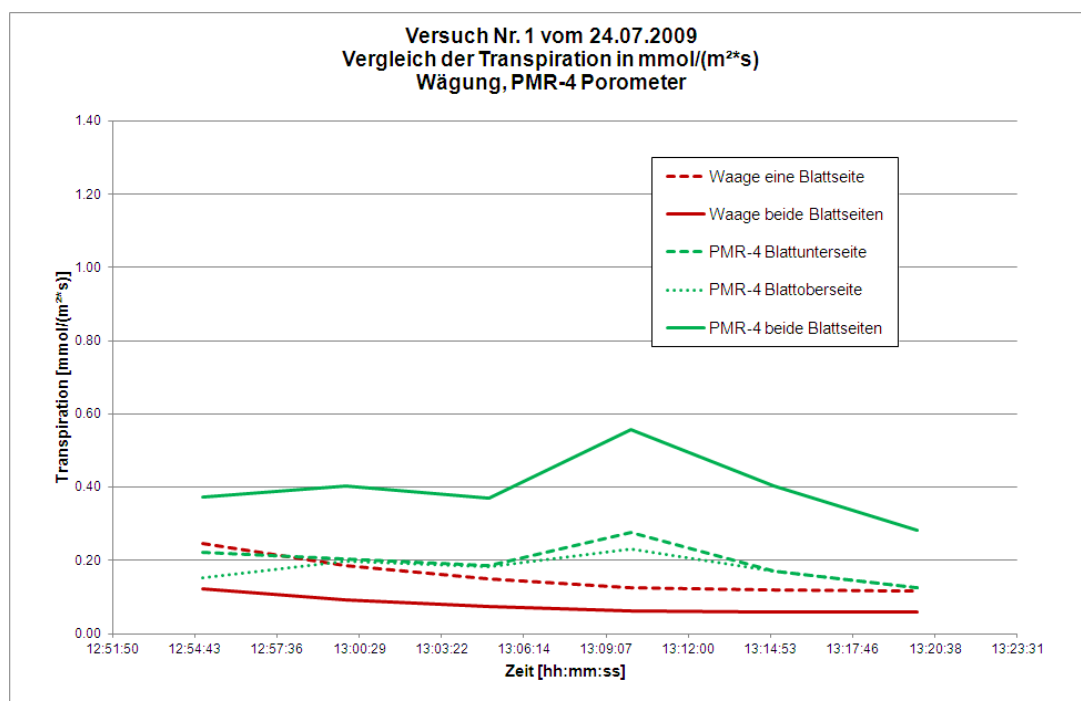


Abb. 63: Versuch Nr. 1 (24.07.2009): Vergleich der Transpiration $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, Wägung, PMR-4 Porometer

Die zusammen gefassten Versuche vom 24.7 (Abb. 66), 30.09 (Abb. 78), 09.10 (Abb.79),

15.10 (Abb. 81) und 16.10 2009 (Abb. 82) zeigen eine Abhängigkeit der Transpiration mit dem Verlauf der Strahlung. Die Wägungen folgen dem Trend der Porometermessung, die Messungen der Blattoberseite sind immer gering. Aus den folgenden einzelnen Messungen vom 07.08.2009 (Abb. 67 bis 72) wird klar, dass bei Berechnung der Transpiration mit beiden Blattseiten nach STOCKER bei einem hypostomatischem Blatt die Transpiration unterschätzt wird, und zwar so stark, dass sie in etwa der der porometrisch gemessenen Blattoberseite gleicht. Werden beide Blattseiten mit dem Porometer gemessen und die Werte addiert, wird der Wert überschätzt. In allen Versuchen mit dem Porometer ergibt diese Methode (bei einem hypostomatischem Blatt) den höchsten Wert. Einen annähernden Wert ergeben die Wägung und nachfolgende Berechnung mit einer Blattfläche und die Messung (Porometer) nur der Blattunterseite. Bei stark transpirierenden Blättern kann der Wert der Unterseite manchmal auch Werte erreichen, die durch die Addition der beiden Blattflächen entstehen, also hohe Werte, der Verlauf der Kurven sagt aber, dass dies eher die „Ausreißer“ der Messwerte sind.

Der geringe Messwert der Blattoberseite beim Porometer spiegelt den geringen Wert bei der Methode mit den versiegelten Blattseiten wieder (siehe Kapitel 7.2), im Falle der Porometermessung liegt er aber doch etwas höher. Bei den Versuchen Nr. 5 (Abb. 71) und Nr. 4 (Abb. 70) vom 07.08.2009 ist auch zu beobachten, dass bei geringeren Transpirationswerten die Kurven eher näher zusammen liegen als bei höheren Werten der Transpiration, siehe Versuch Nr. 3 vom 07.08.2009. (Abb. 69)

Ergebnisse

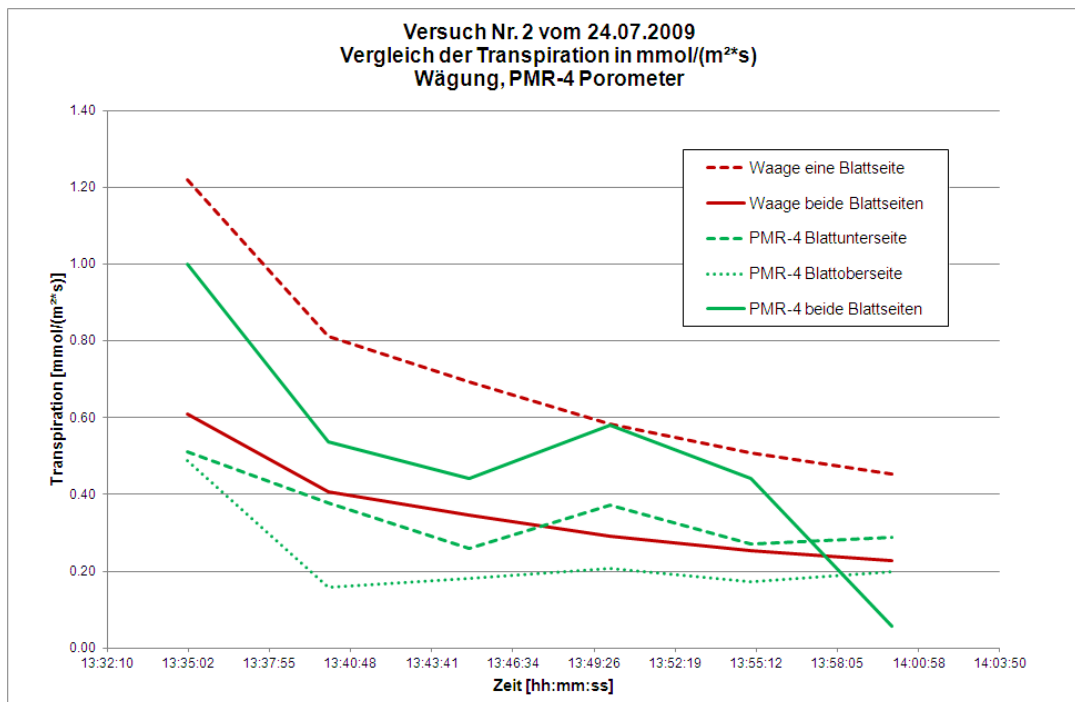


Abb. 64: Versuch Nr. 2 (24.07.2009): Vergleich der Transpiration $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, Wägung, PMR-4 Porometer

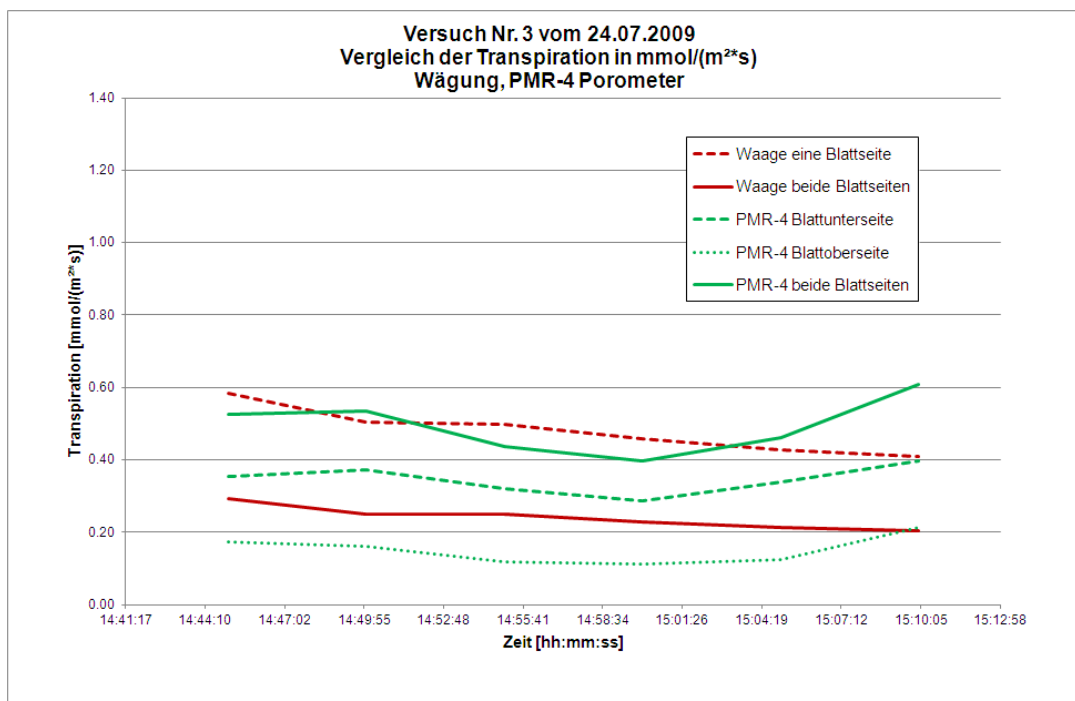


Abb. 65: Versuch Nr. 3 (24.07.2009): Vergleich der Transpiration $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, Wägung, PMR-4 Porometer

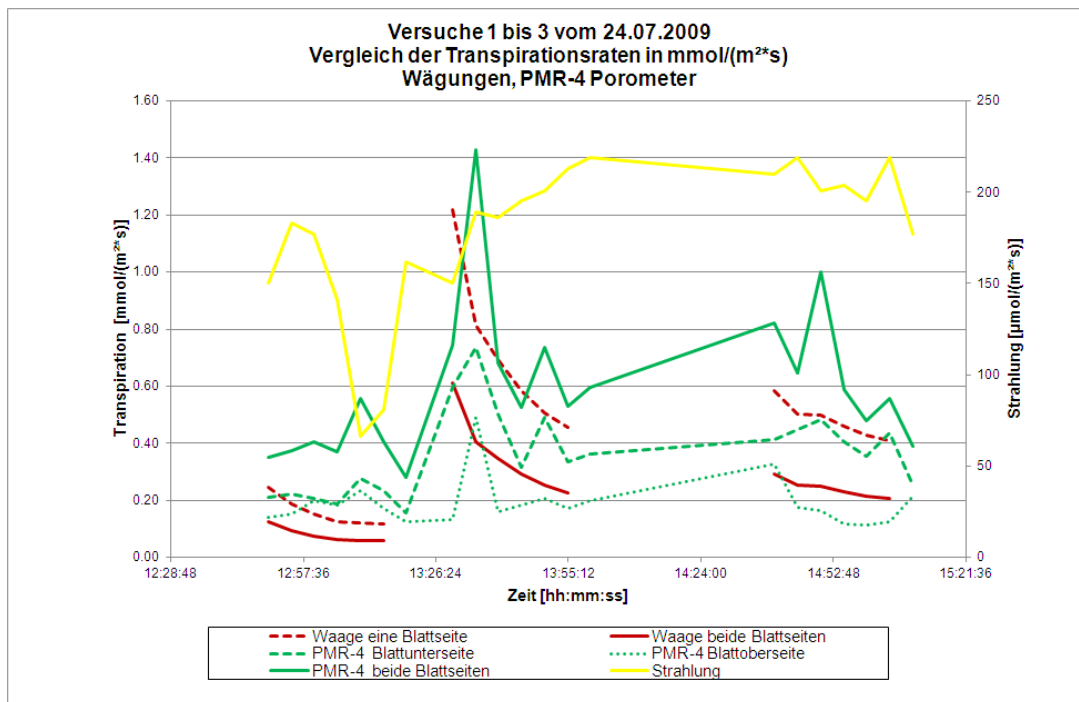


Abb. 66: Versuche Nr. 1 bis 3 (24.07.2009): Vergleich der Transpiration $\text{mmol}/(\text{m}^2\text{s})$, Wägung, PMR-4 Porometer

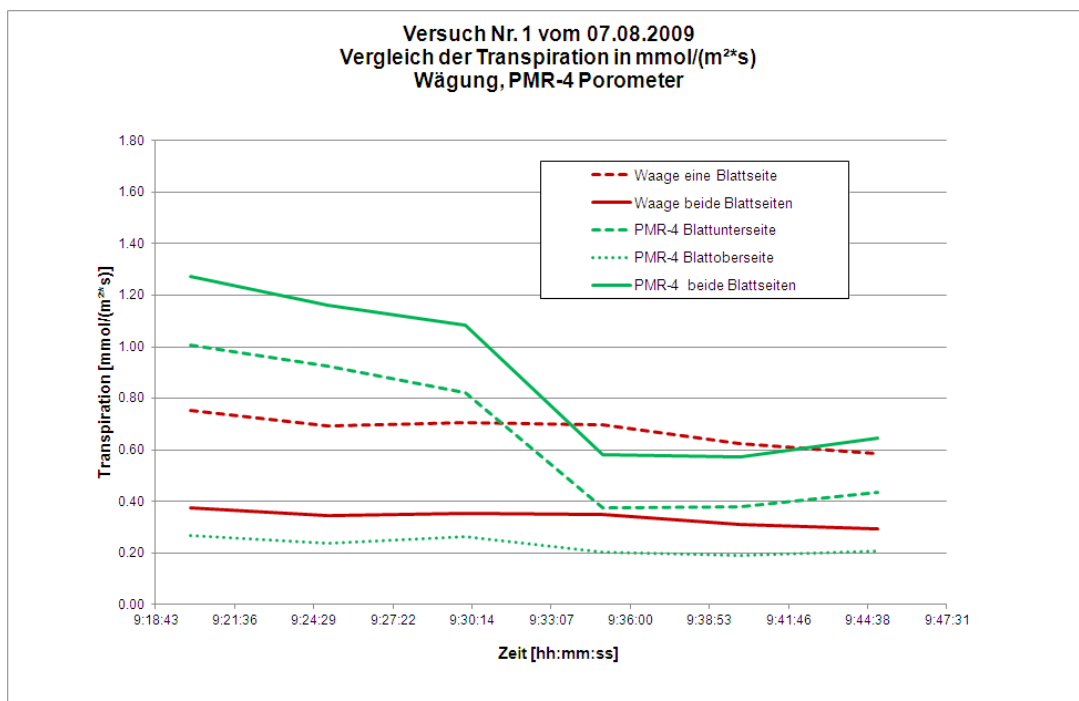


Abb. 67: Versuch Nr. 1 (07.08.2009): Vergleich der Transpiration $\text{mmol}/(\text{m}^2\text{s})$, Wägung, PMR-4 Porometer

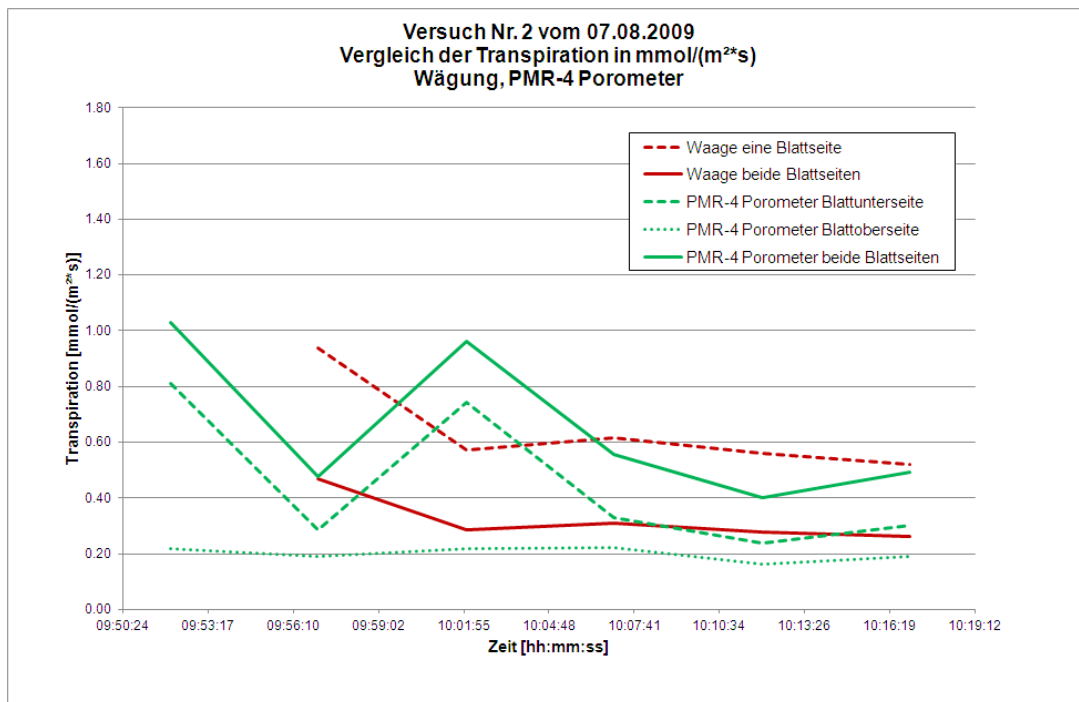


Abb. 68: Versuch Nr. 2 (07.08.2009): Vergleich der Transpiration $\text{mmol}/(\text{m}^2\text{s})$, Wägung, PMR-4 Porometer

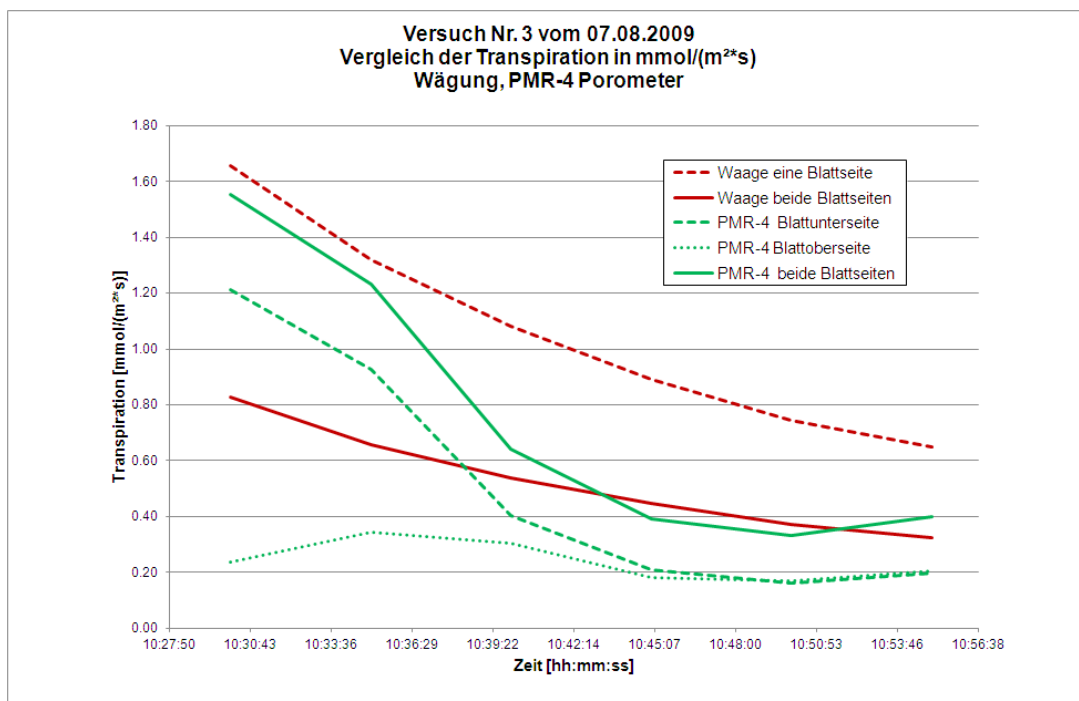


Abb. 69: Versuch Nr. 3 (07.08.2009): Vergleich der Transpiration $\text{mmol}/(\text{m}^2\text{s})$, Wägung, PMR-4 Porometer

Ergebnisse

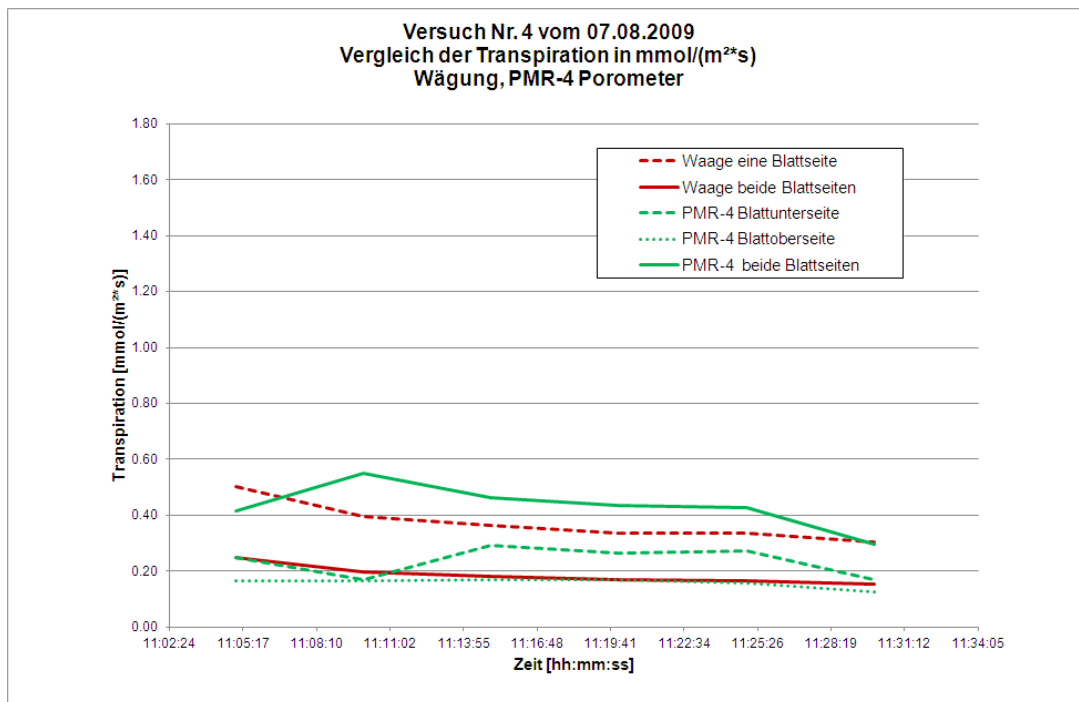


Abb. 70: Versuch Nr. 4 (07.08.2009): Vergleich der Transpiration $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,
Wägung, PMR-4 Porometer

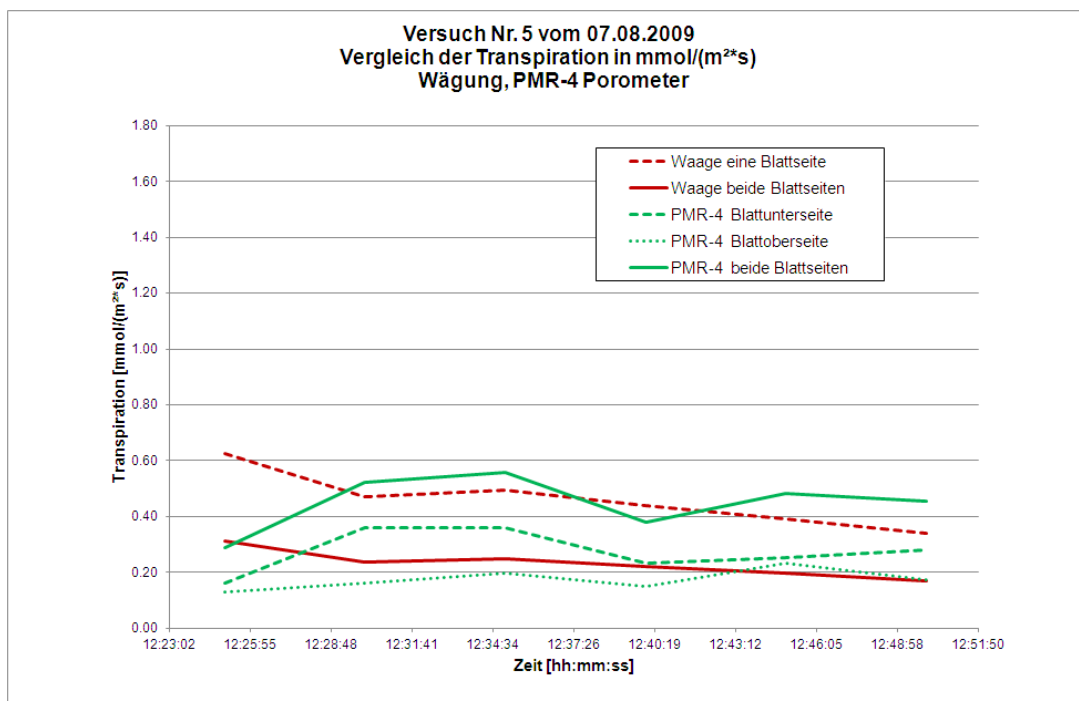


Abb. 71: Versuch Nr. 5 (07.08.2009): Vergleich der Transpiration $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,
Wägung, PMR-4 Porometer

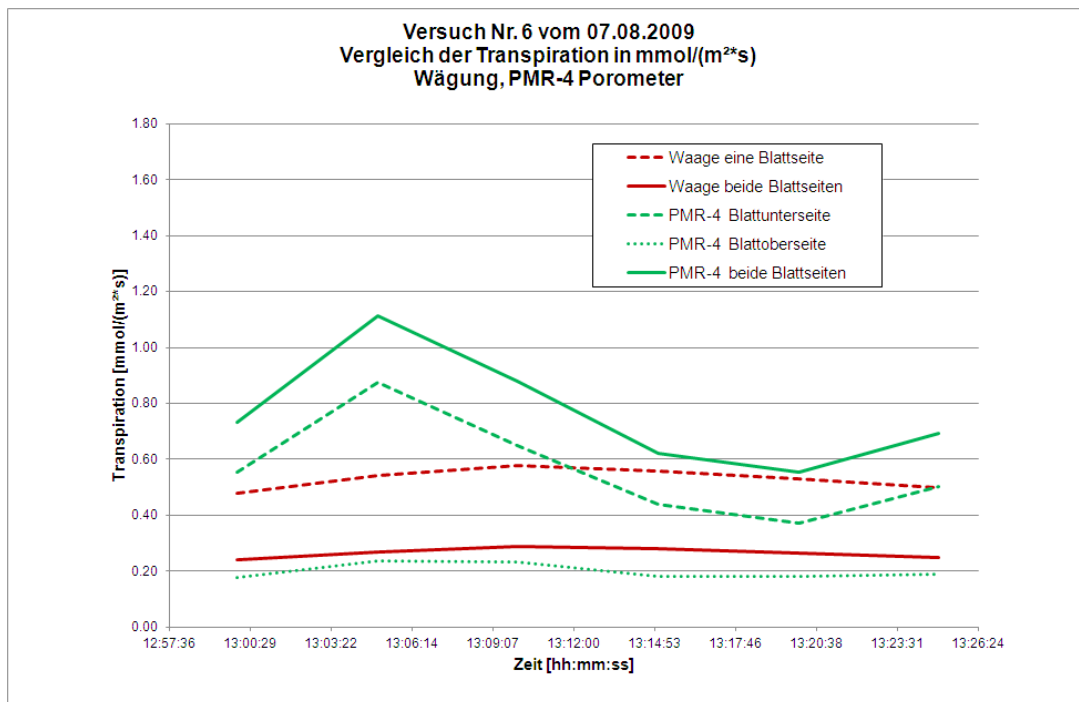


Abb. 72: Versuch Nr. 6 (07.08.2009): Vergleich der Transpiration $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,
Wägung, PMR-4 Porometer

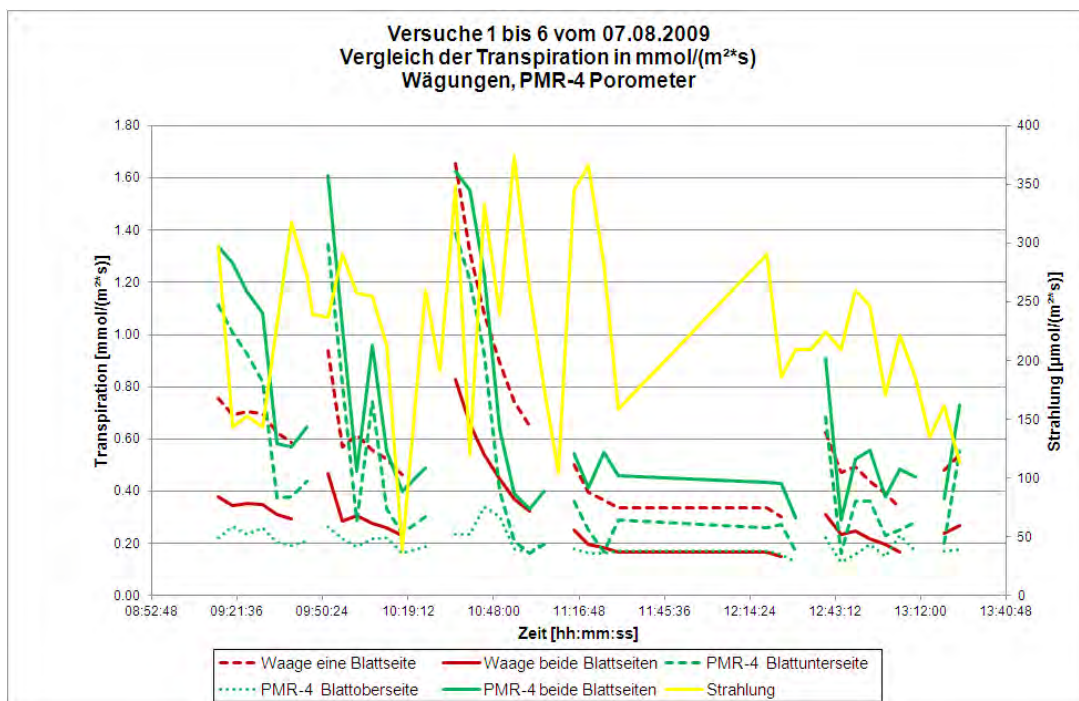


Abb. 73: Versuche Nr. 1 bis 6 (07.08.2009): Vergleich der Transpiration $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,
Wägung, PMR-4 Porometer

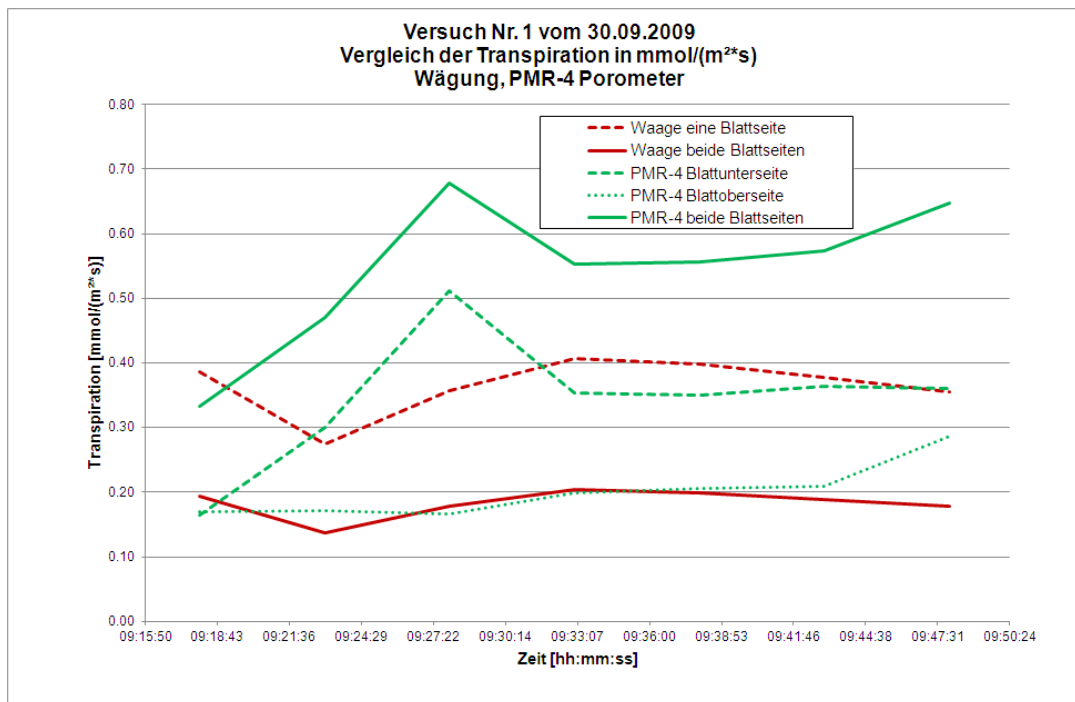


Abb. 74: Versuch Nr. 1 (30.09.2009): Vergleich der Transpiration $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,
Wägung, PMR-4 Porometer

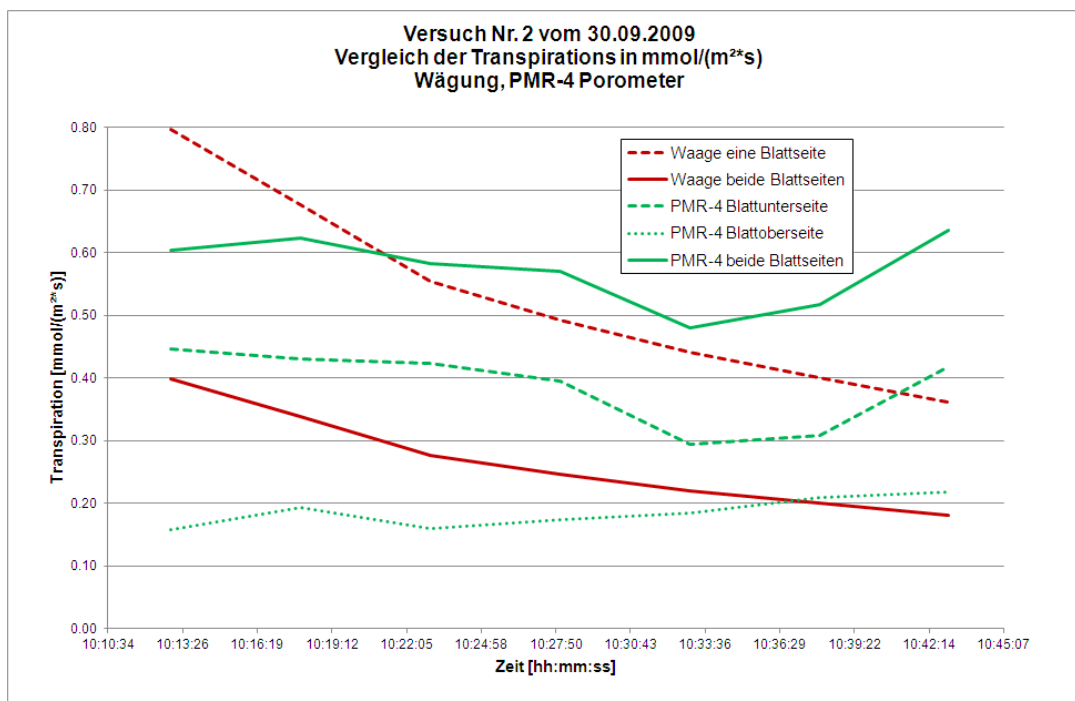


Abb. 75: Versuch Nr. 2 (30.09.2009): Vergleich der Transpiration $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,
Wägung, PMR-4 Porometer

Ergebnisse

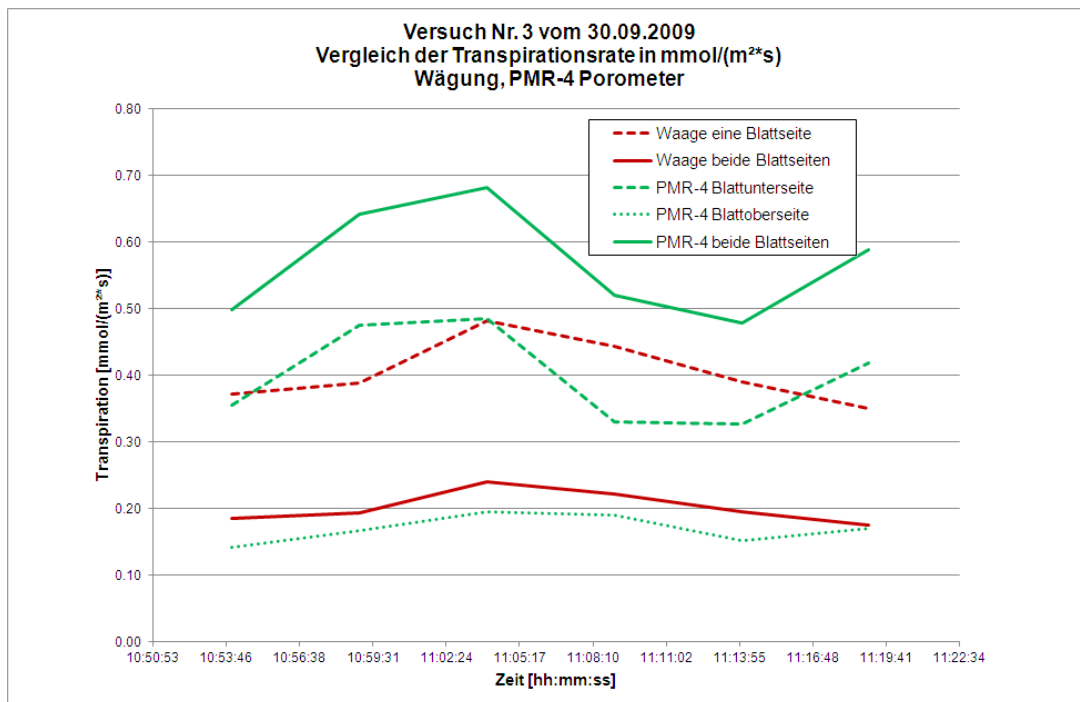


Abb. 76: Versuch Nr. 3 (30.09.2009): Vergleich der Transpiration $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, Wägung, PMR-4 Porometer

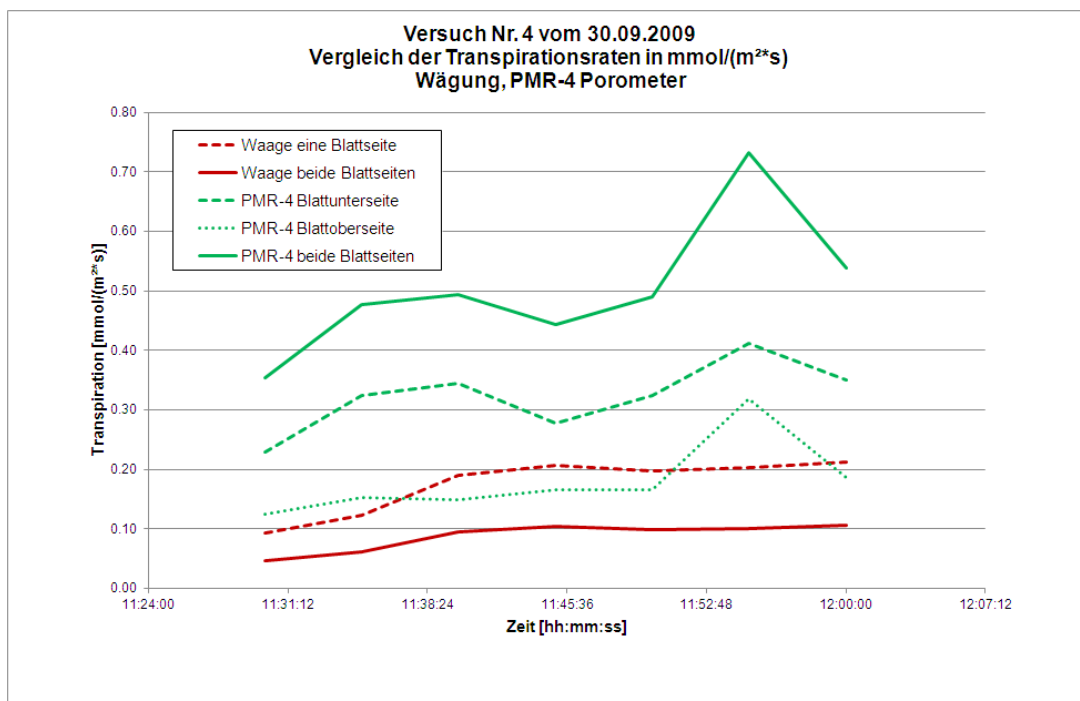


Abb. 77: Versuch Nr. 4 (30.09.2009): Vergleich der Transpiration $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, Wägung, PMR-4 Porometer

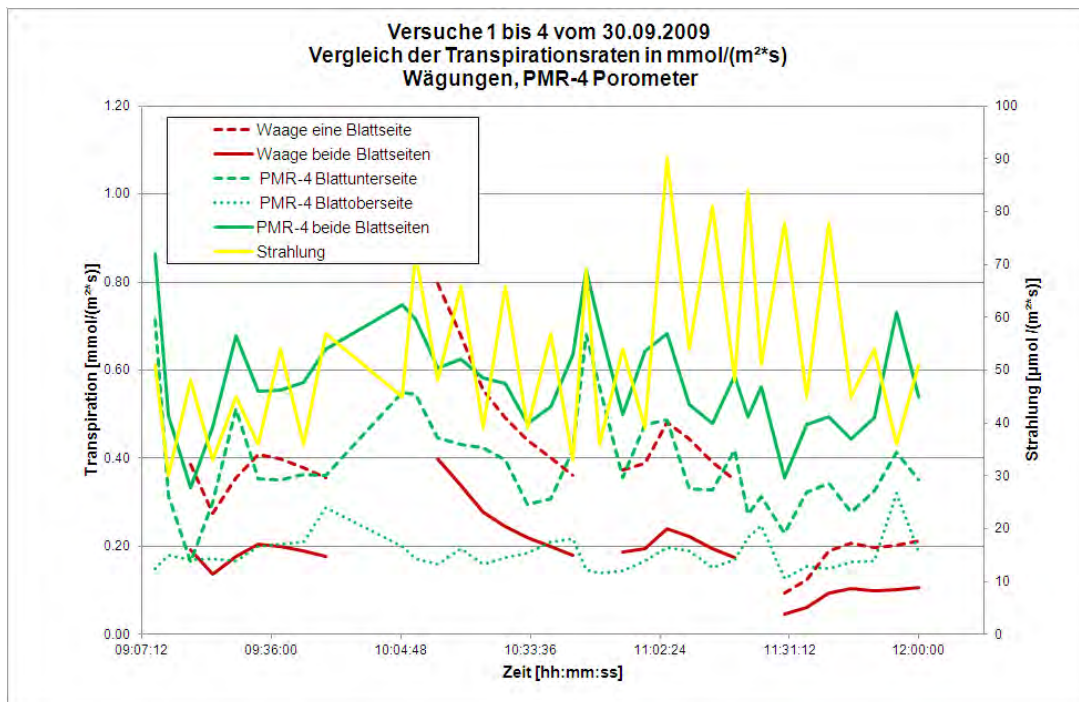


Abb. 78: Versuche Nr. 1 bis 4 (30.09.2009): Vergleich der Transpiration $\text{mmol}/(\text{m}^2\text{s})$, Wägung, PMR-4 Porometer

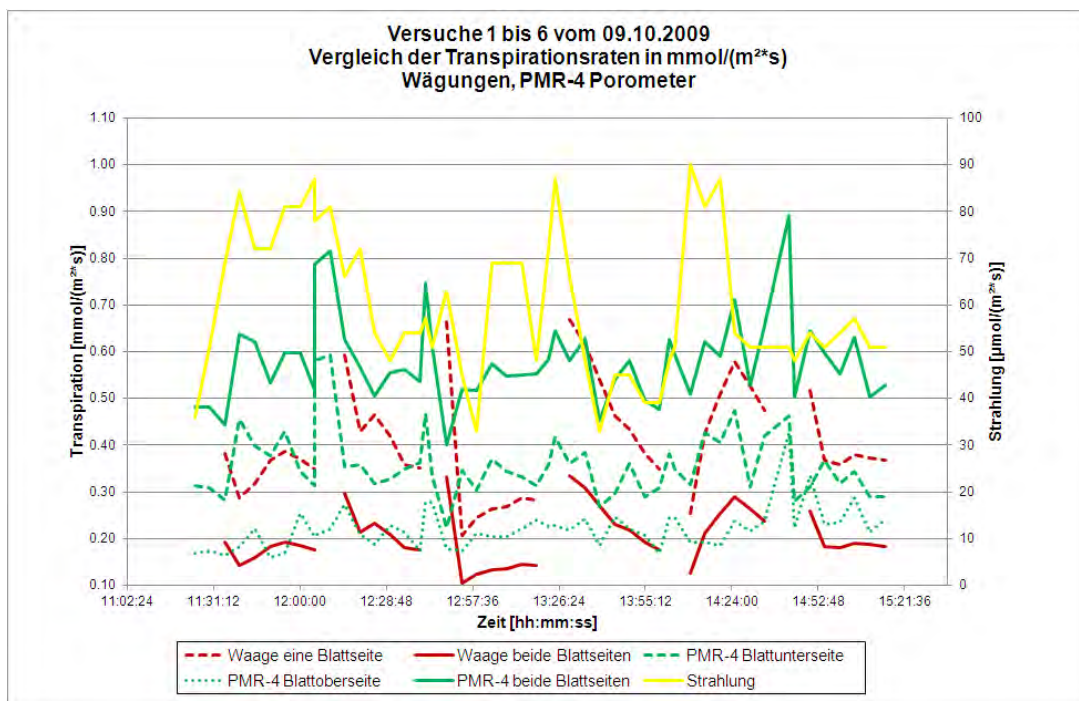


Abb. 79: Versuche Nr. 1 bis 6 (09.10.2009): Vergleich der Transpiration $\text{mmol}/(\text{m}^2\text{s})$, Wägung, PMR-4 Porometer

Ergebnisse

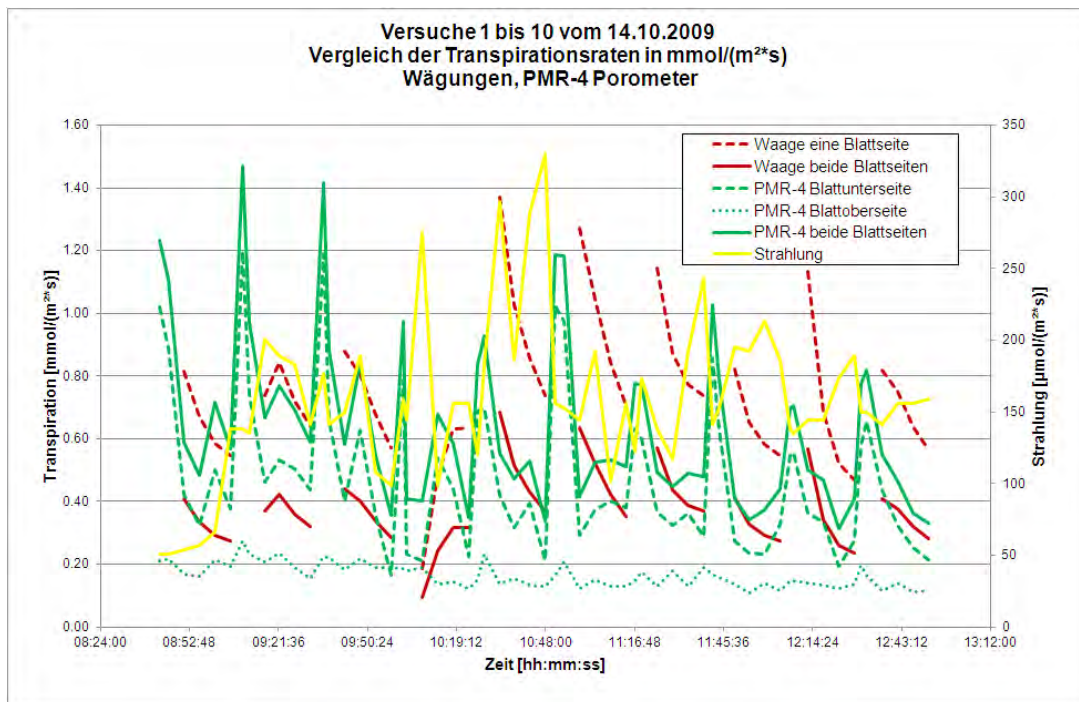


Abb.80: Versuche Nr. 1 bis 10 (14.10.2009): Vergleich der Transpiration $\text{mmol}/(\text{m}^2\text{s})$, Wägung, PMR-4 Porometer

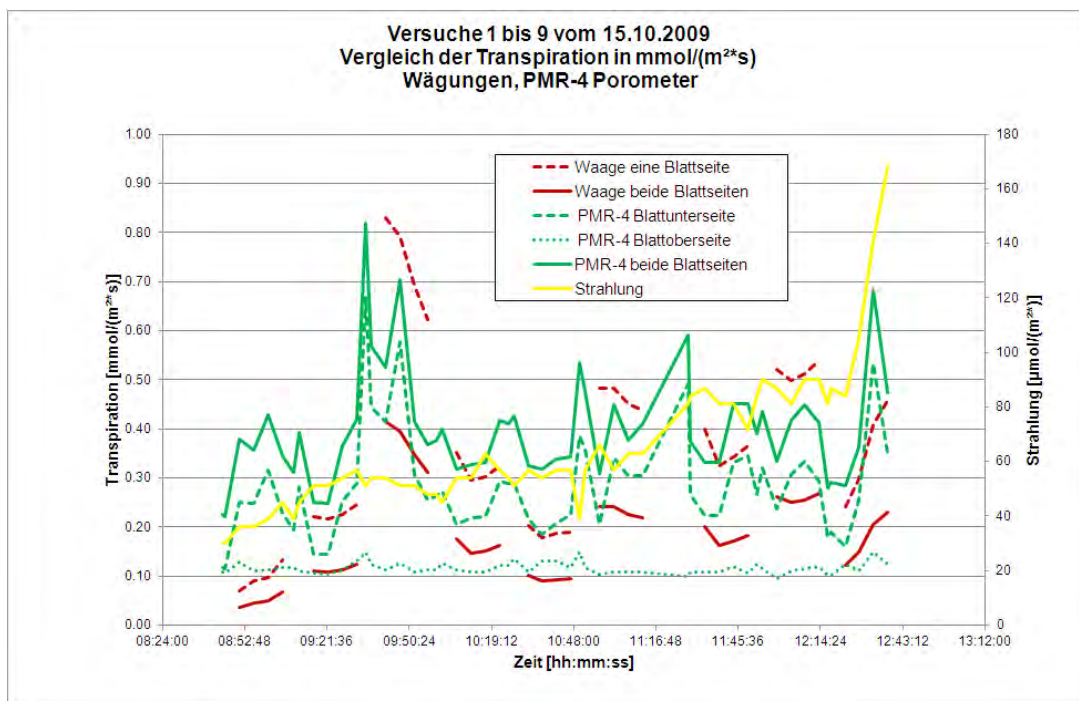


Abb. 81: Versuche Nr. 1 bis 9 (15.10.2009): Vergleich der Transpiration $\text{mmol}/(\text{m}^2\text{s})$, Wägung, PMR-4 Porometer

Ergebnisse

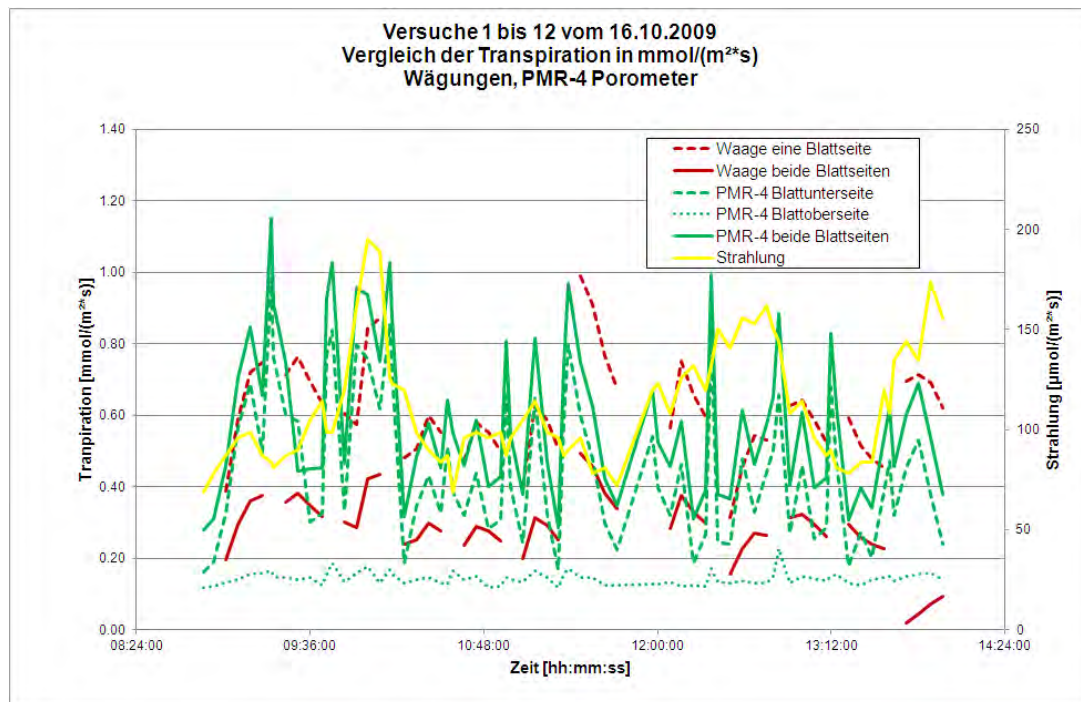


Abb.82: Versuche Nr. 1 bis 12 (16.10.2009): Vergleich der Transpiration $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, Wägung, PMR-4 Porometer

In Tabelle 8 werden die Ergebnisse der Wägungen in $\text{g}/(\text{dm}^2\cdot\text{h})$, $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ und die Ergebnisse der Porometrie in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ miteinander verglichen.

