
**Entwicklung und Nutzung von
Tageslicht- Pflanzenküvetten als
Untersuchungseinheit eines systemorientierten
Ansatzes für Niedrigenergiegewächshäuser**

Von der Naturwissenschaftlichen Fakultät der
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

zur Erlangung des Grades
Doktor der Gartenbauwissenschaften (Dr. rer. hort.)

genehmigte Dissertation
von

M. Sc. Gökhan Akyazi

geboren am 29.05.1982 in Werther (Westf.)

2016

Referent: Prof. Dr. rer. hort. habil. Hans-Jürgen Tantau

Korreferent: Prof. Dr. sc. techn. Uwe Schmidt

Tag der Promotion: 12.09.2016

Kurzfassung

Im Zuge verknappender Ressourcen und steigender Energiekosten ist der Unterglasanbau zunehmenden Veränderungen unterworfen (Hoffmann und Rath 2013, Lobos und Hancock 2015, Ozkan *et al.* 2005). Insbesondere durch den Einsatz innovativer Techniken und angepasster Kulturprogramme kann die Effizienz gesteigert werden. Vor diesem Hintergrund wurde ein deutschlandweites Kooperationsprojekt (Akyazi und Tantau 2012, www.zineg.net) gefördert, das in einem systemorientierten Ansatz versucht den Energieeinsatz in Gewächshäusern deutlich zu reduzieren. Durch die Anwendung und das Zusammenspiel der verschiedenen Techniken verändern sich auch die Gewächshaus- Innenbedingungen und damit die Kulturbedingungen für die Pflanzenproduktion (Akyazi *et al.* 2015, Janka *et al.* 2016). Diese Veränderungen und die jeweiligen Reaktionen der Pflanzen müssen erfasst und abgeschätzt werden, um die Integrations- und Kompensationspotentiale der Pflanzen erfassen zu können. Um dieses Ziel zu erreichen wurden Tageslicht- Pflanzenküvetten entwickelt, in denen die potentiellen Extrembedingungen exakt geregelt werden können. Damit war es möglich die Faktoren Temperatur, relative Luftfeuchte und CO₂- Konzentration losgelöst voneinander und unter natürlichen Lichtverhältnissen zu untersuchen. Nach anfänglichen Systemüberprüfungen wurden zahlreiche Sollwert-einstellungen experimentell untersucht und die Reaktionen bei *Pelargonium zonale* var. Präludium (Klone aus Stecklingen) hinsichtlich der Netto-Photosyntheserate, Respiration, Evapotranspiration zunächst mathematisch und anschließend destruktiv evaluiert.

Die Temperatur und Luftfeuchte beeinflussten in einem weiten Bereich nicht die Netto- Photosyntheserate, anders als die eingestellte CO₂- Konzentration. Die Faktoren Temperatur, Einstrahlung, Blattfläche und Luftfeuchte übten eindeutige Effekte auf die Respiration und die Evapotranspiration aus. Eine gesteigerte CO₂- Konzentration führte erst bei hohen Werten (> 800 vpm) zu einer Reduzierung der Respiration, wohingegen die Evapotranspiration davon gänzlich unbeeinflusst war.

Die Tageslicht- Pflanzenküvetten können zur Untersuchung der Wirkung des Einflusses von zahlreichen Umgebungsparametern auf weitere Kulturen eingesetzt werden. Eine Ausstattung mit LEDs und zusätzlichen Sensoren würde weitere Möglichkeiten eröffnen.

Schlagworte:

Tageslicht- Pflanzenküvette, Klimaparameter, Netto- Photosynthese, Respiration, Transpiration, *Pelargonium zonale*

Abstract

Due to increasing scarcity of natural resources and increasing energy costs, greenhouse plant production will be facing considerable changes (Hoffmann and Rath 2013, Lobos and Hancock 2015, Ozkan *et al.* 2005). Especially the use of innovative techniques and altered crop management will increase the efficiency of greenhouse plant production. In this context, a research project across Germany (Akyazi and Tantau 2012, www.zineg.net) was founded with the aim of a significant reduction of the energy consumption of greenhouses. In a system-oriented approach with an appliance of innovative techniques and altered crop management, the inner climate conditions of a greenhouse and hence the culture conditions are enormously affected (Akyazi *et al.* 2015, Janka *et al.* 2016). These changes alongside the respective reactions of the plants must be recorded in order to estimate the compensation and integration potential of plants. To fulfil this aim, daylight-plant-cuvettes were constructed. They allow for an exact automatic control of occasionally extreme climate conditions as well as a separated view on each of the climate parameters such as temperature, humidity, CO₂-concentration, and light.

After preliminary studies regarding the system function and its control accuracy, several set point adjustments were experimentally tested to identify the reactions in respect of net photosynthesis, respiration, and evapotranspiration. These reactions were measured online, mathematically calculated and connected to data from destructive rating. *Pelargonium zonale* var. 'Präludium' was used as a model plant, propagated from cuttings of genetically identical mother plants.

Temperature and humidity settings showed only a slight influence on the net photosynthesis in a wide spectrum, contrary to CO₂-concentration. A significant impact was found for the parameters temperature, irradiation, leaf area, and humidity to respiration and evapotranspiration. Increased CO₂-levels (> 800 vpm) resulted in a reduction of respiration, whereas the evapotranspiration was completely unaffected.

The daylight-plant-cuvettes may serve as a measuring environment for several climate parameters and factors in order to detect reactions of a broad range of

different crops. Equipping the daylight-plant-cuvettes with LEDs and additional sensors will enable opportunities for further investigation.

Keywords:

daylight-plant-cuvette, climate parameters, net photosynthesis, respiration, transpiration, *Pelargonium zonale*

I Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung

Abstract

I Inhaltsverzeichnis	I
II Abkürzungsverzeichnis	V
III Abbildungsverzeichnis	VII
IV Tabellenverzeichnis	IX
1. Einleitung	1
2. Stand des Wissens	5
2.1 Begriffe und Definitionen	5
2.2 Photosynthese	8
2.2.1 Primärreaktion (Lichtabhängige Reaktion)	8
2.2.2 Sekundärreaktion (Lichtunabhängige Reaktion)	9
2.3 Respiration (Veratmung, Dissimilation)	10
2.4 Modellansätze zur Bestimmung der Photosynthese	11
2.5 Einfluss verschiedener Klimafaktoren auf die Pflanzen-entwicklung	13
2.5.1 Licht	13
2.5.1.1 Einfluss von Strahlung und Wellenlängenbereichen auf die Pflanze	14
2.5.2 Temperatur	16
2.5.3 Relative Luftfeuchtigkeit	16
2.5.4 CO ₂ - Konzentration	17
2.5.5 Weitere Quellen für Pflanzenstress	17
2.6 Klima- Regel- Strategien und energiesparende Regelung	18
2.7 Küvetten- Systeme zur Gaswechsellmessung	19
2.7.1 Marktrelevante Gaswechsellmesssysteme	22
2.7.2 Gaswechsellmessungen bei verschiedenen Versuchsanstel-lungen (Versuchsaufbauten)	24
2.8 ZINEG- Gewächshaus in Hannover Ahlem	27
3. Zielsetzung	30
4. Material und Methoden	31
4.1 Aufbau der Tageslicht- Pflanzenküvetten (TPK)	32
4.1.1 Luftkonditionierungseinheit	32
4.1.1.1 Taupunktregelung	33
4.1.1.2 Ventilatoreinheit	34
4.1.1.3 Bewässerungssystem	36
4.1.2 Pflanzeneinheit	36
4.1.3 Messtechnik und Regelung	37
4.1.3.1 Kondensat	39
4.1.3.2 CO ₂ - Messung und Dosierung	40
4.1.3.2.1 Kalibrierung des CO ₂ - Messsystems	41
4.1.4 Pflanzenmaterial	42
4.1.5 Stecklingsanzucht	42
4.1.6 Versuchspflanzen	43

4.2	Versuchsdurchführung	44
4.2.1.1	Versuchsvarianten	45
4.3	Versuchsauswertung	46
4.3.1	Verrechnung der computergestützten Messwerte	46
4.3.1.1	Dichtigkeitsmessung	47
4.3.1.2	Blattflächenmessung	47
4.3.1.3	Berechnungen zur Netto- Photosyntheserate (P_n)	48
4.3.1.4	Berechnungen zur Respiration	50
4.3.1.5	Berechnungen zur Transpiration	51
4.3.2	Destruktive Bonituren	51
4.3.3	Statistische Auswertung	52
4.3.3.1	Netto- Photosynthese	52
4.3.3.2	Destruktive Bonituren	53
5.	Ergebnisse	55
5.1	Regelgenauigkeit des Systems	55
5.1.1	CO ₂ - Konzentration	55
5.1.2	Temperatur	56
5.1.3	Relative Luftfeuchte	57
5.1.4	Einstrahlung	58
5.1.5	Undichtigkeitsmessungen	60
5.1.5.1	CO ₂ - Zudosierung als Volumenstrom	60
5.1.5.2	CO ₂ - Zudosierung als Ansteuerzeit	62
5.2	Untersuchungen der Netto- Photosynthese (P_n)	62
5.2.1	Einflussgröße CO ₂	64
5.2.1.1	CO ₂ - Konzentration: 400, 800 und 1200 vpm (V1)	64
5.2.1.1.1	Kurvenverlauf	64
5.2.1.1.2	Destruktive Bonituren	66
5.2.1.2	CO ₂ - Konzentration: 1500, 400 und 200 vpm (V2)	67
5.2.1.2.1	Kurvenverlauf	67
5.2.1.2.2	Destruktive Bonituren	69
5.2.1.3	CO ₂ - Konzentration: 400, 800 und 1200 vpm (V5)	70
5.2.1.3.1	Kurvenverlauf	70
5.2.1.3.2	Destruktive Bonituren	72
5.2.2	Einflussgröße Temperatur	73
5.2.2.1	Temperatur 18/14 °C, 14/18 °C und 20/10 °C (V3)	73
5.2.2.1.1	Kurvenverlauf	73
5.2.2.1.2	Destruktive Bonituren	75
5.2.2.2	Temperatur 16/16 °C, 18/14 °C und 25/7 °C (V9)	76
5.2.2.2.1	Kurvenverlauf	76
5.2.2.2.2	Destruktive Bonituren	78
5.2.2.3	Temperatur 18/14 °C, 14/18 °C und 7/25 °C (V10)	79
5.2.2.3.1	Kurvenvergleich	79
5.2.2.3.2	Destruktive Bonituren	81
5.2.2.4	Temperatur 18/18, 30/30 und 10/10 °C (V 11)	82
5.2.2.4.1	Kurvenvergleich	82
5.2.2.4.2	Destruktive Bonituren	84
5.2.2.5	Temperatur 18/18, 30/6 und 6/30 °C (V12)	85
5.2.2.5.1	Kurvenvergleich	85
5.2.2.5.2	Destruktive Bonituren	87
5.2.3	Einflussgröße Schattierung (PAR)	88

5.2.3.1	Lichtminderung durch Schattierung (50 % schattiert, ungeschattiert und 65 % schattiert) bei je 400 vpm CO ₂ (V6)	89
5.2.3.1.1	Kurvenvergleich	89
5.2.3.1.2	Destruktive Bonituren	91
5.2.3.2	Lichtminderung durch Schattierung (50 % schattiert, ungeschattiert und 65 % schattiert) bei je 800 vpm CO ₂ (V7)	92
5.2.3.2.1	Kurvenvergleich	92
5.2.3.2.2	Destruktive Bonituren	94
5.2.3.3	Lichtminderung durch Schattierung (50 % schattiert, ungeschattiert und 65 % schattiert) bei je 1200 vpm CO ₂ (V8)	95
5.2.3.3.1	Kurvenvergleich	95
5.2.3.3.2	Destruktive Bonituren	97
5.2.4	Einflussgröße Luftfeuchte	98
5.2.4.1	Relative Luftfeuchte 45, 65 und 90 % (V4)	98
5.2.4.1.1	Kurvenvergleich	98
5.2.4.1.2	Destruktive Bonituren	100
5.3	Untersuchungen zum Einfluss der Faktoren Temperatur, CO ₂ - Konzentration, PAR- Strahlung und Blattfläche auf die Respiration und die Transpiration	101
5.3.1	Respiration	101
5.3.1.1	Einstrahlung	102
5.3.1.2	Blattfläche	103
5.3.1.3	Temperatur	103
5.3.1.4	Relative Luftfeuchte	105
5.3.1.5	CO ₂ - Konzentration	106
5.3.2	Kondensat	108
5.3.2.1	Einstrahlung	108
5.3.2.2	Blattfläche	109
5.3.2.3	Temperatur	111
5.3.2.4	Relative Luftfeuchte	113
5.3.2.5	CO ₂ - Konzentration	113
6.	Diskussion	116
6.1	Tageslicht- Pflanzenkuvette (TPK)	116
6.2	Netto- Photosynthese (P _n)	117
6.2.1	Einstrahlung	119
6.2.2	Temperatur	121
6.2.3	Relative Luftfeuchte	123
6.2.4	CO ₂ - Konzentration	124
6.3	Respiration	125
6.3.1	Einstrahlung	126
6.3.2	Blattfläche	127
6.3.3	Temperatur	128
6.3.4	Relative Luftfeuchte	129
6.3.5	CO ₂ - Konzentration	130
6.4	Kondensat	131
6.4.1	Einstrahlung	133
6.4.2	Blattfläche	134
6.4.3	Temperatur	135
6.4.4	Relative Luftfeuchte	135
6.4.5	CO ₂ - Konzentration	136
7.	Fazit und Ausblick	138

8.	Zusammenfassung	141
9.	Literaturverzeichnis	144
10.	Anhang	167
10.1	Veröffentlichungen	167
10.2	Lebenslauf	170
10.3	Danksagung	171

II Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung	Einheit
Δ_{vpm}	CO ₂ - Differenz zwischen zwei Messpunkten	
$\Delta\omega$	Sättigungsdampfdruckdifferenz	(kPa)
A	Fläche (hier Blattfläche)	(m ²)
ANOVA	analysis of variance	
Anz.	Anzahl	
ATP	Adenosintriphosphat	
BF	Blattfläche	(cm ²)
C _a	CO ₂ - Konzentration Atmosphäre	
Ca	Kalzium	
CO ₂	Kohlenstoffdioxid	
FM	Frischmasse	(g)
Gl.	Gleichung	
H ⁺	Wasserstoff	
H ₂ O	Wasserstoffoxid (Wasser)	
HT	Heizungstemperatur- Sollwert	(°C)
I	Einstrahlung	($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
I _{LCP}	Einstrahlung am Lichtkompensationspunkt	($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
KAE	Kultur- Anbauempfehlung	
Konz.	Konzentration	
KW	Kondensat	(ml m ⁻² s ⁻¹)
LAI	leaf area index	
LAI _{Beginn}	Blattflächenindex zu Versuchsbeginn	
LAI _{Ende}	Blattflächenindex zu Versuchsende	
LHC	light harvesting complex	
LT	Lüftungstemperatur- Sollwert	(°C)
LVG	Lehr- und Versuchsanstalt für Gartenbau	
LZP	Luftzustandspunkt	
MS	Microsoft ©	
NADP	Nicotinamidadenindinukleotidphosphat	
NADPH	Nicotinamidadenindinukleotidphosphat (reduziert)	
NPS, P _n	Netto- Photosyntheserate	($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
O ₂	Sauerstoff	
O ₃	Ozon	
P	Photosynthese	
PAR	photosynthetically active radiation	($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
PID- Regler	Proportional-, Integral-, Differential- Regler	
PS I / II	Photosystem I und II	
Q ₁₀	Coenzym Q ₁₀	
R _b	Respiration Blatt	($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
R _d , Resp.	Respiration (Dunkelatmung)	($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
rF	relative Luftfeuchte	(%)
SO ₂	Schwefeldioxid	
T., Temp.	Temperatur	(°C)

T_{dos}	Dauer der Zudosierung	(s h ⁻¹)
TKP, K1 – 3	Tageslicht- Pflanzenküvette	
TM	Trockenmasse	(g)
U	Undichtigkeit (hier in Form d. Zudosierung)	(l h ⁻¹)
V	Versuchsnummer	
var.	Varietät	
V_d	Durchflussvolumen	(l s ⁻¹)
V_m	molares Volumen	(l mol ⁻¹)
VPD	vapor pressure deficit	(kPa)
vpm	Volumenkonzentration	($\mu\text{mol mol}^{-1}$)
ZINEG	Zukunftsinitiative- Niedrigenergiegewächshaus	
$\alpha, \beta, \gamma, \delta$	Funktionsparameter	

III Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1:	Schematische Darstellung der CO ₂ Flüsse eines Blattes.	10
Abb. 2.2:	Veränderungen der Netto- Photosyntheserate durch morphologische Anpassung an das Lichtklima bei <i>Solidago virgaurea</i> .	15
Abb. 2.3:	Verlauf der Temperatur und relativen Luftfeuchte auf Stundenmittelwert- Basis.	29
Abb. 4.1:	Kartenausschnitt aus der Vogelperspektive mit der Gewächshausanlage der Abteilung Biosystemtechnik.	31
Abb. 4.2:	Frontalansicht Tageslicht- Pflanzenküvette	32
Abb. 4.3:	Schematische (links) und bildliche (rechts) Darstellung der Tageslicht- Pflanzenküvette im Vergleich.	33
Abb. 4.4:	Schematische Darstellung der Taupunktregelung.	34
Abb. 4.5:	a)Ventilatoreinheit aus gekantetem Zinkblech (2 mm) inklusive einem an der Vorderfront eingelassenen Ventilator. b)Frontalansicht des Einlasses der Luftkonditionierungseinheit.	35
Abb. 4.6:	Perforierung der Zu- und Abluftseite. Laminare Luft-strömung in die Küvette durch Anfasen der Löcher.	36
Abb. 4.7:	Schematische Darstellung der Messstellen der Datenerfassung und Regelung des Gesamtsystems.	38
Abb. 4.8:	System zum Auffangen und Messen des ausfallenden Kondensats.	39
Abb. 4.9:	Mutterpflanzenkultur von <i>P. zonale</i> .	42
Abb. 4.10:	Mit Stegdoppelplatten verkleidetes Anzuchtgestell für Stecklinge.	43
Abb. 4.11:	Versuchspflanzen unmittelbar vor Versuchsbeginn.	43
Abb. 4.12:	Blick in die Pflanzeneinheit mit platzierten Versuchspflanzen zu Versuchsbeginn	44
Abb. 4.13:	Boniturstandard für Blüten geschlossen (a) und Blüten geöffnet (b).	52
Abb. 5.1:	Verläufe der CO ₂ - Konzentration bei 400 vpm (K1), 800 vpm (K2) und 1200 vpm (K3).	56
Abb. 5.2:	Temperaturverlauf bei 18 °C T/N (K1), 30 °C T/N (K2) und 10 °C T/N (K3).	57
Abb. 5.3:	Verläufe der relativen Luftfeuchte bei Sollwerteinstellungen von 45 % rF (K1), 65 % rF (K2) und 90 % rF (K3).	58
Abb. 5.4:	Verläufe der Einstrahlung zur selben Versuchslaufzeit, innerhalb der Küvetten (K1, K2, K3).	59
Abb. 5.5:	Grafische Darstellung der Undichtigkeiten.	61
Abb. 5.6:	Verarbeitung eines Modell- Datensatzes für die finale Modellerstellung.	63
Abb. 5.7:	Modellierter Verlauf von P _n bei gegebener Einstrahlung (PAR) bei 400 vpm, bei 800 vpm und bei 1200 vpm.	65
Abb. 5.8:	Modellierter Verlauf von P _n und Einstrahlung (PAR) bei 1500 vpm, bei 800 vpm und bei 200 vpm.	68

Abb. 5.9: Modellierter Verlauf von P_n und Einstrahlung (PAR) bei 400 vpm, bei 800 vpm und bei 1200 vpm.	71
Abb. 5.10: Modellierter Verlauf von P_n und Einstrahlung (PAR) bei 18/14 °C, bei 14/18 °C und bei 20/10 °C. ¹	74
Abb. 5.11: Modellierter Verlauf von P_n und Einstrahlung (PAR) bei 16/16 °C, bei 18/14 °C und bei 25/7 °C .	77
Abb. 5.12: Modellierter Verlauf von P_n und Einstrahlung (PAR) bei 18/14 °C, bei 14/18 °C und bei 7/25 °C.	80
Abb. 5.13: Modellierter Verlauf von P_n und Einstrahlung (PAR) bei 18 °C, bei 30 °C und bei 10 °C.	83
Abb. 5.14: Modellierter Verlauf von P_n und Einstrahlung (PAR) bei 18 °C, bei 30/6 °C und bei 6/30 °C.	86
Abb. 5.15: Modellierter Verlauf von P_n und Einstrahlung (PAR) bei 50 % schattiert, ungeschattiert und bei 65% schattiert.	90
Abb. 5.16: Modellierter Verlauf von P_n und Einstrahlung (PAR) bei 50 % schattiert, ungeschattiert und bei 65% schattiert.	93
Abb. 5.17: Modellierter Verlauf von P_n und Einstrahlung (PAR) bei 50 % schattiert, ungeschattiert und bei 65% schattiert.	96
Abb. 5.18: Modellierter Verlauf von P_n und Einstrahlung (PAR) bei 45 % rF, 65 % rF und bei 90 % rF	99
Abb. 5.19: Respiration in Abhängigkeit der Einstrahlung.	102
Abb. 5.20: Respiration in Abhängigkeit der Temperatur.	104
Abb. 5.21: Respiration in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte.	105
Abb. 5.22: Respiration in Abhängigkeit der CO ₂ - Konzentration.	107
Abb. 5.23: Kondensatmenge in Abhängigkeit der Einstrahlung.	109
Abb. 5.24: Kondensatmenge am Tag in Abhängigkeit unterschiedlicher Temperaturen.	111
Abb. 5.25: Kondensatmenge in der Nacht in Abhängigkeit unterschiedlicher Temperaturen.	112
Abb. 5.26: Kondensatmenge am Tag in Abhängigkeit unterschiedlicher relativer Luftfechtigkeiten.	113
Abb. 5.27: Kondensatmenge am Tag in Abhängigkeit unterschiedlicher CO ₂ -Konzentrationen.	114
Abb. 5.28: Kondensatmenge in der Nacht in Abhängigkeit unterschiedlicher CO ₂ -Konzentrationen.	115
Abb. 6.1: Vergleichende Darstellung der Kurven aus den Schattiersuchen bei unterschiedlichen CO ₂ - Konzentrationen.	120
Abb. 6.2: Kondensat an der Innenseite der TPK infolge einer Taupunktunterschreitung.	131

IV Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1:	Überblick über verschiedene Temperaturstrategien.	19
Tab. 2.2:	Auswahl verfügbarer und marktrelevanter Küvettensysteme	23
Tab. 2.3:	Literaturüberblick verschiedener Arbeiten zu Gaswechsellmessungen.	25
Tab. 2.4:	Zusammenstellung der Komponenten des systemorientierten Ansatzes im ZINEG Forschungsgewächshaus in Hannover Ahlem.	28
Tab. 4.1:	Auflistung der Messsensorik in den Tageslicht- Pflanzenküvetten.	39
Tab. 4.2:	Überblick über die Versuchszeiträume und Sollwerteinstellungen der durchgeführten Versuche.	45
Tab. 5.1:	Messung der Regelgenauigkeit bei Sollwerten von 18/18 °C in K1, 30/30 °C in K2 und 10/10 °C in K3.	57
Tab. 5.2:	Messung der Regelgenauigkeit bei Sollwerten von 45 % rF in K1, 65 % rF in K2 und 90 % rF in K3.	58
Tab. 5.3:	Daten eines Vergleichs zur Einstrahlung in die Küvetten.	60
Tab. 5.4:	Ergebnisse der Undichtigkeitsmessung (CO ₂ - Zudosierung in l h ⁻¹).	61
Tab. 5.5:	Ergebnisse der Undichtigkeitsmessung (CO ₂ - Zudosierung in s h ⁻¹).	62
Tab. 5.6:	Kurvenparameter der modellierten Funktionen für K1 (400 vpm), K2 (800 vpm) und K3 (1200 vpm).	66
Tab. 5.7:	Ergebnisse der destruktiven Bonituren zu den Versuchsvarianten für K1 (400 vpm), K2 (800 vpm) und K3 (1200 vpm).	67
Tab. 5.8:	Kurvenparameter der modellierten Funktionen für K1 (1500 vpm), K2 (400 vpm) und K3 (200 vpm).	69
Tab. 5.9:	Ergebnisse der destruktiven Bonituren zu den Versuchsvarianten 1500 vpm (K1), 400 vpm (K2) und 200 vpm (K3).	70
Tab. 5.10:	Kurvenparameter der modellierten Funktionen für K1 (400 vpm), K2 (800 vpm) und K3 (1200 vpm).	72
Tab. 5.11:	Ergebnisse der destruktiven Bonituren zu den Versuchsvarianten 400 vpm (K1), 800 vpm (K2) und 1200 vpm (K3).	73
Tab. 5.12:	Kurvenparameter der modellierten Funktionen für K1 (18/14 °C), K2 (14/18 °C) und K3 (20/10 °C).	75
Tab. 5.13:	Ergebnisse der destruktiven Bonituren zu den Versuchsvarianten 18/14 °C (K1), 14/18 °C (K2) und 20/10 °C (K3).	76
Tab. 5.14:	Kurvenparameter der modellierten Funktionen für K1 (16/16 °C), K2 (18/14 °C) und K3 (25/7 °C).	78
Tab. 5.15:	Ergebnisse der destruktiven Bonituren zu den Versuchsvarianten 16/16 °C (K1), 18/14 °C (K2) und 15/7 °C (K3).	79
Tab. 5.16:	Kurvenparameter der modellierten Funktionen für K1 (18/14 °C), K2 (14/18 °C) und K3 (7/25 °C).	81
Tab. 5.17:	Ergebnisse der destruktiven Bonituren zu den Versuchsvarianten 18/14 °C (K1), 14/18 °C (K2) und 7/25 °C (K3).	82

Tab. 5.18: Kurvenparameter der modellierten Funktionen für K1 (18 °C), K2 (30 °C) und K3 (10 °C).	84
Tab. 5.19: Ergebnisse der destruktiven Bonituren zu den Versuchsvarianten 18/14 °C (K1), 30/30 °C (K2) und 10/10 °C (K3).	85
Tab. 5.20: Kurvenparameter der modellierten Funktionen für K1 (18 °C), K2 (30/6 °C) und K3 (6/30 °C).	87
Tab. 5.21: Ergebnisse der destruktiven Bonituren zu den Versuchsvarianten 18/18 °C (K1), 30/6 °C (K2) und 6/30 °C (K3).	88
Tab. 5.22: Kurvenparameter der modellierten Funktionen für K1 (50 % schattiert), K2 (unschattiert) und K3 (65 % schattiert).	91
Tab. 5.23: Ergebnisse der destruktiven Bonituren zu den Versuchsvarianten 50 % schattiert (K1), ungeschattiert (K2) und 65 % schattiert (K3).	92
Tab. 5.24: Kurvenparameter der modellierten Funktionen für K1 (50 % schattiert), K2 (unschattiert) und K3 (65 % schattiert).	94
Tab. 5.25: Ergebnisse der destruktiven Bonituren zu den Versuchsvarianten 50 % schattiert (K1), ungeschattiert (K2) und 65 % schattiert (K3).	95
Tab. 5.26: Kurvenparameter der modellierten Funktionen für K1 (50 % schattiert), K2 (unschattiert) und K3 (65 %schattiert).	97
Tab. 5.27: Ergebnisse der destruktiven Bonituren zu den Versuchsvarianten 50 % schattiert (K1), ungeschattiert (K2) und 65 % schattiert (K3).	98
Tab. 5.28: Kurvenparameter der modellierten Funktionen für K1 (45 % rF), K2 (65 % rF) und K3 (90 % rF).	100
Tab. 5.29: Ergebnisse der destruktiven Bonituren zu den Versuchsvarianten 45 % rF (K1), 65 % rF (K2) und 95 % rF (K3).	101
Tab. 5.30: Ergebnisse der Korrelationsanalyse zwischen der Respirationsrate (R_d) und der Blattfläche (BF).	103
Tab. 5.31: Mittelwerte der Respirationsraten bei unterschiedlichen CO_2 -Konzentrationen.	108
Tab. 5.32: Ergebnisse der Korrelationsanalyse zwischen der Kondensatmenge und der Blattfläche (BF).	110

1. Einleitung

Aufgrund gestiegener und weiter steigender Energiekosten, maßgeblich durch eine Verknappung wichtiger Ressourcen, ist der Gartenbau in Deutschland stark von Kostensteigerungen und damit einhergehend einer Veränderung von Kultur- und Anbausystemen betroffen (Hoffmann und Rath 2013, Lobos und Hancock 2015, Ozkan *et al.* 2005, Rout *et al.* 2008). Auf dem Weg, die Produktion profitabler zu gestalten, bieten effiziente und damit energiesparende Produktionsmöglichkeiten ein großes Potential. Allein durch die Verwendung eines Energieschirms kann viel Energie eingespart werden. Der tatsächliche Einspareffekt hängt dabei stark von den verwendeten Schirmmaterialien ab. Bei Verwendung eines Einfachschirms können nachts 35 – 40 %, bei Verwendung eines zweilagigen Schirmsystems bis zu 70 % der Heizenergie eingespart werden (Tantau 1998). Nach Tantau (1998) wird durch eine Erhöhung des Temperatur- Sollwerts um 1 °C der Energieverbrauch eines Gewächshauses um etwa 10 % erhöht.

Ferner, mittlerweile Konsens einer breiten Öffentlichkeit, wird die globale Zunahme fossiler CO₂- Emissionen zu einer Verstärkung des Treibhauseffekts auf der Erde und damit zu einer Zunahme von Wetter- und Klima-Extremereignissen führen. Die veränderten Umweltbedingungen werden mittelfristig zunehmend auch den Gartenbausektor betreffen (Hoffmann und Rath 2013, Huges 2000; Rosenzweig *et al.* 2008, Solomon *et al.* 2007).

Vor diesem Hintergrund ist seitens des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) sowie der Landwirtschaftlichen Rentenbank unter Federführung des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMEL) mit Unterstützung der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) ein deutschlandweites Verbundvorhaben gefördert worden: ZINEG (ZukunftsInitiative **N**iedrig**E**nergie**G**ewächshaus).

Dieser Kooperation gehören neben dem Forschungsstandort Hannover auch die Standorte Berlin (geschlossene Betriebsweise mit Nutzung solarer Überschussenergie sowie ökonomische Begleitforschung), München / Neustadt

(Wärmebedarfsminimierung und CO₂- neutrale Energieversorgung) und Osnabrück (Gewächshaus mit Wärmeschutzverglasung) an. Nach Projektauffassung ist das Erreichen einer maximalen Energieeinsparung bei der Pflanzenproduktion, ohne Qualitätsverluste hinnehmen zu müssen, nur durch einen systemorientierten Ansatz möglich. Dabei werden innovative Techniken in Kombination mit angepassten Kulturstrategien realisiert (Tantau *et al.* 2011, www.zineg.net). Es gilt zu beachten, dass die aus der innovativen Technik resultierende potentielle Energieeinsparung und der Einfluss auf die jeweilige Kultur in gleichem Maße den Erfolg und damit die Durchsetzung einer bestimmten Technik oder eines bestimmten Zusammenspiels determinieren (Janka *et al.* 2016).

Bei der innovativen Anlage in Hannover, deren Betrieb und Betriebsbedingungen in weiten Teilen von konventionellen Anlagen abweichen, müssen die Innen- und Betriebsbedingungen erfasst und eine anschließende Optimierung dieser vorgenommen werden. Das wiederum erfordert Untersuchungen auf zwei unterschiedlichen Ebenen.

Zum einen muss die Ebene der Technik der Anlage und des Gesamtsystems getestet, untersucht und letztlich optimiert werden. Dies betrifft zum Beispiel das Be- und Entladen des Pufferspeichers, die CO₂- Dosierung oder die Entwicklung und Untersuchung energiesparender Regelalgorithmen sowie jeweils die soft- und hardwareseitige Realisierung, um die Energieeinsparungspotentiale voll ausnutzen zu können (Akyazi und Tantau 2012, Tantau 1998).

Die zweite Ebene der Untersuchung und Optimierung der Anlage befasst sich mit der Kulturführung. Im Fokus der Untersuchungen stehen dabei die Reaktionen der Pflanze auf die geänderten Bedingungen im Gewächshaus. Schließlich werden nur einwandfreie und verkaufsfertige Produkte einen Abnehmer finden und damit auch einen monetären Gewinn erzielen, unabhängig von der jeweiligen Energieeinsparung. Allerdings gibt es hierbei ein gravierendes Problem. Eine Untersuchung der Reaktionen (kurz-, mittel-, und langfristig) der Pflanzen kann in einem (Forschungs-) Gewächshaus nur als Teil eines Gesamtsystems erfasst werden.