Die Werte in $\text{g}/(\text{dm}^2\cdot\text{h})$ liegen eindeutig und logischerweise unter den Werten in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$. Werden wie schon gesagt beide Blattflächen zur Berechnung der Transpiration bei einem hypostomatischem Blatt herangezogen, werden die Werte unterschätzt, bei Berechnung der Transpiration mit nur einer Blattseite liegen sie in etwa im Bereich der Porometermessungen der Blattunterseite. Bei den Porometermessungen mit beiden Blattseiten, wird der Wert wieder überschätzt.

Die hier angegebenen Werte sind Mittelwerte aus 73 Messungen, um den Einfluss von Ausreißern zu minimieren, wurden noch die Mediane angegeben, die Varianz gibt Auskunft über die Streuung der Messwerte.

Es ist natürlich schwer Einzelwerte miteinander zu vergleichen, da der Einfluss der

Ergebnisse

einzelnen Parameter, wie Luftbewegung, Strahlung und so weiter, nie zum selben Zeitpunkt der Messung gleich ist, betrachtet man aber eine Messreihe so kann der aus dem Trend und Verlauf der Kurven und Messwerte schon eine Aussage über die Vergleichbarkeit und Wiederholbarkeit der Methode getroffen werden.

Ergebnisse

Datum	Anzahl der Versuche	Wert	Waage			Porometer PP-Systeme (PMR-4)		
			eine Blattseite Transpiration g/(dm ² ·h)	eine Blattseite Transpiration mmol/(m ² ·s)	beide Blattseiten Transpiration mmol/(m ² ·s)	beide Blattseiten Transpiration mmol/(m ² ·s)	Blattunterseite Transpiration mmol/(m ² ·s)	Blattoberseite Transpiration mmol/(m ² ·s)
24.07.2009	3	Mittelwert	0.29	0.45	0.22	0.47	0.30	0.19
		Median	0.30	0.46	0.23	0.44	0.29	0.17
		Varianz	0.03	0.08	0.02	0.03	0.01	0.01
		Standardabw.	0.18	0.28	0.14	0.18	0.09	0.08
		Variationskoeff.	63	63	63	39	32	44
07.08.2009	6	Mittelwert	0.40	0.62	0.31	0.66	0.45	0.20
		Median	0.36	0.56	0.28	0.55	0.36	0.19
		Varianz	0.03	0.08	0.02	0.10	0.08	0.002
		Standardabw.	0.18	0.28	0.14	0.32	0.28	0.046
		Variationskoeff.	45	45	45	48	62	23
30.09.2009	4	Mittelwert	0.24	0.37	0.18	0.55	0.36	0.18
		Median	0.24	0.38	0.19	0.55	0.35	0.17
		Varianz	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.002
		Standardabw.	0.10	0.16	0.08	0.09	0.08	0.040
		Variationskoeff.	43	43	43	17	21	22
09.10.2009	6	Mittelwert	0.26	0.41	0.20	0.56	0.34	0.21
		Median	0.25	0.38	0.19	0.55	0.34	0.21
		Varianz	0.01	0.01	0.003	0.004	0.003	0.001
		Standardabw.	0.08	0.12	0.058	0.063	0.053	0.036
		Variationskoeff.	29	29	29	11	15	17
12.10.2009	10	Mittelwert	0.28	0.43	0.23	0.55	0.34	0.21
		Median	0.26	0.40	0.20	0.52	0.32	0.18
		Varianz	0.02	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01
		Standardabw.	0.14	0.21	0.18	0.15	0.10	0.08
		Variationskoeff.	48	48	77	28	30	38
13.10.2009	10	Mittelwert	0.44	0.68	0.34	0.63	0.44	0.19
		Median	0.41	0.63	0.32	0.55	0.39	0.17
		Varianz	0.03	0.07	0.02	0.06	0.04	0.002
		Standardabw.	0.17	0.27	0.13	0.24	0.20	0.045
		Variationskoeff.	39	39	39	38	46	24
14.10.2009	10	Mittelwert	0.49	0.75	0.37	0.50	0.35	0.15
		Median	0.47	0.73	0.36	0.49	0.36	0.14
		Varianz	0.02	0.05	0.01	0.02	0.01	0.00
		Standardabw.	0.15	0.23	0.11	0.13	0.11	0.03
		Variationskoeff.	30	30	30	25	30	22
15.10.2009	9	Mittelwert	0.23	0.36	0.18	0.39	0.28	0.12
		Median	0.22	0.33	0.17	0.37	0.25	0.11
		Varianz	0.01	0.04	0.01	0.01	0.01	0.0001
		Standardabw.	0.12	0.19	0.09	0.10	0.09	0.0103
		Variationskoeff.	52	52	52	25	34	9
16.10.2009	12	Mittelwert	0.40	0.61	0.28	0.52	0.39	0.14
		Median	0.39	0.59	0.29	0.46	0.33	0.14
		Varianz	0.01	0.02	0.01	0.03	0.03	0.000
		Standardabw.	0.09	0.14	0.10	0.17	0.16	0.013
		Variationskoeff.	22	22	34	32	41	10
19.10.2009	4	Mittelwert	0.43	0.66	0.22	0.42	0.30	0.12
		Median	0.42	0.65	0.21	0.44	0.28	0.12
		Varianz	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	0.0001
		Standardabw.	0.07	0.11	0.04	0.09	0.08	0.01
		Variationskoeff.	17	16.61	17	21	28	8

Tab. 8: Vergleich der Messwerte der Wägungen mit den Messwerten des PMR-4 Porometers

7.4 Vergleich der gravimetrischen Methode mit dem PMR-4 Porometer und dem AP4 Porometer

Da sich aus den vorhergehenden Versuchsreihen ergab, dass der Anteil der Blattoberseite an der Gesamttranspiration gering ist, wurde im Rahmen dieser Versuchsreihe die Transpiration nur mit einer Blattfläche berechnet (gravimetrische Methode), beziehungsweise es wurde mit den Porometern immer nur die Blattunterseite gemessen.

Die Vergleiche der Beiden Porometer (AP4 und PMR-4) untereinander und mit den aus den Wägungen berechneten Transpirationswerten geben ein eher differenziertes Bild wieder (siehe Abbilder 83 bis 117). Während bei einigen Messungen die Werte der drei Messmethoden eine gute Übereinstimmung zeigen, weichen sie bei anderen um mehr als das Doppelte ab.

Generell liegen die Werte des AP4 näher bei den Werten der Wägungen, als die Werte welche mit dem PMR-4 gemessen wurden. Dies ist insoweit verwunderlich, als das die Werte bei den vorhergehenden Versuchsreihen eine bessere Übereinstimmung zeigten. Wie sich aus den nachfolgenden Versuchen ergibt, liegen die Werte des PMR-4 im Bereich der niedrigsten Werte für die errechnete Transpiration. Die Werte für die Wägungen, sowie die mit dem AP4 gemessenen Werte liegen diesmal deutlich über den Werten welche mit dem PMR-4 gemessen wurden.

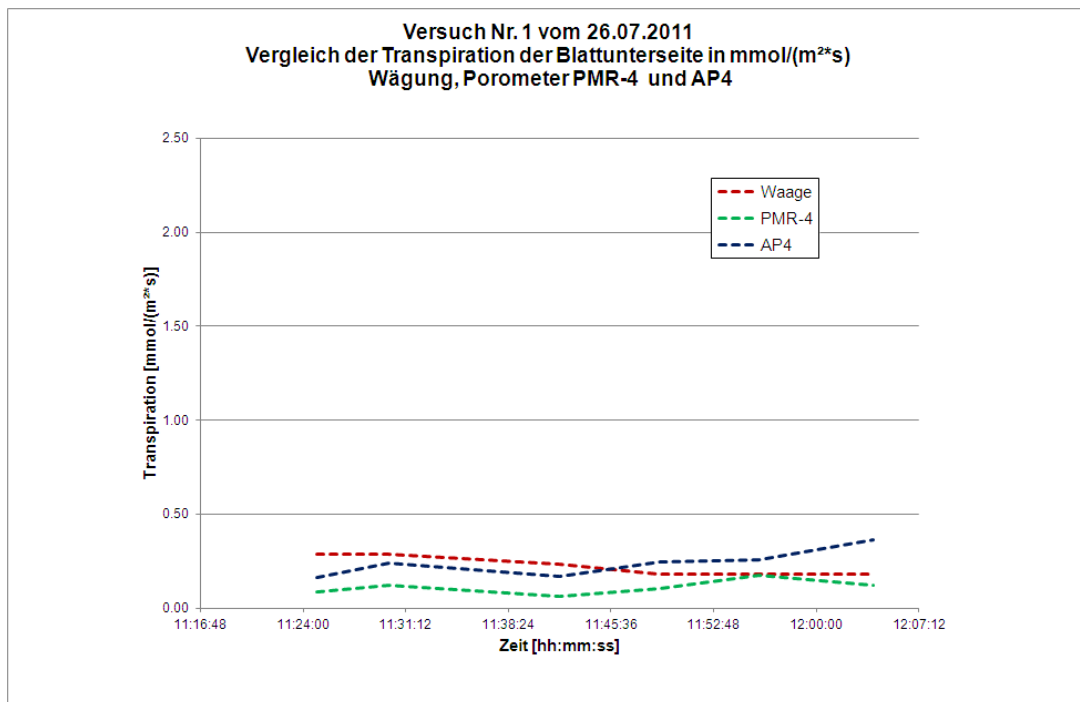


Abb. 83: Versuch 1 vom 26.07.2011: Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, Vergleich Wägung, PMR-4 und AP4, eine Blattseite bzw. Blattunterseite

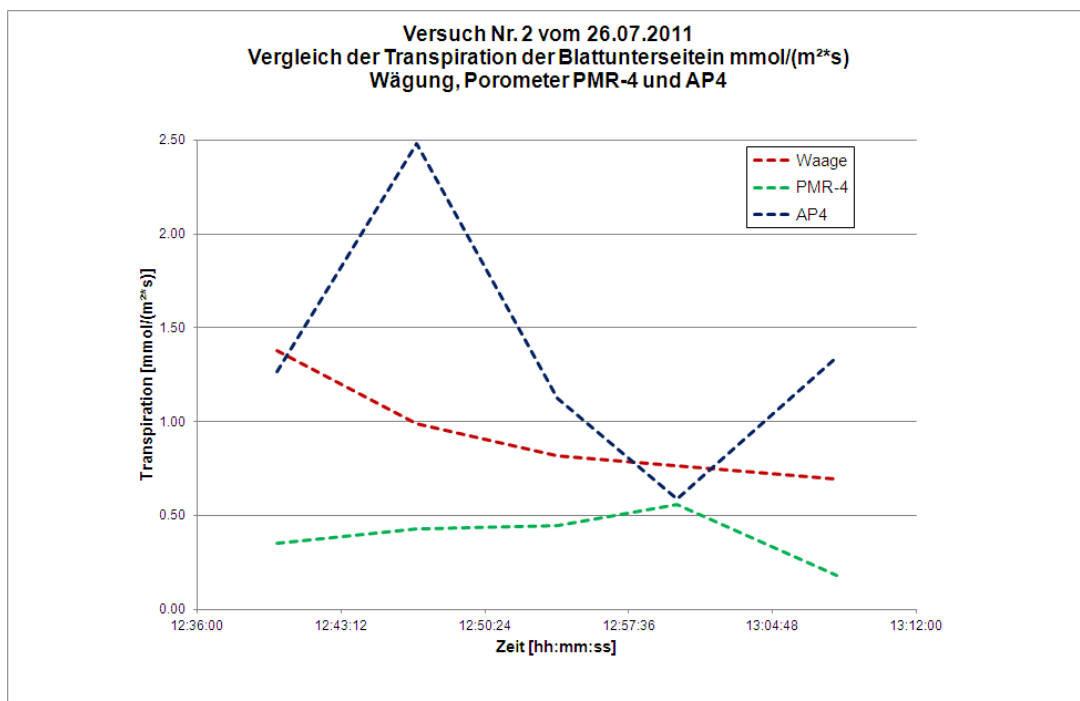


Abb. 84: Versuch 2 vom 26.07.2011: Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, Vergleich Wägung, PMR-4 und AP4, eine Blattseite bzw. Blattunterseite

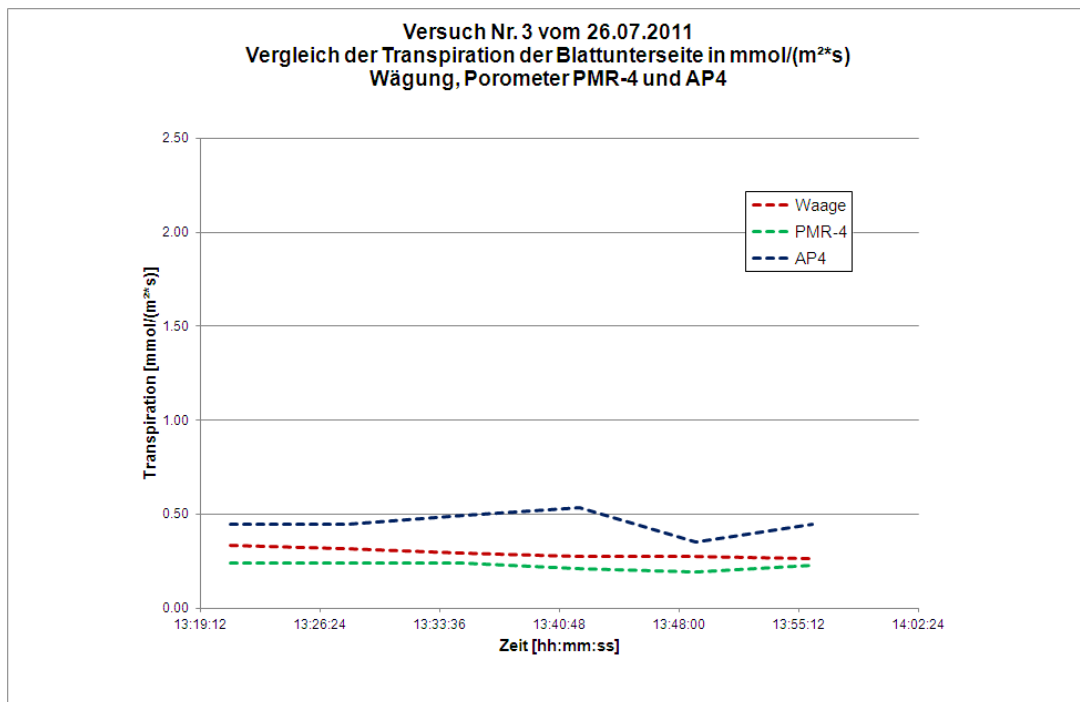


Abb. 85: Versuch 3 vom 26.07.2011: Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, Vergleich Wägung, PMR-4 und AP4, eine Blattseite bzw. Blattunterseite

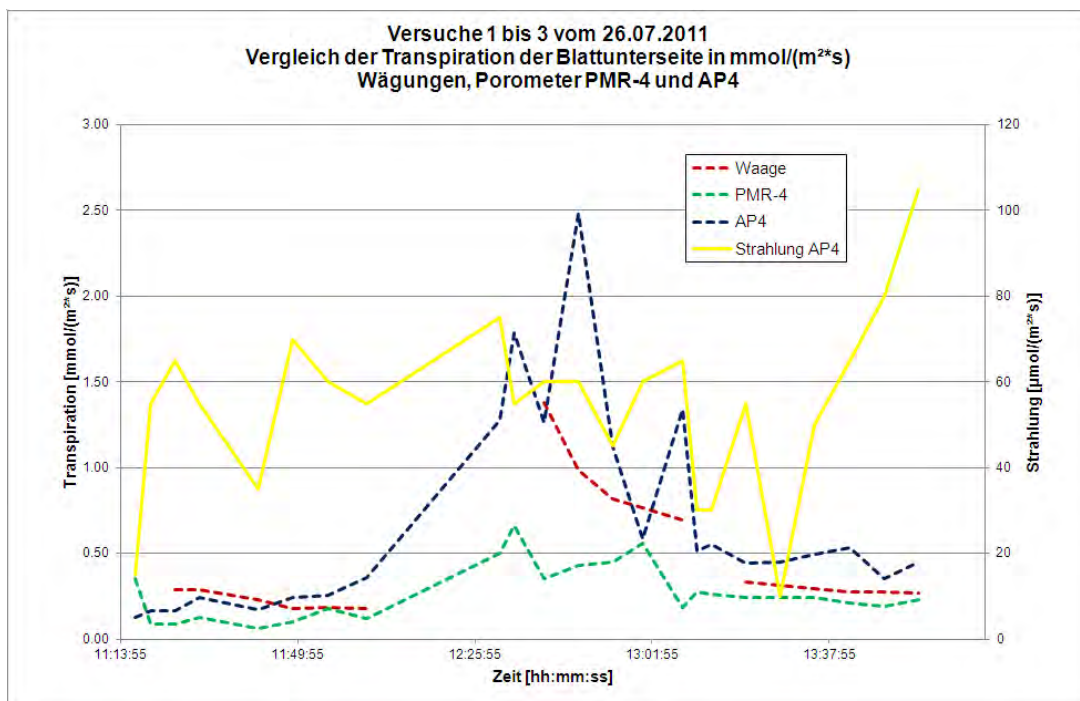


Abb. 86: Versuche Nr. 1 bis 3 vom 26.07.2011: Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, Vergleich Wägung, PMR-4 und AP4, eine Blattseite bzw. Blattunterseite

Ergebnisse

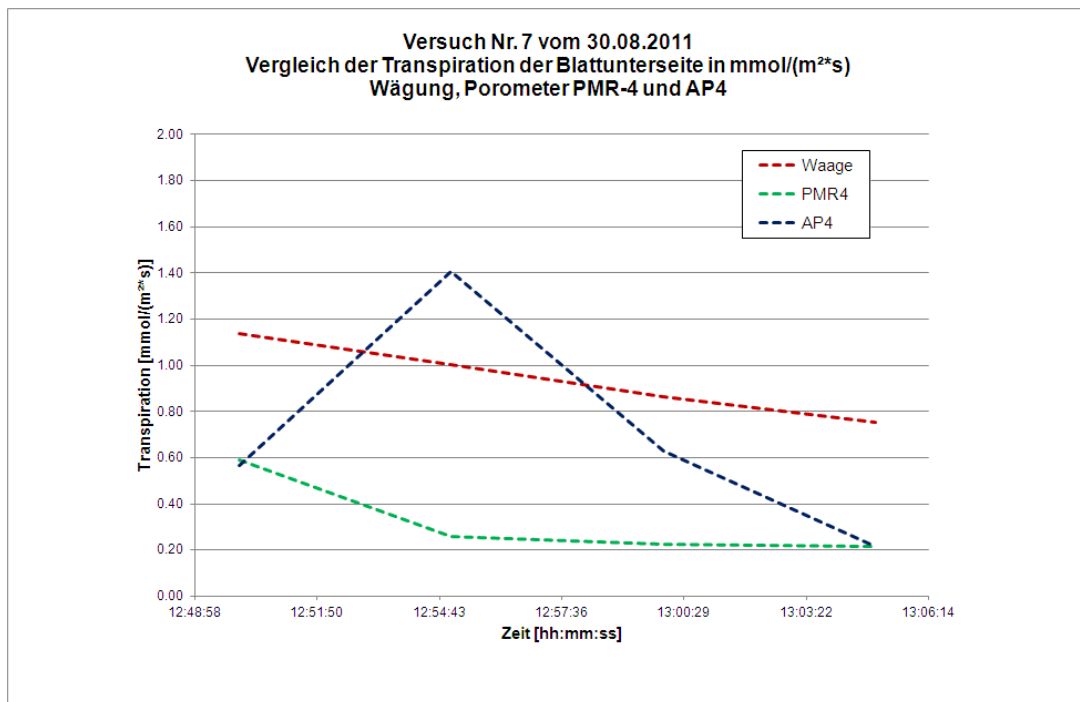


Abb. 87: Versuch 7 vom 30.08.2011: Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, Vergleich Wägung, PMR-4 und AP4, eine Blattseite bzw. Blattunterseite

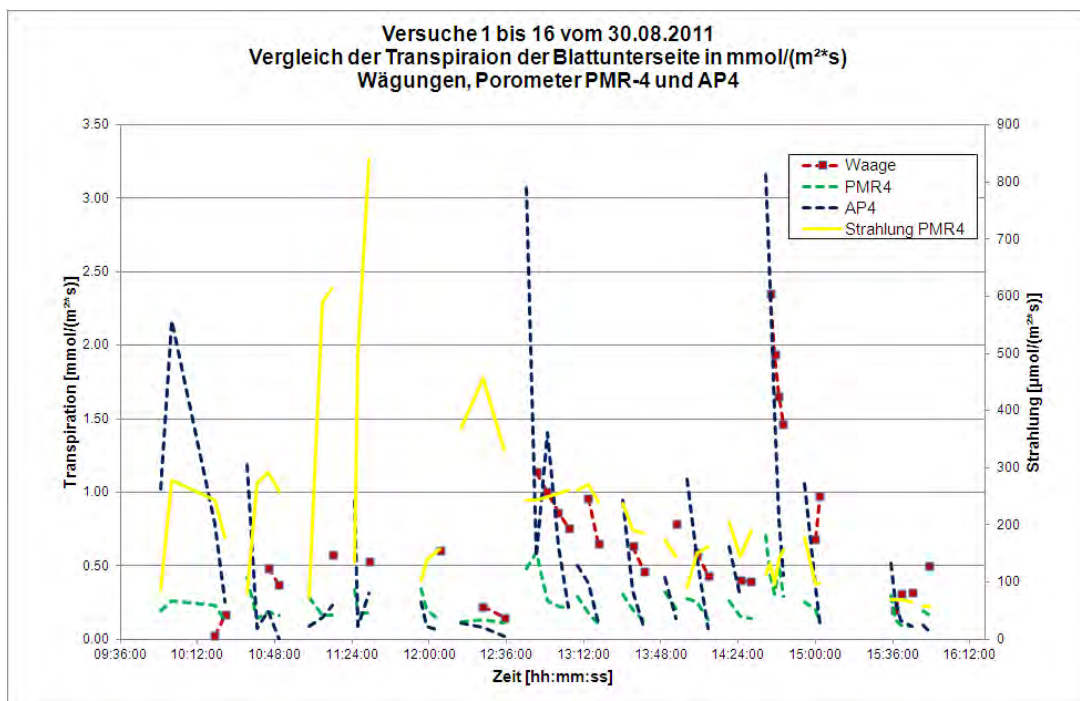


Abb. 88: Versuche Nr. 1 bis 16 vom 30.08.2011: Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, Vergleich Wägung, PMR-4 und AP4, eine Blattseite bzw. Blattunterseite

Ergebnisse

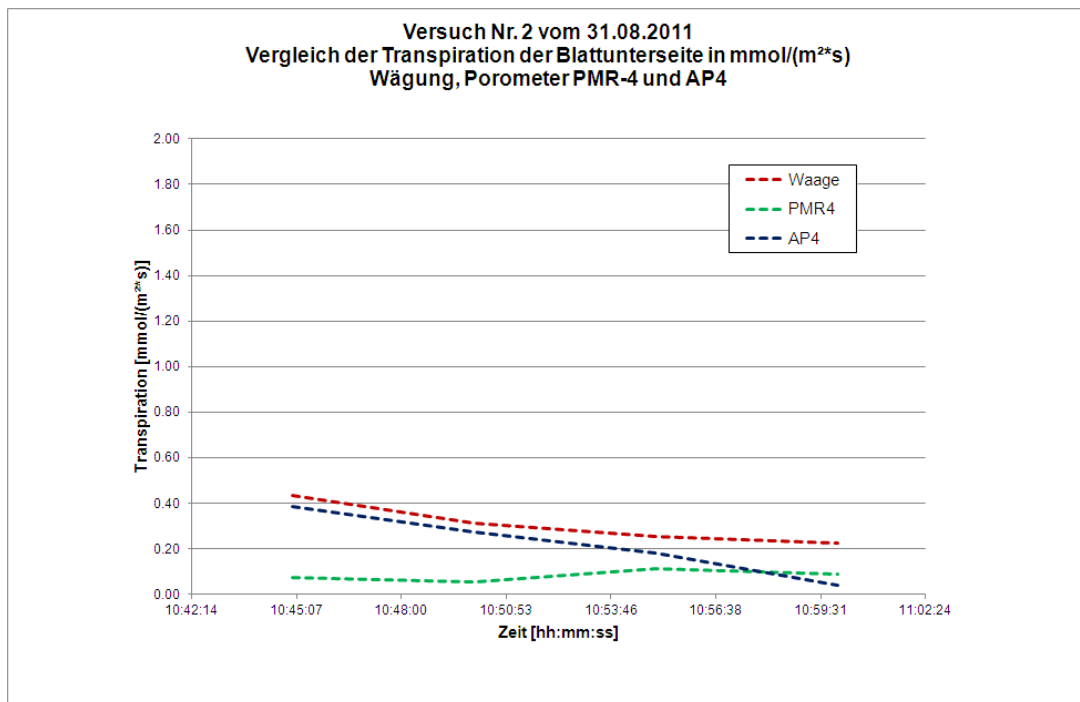


Abb. 89: Versuch 2 vom 31.08.2011: Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, Vergleich Wägung, PMR-4 und AP4, eine Blattseite bzw. Blattunterseite

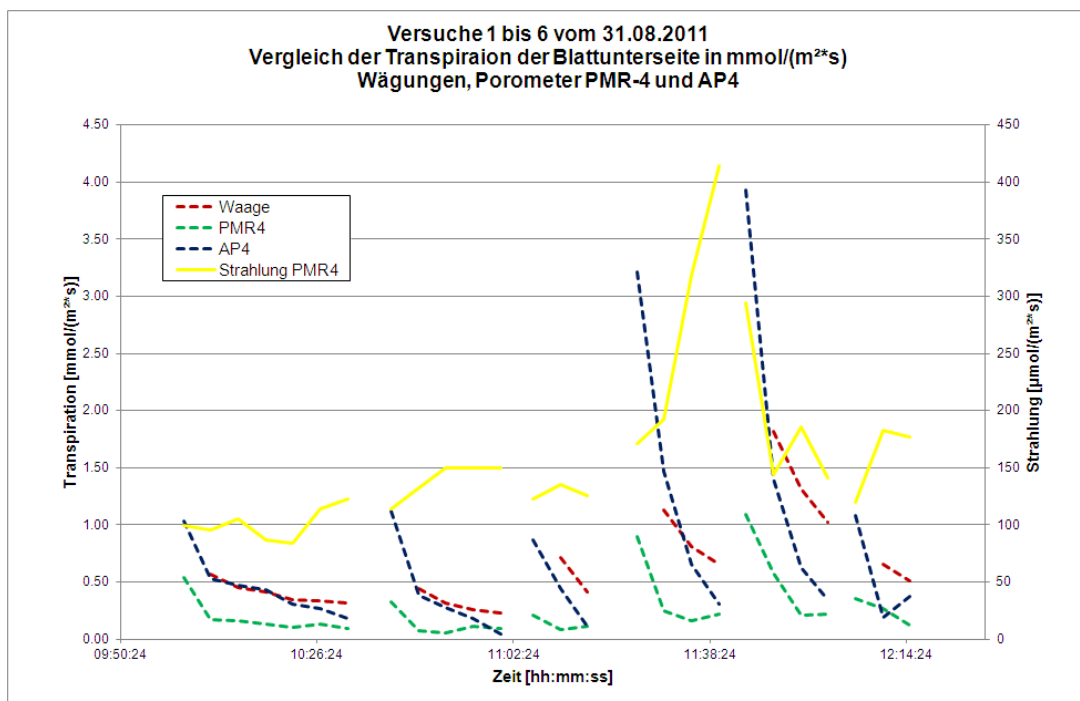


Abb. 90: Versuche Nr. 1 bis 6 vom 31.08.2011: Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, Vergleich Wägung, PMR-4 und AP4, eine Blattseite bzw. Blattunterseite

Ergebnisse

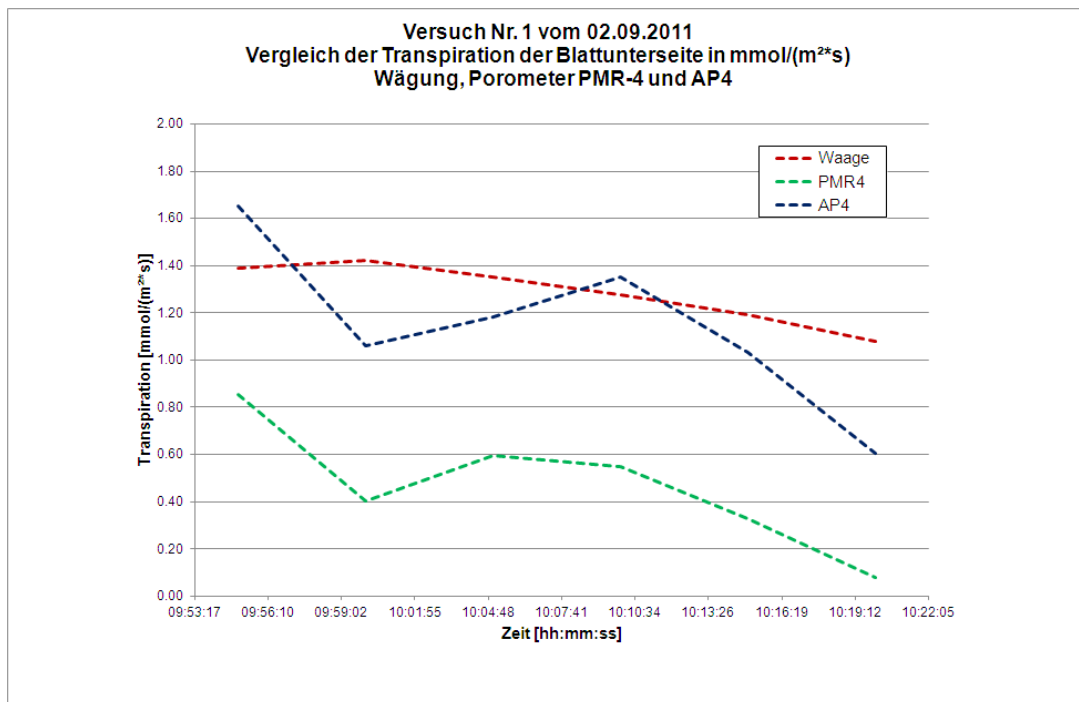


Abb. 91: Versuch Nr. 1 vom 02.09.2011: Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, Vergleich Wägung, PMR-4 und AP4, eine Blattseite bzw. Blattunterseite

Betrachtet man die einzelnen Versuche, so zeigt sich, dass zum Beispiel beim ersten Versuch von 02.09.2011, siehe Abbild 91, die Werte der Wägung mit den Werten des AP4 relativ gut übereinstimmen, während die Werte des PMR-4 eher im unteren Bereich liegen.

Interessanterweise liegen die AP4 Werte beim zweiten Versuch, (Abb. 92), näher an den PMR-4 Werten und eher niedriger als die Wägungswerte. Dies ist eher etwas ungewöhnlich, da es eigentlich auf ein Schließen der Spaltöffnungen hindeutet, jedoch diese sich bei den Wägungswerten nicht schließen, was nicht möglich ist, da es sich um das selbe Blatt handelt. Eine mögliche Erklärung für diese Phänomen, wenn es so bezeichnet werden kann, könnte sein, dass sich die unterschiedlichen Spaltöffnungen auf der Blattfläche in unterschiedlichen Öffnungs- beziehungsweise Schließzuständen befinden.

Ergebnisse

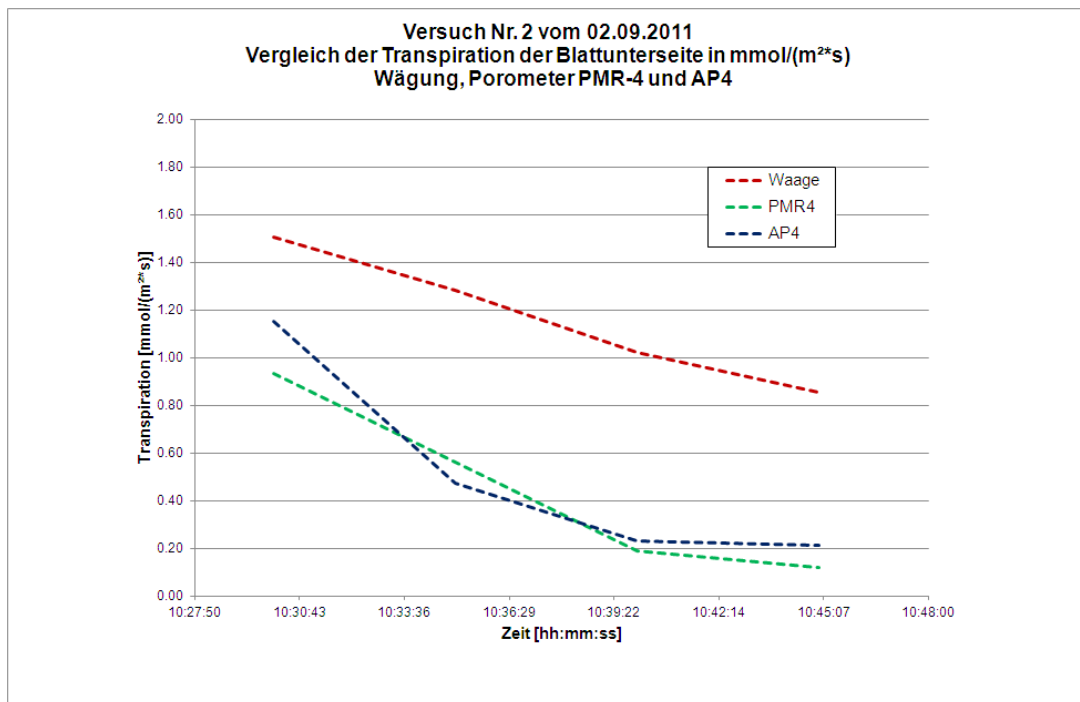


Abb. 92: Versuch Nr. 2 vom 02.09.2011: Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, Vergleich Wägung, PMR-4 und AP4, eine Blattseite bzw. Blattunterseite

Bei den Versuchen Nr. 3, 4 und 7 vom 02.09.2011 (Abb. 93, 94, und 95) liegen die Werte teils auseinander (Versuch Nr.3, Abb. 93), teils wieder näher beisammen, wie bei den Versuchen Nr. 4 und 7 (Abb. 94 und 95), aber eher bei geringeren Transpirationswerten.

Der Trend aller drei Versuche deutet aber auf ein langsames Schließen der Spaltöffnungen oder zumindest auf eine Erhöhung des Diffusionswiderstandes und folglich einer abnehmenden Transpiration.

Ergebnisse

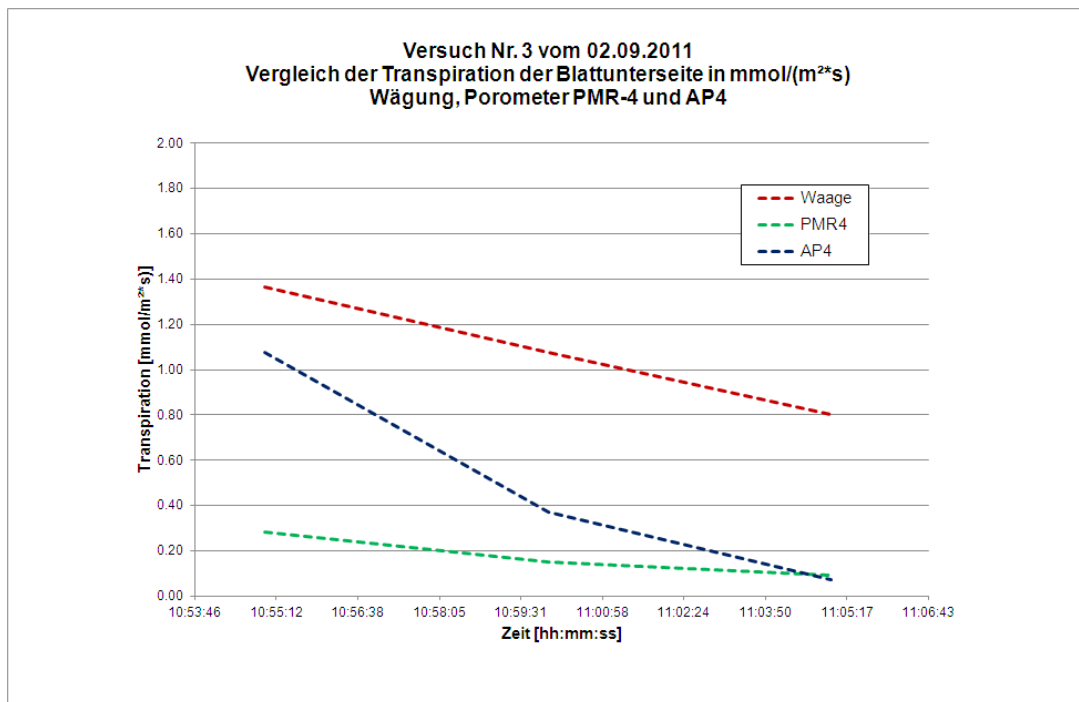


Abb. 93: Versuch Nr. 3 vom 02.09.2011: Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, Vergleich Wägung, PMR-4 und AP4, eine Blattseite bzw. Blattunterseite

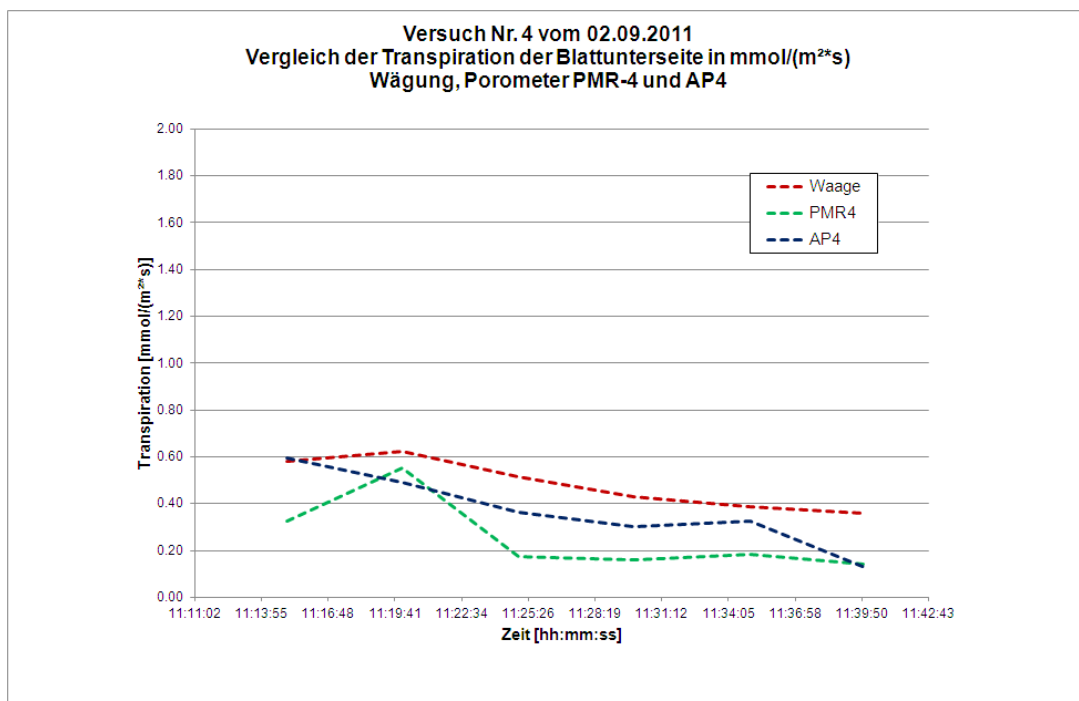


Abb. 94: Versuch Nr. 4 vom 02.09.2011: Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, Vergleich Wägung, PMR-4 und AP4, eine Blattseite bzw. Blattunterseite

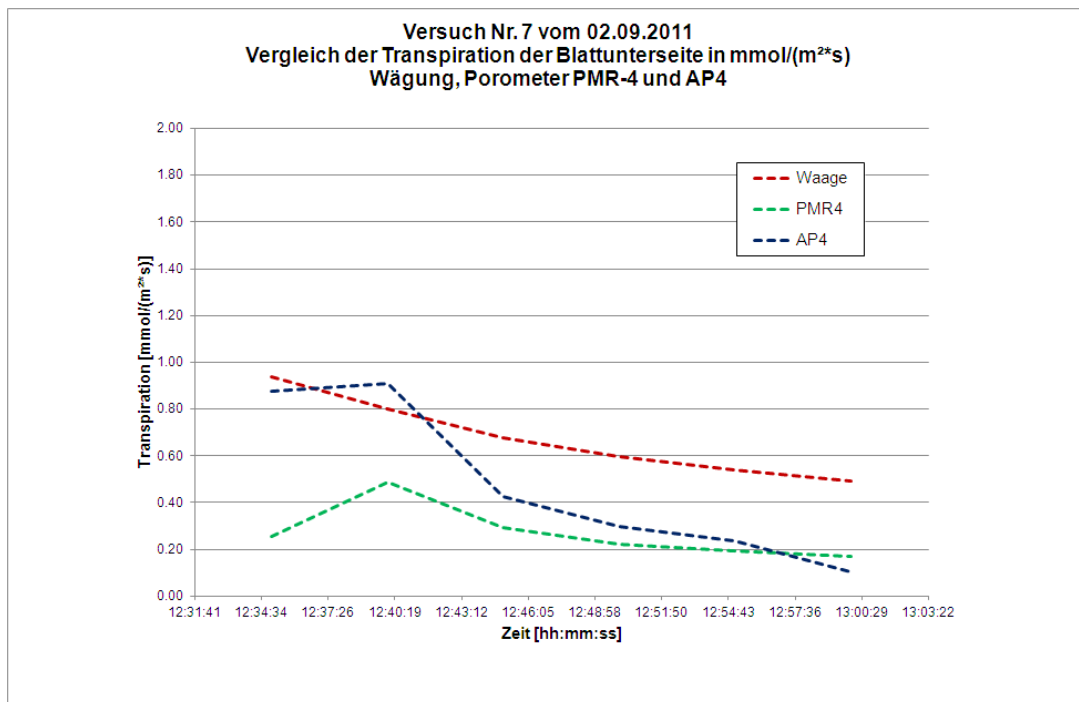


Abb. 95: Versuch Nr. 7 vom 02.09.2011: Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, Vergleich Wägung, PMR-4 und AP4, eine Blattseite bzw. Blattunterseite

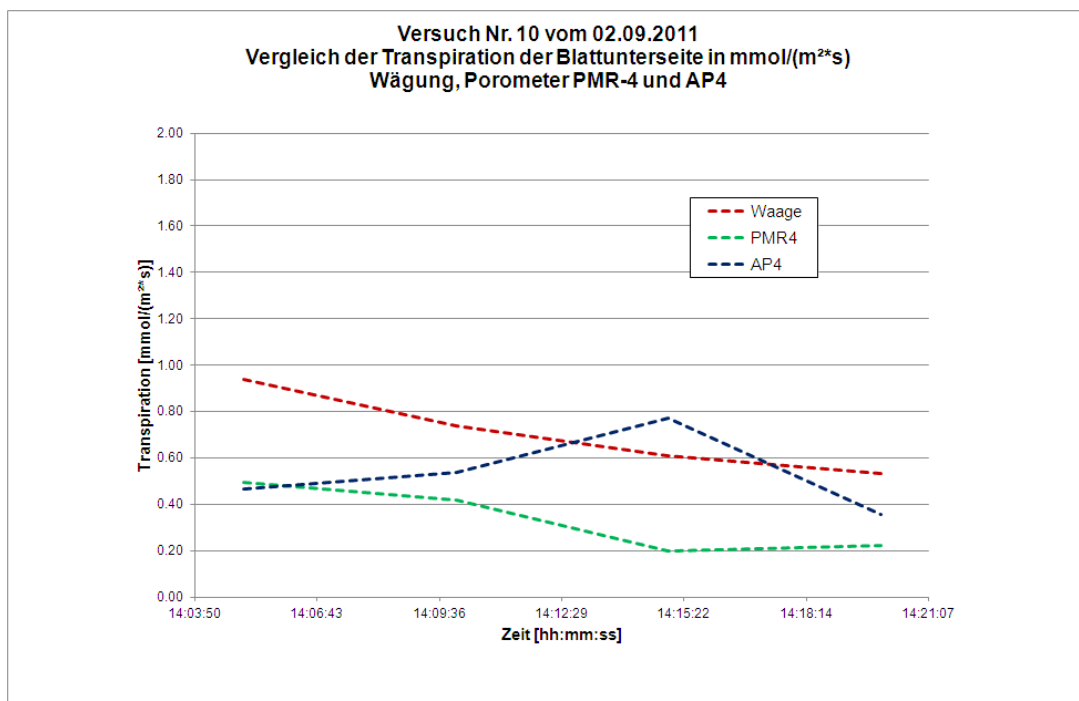


Abb. 96: Versuch Nr. 10 vom 02.09.2011: Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, Vergleich Wägung, PMR-4 und AP4, eine Blattseite bzw. Blattunterseite

Ergebnisse

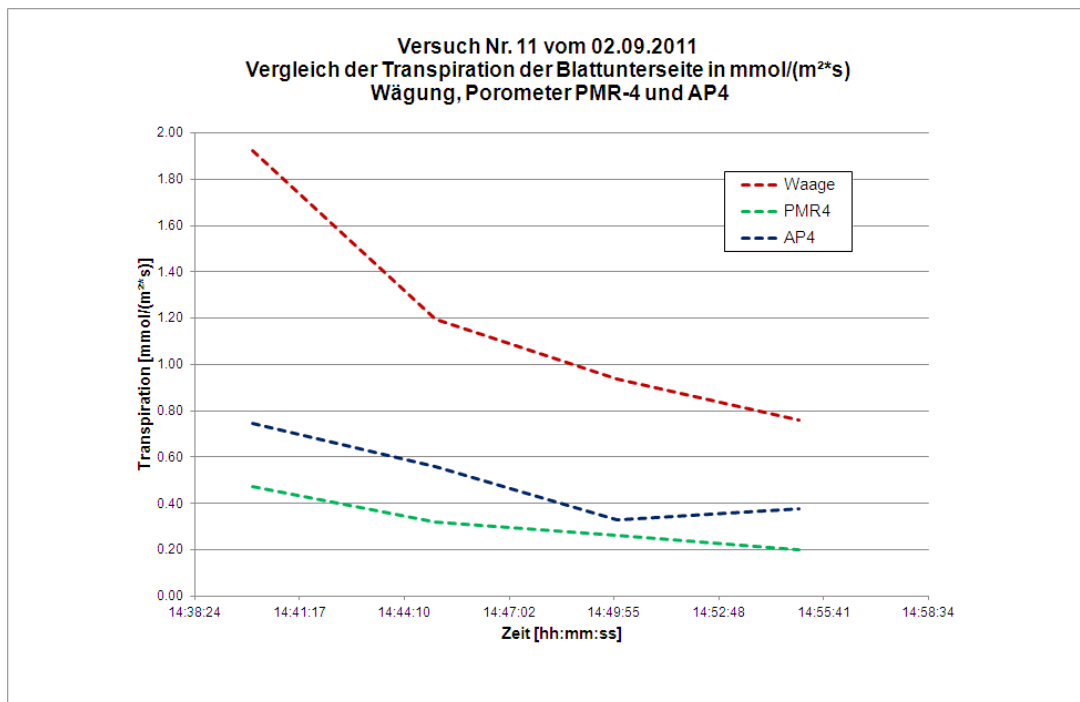


Abb. 97: Versuch Nr. 11 vom 02.09.2011: Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, Vergleich Wägung, PMR-4 und AP4, eine Blattseite bzw. Blattunterseite

Dagegen weisen die Kurven des Versuches Nr. 13 (Abb. 98) auf bereits vor Versuchsbeginn geschlossene oder sich schließende Spaltöffnungen, alle drei Messmethoden zeigen einer geringe Transpiration mit leichtem Abwärtstrend, welcher auch durch die cuticulären Verluste bedingt sein könnte.

Ergebnisse

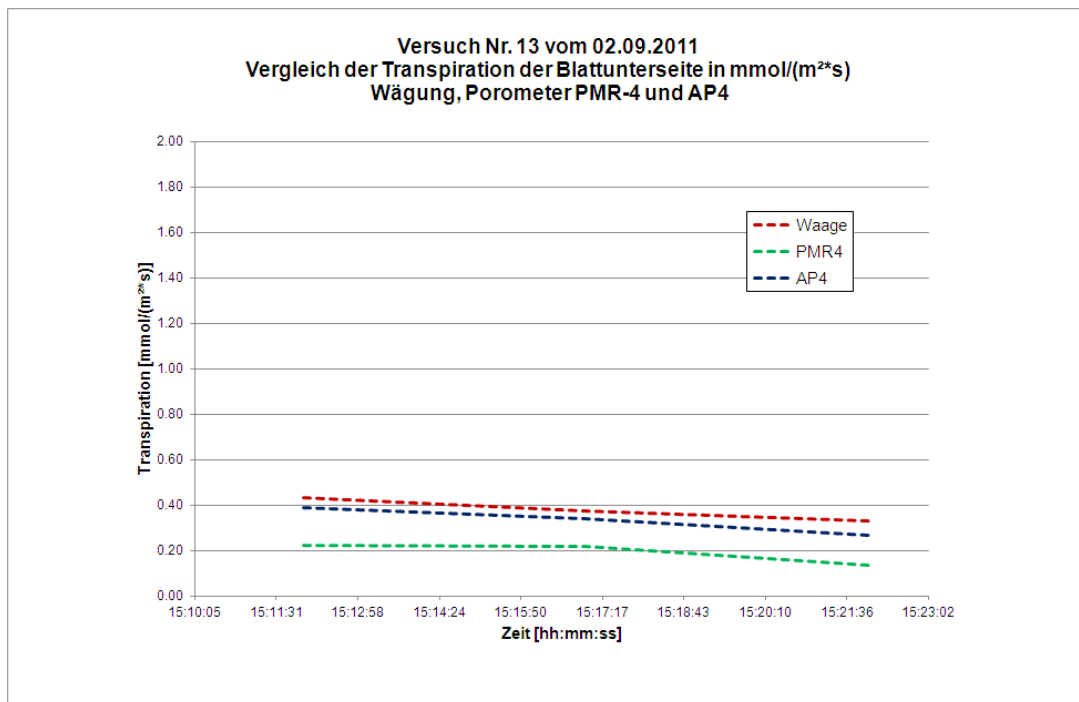


Abb. 98: Versuch Nr. 13 vom 02.09.2011: Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, Vergleich Wägung, PMR-4 und AP4, eine Blattseite bzw. Blattunterseite

Auch bei den Versuchen vom 05.09.2011 zeigt sich, dass die Werte eher schwer vergleichbar sind. Obwohl die Kurven der Messergebnisse doch einen Abwärtstrend zeigen, liegen sie dennoch fallweise weit auseinander. Interessant ist noch, dass je höher die Werte der Transpiration liegen, desto eher weichen die Kurven voneinander ab.

Bei geringeren Transpirationswerten, wie den Versuchen Nr. 4 (Abb. 94), 7 (Abb. 95), 10 (Abb. 96) und 13 (Abb. 98) von 02.09.2011 liegen die Kurven bei einer Transpiration von maximal $1,0 \text{ mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ näher zusammen als zum Beispiel beim Versuch Nr. 8 (Abb. 102) vom 05.09.2011 mit einer maximalen Transpiration von $1,80 \text{ mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$.

Aus dem, für den ganzen Versuchstag zusammen gefassten Diagramm für den 05.09.2011 (Abb. 103) ist zu erkennen, dass generell die Messungen mit dem AP4 Porometer die höchsten Werte der Transpiration liefert, gefolgt von den Werten der Wägungen. Der erste Messwert der AP4 Werte liegt immer deutlich höher als die folgenden.

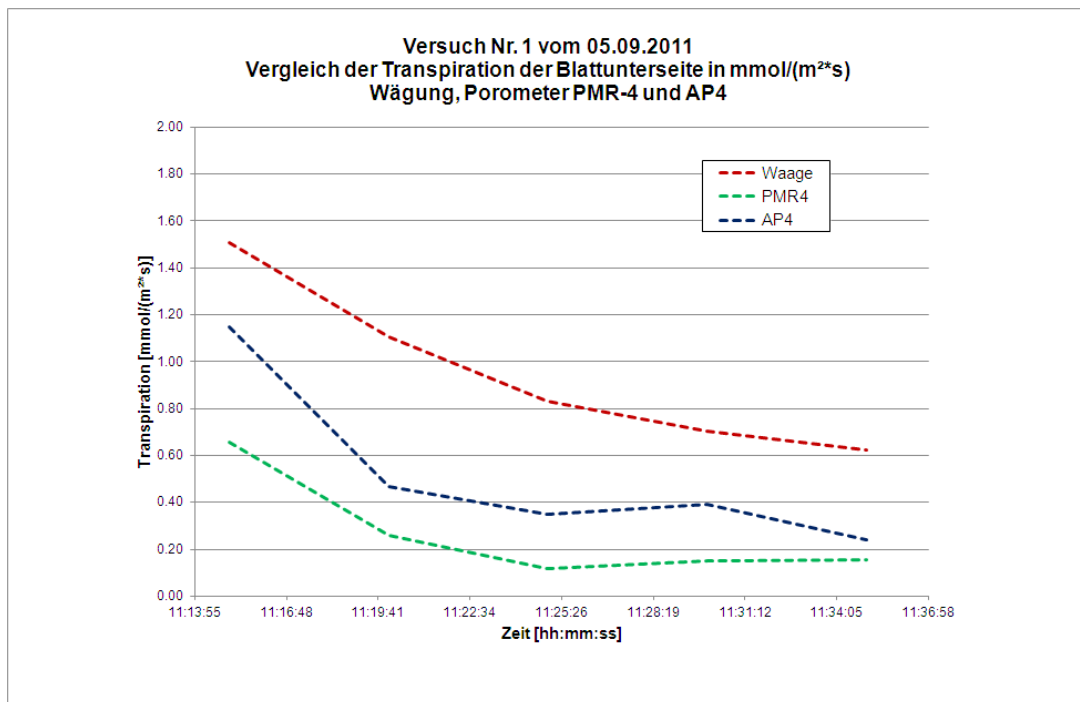


Abb. 99: Versuch Nr. 1 vom 05.09.2011: Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, Vergleich Wägung, PMR-4 und AP4, eine Blattseite bzw. Blattunterseite

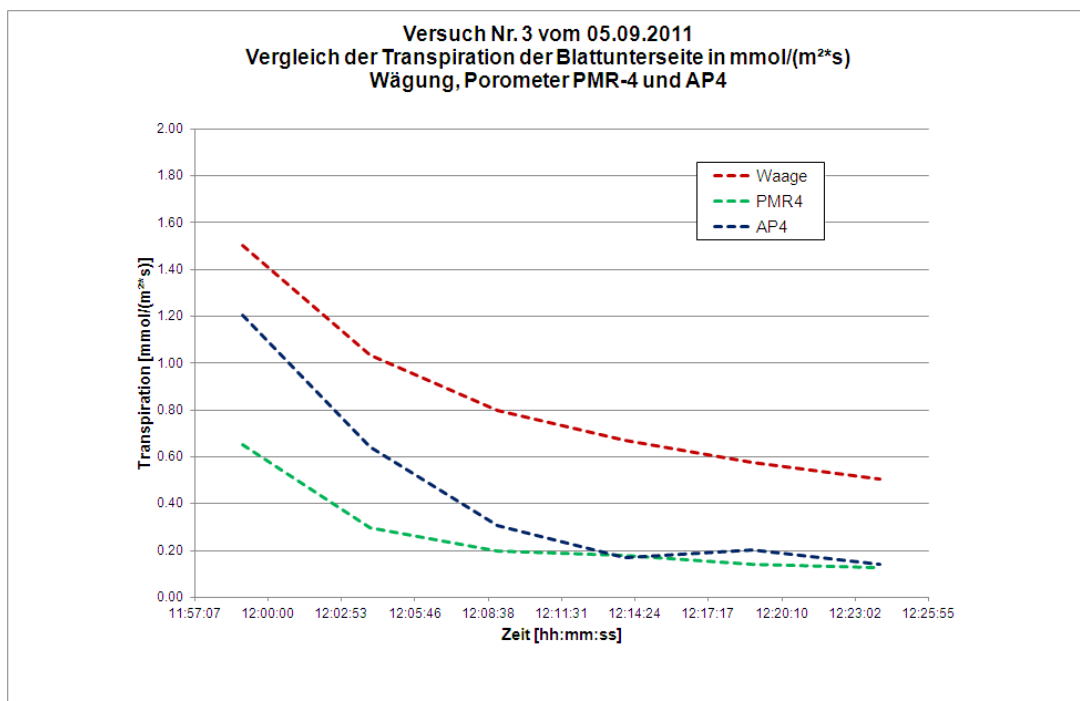


Abb. 100: Versuch Nr. 3 vom 05.09.2011: Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, Vergleich Wägung, PMR-4 und AP4, eine Blattseite bzw. Blattunterseite

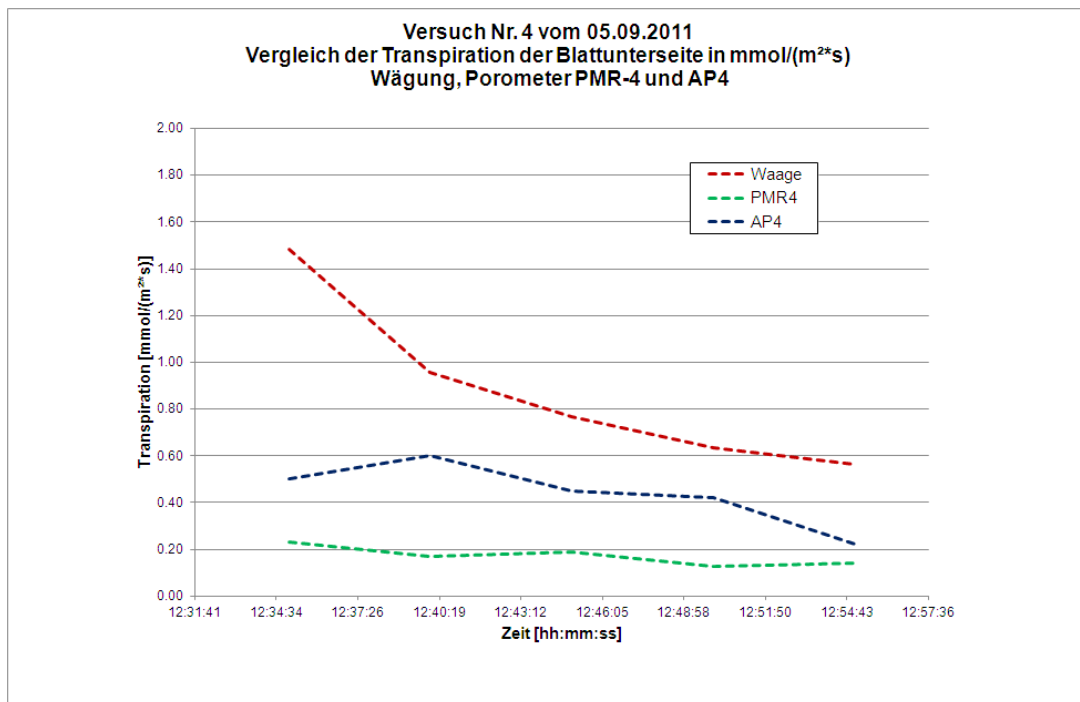


Abb. 101: Versuch Nr. 4 vom 05.09.2011: Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, Vergleich Wägung, PMR-4 und AP4, eine Blattseite bzw. Blattunterseite

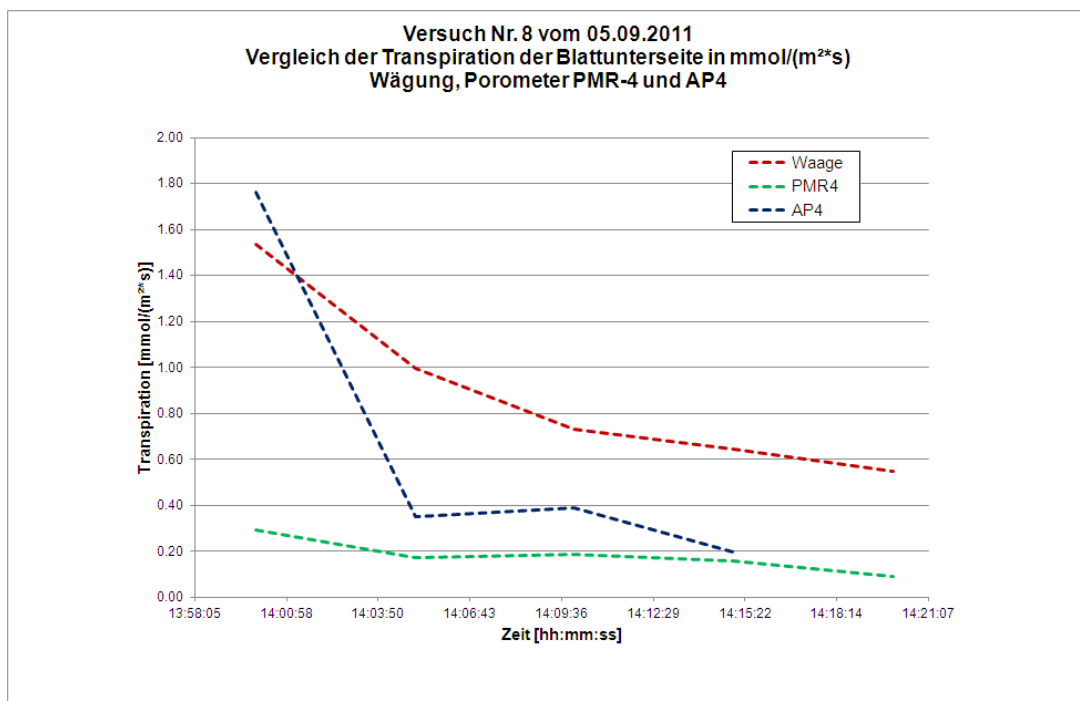


Abb. 102: Versuch Nr. 8 vom 05.09.2011: Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, Vergleich Wägung, PMR-4 und AP4, eine Blattseite bzw. Blattunterseite

Ergebnisse

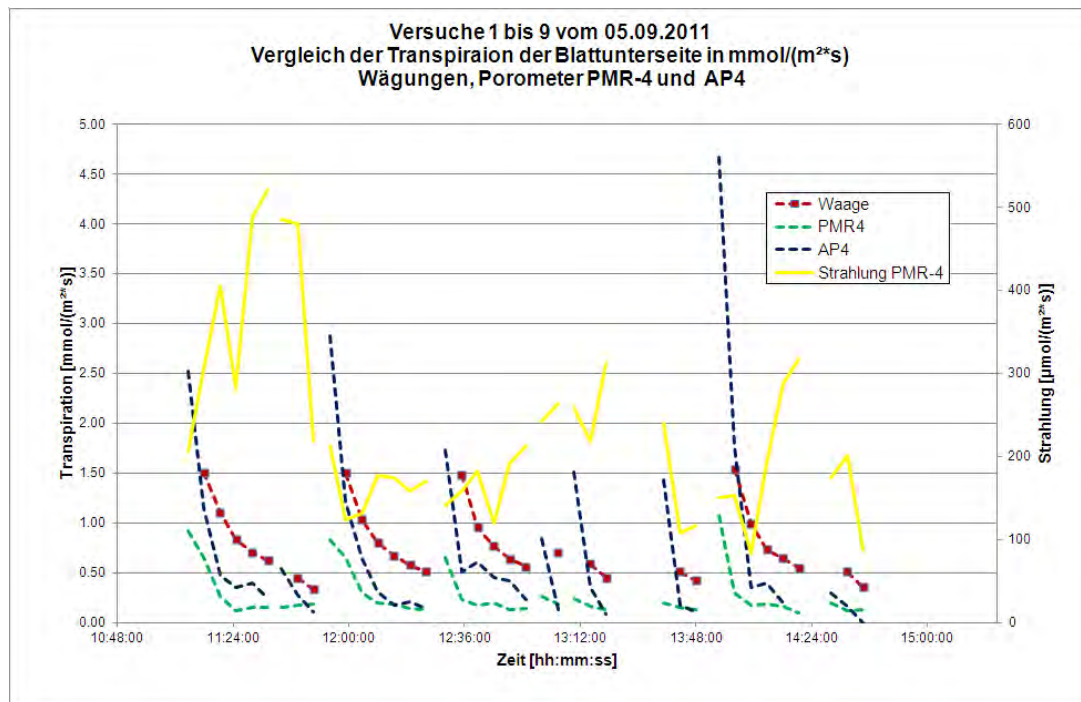


Abb. 103: Versuche Nr. 1 bis 9 vom 05.09.2011: Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, Vergleich Wägung, PMR-4 und AP4, eine Blattseite bzw. Blattunterseite

Bei der Versuchsreihe vom 06.09.2011 (Abb. 104 bis 108) zeigt sich, dass die Kurven der drei Messwerte sich bei geringeren Transpirationsraten eher annähern (siehe Abb. 105), wobei die Transpirationsbereitschaft der Versuchspflanzen beziehungsweise Versuchsblätter an diesem Messtag im allgemeinen eher gering war.

Dabei liegen die Werte der Wägung bei dieser Messserie häufig höher als die Werte der beiden Porometer (Abb. 105, 106 und 107). Dies ist insofern interessant, als dass hier vermutet werden kann, dass sich die Spaltöffnungen durch die Wirkung des Porometers schließen oder zu schließen beginnen. Des Weiteren ist dies auch deshalb interessant, weil bei der Wägung davon ausgegangen wird, dass die Dunstglocke, beziehungsweise Grenzschicht, die sich um die Spaltöffnungen bildet (siehe Abb. 8 und 9, Kapitel 4), eine Diffusion erschwert (ausgenommen dem Randeffect).

Wie bei den vorhergehenden Messungen zeigen die ersten AP4 Werte wieder höhere Transpirationswerte als die anderen beiden Methoden.

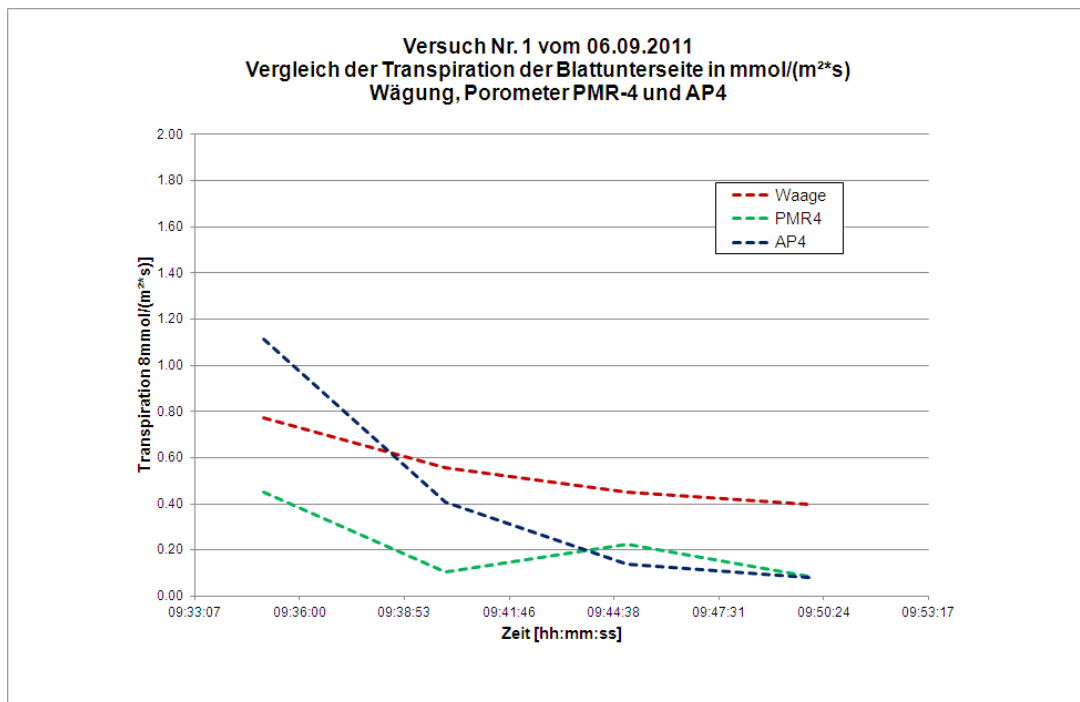


Abb. 104: Versuch Nr. 1 vom 06.09.2011: Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, Vergleich Wägung, PMR-4 und AP4, eine Blattseite bzw. Blattunterseite

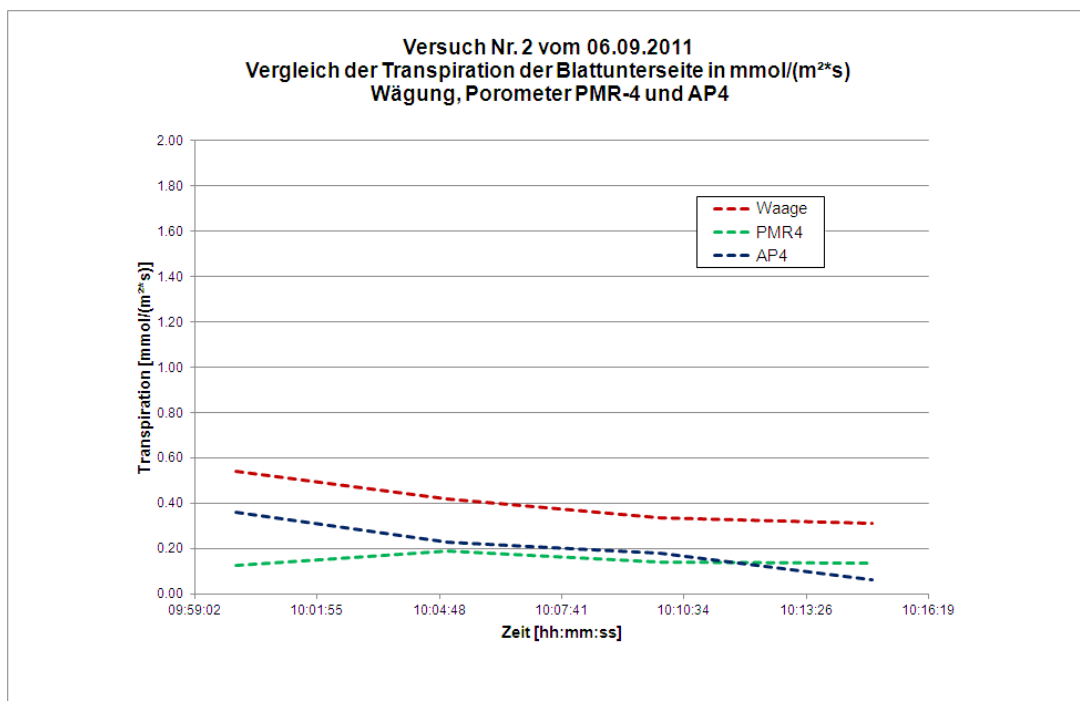


Abb. 105: Versuch Nr. 2 vom 06.09.2011: Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, Vergleich Wägung, PMR-4 und AP4, eine Blattseite bzw. Blattunterseite

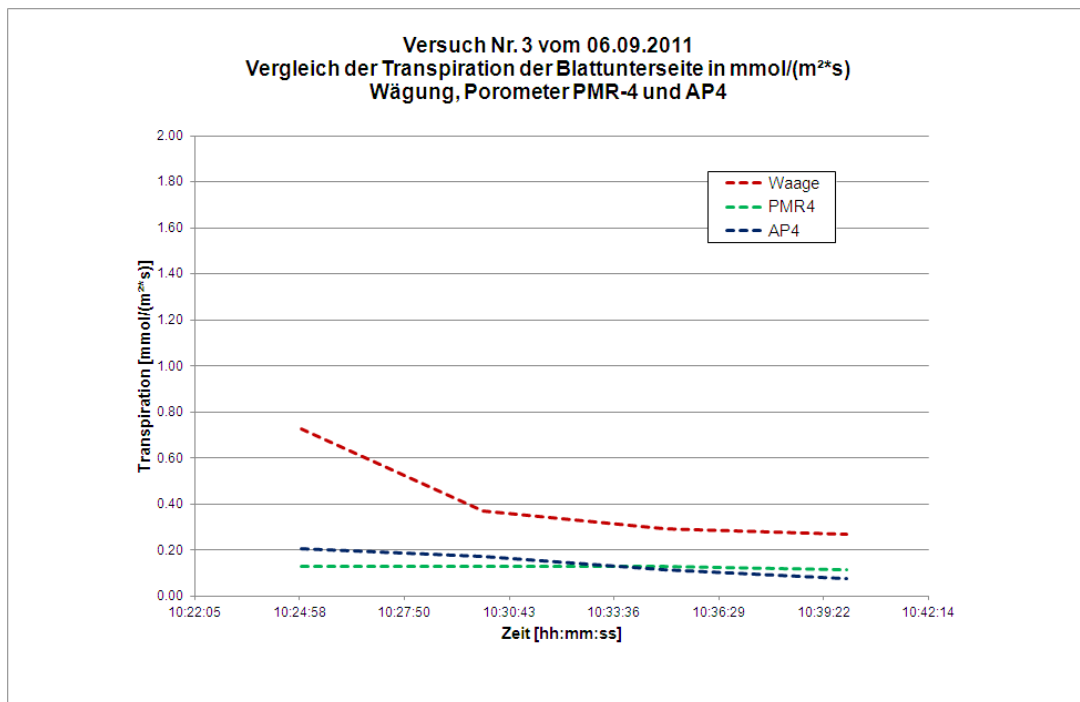


Abb. 106: Versuch Nr. 3 vom 06.09.2011: Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, Vergleich Wägung, PMR-4 und AP4, eine Blattseite bzw. Blattunterseite

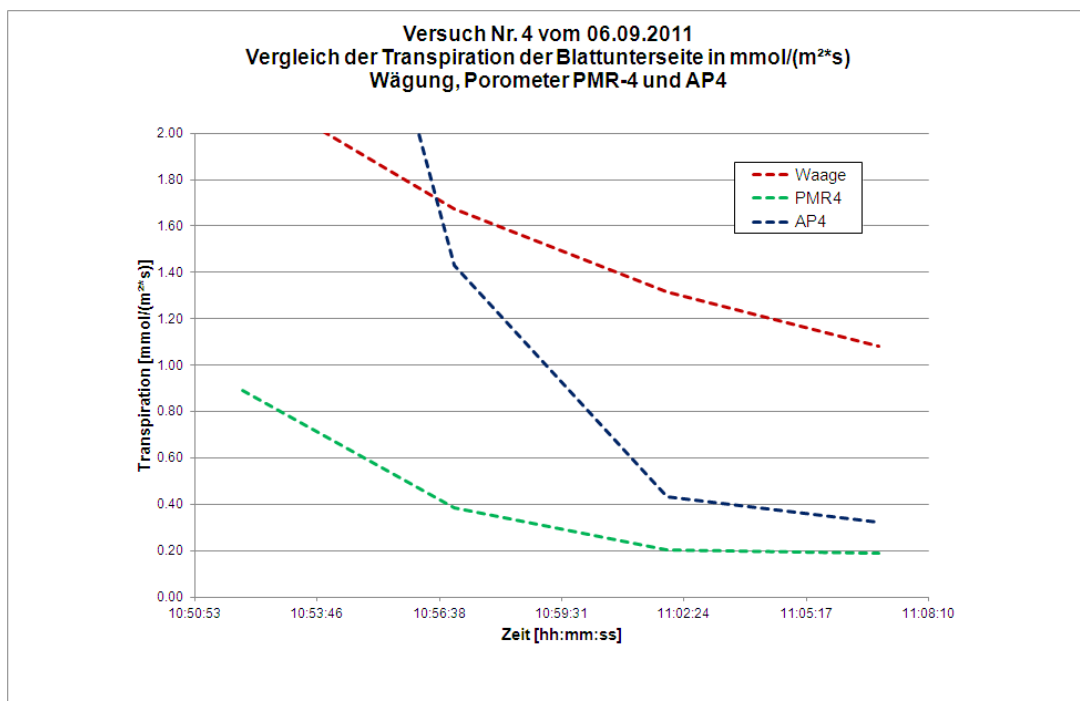


Abb. 107: Versuch Nr. 4 vom 06.09.2011: Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, Vergleich Wägung, PMR-4 und AP4, eine Blattseite bzw. Blattunterseite

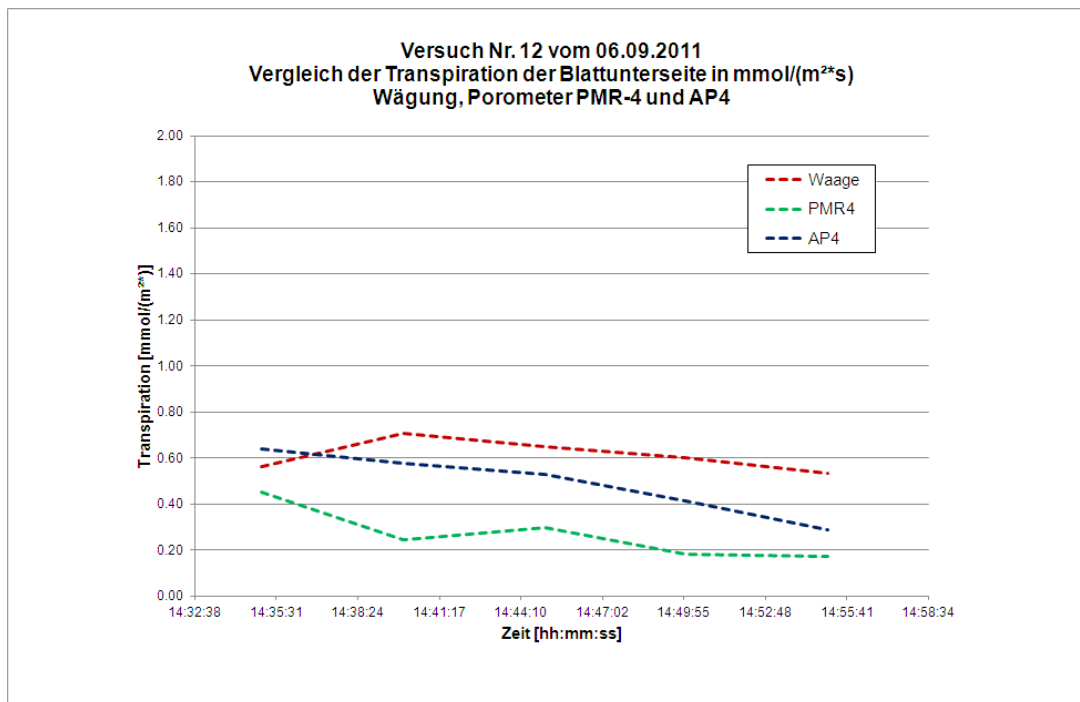


Abb. 108: Versuch Nr. 12 vom 06.09.2011: Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, Vergleich Wägung, PMR-4 und AP4, eine Blattseite bzw. Blattunterseite

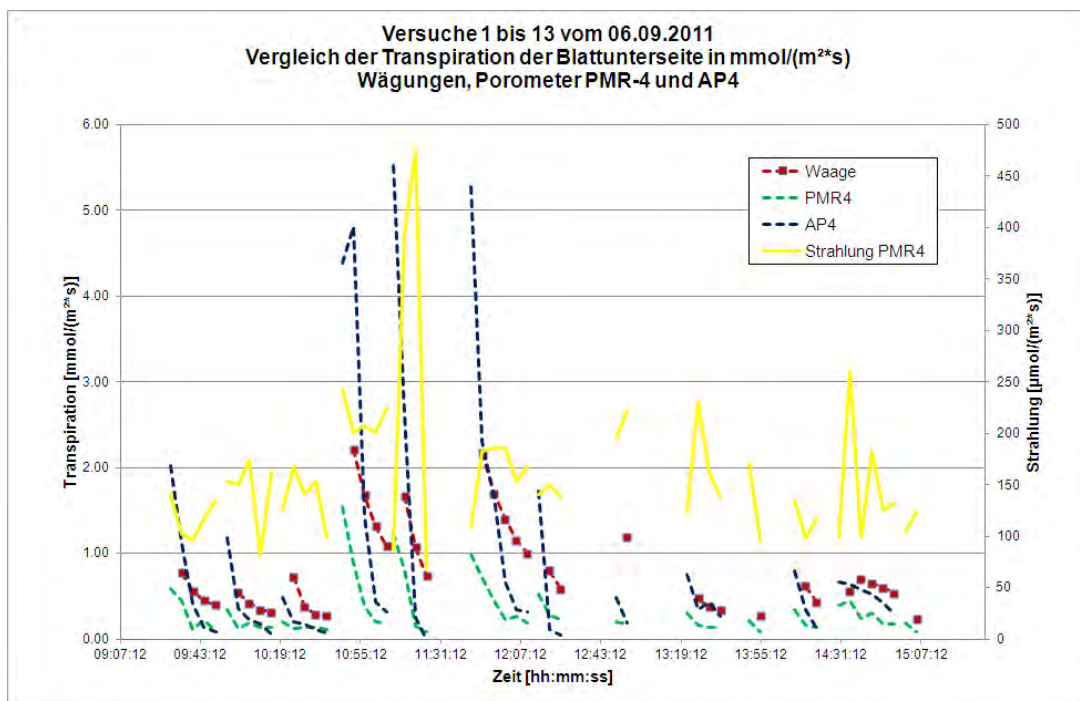


Abb. 109: Versuche Nr. 1 bis 13 vom 06.09.2011: Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, Vergleich Wägung, PMR-4 und AP4, eine Blattseite bzw. Blattunterseite

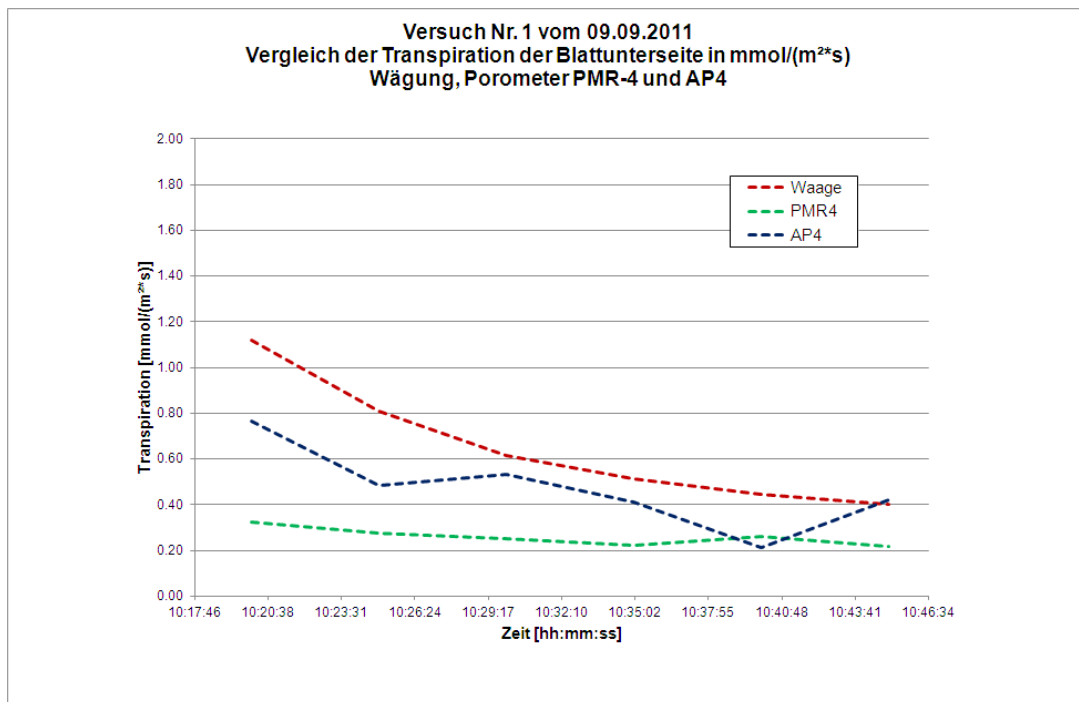


Abb. 110: Versuch Nr. 1 vom 09.09.2011: Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, Vergleich Wägung, PMR-4 und AP4, eine Blattseite bzw. Blattunterseite

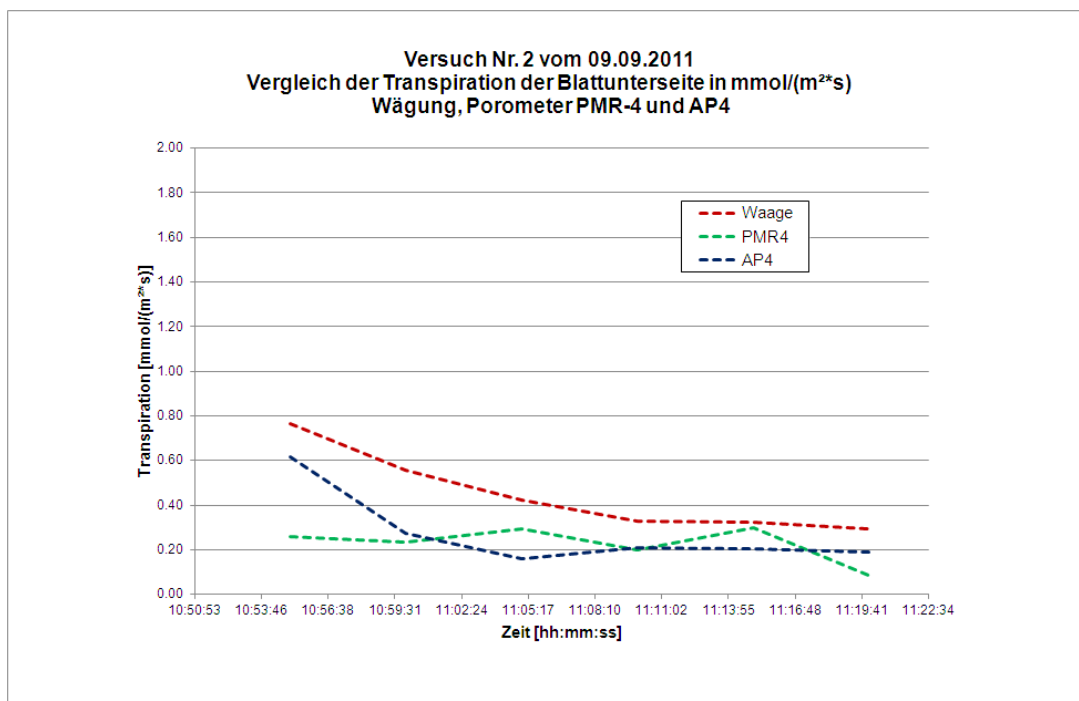


Abb. 111: Versuch Nr. 2 vom 09.09.2011: Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, Vergleich Wägung, PMR-4 und AP4, eine Blattseite bzw. Blattunterseite

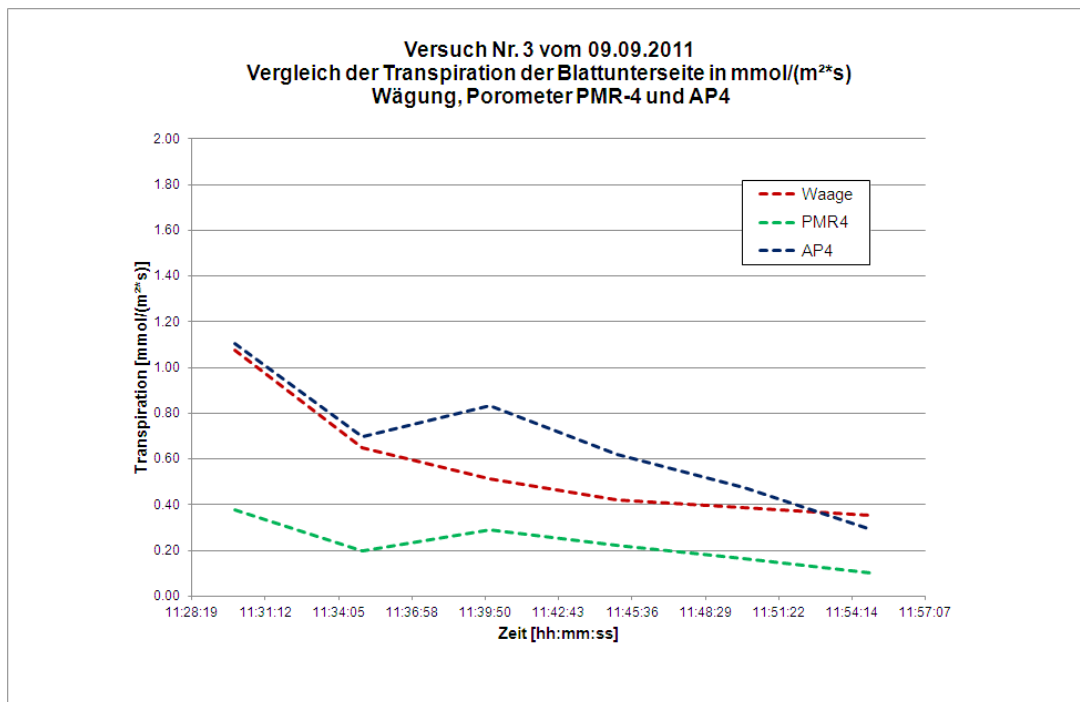


Abb. 112: Versuch Nr. 3 vom 09.09.2011: Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, Vergleich Wägung, PMR-4 und AP4, eine Blattseite bzw. Blattunterseite

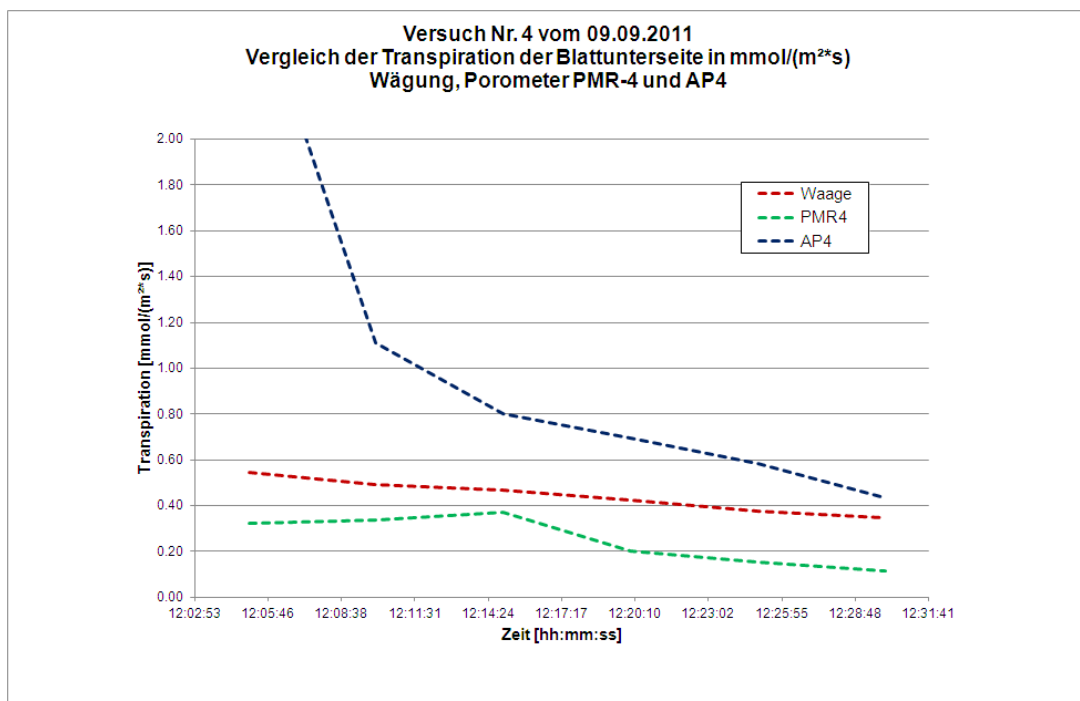


Abb. 113: Versuch Nr. 4 vom 09.09.2011: Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, Vergleich Wägung, PMR-4 und AP4, eine Blattseite bzw. Blattunterseite

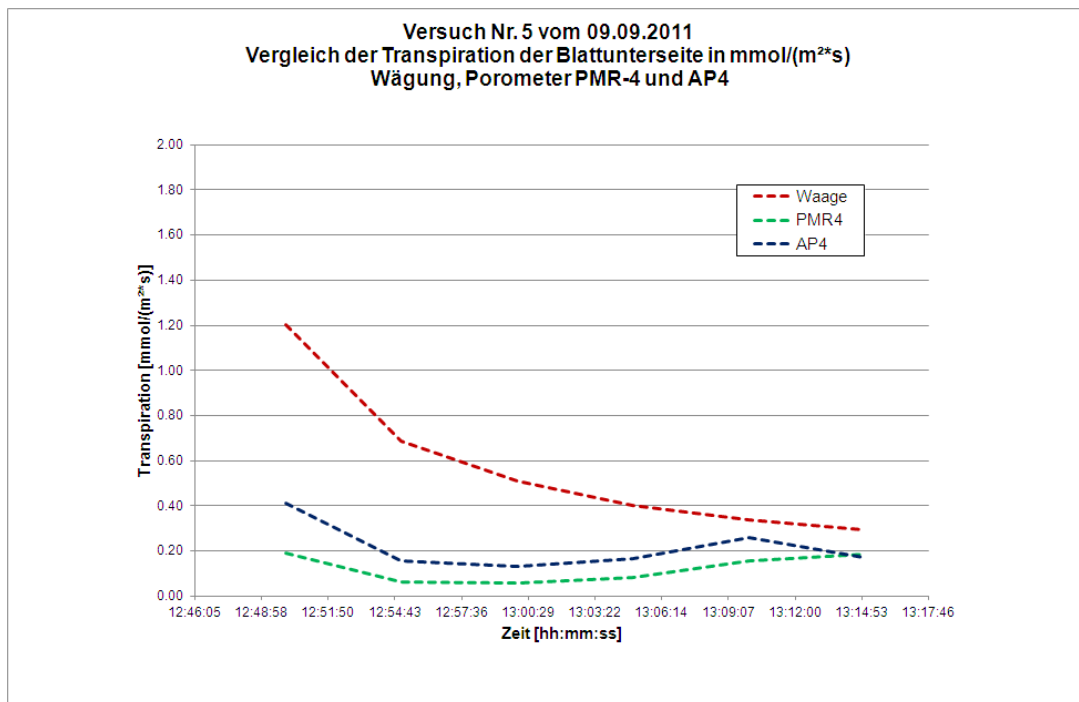


Abb. 114: Versuch Nr. 5 vom 09.09.2011: Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, Vergleich Wägung, PMR-4 und AP4, eine Blattseite bzw. Blattunterseite

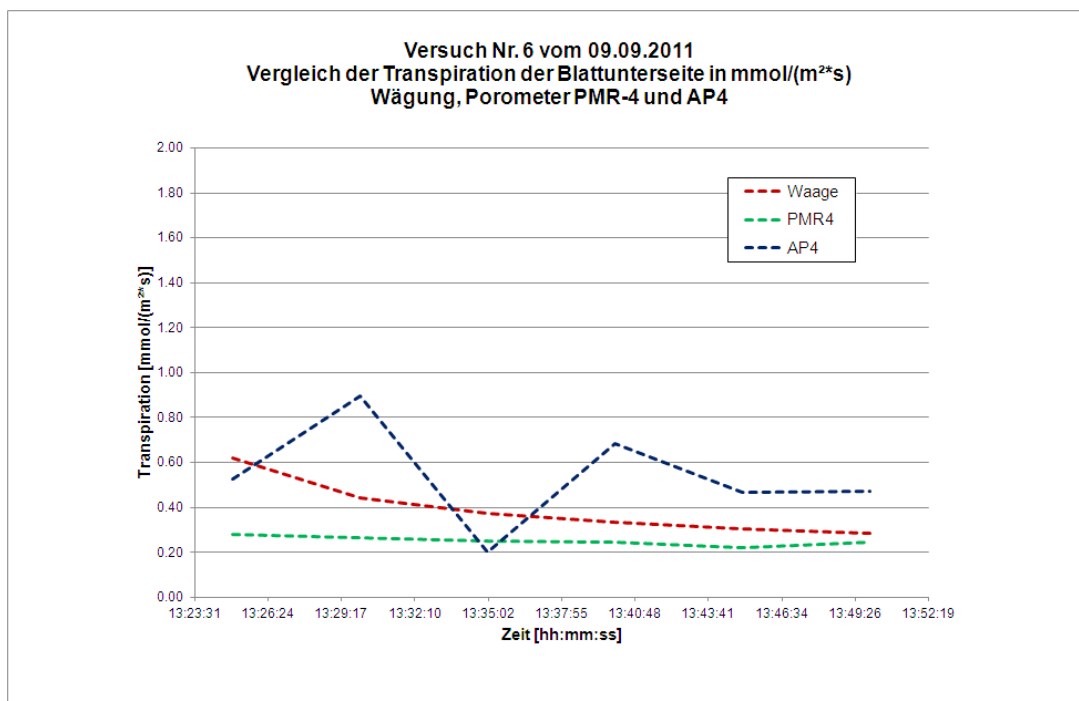


Abb. 115: Versuch Nr. 6 vom 09.09.2011: Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, Vergleich Wägung, PMR-4 und AP4, eine Blattseite bzw. Blattunterseite

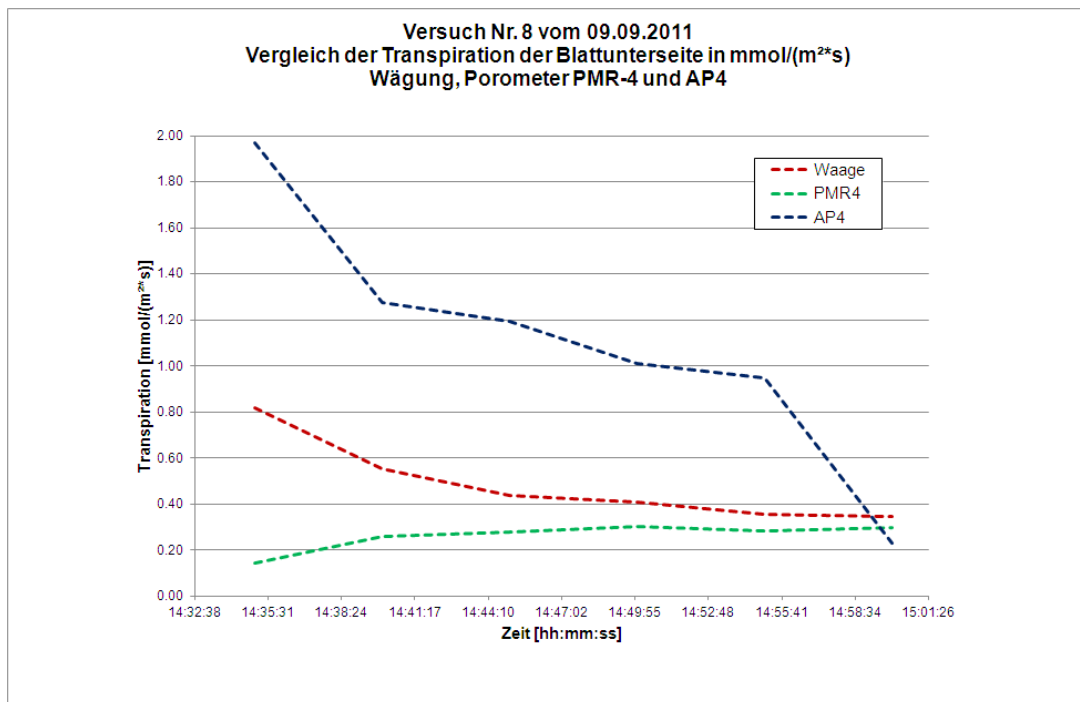


Abb. 116: Versuch Nr. 8 vom 09.09.2011: Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, Vergleich Wägung, PMR-4 und AP4, eine Blattseite bzw. Blattunterseite

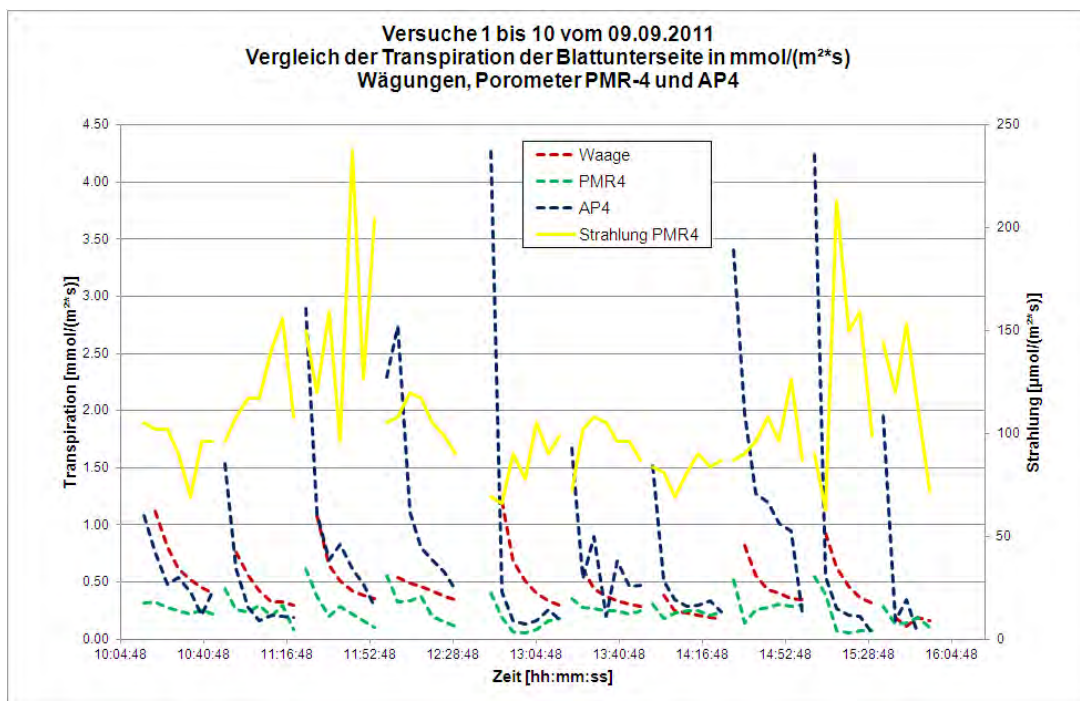


Abb. 117: Versuche Nr.1 bis 10 vom 09.09.2011: Transpiration in $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, Vergleich Wägung, PMR-4 und AP4, eine Blattseite bzw. Blattunterseite

Ergebnisse

Zusammenfassend kann für die Ergebnisse der Vergleichsversuche zwischen AP4, PMR- 4 und der Wägung folgendes gesagt werden: Bei geringeren Werten der Transpiration nähern die Messwertkurven sich eher an, dagegen zeigen sie im Bereich höherer Transpirationsraten ein auseinander Driften.

Um diese Aussage auch rechnerisch nach zu weisen, können die Prozentwerte der Abweichungen der einzelnen Messwerte herangezogen werden. Als Beispiel dienen hier die Versuche Nr. 1 und 3 vom 26.07.2011 (Abb. 83) und (Abb. 85), der Versuch Nr. 7 vom 30.08.2011 (Abb. 87) und der Versuch Nr. 8 vom 09.09.2011 (Abb. 116). Bezugswert beziehungsweise 100% ist bei den Vergleichen der beiden Porometer mit den Wägungen der Messwert der Waage, bei den Vergleichen der Porometer untereinander der Messwert des AP4.

Die ersten beiden Versuche (Tab. 9 und 10) weisen geringere prozentuelle Unterschiede auf als die folgenden zwei Versuche (Tab. 11 und 12), wo auch die Streuung der Daten höher ist, dabei darf nicht vergessen werden, das Extreme wie 440% auch auf Messfehler oder eine Fehlbedienung hinweisen können.

Versuch Nr. 1 vom 26.07.2011		
<i>Differenz zwischen den Messwerten der Wägung und dem AP4</i>		
<i>Maximalwert [%]</i>	<i>Minimalwert [%]</i>	<i>Mittelwert [%]</i>
102	16	37
<i>Differenz zwischen den Messwerten der Wägung und dem PMR-4</i>		
73	4	34
<i>Differenz zwischen den Messwerten des AP4 und dem PMR-4</i>		
66	31	55

Tab. 9: Versuch Nr. 1 vom 26.07.2011: Abweichungen der Messwerte in %

Versuch Nr. 3 vom 26.07.2011		
<i>Differenz zwischen den Messwerten der Wägung und dem AP4</i>		
Maximalwert [%]	Minimalwert [%]	Mittelwert [%]
92	34	51
<i>Differenz zwischen den Messwerten der Wägung und dem PMR-4</i>		
30	14	32
<i>Differenz zwischen den Messwerten des AP4 und dem PMR-4</i>		
60	45	49

Tab. 10: Versuch Nr. 3 vom 26.07.2011: Abweichungen der Messwerte in %

Versuch Nr. 7 vom 30.08.2011		
<i>Differenz zwischen den Messwerten der Wägung und dem AP4</i>		
Maximalwert [%]	Minimalwert [%]	Mittelwert [%]
71	27	45
<i>Differenz zwischen den Messwerten der Wägung und dem PMR-4</i>		
74	48	66
<i>Differenz zwischen den Messwerten des AP4 und dem PMR-4</i>		
440	0	9

Tab. 11: Versuch Nr. 7 vom 30.08.2011: Abweichungen der Messwerte in %

Versuch Nr. 8 vom 09.09.2011		
<i>Differenz zwischen den Messwerten der Wägung und dem AP4</i>		
Maximalwert [%]	Minimalwert [%]	Mittelwert [%]
174	33	117
<i>Differenz zwischen den Messwerten der Wägung und dem PMR-4</i>		
83	15	33
<i>Differenz zwischen den Messwerten des AP4 und dem PMR-4</i>		
388	22	242

Tab. 12: Versuch Nr. 8 vom 09.09.2011: Abweichungen der Messwerte in %

Das AP4 Porometer zeigt bei den meisten Versuchen die höchsten Werte der Transpiration, wobei auch der häufig vorkommende hohe erste Messwert sich von den anderen zwei Methoden unterscheidet. Die Wägung zeigt im Vergleich zu den früheren Messserien deutlich höhere Werte der Transpiration, diese sind bei manchen Versuchen sogar höher als die Werte welche mit dem AP4 gemessen wurden. Das PMR-4 Porometer zeigt dagegen die geringsten Messwerte, diese liegen im Bereich der Messwerte für die Blattoberseite, siehe Messserie Vergleich Waage mit PMR-4 Porometer.

Einzelne Messwerte wie zum Beispiel die AP4 Werte des Versuches Nr. 2 vom 26.07.2011 (Abb. 84) lassen sich nur durch einen Bedienungsfehler erklären und können als messtechnische Ausreißer bezeichnet werden. Alle Messgeräte zeigen aber den Verlauf der Transpiration gleich an, das bedeutet, eine Abnahme der Transpirationsrate wird in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt, vorausgesetzt die Messzeit ist ausreichend lang und es liegt bei den Porometern eine genügende Anzahl an Messungen vor.

Jedoch neigen die Porometer im Vergleich zu der Wägung dazu, hin und wieder zu hohe oder zu geringe Werte anzuzeigen, was sich, wenn zu wenige Messwerte gemacht werden, auf den Verlauf der Messkurven beziehungsweise auf den Endwert der Transpiration auswirkt und das Bild über die Gesamttranspiration verfälschen kann.

Da bei den Versuchen die Öffnungszustände der Spaltöffnungen am Anfang der Messungen unbekannt sind, führt dies zu unterschiedlichen Ausgangsbedingungen, die sich in den jeweiligen Messkurven widerspiegeln. So kann das Zusammenliegen der Messkurven in den Bereichen der geringeren Transpiration auch durch den unteren Messbereich der Geräte bedingt sein.