Die Möglichkeit Reaktionen auf einzelne, konstante und losgelöste Klimaparameter zu erfassen, ist in einem großen und trägen System wie einem Gewächshaus mit fluktuierenden Klimabedingungen äußerst schwierig. Für solche Untersuchungen muss ein System geschaffen werden, bei welchem die einzelnen Parameter getrennt voneinander regelbar und die Reaktionen der Pflanzen erfasst werden können (Gaastra 1959).

Eine ausführliche Beschreibung existenter Küvettensysteme sowie der Einsatzbereiche finden sich in 2.2 (Stand des Wissens). Die überwiegende Mehrzahl der Küvettensysteme erfasst den Gaswechsel der Pflanzen und lässt so Rückschlüsse auf die jeweilige Photosyntheseleistung zu (Willert *et al.* 1995). Techniken zur Online- Beobachtung von Pflanzenreaktionen werden unter dem Überbegriff Phytomonitoring (gr.: Φύτον, phyto, die Pflanze betreffend sowie aus dem Englischen to monitor, beobachten, überprüfen) zusammengefasst. Ziel des Phytomonitoring ist es, durch Messungen von Pflanzenreaktionen Rückschlüsse auf die Pflanzenvitalität (Stress) abzuleiten und – sofern erforderlich – frühzeitig geeignete Gegenmaßnahmen einzuleiten (Ton 1997, Ton und Kopyt 2003). Im Gegensatz zu dem 1978 von Udink ten Cate *et al.* beschriebenen `speaking plant approach´ versucht das Phytomonitoring weniger die Performanz einer Kultur zu beschreiben, sondern vielmehr Stressbedingung in frühen Stadien der Kulturen zu detektieren und die Wirkungen zu evaluieren (Ton 1997). Hierbei wird auf verschiedene Daten als Stressindikatoren zurückgegriffen. Dazu zählen Wachstums- und Entwicklungsdepressionen, zum Beispiel in Form eines veränderten Fruchtwachstums, Messungen des Saftflusses innerhalb der Pflanze und nicht zuletzt Veränderungen der Photosyntheserate (Ton 1997, Ton und Kopyt 2003).

Neben der Energiesituation legitimieren auch die absoluten Produktionszahlen, Anbauflächen sowie die umgesetzten monetären Erlöse und damit die Marktrelevanz im Unterglasanbau eine mitunter kostenintensive Optimierung der Produktion. So wurden in Deutschland im Jahr 2012 Zierpflanzen auf einer Fläche von 1848 ha in Unterglasanlagen produziert. Insgesamt wurden im selben Jahr etwa 1,2 Milliarden Beet- und Balkonpflanzen produziert (hauptsächlich, aber nicht ausschließlich, im Unterglasanbau), wovon wiederum Pelargonien die zweithäufigste Kultur waren (Statistisches Bundesamt). Im Jahr

2015 betrug der Gesamtumsatz im Zierpflanzenbau etwa 1,8 Milliarden Euro und wurde von 5300 Unternehmen erwirtschaftet (Tröster 2016, Zentralverband Gartenbau e.V.). Mit einem Anteil von 12 % betrug der durch Pelargonien umgesetzte Betrag ca. 216 Millionen Euro (Tröster 2016).

2. Stand des Wissens

2.1 Begriffe und Definitionen

(Pflanzen-)Stress:

Jene Umweltsituation oder –Bedingung, die direkt oder indirekt zu einer negativen Veränderung des Pflanzenwachstums führt. In der Folge können auch positive Wirkungen für andere Aspekte und Funktionen in den Pflanzen auftreten (Salisbury 1996).

Photosynthetisch aktive Strahlung (PAR, photosynthetically active radiation):

Die photosynthetisch aktive Strahlung ist per Definition der Bereich der Globalstrahlung, der für Pflanzen nutzbar ist. PAR umfasst einen Wellenlängenbereich von 400 – 700 nm (Lambers *et al.* 2008).

Photosynthetische Photonenflussdichte (PPFD, photosynthetic photon flux density):

Einheit zur Erfassung der photosynthetisch aktiven Strahlung als Photonen (-fluss) auf eine horizontale Ebene je Zeiteinheit, in der Einheit $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. (Lambers *et al.* 2008)

Photosynthese:

Komplexer, in den Chloroplasten stattfindender Vorgang der Aufnahme von CO_2 aus der Atmosphäre und Umwandlung in einfache Kohlenhydrate (Glukose und Stärke) und weitere Energieformen (NADPH und ATP), unter Verbrauch der durch solare Einstrahlung gelieferten Energie (Taiz und Zeiger 2006).

NPS (P_n , Netto- Photosyntheserate):

Als Netto- Photosyntheserate oder CO_2 - Assimilation wird die Differenz zwischen biochemischer CO_2 - Fixierung und Respiration bezeichnet. Beide Prozesse laufen im belichteten Blatt simultan ab und sind daher nur schwer quantitativ voneinander zu trennen. Aus diesem Grund dient die Netto-

Photosyntheserate als Standard für Bewertungen und Abschätzungen in der Ökologie (Schulze *et al.* 2002).

Respiration (Atmung):

Elementarer Prozess zur Bildung komplexer Kohlenhydrate (Zellulose, Stärke etc.) aus einfachen Zuckermolekülen, die während der Photosynthese aus CO₂ gebildet werden. Die Prozesse laufen sowohl bei Lichteinstrahlung (Tag), als auch während der Abwesenheit dieser ab (Nacht).

Es wird zwischen zwei Grundarten unterschieden: Aufrechterhaltungs- Atmung (maintenance respiration) zur Umwandlung zellulärer Komponenten und Wachstums- Atmung (growth respiration) zur Versorgung mit ATP und NADH, um Kohlenhydrate in diverse chemische Komponenten umzuwandeln inklusive der Wurzel Respiration zur Absorption von Nährstoffen aus der Umgebung (Lambers und Poorter 1992, Taiz und Zeiger 2006).

Transpiration:

Bezeichnet die Diffusion von Wasserdampf durch die Stomata in die Atmosphäre. Die treibende Kraft der Transpiration und damit für Wasser- und Nährstoffströme innerhalb der Pflanze (Wurzel – Blatt) ist die Differenz des Sättigungsdampfdruckdefizits (VPD, vapour pressure deficit) zwischen Blatt und Atmosphäre (Nobel 2009, Sellers 1985).

Sättigungsdampfdruckdefizit (VPD, vapor pressure deficit)

Unterschied zwischen tatsächlichem Wasserdampfdruck der Luft und dem Wasserdampfdruck bei gesättigter Luft, jeweils bei gleicher Temperatur und gleichem Luftdruck. Daraus abgeleitet ist die Sättigungsdampfdruckdifferenz (vapor pressure difference, $\Delta\omega$) die Differenz zwischen Interzellularraum im Blatt und der Atmosphäre (Lambers *et al.* 2008, Salisbury 1996).

Stomatäre Leitfähigkeit (engl. stomatal conductance):

Gilt als Maßangabe für die Passierbarkeit von Stoffen (CO₂, O₂, H₂O) durch die Stomata von Pflanzen, dementsprechend als Maß für den Grad der Öffnung der Stomata. Der Kehrwert der stomatären Leitfähigkeit ist der stomatäre

Widerstand (engl. stomatal resitance) (Collatz *et al.* 1991, Farquhar und Sharkey 1982).

Licht- Kompensationspunkt (LCP, Light Compensation Point):

Dynamisches Gaswechselgleichgewicht innerhalb der Pflanzen, zwischen der photosynthetischen CO₂- Aufnahme und der respiratorischen CO₂- Abgabe bei einer bestimmten Einstrahlungsintensität (Egle und Schenk 1953, Lamber *et al.* 2008).

Blattflächenindex (LAI, Leaf Area Index):

Bezeichnet eine dimensionslose Größe und ist das Verhältnis der Blattfläche (Oberseite der Blätter) pro m² Bodenfläche. Der Blattflächenindex hängt von der Kultur und der Bestandesdichte ab und erreicht bei zahlreichen, voll entwickelten Kulturen Werte zwischen drei bis fünf (Chen *et al.* 1997, Sellers *et al.* 1986).

Lichtnutzungseffizienz (LUE, Light Use Efficiency):

Quotient zur Berechnung der Effizienz einer Kultur durch das Verhältnis von Energie- Output (Gesamt- Primärproduktivität) und Energie- Input (solare Einstrahlung bzw. absorbierte PAR- Strahlung), üblicherweise für den Verlauf eines Jahres (Vegetationsperiode) (Monteith 1977).

2.2 Photosynthese

Der äußerst komplexe, aber in weiten Teilen gut analysierte und verstandene Prozess der Photosynthese soll im Folgenden nur in seiner Essenz dargestellt werden. Die verfügbare Literatur bietet einen sehr tiefgehenden Einblick in die Funktionsweise (Heldt und Piechulla 2015, Lambers *et al.* 2008, Marriott und Blankenship 2011, Schulze *et al.* 2002, Taiz und Zeiger 2006).

Die Photosynthese wird grundsätzlich in zwei Teilprozesse unterteilt. Die Licht- und die Dunkelreaktion.

2.2.1 Primärreaktion (Lichtabhängige Reaktion)

In diesem umfassenden Vorgang wird die absorbierte Energie der PAR-Strahlung genutzt, um H₂O zu oxidieren und CO₂ zu reduzieren. Dadurch werden kohlenstoffbasierte Komponenten (primär Zucker) gebildet. In der Thylakoidmembran werden zudem energiereiche Komponenten ATP und NADPH aufgebaut und zur Verfügung gestellt.

Das photosynthetisch aktivste Gewebe in höheren Pflanzen ist das Mesophyll der Blätter. In der Thylakoidmembran der Chloroplasten sitzen Proteinkomplexe (LHC, light harvesting komplex), die als Antennen funktionieren und die auftreffende Strahlungsenergie als Excitonen in das Reaktionszentrum des spezialisierten, lichtabsorbierenden Pigments, dem Chlorophyll, weiterleiten. Das Chlorophyll absorbiert den Großteil der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR, photosynthetically active radiation), die in einem Wellenlängenbereich von 400 – 700 nm liegt. Es fungiert somit als Hauptrezeptor des Lichts und Motor der Photosynthese. Neben den beiden Hauptpigmenten Chlorophyll a und Chlorophyll b absorbieren auch Carotinoide und Xanthophylle auftreffende Strahlung, leiten die Energie aber wiederum zum Chlorophyll weiter und werden daher auch als akzessorische Pigmente bezeichnet (Heldt und Piechulla 2015, Nobel 2009). Die insgesamt zwei hintereinander geschalteten Reaktionszentren, Photosystem II und Photosystem I (PS II und PS I), besitzen unterschiedliche Absorptionsmaxima (680 und 700 nm für PS II und PS I).

Im Photosystem II werden zwei H₂O in O₂ und vier H⁺ gespalten, wodurch insgesamt vier Elektronen erzeugt werden. Die so bereitgestellten Elektronen

werden entlang einer Elektronen- Transportkette in der Thylakoidmembran zum Photosystem I geleitet. Hier wird durch angelagerte und spezialisierte Proteinkomplexe NADP^+ zu NADPH reduziert (Lambers *et al.* 2008). Ein weiteres, ebenfalls in der Thylakoidmembran lokalisiertes und sehr komplexes Molekül, die ATPase, nutzt den H^+ - Protonengradienten zwischen Thylakoid- Innenraum (Lumen) und Chloroplasten- Innenraum (Stroma) und fungiert als Protonenpumpe für den Wasserstoff aus der Spaltung von H_2O und synthetisiert dabei ATP.

Die Produkte der Lichtreaktion sind damit elementarer Sauerstoff (O_2), Reduktionsäquivalente (NADPH) und chemische Energie (ATP). Diese gehen in die Sekundärreaktion der Photosynthese ein.

2.2.2 Sekundärreaktion (Lichtunabhängige Reaktion)

Die Sekundärreaktion der Photosynthese benötigt zum Ablauf per se kein Licht. Da aber die umgesetzten Stoffe aus der Lichtreaktion stammen und die Aktivität einiger beteiligter Enzyme des Calvin- Zyklus durch Licht reguliert werden, ist sie eben nicht unabhängig von Licht und wird in der Literatur zunehmend als Kohlenstoffreaktion der Photosynthese bezeichnet (Heldt und Piechulla 2015). Dabei wird ein komplexer biochemischer Vorgang, der Calvin- Zyklus, durchlaufen. An dessen Ende wird mithilfe der Reduktionsäquivalente (NADPH) und der chemischen Energie (ATP) CO_2 assimiliert (Heldt und Piechulla 2015, Lambers *et al.* 2008).

Der Calvin- Zyklus gliedert sich vereinfacht in drei Teilabschnitte:

- Carboxylierung des CO_2 Akzeptors (Ribulose- 1,5- bisphosphat), wodurch zwei C3- Körper gebildet werden und das erste stabile Zwischenprodukt des Calvin- Zyklus darstellen.
- Reduktion von 3- Phosphoglycerat zu Glycerinaldehyd- 3- phosphat, einem Kohlenhydrat.
- Regenerierung des CO_2 - Akzeptors

Die auf diese Weise generierten Kohlenhydrate werden in Form von Glukose und Stärke gespeichert.

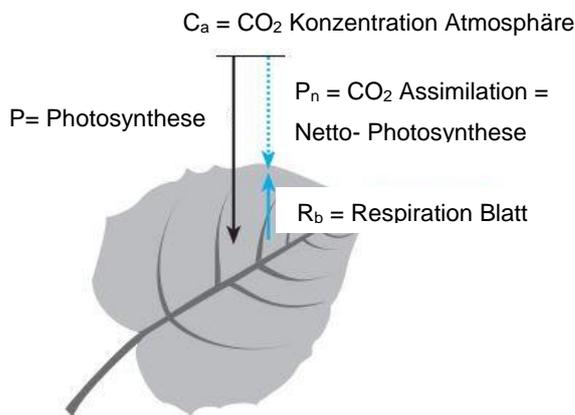
Eine entscheidende Feststellung in der Photosyntheseforschung ist die Erkenntnis, dass diese entweder durch Licht oder durch CO_2 limitiert wird, niemals aber durch beide gleichzeitig (Taiz und Zeiger 2006).

2.3 Respiration (Veratmung, Dissimilation)

Die Respiration ist eine komplexe, stoffwechselphysiologische, bei höheren Pflanzen in den Mitochondrien stattfindende Abfolge von RedOx- Vorgängen, an deren Ende die Umwandlung von Kohlenhydraten (Glukose oder andere Speicher- Kohlenhydrate) zur Energiegewinnung steht. Sie kann als Umkehrung der Photosynthese verstanden werden. Zu den Stoffwechselwegen der Respiration in pflanzlichen Geweben zählen die Glykolyse, der oxidative Pentose- Phosphatweg, der Tricarbonsäure- Zyklus und die Elektronen-Transportkette (Atkin 2003, Lambers *et al.* 2005).

Die Respiration ist in insgesamt drei Teilprozesse untergliedert. Dazu zählen die lichtinduzierte Respiration, die auch als Photorespiration bezeichnet wird, sowie die Respiration heterotropher Zellen (z.B. Epidermis) und

photosynthetisch aktiver Zellen. Eine Überschneidung dieser auch bei Lichteinfall auftretenden Prozesse mit der Photosynthese erschwert eine mögliche Messung, bzw. quantitative Erfassung und damit Unterscheidung in der Kohlenstoffbilanzierung (Abb. 2.1).



Quelle: Schulze *et al.* 2002, verändert Akyazi

Abb. 2.1: Schematische Darstellung der CO_2 Flüsse eines Blattes. CO_2 Fluss ins Blatt entspricht der Photosyntheserate. Davon wird die zur selben Zeit stattfindende Respiration abgezogen, sodass als Ergebnis die Netto-Photosyntheserate steht.

Aus diesem Grund wird der Netto-Austausch (Netto- Photo-synthese) zur CO_2 - Bilanzierung bei Lichteinfall verwendet (Schulze *et al.* 2002).

In Abwesenheit von Licht stellt die Respiration ATP und andere erforderliche metabolische Zwischenprodukte, die

für Wachstum, Aufrechterhaltung, Transport und Nährstoffassimilation erforderlich sind, bereit.

Die Respiration ist von einer Vielzahl biotischer Faktoren abhängig, wobei die Temperatur von herausragender Bedeutung ist (Meler *et al.* 1999).

2.4 Modellansätze zur Bestimmung der Photosynthese

Mathematische Modelle dienen im Allgemeinen der Vereinfachung von zum Teil sehr komplexen Sachverhalten. Dabei können die zugrundeliegenden Annahmen, z.B. bei biologischen Modellen, von sehr unterschiedlichen Tiefen oder Ebenen aus betrachtet werden. Generell gilt dabei, dass biologische Konzepte durch mathematisch basierte Modelle gut beschrieben und verifiziert werden können und sollen (Kessler 2007). Die Betrachtungsebene reicht von Prozessen auf atomarer- (submikroskopischer), über Protein-, bis hin zur makroskopischen Ebene. Sie können als Teilmodelle in ein mehr oder weniger komplexes, die Realität mehr oder weniger gut abbildendes Gesamtmodell überführt werden (Peleg *et al.* 2002).

Die ersten Modelle zur Berechnung der Photosynthese stammen aus den frühen 60er Jahren des 20. Jahrhundert (Seaki 1960, Wit 1965) und betrachteten die solare Einstrahlung als einzige Einflussgröße. Im Laufe der Entwicklung wurde klar, dass zahlreiche Faktoren die Photosynthese beeinflussen und bei der Modellentwicklung berücksichtigt werden müssen. Einer der am häufigsten angewendeten Modellansätze (in der Fachliteratur zitiert) zur Modellierung der Netto-Photosynthese stammt von Farquhar *et al.* (1980). Bei diesem Ansatz werden erstmalig biochemische Vorgänge und Prinzipien in ein Modell implementiert. Es setzt sich aus zahlreichen Teilmodellen, unter anderem zur Berechnung von Respiration, De- / Carboxylierungsprozessen, Elektronen-transportrate etc. zusammen und vereint so modellhaft die zusammenhängende Prozessvielfalt.

Ein weiterer Durchbruch in der Geschichte der Evolution der Photosynthese-Modellierung wird durch Sellers *et al.* (1996) und Thornley und Johnson (1990) begründet. Hier wurde erstmals der Versuch unternommen die Photosyntheseraten auf verschiedenen Ebenen der Einzelpflanze, bzw. für

ganze Pflanzenbestände zu erfassen und durch Modellparameter wie Photonenflussdichte, Blatttransmissionskoeffizient und später auch Luftströmung um das Blatt, Blattarchitektur oder Blattstellung zu modellieren ('big leaf models'). Diese Zusammenhänge werden in Form einer rechteckigen Hyperbelfunktion (rectangular hyperbola function) zusammengeführt (Thornley und Johnson 1990).

In zukünftigen Modellen werden für eine genauere Abbildbarkeit der tatsächlichen Messwerte und Reaktionen, aber auch im Blick auf eine höhere Skalierung der Aussage weitere, tiefgehende Ebenen der Pflanzenphysiologie Einzug halten. Dazu zählen zum Beispiel Faktoren wie Zellteilung und -expansion, hormonelle Einflüsse oder die Kontrolle bestimmter Gene. Deutliche Fortschritte auf dem Gebiet der Gaswechselfmessungen, aber auch das tiefergehende Verständnis der stoffwechselphysiologischen Vorgänge, haben komplexere und genauere Modelle und deren Validierung ermöglicht (Farquhar *et al.* 2001). Als Folge der Implementierung weiterer Faktoren in ein Modell, wird dieses vielschichtiger und dadurch zwangsläufig schwerer überschaubar. Zudem fußen die zusätzlichen Faktoren oftmals auf Annahmen, sodass die Vorhersagegenauigkeit trotz der Komplexität abnehmen kann (Boote und Pickering 1994, Kessler 2007, Schymanski *et al.* 2007). Ein weiterer Punkt die Aussagekraft von Modellen und ihre jeweilige Vorhersagefähigkeit betreffend bezieht sich auf die Unterschiede zur Modellparametererfassung und der folgenden, tatsächlichen Umgebung der Versuchsanstellung oder der Praxis. Durch verschiedenste Merkmale, wie zum Beispiel Vorhandensein und Position der Zusatzbelichtung, Position der Heizrohre, generelle Struktur der Versuchs- oder Produktionsanlage und viele weitere, kann die Modellvorhersage unzureichend sein (Körner *et al.* 2007).

Auf Basis einer modifizierten rechteckigen Hyperbelfunktion haben Ye (2007) und Ye und Zhao (2010) ein vereinfachtes Modell zur Bestimmung der Netto-Photosyntheserate (Gl. 1.1) entworfen und für verschiedene Pflanzenarten bei Stark- und Schwachlicht, sowie bei erhöhten CO₂-Konzentrationen mit Messdaten validiert. Dieses Modell kommt mit sehr wenigen Annahmen aus und liefert eine gute Vergleichbarkeit der gemessen im Vergleich zu den modellierten Daten (Ye 2007, Ye und Zhao 2010).

$$P_n = \alpha * \frac{1 - \beta I}{1 + \gamma I} * I - \delta \quad \text{Gl. 1.1}$$

Eine detaillierte Beschreibung der Modellparameter ist in Abschnitt 4.3.1.2 dargestellt.

2.5 Einfluss verschiedener Klimafaktoren auf die Pflanzenentwicklung

Die unterschiedlichen Klima- und Einflussgrößen, denen eine Pflanze oder Kultur während der Kulturdauer ausgesetzt ist, bewirken mannigfaltige Reaktionen auf die Pflanze oder Kultur. Es gilt vor allem diese Größen zu identifizieren und ihre jeweilige Schadwirkung zu quantifizieren, die der optimalen Entwicklung einer Pflanze oder Kultur abträglich sind. Die Stärke dieser Einflussnahme hängt von einzelnen, aber auch sehr oft dem Zusammenspiel dieser Faktoren, sowie der Art und Weise des Einflussfaktors selbst, ab. Das Spektrum der positiven oder negativen Reaktionen ist dabei sehr breit. Im Allgemeinen wird zwischen klimatischen (z.B. Temperatur, Einstrahlung etc.), edaphischen (Nährstoffversorgung, Wasserversorgung etc.) und zeitabhängigen Faktoren (Pflanzenalter, Dauer der Vegetationsperiode etc.) unterschieden (Schulze *et al.* 2002).

2.5.1 Licht

Zur Beschreibung des Lichts werden zahlreiche Einheiten angegeben, wobei allerdings nur zwei für die Beschreibung der Vorgänge bei Pflanzen angebracht sind. Die Bestrahlungsstärke, also der Energiegehalt des Lichts, der auf eine definierte Fläche (zumeist 1 m²) auftrifft, wird in W m⁻² angegeben (Smith *et al.* 2007).

Eine weitere Einheit ist die Anzahl einfallender Lichtquanten. Hierbei wird das Licht als energiereiches Teilchen (Photon) verstanden. Die Einheit der Lichtquanten wird in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ angegeben. Die beiden maßgeblich verwendeten Einheiten zeugen von Erkenntnissen, die man über die

Verbreitung und die Eigenschaften des Lichts gewonnen hat und als Welle-Teilchen- Dualismus beschreibt (Arndt *et al.* 1999).

Licht, das im photosynthetisch verwertbaren Bereich zwischen 400 und 700 nm auf die Pflanze auftrifft, kann von ihr durch spezielle, lichtabsorbierende Pigmente genutzt und umgesetzt werden und wird als photosynthetische Photonen- Flussdichte (PPFD) bezeichnet. Es gilt im Allgemeinen als Einheit der Wahl bei der Beschreibung der Wirkung des Lichts auf Pflanzen, da damit am besten die photochemischen Zusammenhänge erklärt werden (McCree 1972, Taiz und Zeiger 2006). Das Licht trifft auf die Pflanze, wird in bestimmten Wellenlängenbereichen absorbiert und für biochemische Prozesse nutzbar gemacht.

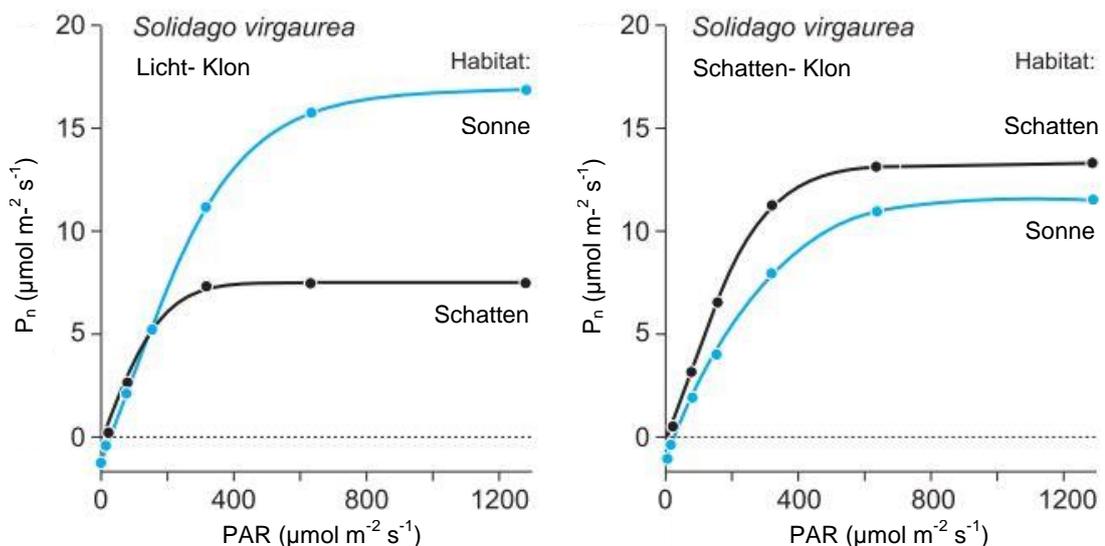
2.5.1.1 Einfluss von Strahlung und Wellenlängenbereichen auf die Pflanze

Dem Wachstums- und Klimafaktor Licht, also der elektromagnetischen Strahlung, kommt bei Pflanzen eine übergeordnete Rolle zu. Die Lichtqualität, die auf eine Pflanze auftreffenden Wellenlängenbereiche und deren Verhältnisse zueinander üben eine stark beeinflussende Wirkung aus (Goins *et al.* 1997, Kim *et al.* 2004, Tanaka *et al.* 1998, Tripathy und Brown 1995). Dabei entscheiden sowohl die Lichtqualität (Wellenlänge der Strahlung), die Lichtquantität (Intensität der Strahlung) und die Photoperiode (Dauer der Strahlung, z.B. Tageslänge) über die respektive Wirkung des Lichts auf die Pflanze (Gagnon und Dansereau 1990, Langton *et al.* 2003, Schulze *et al.* 2002, Taiz und Zeiger 2006, Turner *et al.* 2005).

In der Literatur werden zahlreiche licht- induzierte Erscheinungen beschrieben. Dazu zählen unter anderem der lichtregulierte Übergang von der vegetativen in die generative Phase, die Blüteninduktion, Ausbildung von Inhaltsstoffen, diurnale Bewegungen und Phototropien jeglicher Art und viele weitere (Langton *et al.* 2003, Lee *et al.* 2005, Rao *et al.* 1996, Schulze *et al.* 2002).

Hierbei gilt es zu beachten, dass das Verhältnis zweier oder mehrerer Wellenlängenbereiche selbst innerhalb einer Art zu unterschiedlichen Effekten führen kann (Attridge 1990, Bornwaßer 2011, Kim *et al.* 2004, Stuefer und Huber 1998). Die in der Literatur genannten, maßgeblich beeinflussenden Wellenlängenbereiche erscheinen für das menschliche Auge blau (~ 430 – 450

nm), rot (~ 640 – 680 nm) und dunkelrot, auch far red, (~ 730 nm) (Attridge 1990). Nach Appelgren (1990) führen die Wellenlängenbereiche, die für das menschliche Auge als blau und rot wahrgenommen werden, zu signifikanten Unterschieden in Stängellänge und damit Gesamtpflanzenhöhe. Eine Reduzierung der Einstrahlung kann maßgeblich zwei grundsätzliche Veränderungen der Lichtstrahlung hervorrufen. Zum einen kann die Quantität verändert werden, was sich in der Regel auf Wachstums- und Produktionsparameter auswirkt und zum anderen auf die Qualität (z.B. hellrot/dunkelrot Verhältnis) der Strahlung, was sich wiederum auf entwicklungsphysiologische Parameter auswirkt (Stuefer und Huber 1998). Eine morphologische und von der Lichtsituation abhängige Veränderung betrifft die Blattanatomie der Kultur. Diese wird an die jeweiligen Gegebenheiten angepasst, sodass sich als Folge an diese Veränderungen unter anderem auch die Photosyntheserate der neuen Situation entsprechend einpendelt. Neben einer kurzzeitigen und reversiblen Anpassung, die maßgeblich durch eine Verschiebung des Licht- Kompensationspunktes, also dem Gleichgewicht zwischen Photosynthese und Respiration bei entsprechender Einstrahlung, existiert zusätzlich noch eine nicht reversible morphologische Anpassung (Abb. 2.2) (Schulze *et al.* 2002).



Quelle: Schulze *et al.* 2002, verändert Akyazi

Abb. 2.2: Veränderungen der Netto- Photosyntheserate durch morphologische Anpassung an das Lichtklima bei *Solidago virgaurea*, verdeutlicht durch lichtadaptierte Pflanzen (links) und Schatten-adaptierte Pflanzen (rechts).

2.5.2 Temperatur

Die Temperatur ist eine wichtige und einflussreiche physikalische Größe, da sie nahezu sämtliche biologischen Prozesse beeinflusst (Meler *et al.* 1999, Taiz und Zeiger 2006). Insbesondere niedrige Temperaturen verlangsamen enzymkatalysierte Prozesse (Stitt und Hurry 2002, Sung *et al.* 2003) und sind einer der wichtigsten, die Performanz einer Pflanze beeinflussenden Faktoren (Boyer 1982, Larcher 2003). Dabei ist das Temperaturoptimum über verschiedene Pflanzenarten keineswegs konstant. Auch kann es sich innerhalb einer Art, z. B. in Abhängigkeit von der Vegetationsperiode, der Einstrahlung oder der Blattmorphologie anpassen (Schulze *et al.* 2002).

Physiologisch betrachtet beeinflussen Extremtemperaturen die Membranfluidität und verändern dadurch die Expression beteiligter Gene (Sung *et al.* 2003).

2.5.3 Relative Luftfeuchtigkeit

Die relative Luftfeuchtigkeit und damit das daraus resultierende Sättigungsdampfdefizit der umgebenden Luft gilt als treibende Kraft der Transpiration und sorgt in der Pflanze für den notwendigen Unterdruck, der benötigt wird, um Wasser und Nährstoffe aus dem Wurzelbereich durch die Pflanzen zu transportieren (Taiz und Zeiger 2006, Tibbits 1979). Je nach Anpassung und Pflanze existieren allerdings Unterschiede bei der Wirkung eines hohen Sättigungsdampfdefizits. So nimmt die Transpiration in der Regel zu, was aber nicht automatisch zu einer Abnahme oder allgemeiner zu einer Veränderung des Wasserpotentials in der Pflanze führt (Tibbits 1979). Ein übermäßiger Wasserverlust durch die Transpiration einhergehend mit einer unzureichenden Wasserversorgung aus dem Boden / Substrat kann zu massiven Problemen bei Pflanzen führen, sofern diese nicht an extrem trockene Standorte angepasst sind (Farooq 2009).

Der Weg des Wassers verläuft dabei vom Boden über die Wurzeln in die Pflanze, ins Blattwerk und schließlich in die Atmosphäre. Dieser Weg durch die Pflanze erfordert das Überwinden einiger Barrieren und wird als Widerstandskaskade oder –netzwerk bezeichnet (Massman und Ham 1994).

2.5.4 CO₂- Konzentration

Der Einfluss der CO₂- Konzentration auf das Wachstum von Pflanzen konnte in zahlreichen Untersuchungen hinreichend belegt werden (Ghannoum et al 1997, Ghannoum und Conroy 1998, Riechers und Strain 1988, Sionit und Patterson 1988, Wand *et al.* 1999). Unter natürlichen Bedingungen (ca. 0.03 % CO₂) stellt CO₂ einen limitierenden Faktor dar (Gaastra 1959). Eine Erhöhung der Konzentration führt zu einer gesteigerten Netto- Photosyntheserate und damit in der Regel auch zu einer gesteigerten Biomasseproduktion. Allerdings verläuft der Zugewinn nur in einem bestimmten Bereich linear und der Zusammenhang ist nicht endlos gültig (CO₂- Toxizität) und in einigen Fällen selbst bei verschiedenen Sorten einer Art variierend (Kimball 1982, Manning und Tiedemann 1995).

Die Diffusion von CO₂ aus der Atmosphäre in den Interzellularraum über die Stomata wird ähnlich wie die Transpiration, allerdings in umgekehrter Richtung, über eine Widerstandskaskade erschwert.