Tabelle 13 gibt eine zusammenfassende Darstellung aller in Rahmen der Versuchsreihe durchgeführten Vergleichsmessungen wieder.

Ergebnisse

Aus dieser wird ersichtlich, dass ein Vergleich unter den Methoden eher schwer ist, zeigen doch manche Werte, wie die mit dem AP4 und der Waage gemessenen Werte, manchmal ganz gute Übereinstimmung und dann wieder gar nicht. Die PMR-4 Werte liegen jedoch deutlich unter den, sogar mit der Waage gemessenen Werten.

Was aber auch auffällt ist, dass obwohl die Ergebnisse der einzelnen Messmethoden untereinander nur bedingt vergleichbar sind, die Wiederholbarkeit der Messungen, dass heißt die Konsistenz der Messreihen in sich doch relativ gut ist, dies hat sich auch bei den schon vorher durchgeführten Messreihen gezeigt.

Ergebnisse

Datum	Anzahl der Versuche	Wert	Waage eine Blattseite Transpiration mmol/(m ² s)	PMR-4 Blattunterseite Transpiration mmol/(m ² s)	AP4 Blattunterseite Transpiration mmol/(m ² s)
26.07.2011	3	Mittelwert	0.46	0.24	0.64
		Median	0.29	0.21	0.45
		Varianz	0.12	0.02	0.36
		Standardabw.	0.35	0.14	0.60
		Variationskoeff.	76	58	93
27.07.2011	4	Mittelwert	0.37	keine Daten da Gerät defekt	0.54
		Median	0.31		0.45
		Varianz	0.03		0.14
		Standardabw.	0.16		0.37
		Variationskoeff.	43		69
30.08.2011	16	Mittelwert	0.70	0.20	0.43
		Median	0.58	0.17	0.25
		Varianz	0.28	0.01	0.28
		Standardabw.	0.53	0.12	0.53
		Variationskoeff.	75	57	123
31.08.2011	6	Mittelwert	0.64	0.17	0.45
		Median	0.48	0.13	0.36
		Varianz	0.17	0.013	0.140
		Standardabw.	0.41	0.113	0.374
		Variationskoeff.	64	68	83
02.09.2011	13	Mittelwert	0.83	0.30	0.53
		Median	0.75	0.22	0.37
		Varianz	0.18	0.04	0.17
		Standardabw.	0.42	0.20	0.41
		Variationskoeff.	51	69	77
05.09.2011	8	Mittelwert	0.77	0.20	0.41
		Median	0.66	0.16	0.33
		Varianz	0.12	0.02	0.14
		Standardabw.	0.35	0.13	0.38
		Variationskoeff.	46	66	92
06.09.2011	13	Mittelwert	0.81	0.25	0.63
		Median	0.60	0.17	0.33
		Varianz	0.28	0.04	0.87
		Standardabw.	0.53	0.19	0.93
		Variationskoeff.	65	78	149
09.09.2011	10	Mittelwert	0.46	0.21	0.53
		Median	0.40	0.22	0.42
		Varianz	0.06	0.01	0.22
		Standardabw.	0.23	0.09	0.47
		Variationskoeff.	51	41	88

Tab. 13: Vergleich der Messwerte der Versuchsreihen: Wägung, PMR-4 und AP4, eine Blattseite bzw. Blattunterseite

7.5 Vergleich des AP4 mit der Infrarot Thermographie

7.5.1 Versuch vom 05.11.2011 *Hedera helix*:

Bei dem folgenden Versuch wurden 7 Blätter gekennzeichnet und auf der Pflanze belassen, oder abgetrennt und wieder an ihrer ursprünglichen Position mit Klemmen befestigt.

Blatt A = trockene Referenz (Vaseline), Blatt B = trockene Referenz (Vaseline), Blatt C = abgetrennt, Blatt D = abgetrennt, Blatt E = abgetrennt, Blatt F = nasse Referenz, Blatt G = nasse Referenz.

Folgende Umweltparameter wurden zu Beginn des Versuches gemessen: maximale Strahlungsleistung 500 W/m², minimale Strahlungsleistung 100 W/m², Lufttemperatur zu Beginn 16°C, relative Luftfeuchte 43%.

Der Leitwert (gemessen mit dem AP4) des abgetrennten Blattes (Abb. 118) fällt innerhalb von ca. 20 Minuten deutlich ab. Am unteren Knick der Kurve ist der Spaltenschluss zu erkennen. Die restliche Kurve stellt mit hoher Wahrscheinlichkeit nur mehr die cuticuläre Transpiration da.

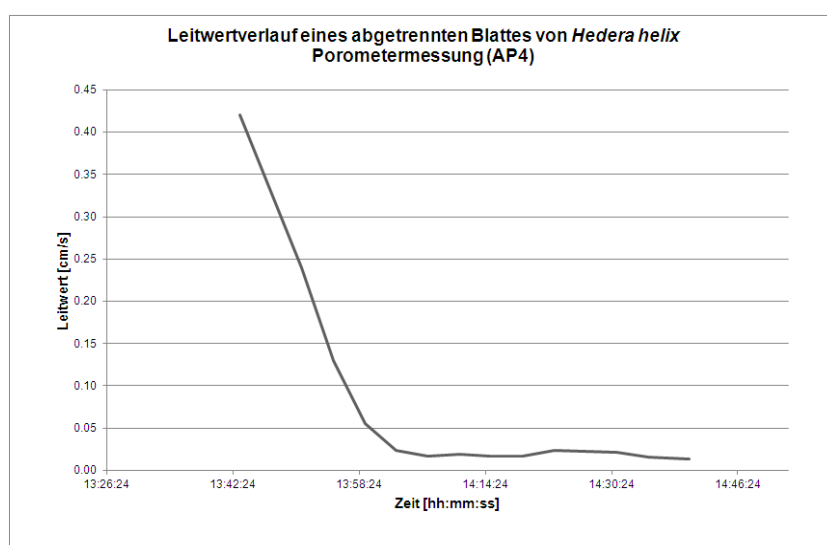


Abb. 118: Leitwertverlauf eines abgetrennten Blattes, *Hedera helix*, 05.11.2011

Ergebnisse

Diesen Verlauf müssten auch die zeitgleich abgetrennten Blätter auf der Pflanze zeigen, bei der Annahme, dass sie im ähnlichen physiologischen Zustand sind wie das porometrierte Blatt. Bei sonst ungestörten Umweltbedingungen, das heißt zum Beispiel kein Wind oder nur wenig Wind und genügend Strahlungsleistung, müssten die abgetrennten Blätter im Laufe des Versuches eine stetige Temperaturzunahme zeigen.

Abbild 119 zeigt die Temperaturverhältnisse zu Beginn des Versuches am 05.11.2011 wieder.

Blatt A, das mit Vaseline bestrichen ist, hat mit 24 °C eine höhere Temperatur als die Umgebungstemperatur, auch Blatt C liegt mit 25,6 °C weit über den 16 °C, dagegen liegen die Blätter F und G mit jeweils 17,2 °C und 13,2 °C nur etwas über den 16 °C und deutlich unter der Umgebungstemperatur. Es ist aber zu beachten, dass die Erwärmung der Blätter durch die Sonnenstrahlung zustande kommt, die durch die Transpiration verursachte Kühlung zeigt sich in diesem Fall noch nicht.

Die nassen Blätter sind natürlich wegen der ungehinderten Verdunstung kühler als die restlichen.

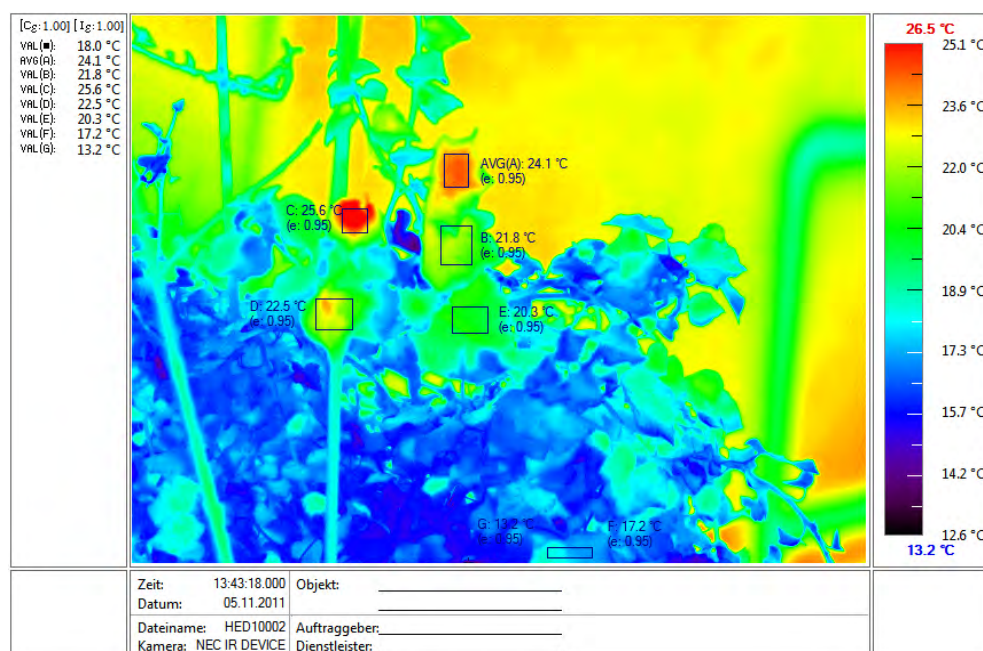


Abb. 119: Temperaturen zu Versuchsbeginn, *Hedera helix*, 05.11.2011

Ergebnisse

Durch Änderung der Strahlungsbedingungen (siehe Abb. 120) kommt es nach 8 Minuten zu Änderungen der Blatttemperaturen, im Hintergrund sichtbar ist die sich erwärmende Wand. Blatt A hat 22,9°C, B 22,0°C und die Blätter C, D und E liegen zwischen 20 und 21,8°C.

Die nassen Referenzen F und G zeigen deutlich geringere Temperaturen 14,7°C und 19,6°C. Es ist aber an den Blattflächen zu sehen, dass manche Bereiche des Blattes etwas wärmer werden als andere. Dies könnte an einer unterschiedlichen Transpiration liegen, jedoch ist auch eine unterschiedliche Erwärmung der Blattfläche durch die Sonnenstrahlung möglich. Dies schließt aber nicht aus, dass die Spaltöffnungen auf die unterschiedliche Erwärmung der Blattbereiche mit unterschiedlich intensiver Transpiration reagieren.

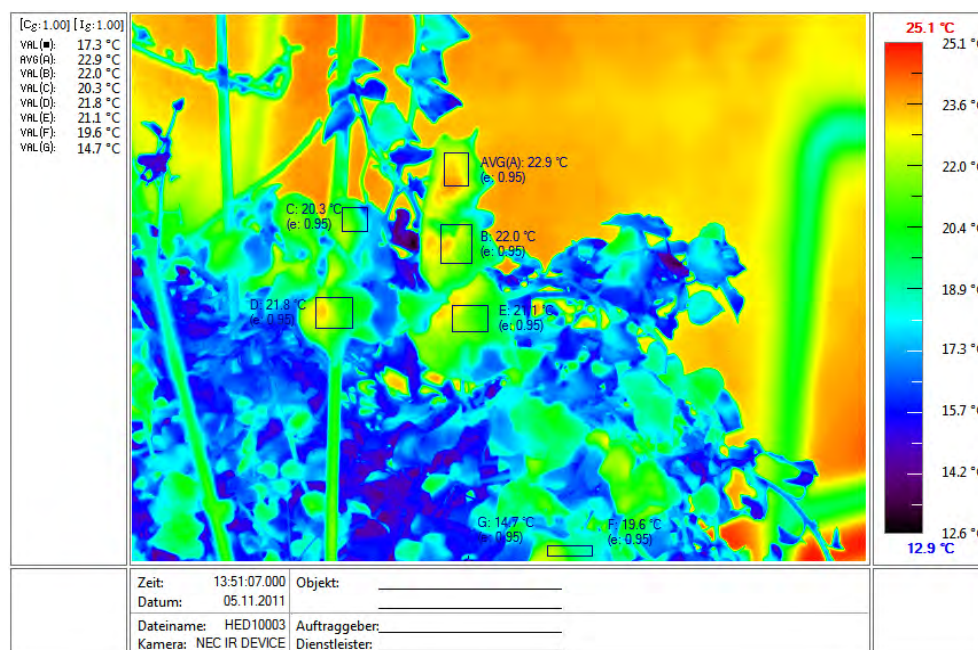


Abb. 120: Temperaturverlauf nach 8 Minuten, *Hedera helix*, 05.11.2011

Ergebnisse

Nach 20 Minuten haben die Referenzblätter A und B, 23,5°C und 22,4°C. Die abgetrennten Blätter C, D und E liegen im Temperaturbereich 20 bis 21,6°C. Die nassen Referenzblätter F und G liegen bei 16,2 und 19,2°C. Somit kann nach JONES gesagt werden (LEINONEN und JONES 2004), dass die Referenzblätter in diesem Fall tatsächlich die Temperaturober- und Untergrenze bilden, die restlichen Temperaturbereiche liegen dazwischen (Abb. 121).

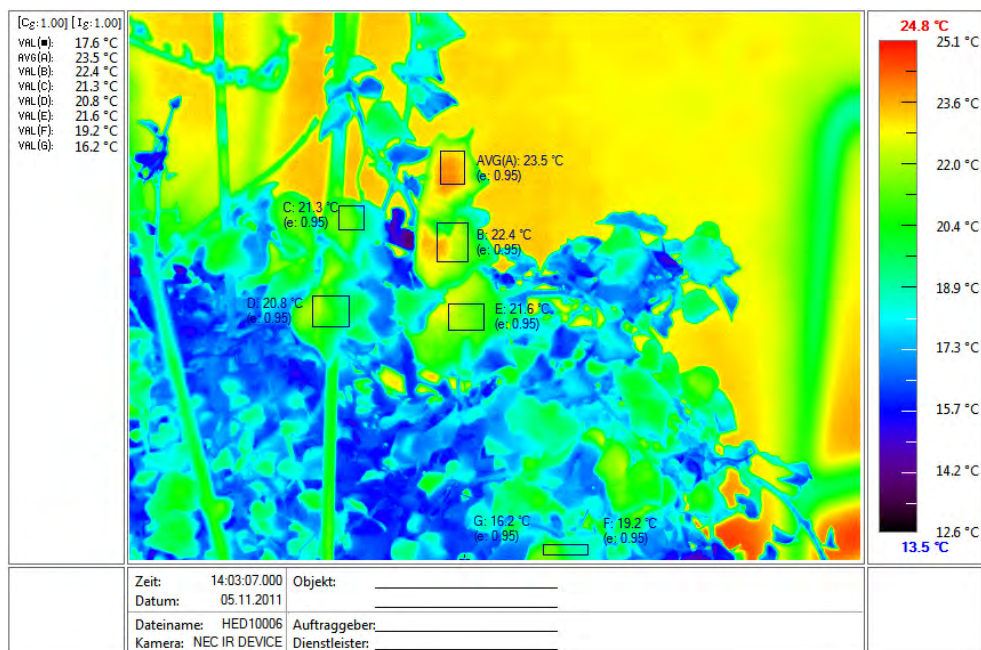


Abb. 121: Temperaturverlauf nach 20 Minuten, *Hedera helix*, 05.11.2011

Nach 28 Minuten (Abb. 122) zeigen die Versuchsblätter folgende Temperaturen. A hat 21,7°C, B 20,8°C, C 20,2°C, D 19,6°C, E 20,4°C, F 18,1°C und G 15,9°C. Im Vergleich zu der Aufnahme die nach 20 Minuten gemacht wurde (Abb. 121), haben sich die Blätter wieder etwas abgekühlt, zeigen aber noch deutlich die kälteren Referenzen (F und G) und die wärmeren Blätter die mit Vaseline bestrichen wurden (A und B).

Ergebnisse

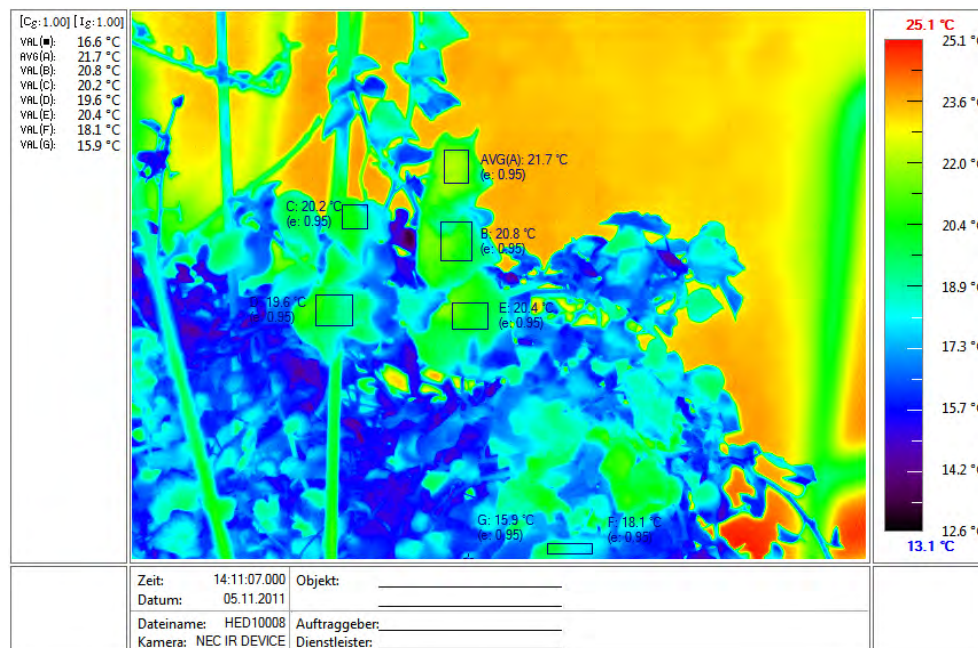


Abb. 122: Temperaturverlauf nach 28 Minuten, *Hedera helix*, 05.11.2011

Abbild 123 und 124 geben die Beziehung zwischen I_G und Leitwert (Porometer) nach LEINONEN und JONES wieder. Im Fall des Versuches vom 05.11.2011 sind die Korrelationen aber mit 22,6% und 27% gering.

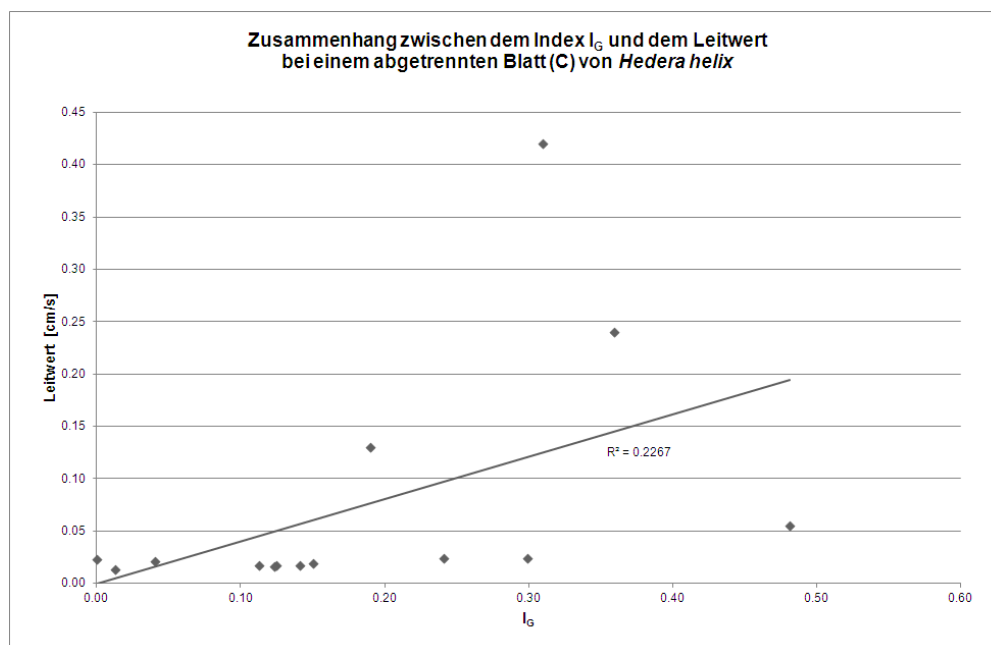


Abb. 123: I_G und Leitwert, abgetrenntes Blatt von *Hedera helix*, 05.11.2011

Ergebnisse

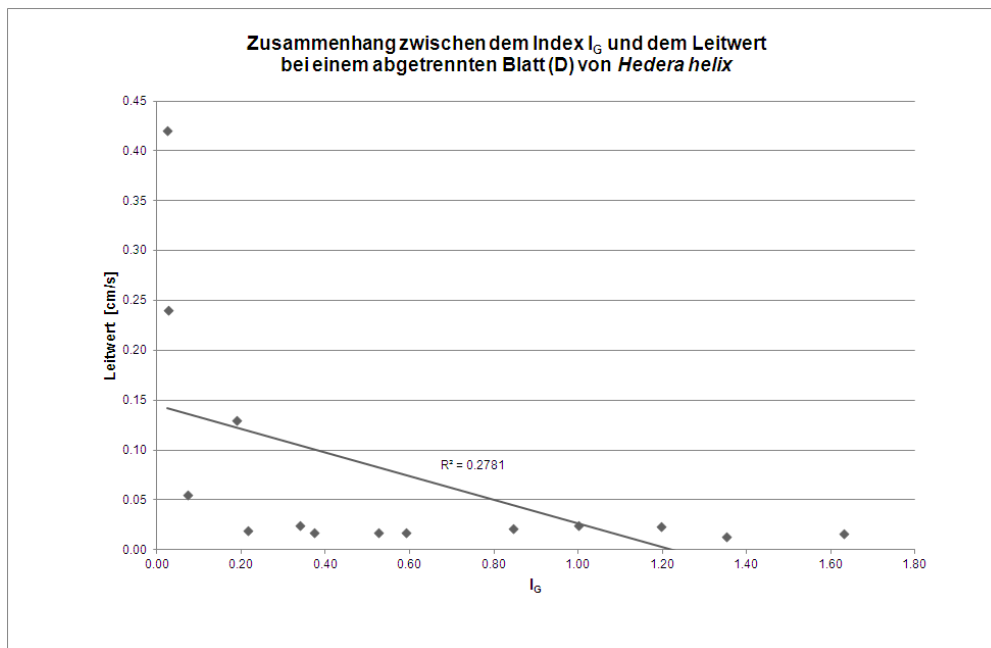


Abb. 124: I_G und Leitwert, abgetrenntes Blatt von *Hedera helix*, 05.11.2011

Tabelle 14 fasst die Temperaturen des Versuches zusammen. Dabei ist zu erkennen, dass die Temperaturschwankungen sich mit 1 bis 2°C bei den Blättern A und B eher in Grenzen halten. Bei den Blättern C bis E kommt es zu größeren Temperaturunterschieden, die nassen Referenzen sind am kühlssten.

Zeit	Blattbezeichnung, Blattzustand, Blatttemperatur [°C]						
	A	B	C	D	E	F	G
	trockene Referenz	trockene Referenz	abgetrennt	abgetrennt	abgetrennt	nasse Referenz	nasse Referenz
13:43:18	24.1	21.8	25.6	22.5	20.3	17.2	13.2
13:51:07	22.9	22.0	20.3	21.8	21.1	19.6	14.7
14:03:07	23.5	22.4	21.3	20.8	21.6	19.2	16.2
14:11:07	21.7	20.8	20.2	19.6	20.4	18.1	15.9

Tab. 14: Temperaturverlauf der Versuchsblätter bei *Hedera helix*, 05.11.2011

Werden die Temperaturverläufe als Kurven dargestellt ergibt sich, wie aus Abb. 125 ersichtlich, dass sich die Temperaturen der Versuchsblätter zwischen den Temperaturen der Referenzblätter bewegen. Die Referenzblätter begrenzen somit als oberer und unterer Grenzwert die Temperaturskala der Versuchsblätter.

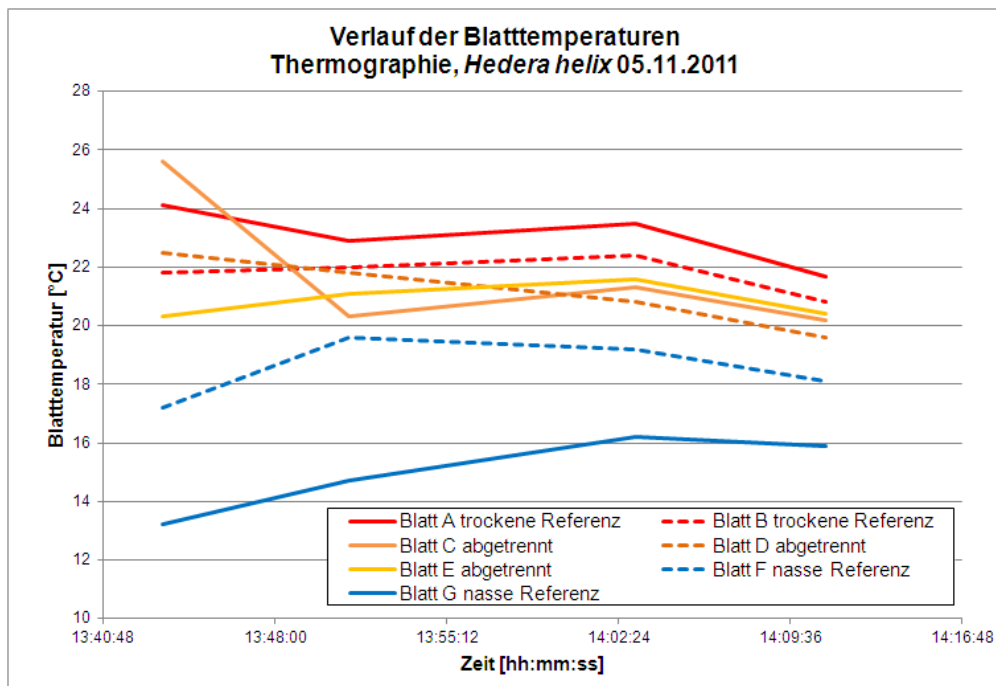


Abb. 125: Temperaturverlauf der Versuchsblätter bei *Hedera helix*, 05.11.2011

7.5.2 Versuch vom 06.11.2011 *Polygonum aubertii*:

4 Blätter wurden wie folgt gekennzeichnet. Blatt A = nasse Referenz, Blatt B = trockene Referenz (Vaseline), Blatt C = abgetrennt, Blatt D = nicht abgetrennt. Eines wurde abgetrennt und wieder aufgehängt, das andere (Blatt D) wurde auf der Pflanze belassen.

Der Verlauf des Leitwertes des abgetrennten Blattes (Abb. 126) zeigt eine deutliche Abnahme, bis die Kurve schließlich verflacht, die Spaltöffnungen schließen und nur mehr der cuticuläre Anteil bleibt. Die Zacken der Messung entstehen durch die Vielzahl der durchgeführten Messungen und geben die Schwankungen am Standort wieder. Es wird ersichtlich, dass mit abnehmender Strahlung auch der Leitwert abnimmt, bei zunehmender Strahlung können die Spaltöffnungen aber aufgrund der fehlenden Wasserversorgung nicht mehr folgen und schließen.

Ergebnisse

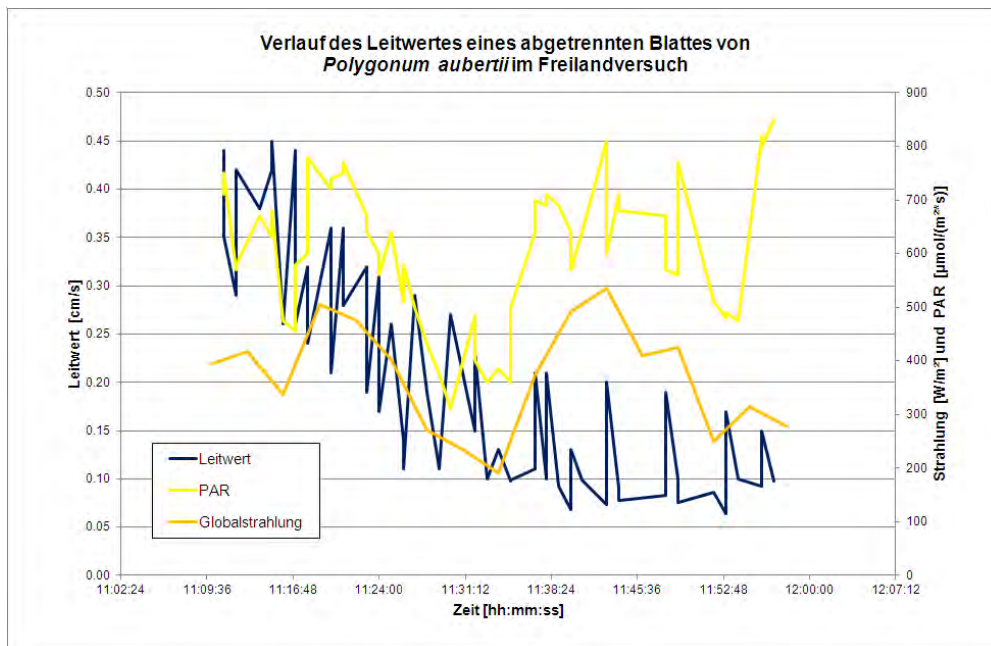


Abb. 126: Leitwertverlauf, abgetrenntes Blatt von *Polygonum aubertii*, 06.11.2011

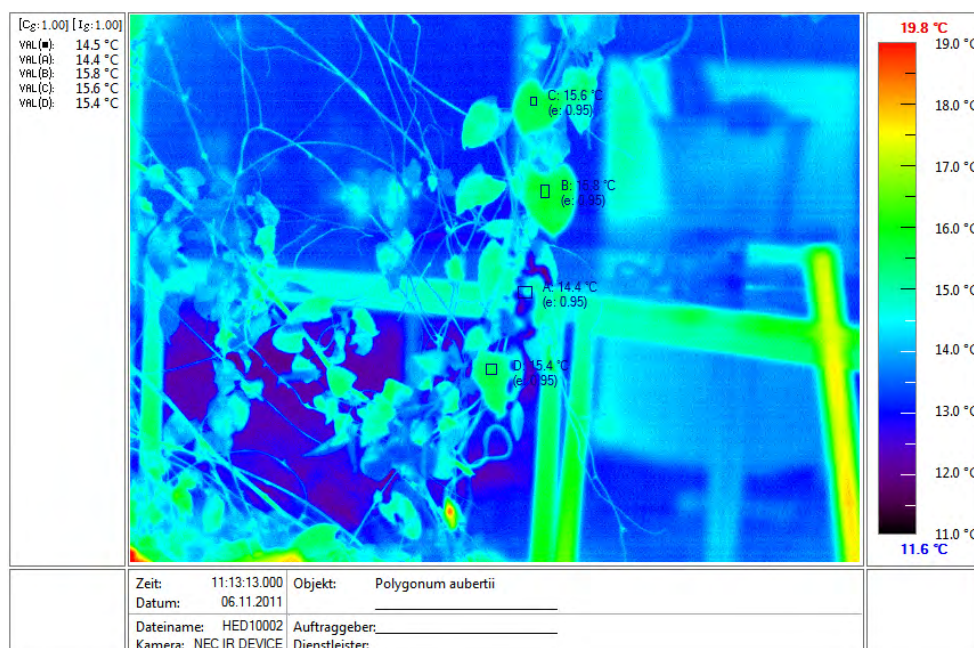


Abb. 127: Temperaturen, *Polygonum aubertii*, 06.11.2011

Das Thermogramm (Abb. 127) gibt die Temperaturbereiche zu Beginn des Versuches wieder. Um 11:13:13 liegen die Blattemperaturen bei ca. 16 °C, nur das nasse Referenzblatt liegt mit ca. 14 °C darunter. Der Unterschied zwischen Blatt C und D zur Umgebungstemperatur beträgt ca. 2 °C. Zwischen den Blättern C und D ist kein

Ergebnisse

Temperaturunterschied erkennbar.

Auch nach 3 Minuten (Abb. 128) ist kein nennenswerter Temperaturunterschied zwischen dem nicht abgetrennten (D) und dem abgetrennten Blatt (C) zu erkennen.

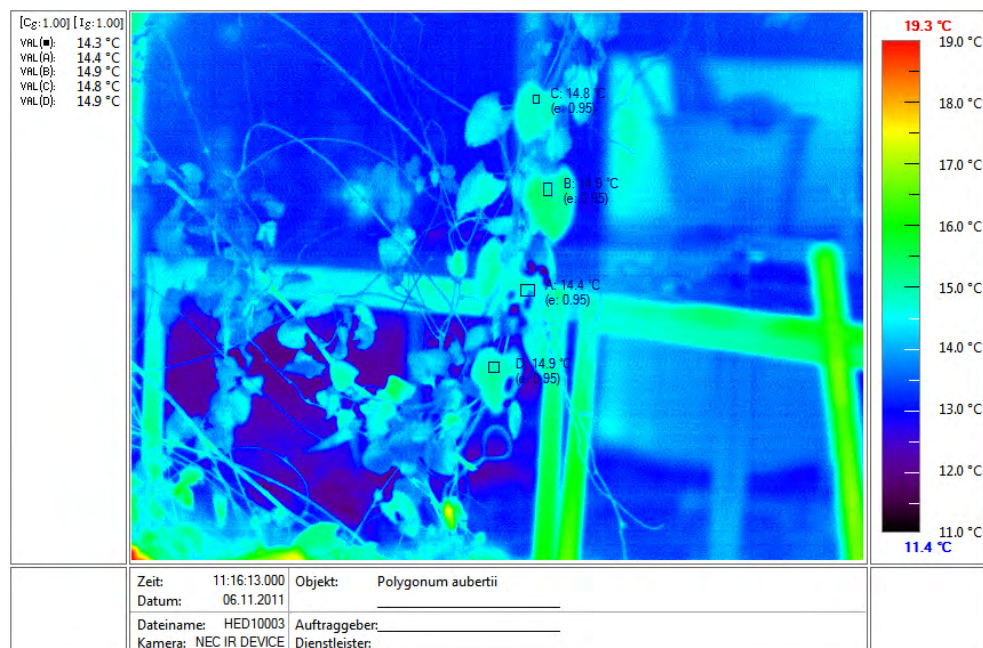


Abb. 128: Temperaturverteilung nach 3 Minuten, *Polygonum aubertii*, 06.11.2011



Abb. 129: Temperaturverteilung nach 6 Minuten, *Polygonum aubertii*, 06.11.2011

Ergebnisse

Nach 6 Minuten (Abb. 129) kommt es zu einer Erwärmung durch Sonnenstrahlung, am wärmsten ist dabei das trockene Referenzblatt B. Blatt C und D haben in etwa die gleiche Temperatur.

Gegen Ende des Versuches (Abb. 130) hat B 15,2°C, D 15,0°C, die anderen Blätter liegen bei ca. 14°C die Umgebungstemperatur liegt bei 13°C.

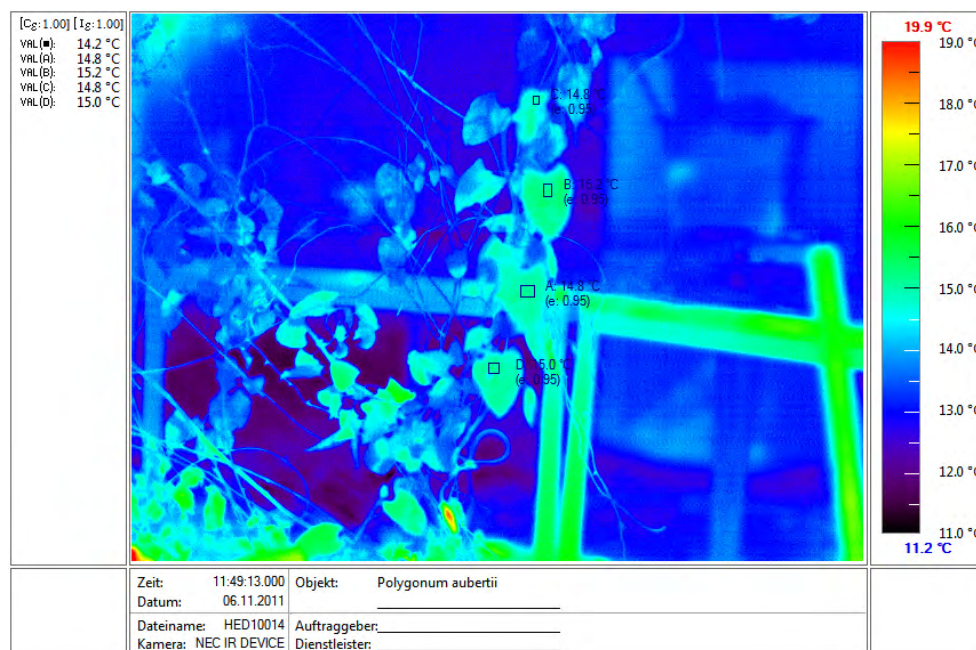


Abb. 130: Temperaturen nach 36 Minuten, *Polygonum aubertii*, 06.11.2011

Tabelle 15 gibt den Temperaturverlauf der Versuch- und Referenzblätter wieder. Auch diesmal sind die Temperaturschwankungen eher gering, die Werte aber, bedingt durch die Umgebungsparameter, allgemein niedriger. Abb. 131 gibt den Temperaturverlauf als Kurven wieder. Auch hier begrenzen die Referenzblätter den Temperaturbereich.

Zeit	Blattbezeichnung, Blattzustand, Blatttemperatur [°C]			
	A	B	C	D
	nasse Referenz	trockene Referenz	abgetrennt	nicht abgetrennt
11:13:13	14.4	15.8	15.6	15.4
11:16:13	14.4	14.9	14.8	14.9
11:19:13	14.9	16.3	15.7	15.7
11:49:13	14.8	15.2	14.8	15.0

Tab. 15: Temperaturverlauf der Versuchsblätter bei *Polygonum aubertii*, 06.11.2011

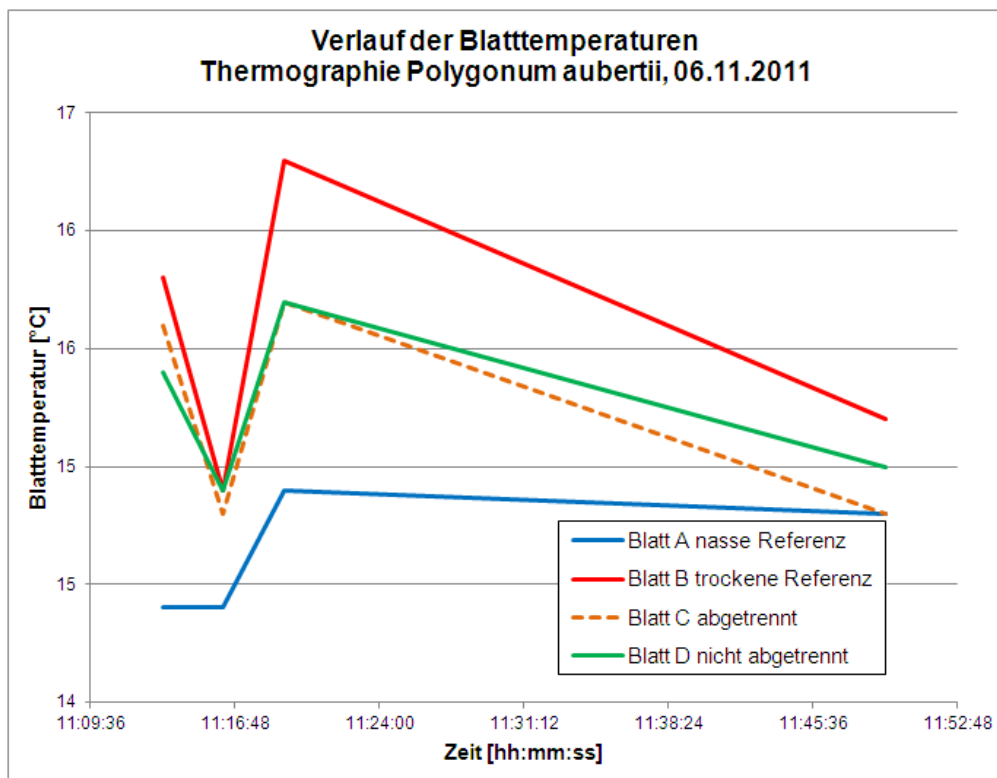


Abb. 131: Temperaturen der Referenz- und Versuchsblätter, *Polygonum aubertii*, 06.11.2011

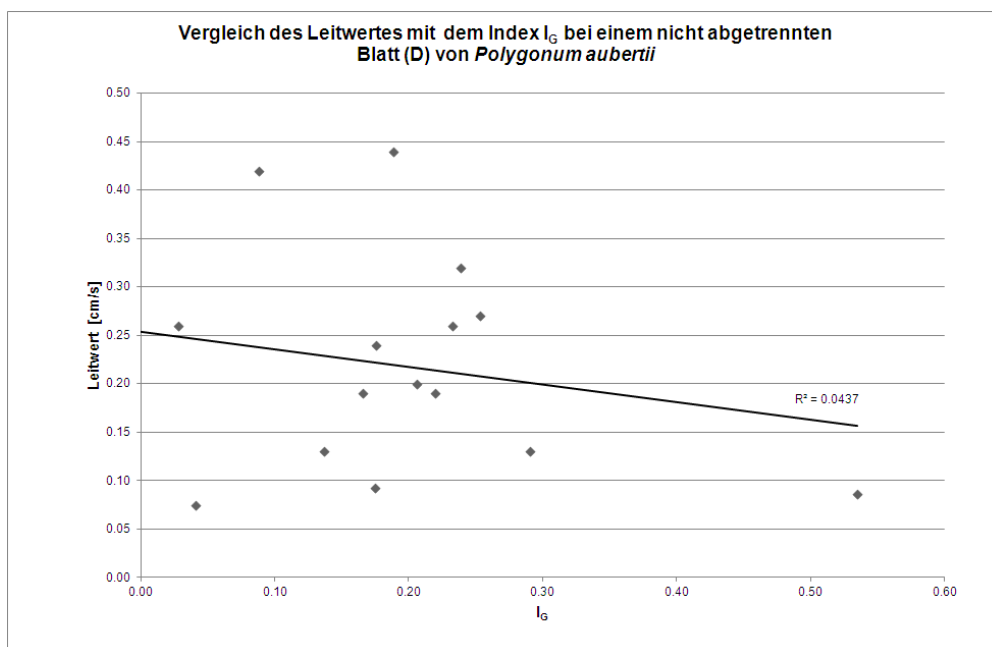


Abb. 132: Leitwert und I_G nicht abgetrenntes Blatt, *Polygonum aubertii*, 06.11.2011

Die bei der Versuchsreihe mit *Polygonum aubertii* herrschenden Umweltbedingungen sind aus den Blatttemperaturen sowie aus den Korrelationen mit den Porometerwerten

Ergebnisse

ersichtlich.

Durch den Wind konnten die Blätter sich nicht richtig erwärmen, die Grenzschicht an der Blattunterseite wurde durch den Wind abgetragen und obwohl die Transpirationsraten beziehungsweise die Leitwerte relativ hoch waren, liegt nur ein sehr geringer Zusammenhang zwischen Leitwert und I_G von etwa 4,4% vor (Abb. 132). Das weil die Blätter die an der Pflanze hängen ganz andere Umgebungsbedingungen haben als das Blatt welches in die Porometerklemme gegeben wird.

Obwohl das porometrierte Blatt zwischen den Messungen den gleichen Umweltbedingungen exponiert wird, wie die Blätter an der Pflanze, reicht die kurze Messzeit in der Messkammer unter solchen Umweltbedingungen anscheinend aus, um eine Änderung des Verhaltens der Spaltöffnungen hervorzurufen. Dies wird auch durch die Ergebnisse des zweiten Blattes bestätigt, auch hier liegt die Korrelation zwischen I_G und Leitwert in einem sehr niederen Bereich, bei 6,6% (Abb. 133).

Um also gute Zusammenhänge zu erhalten, müssen die Umgebungsparameter während der Versuche ziemlich konstant bleiben.

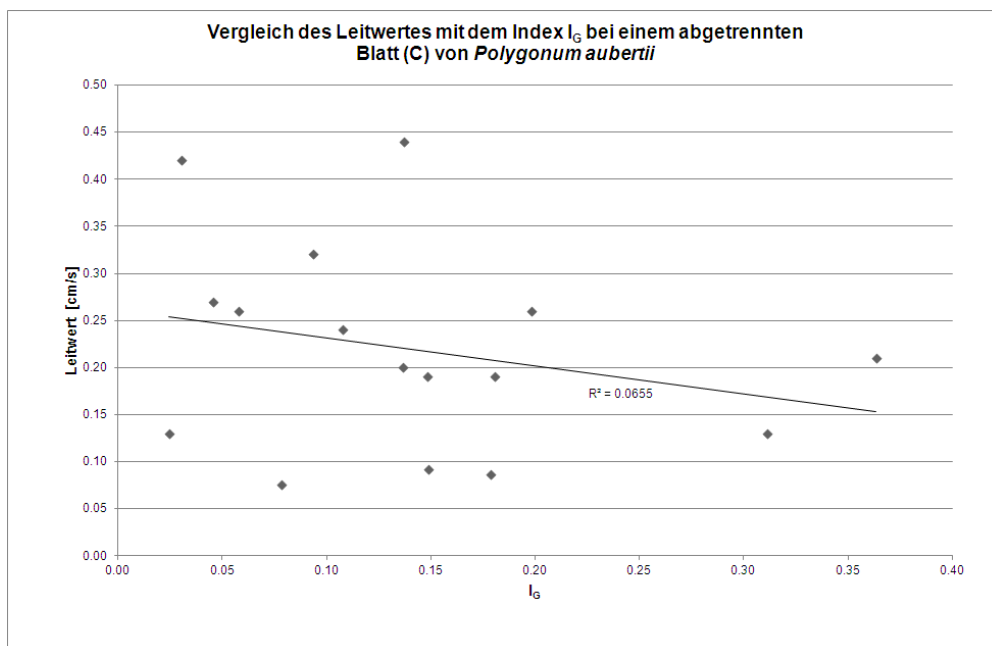


Abb. 133: Leitwert und I_G abgetrenntes Blatt, *Polygonum aubertii*, 06.11.2011

Ergebnisse

Betrachtet man den Zusammenhang zwischen dem CWSI (Crop Water Stress Index) und dem Leitwert (Abb. 134 und 135) so gibt sich ein ähnliches Bild wie bei den Index I_G und dem Leitwert. Der CWSI und der Leitwert haben keine lineare Beziehung zueinander sondern eine exponentielle. Mit zunehmendem CWSI verringert sich der Leitwert, bedingt durch das Schließen der Spaltöffnungen. Bedingt durch schwankende Umweltparameter, werden die Zusammenhänge zwischen CWSI und dem Leitwert geringer sein.

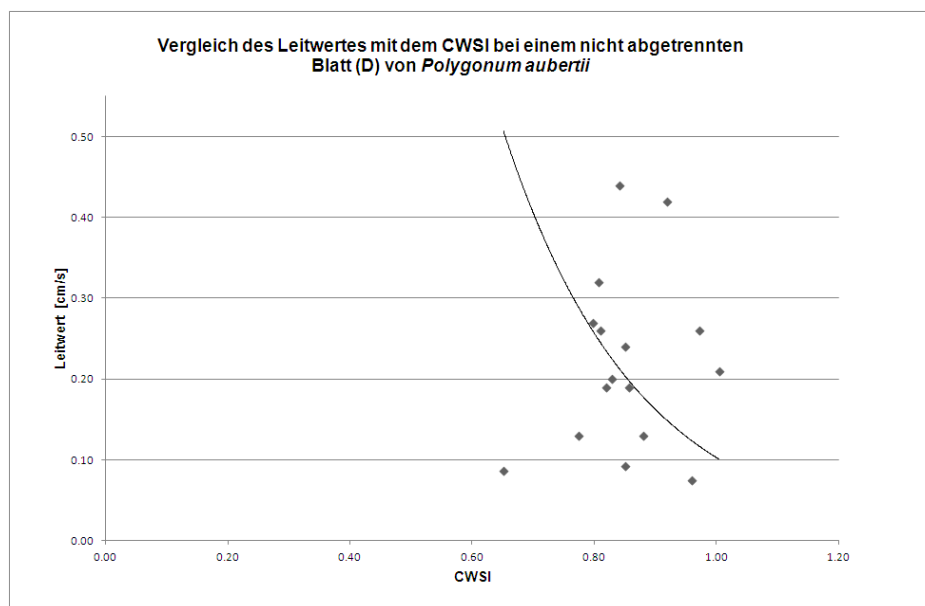


Abb. 134: Leitwert und CWSI nicht abgetrenntes Blatt, *Polygonum aubertii*, 06.11.2011

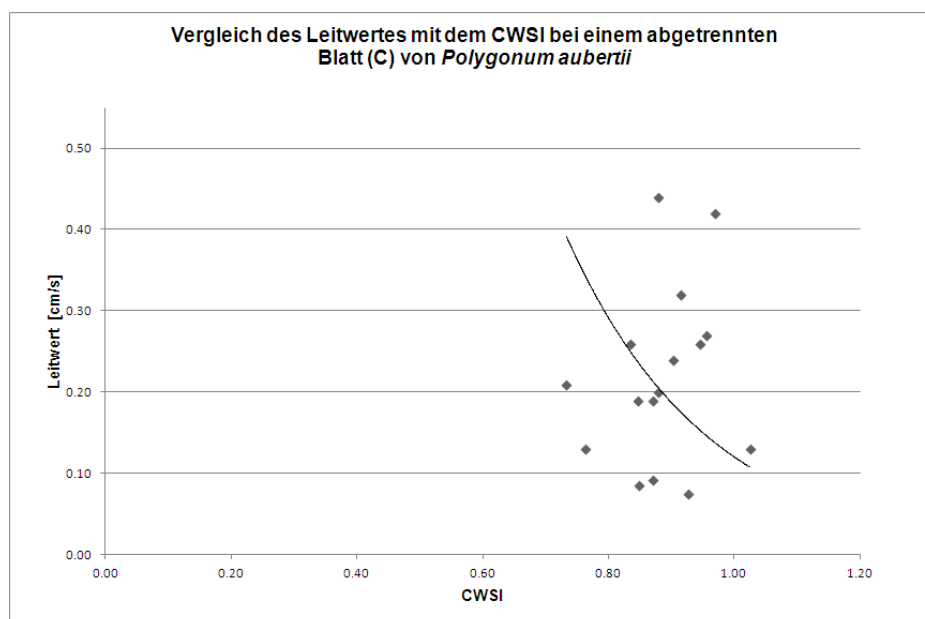


Abb. 135: Leitwert und CWSI abgetrenntes Blatt, *Polygonum aubertii*, 06.11.2011

7.5.3 Versuch vom 06.11.2011 *Hedera helix*:

Für diese Versuchsreihe wurden 6 Blätter gekennzeichnet. Dabei wurden wie schon bei den vorhergehenden Versuchen die abgetrennten Blätter mit Krokodilklemmen wieder an der Pflanze (an der Entnahmestelle) befestigt.

Blatt A = abgetrennt, Blatt B = nicht abgetrennt, Blatt C = nicht abgetrennt, Blatt D = abgetrennt, Blatt E = trockene Referenz (Vaseline), Blatt F = nasse Referenz.

Die Abbilder 136 bis 142 geben den Messverlauf des zweiten Versuches vom 06.11.2011 wieder. Diesmal wurde wieder der Topffeu für die Versuche verwendet, und um etwas Windschutz zu haben wurde der Versuch in einem Baucontainer bei offen Türen durchgeführt.

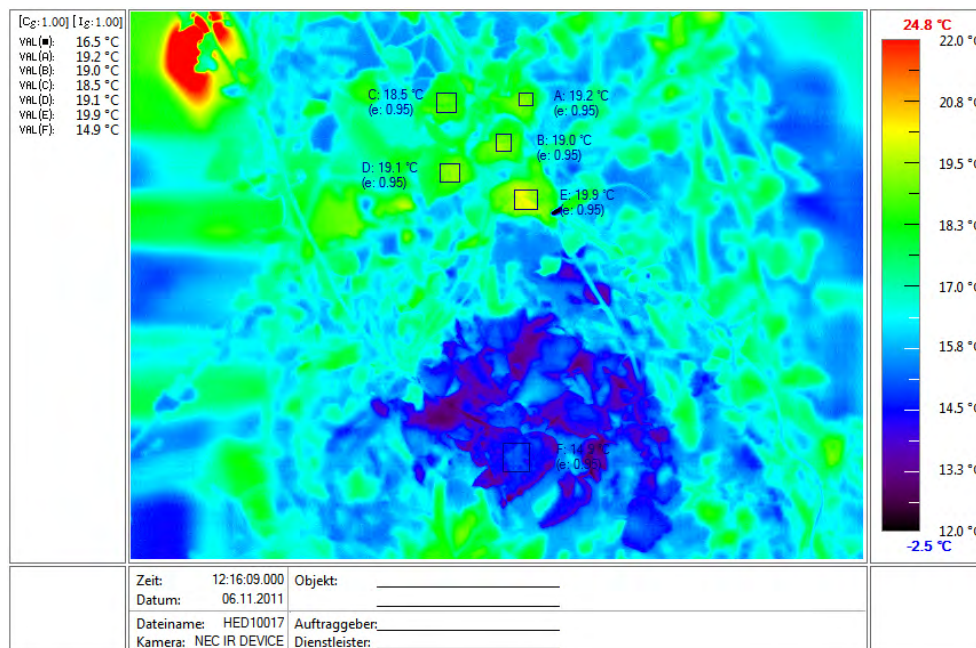


Abb. 136: Temperaturen zu Versuchsanfang, *Hedera helix*, 06.11.2011

Ergebnisse

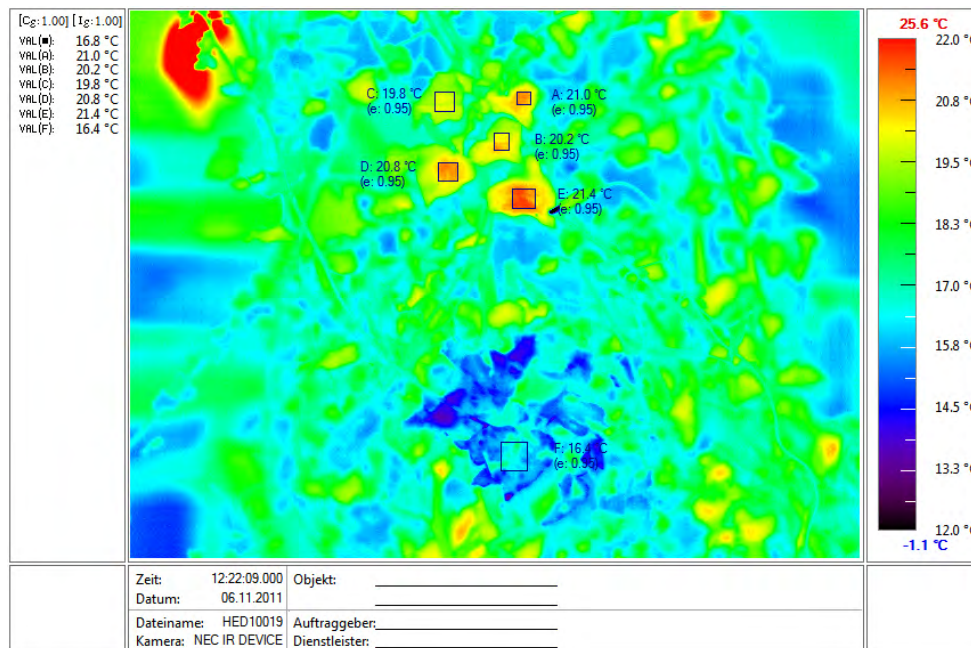


Abb. 137: Temperaturen nach 6 Minuten, *Hedera helix*, 06.11.2011

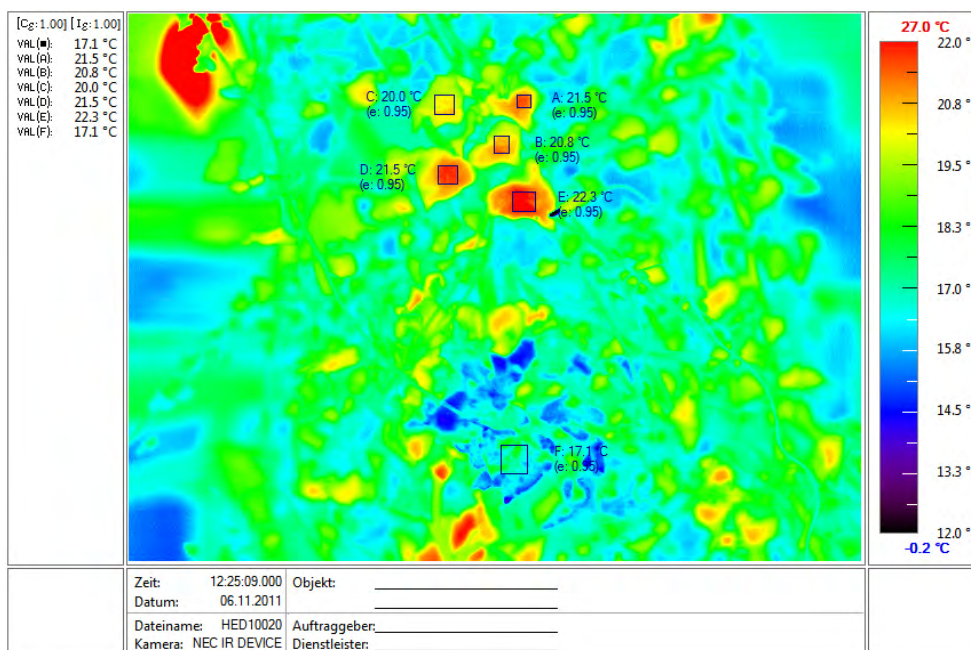


Abb. 138: Temperaturen nach 9 Minuten, *Hedera helix*, 06.11.2011

Ergebnisse

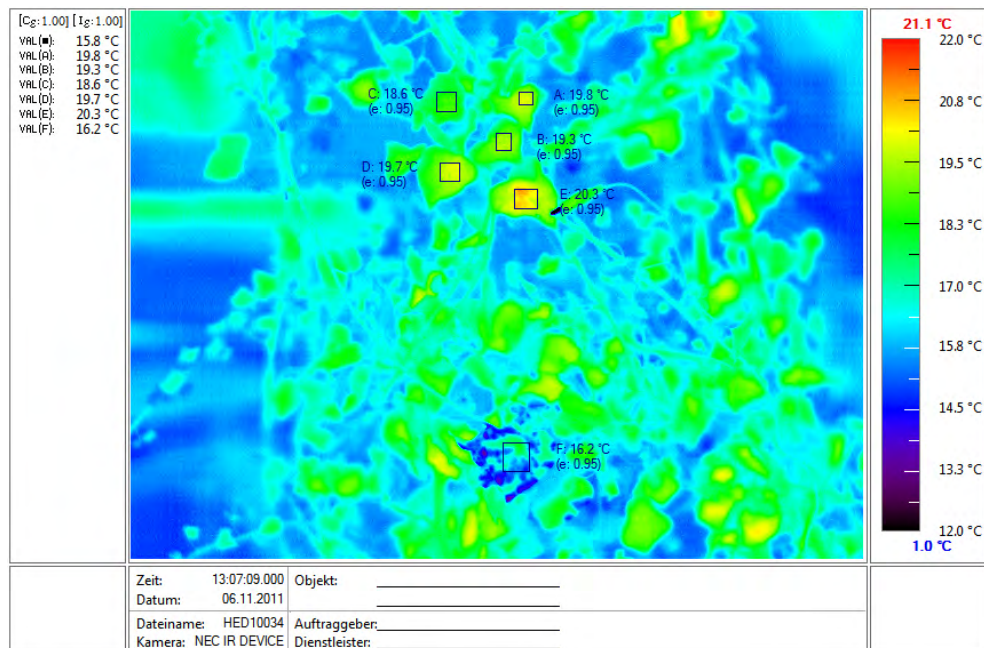


Abb. 139: Temperaturen nach 51 Minuten, *Hedera helix*, 06.11.2011

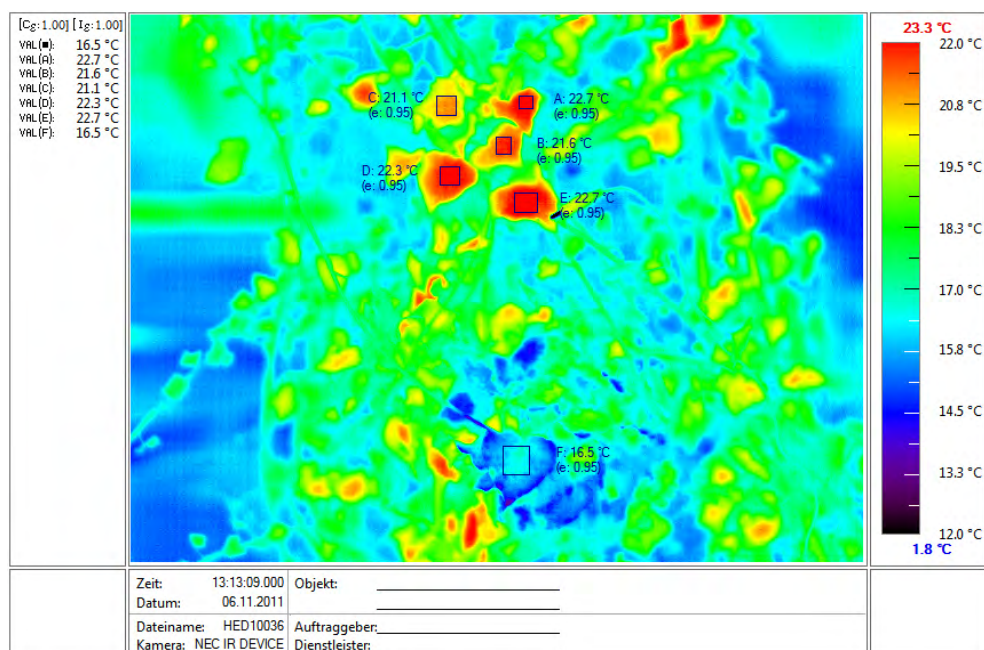


Abb. 140: Temperaturen nach 57 Minuten, *Hedera helix*, 06.11.2011

Ergebnisse

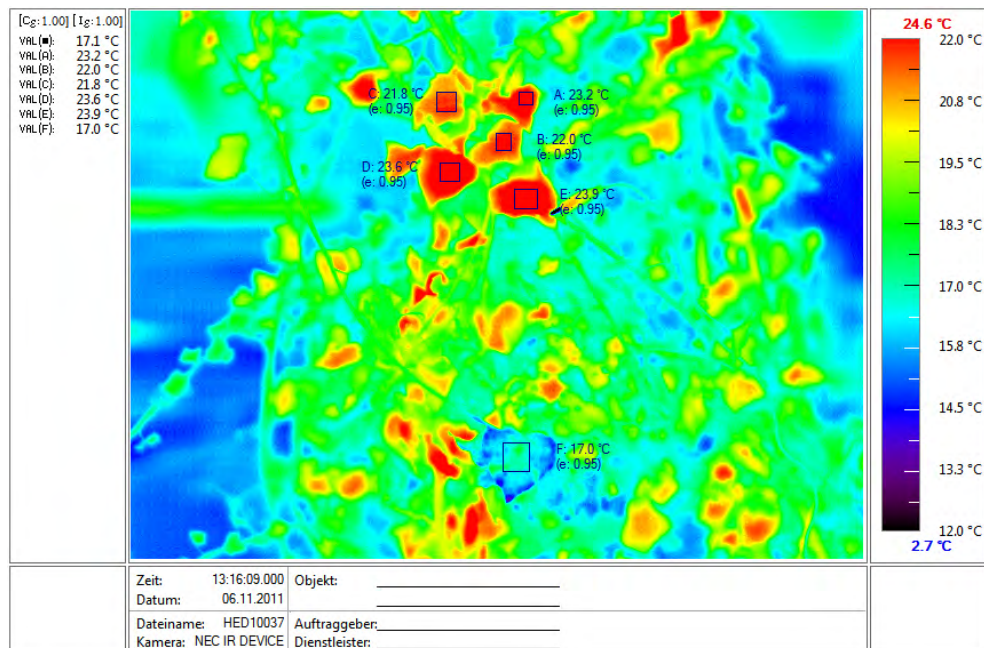


Abb. 141: Temperaturen nach 60 Minuten, *Hedera helix*, 06.11.2011

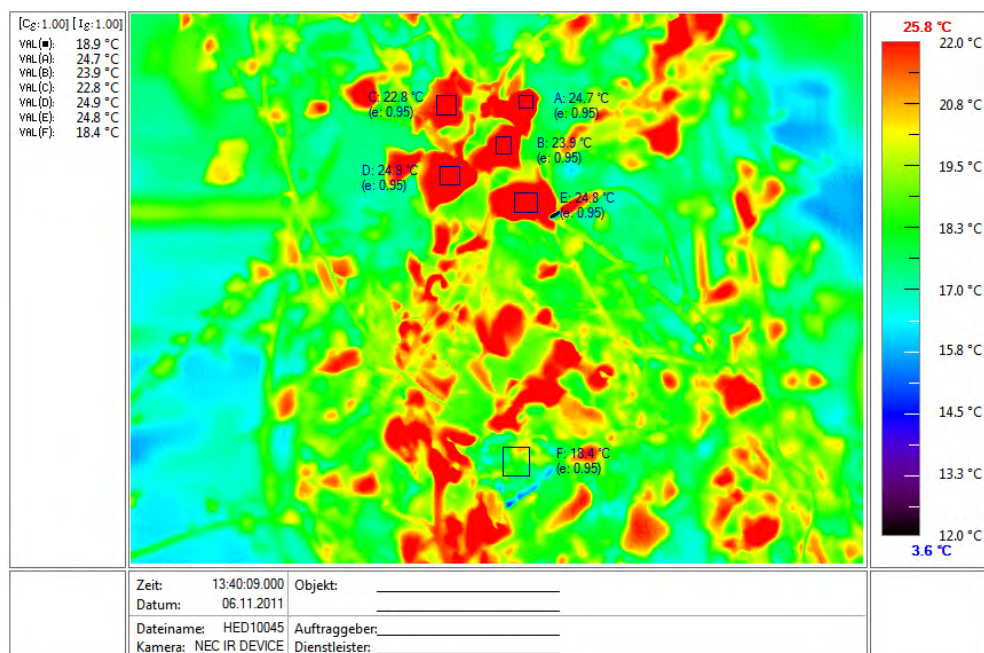


Abb. 142: Temperaturen nach 84 Minuten, *Hedera helix*, 06.11.2011

Ergebnisse

Tabelle 16 fasst die Temperaturänderungen in Verlauf des Versuches vom 06.11.2011 mit *Hedera helix* zusammen.

Zeit	Blattbezeichnung, Blattzustand, Blatttemperatur [°C]					
	A	B	C	D	E	F
	abgetrennt	nicht abgetrennt	nicht abgetrennt	abgetrennt	trockene Referenz	nasse Referenz
12:16	19.2	19.0	18.5	19.1	19.9	14.9
12:22	21.0	20.2	19.8	20.8	21.4	16.4
12:25	21.5	20.8	20.0	21.5	22.3	17.1
13:07	19.8	19.3	18.6	19.7	20.3	16.2
13:13	22.7	21.6	21.1	22.3	22.7	16.5
13:16	23.2	22.0	21.8	23.6	23.9	17.0
13:40	24.7	23.9	22.8	24.9	24.8	18.4

Tab. 16: Temperaturverlauf des Versuches vom 06.11.2011 mit *Hedera helix*

Aus Abbildern 143 bis 146 wird klar, dass es einen Unterschied zwischen der Reaktion eines abgetrennten Blattes und eines nicht abgetrennten Blattes gibt, auch wenn das abgetrennte Blatt den gleichen Umweltbedingungen exponiert wird, wie das nicht abgetrennte. Das wird besonders aus Abbild 146 deutlich, welches gleichzeitig auch die Annahme von JONES bestätigt, dass die Referenzblätter die beiden Temperaturextrema darstellen. Das trockene Referenzblatt hat die höchste Temperatur, das nasse die geringste, die anderen Versuchsblätter befinden sich dazwischen. Dabei kommt aber heraus, dass die abgetrennten Blätter mit ihrer Temperatur über den nicht abgetrennten Blättern liegen, die Kurven der zwei abgetrennten Blatttemperaturen nähern sich der Kurve der trockenen Referenz an. Die lebenden Blätter liegen beide darunter. Die Lufttemperatur liegt deutlich unter der feuchten Referenz und unter allen anderen Temperaturwerten siehe Abbild 147.

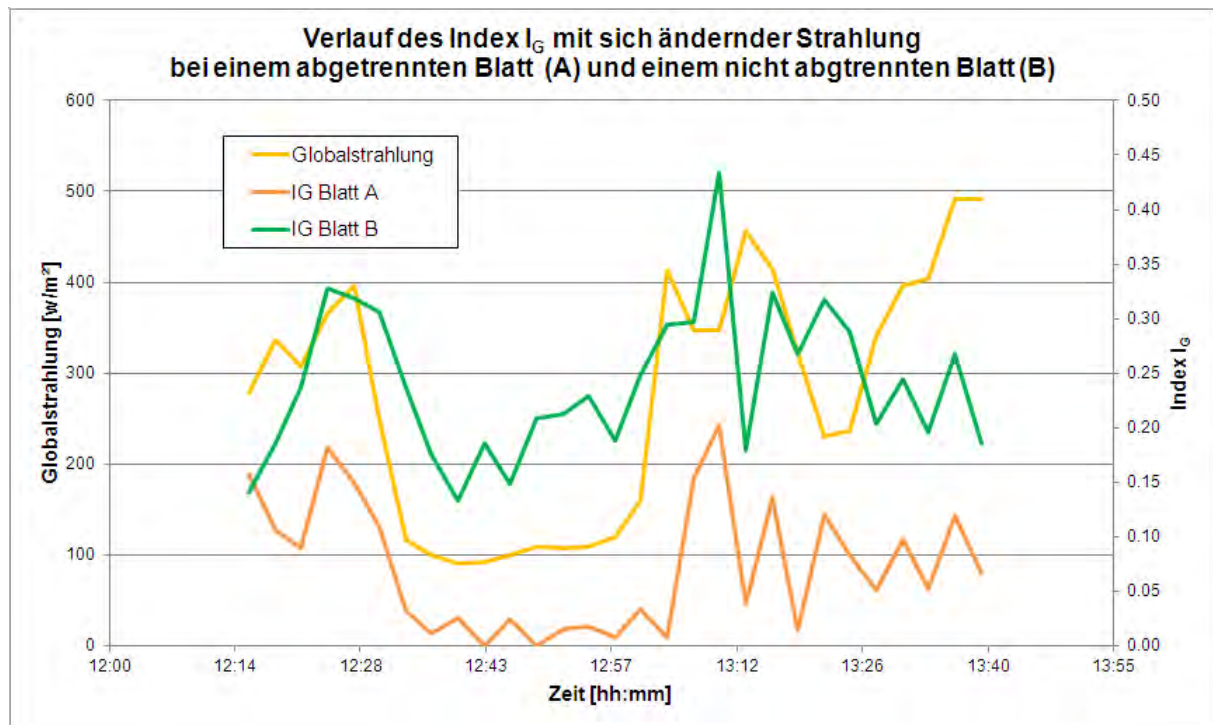


Abb. 143: Index I_G in Zusammenhang zur Strahlung, Hedera helix, 06.11.2011

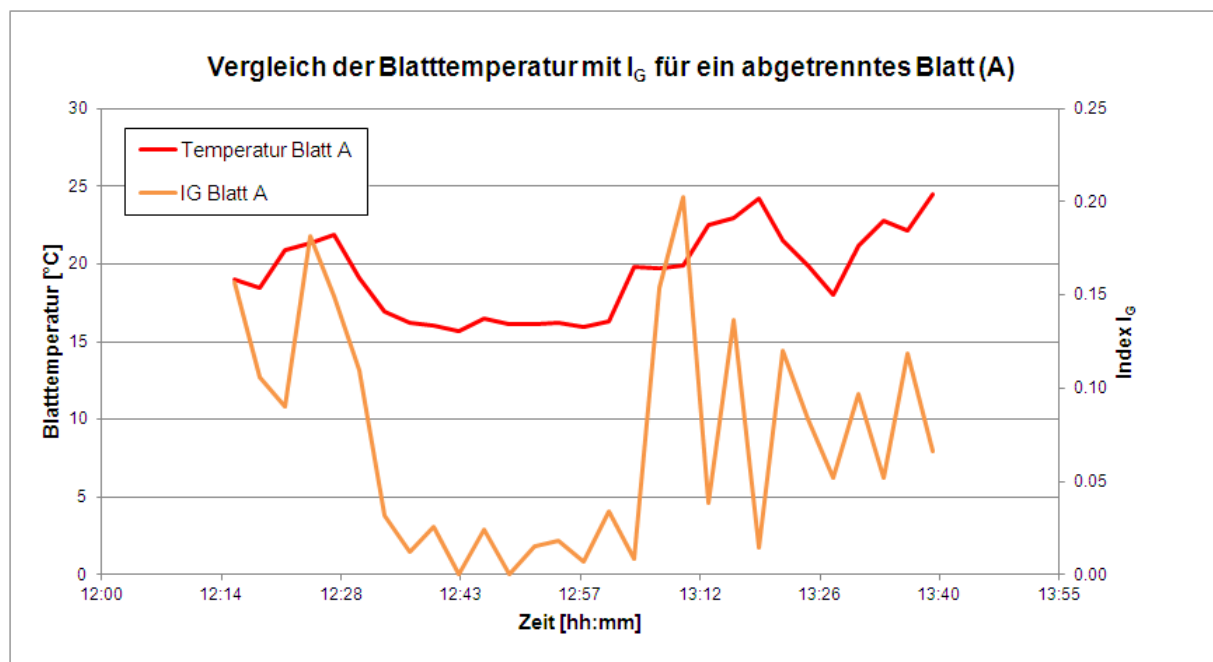


Abb. 144: Index I_G in Zusammenhang zur Blatttemperatur, abgetrenntes Blatt, Hedera helix, 06.11.2011

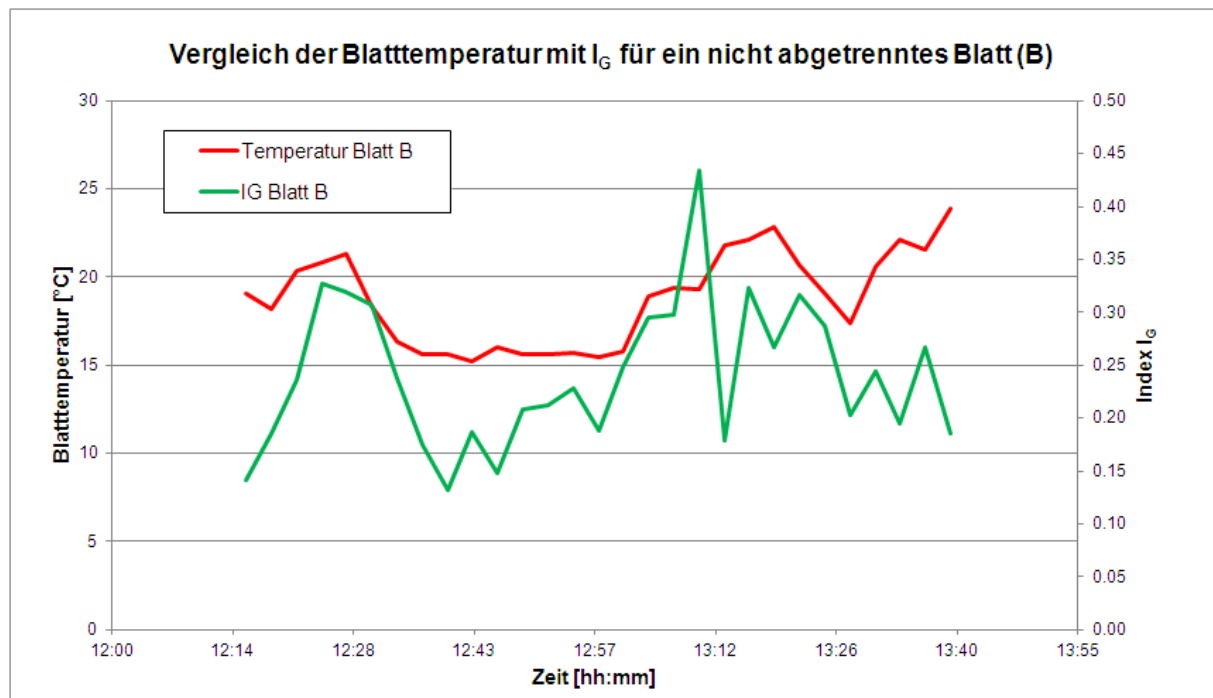


Abb. 145: Index I_G in Zusammenhang zur Blatttemperatur, abgetrenntes Blatt, Hedera helix, 06.11.2011

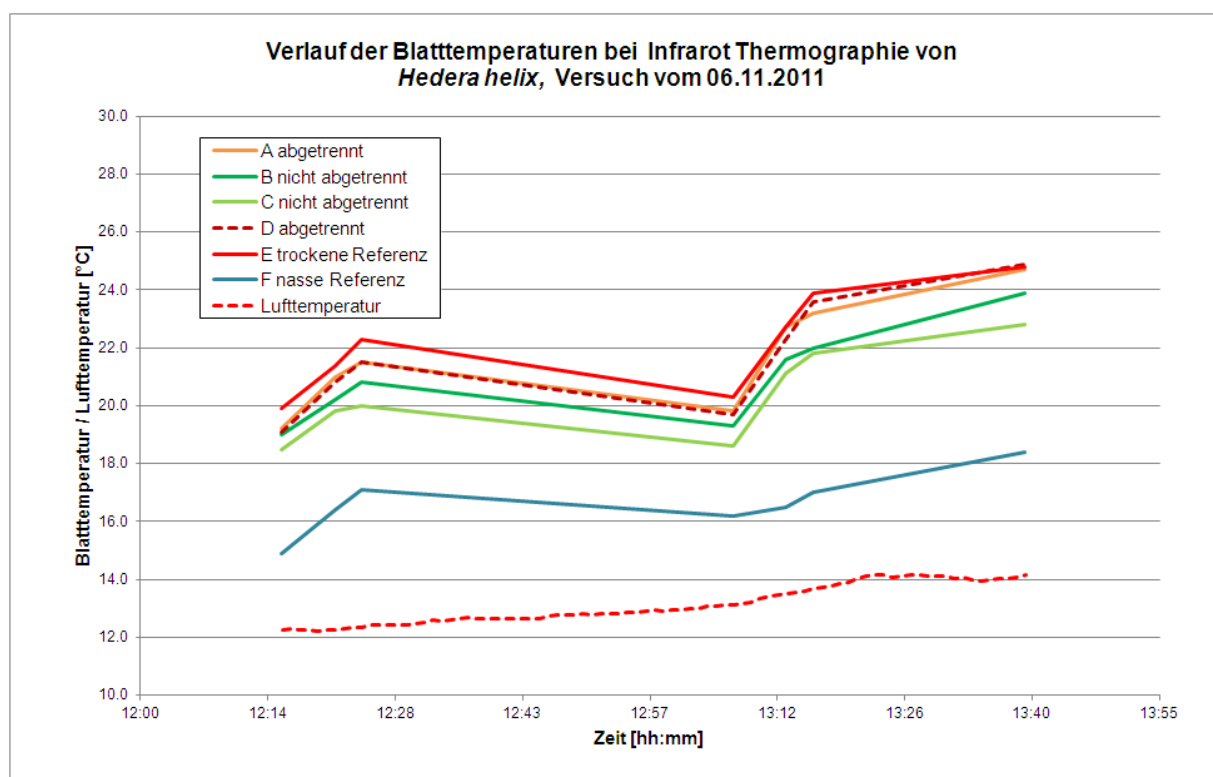


Abb. 146: Temperaturverlauf der Blätter bei Hedera helix am 06.11.2011

Ergebnisse

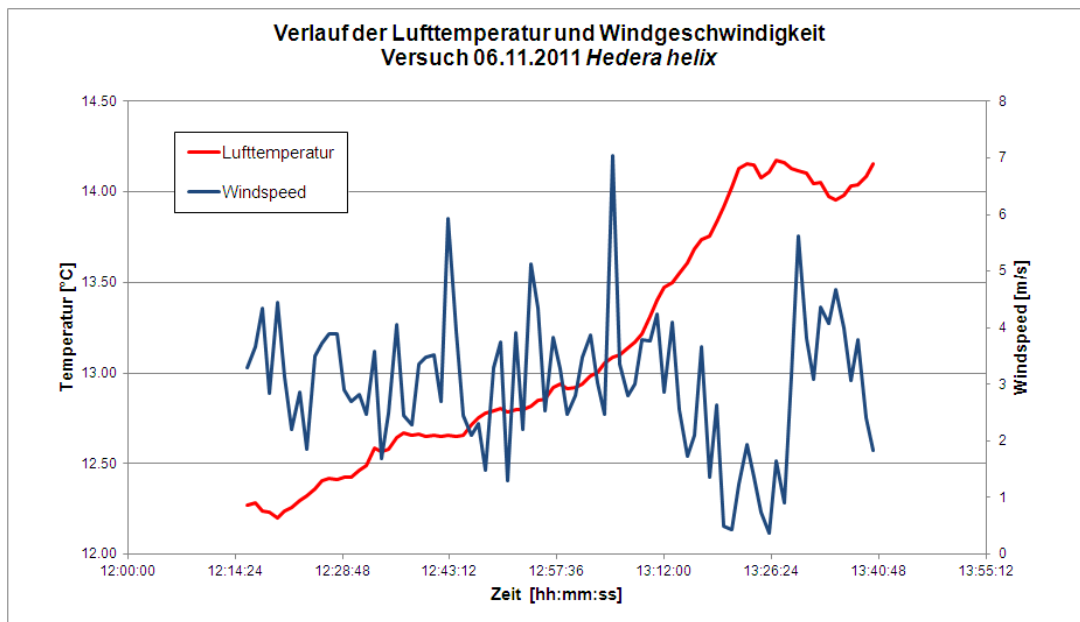


Abb. 147: Temperaturverlauf und Windgeschwindigkeit am 06.11.2011

Der Zusammenhang zwischen Leitwert und I_G kommt auch bei den Versuchen mit *Hedera helix* am 06.11.2011 nicht gut heraus, die Korrelationen sind gering bis negierbar (siehe Abb. 148 bis 153). Dies kann auf die Windstärken und stark wechselnden Umweltparameter (siehe Abb. 147) zurückgeführt werden.

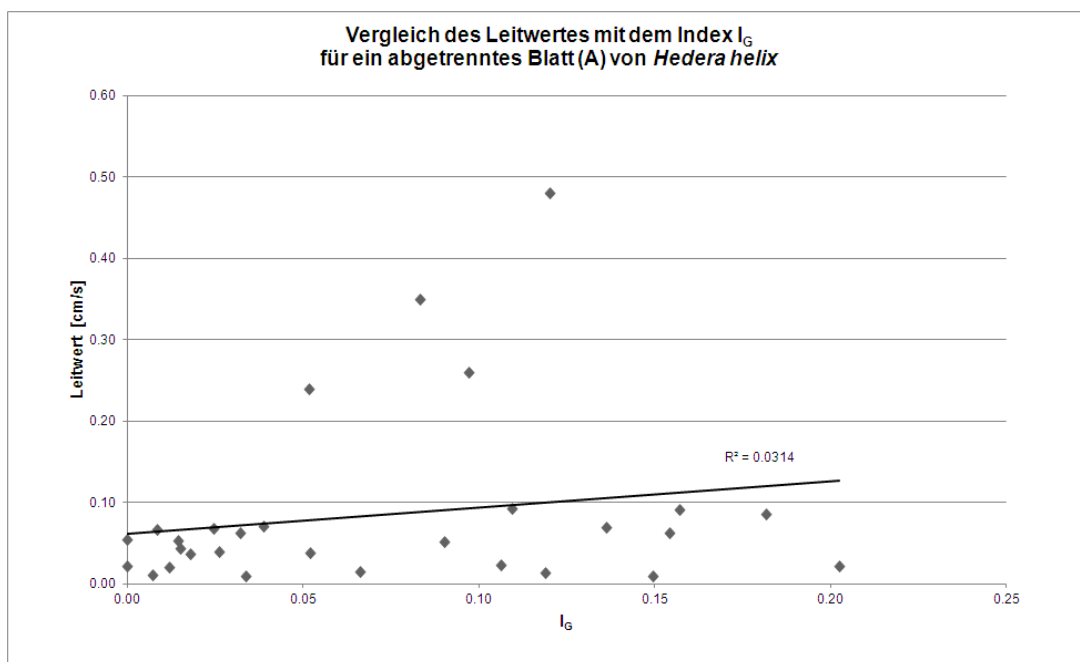


Abb. 148: Leitwert und Index I_G , *Hedera helix*, abgetrenntes Blatt, 06.11.2011

Ergebnisse

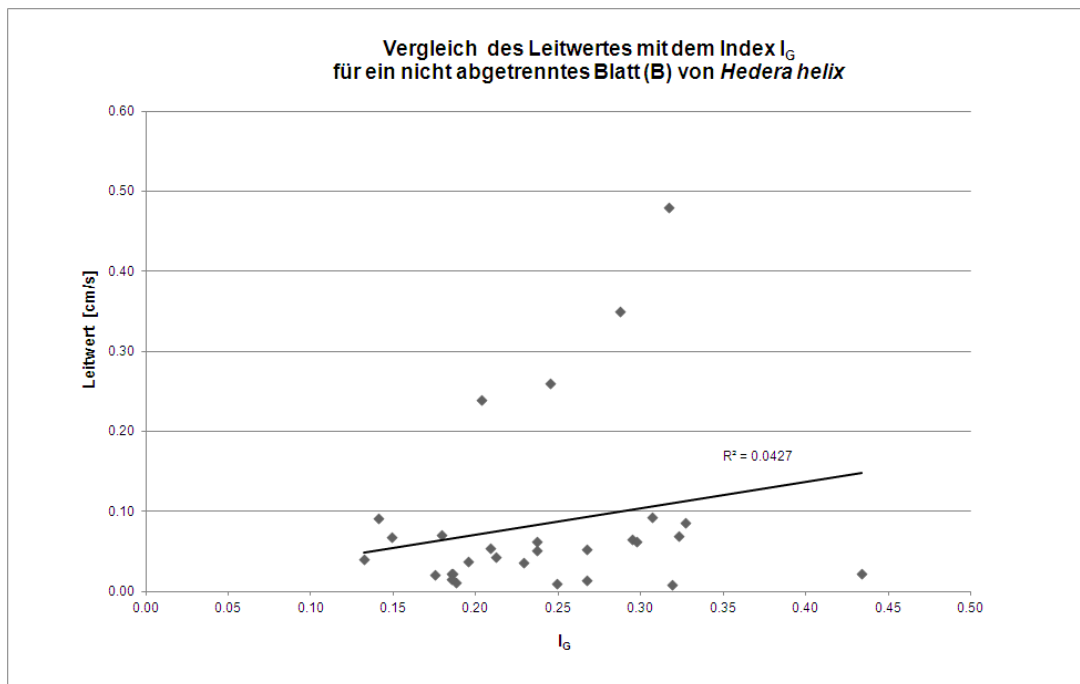


Abb. 149: Leitwert und Index I_G , *Hedera helix*, nicht abgetrenntes Blatt, 06.11.2011

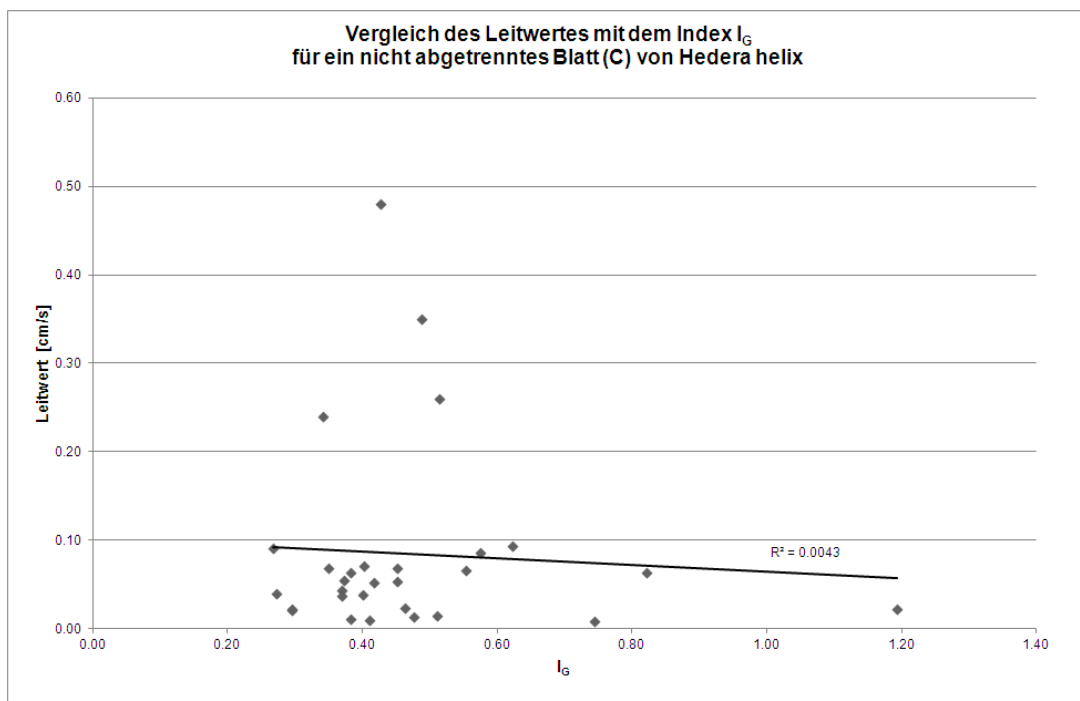


Abb. 150: Leitwert und Index I_G , *Hedera helix*, nicht abgetrenntes Blatt, 06.11.2011

Ergebnisse

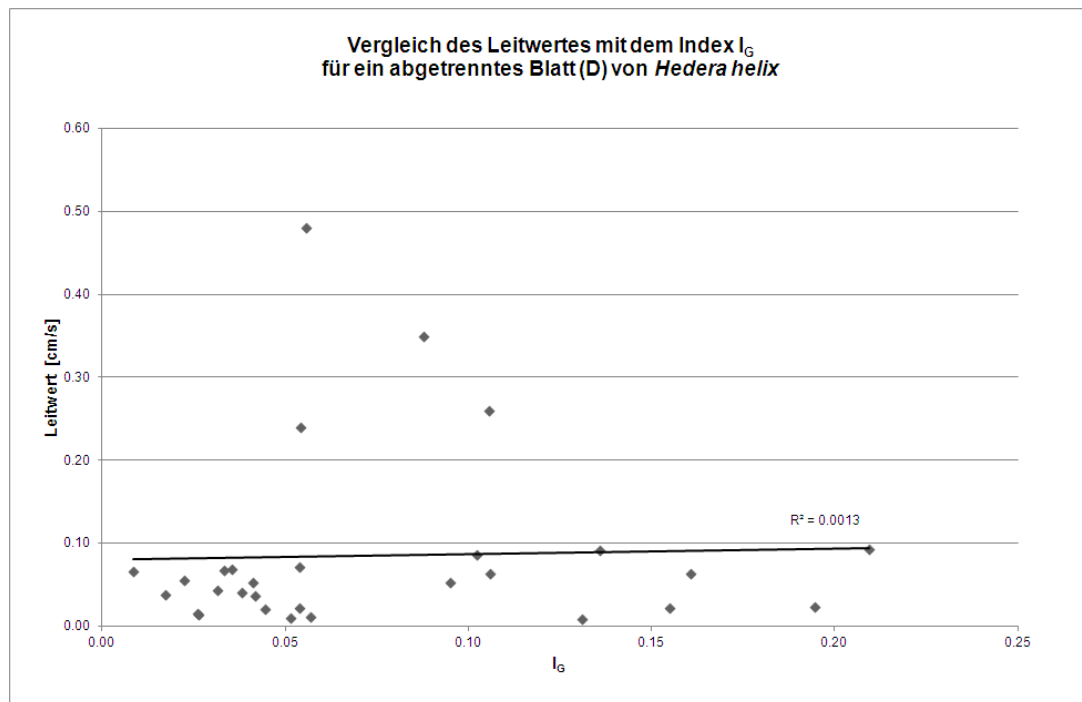


Abb. 151: Leitwert und Index I_G , *Hedera helix*, abgetrenntes Blatt, 06.11.2011

Bei den CWSI Werten (Abb. 152 und 153) kommen bessere Zusammenhänge zu Stande, diese sind aber aufgrund der erschwerten Bedingungen auch mit Vorsicht zu betrachten.

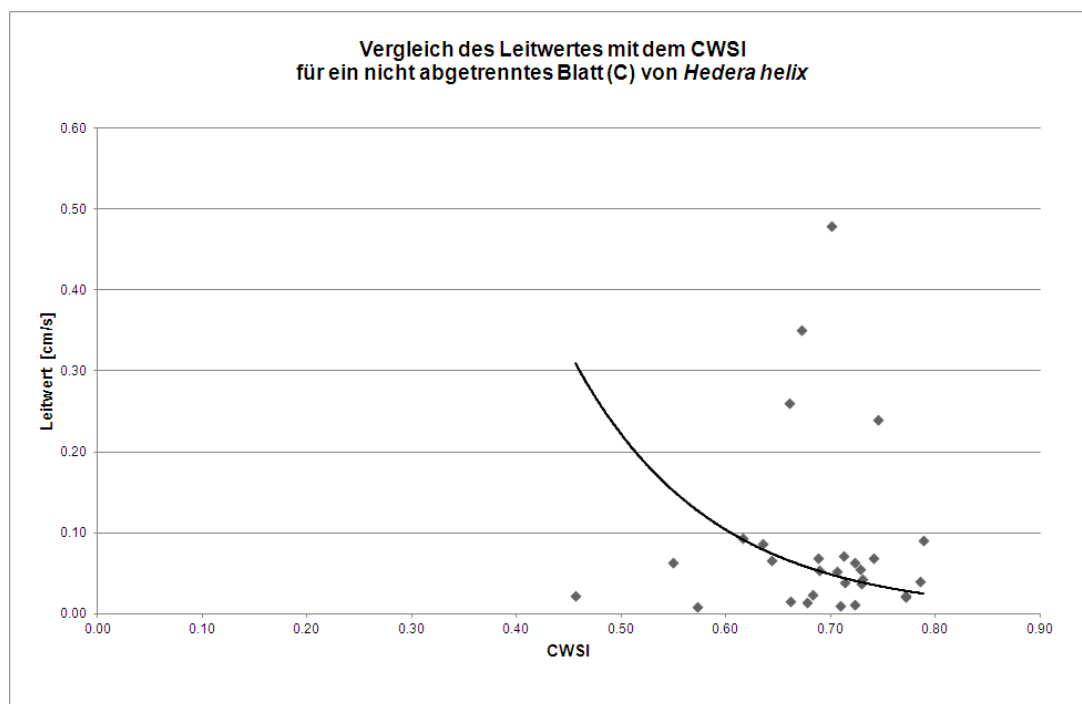
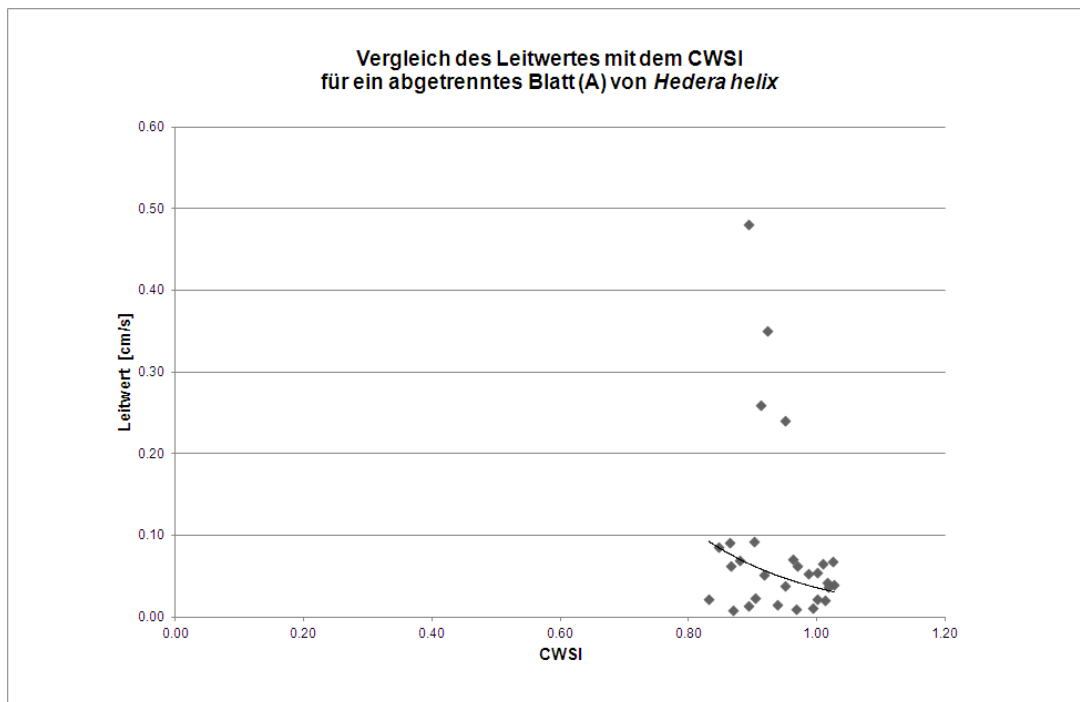


Abb. 152: Leitwert und Index CWSI, *Hedera helix*, nicht abgetrenntes Blatt, 06.11.2011

Ergebnisse



8. Diskussion

Es wäre zu einfach, die Frage nach der Vergleichbarkeit der drei beschriebenen Messmethoden mit „ja“ oder „nein“ zu beantworten. Dabei besteht die Gefahr, wichtige Aspekte und Argumente zu übersehen und ein vereinfachtes Bild darzustellen, ohne den eigentlichen Ursachen welche für oder gegen einen Vergleich sprechen auf den Grund zu gehen.

Die erste Frage die sich stellt, ist die nach den Vor- und Nachteilen der untersuchten Methoden.

Die STOCKER-Methode (1929) ist eine im Freiland relativ unkompliziert anzuwendende Methode.

Da nur ein Parameter gemessen wird, nämlich die Änderung des Blattgewichtes im Laufe der Zeit hängt die Genauigkeit der Messung von der Genauigkeit der Waage ab. Damit ergibt sich eine kurze Fehlerkette und wenige Fehlermöglichkeiten. Die Messung der Gewichtsänderung erfolgt als Differenzmessung und damit wirken sich mögliche Ungenauigkeiten der Waage nicht drastisch aus. Jedoch sind diese Ungenauigkeiten bei den in der Forschung verwendeten hochwertigen Waagen kein Thema.

Gegen die STOCKER-Methode (1929) spricht folgendes; die Waage reagiert gegenüber Wind und Erschütterungen empfindlich (siehe „Peaks“, zum Beispiel Versuch Nr. 1 vom 05.12.2008, Abb. 36). Diese machen bei einer Langzeitmessung, wie der angewendeten abgeänderten „Anwelk-Methode“ wenig aus, da ja genügend Werte zur Verfügung stehen, bei Einzelmessungen können solche „Peaks“ aber durchaus das Ergebnis verfälschen. Im Freiland ist daher ein Schutz der Waage vor Wind und Erschütterungen notwendig.

Das Wägen des Blattes kann sich auch dadurch als schwierig gestalten, dass sich die Messwerte am Anfang der Messung sehr schnell ändern. Wird das einzelne Blatt auf die Waage gelegt oder in ein Gestell gehängt (dies ist eher zu empfehlen) sinken die Werte

Diskussion

am Anfang erheblich, bis sich die Änderung verlangsamt.

Es sollten also nicht die ersten Werte der Wägung genommen werden, sondern immer gewartet werden, bis der Messwert sich nicht mehr so schnell ändert (siehe Seite 142).

Noch ein Einwand ist, dass das Abtrennen der Blätter für die Messung bei der Pflanze Stress verursacht. Durch das Abreißen der Wassersäule kann es zum IWANOFF-Effekt (LÖSCH 2001) kommen.

Dieser Effekt wird durch die unterschiedlichen Zellvolumina der Epidermis- und Schließzellen im Falle einer Turgorreduzierung im gesamten Blatt beziehungsweise im Epidermisverband hervorgerufen. Dabei ziehen die sich im Volumen verkleinernden Epidermis- und Nebenzellen die Schließzellen passiv auseinander. Somit kommt es, trotz der Turgorabnahme im Stomataapparat zu einem Öffnen der Schließzellen. Dieses Öffnen ist nur vorübergehend und tritt vielfach beim Abschneiden von Blättern auf, was zu erhöhten anfangs Transpirationswerten bei der STOCKER-Methode führen kann. Diese passive Veränderung der Spaltöffnungsweite ist nicht von Stoffwechselprozessen in den Schließzellen begleitet und betrifft primär die Wasserverhältnisse im Epidermisverband (LÖSCH 2001).

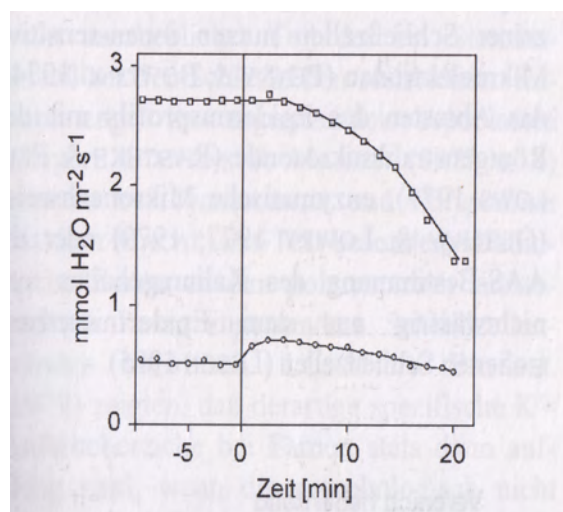


Abb. 154: Transpiration der Blattunter- und Oberseite bei *Gossypium hirsutum*. Die Nulllinie kennzeichnet den IWANOFF-Effekt. (LÖSCH 2001)

Aus Abbild 154 wird der IWANOFF-Effekt ersichtlich (LÖSCH 2001). Die Versuche in Abbild 155 und Abbild 156 fangen mit einer relativ geringen Transpiration an (siehe auch Abb. 36 bis 52 in Kapitel 7.1), um dann anzusteigen und langsam wieder abzufallen. Ähnlich in Abbild 154 und Abbild 156 wo die Kurve für die Blattunterseite nach einem leichten Anstieg mit dem Schließen der Spaltöffnungen und einer Abnahme der Transpiration fällt. Im Abbild 155 sind die Kurven für die Blattober- und Unterseite dargestellt. Der Transpirationsverlauf der Blattoberseite liegt bei beiden Versuchen (siehe Abb. 154 sowie Abb. 155) deutlich unter dem der Blattunterseite. Dabei zeigt auch die Kurve der Blattoberseite (Abb. 154) am Anfang einen leichten Anstieg, dies ist auch bei Abbild 155 zu sehen. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass die Änderung der Wasserverhältnisse im Blatt auch zu einem Wasserverlust über die Schnittstelle führt. Zu beachten ist aber, dass Abbild 154 die Transpiration eines Baumwollblattes (*Gossypium hirsutum*) und nicht von *Hedera helix* darstellt.

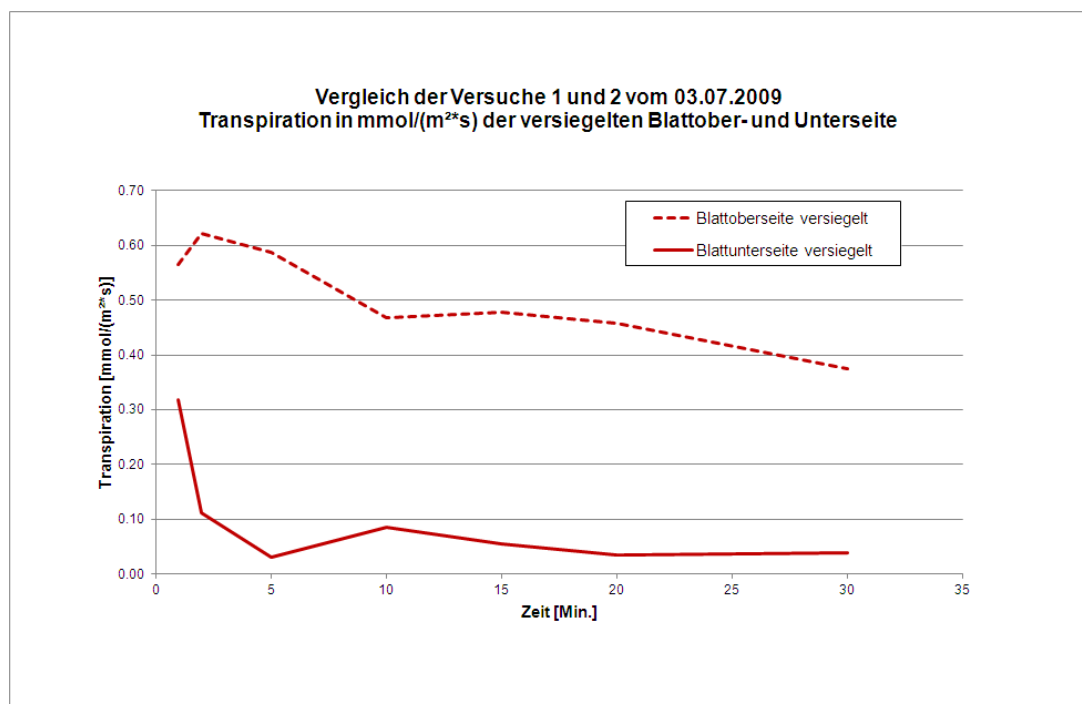


Abb. 155: Transpiration der Blattunter- und Oberseite bei *Hedera helix*

Wird ein ungünstiger Messzeitbereich gewählt, kann es sein, dass nicht die eigentliche Transpiration gemessen wird, sondern der IWANOFF-Effekt, welcher dann zu viel höheren

Diskussion

Werten führt. Die Frage welcher Messzeitbereich „günstig“ ist, sollte demnach im Vorversuch bestimmt werden, ideal vielleicht mit der „Anwelk-Methode“ (ARLAND 1955) in abgewandelter Form, wie in dieser Arbeit angewendet.

Dies macht die STOCKER-Methode dann aber wesentlich komplizierter, aufwendiger und somit für die Feldarbeit zu umständlich. Vermieden oder geringer gehalten werden kann der Fehler indem viele Blattproben aus den unterschiedlichsten Bereichen der Pflanze gezogen werden. Wie sich jedoch das wiederholte Abtrennen von Blättern auf die gesamte Pflanze auswirkt und welche physiologischen Stressreaktionen beteiligt sind, wenn ein Blatt abgetrennt wird, wurde soweit bekannt, noch nicht untersucht.

Abbild 156 gibt einen typischen Versuchsverlauf wieder. Dabei zeigt der Verlauf der Messkurve einen ähnlichen Verlauf wie bei dem Versuch in Abbild 154. Die Abnahme ist nicht so eindeutig. Das Schließen der Spaltöffnungen ist aber auch in Abbild 156 gut zu erkennen. Es erfolgt aber langsamer und gradueller als bei *Gossypium hirsutum*.