2.5.5 Weitere Quellen für Pflanzenstress

In der Literatur werden zahlreiche weitere, in der vorliegenden Arbeit nicht näher untersuchte, Faktoren für das Auftreten von Pflanzenstress genannt. Eine wichtige Rolle nimmt dabei die Nährstoffversorgung, also die Zugänglichkeit von elementaren Mikro- und Makronährstoffen, der Pflanzen ein (Taylor und Tingey 1981, Zhao *et al.* 2005).

Auch die Verfügbarkeit von Wasser und der Versorgungsgrad in der Pflanze spielt eine bedeutende Rolle (Amer und Williams 1958). Allerdings ist *Pelargonium zonale* wenig empfänglich für Trockenstress, da sie über Vermeidungsmechanismen, wie eine Reduzierung der Photosynthese, geschlossene Stomata und weitere Anpassungen verfügt (Amer und Williams 1958).

Eine ebenfalls hohe Bedeutung als Störgröße, die eine optimale Pflanzenentwicklung unterbindet, wird auch Schadstoffen in der Luft und dabei

insbesondere dem Schwefeldioxid (SO₂) und dem Ozon (O₃) zugemessen (Sarabia *et al.* 2009, Taylor und Tingley 1981).

Gänzlich außer Acht gelassen wurde auch das gesamte Feld der Schadwirkungen, auslöst durch Schaderreger. Dieses enorm breitgefächerte Gebiet und die damit verbundenen – zumeist negativen – Reaktionen der Pflanzen bergen gerade im Unterglasanbau ein enormes Potential für Störungen der Pflanzenvitalität jeglicher Art und stellen eine hohe monetäre Verlustquelle für Anbauer da (Hock und Elstner 1988).

2.6 Klima- Regel- Strategien und energiesparende Regelung

Nach Hendricks (1997) findet eine grundsätzliche Unterscheidung in statische und dynamische Regelstrategien statt.

Statische Regelstrategien folgen einem fest eingestellten Regelmuster der Heiz- und Lüftungstemperatur und verfügen nur über geringe Variations- und Optimierungsmöglichkeiten ('blue print'). Dynamische Strategien dagegen sind bedeutend vielfältiger gestaltbar, da durch die Verquickung der Temperatur mit anderen Klimafaktoren, physiologischer Reaktion oder dem Energieverbrauch mannigfaltige Einstellungs- und Optimierungsmöglichkeiten gegeben sind. Seit der Einführung von Klimacomputern konnten die dynamischen Strategien durch moderne Regelgeräte um die Sparte der Integrationsstrategien erweitert werden. Diesen sind heutzutage in modernen Gewächshausanlagen und Produktionsstätten Standard (Hendricks 1997, Tantau 1998). Eine Auflistung gängiger Temperaturstrategien ist in Tabelle 2.1 dargestellt.

Tab. 2.1: Überblick über verschiedene Temperaturstrategien. HT: Heiztemperatur, LT: Lüftungstemperatur

Strategien	Merkmal
<u>statische Strategien</u>	
konventionell	LT i.d.R. 2 -4 °C über HT HT Nacht i.d.R. 2 – 4°C unter HT Tag
Drop (‘Cool Morning’)	Absenkung HT und LT am frühen Morgen. Hemmung Streckungswachstum
‘Warm- Evening’	Anheben der LT am Abend um Einstrahlungsenergie zu speichern
<u>dynamische Strategien</u>	
strahlungs- / lichtabhängige Temperaturführung	Anbindung HT Tag oder Nacht an Einstrahlung oder Einstrahlungssumme
Entfeuchtungsregelung	Absenkung LT oder Anhebung HT bei Überschreiten eines Sollwerts
‘Speaking- Plant’- Strategien	Einbeziehung physiologischer oder morphologischer Pflanzenreaktion
<u>Integrationsstrategien</u>	
Temperatursummenregelung	HT Nacht ergibt sich aus der Differenz zwischen 24 h Solltemperatursumme und der Temperatursumme des Tages

Quelle: Hendricks 1997, verändert Akyazi

Während die statische Gewächshausregelung in weiten Teilen nicht sehr effizient hinsichtlich des Energieverbrauchs eines Gewächshauses ist, birgt eine dynamische Gewächshaus Klima- Regel- Strategie den enormen, nicht zuletzt wirtschaftlichen, Vorteil einer energieeffizienten Klimaführung. Allerdings geht dies oft zu Lasten der Kultur, da mitunter extreme Mikroklimata die Folge sind (Körner *et al.* 2007, Janka *et al.* 2015). Die einer dynamischen Klima- Regel- Strategie zugrunde liegenden Modelle müssen mit tatsächlichen Kultur- und Pflanzendaten unterlegt und im Folgenden validiert werden (Rodriguez *et al.* 2000).

2.7 Küvetten- Systeme zur Gaswechselformung

In der Literatur werden zahlreiche Systeme zur Messung des Gaswechsels bei Pflanzen dargestellt. Bereits 1937 beschrieben Thomas und Hill automatisierte Messtechniken zur Erfassung des Gaswechsels von Pflanzen. Für die Untersuchungen bei Pflanzen werden in der Regel intakte und noch an der Pflanze befindliche Pflanzenorgane verwendet und Gaswechsel, der

teilchenmäßige Austausch zwischen Pflanzeninnerem und der Umgebung, erfasst und ausgewertet.

Der Großteil solcher Versuche wird mit einzelnen Blättern, Pflanzenteilen oder gesamten Pflanzen bzw. Pflanzenbeständen durchgeführt (Burkhardt 2007). Der Gasaustausch zwischen Pflanze und Umwelt erfolgt in sehr geringen Anteilen unkontrolliert über die Epidermis, kontrolliert und hauptsächlich aber über die Stomata. Dazu wird im Spaltöffnungsapparat, einem Komplex aus Schließzelle, Nebenzelle und Spaltöffnungspore, in den Nebenzellen der Turgor erhöht, wodurch die Stomata öffnen und der Gasaustausch stattfinden kann (Taiz und Zeiger 2006).

Es finden sich zahlreiche Arbeiten zur Nutzung von Phytosignalen zur Regelung pflanzenbaulich relevanter Parameter wie der Bewässerung, der Schirmsteuerung oder der optimalen Temperatur und relativen Luftfeuchte im Gewächshaus (Exarchou 2006, Schmidt 2004, Schmidt 2005, Ton 1997, Ton und Kopyt 2003^a, Ton und Kopyt 2003^b). Bei den Systemen handelt es sich um stationäre, fest installierte und verkabelte Geräte mit permanentem oder periodischem Kontakt zur Pflanze. Um die Pflanzenreaktionen akkurat erfassen zu können, müssen geeignete Sensoren die Veränderungen der Pflanze-Umweltinteraktion genau erfassen und verarbeiten (Kacira *et al.* 2005). Hierbei ist eine besondere Anforderung an das Messsystem, die untersuchte Pflanze nicht zu verletzen, oder anderweitig zu beeinflussen, wobei sich die genauen Anforderungen an die Instrumente aus dem jeweiligen Nutzungsbereich ableiten (Burkart *et al.* 2007). Allen Systemen gemeinsam ist die Erfassung des Gaswechsels innerhalb einer mehr oder weniger zur Umwelt abgeschlossenen Einheit. Auch die reine Messmethodik ist bei allen Systemen gleich und basiert in der Regel auf einer Erfassung der CO₂-Konzentration (aber auch O₂ oder anderer Moleküle) vor und nach einer Interaktion mit dem Messobjekt (Burkart *et al.* 2007, Willert *et al.* 1995).

Eine grundsätzliche Unterscheidung findet durch zwei verschiedene Messverfahren statt: Offene und geschlossene Messsysteme, wobei auch hier beide Messsysteme über identische Komponenten und damit Messprinzipien verfügen (Willert *et al.* 1995).

Bei offenen Systemen werden in der Regel einzelne Pflanzenorgane, zumeist Blätter, dicht in einer transparenten Küvette verschlossen. Dabei ist das Versuchsobjekt nicht von der Außenluft getrennt. Vielmehr wird Außenluft in definierten Volumina, Drücken und Geschwindigkeiten an dem Messobjekt vorbeigeführt und die Veränderungen der Referenzluft (Außenluft) gegenüber der Messluft (Küvettenluft) verglichen (Willert *et al.* 1995).

Dem gegenüber stehen geschlossene Systeme. Hier sind die Pflanzen, oder Teile dieser, ebenfalls in transparenten Küvetten dicht eingeschlossen. Der maßgebliche Unterschied zu einem offenen System liegt in der Trennung von Messobjekt und Außenluft. Die zur Probenahme entnommene Messluft wird nach dem Messvorgang über eine Ringleitung wieder in das System geleitet.

Im Allgemeinen gilt, dass die Aussagekraft von Küvettenssystemen gesteigert werden kann, wenn diese möglichst geringe Veränderungen der einwirkenden Faktoren mit sich bringen. Dies gilt in besonderem Maße für die mehr oder weniger stark beeinflusste Einstrahlung (Lichtfeld). Aber auch der mit abnehmender Küvettengröße zunehmende Luftstrom und das sich schneller ändernde Küvettenklima wirken sich mitunter stark auf die erzielten Resultate aus (Egle 1960). Nach Sellers *et al.* (1992) können deutliche Unterschiede zwischen den Gaswechselfmessungen einzelner Blätter (in Blattküvetten) oder eines gesamten Bestandes (in Ganzpflanzen- Küvetten) entstehen. Dies geschieht vor allem durch die Auswahl ungeeigneter und nicht repräsentativer Blätter und Blattpositionen an der Pflanze, da im Vergleich zu einer Erfassung auf Bestandesebene, die Netto- Photosyntheseleistung durch Beschattung des Blattwerks an sich, in absoluten Zahlen betrachtet, geringer ist.

Die Datenerfassung in Küvettenssystemen wird bei einem Großteil der in der Literatur angegebenen Messungen mit den unterschiedlichen Messsystemen, jeweils nur für eine relativ kurze Messperiode zur Erfassung der Pflanzenreaktionen durchgeführt. Die Einwirkdauer eines bestimmten zu untersuchenden Faktors ist aber oftmals deutlich länger anhaltend und einwirkend, sodass lediglich Momentaufnahmen erfasst werden, die insbesondere dann nicht besonders repräsentativ sind, wenn die Pflanze durch die Messmethodik an sich beeinflusst wird. Dem kann nur durch ein

langfristiges ungestörtes Messprozedere entgegengewirkt werden (Farquhar *et al.* 2001).

2.7.1 Marktrelevante Gaswechsellmesssysteme

Der breitbandige Einsatzbereich und die Verbesserungen in technischen und zugrundeliegenden mathematischen (Algorithmen) Bedingungen von Gaswechsellmesssystemen sowie daraus abgeleitete Erkenntnisse und Forschungsergebnisse erklären das steigende kommerzielle Interesse an verschiedenen Küvettensystemen. Zugleich wird die Bedeutung von Gaswechsellmessungen für ökophysiologische Untersuchungen gesteigert, da sie eine vielseitige und anpassbare Grundlage für Untersuchungen im Einzelblatt-, Einzelpflanzen- und Bestandesmaßstab darstellen können. Die Anwendungsumgebung umfasst Untersuchungen sowohl unter Laborbedingungen, als auch im Freiland (Burkart 2007, Farquhar *et al.* 2001). Eine Auswahl an kommerziell verfügbaren Gaswechsellmesssystemen bietet die Tabelle 2.2.

Tab. 2.2: Auswahl verfügbarer und marktrelevanter Küvettensysteme

Hersteller	Typenbezeichnung	
Bio Instruments S.R.L. www.phyto-sensor.com/PM-11	PTM-48A	
Bio Instruments S.R.L. www.phyto-sensor.com/PM-11	PM-11 Phytomonitor	
Heinz Walz GmbH www.walz.com	3010-GWK1	
Li- Cor www.licor.com	Li-6400 XT	
PP Systems www.ppsystems.com	CIRAS-3	

Ein großes Problem der Datenerhebung mit Handmessgeräten betrifft die selektive Auswahl der zu vermessenden Pflanzen oder Pflanzenteile. Zudem werden nur kurzzeitige Momentaufnahmen ohne eine gleichzeitige Erfassung des Mikroklimas aufgezeichnet und eine Erfassung des Gesamtsystems (Gewächshaus – Bestand – Pflanze – Blatt) unterbunden (Schmidt *et al.* 2014). Während das Li- Cor Messgerät (Li-6400 XT) primär als reines Handgerät mit der Möglichkeit zum Feldeinsatz konzipiert wurde, bietet es auch die Möglichkeit, wie die Geräte von Bio Instrumentals S.L.R. (PTM-48A, PM-11 Phytomonitor), als stationäre Lösung und zur Langzeitüberwachung verwendet zu werden. Um dabei die Pflanzen über die Messperiode weniger zu beeinflussen, klappt die Küvette der Bio Instrumentals Geräte, für die jeweiligen Messungen, periodisch zu (www.phyto-sensor.com).

Die Li- Cor, Walz und PP Systems Messgeräte bietet neben der Gaswechselfmessung zusätzlich die Möglichkeit, auch die Chlorophyll-Fluoreszenz, des in der Küvette befindlichen Blattausschnitts aufzunehmen.

Vom reinen Messprinzip her arbeiten die gezeigten Systeme identisch. Die durch die Küvette geführte Luft wird gefiltert, getrocknet und zum Sensor geleitet, wo die CO₂- Differenz zwischen Ein- und Auslassluft ermittelt und verrechnet wird.

Nach Hurry *et al.* (2005) weisen die Messwerte aus Blattküvetten (gemessen mit dem Li- Cor 6400), die zur Photosynthese- und Respirationmessung eingesetzt werden, einen Fehler auf, wenn die Daten nicht korrigiert werden. Diese Fehler äußern sich in einer Überschätzung der Messwerte und entstehen durch CO₂ Diffusion aus der Atmosphäre in die Küvette und durch respirative CO₂ Freisetzung unter der Dichtung der Küvette. Zumindest die Korrektur der Diffusion von CO₂ in die Küvette muss auch bei Messungen zur Photosynthese berücksichtigt werden, da auch hier ein CO₂ Gradient zwischen Küvette und Außenluft vorhanden ist.

2.7.2 Gaswechselfmessungen bei verschiedenen Versuchsanstellungen (Versuchsaufbauten)

Neben den marktrelevanten und kommerziell verfügbaren Gaswechsel-Messsystemen gibt es eine Vielzahl von Versuchsanstellungen, bei denen durch Kombinationen marktverfügbarer Messsysteme, die an die jeweiligen Messaufgaben angepasst wurden, versuchsspezifische Lösungen konstruiert werden konnten. Ebenso wird in der Literatur eine Fülle von in weiten Teilen selbst konstruierten oder der Messumgebung und dem Messobjekt angepassten Messlösungen beschrieben. Einen Überblick über verschiedene Systeme, Bauweisen und Einsatzbereiche gibt die Tabelle 2.3.

Tab. 2.3: Literaturüberblick verschiedener Arbeiten zu Gaswechselfmessungen. Mit Asterisk versehene Publikationen (hinter dem Veröffentlichungsjahr) werden in der Diskussion aufgeführt.

Quelle	System / Untersuchungen	Kultur
Akyazi (2014)	Tageslicht- Pflanzenküvette/ Einfluss verschiedener Klimabedingungen, Untersuchungen zu CO ₂ , PAR, rF und Temp.	<i>Pelargonium zonale</i>
Avola <i>et al.</i> (2008)*	Blattküvette/ Einfluss von CO ₂ u. Belichtung auf Gaswechsel	<i>Vicia faba</i>
Brauer (2006)	Ganzpflanzen- Küvette/ Begrenzung der Eignung von Zimmerpflanzen	<i>Yucca elephantipes</i> <i>Spatiphyllum</i>
Bunce (1989)	Blattküvette/ Einfluss LAI auf der Wachstumsrate auf P _n und R _d	<i>Glycine max.</i> <i>Amaranthus hyb.</i> <i>Chenopodium alb.</i>
Burkart <i>et al.</i> (2007)*	Transportable Ganzpflanzen- Küvette/ CO ₂ und H ₂ O Flüsse im Feldeinsatz	<i>Hordeum vulgare</i> <i>Lolium multiflorum</i> <i>Beta vulgaris et al.</i>
Buwalda <i>et al.</i> (1992)*	Bestandes- Küvette (10 m ²)/ Simultane Vermessung der Assimilation und Transpiration	<i>Actinida deliciosa</i>
Exarchou (2006)*	Blattküvette/ Transpirationsmessung zur Bewässerungssteuerung	<i>Lycopersicon esc.</i>
Gaastra (1959)*	Klimakammer/ Einfluss verschiedener (Kunstlicht-) Lichtquellen	<i>Beta vulgaris,</i> <i>Cucumis sativus,</i> <i>Lycopersicon esc.</i>
Harley <i>et al.</i> (1996)	Blattküvette/ P _n , stomatäre Leitfähigkeit und Isopren Emission in Abh. d. Einstrahlung	<i>Liquidambar</i> <i>styraciflua</i>
Hättenschwiler <i>et al.</i> (2002)*	offenes Messsystem (Gestell)/ Einfluss erhöhter CO ₂ - Konz. auf P _n , stomatäre Leitfähigkeit und Morphologie	<i>Larix decidua</i> <i>Pinus uncinata</i>
Klopotek <i>et al.</i> 2012*	Jungpflanzen- Bewurzelungsküvette/ Einfluss Einstrahlung, CO ₂ - Konz. auf P _n , R _d und Bewurzelung	<i>Petunia hybrida</i>
Lange (1962)	Klapp- Blattküvette/ Entwicklung und Messung P _n	<i>Rhododendron</i> <i>Fagus sylvatica</i> <i>Sedum maxima</i>
Leuning (1995)	Blattküvette/ P _n und stomatäre Leitfähigkeit zur Modellerstellung	<i>Eucalyptus grandis</i>
Livingston <i>et al.</i> (1994)*	Ganzpflanzen- Küvette/ Simulation von Umweltbedingungen und Auswirkung auf P _n und Transpiration	<i>Picea glauca</i>

Stand des Wissens

Mäkinen (1987)	Klapp- Blattküvette/ P _n - im Feldeinsatz, Verbesserung der Berechnungsalgorithmen von Lange (1962)	nur Entwicklung
Mitchell (1936)*	Glasglocke als Messraum/ Einfluss der rel. Luftfeuchtigkeit auf die Transpiration	<i>Lycopersicum esc.</i> <i>Pelargonium zonale</i> <i>Primula obconica</i>
Rawson und Begg (1977)	Assimilationskammer/ Einfluss rF auf P _n	<i>Helianthus annuus</i> <i>Sorghum bicolor</i> <i>Glycine max.</i>
Schmidt (2004)*	Blattküvette/ Ermittlung optimaler Kulturbedingung, Erfassung von P _n und Transpiration	<i>Lycopersicum esc.</i>
Schmidt <i>et al.</i> (2014)*	Blattküvette/ Vergleich verschiedener Klimastrategien und Wirkung auf P _n und WUE	<i>Lycopersicum esc.</i>
Taylor und Tingley (1981)	Gaswechsel- Messsystem/ Wirkung von SO ₂ auf oberirdische Pflanzenteile	<i>Geranium</i> <i>carolinianum L.</i>
Tricker <i>et al.</i> (2005)	Blattküvette/ Einfluss erhöhter CO ₂ - Konz. auf Stomata, P _n und WUE	<i>Populus x</i> <i>euramericana</i>

2.8 ZINEG- Gewächshaus in Hannover Ahlem

Das Ziel, ein Gewächshaus mit maximaler Wärmedämmung, vorwiegend geschlossener Betriebsweise, Solarenergienutzung sowie angepassten Integrationsstrategien bei Topfpflanzen zu realisieren, wurde in Hannover durch den Bau eines innovativen Forschungsgewächshauses erreicht. Die Anlage umfasste auf einer Grundfläche von 960 m² insgesamt zwei Abteilungen, mit je zwei Unterabteilungen (Akyazi *et al.* 2015, Akyazi und Tantau 2012, Tantau *et al.* 2011).

Insbesondere die Wärmedämmeigenschaften des Gewächshauses wurden in den Fokus der Planungen gerückt und durch die Verwendung von Isolierverglasung im Dach und Stegvierfachplatten an den Stehwänden und Giebelseiten realisiert. Der erhöhte konstruktive Aufwand für die Dachverglasung (Berechnungen mit erhöhter Schneelast) sowie die Verwendung eines dreilagigen Energieschirm- Systems sorgen für eine merkliche Verringerung der Einstrahlung auf Bestandesebene (Akyazi *et al.* 2015, Akyazi und Tantau 2012). Eine weitere Begleiterscheinung des hohen Grads der Wärmedämmung betrifft die Transpirationsraten und damit die Nährstoffaufnahme (z.B. Ca) der Kulturen. Diese sind nach Tantau und Akyazi (2014) mit zunehmender Wärmedämmung durch die geringere Entfeuchtungsleistung im Dachbereich geringer. Damit einhergehend und der vorwiegend geschlossenen Betriebsweise des Gewächshauses geschuldet, maßgeblich zur Zwischenspeicherung der solaren Überschussenergie, stieg die relative Luftfeuchtigkeit innerhalb des ZINEG Gewächshauses deutlich an. Diese kann zwar durch Niedertemperatur- Wärmetauscher, die auch zur Kühlung und Entfeuchtung eingesetzt werden, reduziert werden, erfordert aber wiederum den Einsatz elektrischer Energie zum Antrieb der Pumpen und Ventilatoren.

Auf der anderen Seite gestattet die vorwiegend geschlossene Betriebsweise eine angepasste CO₂- Düngung. Diese ist insbesondere dann erforderlich, wenn das Gewächshaus geschlossen betrieben wird und die CO₂- Innenkonzentration deutlich abnimmt.

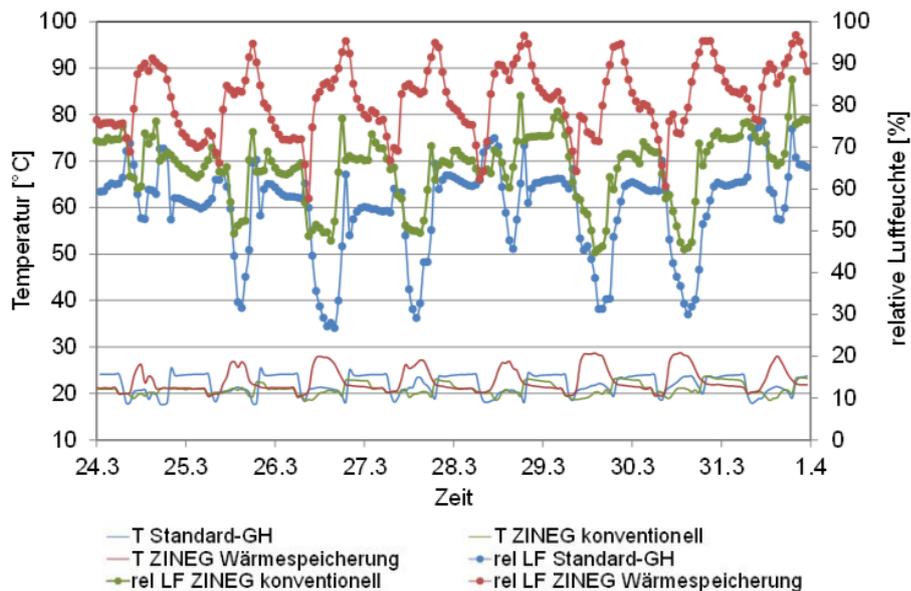
Eckpunkte des im Forschungsgewächshaus in Hannover verfolgten, systemorientierten Ansatzes sind in Tabelle 2.4 aufgelistet und umfassen technische und kulturorientierte Punkte zur Reduzierung des Energieverbrauchs.

Tab. 2.4: Zusammenstellung der Komponenten des systemorientierten Ansatzes im ZINEG Forschungsgewächshaus in Hannover Ahlem.

Maßnahme	Beschreibung	Hersteller
Bedachung	Isolierverglasung 20 mm (4/12/4) Antireflexbeschichtung Argon- Füllung	Grogas
Stehwände	Stegvierfachplatte 32 mm	Evonik
dreifach Energieschirm	Tagesenergieschirm (SHS 15) Schattierung (Pyro Silver 50) Verdunkelung (XLS Obscura Revolux)	Novavert Reimann Ludvig Svensson
Solarenergienutzung	Tag-, Nachtspeicherung 50 m ³ Kalt- und Warmwasserspeicher Wärmepumpe	
energiesparende Klima- Regelstrategien	z.B.: Temperatursummenstrategien	-
angepasste Kulturprogramme	z.B.: Integrationspotentiale d. Pflanzen pflanzenpezifische Untersuchungen	-

Die Summe der technischen und pflanzenbaulichen Detaillösungen sorgt für zum Teil deutlich veränderte Klimabedingungen innerhalb des ZINEG-Forschungsgewächshauses im Vergleich zu einem konventionellen Gewächshaus. So sorgt die Maßnahme Bedachung durch den hohen Isolationsgrad und damit einer erhöhte potentiellen Schneelast für mehr konstruktive Bausteile und führt damit zu einer Reduktion der Einstrahlung. Auch die Stehwände (materialbedingt) und Schirmsysteme (konstruktionsbedingt) reduzieren jeweils die Einstrahlung. Bei der Maßnahme Solarenergienutzung wird das Gewächshaus in weiten Teilen geschlossen betrieben, wodurch sich wiederum ein mitunter eminenten Einfluss auf die Innen- Klimabedingungen (relative Luftfeuchte, Temperatur und CO₂-Konzentration) ableiten lässt. Es gilt zu beachten, dass das Forschungsgewächshaus zur maximalen Energieeinsparung konstruiert wurde und damit die Kulturführung entsprechend angepasst werden muss (Tantau et

al. 2011). Abbildung 2.3 zeigt beispielhaft den Verlauf der Temperatur und Luftfeuchte im Vergleich eines konventionellen Gewächshauses, eines ZINEG Gewächshauses mit denselben Sollwerteneinstellungen und eines ZINEG Gewächshauses mit Energierückgewinnung. Anhand der Grafik lässt sich belegen, dass im direkten Vergleich des konventionellen mit dem ZINEG Gewächshaus, trotz der identischen Sollwerte, mitunter deutliche Unterschiede in der Ausprägung der gemessenen Werte herrschen. In Bezug auf die Luftfeuchte fällt auf, dass diese über den gesamten Messzeitraum oberhalb der des Standard Gewächshauses liegt. Die zum Zweck der Speicherung der solaren Überschussenergie geschlossenen Lüftungsklappen im ZINEG Gewächshaus mit Energierückgewinnung sorgen für eine weitere Erhöhung der relativen Luftfeuchte. Hier erreichen die Werte in der Spitze annähernd 100 % (Akyazi *et al.* 2015).



Akyazi *et al.* 2015, verändert Akyazi

Abb. 2.3: Verlauf der Temperatur und relativen Luftfeuchte auf Stundenmittelwert-Basis. Vergleich eines konventionellen Gewächshauses mit einem ZINEG Gewächshauses mit denselben Sollwerteneinstellungen sowie eines ZINEG Gewächshauses mit Wärmerückgewinnung. Erfassungszeitraum 24. – 31.03.2014

3. Zielsetzung

In der vorliegenden Arbeit soll der Einfluss zum Teil extremer Klimabedingungen auf eine Modellkultur der Gattung *Pelargonium* (*Pelargonium zonale* var. Präludium) in Tageslicht- Pflanzenküvetten untersucht werden, um Rückschlüsse auf die Effekte der einzelnen und separat betrachteten Einflussfaktoren zu gewinnen und damit letztendlich eine optimierte Kulturführung durchführen zu können. Dabei stehen sowohl die Pflanzenuntersuchungen (z.B. Integrationspotentiale der Modellkultur), als auch die technische Entwicklung und Realisierung der Pflanzenküvetten im Vordergrund.

Für eine energiesparende Regelung ist die Kenntnis des Integrationspotentials und der Grenzen für Temperatursummenstrategien der jeweiligen Kultur von großer Bedeutung.

Dazu sollen parallel zu den pflanzenbaulichen Untersuchungen im ZINEG-Versuchsgewächshaus (LVG Ahlem) unter definierten Bedingungen der Einfluss veränderter Klimabedingungen durch die verwendeten energiesparenden Maßnahmen untersucht sowie die Grenzen für Integrationsregelstrategien beispielhaft ermittelt werden. Damit werden Grundlagen für eine optimierte energiesparende Klimaregelung geschaffen. Für diese Zielsetzung ist die Entwicklung spezieller Tageslicht-Pflanzenküvetten erforderlich, in denen die Klimafaktoren unabhängig voneinander geregelt und als Reaktion der Pflanzen Nettphotosynthese, Respiration und Transpiration kontinuierlich gemessen werden können. Diese Daten bilden die Basis für mathematische Modelle zur Beschreibung der spezifischen Pflanzenreaktion.

4. Material und Methoden

Die vorliegenden Versuche wurden in der Abteilung Biosystemtechnik (BGT) auf dem Gelände der Leibniz Universität Hannover durchgeführt (N 52.394611, O 9.703049; Campus Herrenhausen). Innerhalb eines deutschen Normgewächshauses mit Ost - West Ausrichtung, mit den Abmaßen 18 m * 12 m, einer Firsthöhe von 5,6 m, mit First- und Seitenlüftung wurden drei Tageslicht- Pflanzenküvetten (TPK) an der Südstehwand des Gewächshauses aufgebaut und betrieben (Abb. 4.1). Die restliche Fläche des Gewächshauses wurde genutzt, um die erforderlichen Versuchspflanzen zu kultivieren.



Abb. 4.1: Kartenausschnitt aus der Vogelperspektive mit der Gewächshausanlage der Abteilung Biosystemtechnik. Der Pfeil kennzeichnet die Lage der TPK innerhalb des Gewächshauses.

4.1 Aufbau der Tageslicht- Pflanzenküvetten (TPK)



Abb. 4.2: Frontalansicht TPK. Die rote Linie trennt symbolisch die Bereiche Pflanzeinheit (oben) und Luftkonditionierungseinheit (unten).

Der Grundaufbau der drei TPK war gleich. Jede Küvette bestand aus zwei, aufeinander aufgebauten und miteinander verbundenen Einheiten. In Abbildung 4.2 sind diese zur Unterscheidung durch eine rote Linie markiert. Systembedingt waren diese beiden Teilbereiche nur hinsichtlich ihrer primären Nutzung, nicht aber räumlich oder strukturell trennbar.

Die Luftkonditionierungseinheit, in der die gewünschten Luftzustandspunkte geregelt wurden, diente gleichzeitig als Sockel oder Fuß für die darauf aufgebaute Pflanzeinheit. In dieser waren die Pflanzen den entsprechenden Versuchsbedingungen ausgesetzt.

4.1.1 Luftkonditionierungseinheit

Die Luftkonditionierungseinheit mitsamt der verbauten Technik, hatte die Maße $86 * 150 * 124$ cm (H*B*T). Als dichte Abgrenzung zur Umwelt und zur bestmöglichen Isolierung wurde die Luftkonditioniereinheit aus Sandwichelementen gefertigt (Thermowand TL, Hoesch Bausysteme GmbH, Kreuztal, D). Die dabei natürlich auftretenden Stöße sowie die in und aus der Einheit geführten Zuleitungen (Datenerfassung, Probenahme, Bewässerung etc.) wurden mit Dichtungsband und Silikon abgedichtet. Neben der Funktion als Bereich der Luftkonditionierung, bildete es auch eine Art Sockelgestell für die Pflanzeinheit. Abb. 4.3 zeigt eine schematische und eine fotografische Darstellung der Einheiten sowie der technischen Komponenten. Innerhalb der Luftkonditioniereinheit war die zur Konditionierung der Luft auf die jeweiligen Luftzustandspunkte (LZP) benötigte Technik untergebracht.

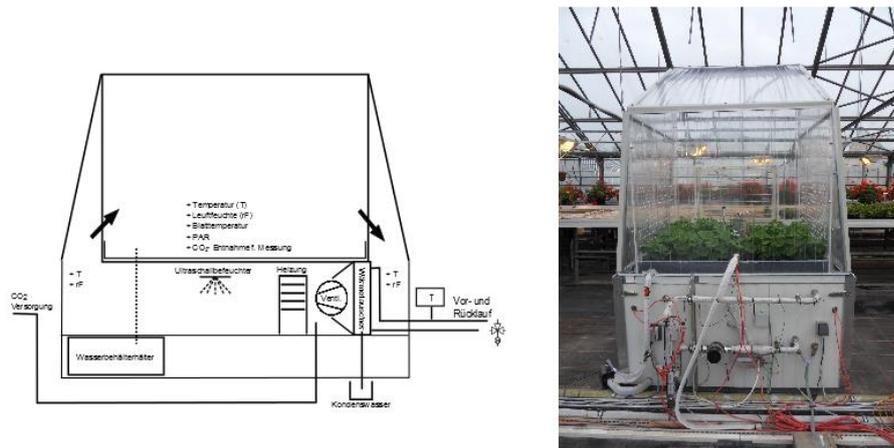


Abb. 4.3: Schematische (links) und bildliche (rechts) Darstellung der TPK im Vergleich.