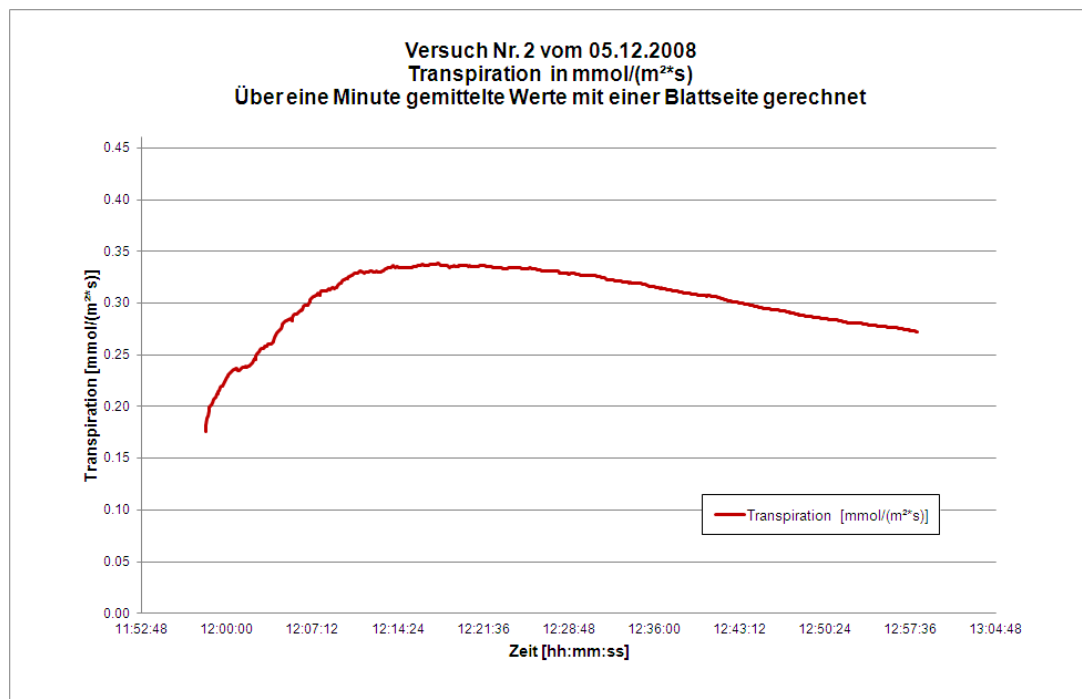


Abb. 156: Transpiration bei *Hedera helix* Verlauf mit einer Blattseite berechnet

Ähnliche Versuche zur Untersuchung der Transpiration der Blätter als auch der Blattober- und Unterseite wurden bereits 1932 von STÅLFELT in seinem Bericht „Der stomatäre Regulator in der pflanzlichen Transpiration“ dokumentiert. Dabei beschreibt er eine Versuchsanordnung wie folgt: „Das Versuchsblatt wird in der Analysewaage ohne Wasserzufuhr aufgehängt, und Transpiration und Spaltweite werden in kurzen Zeitintervallen bestimmt. Mit der sinkenden Wasserreserve des Blattes nehmen die Spaltweite und Transpiration ab. Jede Messung gibt folglich einen neuen Spaltwert und einen entsprechenden Wert der Transpiration“ (STÅLFELT 1932).

Des weiteren schreibt er zur Transpiration der Blattseiten: „Die Transpiration der spaltöffnungsfreien Flächen hypostomatischer Blätter beträgt nur einige Prozent der stomatären Transpiration“ (STÅLFELT 1932).

STÅLFELT (1932) führte aber auch noch umfangreiche Untersuchungen zum Thema „Incipient drying“, Wind und Wundeffekt durch. Dabei stützte er sich auf die Erkenntnisse vom KAMP der bei seinen Versuchen 1930 fand, das in den cutinisierten Epidermisaußenwänden ein „incipient drying“ stattfindet, das er mit einer bei Wassermangel eintretenden Änderung der Wasserpermeabilität erklärte. „Dabei konnte KAMP auch zeigen, dass die innere Beschaffenheit der Cuticula, ihre chemische Zusammensetzung und ihre Strukturverhältnisse, für die Durchlässigkeit eine größere Rolle spielt als ihre Dickenausbildung“.

Um KAMP'S Theorie (STÅLFELT 1932) über das cuticuläre „incipient drying“ zu überprüfen führte STÅLFELT Versuche mit Birkenblättern durch. Dabei beschreibt er seine Versuche wie folgt: „Die cuticuläre Transpiration der hypostomatischen Birkenblätter wurde in üblicher Weise bestimmt, d. h. die Blätter wurden auf der Unterseite mit weißer Vaseline überzogen und die Transpiration darauf durch Wägungen gemessen“. Er erwähnt dabei ein Phänomen, das auch in dieser Arbeit teilweise beobachtet wurde, „Dabei ist nicht zu vergessen, dass die frisch aufgestrichene Vaseline in den ersten Minuten einen geringen

Gewichtsverlust erleiden kann. Die ersten Transpirationsraten müssen in diesen Fällen korrigiert werden“ (STÅLFELT 1932). Da aber auch nicht bestrichene Blätter am Anfang der Messung eine rasche Abnahme der Messwerte zeigten, ist dies nicht die einzig mögliche Erklärung.

Eines von STÅLFELT'S Ergebnissen ist in Abbild 157 dargestellt. Zu seinen Erkenntnissen aus den Versuchen schreibt er „Dieser und meine übrigen Versuche bestätigen die Ergebnisse von KAMP und zeigen, dass die cuticuläre Transpiration einem „incipient drying“ unterliegt. Der Abfall der Transpiration geht anfangs sehr schnell vor sich (dies wurde auch bei den Versuchen in dieser Arbeit teilweise beobachtet), und hört später in der Hauptsache auf. Die Transpiration ist dann bis auf die Hälfte herab gegangen. Ein konstanter Wert wird jedoch niemals erreicht. Mit dem fortschreitenden Austrocknen des Blattes sinkt die Wasserabgabe ganz langsam herab“ (STÅLFELT 1932). Ähnliche Kurven ergaben auch bei den Versuchen mit *Hedera helix*, (siehe Kapitel 7.1, Abb. 37, 45, 51 und Abb. 52, sowie Kapitel 7.2, Abb. 56 und 59 und Kapitel 7.3 Abb. 69). In all diesen Fällen sinkt die Transpiration im Verlauf des Versuches, um schließlich einen konstanten Verlauf zu erreichen. Da der Öffnungszustand der Spaltöffnungen unbekannt ist, kann der Knick in der Kurve als Schließen der meisten (oder aller) Spaltöffnungen gedeutet werden, die auslaufende Kurve als cuticulärer Anteil der Transpiration.

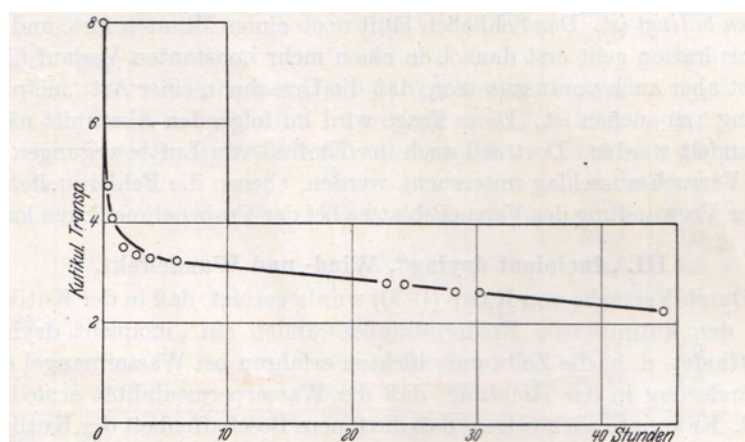


Abb. 157: Birkenblätter, auf der Unterseite mit Vaseline bestrichen.
Cuticuläre Transpiration in Milligramm pro Stunde und 25 cm² angegeben (STÅLFELT 1932)

Nach weiteren ausführlichen Versuchen und Untersuchungen kommt STÅLFELT zum Schluss, dass die cuticuläre Transpiration bei einer Spaltweite von über 1 μm höchstens 8,7% des stomatären Anteils beträgt. Ein Teil seiner Ergebnisse sind in Abbild 158 unten dargestellt. Dabei kommt STÅLFELT auf Werte von 6,8% bei 5,5 μm Öffnungsweite der Spaltöffnungen bis zu maximal 20% cuticulärem Anteil der stomatären Transpiration bei einer Spaltweite von 0,1 μm . Betrachtet man die Anteile der cuticulären Verluste an der Gesamttranspiration (siehe Abb. 158 Spalte 2) so ergeben sich folgende Werte; bei einer Öffnungsweite von 0,1 μm 17%, und bei einer Spaltenweite von 5,5 μm 6,3%.

Spaltweite μ	Gesamttranspi- ration mg/h 25 qcm Blatt- scheibe	Stomatärer Anteil	Kutikulärer Anteil in		25% des kutikulären Anteils in	
			mg	% des sto- matären Anteils	mg	% des sto- matären Anteils
5,5	142	133	9	6,8	2,3	1,6
3,1	130	121	9	7,5	2,3	1,8
1,1	112	103	9	8,7	2,3	2,1
0,65	92	83	9	10,8	2,3	2,5
0,35	75	66	9	14,0	2,3	3,1
0,1	54	45	9	20	2,3	5,1

Abb. 158: Anteile der cuticulären und stomatären Transpiration (STÅLFELT 1932)

Im Rahmen weiterer Untersuchungen, bei denen jeweils drei Blattprobentypen (A, B und C) mit unterschiedlichen anfangs Wasserdefizitwerten verwendet wurden, Proben A mit voller Wassersättigung, Probe B mit 10,5% Wasserdefizit und Probe C mit 7,5%, stellte STÅLFELT fest, dass die Kurven der 3 Proben (A, B und C) einen unterschiedlichen Verlauf zeigten. B und C zeigten am Anfang des Versuches einen deutlich steileren Abfall als die Kurve der Probe A. Diese verlief, wie die in Abbild 158 dargestellte Transpirationskurve eines Blattes dessen Unterseite mit Vaseline bestrichen wurde. Daraus folgerte STÅLFELT dass die cuticuläre Transpiration (und das „incipient drying“) auch vom Grad des Wasserdefizits der untersuchten Blätter abhängt. Dies bedeutet aber, dass sie bei unterschiedlichen Blättern eines Baumes als auch bei unterschiedlich alten Blättern erheblichen Schwankungen unterliegt.

Die Ergebnisse der Rahmen dieser Arbeit durchgeführten ersten 2 Versuchsreihen sind in

Tabelle 17 und Tabelle 18 dargestellt. Dabei werden die abgeänderte „Anwelk-Methode“ (Kapitel 6.2) und die Untersuchung des Transpirationsverhaltens der Blattober- und Unterseite (Kapitel 6.3) verglichen. Der Unterschied zwischen der Transpiration der beiden Messserien beträgt 17,8% (siehe Tab. 18, Differenz). Dieser Unterschied ist durch die Reaktionsbreite der Spaltöffnungen, sowie leicht schwankende Umgebungsparameter zu erklären. Der Anteil der cuticulären Transpiration (Wert für Blattunterseite versiegelt, 0,05 mmol/(m²·s) in Tab. 18) an der Gesamttranspiration (Summe aus dem Wert der versiegelten Blattunter- und Oberseite, Tab. 18) mit 0,34 mmol/(m²·s) beträgt 14,7%. Die Werte von STÅLFELT liegen bei 17%. Vergleicht man den durchschnittlichen Masseverlust der Blätter der ersten Versuchsreihe (Tab. 17), so ist zu erkennen, dass die Blattoberseite wenig zur Gesamttranspiration beiträgt. Es muss jedoch bedacht werden, dass hier keinerlei Aussage über den Öffnungszustand der Spaltöffnungen gemacht wird und dieser auch unbekannt ist. Da STÅLFELT seine Versuche auch bei unterschiedlichen Wasserpotentialen seiner Versuchspflanzen durchführte ist ein direkter Vergleich eher nicht möglich. Es kann lediglich die Aussage gemacht werden, dass auch bei *Hedera helix* der Anteil der stomatären Transpiration im Vergleich zur cuticulären Transpiration überwiegt.

Messmethode		
abgeänderte "Anwelk-Methode"	Blattoberseite versiegelt	Blattunterseite versiegelt
Mittel des Masseverlustes in %		
2.1	1.8	0.3

Tab. 17: Mittlerer Masseverlust beim Gesamtblatt von *Hedera helix*, sowie der Blattober- und Unterseite

WERT	abgeänderte "Anwelk-Methode" Transpiration [mmol/(m ² *s)]		Blattseite versiegelt Transpiration [mmol/(m ² *s)]	Blattseite versiegelt Transpiration [mmol/(m ² *s)]
Berechnet mit / Messmethode	<i>beide Blattseiten</i>	<i>eine Blattseite</i>	<i>Blattunterseite versiegelt</i>	<i>Blattoberseite versiegelt</i>
Mittelwert	0.12	0.24	0.05	0.29
Median	0.12	0.23	0.04	0.27
Varianz	0.003	0.010	0.002	0.04
Differenz	17.8%			

Tab. 18: Mittlere Transpiration beim Gesamtblatt von *Hedera helix*, sowie der Blattober- und Unterseite

Ähnliche Versuche wie STÅLFELT (1932) sie durchführte, wurden auch von BURGHARDT und RIEDERER (2003) in ihrer Untersuchung zur Ökophysiologie der cuticulären Transpiration durchgeführt.

Dabei untersuchten sie das cuticuläre Transpirationsverhalten unter Wasserstress bei immergrünen Gehölzarten wie *Hedera helix* und bei Laub werfenden Gehölzen wie *Acer campestre*, *Fagus sylvatica* und *Quercus petraea*. Bei einer ihrer Versuchsmethoden verwendeten sie abgetrennte Blätter von *Hedera helix*, die an der Blattunterseite mit Vaseline bestrichen in einem Gestell auf einer Waage laufend gewogen wurden. Ihre Messkurven zeigen eine laufende Abnahme der Transpiration mit einer auslaufenden Kurve bei Erreichen einer Minimum Transpirationsrate und einem anschließenden Übergang in einen Bereich der konstanten Transpirationsrate, siehe Abbild 159 (BURGHARDT und RIEDERER 2003).

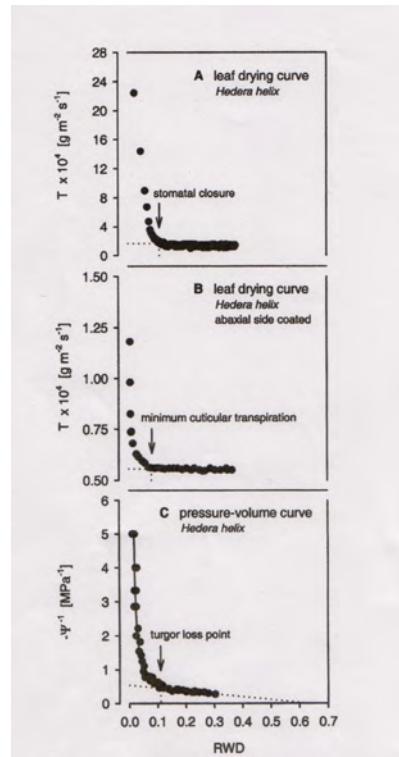


Abb. 159: Transpirationsverlauf bei *Hedera helix* im „Anwelk-Versuch“ (BURGHARDT und RIEDERER 2003)

BURGHARDT und RIEDERER (2003) kamen bei ihren Versuchen mit *Hedera helix* auf minimum Transpirationsraten von 0,0036 mmol/(m²·s) bei einem RWD (relative water deficit) von 0,065. Bei einigen Versuchen (siehe Kapitel 7.2, Tab. 7, Versuch vom 20.02.2009, 04.03.2009 und 26.06.2009) wurden im Mittel Werte von 0,003, 0,008 und 0,009 mmol/(m²·s) gemessen.

Gestützt auf diese Erkenntnisse kann davon ausgegangen werden, dass die in dieser Arbeit durchgeführten Versuche zur Untersuchung des stomatären Verhaltens von *Hedera helix* zumindest in den Grundannahmen, welche für die folgenden Versuchsreihen von Bedeutung sind, auch von anderen in Teilen bestätigt wurden.

Interessant ist, dass STÅLFELT über eine anfangs sehr schnelle Änderung der Transpiration spricht, was auch hier bei vielen Versuchen beobachtet wurde. Es stellt sich die Frage, wenn es immer zu solchen schnellen Änderungen des Wertes kommt, kann

eine Momentaufnahme wie die STOCKER-Methode eine verlässliche Aussage liefern? Kommt diese schnelle Änderung durch den IWANOFF-Effekt zustande oder spielen hier noch andere Faktoren eine Rolle?

Obwohl nach diesen Betrachtungen vielleicht einiges gegen die STOCKER-Methode spricht, kann, lässt man den Umstand des IWANOFF-Effektes und der sich rasch ändernden Messwerte weg, gesagt werden, dass hinsichtlich der Umgebungsparameter diese Methode am ansprechendsten ist. Das Blatt bleibt nach dem Abtrennen und der Wägung wo es ursprünglich war. Es werden weder Strahlung noch Feuchtebedingungen verändert, der Grenzsichtwiderstand bleibt gleich und die Strömungsverhältnisse der umgebenden Luft bleiben unverändert. Alle Spaltöffnungen (egal in welchen Schließ- oder Öffnungszustand diese sich gerade befinden) werden in die Messung einbezogen.

Die STOCKER-Methode ist bemüht den ersten Messwert so schnell als möglich zu erfassen, dies ist vielleicht aus oben angeführten Betrachtungen insoweit nicht ideal, als das eine Stressreaktion oder eine durch ein passives Öffnen der Spaltöffnungen hervorgerufene Erhöhung der Transpiration gemessen wird und nicht der „eigentliche“ Wert dieser. Bei der Messung der Transpiration von größeren Pflanzen wie Sträuchern und Gehölzen ist auch zu bedenken, dass jedes Blatt seinen eigenen physiologischen „Anfangszustand“ hat, die Spaltöffnungen werden je nach Strahlungsverhältnis, Wasserpotential, Luftfeuchte, Temperatur und Windverhältnis auf verschiedenen Blättern unterschiedliche Öffnungszustände aufweisen und damit sehr unterschiedlich reagieren.

Es ist durchaus möglich das der IWANOFF-Effekt je nach Wasserversorgung der Pflanze unterschiedlich stark ausgeprägt auftritt, im Freiland ein schwer zu bestimmender Parameter.

Betrachtet man die Messkurve in Abbild 155 so sieht man, dass die Transpiration am Anfang eher gering ist, um dann an zu steigen, bei Abbild 156 steigt sie nach ca. 2

Minuten an, um dann ab zu fallen. In wie weit die ersten Minuten den „wahren“ Wert der Transpiration wiedergeben ist eine schwere Frage. Ein Ansatz zur Lösung könnte wie folgt aussehen; mehrere Blätter gleichzeitig zu 3 unterschiedlichen Zeitpunkten messen, also einmal am Anfang, nach 2 Minuten und dann nach weiteren 3 Minuten. Das Mittel der 3 Werte nehmen. Wenn die Blätter hypostomatisch sind nur mit einer Blattseite rechnen und immer Temperatur, Strahlung und Luftfeuchte mit messen, um unter Umständen die Plausibilität der Werte nachprüfen zu können.

Im Vergleich zur STOCKER-Methode oder jeder anderen gravimetrischen Feldmethode, ist ein Porometer, egal welcher Typ und Bauart eine Möglichkeit das Blatt lebend im Freiland zu messen. Natürlich gibt es andere Methoden am lebenden Objekt zu messen, siehe Saftflussmessung (Kapitel 5.4.5) oder Lysimeter (Kapitel 5.2.10), diese Methoden sind aber aufwendig und eher für Langzeitbeobachtungen gedacht. Eine anderen Methode die nicht in die Umgebung des Blattes eingreift, die Infrarot Thermographie (Kapitel 5.4.6) wird später besprochen.

Der Vorteil des Porometers ist die schnelle Bestimmung der Wasserabgabe ohne Abtrennung des Blattes und damit ohne Stressreaktion der Pflanze.

Je nach Typ des Gerätes (Kapitel 6.4 und Kapitel 6.5) werden entweder die Zeit bis zum Erreichen einer Feuchteänderung in der Blattkammer gemessen oder die Differenz zwischen Eingangs- und Ausgangsfeuchte zusammen mit anderen Parametern wie Temperatur der Kammer, des Blattes und Strahlung gemessen und zur Berechnung des Widerstandes oder des Leitwertes des Blattes herangezogen.

Porometer sind hoch komplexe Messgeräte in die erheblich viel Entwicklungszeit und Forschung investiert wurde. Führend auf dem Gebiet waren unter anderem K. J. PARKINSON (1980), G. P. JARVIS (1971) und C. KÖRNER (1976). Doch gerade diese Komplexität kann zu Problemen führen.

Die Blattkammer bildet um das Blatt herum eine eigene „Umwelt“. Auf diese reagieren die Spaltöffnungen mehr oder weniger. Das Einstellen der Messparameter und die Durchführung der Messung hängt vom Bediener ab.

Da mehrere Parameter von Sensoren erfasst werden, hängt die Genauigkeit der Messung von der Genauigkeit der einzelnen Sensoren ab. Im Vergleich zur Wägung ist die Fehlerkette wesentlich länger, die Möglichkeit Fehler bei der Messung zu machen höher. Eine Eingangsfeuchte die zum Beispiel stark von der Umgebungsfeuchte abweicht, führt dazu, dass in der Kammer ganz andere Verhältnisse sind, wie in der Umgebung.

Da nur ein Teil des Blattes in der Kammer ist, werden nicht alle Spaltöffnungen in ihrem eigentlichen Zustand erfasst, es wird davon ausgegangen, dass sich alle anderen am Blatt befindenden Spaltöffnungen im gleichen Zustand der Öffnung oder des Schließens befinden wie die in der Messkammer. Wird dann auf die Blattfläche hoch gerechnet, kann es zu Fehlern kommen. Des Weiteren geben die Porometer nicht die eigentliche Transpiration aus, sondern den stomatären Leitwert oder Widerstand. Die Transpiration muss erst aus den Geräteparametern und den Umgebungswerten berechnet werden.

Um Datensätze miteinander vergleichen zu können, wurde, basierend auf den Erkenntnissen der vorhergehenden Versuche sowie auf den Erkenntnissen von STÅLFELT (1932), BURGHARDT und RIEDERER (2003) und anderen entschieden, im Rahmen dieser Arbeit die Transpiration mit einer Blattseite zu berechnen, beziehungsweise nur die Blattunterseite mit dem Porometer zu messen.

Die Häufigkeiten und Verteilungen der ersten 2 Versuchsreihen (Abb. 160 bis Abb. 162) zeigen einen deutlichen Unterschied zwischen der Transpiration der Blattober- und Unterseite. Während beim ganzen Blatt die Transpiration am häufigsten zwischen 0,2 bis 0,25 mmol/(m²·s) liegt (Abb. 160), liegt sie bei der mit Vaseline bestrichenen Blattunterseite bei 0,00 bis 0,05 mmol/(m²·s) siehe Abbild 161. Bei der mit Vaseline bestrichenen Blattoberseite liegen die meisten Werte zwischen 0,10 und 0,15 mmol/(m²·s) siehe Abbild 162.

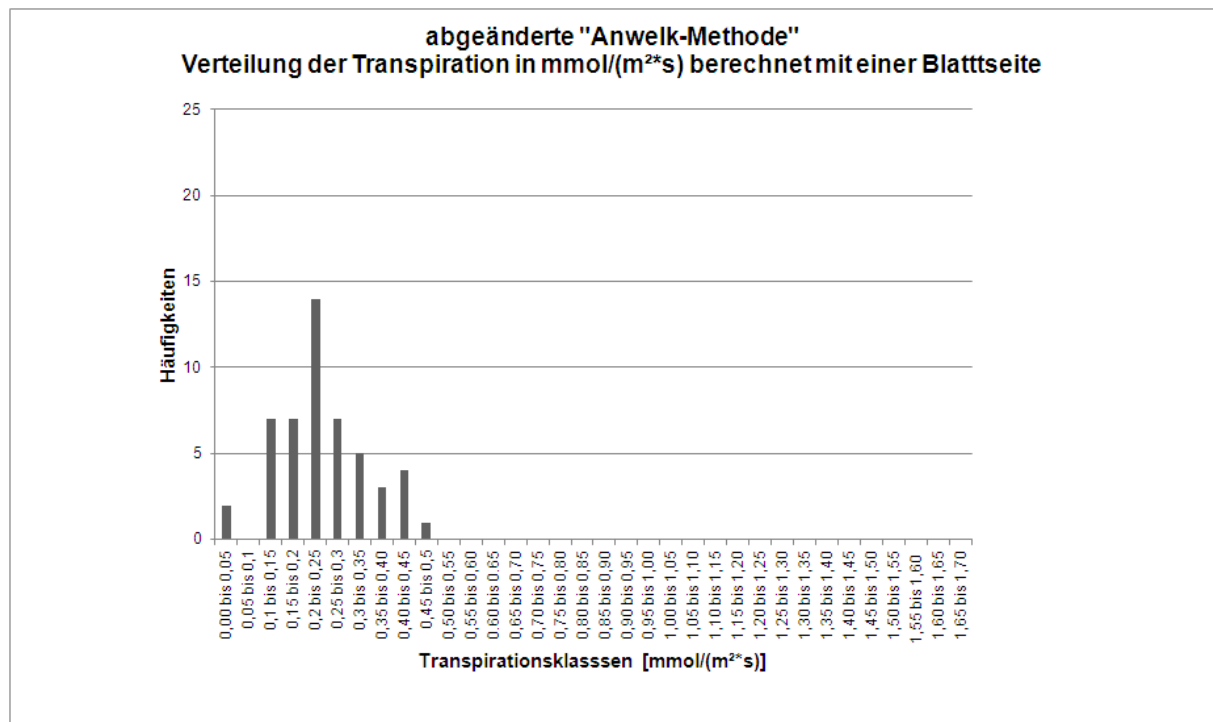


Abb. 160: Verteilung der Transpirationswerte, für die Versuchsreihe Abgeänderte „Anwelk-Methode“

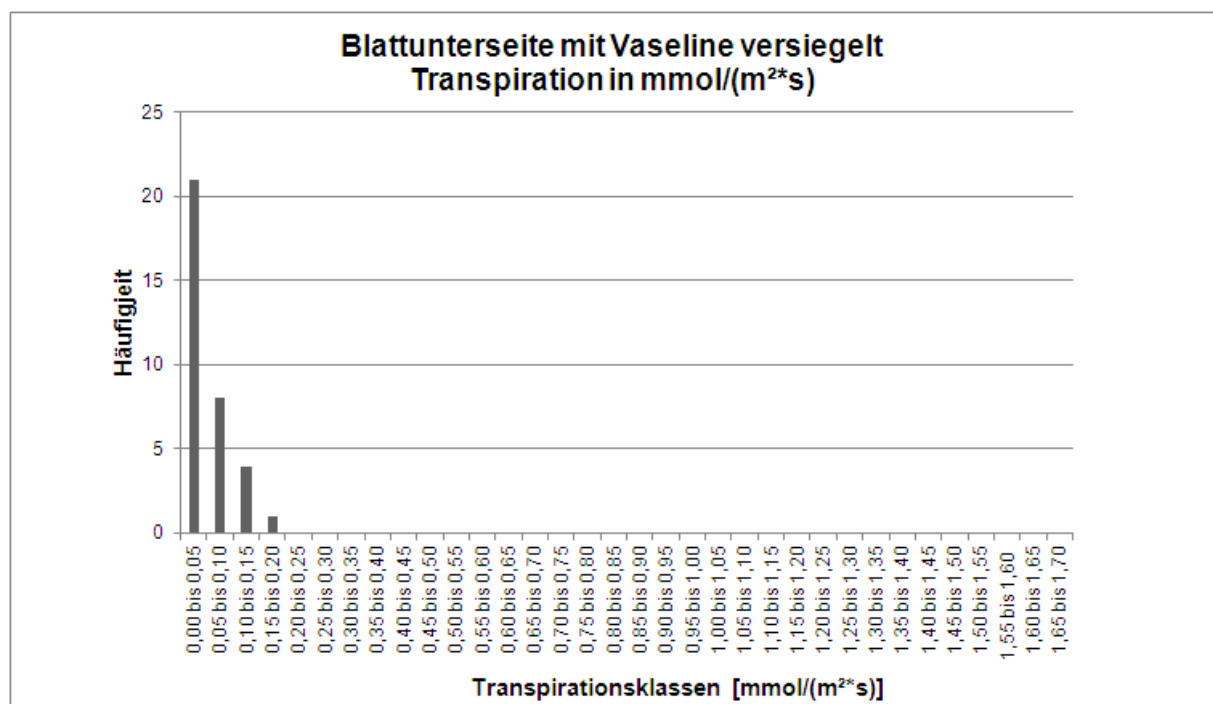


Abb. 161: Verteilung der Transpirationswerte für die Blattoberseite, Transpirationsverhalten der Blattunter- und Oberseite

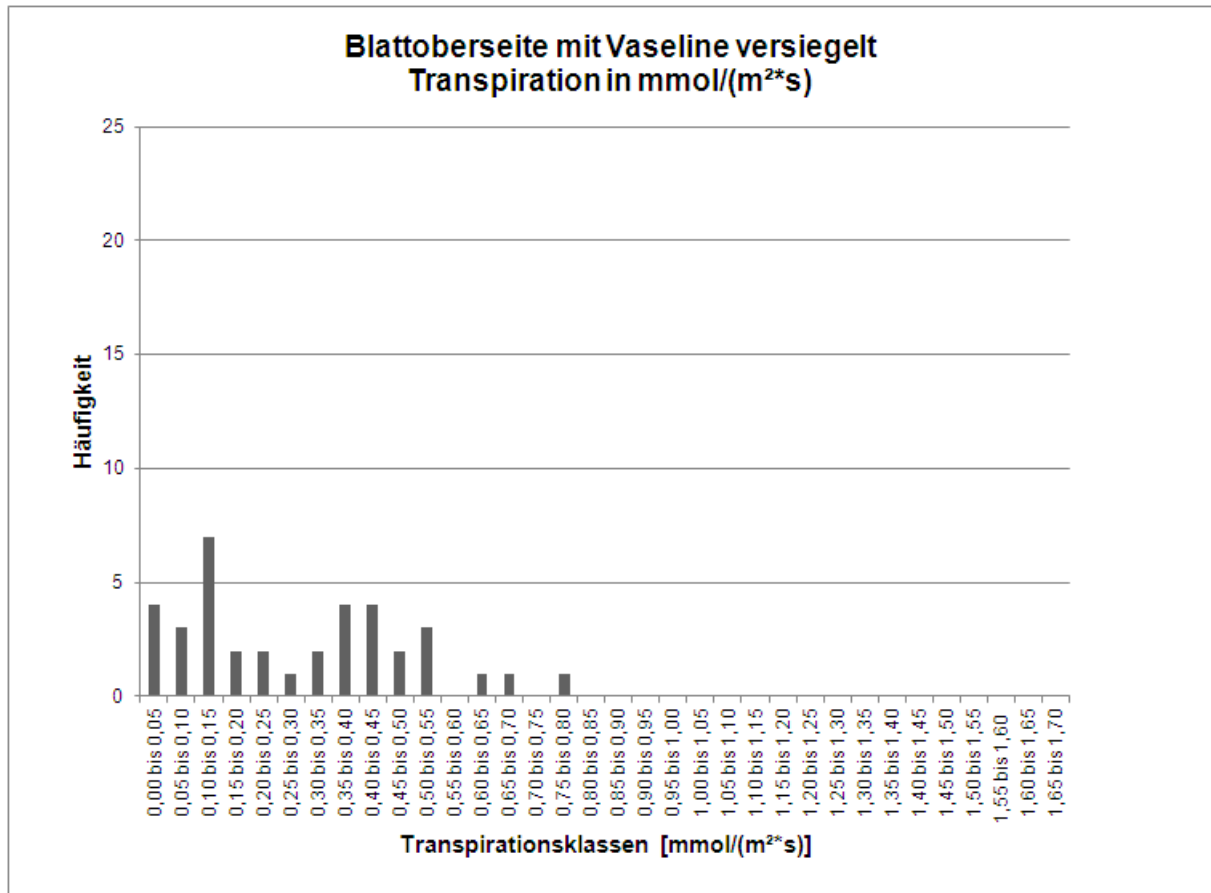


Abb. 162: Verteilung der Transpirationswerte für die Blattunterseite, Transpirationsverhalten der Blattunter- und Oberseite

Der Unterschied zwischen den Wägungen und der Messung mit dem PMR-4 Porometer von PP Systems beträgt ca. 32% (Tab. 19).

Anscheinend ist der stomatäre Widerstand bei der Messung mit dem Porometer höher als bei der Wägung. Eigentlich war ein höherer Wert der Porometermessung erwartet worden, aus der Annahme, dass die durch die Blattkammer strömende Luft, die durch einen Ventilator gut verwirbelt wird, um eine gleichmäßige Feuchteverteilung zu gewährleisten, zu einem Abreißen der Dunstgrenzschicht an der Blattfläche führt und damit die geringere Feuchte zu einer schnelleren Diffusion führt. Dies könnte am Anfang der Messung auch so gewesen sein, was dann zu einem Schließen der Spaltöffnungen führte und somit letztlich zu geringeren Werten der Transpiration. Interessant ist auch die Tatsache, dass die Blattoberseite, mit dem Porometer gemessen höhere Werte für die cuticuläre Transpiration

gibt als bei den Wägungen. Aus diversen Versuchen und Literaturwerten geht hervor, dass die Cuticula nicht ganz undurchlässig ist. In der Literatur werden Werte zwischen 0,3% und 6,0% der Umsatzmengen, die bei maximaler, durch stomatäre Regelung nicht beeinträchtigter Transpiration gemessen werden können, angeben (LÖSCH 2001).

WERT	Transpiration [mmol/(m ² ·s)] einseitig	Transpiration [mmol/(m ² ·s)] zweiseitig	Transpiration [mmol/(m ² ·s)] beide Blattseiten	Transpiration [mmol/(m ² ·s)] Blattunterseite	Transpiration [mmol/(m ² ·s)] Blattoberseite
Berechnet mit / Messmethode	Waage	Waage	Porometer PP Systems	Porometer PP Systems	Porometer PP Systems
Mittelwert	0.54	0.26	0.53	0.36	0.17
Median	0.52	0.25	0.51	0.33	0.16
Varianz	0.06	0.02	0.04	0.02	0.003
Differenz	31.9%				

Tab. 19: Vergleich der Versuche Wägungen, PMR-4 Porometer, Transpiration in mmol/(m²·s)

Die Porometermesswerte für die Verluste der Blattoberseite ergeben einen Wert von 32% (Tab. 19) der Gesamttranspiration (Summe aus Ober- und Unterseite). Der Anteil der stomatären Transpiration an der Gesamttranspiration ergibt 68% (Tab. 19) und ist damit immer noch doppelt so hoch. Der unerwartet hohe Wert für die Blattoberseite kann das Ergebnis eines „Messartefaktes“ sein. Da *Hedera helix* nur auf der Blattunterseite Spaltöffnungen hat, ist der Wert von 0,17 mmol/(m²·s) (Tab. 19) für die Blattoberseite doch hoch. Vergleicht man die Werte der versiegelten Blattunterseite, welche im Bereich von 0,05 mmol/(m²·s) (Tab. 18) liegen, ergibt sich eine Differenz von 71%.

Mit hoher Wahrscheinlichkeit wurde durch die Messung ein Artefakt produziert. Damit ergibt sich die Frage, soll die Blattoberseite überhaupt gemessen werden, wenn das Blatt eindeutig hypostomatisch ist?

Beim Vergleich der Transpirationswerte nach den untersuchten Methode (Tab. 20), reichen die Werte von 0,10 mmol/(m²·s) bis 0,60 mmol/(m²·s). Betrachtet man dagegen die Werte innerhalb der Messserie (Wägung im Vergleich mit dem PMR-4 Porometer für eine Blattseite beziehungsweise für die Blattunterseite) so liegen die Werte zwischen

Diskussion

0,30 mmol/(m²·s) und 0,60 mmol/(m²·s) (Tab. 20).

Methode	Häufigsten Transpirationswerte mmol/(m²·s)
abgeänderte „Anwelk-Methode“	0,20 bis 0,25
Blatt-Us versiegelt	0,00 bis 0,05
Blatt-Os versiegelt	0,10 bis 0,15
Waage (einseitig)	0,55 bis 0,60
Waage (zweiseitig)	0,25 bis 0,30
PMR-4 (Os und Us)	0,45 bis 0,50
PMR-4 Us	0,30 bis 0,35
PMR-4 Os	0,10 bis 0,15

Tab. 20: Transpirationswerte der Versuchsreihen im Vergleich
Os = Blattoberseite, Us = Blattunterseite

Aus den Abbildern 163 bis 168 wird ersichtlich, dass die Häufigkeiten der Transpirationsraten ein ähnliches Bild geben, wie die der vorhergehenden Versuchsreihe. Auch beim Vergleich der Wägung mit dem PMR-4 Porometer ergeben die Blattoberseiten den geringsten Wert (Abb. 167), die Wägungen (Abb. 163) geben die höchsten Werte, dazwischen liegen die Porometermessungen der Blattunterseite (Abb. 166).

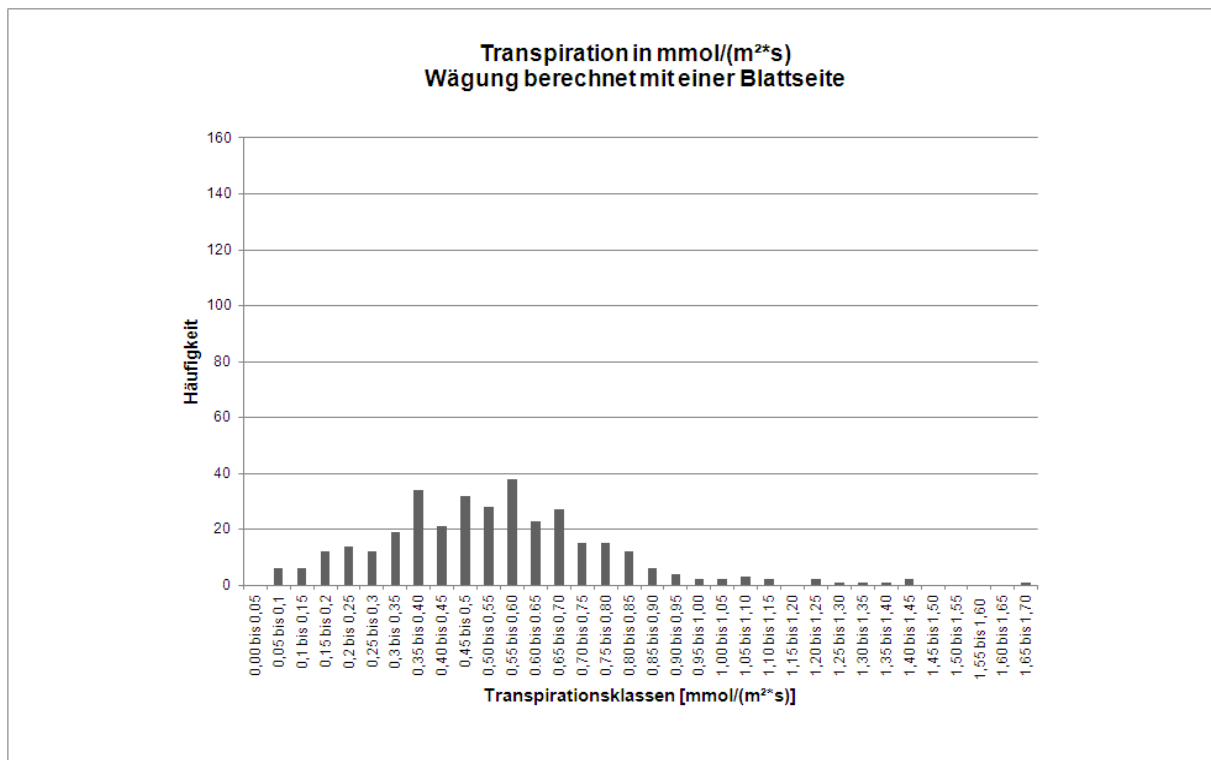


Abb. 163: Verteilung der Transpirationswerte, eine Blattseite, Vergleichsmessungen Waage, PMR-4

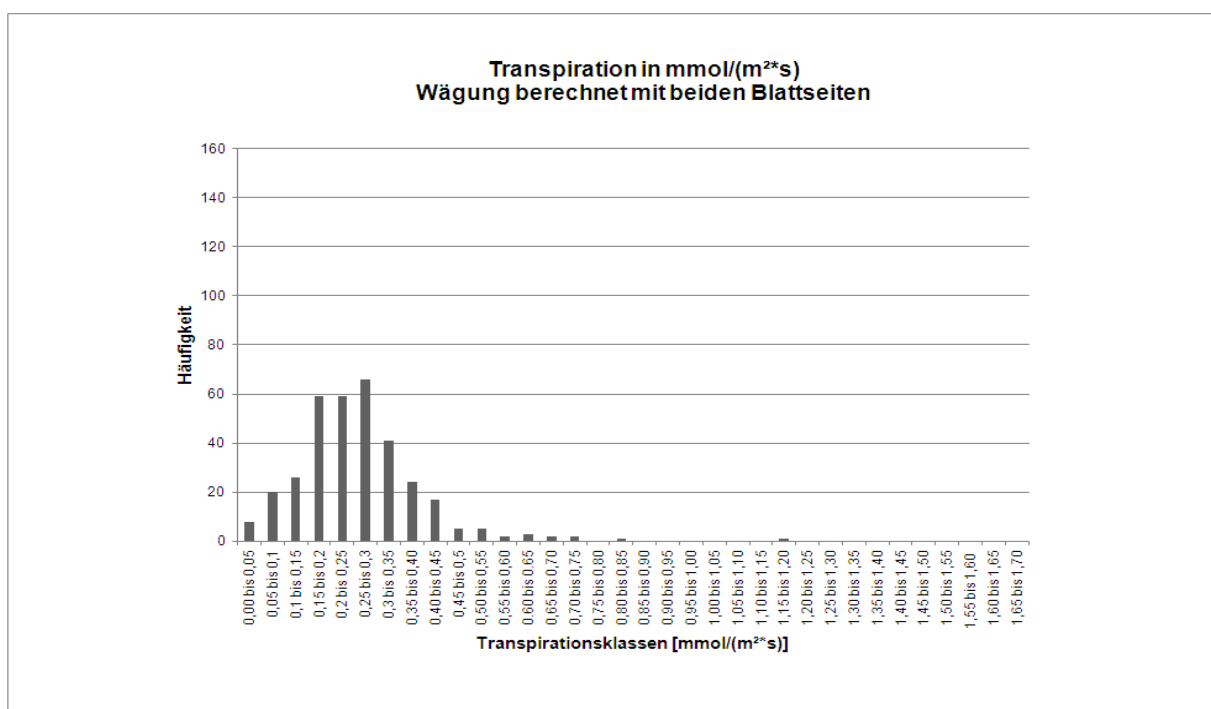


Abb. 164: Verteilung der Transpirationswerte, beide Blattseiten, Vergleichsmessungen Waage, PMR-4

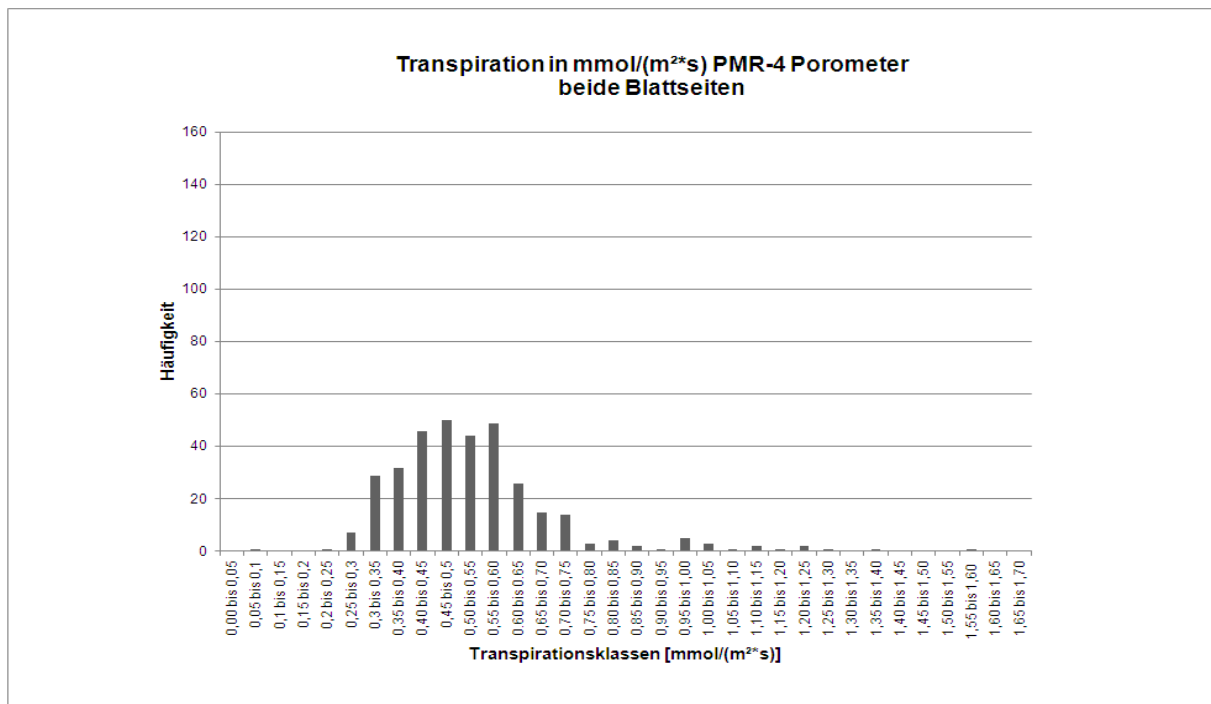


Abb. 165: Verteilung der Transpirationswerte, PMR-4 beide Blattseiten addiert
Vergleichsmessungen Waage, PMR-4

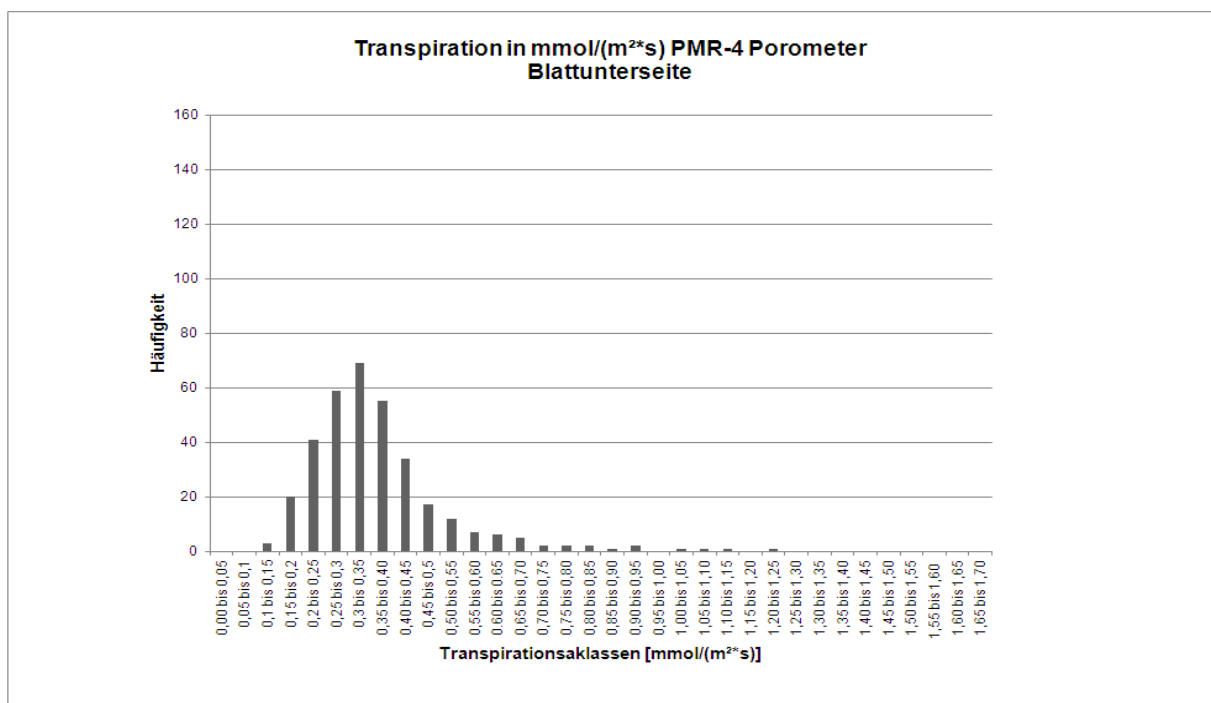


Abb. 166: Verteilung der Transpirationswerte, PMR-4 Blattunterseite
Vergleichsmessungen Waage, PMR-4

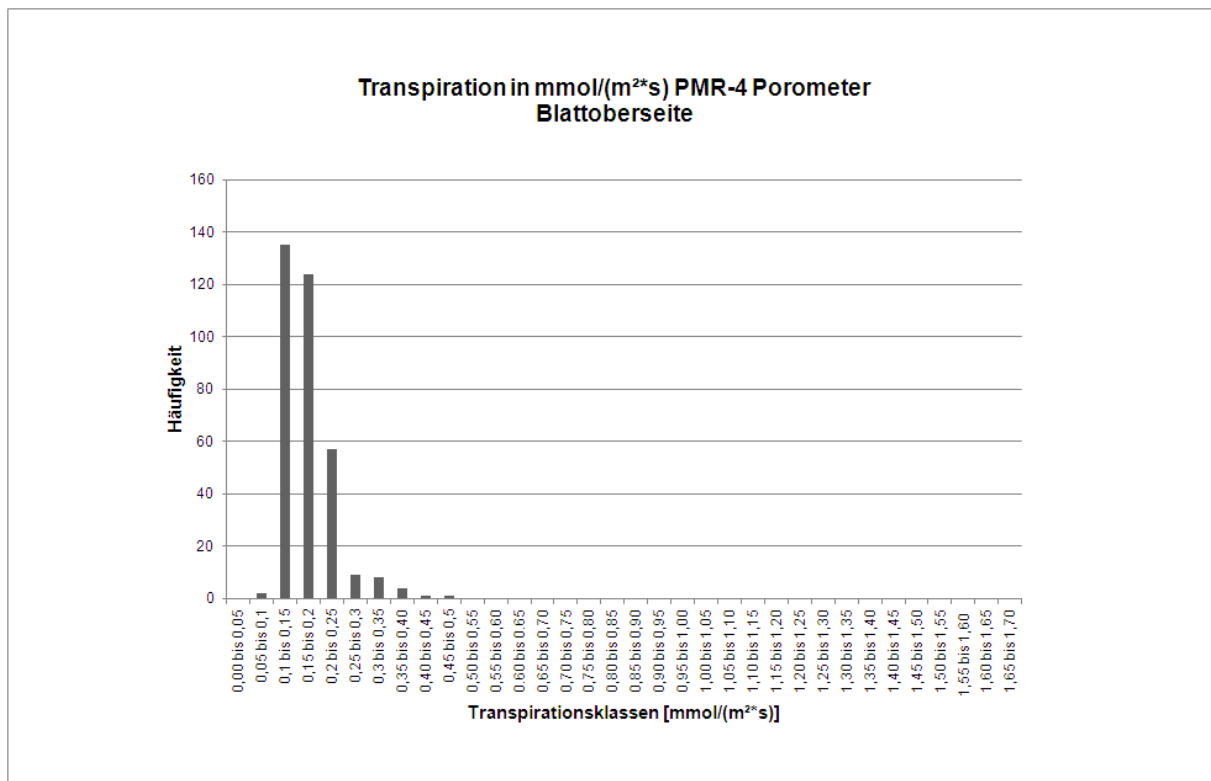


Abb. 167: Verteilung der Transpirationswerte, PMR-4 Blattoberseite
Vergleichsmessungen Waage, PMR-4

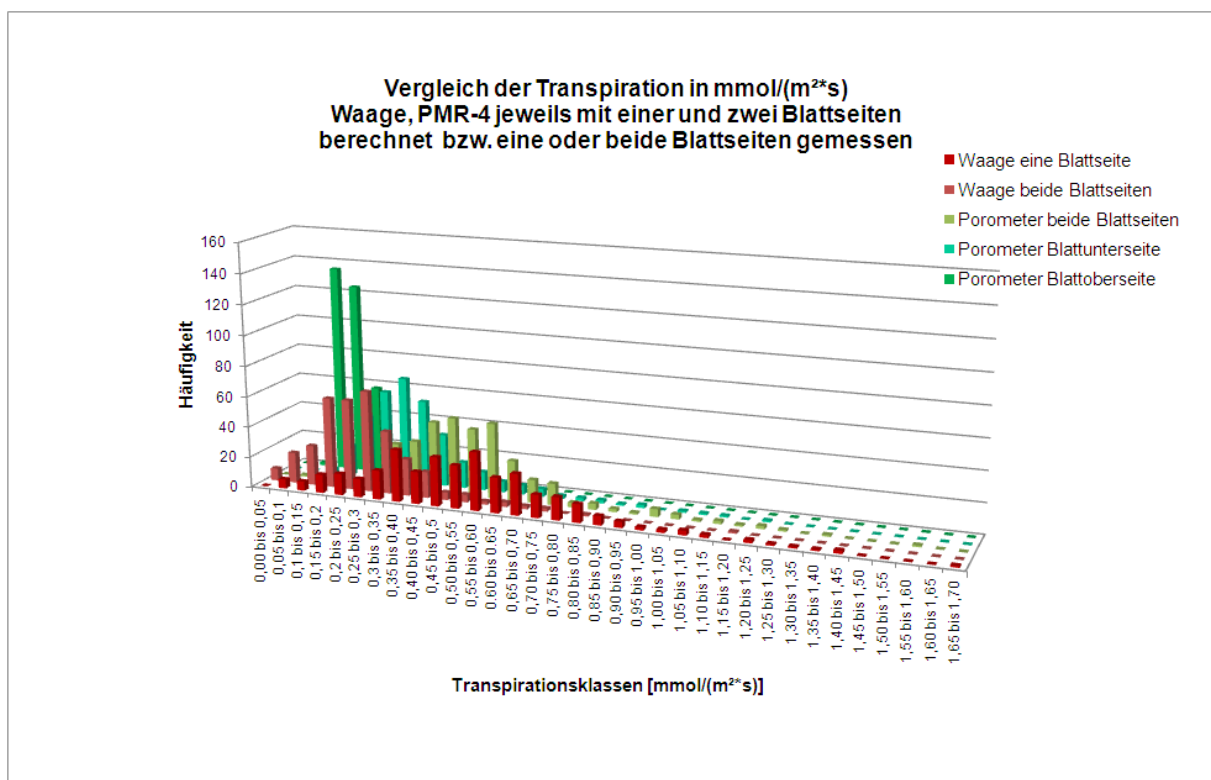


Abb. 168: Verteilung der Transpirationswerte,
Vergleichsmessungen Waage, PMR-4

Aus den Abbildern 169 bis 172 wird ersichtlich, dass beim Vergleich der drei Methoden die Messungen mit dem AP4 Porometer und der Wägung näher zusammen liegen als die Werte des PMR-4 Porometers. Dabei liegen alle Werte eher im Bereich der geringeren Transpiration, die Werte der Wägungen geben teilweise höhere Werte (siehe auch Abb. 67, 68, 69 und 73 Kapitel 7.3 sowie Abb. 88, 90 und 103 Kapitel 7.4). Wie es zu diesen teilweise hohen Werten kommen kann wurde schon anhand des IWANOFF-Effektes besprochen, dieser müsste sich aber bei den Messungen mit dem Porometer zeigen. Tatsächlich ist es so, dass die Werte die unmittelbar nach dem Abtrennen des Blattes mit dem Porometer gemessen wurden oft um einiges höher sind als die folgenden Werte (siehe Kapitel 7.4 Abb. 103) diese wurden für die Auswertungen aber nicht herangezogen, da sie nicht „gleichzeitig“ mit der Wägung gemessen wurden. Aus Abbild 172 wird auch klar, dass die Werte breit gestreut sind, wobei sich die meisten Werte doch im Bereich 0,1 bis 0,85 mmol/(m²·s) befinden. Natürlich kommen auch Werte darunter und darüber vor, der Hauptteil befindet sich jedoch bei allen Methoden ca. in dem Bereich, was bedeutet, dass bei den Meisten Versuchsblätter während der durchgeführten Messungen der Wert der Transpiration beziehungsweise des Leitwertes innerhalb diese Bereiches lag.