4.1.1.1 Taupunktregelung

Durch eine Wärmepumpe (Stiebel Eltron WPF 13 Basic, Stiebel Eltron GmbH und Co KG, Holzminden, D) wurde fortlaufend Kühlmittel (Stiebel Eltron Wärmeträgerflüssigkeit 161696, Stiebel Eltron, Holzminden, D) auf einer Temperatur von ca. 5 °C gehalten und in einem 200 l Puffertank (Stiebel Eltron SBP 200 E, Stiebel Eltron GmbH und Co KG, Holzminden, D) zwischengespeichert. Bei Versuchen mit einer niedrigeren Taupunkttemperatur, wurde die Temperatur im Pufferspeicher versuchsspezifisch angepasst. Die erforderliche Temperaturregelung erfolgte computergesteuert durch einen Abgleich der Soll- / Ist- Temperaturen im Puffertank.

Über Edelstahlleitungen gelangte das entsprechend temperierte Kühlmittel zu den einzelnen TPK. Vor dem Eingang in den Wärmetauscher wurde das Kühlmittel durch einen Drei- Wege- Mischer (Wolf Typ: 2791011, Wolf Klimatechnik GmbH, Mainburg, D) und mithilfe einer Mischerregelung zwischen Vor- und Rücklauf des Wärmetauschers auf die gewünschte Taupunkttemperatur (TPT) des gewünschten Luftzustandspunkts eingestellt und in den Wärmetauscher eingeleitet. Unmittelbar hinter dem Mischer befand sich bei jeder TPK eine Umwälzpumpe (Laing E4 vario – 25/180 G, Laing GmbH, Remseck, D), die für die Kühlmittelströmung zur (Rohrleitung) und durch (Wärmetauscher) die jeweilige TPK sorgte. Die eingestellte Fördermenge betrug ca. $0,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (Stufe 2)

In Abbildung 4.4 sind die einzelnen Etappen der Veränderung des Luftzustands innerhalb einer Kuvette schematisch dargestellt. Dabei sind die jeweiligen Stufen mit den Ziffern eins bis sechs beschriftet:

- 1 Ursprungszustand in der Kuvette, gewünschte SollwertEinstellung
- 2 Erwärmung durch solare Einstrahlung in die Kuvette
- 3 Feuchteeintrag durch Transpiration und Evaporation
- 4 kühlen auf TPT (Beginn Kondensation)
- 5 Zusätzliches kühlen auf TPT des gewünschten LZP
- 6.anschließend trockene Erwärmung (Heizung) bis (1)

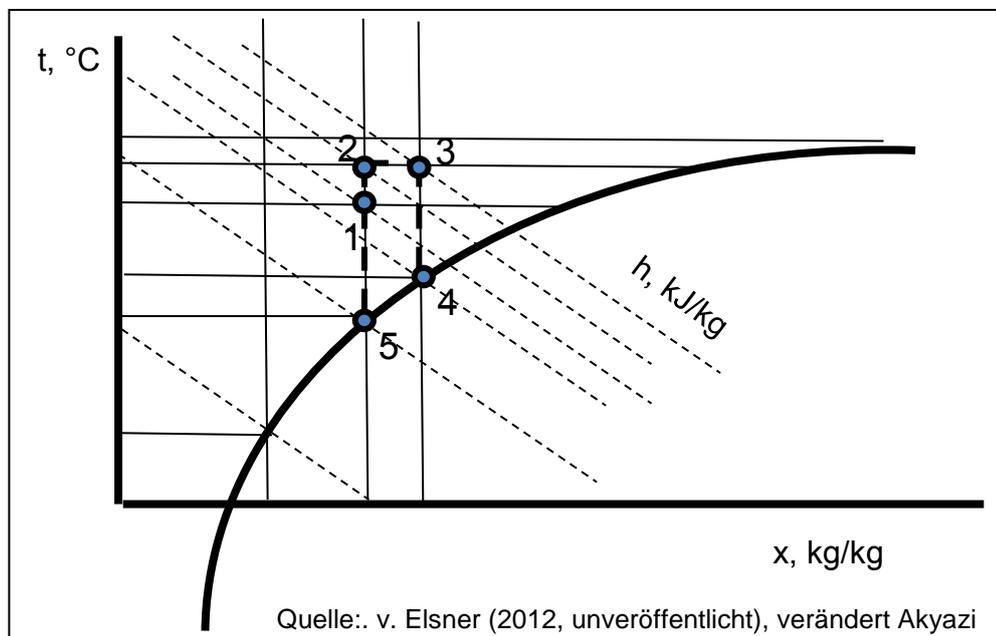


Abb. 4.4: Schematische Darstellung der Taupunktregelung (unterschiedliche LZP und deren Veränderung durch Einflüsse innerhalb der Kuvette). Einzelheiten siehe Text.

4.1.1.2 Ventilatoreinheit

In Strömungsrichtung vor dem Wärmetauscher befand sich ein regelbarer Axialventilator (ETAvent FN025-6IH.0E.V7, Ziehl-Abegg AG, Künzelsau, D) der für die gesamte Luftbewegung innerhalb des Kuvetten- Systems sorgte und somit auch den Wärmeübergang zwischen Wärmetauscher und Luftmassen in der TPK forcierte. Eine passgenaue Ventilatorverkleidung (Abb. 4.5 a) verband den Ventilator dicht mit dem Wärmetauscher und dem umgebenden

Gehäusematerial. Das Grundgerüst der Ventilatorhalterung bestand aus mehrfach gekantetem und entsprechend weiter bearbeitetem, 2 mm starkem Zinkblech. Für zusätzliche Dichtigkeit und zur Vermeidung unnötiger Druckverluste wurde auch hier Dichtungsband und Silikon verwendet. Eine hohe Anschlussdichte der Ventilatoreinheit an den Wärmetauscher war besonders wichtig, da dadurch die umgewälzten Luftmassen besonders effizient an der gesamten Wärmetauscherfläche vorbeigeführt werden konnten (Abb. 4.5 b).

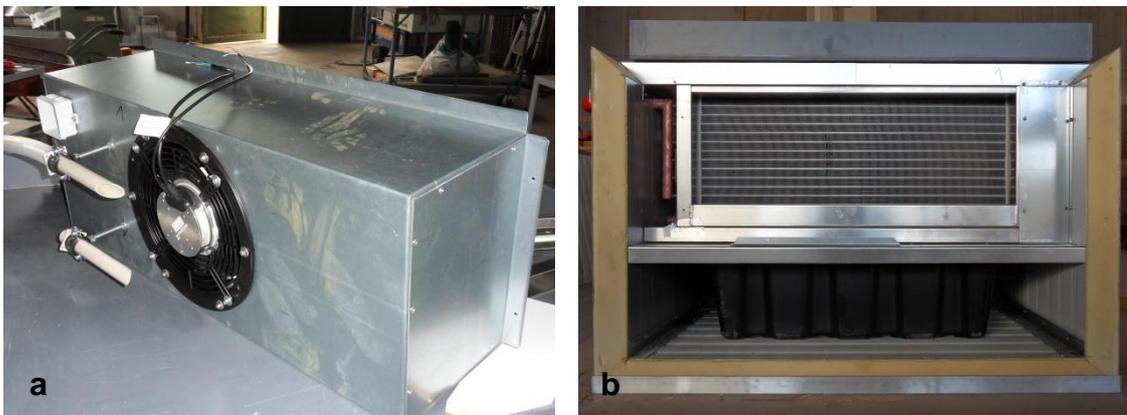


Abb. 4.5 (a): Ventilatoreinheit aus gekantetem Zinkblech (2 mm) inklusive einem an der Vorderfront eingelassenen Ventilator. Am linken Rand der Ventilatoreinheit sind die Zuluftdüsen der Befeuchtungseinheit zu sehen.

Abb. 4.5 (b): Frontalansicht des Einlasses der Luftkonditionierungseinheit. Zu sehen ist der Wärmetauscher (oben) und durch ein Bodenblech davon getrennt das Wasserreservoir (unten).

Der Ventilator war mit einer Drehzahlregelung (0-10 V Frequenzumrichter) versehen, wodurch die Drehzahl stufenlos geregelt werden konnte. In den Luftstrom an der Auslassseite der Ventilatoreinheit mündete der Auslass der Luftbefeuchtungseinheit (Stulz Ultrasonic FN 400 HDA, Stulz GmbH, Hamburg, D), sowie der gasdichte FEP- Schlauch ($\varnothing_{\text{innen}}$: 6 mm, Wolf Technik, Stuttgart, D) der CO₂- Dosierung, die jeweils von außen in die Luftkonditionierungseinheit eingeführt wurden. In den Bereichen des Übergangs zwischen Lüftungs- und Pflanzeinheit, also am Ein- und Auslass, befanden sich jeweils zwei Temperatur- und Luftfeuchtesensoren (SHT75, Sensirion AG, .Staef, CH) für die Regelung und Überprüfung des Systems.

4.1.1.3 Bewässerungssystem

In dem unteren Bereich der Luftkonditionierungseinheit, durch ein Bodenblech von der Technik zur Luftkonditionierung getrennt (Abb. 4.5 b), befand sich ein Wasserreservoir, das zur Bewässerung der Pflanzen in der Pflanzeneinheit genutzt wurde. Dabei wurde die Nährlösung über eine außen angebrachte Förderpumpe (Eheim Universal 300, Eheim GmbH und Co. KG, Deizisau, D) in die Bodenwanne der Pflanzeneinheit gefördert. Nach Ablauf einer eingestellten Förderdauer von 180 s lief die Lösung durch einen grobmaschigen Filter wieder in das Reservoir und funktionierte dementsprechend nach dem System einer geschlossenen Anstaubewässerung (Ebbe-, Flut-System).

4.1.2 Pflanzeneinheit

Die Luftkonditionierung- und die Pflanzeneinheit sind übereinander angeordnet, wobei bei der Konstruktion auf maximale Dichtheit geachtet wurde. Bei der Fertigung wurden sämtliche Stöße beidseitig mit Spezialsilikon für Plexiglas und Makrolon (OWOSIL-N, Herrmann Otto GmbH, Fridolfing, D) abgedichtet. Der 50 * 80 cm (H * B) große Revisions-zugang zum Inneren der Pflanzeneinheit

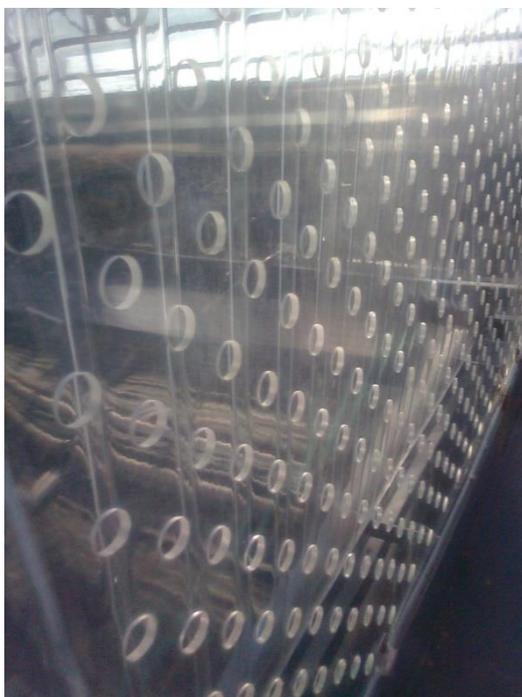


Abb. 4.6: Perforierung der Zu- und Abluftseite. Laminare Luftströmung in die Küvette durch Anfasen der Löcher.

bestand aus einem passgenau ausgeschnittenem Element an der nördlichen Stehwand der TPK. Die Schnittkanten wurden dabei mit Aluminiumklebeband (3M Deutschland GmbH, Neuss, D) abgedichtet. Eine auf der Innenseite angebrachte Dichtlippe fungierte als Dichtung zwischen dem Inneren der TPK und der Umwelt. Das Element wurde an der Dichtlippe mithilfe von Rändelmuttern befestigt.

Über einen Luftein- und einen gegenüberliegenden Luftauslass sind die beiden Einheiten miteinander verbunden. Dabei liefen die Luftkanäle nach oben

konisch zu um zu gewährleisten, dass sowohl unten als auch oben an den Luftkanälen der selbe Druckabfall und damit über die Höhe der selbe Volumenstrom in die und aus der Pflanzeinheit gegeben ist. Zusätzlich wurden Plexiglasscheiben mit berechneter Anzahl, Anordnung und Durchmesser an Löchern angebracht (Abb.4.6), die ebenfalls der Homogenisierung der Zu- und Fortluftmassen dienen.

Innerhalb des Pflanzenraumes befand sich mittig angeordnet ein Laborstativ als Halter für die Sensirion Temperatur- und Luftfeuchtefühler, den PAR Quantum Sensor (Li 190 SA, Li-COR Biosystems, Lincoln, USA), sowie Halter für die Blatttemperatursensoren (Mantel-Thermoelement Typ K, Lemo Elektronik GmbH, München, D). Eine auf dem Halter des PAR Quantum Sensors angebrachte Libelle sorgte für eine horizontale Ausrichtung. Die Höhe betrug 30 cm über dem Wannenboden.

4.1.3 Messtechnik und Regelung

Innerhalb der TPK befanden sich zahlreiche Messsensoren und weitere Techniken zur Erfassung der aktuellen Daten innerhalb der Datenerfassung und der Regelung der Anlage über den Computer. Das Gewächshausregelprogramm Ansteuer.exe (Tantau 1979) wurde dem System angepasst und zur Regelung und Datenerfassung eingesetzt. Über die USB Schnittstelle des Computers wurde die Kommunikation zu der Regel- und Messtechnik aufgebaut. Dabei diente ein RS485-Bus als Verbindung zwischen dem Computer und der Hardware in Form von Regel- und Datenerfassungskarten ITG. Sowohl bei der Software als auch bei der Hardware handelt es sich um Entwicklungen des BGT. Die Datenerfassung für die Messung und die Regelung waren modular aufgebaut und bestanden aus einer Master-Karte (ITG 66), mit maximal vier angegliederten Slave-Karten (Input) und acht Relaiskarten (Output). Die Aufzeichnung, Verrechnung und Speicherung der Messwerte erfolgte im 15 Sekunden-Intervall. Abbildung 4.7 zeigt die Belegung der Regel- und Datenerfassungskarten. Für die Regelung wurden vier Relaiskarten, eine analoge (0–10 V) Ausgabekarte, sowie zwei Loggerkarten an die Masterkarte angeschlossen. Die Datenerfassung erfolgte über eine

Zählerkarte, zwei analoge (-5 – 5 mV) Inputkarten sowie drei digitale Inputkarten.

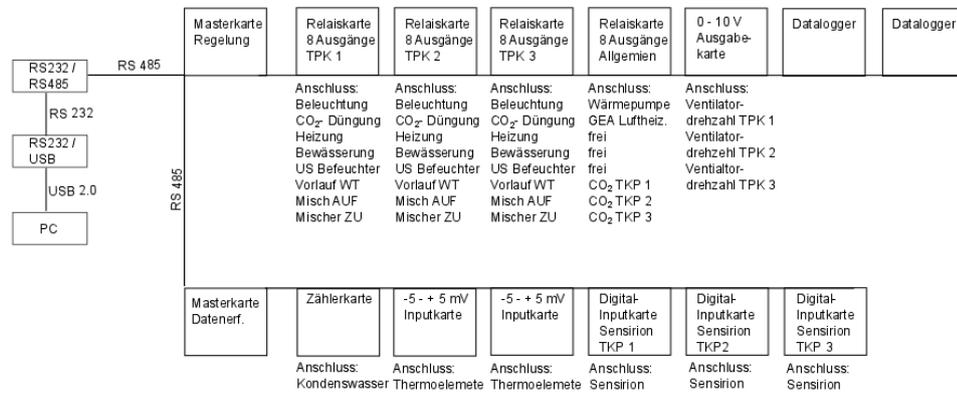


Abb. 4.7: Schematische Darstellung der Messstellen der Datenerfassung und Regelung des Gesamtsystems.

Eine Auflistung der Messtechnik sowie Anzahl und Typ der verwendeten Sensoren je Tageslicht- Pflanzenküvette bzw. insgesamt ist in Tabelle 4.1 dargestellt.

Tab. 4.1: Auflistung der Messensorik in den Tageslicht- Pflanzenküvetten. Angegeben sind die erfassten Messwerte, verwendeten Sensoren und die Anzahl der Messstellen je TPK bzw. gesamt.