Tabelle 21 fasst die häufigsten Transpirationsklassen der 3 Messmethoden zusammen. Dabei zeigt die Wägung die höchsten Werte, die Porometer liegen darunter. Interessant ist, dass bei beiden Porometern (PMR-4 und AP4) die häufigsten Werte innerhalb der gleichen Klassen liegen. Widersprüchlich ist, dass die Differenz zwischen dem AP4 und dem PMR-4 sehr hoch ausfällt.

Methode	Häufigsten Transpirationswerte mmol/(m²·s)
Wägung	0,30 bis 0,35
PMR-4 Us	0,15 bis 0,20
AP4 Us	0,15 bis 0,20

Tab. 21: Transpirationswerte der Versuchsreihen im Vergleich, Waage, PMR-4 und AP4, Blattunterseite (Us)

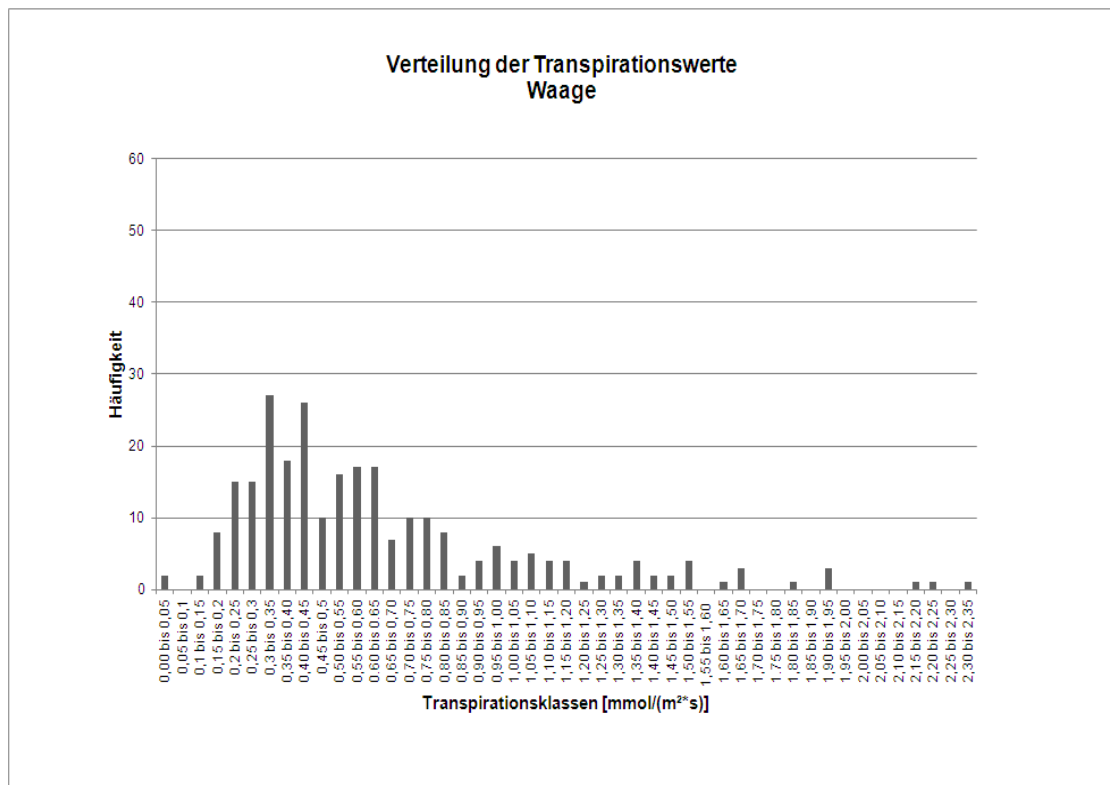


Abb. 169: Verteilung der Transpirationswerte der Wägungen, Vergleich der Messmethoden Waage, PMR-4 und AP4, eine Blattseite beziehungsweise Blattunterseite

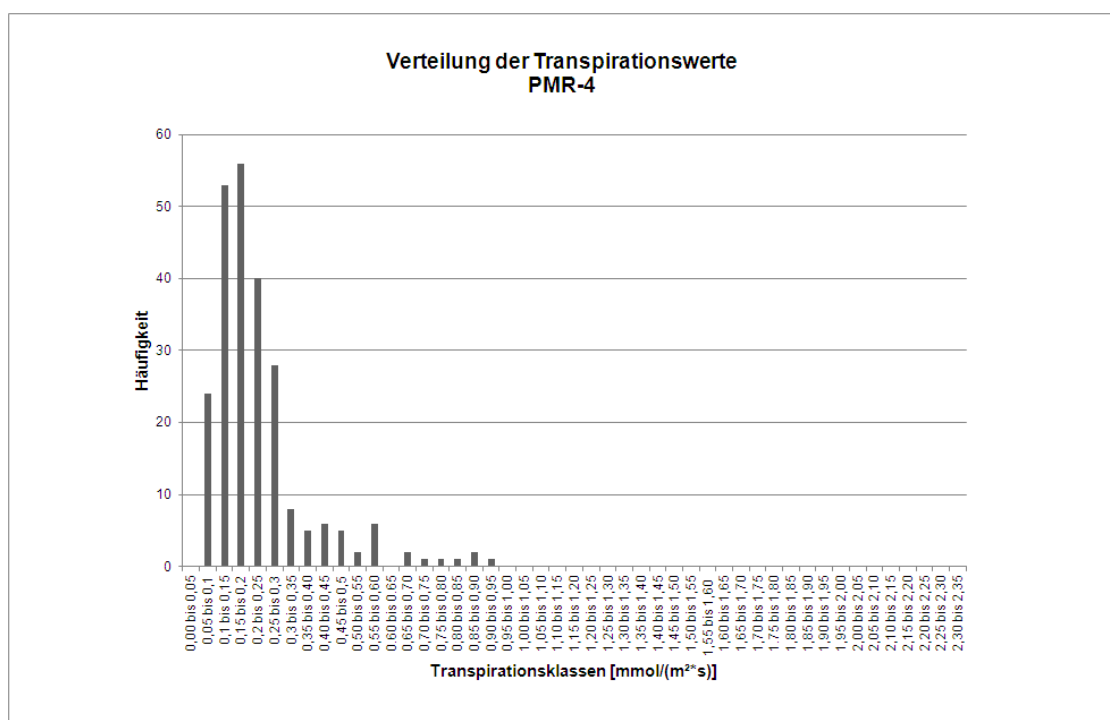


Abb. 170: Verteilung der Transpirationswerte der Messung mit dem PMR-4, Vergleich der Messmethoden Waage, PMR-4 und AP4, eine Blattseite beziehungsweise Blattunterseite

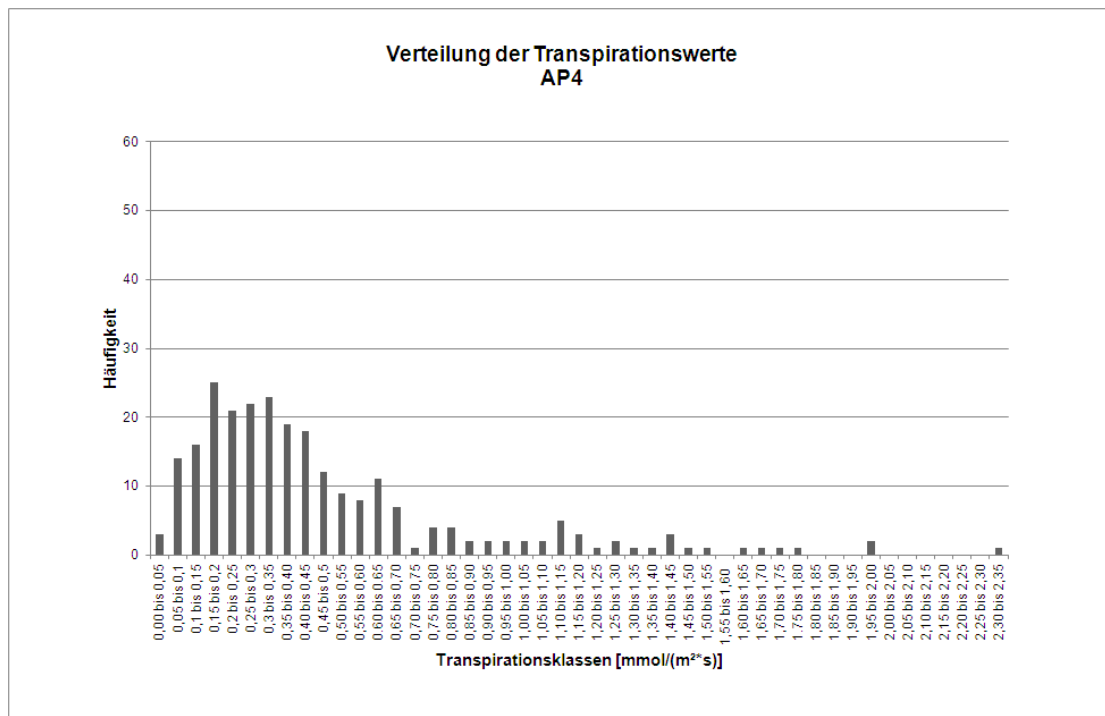


Abb. 171: Verteilung der Transpirationswerte der Messung mit dem AP4, Vergleich der Messmethoden Waage, PMR-4 und AP4, eine Blattseite beziehungsweise Blattunterseite

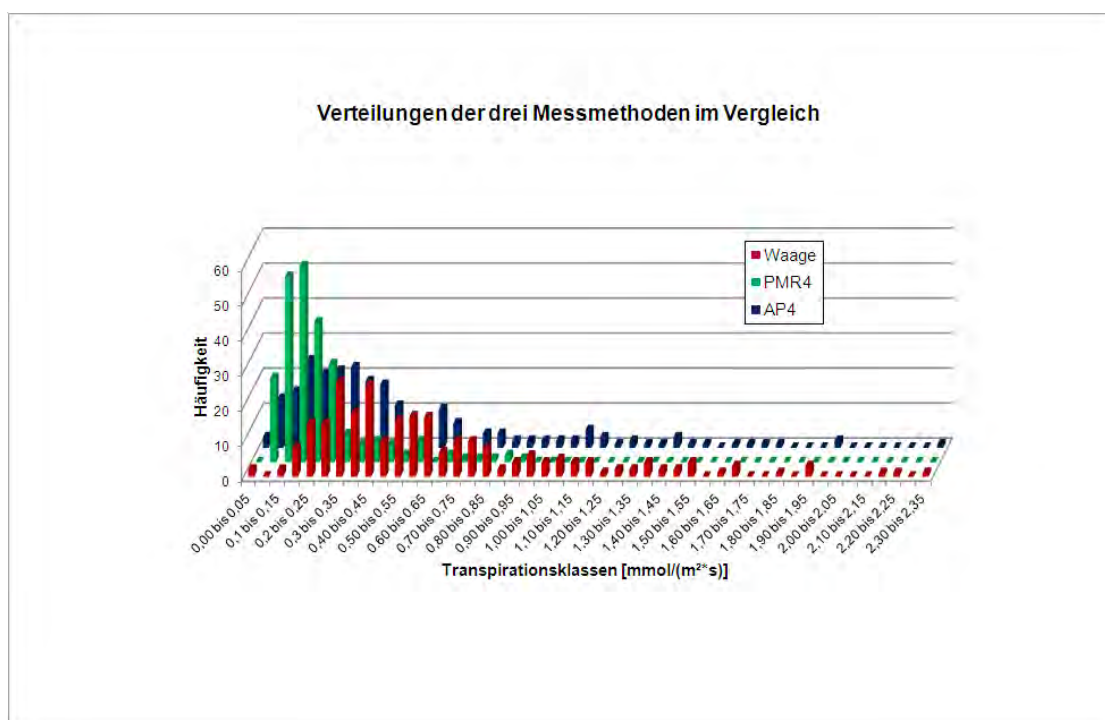


Abb. 172: Verteilung der Transpirationswerte, Waage, PMR-4 und AP4 im Vergleich
Vergleich der Messmethoden Waage, PMR-4 und AP4, eine Blattseite beziehungsweise Blattunterseite

Ein Vergleich der Werte in Tabelle 22 zeigt, dass die Unterschiede doch hoch sind, zwischen den beiden Geräten sogar 126%. Wieso das PMR-4 Porometer diesmal so große Unterschiede zu den Wägungen zeigt, obwohl es bei der vorhergehenden Messreihe „nur“ einen Unterschied von 32% ergab, lässt sich in aller Wahrscheinlichkeit mit einem auftretendem technischen Problem erklären. Daher ist der Wert von 126% zwischen den beiden Geräten mit Vorsicht zu betrachten. Das AP4 von Delta-T liegt mit einem Unterschied von 23% zu den Wägungen noch etwas näher, und betrachtet man die Werte der vorhergehenden Messreihe, so liegen die Werte bei 32% (PMR-4) und 23% (AP4) der beiden Geräte im Vergleich zur Wägung.

WERT	Transpiration [mmol/(m ² *s)] einseitig	Transpiration [mmol/(m ² *s)] Blattunterseite	Transpiration [mmol/(m ² *s)] Blattunterseite
Berechnet mit / Messmethode	Waage	Porometer PP Systems	Porometer Delta-T
Mittelwert	0.67	0.23	0.52
Median	0.54	0.19	0.35
Varianz	0.19	0.02	0.31
Differenz			
Waage/PP Systems		66%	
Waage/Delta-T		23%	
PP Systems/Delta-T		126%	

Tab. 22: Transpirationswerte der Versuchsreihen im Vergleich, Waage, PMR-4 und AP4, Differenzen zwischen den Methoden in %

Bis jetzt wurde aus den Porometerdaten immer die Transpiration berechnet, [siehe Kapitel 6.2.4, 6.4.4 und 6.5.4]. Dies ist, will man die Daten zur Bestimmung der in situ Transpiration verwenden nach gängiger Literatur und Wissensstand nicht mehr üblich. Zumindest schreibt McDERMITT (1990) in seinem Artikel Sources of Error in the Estimation of Stomatal Conductance and Transpiration from Porometer Data: „It is tempting to use the transpiration rate measured in a porometer to estimate transpiration rate in situ. Don't do it. At best, leaf temperature, air temperature, and boundary layer conductance will all have different values in the porometer than in the field. At worst, stomatal conductance and VPD (Vapour Pressure Difference) may be different as well“.

Er bietet für das Problem aber einen Lösungsansatz, indem die Umgebungsparameter, Temperatur, Luftfeuchte, in manchen Fällen auch Strahlung extra gemessen werden, und aus diesen dann, mit den Gerätewerten, die in situ Transpiration oder der Widerstand berechnet werden kann.

Diverse Porometer, auch das PMR-4 von PP Systems und das AP4 von Delta-T Devices, welche für diese Arbeit verwendet wurden, geben als Messwert entweder den stomatären Widerstand oder den Leitwert aus. Der stomatäre Widerstand wird durch den Öffnungszustand der Spaltöffnungen sowie den Umgebungsparametern wie Dampfdruckgradient, Temperatur und Strahlung beeinflusst. Vereinfacht gesagt, sind die Spaltöffnungen weit geöffnet, und die Dampfdruckdifferenz zwischen Blatt und Messkammerluft hoch, ist der Widerstand, den die Spaltöffnungen dem Wasserdampfaustritt entgegensetzten, gering. Sind die Spaltöffnungen zu und die Dampfdruckdifferenz gering, ist der Widerstand hoch. Der Leitwert ist der Kehrwert des Widerstandes, also hoher Widerstand, geringer Leitwert und umgekehrt. Somit ergibt sich ein eindeutiger linearer Zusammenhang zwischen dem Widerstand/Leitwert und der Transpiration der auch graphisch dargestellt werden kann.

Natürlich spielen viele andere Faktoren eine Rolle (siehe Kapitel 4.1), auf diese wird später noch eingegangen.

Werden zu den Wägungen noch die Luftfeuchte, die Blatttemperatur und die Umgebungstemperatur gemessen, können mit diesen Daten und aus der nach Gleichung [37] und [38] berechneten Transpiration die Leitwerte für die Wägungen berechnet werden (siehe Kapitel 6.5.4 Gleichungen [59], [60], [61] und [62]).

Der Vergleich, der mit dem Porometer gemessenen Leitwerte und den aus den Wägungen berechneten Leitwerte, stellen die folgenden Diagramme (Abb. 173 bis 176) dar. Diese zeigen den gleichen Verlauf, wie die Messkurven der Versuche aus Kapitel 7.4, Abbilder 83, 84, 85, 86 und 117.

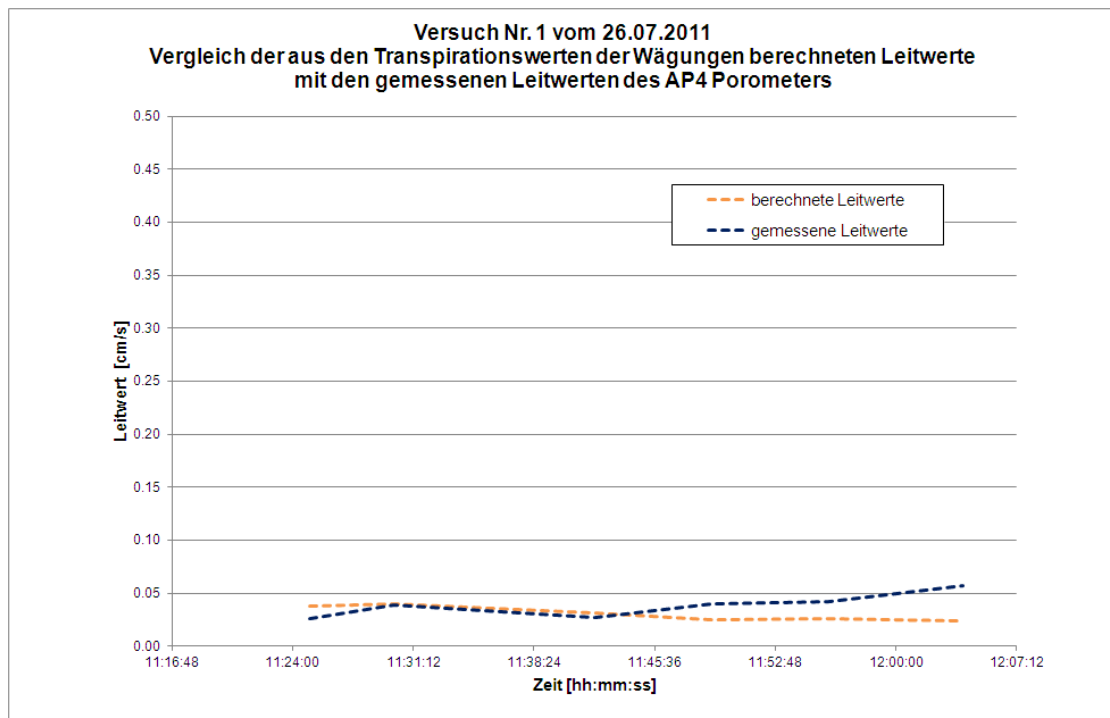


Abb. 173: Vergleich der berechneten mit den gemessenen Leitwerten, Versuch Nr. 1, 26.07.2011

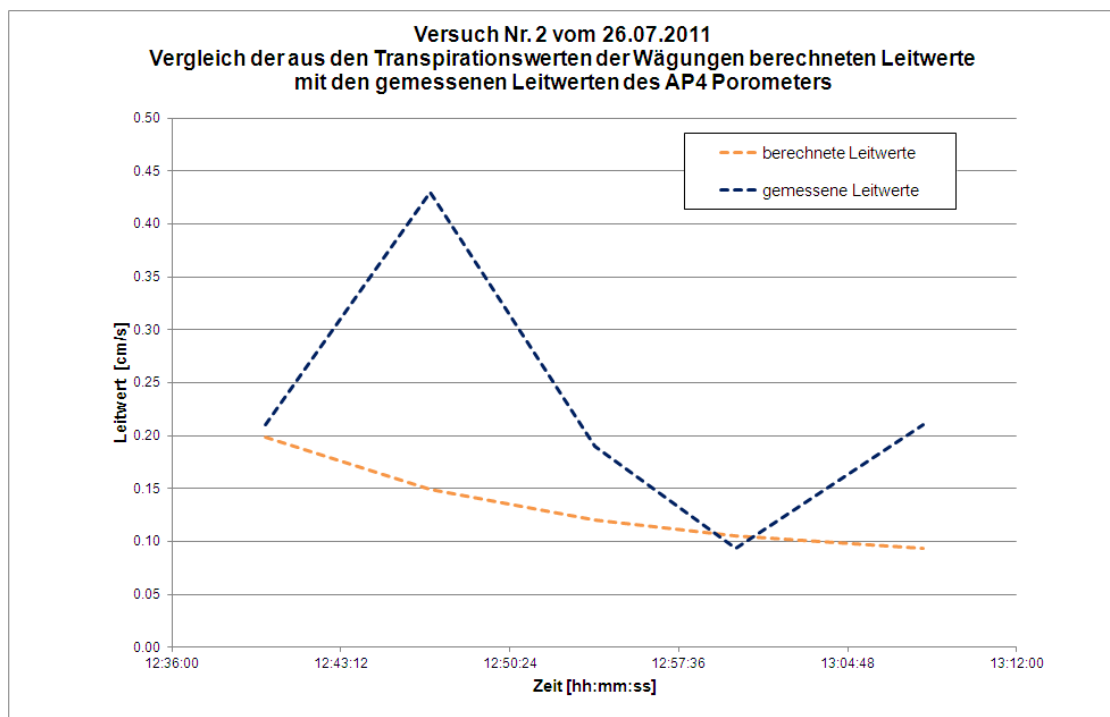


Abb. 174: Vergleich der berechneten mit den gemessenen Leitwerten, Versuch Nr. 2, 26.07.2011

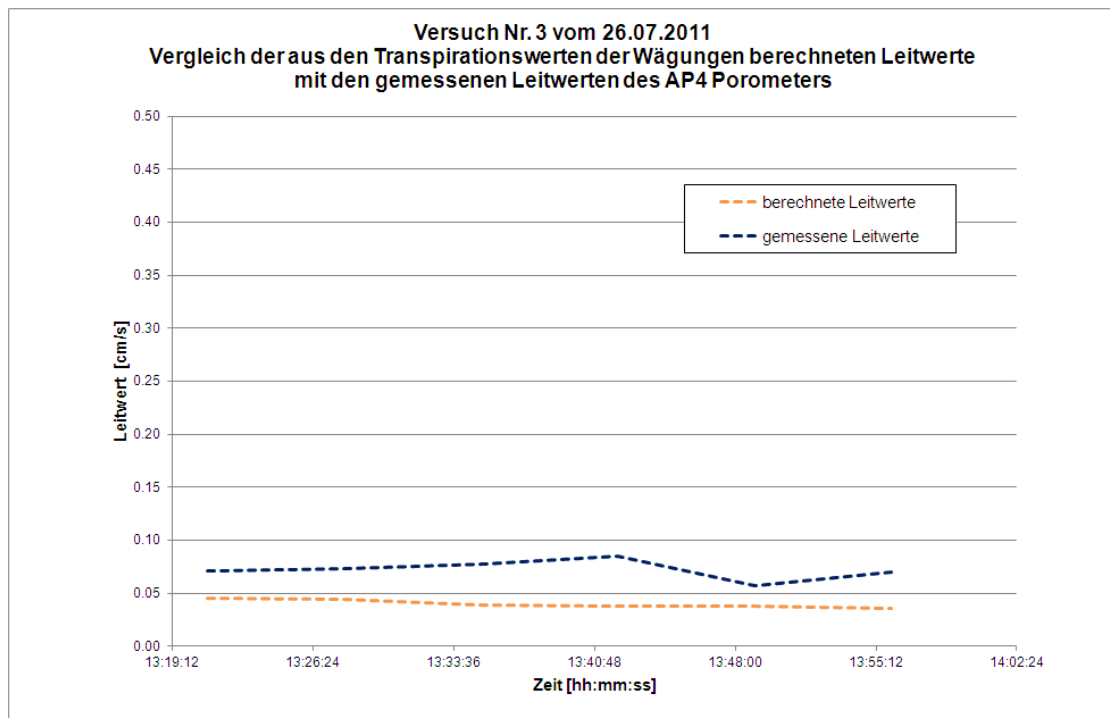


Abb. 175: Vergleich der berechneten mit den gemessenen Leitwerten, Versuch Nr. 3, 26.07.2011

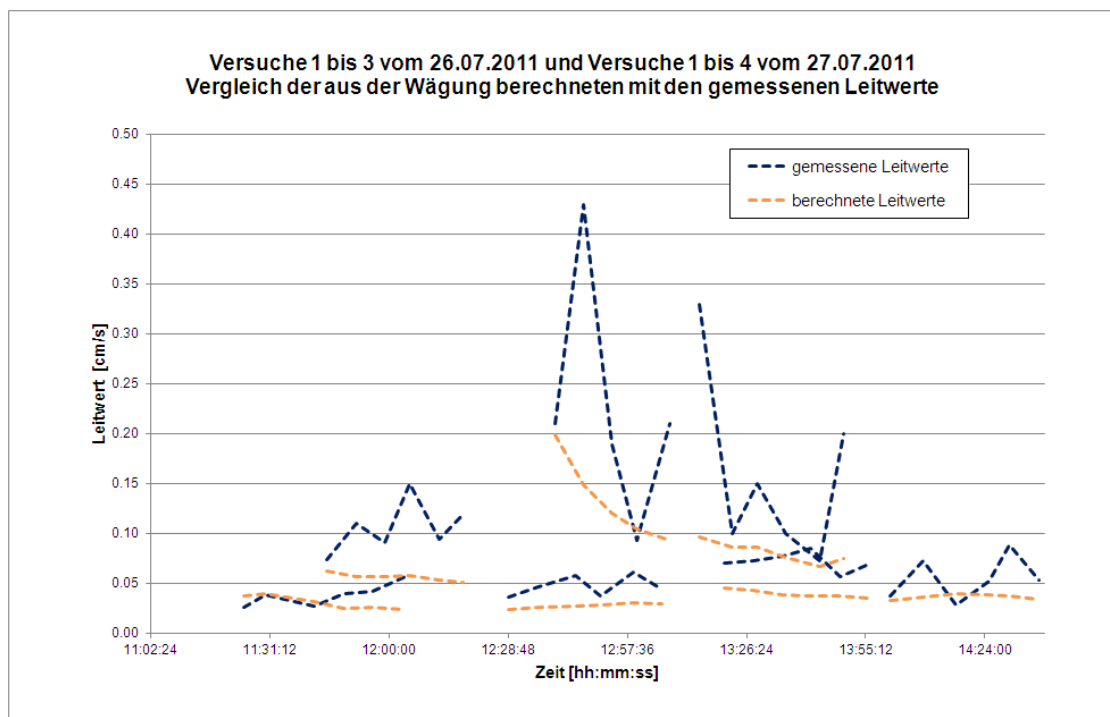


Abb. 176: Vergleich der berechneten mit den gemessenen Leitwerten, Versuch Nr. 1 bis 3, 26.07.2011 und Nr. 1 bis 4, 27.07.2011

Diskussion

Werden die gemessenen mit den berechneten Leitwerten oder der Transpiration verglichen, so ergibt sich ein linearer Zusammenhang (siehe Abb. 177 bis Abb. 182). Dieser folgt aus der schon getroffenen Annahme, dass die Transpiration durch die Öffnungszustände der Spaltöffnungen geregelt wird. Die in den dargestellten Versuchen durchgeführten Messungen wurden immer auf dem selben Blatt durchgeführt. Vergleicht man die Kurven der Leitwerte zu denen der Transpiration, ergeben sich die gleichen Muster, die „Peaks“ der Porometermessungen ergeben oft höhere Werte als die Kurven der aus den Wägungen berechneten Leitwerte.

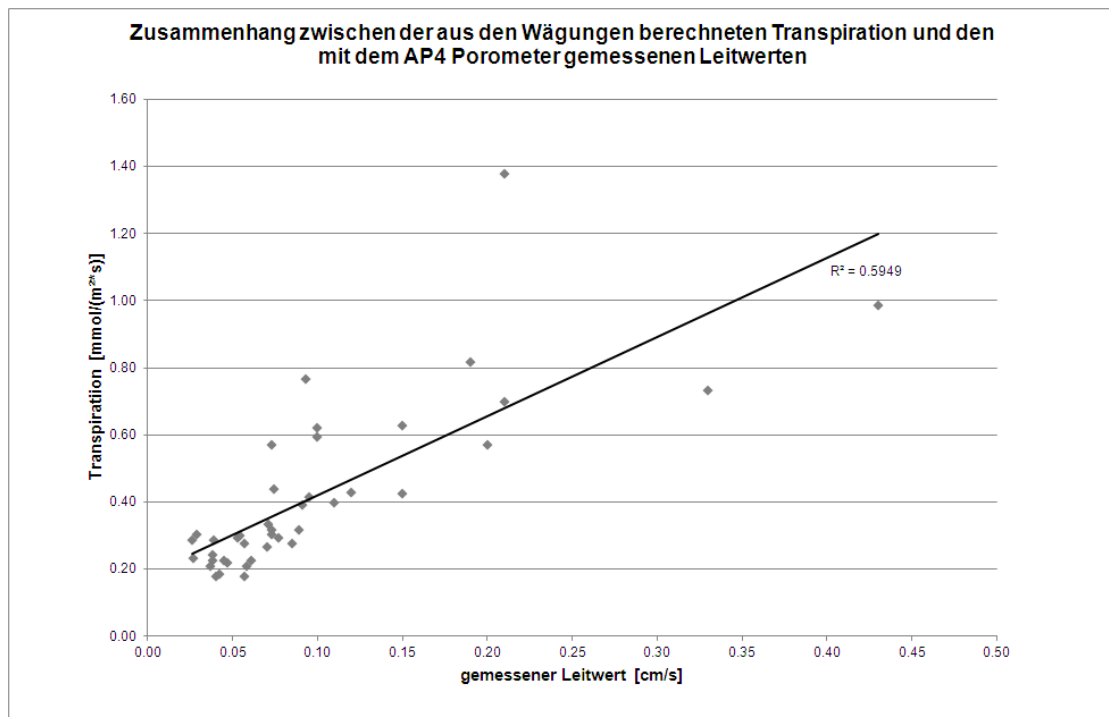
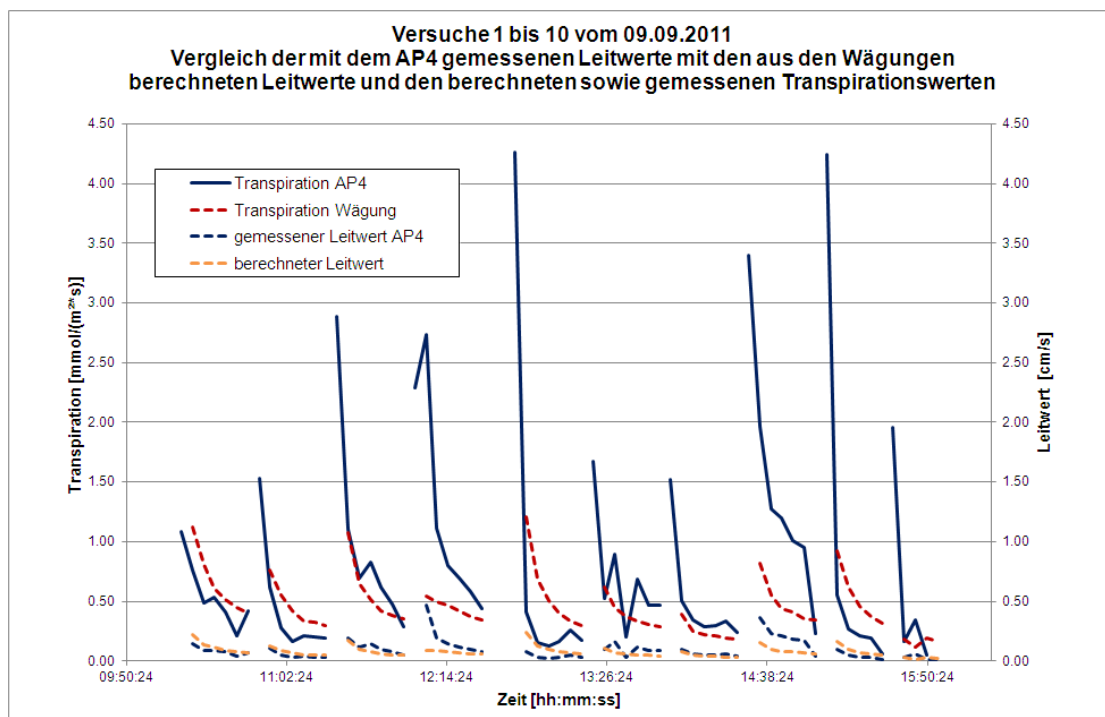
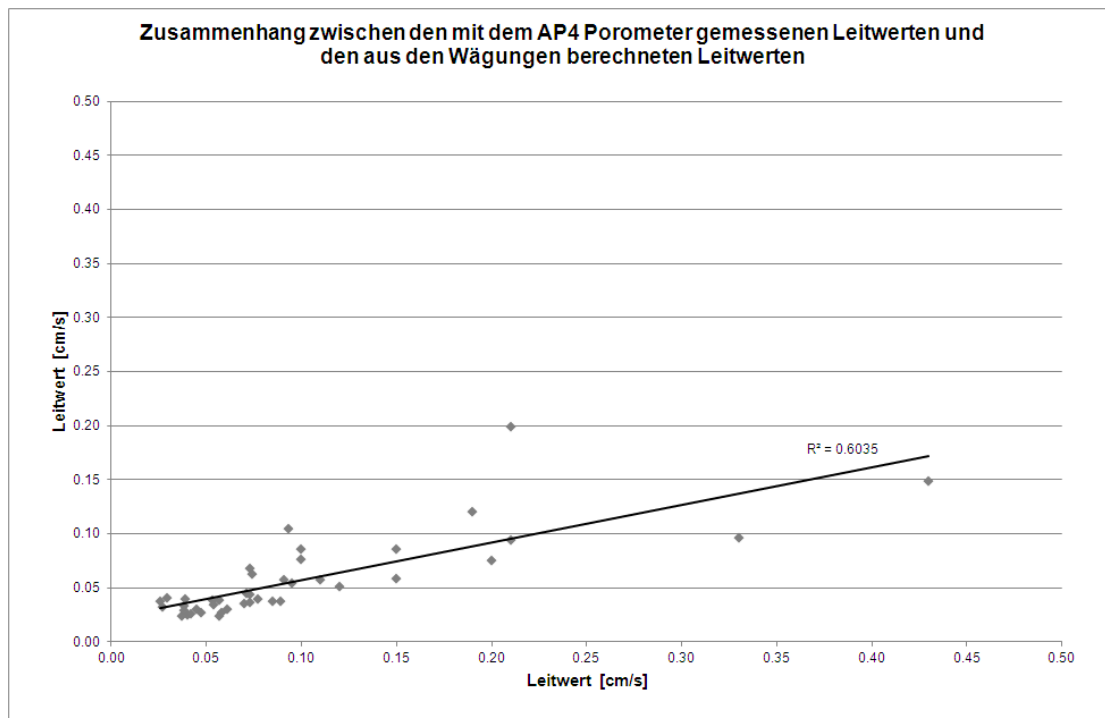


Abb. 177: Vergleich der berechneten Transpiration mit den gemessenen Leitwerten, Versuch Nr. 1 bis 3, 26.07.2011 und Nr. 1 bis 4, 27.07.2011

Diskussion



Diskussion

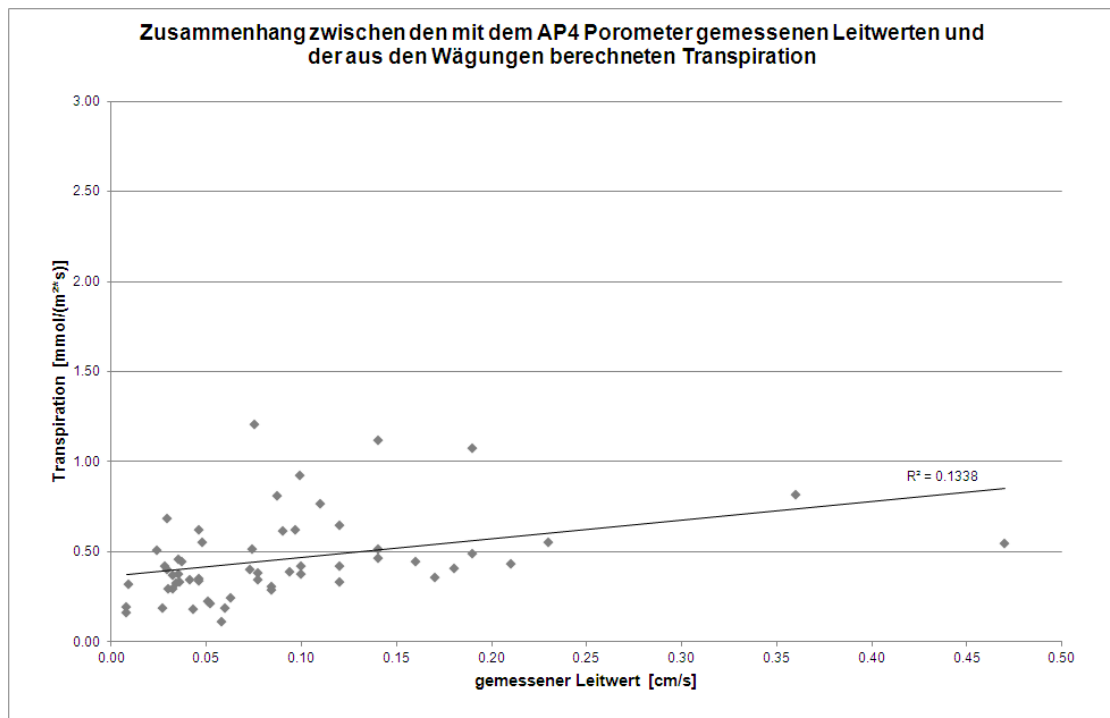


Abb. 180: Vergleich der gemessenen Leitwerten mit der Transpiration
Versuch Nr. 1 bis 10, 09.09.2011

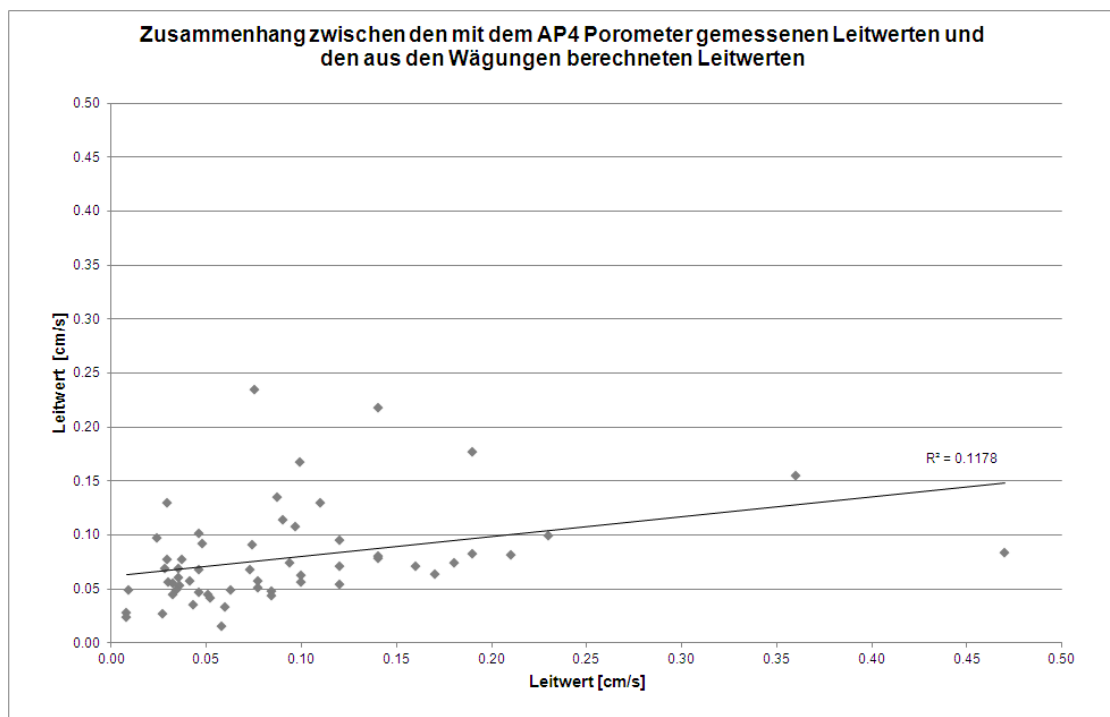


Abb. 181: Vergleich der gemessenen Leitwerten mit den berechneten Leitwerten
Versuch Nr. 1 bis 10, 09.09.2011

Diskussion

Abbild 182 gibt den Zusammenhang zwischen der aus der Wägung berechneten Transpiration und der aus den Porometerdaten berechneten Transpiration wieder.

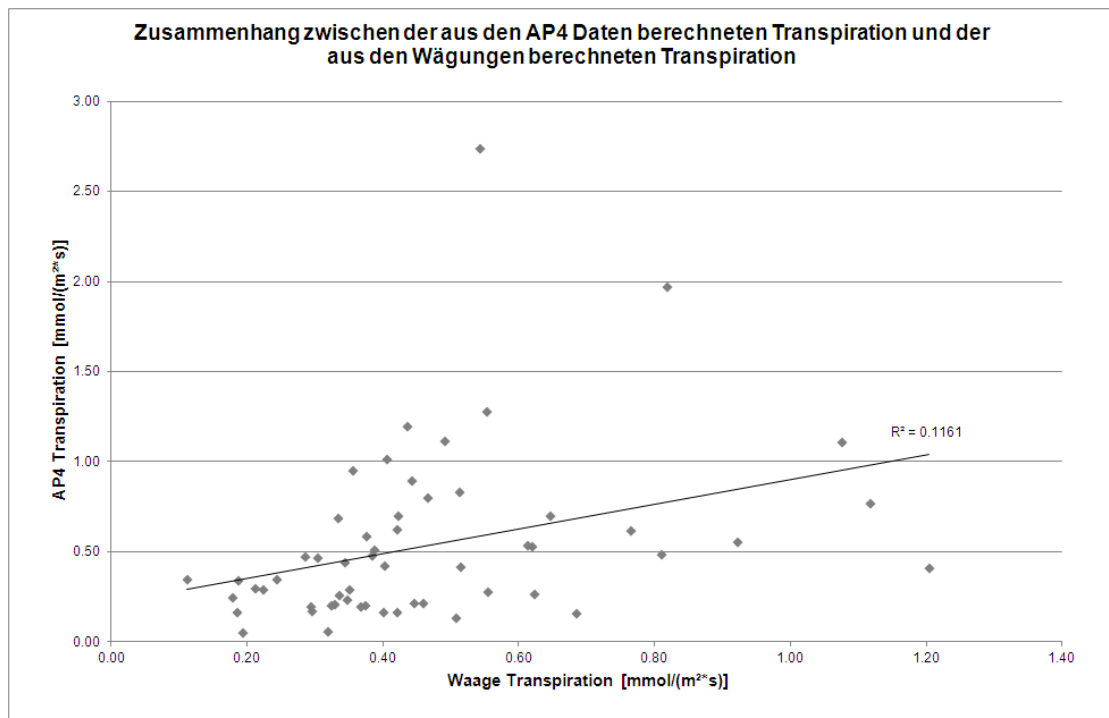


Abb. 182: Vergleich der aus den AP4 Daten berechneten Transpiration mit der aus den Wägungen berechneten Transpiration Versuch Nr. 1 bis 10, 09.09.2011

Es ist nicht zwingend notwendig, die Transpiration aus den Porometerdaten zu berechnen, es ist aber auch nicht falsch, diese in Betracht zu ziehen. Genauso kann mit der Kenntnis der entsprechenden Umgebungsparameter aus der Transpiration der Wägungen der Leitwert berechnet werden, setzt diese dann in Relation zu einander, kann die Messung überprüft werden. Die Korrelationen können, wie aus den Abbildern 177, 178, 180, 181 und 182 ersichtlich wird, aber schwanken und sind nicht immer gleich stark.

Vorsicht ist aber geboten, will man die Porometerwerte oder die Wägungswerte auf Freilandwerte übertragen.

Da die Messung im Porometer durch eine Manipulation der Blattumgebung und des Grenzflächenwiderstandes erfolgt, beziehungsweise diese zur Folge hat, können die Werte nicht eins zu eins in Transpiration umgerechnet und auf Freilandwerte übertragen

Diskussion

werden.

Durch die in der Messkammer des Porometers strömende Luft wird die feuchte Grenzschicht des Blattes abgetragen und damit der Dampfdruckgradient verändert, dies führt zu einem anderem Grenzschichtwiderstand als im Freiland, wo die Grenzschicht bei ungestörten (Windstillen) Bedingungen eine höhere Wasserdampfsättigung aufweist und der Widerstand damit wahrscheinlich höher ist als in der Messküvette. Um diesen Fehler zu berücksichtigen ist es nötig, den in situ vorliegenden Grenzschichtwiderstand zu bestimmen. Dazu kann bei geringer Windgeschwindigkeit und laminarer Strömung folgende Formel verwendet werden,

$$g_b = C(v/d)^{1/2} \quad [66]$$

g_b = einseitiger Grenzschicht Leitwert (one- sided boundary layer conductance) [m/s]

C = Koeffizient der Blattform, Windgeschwindigkeit und Turbulenzintensität

v = Windgeschwindigkeit [m/s]

d = durchschnittliche lineare Blattgröße [m]

folgende Näherungen können verwendet werden,

$$g_b \sim 0,006 (v/d)^{1/2} \pm 50\% \quad [m/s] \quad [67]$$

$$g_b \sim 0,24 (v/d)^{1/2} \quad [mol/(m^2/s)] \quad [68]$$

Sind die in situ Grenzschichtwiderstände für beide Blattseiten bestimmt, müssen diese mit dem stomatären Leitwerten der Blattober- und Unterseite kombiniert werden. Dies erfolgt durch Messung des Leitwertes der Blattunter- und Oberseite (dazu ergibt sich das Problem des höheren Leitwertes beziehungsweise der Transpiration im Vergleich zum Wert der Wägung). Und durch Berechnung der Serienschaltung von Grenzschichtwiderstand und stomatärem Widerstand wie folgt,

Diskussion

$$\frac{1}{g_L^u} = \frac{1}{g_s^u} + \frac{1}{g_b^u} \quad [69]$$

g_L^u = Gesamtleitwert der Blattunterseite [m/s]

g_s^u = stomatärer Leitwert der Blattunterseite [m/s]

g_b^u = berechneter Grenzschichtwiderstand der Blattunterseite [m/s]

analog erfolgt die Berechnung für die Blattoberseite.

Danach werden die Leitwerte parallel geschaltet und der Gesamtblattleitwert berechnet.

$$g_L = g_L^u + g_L^o \quad [70]$$

dabei sind g_L^u der Gesamtleitwert der Blattunterseite und g_L^o der Gesamtleitwert der Blattoberseite.

Die in situ Transpiration kann nun anhand der zusätzlich gemessenen Daten der Luftfeuchte, Temperatur, Blatttemperatur und gegebenenfalls Windgeschwindigkeit mit Gleichungen [59] bis [62] berechnet werden (McDERMITT 1990).

Obwohl die Berechnungen hier für die Anwendung des AP4 Porometers dargestellt sind, ist das Prinzip beim PMR-4 ident.

Um realitätsnahe Messwerte zu erhalten, ist also erheblicher Aufwand nötig.

Worauf ist bei der Porometrie nun zu achten. Da das Porometer eine Messkette von unterschiedlichen Messsensoren darstellt, kann es nur so genau sein wie der ungenaueste Sensor in der Kette. Daher müssen alle Sensoren regelmäßig kalibriert und kontrolliert werden. Eine genaue Einstellung der in die Messkammer führenden Luftfeuchte (AP4 als auch PMR-4) und des Volumenflusses (PMR-4) ist absolut notwendig um ein Reagieren der Spaltöffnungen auf die geänderten Umgebungsbedingungen zu vermeiden. Es solle zusätzlich noch andere Messfühler für die Messung der Umgebungsbedingungen verwendet werden um einen Abgleich zu ermöglichen und um die in situ Transpiration

berechnen zu können. Ein eins zu eins Umrechnen der Porometerdaten gibt nicht die Bedingungen im Freiland wieder, sondern die in der Messküvette. Diese können aber, wenn auf das Einstellen und Kalibrieren des Gerätes geachtet wurde, sowie nicht all zu lange gemessen wurde, durchaus den Umgebungsbedingungen entsprechen.

Die Daten können zum Abschätzen gut verwendet werden, will man Bestandesaufnahmen machen und Transpirationsraten hochrechnen (upscaling), ist die Umrechnung nicht geeignet.

Vergleicht man dazu die Wägungen, so stößt man gleich auf das erste Problem, die Abtrennung des Blattes ist ein schwerer Eingriff in das System. Versuche von KAISER und GRAMS (2006) mit *Mimosa pudica* zeigten, dass ein Reiz wie zum Beispiel eine Verbrennung eine Reaktion über die gesamte Pflanze hervorruft. Diese Reaktion bedingt ein Schließen der Spaltöffnungen, eine Reduktion der Photosyntheseleistung und eine Reduktion des CO₂ Austausches. Obwohl sich diese Versuche auf *Mimosa pudica* beziehen, kann nicht ausgeschlossen werden, dass auch bei anderen Pflanzen solche Reaktionen durch das Abtrennen von Blättern hervorgerufen werden. Sollte dies der Fall sein, und bewirkt das Abtrennen eine fortlaufende elektrische und physiologische Reaktion, welche die gesamte Pflanze erfasst, stellt sich die STOCKER-Methode zur Transpirationsbestimmung als fraglich heraus.

Rein technisch gesehen erspart man sich aber die komplexen Berechnungen der Grenzflächenwiderstände, da die Umgebung des Blattes nicht beeinflusst wird. Die Daten könne zur Abschätzung verwendet werden, sofern die Auswirkungen in Betracht gezogen werden. Jedoch sollte man in beiden Fällen (Wägung als auch Porometrie) immer genügend Messungen machen um einen Trend darstellen zu können, zusätzlich sollten noch die Strahlung und andere Parameter gemessenen werden.

Vergleichbar sind die beiden Methoden nur insofern, als das sie den Verlauf der Transpiration aufzeichnen, zumindest ergibt sich das aus den Versuchsserien für diese Arbeit. Beide Methoden greifen in das System Blatt/Umgebung ein und ändern somit die

Bedingungen. Die Abtrennung des Blattes führt zu physiologischen Reaktionen, das Einschließen des Blattes in die Messkammer bewirkt eine Anpassungsreaktion auf die geänderten Umgebungsbedingungen.

Es wurden viele Untersuchungen hinsichtlich der Vergleichbarkeit von diversen Porometertypen als auch anderen Methoden zur Transpirationsbestimmung durchgeführt mit unterschiedlichen Ergebnissen. Einige Autoren fanden keine Korrelationen zwischen gravimetrischen Methoden und der Porometrie als auch der Thermographie und führten diese Unvergleichbarkeit auf die unterschiedlichen Öffnungszustände der Spaltöffnungen sowie auf Anpassungsreaktionen dieser zurück (IDSO und ALLEN 1988, IDSO et al 1987 zitiert von McDERMITT 1990).

Andere Autoren dagegen fanden gute Korrelationen zwischen gravimetrischen Methoden und der Porometrie (McDERMITT 1990, MARSHALL und WOODWARD 1985).

Die bedingte Vergleichbarkeit der gravimetrischen Methode und der Porometrie ergibt sich aus dem Eingriff in das Messsystem.

Eine Methode ohne in das Messsystem einzugreifen ist die Thermographie. Diese Methode ist in der Technik eigentlich schon seit den 1960 Jahren bekannt. Seit den 1970 und 1980 Jahren gibt es Versuche die Bestandestemperatur mit Infrarotthermometern zu messen. Als weitere Folge wurde die Thermographie in der Pflanzenphysiologie eingesetzt. Vor allem JONES (2004) hat sich ausgiebig mit dem Thema beschäftigt.

Eine durch Transpiration bedingte Kühlung des Blattes wird im Vergleich zu einem abgetrennten Blatt das sich aufgrund der fehlenden Verdunstung erwärmt als Temperaturdifferenz sichtbar (GRANT et al. 2006).

In den Versuchsreihen vom 05.11.2011 und 06.11.2011 konnten diese Zusammenhänge nur bedingt nachvollzogen werden. Da die Versuche im Herbst unter Freilandbedingungen durchgeführt wurden, waren die Strahlungsverhältnisse nicht optimal (tiefer Sonnenstand,

geringe Strahlungsleistung und höherer Rotlichtanteil). Des weiteren waren auch die Temperaturen sowie der am 06.11.2011 herrschende Wind für eine ungestörte Thermographie nicht günstig.

Die Transpirationsraten von *Hedera helix* waren eher gering. Bei *Polygonum aubertii* ergaben die Messungen zwar höhere Leitwerte aber eindeutige Korrelationen konnten auch da nicht heraus gelesen werden. Mit eindeutigen Korrelationen ist der lineare Zusammenhang zwischen I_G und dem Leitwert (gemessen mit dem Porometer) gemeint, sowie die nicht lineare Beziehung zwischen CWSI (Crop Water Stress Index) und dem Leitwert. Mit zunehmendem I_G nimmt auch der Leitwert zu, der CWSI (Crop Water Stress Index) verhält sich genau umgekehrt, mit abnehmendem CWSI (Crop Water Stress Index) steigt der Leitwert, diesmal aber nicht linear sondern exponentiell (LEINONEN und JONES 2004).

Die Korrelationen die aus den Versuchsreihen in dieser Arbeit dargestellt werden konnten lagen bei I_G und Leitwert unter 30%.

Bedingt durch die ungünstigen und wechselnden Umweltparameter konnten keine besseren Zusammenhänge erzielt werden. Auch wurde die Methode im Vergleich zu JONES doch sehr vereinfacht und der potenzielle Fehler damit sicher vergrößert.

Was sich jedoch ergab ist, dass unter besseren Bedingungen eine Korrelation durchaus vorliegt (siehe LEINONEN und JONES 2004), und dass die Methode, um wirklich sicher und einfach im Freiland eingesetzt werden zu können, noch einiges an Entwicklung benötigt. Dies sei im Hinblick darauf gesagt, dass in dieser Arbeit die Methode so vereinfacht wurde, dass eine einfache Handhabung ohne komplizierte Auswertungen und Berechnungen möglich wird. Es muss aber bedacht werden, dass mit diesen Vereinfachungen die Fehlermöglichkeiten steigen.

Tabelle 23 gibt eine Zusammenfassung der unterschiedlichen Vor- und Nachteile, sowie der möglichen Fehlerquellen der verwendeten Methoden wieder. Natürlich können noch

Diskussion

andere Vor- und Nachteile je nach Anwendungsbereich der Methoden gefunden werden. Die hier erwähnten geben nur einen Überblick über die für diese Arbeit relevanten Anwendungen wieder.

Messgerät oder Methode	Vorteile	Nachteile	Fehlerquellen	Worauf zu achten ist
WAAGE	einfache Methode	zerstörende Methode. Physiologische Reaktionen	Schwingen der Waage.	IVANOFF-Effekt
	wenige Fehlerquellen und Fehlermöglichkeiten. Keine Sensoren und komplexe Messketten	Unter Freilandbedingungen oft schwer wiederholbar.	Diverse Effekte welche durch das Abtrennen der Blätter zustande kommen	Waagen Schwingungen
		Aufwand höher als bei Porometer.		
		Messzeitpunkt und Messdauer ohne Vorversuche schwer zu bestimmen.	Waageneinstellung (Libelle).	Wind und Strahlung
	Keine künstliche Manipulation der Blatumgebung. Daher keine Änderung der Grenzschicht und der Strahlungsbedingungen.	Abschirmung der Waage von Wind und Strahlung nötig daher werden bei der Messung wieder andere Bedingungen geschaffen als am Standort.	Temperaturdrift der Waage bei starker Bestrahlung. Temperaturänderung	Bestimmung der Blattfläche
	Die ganze Blattfläche wird erfasst. Kein Schluss von einer kleinen Fläche auf die gesamte Blattfläche oder Pflanze.		Blattflächenbestimmung	Umweltparameter erfassen.
PMR-4 STEADY STATE POROMETER	Physikalische Parameter gehen direkt in die Berechnung ein.	Künstliche Manipulation der Blatumgebung.	Einstellen der Durchflussrate und der Eingangsfeuchte	Kalibrierung der Sensoren
	Zerstörungsfreie Methode daher keine physiologischen Reaktionen.	Von einer kleinen Blattfläche (1,25 cm ²) wird auf das gesamte Blatt geschlossen.	Messung zu kurz oder zu lang. Im ersten Fall noch kein Gleichgewicht erreicht, im zweiten Fall reagieren die Spaltöffnungen bereits auf die geänderte Umgebung.	Einstellen der Umgebungsfeuchte. Diese immer mit zusätzlichem Sensor messen.
	Schnell und einfach im Freiland anzuwenden.	Durch Ventilation der Blattkammer kann es zu einem Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung kommen.	Sensoren nicht kalibriert.	Änderung der ausgehenden Feuchte deutet auf Änderungen der Stomatazustände.
	Änderungen des Stomata - zustandes durch Änderung der Ausgangsfeuchte erkennbar.	Durch Strömung in der Blattkammer ist eine Ablösung der Grenzschicht möglich, es kommt zu einer Änderung der Diffusionsverhältnisse und des Schließzustandes der Spaltöffnungen.	Geänderte Strahlungsbedingungen durch Messkammer.	Messzeit nicht zu kurz aber auch nicht zu lang. Empfehlung des Herstellers beachten.
			Temperaturunterschied zwischen Blattkammer und Umgebungsluft zu hoch.	Zusätzliche Messungen der Umweltparameter durchführen.
AP4 TRANSIENT POROMETER	Sehr einfach zu bedienen.	Künstliche Manipulation der Blatumgebung.	Einstellung der Messkammerfeuchte	Richtige Kalibrierung mit Platte
	Zerstörungsfreie Methode keine physiologischen Reaktionen.	Von einer kleinen Blattfläche wird auf das gesamte Blatt geschlossen.	Temperaturdifferenz zwischen Umgebungsluft und Messkammer zu hoch oder zu gering.	Umgebungsfeuchte
	Schnell und einfach im Freiland anzuwenden.	Vergleich mit Kalibrierplatte, keine direkten physikalischen Parameter eingehend. Berechnungsgrundlage ist die Feuchte-änderung im Zeitverlauf.	Kalibrierung der Sensoren.	Umgebungstemperatur
	Durch den Vergleich der Werte mit einer intern gespeicherten Wertetabelle sind die Fehlermöglichkeiten durch den Bediener geringer als bei PMR-4.	Blattkammer reagiert schneller auf Erwärmung durch Sonnenstrahlung.	Kalibrierung mit der Kalibrierplatte. Fehler zu hoch.	Temperaturdifferenz zwischen Blattkammer und Umgebung.
	Durch den transient Modus, wobei während der Messung keine Luftströmung herrscht besteht keine Gefahr der Ablösung der Grenzschicht. Messung daher realitätsnäher.	Änderung der Strahlungsbedingungen durch Blattkammer.	Umgebungsfeuchte zu hoch. Spielt nur im tropischen Klima eine Rolle.	Zu starke Erwärmung der Blattkammer.
INFRAROT THERMOGRAPHIE	Nicht zerstörende Methode.	Derzeit noch aufwendig.	Emissivität der Blattflächen	Emissivität der Blattflächen
	Erfasst auch große Flächen.	Derzeit noch sehr Fehleranfällig und nur von Experten (Thermographie) anzuwenden.	Optische Ebene der Blätter verschieden.	Alle zu messenden Blätter sollten in der gleichen optischen Ebene sein.
	Greift nicht in das System Blatt/Umgebung ein und ändert somit nicht die Blatumgebung.	Berechnungen der Bilder aufwendig.	Einstellung der Kamera unscharf.	Hintergrundstrahlung bestimmen.
	Sehr empfindliche Methode wenn Thermokameras mit entsprechender Auflösung und Genauigkeit eingesetzt werden.	Ein Vergleich mit Porometrie oder Berechnungen aus meteorologischen Daten derzeit noch nötig.	Hintergrundstrahlung nicht oder falsch bestimmt. Thermische Reflektionen und Einflüsse aus der Umgebung.	Umgebungstemperatur und Umgebungsfeuchte bei Kamera einstellen.
			Wasserdampf in der Atmosphäre. (Bei Thermokameras die dies nicht kompensieren.)	Umweltparameter mit messen.

Tab. 23: Vorteile, Nachteile, Fehlerquellen der Methoden im Vergleich

Werden die gravimetrischen mit den porometrischen Methoden unter kontrollierten Bedingungen, das heißt im Glashaus bei konstanter Temperatur und Luftfeuchte sowie gleichmäßigem Strahlungsklima mit einander verglichen so halten sich die Unterschiede mit 32% (PMR-4) beziehungsweise 23% (AP4) in relativ vernünftigen Grenzen. Jedoch sind diese Unterschiede sehr hoch will man die verschiedenen Daten zum Berechnen eines Bestandeswertes anwenden.

Ein direkter Vergleich der unterschiedlichen Methoden ist nicht wirklich möglich, da diese auf sehr unterschiedlichen Prinzipien beruhen. Werden die Umgebungsbedingungen konstant gehalten, (siehe oben), kann es durchaus zu einer Übereinstimmung oder Korrelation zwischen den Methoden kommen. Unter wechselnden Freilandbedingungen wird es schwer, die Einflüsse der Umweltparameter zu minimieren und dadurch werden auch die Korrelationen geringer ausfallen.

Obwohl die Vergleichbarkeit der einzelnen Messmethoden eher gering ist, zeigt sich beim Betrachten der Wiederholbarkeit der Messreihen, dass die Daten in sich konsistent sind. Die Ergebnisse sind unter gegebenen Bedingungen durchaus reproduzierbar und verlässlich.

Da die gravimetrische Methode einen massiven Eingriff in das System Pflanze darstellt (siehe Versuche mit *Minosa pudica*) ist sie doch zu hinterfragen oder zumindest mit Vorsicht anzuwenden. Die Porometrie stellt eine Alternative da, insofern der Stresseffekt durch die Abtrennung von Pflanzenteilen ausbleibt. Durch die Blattkammer wird ein eigenes Klima geschaffen, auf das die Spaltöffnungen reagieren. Somit ist der gemessene Bereich vielleicht gar nicht repräsentativ für das ganze Blatt oder die ganze Pflanze.

Die Infrarot Thermographie stellt eine Alternative dar, nur ist der Aufwand zur Zeit noch erheblich und die Methode für eine einfache Freilandanwendung noch nicht ganz ausgereift.

Diskussion

Egal welche Methode verwendet wird, es ist immer wichtig die meteorologischen Daten mit zu erfassen, genügend Messwerte zu sammeln um Trends zu erfassen und nicht zuletzt die Daten auf Plausibilität zu überprüfen. So kann man sich an die „realen“ Werte am Standort annähern.

Literaturverzeichnis

- ARLAND, A., 1955: Die Anwelkmethode im Dienste des Landbaues. 1. Aufl. VEB, Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin.
- BRESINSKI, A., KÖRNER, C., KADEREIT, W., J., NEUHAUS, G., SONNEWALD, U., 2008: Strasburger, Lehrbuch der Botanik. 36. Aufl. Spektrum, Heidelberg.
- BURGERSTEIN, A., 1920: Die Transpiration der Pflanzen. Zweiter Teil, 1. Aufl. Gustav Fischer, Jena.
- BURGHARDT, M., RIEDERER M., 2003: Ecophysiological relevance of cuticular transpiration of deciduous and evergreen plants in relation to stomatal closure and leaf water potential. In: Journal of Experimental Botany 2003, Vol. 54, No. 389, S 1941-1949.
- DELTA-T DEVICES, 2004: User Manual for the Porometer type AP4. Delta-T Devices, Cambridge.
- DIERSCHKE, H., 2005: Zur Lebensweise, Ausbreitung und aktuellen Verbreitung von *Hedera helix*, einer ungewöhnlichen Pflanze unserer Flora und Vegetation. In: Hoppea, Denkschr. Regensb. Bot. Ges. 66, Schönfelder-Festsschrift (2005): S. 187-206.
- ELLENBERG, H., WEBER, H. E., DÜLL, R., WIRTH, V., WERNER, W., PAULISSEN, D., 1992: Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. Scripta Geobotanica 18, 2. Auflage.
- FALK, O. S., 1966: Quantitative Determinations of the Effect of Excision on Transpiration. In: Physiologia Plantarum 1966, Vol. 19, S. 493-522.
- FOUAD, A. N., RICHTER, T., 2006: Leitfaden Thermographie im Bauwesen. 1. Aufl. Fraunhofer IRB Verlag.

GRABE, M., 2005: Measurement Uncertainties in Science and Technology. Springer, Braunschweig.

GRANT, M. O., CHAVES M. M., JONES G. H., 2006: Optimizing thermal imaging as a technique for detecting stomatal closure induced by drought stress under greenhouse conditions. In: *Physiologia Plantarum* 2006, Heft 127, S. 507-518.

HALL, O. D., SCURLOCK, O. M. J., BOLHAR-NORDENKAMPF, P. H., LEEGOOD, C. R., LONG, P. S., 1993: Photosyntheses and Production in a Changing Environment, A Field and Laboratory manual. 1. Aufl. Chapman and Hall.

HECKER, U., 1998: Bäume und Sträucher. 2. Aufl. BLV, München,

HEINRICH, D., HERGT, M., 1991: dtv-Atlas zur Ökologie. 2 Aufl. dtv, München.

KAISER, H., GRAMS, E. E. T., 2006: Rapid hydropassive opening and subsequent active stomatal closure follow heat-induced electrical signals in *Mimosa pudica*. In: *Journal of Experimental Botany* 2006, Vol 57, No. 9, S. 2087-2092.

LARCHER, W., 2001: Ökophysiologie der Pflanzen. 6. Aufl. UTB, Stuttgart.

LEINONEN, I., GRANT M. O., TAGLIAVIA P. P. C., CHAVES M. M., JONES G. H., 2006: Estimating stomatal conductance with thermal imagery. In: *Plant, Cell and Environment* 2006, Heft 29, S. 1508-1518.

LEINONEN, I., JONES G. H., 2004: Combining thermal and visible imagery for estimating canopy temperature and identifying plant stress. In: *Journal of Experimental Botany*, Band 55, Nr. 401, S. 1423-1431.

LÖSCH, R., 2001: Wasserhaushalt der Pflanzen. 1. Aufl. Quelle und Meyer, Wiebelsheim.

MARSHALL, B., WOODWARD, I. F., 1985: Instrumentation for environmental physiology. 1. Aufl. Cambridge University Press, Cambridge.

MONTEITH, L. J., 1978: Umweltphysik. Dr. Dietrich Steinkopf Verlag, Darmstadt.

NULTSCH, W., 2001: Allgemeine Botanik. 11. Aufl. Thieme, Stuttgart.

PEARCY, W. R., EHLERINGER, J., MOONEY, A. H., RUNDEL, W. P., 1991: Plant Physiological Ecology. 2. Aufl. Chapman and Hall, London.

PEARCY, W. R., SCHULZE, E. D., ZIMMERMANN, R., 1991: Measurement of transpiration and leaf conductance.

PP-SYSTEMS, 2002: PMR-4 Steady State Porometer, Operator's Manual, Version 3.00. PP-Systems, Hertfordshire.

RUHLAND, W., 1956: Handbuch der Pflanzenphysiologie, Band III, Pflanze und Wasser. Springer Verlag, Würzburg.

SCHOPFER, P., BRENNICKE, A., 2006: Pflanzenphysiologie. 6. Aufl. Spektrum, Akad. Verl., München.

SCHULZE, E. D., BECK, E., MÜLLER-HOHENSTEIN, K., 2002: Pflanzenökologie. 1. Aufl. Spektrum, Akad. Verl., Berlin.

SCHUMANN: Analytische Messtechnik: URL: <http://www.schumann-analytics.de>, (abgerufen am 3.Jänner 2012).

SONNTAG, D., 1990: Important new values of the physical constants of 1986, vapour pressure formulations based on ITC-90, and psychrometric formulae. Z. Meteorol., 40,

S. 340-344.

STÅLFELT, G. M., 1932: Der stomatäre Regulator in der pflanzlichen Transpiration. In: *Planta/Archiv für wissenschaftliche Botanik* 1932, Heft 1, Band 17., S. 22-85.

STOCKER, O., 1929: Eine Feldmethode zur Bestimmung der momentanen Transpirations- und Evaporationsgröße. Band II, *Berichte der Deutschen Botanischen Gesellschaft*, 47, Seite 126-136.

VOGEL, G., ANGERMANN, H., 1984: *dtv-Atlas zur Biologie*. 19. Aufl., dtv, München.



PMR-4 Steady State Porometer



Built-in CO₂ Analyzer And Steady State Porometer In One System

The PMR-4 is a steady-state, continuous flow porometer described by Dr. K.J. Parkinson in 1985 for the study of water relations in the field and laboratory. A high precision CO₂ analyzer (EGM) and air supply unit are integral to the system adding to the instrument versatility. The PMR-4 measures the stomatal conductance of leaves to water vapour. This is achieved by passing air of a known humidity and flow rate through a leaf cuvette, and measuring the rise of humidity of the outlet air. The porometer contains two humidity sensors for measuring the relative humidity of air entering and leaving the cuvette, a thermistor to measure head temperature and a fully cosine corrected PAR sensor.

PMR-4 Specifications	
Construction	Chamber: Aluminium Control Unit: High impact aluminium case
Chamber Window	Interference filter which transmits largely below 0.7 microns (<50% transmission at 0.71 microns)
Chamber Window Dimensions	25mm L x 5mm W
Measurement Range	0 - 9,999 mmol m ⁻² s ⁻¹ (Stomatal Conductance)
Measurement Accuracy	< 40 μmol m ⁻² s ⁻¹ = 10 % > 40 μmol m ⁻² s ⁻¹ = 20 %
%RH Calibration	Absolute: 2% Differential: 1%
Humidity Sensors	2 capacitance type RH sensors
Temperature Sensor	1 Linearized thermistor network
PAR Sensor	Filtered Silicon Cell (Cosine corrected) Response: 400-700 nm Precision: 10 μmol m ⁻² s ⁻¹
Power Supply	12V rechargeable battery providing up to 4 hours use.
Air Supply Unit	Flow Control: 0-200 ml/min (Mass flow control) RH Control: Proportional diversion of the input air through a drying column.
Data Storage	Up to 1,500 records
Dimensions	Chamber: 275mm L x 32mm W Control Unit: 220mm W x 150mm D x 120mm H
Weight	Chamber: 400 g. Control Unit: 1 kg.

Thermal equilibrium of the sensors and the cuvette is achieved by careful design of the porometer head. It is a compact unit made from aluminium alloy, with tortuous air passages for air entering before the inlet humidity sensor, and leaving after the outlet sensor. Also, the sensors are mounted in close proximity, directly into the head.

Typically, the porometer will equilibrate with the leaf within 15-20 seconds to give a rapid measurement. This is necessary because stomata can respond very rapidly to environmental change. The ability to adjust inlet air humidity and flow rate enables the user to minimize the impact of changing leaf microclimate, or alternatively to study the effects of varying RH.

Our SRC-1 Soil Respiration Chamber can also be used with the PMR-4 for measurement of soil respiration if required. For technical specifications on the internal EGM and air supply unit, please refer to our web site.

Contact Us At:

PP Systems -110 Haverhill Rd., Suite 301 - Amesbury, MA 01913 U.S.A.
Tel: +1 978-834-0505 Fax: +1 978-834-0545

PP Systems - Unit 2, Glovers Court, Bury Mead Rd.
Hitchin, Herts SG5 1RT UK
Tel: +44 1462-453411 Fax: +44 1462-431090

E-Data Sheet



Pflanzenphysiologie

Stomatäre Leitfähigkeit

AP4-Porometer



- Direktanzeige des stomatären Widerstandes bzw. der Leitfähigkeit mit Möglichkeit der Angabe in Molareinheiten
- Einfache, menügesteuerte Feldkalibrierung
- Speichert bis zu 1500 Meßwerte, mit Notizfunktion
- Minimiert die Blattbeanspruchung beim Messen

Die Stomata-Öffnungen kontrollieren den Wasserverlust von Pflanzenblättern und die Aufnahme von Kohlendioxid für die Photosynthese. Sie sind ein wichtiger Indikator der physiologischen Verfassung der Pflanzen und lassen wichtige Rückschlüsse auf deren Reaktion auf sich verändernde Umweltbedingungen (Luftverschmutzung, Trockenstreß etc.) zu.

Das Porometer Modell **AP4** ist ein Instrument der **neuen Generation** und wurde als zyklisches Diffusionsporometer entworfen, das genaue, einfache und wiederholbare Messungen des Wasserdampfverlustes durch die Stomata der Pflanzenblätter liefert. Mit dem AP4 kann die Reaktion verschiedener Getreidesorten auf Umweltveränderungen und -beanspruchungen verglichen werden.



Die **Bedienung** des **AP4** ist unkompliziert - einfaches Schritt-für-Schritt-Verfahren - mittels der auf der LCD-Anzeige dargestellten Menüs führen den Anwender durch den Kalibrierprozeß, die Meßvorgänge und das Überprüfen der gespeicherten Daten. Notizen mit bis zu 30 Zeichen pro Messung können über die Tastatur eingegeben werden.

Das AP4 hat eine Tragetasche, die um die Schulter und Taille getragen wird, wodurch der Zugang zu den Bedienelementen auf einer bequemen Arbeitshöhe gewährleistet ist. Der leichtgewichtige Kopf des Sensors kann einfach und ohne Beschädigung der Probe an das Blatt geklemmt werden. Die rote READ-Taste ermöglicht das Bedienen mit einer Hand.



Pflanzenphysiologie

Stomatäre Leitfähigkeit

AP4-Porometer



Anwendungen

In Wasserhaushaltsstudien ist der Verlust von Wasserdampf durch die Blatt-Stomata einer der kritischen Faktoren, der die Transpiration mit der momentanen Temperatur, Luftdruck, Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit verbindet. Die Stomata reagieren auf Licht, Luftfeuchte, Kohlendioxid, Wasserstress und Krankheitserreger. In Verbindung mit einem Blattflächenmeßgerät erlaubt das AP4 hiermit, den Wasserverlust ganzer Pflanzenbestände zu bestimmen.

Masseinheiten

Das AP4 läßt Ihnen die Wahl entweder die stomatäre Leitfähigkeit oder den stomatären Widerstand bzw. "Geschwindigkeits-" oder molare Einheiten zu verwenden.

Molare Einheiten bieten eine gute Vergleichbarkeit mit Biochemischen Einheiten der Photosynthese, z.B. die Anzahl der Mole Biomasse, die gebildet wurden, oder die Flußdichte von PAR-Quanten. Sie haben den Vorteil unabhängig von Druck und nur schwach abhängig von der Umgebungstemperatur zu sein, während Geschwindigkeitseinheiten von beiden abhängig sind.

Technische Spezifikation

Parameter	Meßbereich	Auflösung	Meßbereich	Auflösung
Leitfähigkeit	5.0..1200mmolm-2s-1	0.1..10	Kammertemperatur -5..+55°C	0.1
Leitfähigkeit	0.25..30.0mms-1	0.01..0.1	Kammer-Blatttemp. -5..+55°C	0.1
Widerstand	0.2..40scm-1	0.01..0.1	Luftfeuchte 0..100%	0.1
PAR-Fluß	0..2500mmolm-2s-1	10	Größe/Gewicht	300x220x140mm/ 3kg
Luftdruck	600..1200hPa		interne Akku f. ca. 20h	
rH-Zyklus-Level	(einstellbar in 5hPa Stufen)		Stromversorgung	Betrieb
	20..80% (einstellbar in 5% Stufen)		Ladezeit:	14h

Bestellinformationen

		Art.Nr.
AP4	Automatisches Diffusions-(Transpirations-) Porometer von Delta-T	12300
PBR1	Uhr mit Armband-Barometer	12302
PCK1	Ersatzteilkit für AP4: Dichtungen, Kleband, Filterpapier	12304
PSK1	Ersatzteil-Kit inkl. Ersatzsensorkopf und Technical User Manual	12306
PSH1	Ersatzsensorkopf	12308



The AP4 Porometer measures stomatal aperture in terms of leaf conductance to water vapour.

This is a major determinant of water loss from plant leaves and of CO₂ uptake in photosynthesis.

- *Direct readout of conductance or resistance*
- *Simple and rapid calibration in the field*
- *Minimises leaf stress during measurement*
- *Outstanding value and ease of use*



AP4 Porometer

PRODUCT INFORMATION

Applications

Loss of water vapour through plant leaf stomata is one of the critical factors linking transpiration with ambient temperature, pressure, humidity and wind speed. The stomata are sensitive to light, relative humidity (RH), carbon dioxide (CO₂), water stress, pathogens and pollutants. The AP4 Porometer makes accurate, repeatable and convenient field measurements of stomatal conductance using the cycling diffusion principle. When combined with leaf area and leaf temperature measurement, the instrument enables water loss from a whole plant or crop canopy to be estimated.

The AP4 is therefore an invaluable tool for quantifying the effect of various influences on stomatal behaviour. It also has an important role to play in comparing the performance of different crop varieties in response to environmental variations and stresses.

Practical Experience The theory behind the cycling porometer is well understood (ref. 1), and is backed by Delta-T's considerable manufacturing experience of this type of instrument through four evolutionary stages. Over 1000 Delta-T porometers have been used worldwide since the first was devised by Dr. J. L. Monteith in 1974 (ref. 2).

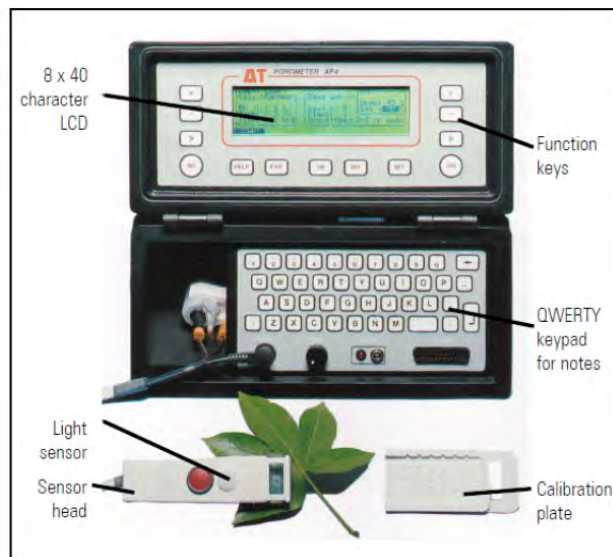
Easy and convenient use

The innovative design of the AP4 provides users with logical, convenient operation and a comprehensive range of features and functions. In particular, the AP4 offers an automated, rapid cycle that gives temperature-compensated readings, and straightforward calibration.

New users can quickly make effective use of the AP4, without a deep knowledge of all the options available to the more experienced user. A [HELP] button provides operating assistance, especially useful for field work, while a [SET] button conveniently recalls operating settings stored previously.

In use, the AP4 is carried on a shoulder strap in its own protective carrying case, with the keyboard, control buttons and display at a convenient working level. The sensor head, on a flexible cable, is simply clipped on to the leaf to be measured. Once the instrument has been initialised, a [READ] button on the head allows single-handed operation. Successive readings can be taken, evaluated and stored just by pressing this one button. Stable readings are audibly indicated by a double beep.

Step-through procedures from menus displayed on the LCD guide the user through the processes of calibration, taking readings, and the review and output of stored data.



Direct calibration

The direct calibration technique used in the AP4 gives much greater confidence in the absolute accuracy of its readings than is possible in practice with other systems.

The AP4 is supplied with a moulded polypropylene calibration plate with six groups of holes; the rate of diffusion of water vapour through these holes has been carefully verified. Water vapour is provided by backing the plate with dampened paper. The sensor head is clipped onto the calibration plate, and readings are stored from each of the six standard calibration positions.

Calibration is a simple process, and easily undertaken in the field. It should be carried out at the start of a measurement session, and when necessitated by a change in temperature, or by moving to a new RH cycling level, or by changing to the alternative cup on the sensor head.

Dynamic diffusion and steady state porometers compared

Porometry

Porometry is the study of gas diffusion through pores, particularly through leaf stomata. Since plant transpiration is mainly controlled by the opening and closing of stomata, the use of porometers is vital to many areas of plant research.

Most field measurements are currently made by diffusion porometers, using either the dynamic or steady state measurement principle. Dynamic diffusion porometers, such as the Delta-T AP4, are characterised by simplicity, unstirred leaf chambers, and the need for frequent but easy recalibration using plates with known diffusion resistances. Steady state porometers are comparatively complex, they require a vigorously stirred leaf chamber and their recalibration, while infrequent, can be difficult.

Relative Strengths

Accuracy: Under laboratory conditions, the two systems are comparable, though the steady state can be significantly more accurate at very high diffusion conductances when carefully calibrated.

Under field conditions, the situation changes. The accuracy of the Delta-T system can be maintained by simply recalibrating in the field whenever appropriate. In the steady state system, accuracy depends on the absolute accuracy of the RH measurement: an error of more than $\pm 18\%$ in the diffusion reading can be caused by a $\pm 3\%$ RH error (refs. 3, 4). When taking measurements in the field on leaves, the possibility of contamination will usually limit confidence in the absolute RH measurement to $\pm 4\%$, even with careful and frequent laboratory recalibration.



Conditions within a porometer chamber can occasionally cause the stomata to close before a reading is taken. These are more likely to be present in a chamber where the leaf is stressed by the increased water loss associated with vigorously stirred steady state systems.

Resolution: Dynamic and steady state porometry systems offer similar resolution: approximately $0.5 \text{ mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$.

Speed: Both systems enable a reading to be taken within about 15 seconds for a highly conductive leaf, and within about 60 seconds for a highly resistive leaf.

Convenience: Both systems provide direct readout of stomatal conductance units, but the AP4 also features a simple comprehensive graphic display of all relevant reading information. The moulded plastic AP4 sensor head weighs only 130g – less than 1/3 of many steady state porometers.

Sampling area: Because the chamber in a dynamic system is unstirred, it is not practical to use large sampling areas in conjunction with a small RH sensor. However, users' experience suggests that this is a very minor inconvenience, occasionally requiring more samples to be taken.

Price: Generally, dynamic porometers are less expensive because they do not require such elaborate leaf chambers or expensive gas flow meters.

Ease of use, reliability and economy without compromising on accuracy continue to make dynamic diffusion porometers the first choice for professional scientists worldwide.

Compact sensor head

The lightweight, compact AP4 sensor head enables reliable and quick measurements, even in small or dense canopies, with minimum stress on the leaf.

Made from low water absorption polypropylene, the head contains two cups (cuvettes): one slotted, the other circular, to suit different leaf shapes. A shuttered cover lets the user check leaf alignment. A silicone rubber seal presses gently onto the leaf surface, defining the sample area.

The head contains fast response sensors to measure cup and leaf temperatures, allowing automatic temperature compensation to be applied (ref 3). White insulating materials reduce cup heating by bright sunlight, while a PAR photodiode sensor (Photosynthetically Active Radiation) measures light incident on the leaf.

Measurement units

The AP4 lets you choose whether to work in terms of stomatal conductance or resistance, and in "velocity" or mole units. Mole units offer comparability with biochemical units in photosynthesis, for example the moles of biomass created, or the flux density of PAR quanta. They have the advantage of being independent of pressure*, and only weakly dependent on temperature, whereas velocity units depend on both. The AP4 refers all readings to the ambient temperature and pressure.

* Changes in barometric pressure between a calibration and actual measurement will affect resistance readings: a change of 1kPa can cause a 1% error in measured resistance. An extreme change in the weather could have this effect, but altitude is normally a greater factor, the rate of change being 1kPa per 100 metres. The Wristwatch Barometer type PBR1, is suitable for monitoring local pressure (see Ordering Information).

Data handling

Onboard memory provides a storage capacity of up to 1500 readings, with a notes facility. Data is read out to a computer, printer or pocket terminal through the RS232 link. Data formats are suitable for direct entry to standard analysis software including Excel.

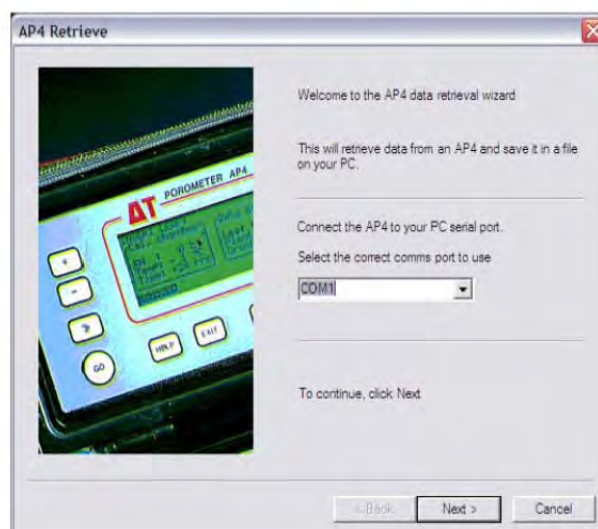
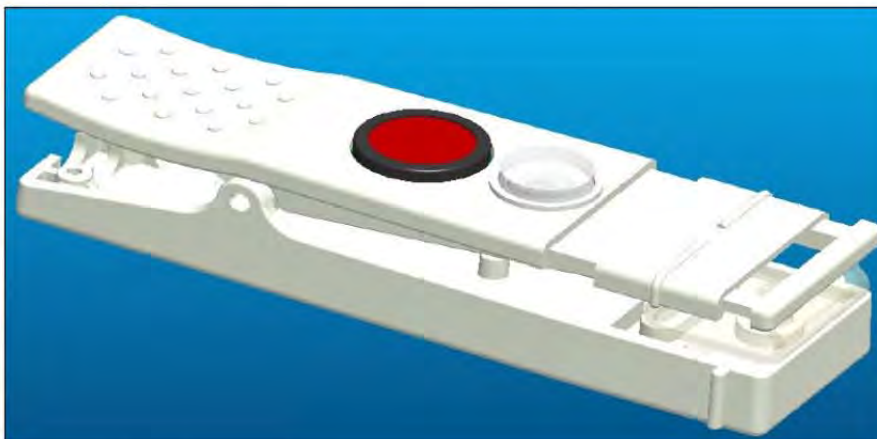
A complete set of data comprises the reading, reading labels, time, light level, temperature and relative humidity. Up to 30 characters of notes for each reading can be added using the keypad.

3	GROUP 6: Pinot	Date	10/07/2004	Set RH:	50%	Units:	mmol/m ² /s
4						Press:	1000 hPa
5							
6	Time	Plant	Leaf	Conduct.	Cup T	Cup-Leaf	Light
7	15:52	1	1	17.7	23.8	0.1	810 upper - centre of plot
8	15:53	1	2	216.0	24.0	0.2	320 lower
9	15:53	1	3	21.2	24.2	0.3	570 upper
10	15:54	2	1	435.0	24.4	0.4	340 lower
11	15:55	2	2	15.6	24.5	0.3	660 upper - edge of plot
12	15:55	2	3	131.0	24.5	0.6	480 lower

New for 2004

The sensor head mouldings have been redesigned to incorporate several further mechanical enhancements, e.g.

- Strengthened side ribs and hinge mounting
- Textured thumb grip
- Improved cable retention and strain relief



New for 2004

- RETRIEVE software has been updated for Windows XP and Windows ME compatibility.



Porometer type AP4 Specifications

Parameter	Reading range	Resolution [1]	Accuracy [2]	Test Conditions Reading range
Conductance	5.0 - 1200 mmol m ⁻² s ⁻¹	0.1 - 10	±10 % ±20 %	5 - 800 mmol m ⁻² s ⁻¹ 800 - 1200 mmol m ⁻² s ⁻¹
Conductance	0.25 - 30.0 mm s ⁻¹	0.01 - 0.1	±10 % ±20 %	0.25 - 20 mm s ⁻¹ 20 - 30 mm s ⁻¹
Resistance	0.2 - 40 s cm ⁻¹	0.01 - 0.1	±10 % ±0.2 s cm ⁻¹	0.5 - 40 s cm ⁻¹ 0.2 - 0.5 s cm ⁻¹
RH	0 - 100%	0.1	±4%	
Cup temp.	-5 - +55 °C	0.1	±0.7 °C	0 - 50 °C
Cup-leaf temp.	-5 - +5 °C	0.1	±0.2 °C	0 - 50 °C
PAR flux [3]	0 - 2500 μmol m ⁻² s ⁻¹	10	±15%	
Pressure [4]	600 - 1200 hPa, settable in steps of 5 hPa			
RH cycle level	20 - 80 %RH, settable in steps of 5%			

Notes:

- [1] Resolution varies with the magnitude of the value obtained. The range shown corresponds to the reading range. In relative terms, the resolution is better than 2%, but at least the smallest amount shown.
- [2] The stated accuracy applies over the range of the calibration plate and for optimum cup conditions, i.e. from +10 to -5 °C difference between actual cup temp. and that existing at calibration, and for +2.5 to -2.5 °C difference between leaf and cup temperatures.
- [3] Spectral and cosine responses are approximate only.
- [4] Ambient pressure may be read from a Wristwatch Barometer type PBR1.
- [5] Cycling at extreme combinations of temperature, conductance and RH level may not always be possible.

Measuring units

Conductance: mmol m⁻² s⁻¹, mm s⁻¹, cm s⁻¹

Resistance: s cm⁻¹, s m⁻¹, m² s mol⁻¹.

Calibration plate values at 20°C, 1000 hPa

Plate position	Conductance (mmol m ⁻² s ⁻¹)	Resistance (s cm ⁻¹)
1	15	27.3
2	25	16.5
3	55	7.4
4	132	3.1
5	257	1.6
6	513	0.8

Sensor head

Cups: (a) slot, 2.5 x 17.5 mm, rounded ends
(b) circle, 6 mm diameter

RH sensor: Vaisala 16663HM

Temp. sensors: high precision 100K thermistors

Light sensor: unfiltered GaAsP photodiode

Cable length: 1.2m

Size/weight: 110 x 30 x 27mm, 130g incl. Cable

Data handling

Reading memory: up to 1500 readings with full annotation (see sample printout)

Data interface: RS232 serial, up to 9600 baud, supplied with connector and adaptor for direct connection to PCs

Software: for Windows, saves data to a comma-separated ASCII data file (.CSV)

Control unit

Display: 8 lines x 40 character LCD

Keys: 13 function keys, plus full QWERTY keypad

Carrying case: padded with shoulder & waist straps.

Size/weight: 300 x 220 x 140mm, 3kg

Power Supply

Battery: internal rechargeable, 20 hour duration

Charger: separate unit, 12 to 15V DC, 0.5A, 110, 220 or 240V AC mains input (please state when ordering)

Recharge time: 14 hours



References

1. Monteith, J. L., Campbell, G. S. & Potter, E. A., 'Theory and performance of a dynamic diffusion porometer'. Agric. For. Meteorol. 44,27-38, 1988.
2. Stiles, W., Monteith, J. L. & Bull, T. A., 'A diffusive resistance porometer for field use'. J. Appl. Ecol. 7,617-638, 1970
3. Campbell, G. S., 'Steady-state diffusion porometers'. Research Bulletin 809, Washington State University, 20-23, 1975.
4. McDermitt, D. K., 'Sources of error in the estimation of stomatal conductance and transpiration from porometer data'. HortScience, 25(12), 1538-1548, 1990.

Ordering Information

Porometer type AP4 including: built-in rechargeable battery, sensor head type PSH1, calibration plate, carrying bag, manual, quick guide, RS232 cable, data collection software, consumables kit type PCK1 (paper pads, tape, 500g silica gel, silica gel tube, 2 cup seals, cup gasket), battery charger (please specify mains 230 V AC 50Hz UK, or EURO, or 120V AC 60Hz).

Optional items:

Wristwatch Barometer, type PBR1, reads atmospheric pressure.

AP4 consumables kit, type PCK1, complete set as included with instrument.

AP4 spares kit, type PSK2, includes spare manual. Detailed list available on request.

Spare AP4 sensor head, type PSH1.

Spare rechargeable battery, type PSB2.

Spare battery charger type AP-CHG.

Spare calibration plate type AP-CP.



Delta-T Devices Ltd

128 Low Road, Burwell, Cambridge CB5 0EJ, England

Tel: +44 (0)1638 742922 Fax: +44 (0)1638 743155

Email: sales@delta-t.co.uk Web: www.delta-t.co.uk

6.1 SPECIFICATIONS

6.1.1 Infrared Thermography H2640 Specifications

		Range 1	Range 2	Range 3												
Measuring range (Temperature CAL Range)		-20°C~60°C (0°C~60°C) *Theoretical data beyond the calibration range.	-40°C~120°C (0°C~120°C) *Theoretical data beyond the calibration range.	0°C~500°C (0°C~500°C)												
Minimum detectabletempe rature difference	30Frame/sec	0.06°C (at 30°C)	0.08°C (at 30°C)	0.30°C (at 30°C)												
Measurement accuracy		±2°C or ±2 % (reading) (For ambient temperature 0°C~40°C, the standard lens use, and the measurement distance 50cm.)														
Spectral range		8~13 μm (with half value width)														
Detector		Uncooled focal plane array (Microbolometer)														
Field of view		Horizontal 21.7°×Vertical 16.4°														
I.F.O.V		When the 0.6 mrad standard lens is attached														
Focus range		30 cm to ∞														
Frame time		30 frame/sec														
Display		Model 5.6 LCD and Viewfinder														
Number of pixels		640 (H)×480 (V) (3 edge lines of screen is out of the specs.)														
A/D resolution		14 bits														
Temperature setup level		-20°C ~60°C	-40°C ~120°C	0°C ~500°C												
Sensitivity setup		0.1~20°C/DIV	0.2~20°C/DIV	~0.3~70°C/DIV												
Emissivity correction		0.10 to 1.00 (0.01 step both in RUN and FREEZE)														
Measurement function		Run/Freeze a) S/N improvement Σ2, Σ8, Σ16, Σ32, Σ64spatial filter on/off b) Event output screen display, alarm sound (on/off)														
Interval measuring		Real time memory record (interval time 1/30~3600 seconds) Memory card record (For interval time, refer to the following table.) <table><tr><td>S/N improvement</td><td>Save visual</td><td>Interval time</td></tr><tr><td>Off, Σ2, Σ8, Σ16</td><td>Off</td><td>5~3600 seconds</td></tr><tr><td></td><td>IR LINK</td><td>30~3600 seconds</td></tr><tr><td>Σ32, Σ64</td><td>Off, IR LINK</td><td>60~3600 seconds</td></tr></table> Event function (trigger) provided The visual image save function is provided. (Only available for saving into a memory card)			S/N improvement	Save visual	Interval time	Off, Σ2, Σ8, Σ16	Off	5~3600 seconds		IR LINK	30~3600 seconds	Σ32, Σ64	Off, IR LINK	60~3600 seconds
S/N improvement	Save visual	Interval time														
Off, Σ2, Σ8, Σ16	Off	5~3600 seconds														
	IR LINK	30~3600 seconds														
Σ32, Σ64	Off, IR LINK	60~3600 seconds														
Ambient correction		Provided (including Interval NUC)														
Response calibration		Provided (external)														
Lens assembly correction		Provided (auto, manual)														
Storage setup		Setup for measurement condition save/renewal (10 registration is possible at most)														
Correction of measurement condition		Provided (correction by inputting outside temperature, humidity and the distance for the object)														
Background compensation		Provided														
Emissivity table setup		Available														
AUTO function		Full auto (level, sens, focus), Level/Sens auto (manually available), Focus auto (manually available), Level trace, Auto gain control														

Display function	a)Display color Color/Monochrome, Positive / Negative b)Step 16, 32, 64, 128, 256 Grades c)Color Select Shine color/Rainbow color/Brightness color/ Hotiron/Medical/Fine color d)ISO Temp. Band display 1 to 4 lines (ISO temp band width, display position change) e)Multidisplay 12 images on renewal display f)Multi sense display Provided g)Waveform display on Freeze. X,Y line profile.										
Image processing function	Level change during freeze Sense change during freeze Multi-point Temperature Display (10 point available) Multi-point Emissivity Correction (10 point setting) Display of Temperature difference between Two Points Max/Min (peak hold) Temperature (All image or box) Alarm (All image or box) Digital zoom x2 , x4 and x8 (run/freeze) Box (max 5) Sharpness , Median										
Multi-Focus	On/Off, Temperature threshold(1.0~100.0°C, 1.0°C Step), Frame (16/32), H/H&V(H/V/H&V) <table border="1"> <thead> <tr> <th>Frame</th><th>H/H&V</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">16</td><td>H</td></tr> <tr> <td>V</td></tr> <tr> <td>H&V</td></tr> <tr> <td rowspan="3">32</td><td>H</td></tr> <tr> <td>V</td></tr> <tr> <td>H&V</td></tr> </tbody> </table>	Frame	H/H&V	16	H	V	H&V	32	H	V	H&V
Frame	H/H&V										
16	H										
	V										
	H&V										
32	H										
	V										
	H&V										
Data display	Color Bar (Gray Scale), Temp scale, multi point temp, time, memo, error message and operating menu in Japanese/English/Portuguese/Spain/ French/German/Traditional Chinese/Chinese/Korean/Russian/Italian, remaining battery monitor, emissivity.										
Memo	a) Word annotation Manual/Standard input, alphameric, special character b) Voice annotation 30sec for each image(built in speaker/ microphone)										
Memory system	Infrared image: Compact flash memory card (SIX, BMP) Visual image: Compact flash memory card (SIX, JPEG)										
Video output	NTSC/PAL, Composite Video, S Video (exclusive cable is required.)										
Multipurpose interface	Compact flash memory card slot, IEEE1394, RS-232C (exclusive cable is required), USB2.0/1.1										
Ambient setup	Time, TV mode (NTSC/PAL), Ambient indication mode (°C / °F)										
Battery operation	Approx. 120 minutes (At 20°C of ambient temperature, with LCD, and measurement is RUN .)										

6.1.2 Visual camera specifications (When the standard lens is attached)

Detector	CMOS
EFFECTIVE image pixel	1280(H) x 1024(V) pixels
Field of View ^{*1}	27.0°(H) x 20.0°(V)
Focus ^{*2}	Manual focus
Focus distance	30cm to infinity
AGC	Provided
Video output	NTSC
Display Style	Infrared image /Visual image /Composite image selectable ^{*3}

*1: Visual camera can display full screen area of infrared image in case of measuring distance more than 1 meter. (In case of measuring distance less than 1 meter, the visual camera can't display a part of infrared image because of difference of optical axis.)

*2: Focus distance is fixed. It can't focus measuring object within 30cm.

6.1.3 Laser Specifications

Laser Pointer	Classi cation:	Class 2
	Type:	635nm (red) Laser Diode 1mW or less

6.1.4 General Specifications

Operating temperature and humidity	-15°C~50°C Less 90%RH (not condensed)
Storage temperature and humidity	-40°C~70°C Less 90%RH (not condensed)
Power supply	DC + 7.2V (nominal)
Power consumption	Approx 9W (Typ) (At 20°C ² of ambient temperature, with LCD, and measurement is RUN.)
Shock resistance	294m/sec ² (30G), (IEC60068-2-27/JIS C 0041)
Vibration resistance	29.4m/sec ² (3G), (IEC60068-2-6/JIS C 0040)
Environmental Protection	IP54, (IEC60529/JIS C 0920)
Dimensions	110(W) x 110(H) x 210(D) mm (excluding projection)
Weight	Approx 1.5kg (excluding LCD and battery) Approx 1.7kg (including LCD and battery)

6.1.5 Standard Accessory

Accessory name	Number
1) AC adapter	1
2) Battery pack	2
3) Battery charger	1
4) Memory card (Compact flash memory card and its adapter)	1
5) Grip belt	1
6) Neck strap	1
7) Lens protective cap	1
8) Carrying case	1
9) Standard accessories software	1
10) Infrared Thermography H2640 Operation Manual	1
11) USB cable	1
12) Target illuminate (Target illuminate, battery (CR123A) and adapter)	1

Zusammenfassung

Um eine Aussage über die Wasserverhältnisse oder den Wasserstress einer Pflanze oder eines Bestandes machen zu können, ist es notwendig entsprechende Messungen im Freiland durchzuführen.

Dazu stehen zur Zeit unterschiedliche Methoden zur Verfügung, am häufigsten verwendet wird die Porometrie. Porometer können, je nach Funktionsprinzip in 2 große Klassen unterteilt werdend, den „Transient“-Porometern und den „Durchfluss“-Porometern. Beide unterschiedlichen Funktionstypen wurden im Rahmen dieser Arbeit mit einer der ältesten Freilandmethoden, der „Momentan-Methode“ nach Otto STOCKER (1929) beziehungsweise der „Anwelk-Methode“ (ARLAND 1955) in leicht abgewandelter Form verglichen.

Alle verwendeten Methoden zur Bestimmung der Transpiration, des Leitwertes oder des Widerstandes, sind mehr oder weniger invasive Methoden, da sie entweder ein eigenes Mikroklima um das Blatt oder den Blattteil schaffen, oder durch das Abtrennen zu einer massiven Stressreaktion (IWANOFF-Effekt) führen.

Die Versuche wurden an eingetopften bewurzelten Blättern von *Hedera helix* durchgeführt. Um unter möglichst kontrollierten Bedingungen zu arbeiten, wurden die Versuche (wenn möglich gleichzeitig) im Glashaus bei gleich bleibender Temperatur, Feuchte und Windgeschwindigkeit beziehungsweise Luftströmung durchgeführt. Die Messergebnisse der unterschiedlichen Methoden wurden verglichen, wobei die jeweiligen prozentuellen Differenzen zwischen den Methoden berechnet wurden, als auch die Wiederholbarkeit und die Verlässlichkeit innerhalb der Messreihen untersucht wurde.

Dabei wurde für das PMR-4 Porometer eine Differenz von 32% zur gravimetrischen Methode festgestellt. Für das AP4 Gerät lag der Wert bei 23%.

Als nicht invasive Methode wird die Infrarot Thermographie anhand zweier Freilandmessungen mit *Hedera helix* (Pflanzen im Topf) und *Polygonum aubertii* vorgestellt. Dabei

dienen die Arbeiten von LEINONEN (2004, 2006), JONES (2004) und GRANT (2006) als Vorlage zur Berechnung des CWS (Crop Water Stressindex) sowie des I_G (stomatärer Index). Diese Daten werden mit den Ergebnissen des „Transient“-Porometers verglichen. Die Korrelationen liegen bei I_G (stomatärer Index) im Bereich von maximal 30%, was sehr gering ist. Dies lässt sich aber mit den zum Zeitpunkt der Messung herrschenden ungünstigen Umweltbedingungen, starker Wind, wechselnde Lichtverhältnisse, geringe Strahlungsintensität (November) erklären.

Abstract

Plant field ecology is faced with the problem of having to measure in situ. Among many parameters of interest, one is the transpiration rate, (conductance or resistance) of a plant under given conditions. The loss of water vapour through the stomatal openings giving information about the plants water status or water stress.

A variety of methods have been developed to measure the transpiration rate, conductance or resistance. The most common in use are porometers, of which different operating principles exist. Two of these, the transient porometer and the steady state (continuous-flow) porometer are compared with one of the oldest field methods, the weighing method by Otto STOCKER (1929). All methods mentioned being more or less invasive, since they either change the microclimate surrounding the leaf, or cause massive stress by cutting the leaf off (IWANOFF-Effect).

Measurements were performed with all three systems. In order to minimize the environmental effects, the measurements were done under controlled conditions in a glass house, that is keeping air temperature, air moisture and wind speed constant.

The results obtained by using the different methods (when possible simultaneously) to measure the transpiration rate of rooted *Hedera helix* leaves planted in small pots are compared with each other in terms of the percentage difference between the methods as well as in terms of the reproducibility and reliability of the method in use.

To give an alternative method which is non invasive, thermal imaging was used to estimate the transpiration of potted *Hedera helix* plants and *Polygonum aubertii* under field conditions. For this the work of LEINONEN (2004, 2006), JONES (2004) and GRANT (2006) was used as basis to calculate the indices of Crop Water Stress (CWS) and I_G the stomatal index. These were compared to the conductances obtained by the transient porometer.

Curriculum Vitae

Name: Dipl.-Ing. Grüner
Vorname: Edith
geb.: 04.07.1970
in: Wien
Familienstand: verheiratet, 1 Sohn

weiterführende Ausbildung:

	1988	Matura, (International Baccalaureate), Vienna International School
1988	1993	Biologie/Botanik, Universität Wien
1993	1996	Elektrotechnik, Steuerungs- und Regelungstechnik, Höhere Lehranstalt für Berufstätige an der HTL Wien I
	1996	Matura, Steuerungs- und Regelungstechnik
1996	2002	Umweltbiologie und Umwelttechnik (studium irregulare), Universität für Bodenkultur Wien
	2002	Diplom, Umweltbiologie und Umwelttechnik
2006	2012	Biologie/Ökologie, Universität Wien

facheinschlägige Tätigkeit:

1998	2000	Technische Universität Wien, Institut für Festigkeitslehre, Laboratorium, Arbeitsbereich: Messtechnik, Auswertung
2000	2002	Technologisches Gewerbemuseum, Versuchsanstalt für Wärme- und Schalltechnik, Arbeitsbereich: Wärmetechnik
2002	2005	Technologisches Gewerbemuseum, Versuchsanstalt für Kunststoff- und Umwelttechnik, Arbeitsbereich: Brandschutz, Qualitätssicherung
2005	laufend	Technologisches Gewerbemuseum, Versuchsanstalt für Kunststoff- und Umwelttechnik, Arbeitsbereich: Abdichtung- und Drainage im Hoch und Tiefbau, Deponietechnik, Umwelttechnik