Messwert	Sensor	Messstellen je TPK / Insgesamt
Temperatur / Luftfeuchte	Sensirion SHT 75	6 / 18
Blatttemperaturen	Thermoelement Typ K NiCr-Ni	2 / 6
Vor-, und RI- Temp., Pufferspeichertemp.	Thermoelement Typ K NiCr-Ni	3 / 6 0 / 2
PAR	Li Cor Quantumsensor Li 190 SZ	1 / 3
CO ₂	Vaisala GMP 343 0-2000 vpm	0 / 1
CO ₂ - Durchfluss	magnetisch induktiver Durchflussmengenmesser	0 / 1
Kondensat	Messwippe mit Reed-Kontakt	1 / 3

4.1.3.1 Kondensat

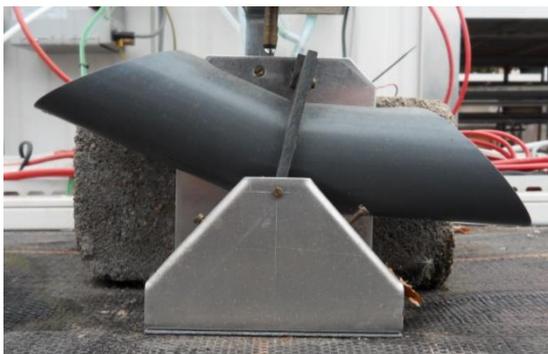


Abb. 4.8: System zum Auffangen und Messen des ausfallenden Kondensats.

Durch die Temperaturregelung mittels Taupunktregelung kondensierte im Wärmetauscher der Wasseranteil der Luft aus und wurde in einer vom Hersteller dafür vorgesehenen Wanne aufgefangen. Dieses auskondensierte Wasser wurde über einen Schlauch zu einem Durchflussmesser, der als Kippwippe

funktionierte, (Abb. 4.8) geführt. Zwei im 120 ° Winkel zueinander angeordnete Kunststoffröhren mit einem Durchmesser von 45 mm und einer Länge von 120 mm wurden an der Oberseite eingefräst und dienten als Mess- oder Kippvorrichtung für das Kondenswasser. Mit Erreichen eines Volumens von 30 ml innerhalb eines Kunststoffröhrchens kippte die Konstruktion über den Drehpunkt und erzeugte dabei einen digitalen Impuls, welcher an die Datenerfassung geleitet wurde und die Erfassung des Kondensats ermöglichte.

4.1.3.2 CO₂- Messung und Dosierung

Während der Versuche wurde innerhalb jeder TPK Luft auf Bestandeshöhe entnommen und durch eine Messgasanalyse die jeweilige CO₂- Konzentration online ermittelt. Jede TPK besaß eine eigene Messgasleitung. Diese mündete nach einem Magnetventil in einer zentralen Messgasleitung, die wiederum zum Messgerät führte. Die jeweiligen Zuleitungen wurden auf einer Länge von ca. 2,5 m, nach dem Austritt aus den TPK, mithilfe einer um die Zuleitung gewickelten 25 W Kabelheizung (Trixie Reptiland Heizkabel, Trixie Heimtierbedarf GmbH und Co. KG, Tarp, D) auf einer Temperatur von 28 – 34 °C gehalten. Die gleiche Technik wurde auch ca. 2,5 m vor dem Eintritt in die CO₂- Erfassung installiert, sodass ein Auskondensieren der Feuchtigkeit der Messluft an der Schlauchwand effektiv unterbunden wurde.

Die Messluft wurde durch eine Kolbenhubpumpe (NPK xx AC/DC Pressure, KNF Neuberger GmbH, Freiburg, D) angesaugt und durch einen nachgeschalteten Schwebekörper Durchflussmengenmesser (P 16B2 BAOA, Aalborg Instruments and Controls Inc., New York, USA) geleitet, bevor sie in einer Taupunktfalle (JCM – A, Maihak Ag, Hamburg, D) getrocknet und zu dem CO₂- Sensor geführt wurde.

Zur CO₂- Analyse diente ein Sensor der Firma Vaisala (GMP 343, Vaisala, Finnland) mit einem Messbereich von 0 – 2000 vpm und einer Genauigkeit von ±2 % vom Messwert. Das Gerät arbeitet nach dem Prinzip der Absorptionsmessung. Dabei wird die zu untersuchende Luft durch das Gerät geleitet. Im Gerät wird die Absorption von Strahlung im Bereich von 426 nm ermittelt. Der Grad der Absorption ist eine Funktion der CO₂- Konzentration in der Messluft.

Über Messgasumschalter mit Magnetventilen (Serie 7000, OLAB Srl, Torbole Casaglia, I) wurde die CO₂- Konzentration der einzelnen TPK nacheinander und mit demselben Sensor gemessen. Ein Messzyklus dauerte sechs Minuten und gliederte sich wie folgt, in die nacheinander ausgeführten, je 120 Sekunden dauernden Aktionen:

CO₂- Messung → CO₂- Dosierung → Leitungsspülung

Anhand der Messung der CO₂-Konzentration und einem Abgleich mit den eingestellten Sollwerten erfolgte die Dosierung (max. 120 Sek.) des technischen CO₂ (Reinheit $\geq 99,5\%$, Kohlendioxid, Linde AG, Pullach, D). Eine mit Manometer und Druckregelung versehene 35 kg Gasflasche (Linde AG, Pullach, D) enthielt das CO₂, was über eine zentrale Zuleitung zu einem Dosiergasumschalter mit Magnetventilen geführt wurde und dann, entsprechend des aktivierten Magnetventils in die entsprechende TPK geleitet wurde. Das Gas wurde in den unteren Bereich der TPK geleitet und mündete unmittelbar hinter dem Ventilator.

Die CO₂-Regelung erfolgte als PID-Regelung mit einer modellbasierten Störgrößenaufschaltung der PAR-Strahlung. Messsystembedingt war eine Zudosierung von max. 120 s pro 6 min Messzyklus möglich.

4.1.3.2.1 Kalibrierung des CO₂-Messsystems

Im Abstand von drei Monaten, zwischen den Versuchen, fand eine Kalibrierung der CO₂-Messanlage statt. Dabei wurde am zentralen, von den Versuchskammern kommenden, Messgaszuluftschauch Prüfgas (Kohlendioxid 4.5, Linde AG, Pullach, D) mit einer Reinheit von $\geq 99,995\%$ angeschlossen. Das Prüfgas wurde mit dem gleichen Vordruck (1 bar), Durchfluss (3,5 l h⁻¹) und über den gleichen Weg (Filter, Kühlfalle) in das Messgerät geleitet.

Auf eine Kalibrierung der Luftfeuchte- und Temperaturfühler wurde verzichtet, da je Messstelle zwei Fühler angebracht und gegeneinander, unter Einbezug der Messgenauigkeit (rF: $\pm 1,8\%$, T: $\pm 0,3\text{ °C}$) abgeglichen wurden. Bei größeren Abweichungen wurden die Sensoren ausgetauscht.

Der Kippmechanismus der Kondensatmesser wurde in einem Intervall von drei Monaten (zusammen mit der Kalibrierung des CO₂-Messsystems) überprüft. Dabei wurde mit einer Spritze ein Volumen von exakt 30 ml in beide Kammern des Systems geleitet, dabei der Kippvorgang überwacht und ggf. nachjustiert.

4.1.4 Pflanzenmaterial



Abb. 4.9: Mutterpflanzenkultur von *P. zonale*, hier unmittelbar vor manueller Blütenentfernung.

Das Pflanzenmaterial, *Pelargonium zonale* var. 'Präludium', stammte von der Firma Dümme (Dümme GmbH, Rheinsberg, D). Für die durchgeführten Versuche wurde zunächst eine Mutterpflanzenkultur angelegt (Abb. 4.9). Dazu wurden jeweils drei Pflanzen des Ausgangsmaterials angezogen, in 30er Container (MCI 29, Pöppelmann GmbH und Co. KG,

Lohne, D) gepflanzt und bei 18/14 °C Tag/Nacht unter natürlichen Lichtbedingungen mit Zusatzbelichtung in den Monaten Oktober bis April kultiviert. Insgesamt standen 55 Container für die regelmäßige Stecklingsvermehrung zur Verfügung. Über die gesamte Versuchslaufzeit wurde der Mutterpflanzenbestand regelmäßig erneuert.

Eine ausreichende Nährstoffversorgung der Mutter- und Versuchspflanzen wurde durch eine konstante Düngemittelgabe (Hakaphos Grün 20+5+10[+2], Compo Expert, Münster, D) in einer geringen Konzentration als Permanentdünger im Gießwasser gewährleistet. Hierfür wurde ein 1%ige Stammlösung hergestellt, die dann durch weitere Verdünnung in einer gesamt-Konzentration von 1‰ über ein Dosiergerät (Dosatron D25 RE5 VF, Dosatron International, Tresse, F) dem Gießwasser beigemischt wurde. Die Konzentration entsprach dabei der Herstellerempfehlung für stete Zufuhr über das Gießwasser. Während der Kultur der Mutterpflanzen wurden regelmäßig die Blüten entfernt. Die in den Versuchen eingesetzten Pflanzen wurden aus diesen Mutterpflanzen erzeugt.

4.1.5 Stecklingsanzucht

In einem Intervall von einer Woche wurden Stecklinge von den Mutterpflanzen geschnitten und unmittelbar in Pikierplatten (Multitray 73, Multitray, Uden, NL) gesteckt. Als Substrat hierfür diente nährstoffarmes Stecklingsmedium



Abb. 4.10: Mit Stegdoppelplatten verkleidetes Anzuchtgestell für Stecklinge.

(Steckmedium, Klaasmann-Deilmann, Geeste, D). Insgesamt wurden jede Woche zwei Pikierplatten mit Stecklingen angefertigt, sodass wöchentlich insgesamt 146 Stecklinge gesteckt wurden. Die Stecklinge wurden in ein aus Stegdoppelplatten konstruiertes Anzuchtgestell (Abb. 4.10) überführt, wo sie

schließlich bewurzeln konnten. Das verwendete Gießwasser wurde gegen Trauermückenlavenschäden mit einem BT- Präparat versetzt (Stechmückenfrei, Neudorff GmbH KG, Emmerthal, D). Durch die gute Isolierung der Stecklingsanzucht konnte eine hohe Luftfeuchtigkeit aufrechterhalten werden. Die Temperaturführung wurde nicht aktiv geregelt, orientierte sich im Minimum aber an den Temperaturen im Gewächshaus. Übermäßige Einstrahlung und damit verbunden sehr hohe Temperaturen konnte durch die Verwendung von Schattiergewebe unterbunden werden.

4.1.6 Versuchspflanzen



Abb. 4.11: Versuchspflanzen unmittelbar vor Versuchsbeginn.

Vier Wochen nach dem Stecken der Stecklinge wurden die bewurzelten Jungpflanzen in einen 12er Topf (VTG 12, Pöppelmann GmbH und Co. KG, Lohne, D) mit Spezial Pelargonien Substrat (TS 2 Medium, Klaasmann- Deilmann GmbH, Geeste, D) überführt und im Gewächshaus platziert. Die

Pflanzen wurden während der Kulturdauer mit einer 1- ‰ Nährstofflösung im Gießwasser gewässert. Blüten sowie Blütenansätze wurden manuell entfernt. Ferner wurden regelmäßig Maßnahmen zur Pflanzenhygiene getroffen. Im Bedarfsfall wurden bei Befall durch Schadinsekten entsprechende Maßnahmen

eingeleitet. Bei visuellen Kontrollen und positiven Befunden wurden Mospilan SG (Cheminova Deutschland GmbH, Stade, D), Vertimec (Syngenta Agro AG, Dielsdorf, CH) und Confidor WG 70 (Bayer CropScience Deutschland GmbH, Langenfeld, D) nach den jeweiligen Herstellervorgaben aufgebracht. Nach vier Wochen Vor- Kulturdauer standen die Versuchspflanzen bereit und konnten für die Versuche verwendet werden (Abb. 4.11). Durch die hohe Zahl an produzierten Stecklingen und Versuchspflanzen standen wöchentlich etwa 135 – 140 insgesamt acht Wochen alte Versuchspflanzen (vier Wochen Bewurzelung und vier Wochen Anzucht) zur Verfügung.

4.2 Versuchsdurchführung



Abb. 4.12: Blick in die Pflanzeneinheit mit platzierten Versuchspflanzen zu Versuchsbeginn

Aus dem Pool der Versuchspflanzen wurden randomisiert 34 Pflanzen für jede TPK entnommen und nach einem standardisierten Muster innerhalb der Küvette verteilt (Abb. 4.12). Eine umlaufende, 18 Pflanzen umfassende Reihe mit Randpflanzen und 16 mittig angeordnete und später destruktiv auszuwertende (siehe 4.3.2) Versuchspflanzen stellten die Versuchsobjekte dar. Die Berechnung der Netto- Photosyntheserate (siehe 4.3.1.2) erfolgte systembedingt für den gesamten Pflanzenbestand innerhalb der TPK.

Über einen Zeitraum von 30 Tagen verblieben die Pflanzen bis zum Ende der Versuchslaufzeit und der folgenden Entnahme für die destruktiven Bonituren in den TPK. Während dieser Zeit wurden diese nicht geöffnet. Bereits einige Stunden vor dem eigentlichen Versuchsbeginn wurden die versuchsspezifischen Sollwerte am Computer eingestellt, um die Pflanzen direkt bei Versuchsbeginn in die gewünschten TPK mit den entsprechen Klimabedingungen zu überführen.

Zu jedem Versuchsstart wurde die Bewässerungslösung des Bewässerungssystems in einer Konzentration von 1 ‰ (Hakaphos Grün 20+5+10[+2], Compo Expert, Münster, D) neu angesetzt.

4.2.1.1 Versuchsvarianten

Der Tabelle 4.2 sind die genauen Versuchsvarianten und Einstellungen sowie das Datum der Versuchslaufzeit zu entnehmen. Im Allgemeinen wurde je Versuch jeweils einer der getrennt voneinander regel- und messbaren Faktoren (Temperatur, CO₂- Konzentration, relative Luftfeuchte und Einstrahlung) variiert. Die variierte Größe ist der zweiten Spalte der Tabelle zu entnehmen.

Bei den Schattierversuchen wurde über die drei verschiedenen Versuche auch jeweils die CO₂- Konzentration in den Stufen 400 vpm, 800 vpm und 1200 vpm erhöht. Dabei blieb das Schattiergewebe in allen Fällen an der jeweiligen TPK bestehen und wurde nicht zwischen den Versuchen verändert.

Tab. 4.2: Überblick über die Versuchszeiträume und Sollwerteneinstellungen der durchgeführten Versuche.

Versuchs- zeitraum	Variante (K1, K2, K3)	Konstante Parameter
15.08.'12 – V 1 14.09.'12	CO ₂ : 400, 800, 1200 vpm	T: 18/14 °C, rF: 75 %
14.10.'12 – V 2 13.11.'12	CO ₂ : 1500, 400, 200 vpm	T: 18/14 °C, rF: 75 %
09.01.'13 – V 3 06.02.'13	T: 18/14, 14/18, 20/10 °C	CO ₂ : 800 vpm, rF: 75 %
25.02.'13 – V 4 25.03.'13	T: 45 %, 65 %, 90 % rF	T: 18/14 °C, rF: 75 %, CO ₂ : 800 vpm
26.03.'13 – V 5 25.04.'13	CO ₂ : 400, 800, 1200 vpm	T: 18/14 °C, rF: 75 %
08.05.'13 – V 6 05.06.'13	Schattierung: 50 %, 0 %, 65 % CO ₂ : 400 vpm	T: 18/14 °C, rF: 75 %
12.06.'13 – V 7 12.07.'13	Schattierung: 50 %, 0 %, 65 % CO ₂ : 800 vpm	T: 18/14 °C, rF: 75 %
08.07.'13 – V 8 07.08.'13	Schattierung: 50 %, 0 %, 65 % CO ₂ : 1200 vpm	T: 18/14 °C, rF: 75 %
16.08.'13 – V 9 15.09.'13	T: 16/16, 18/14, 25/7 °C	CO ₂ : 800 vpm, rF: 75 %
24.09.'13 – V 10 24.10.'13	T: 18/14, 14/18, 7/25 °C	CO ₂ : 800 vpm, rF: 75 %
06.01.'14 – V 11 05.02.'14	T: 18/18, 30/30, 10/10 °C	CO ₂ : 800 vpm, rF: 75 %
04.03.'14 – V 12 02.04.'14	T: 18/18, 30/6, 6/30 °C	CO ₂ : 800 vpm, rF: 75 %

4.3 Versuchsauswertung

Eine Auswertung der Versuche erfolgte im Allgemeinen auf zwei unterschiedliche Arten. Zum einen mithilfe der durch das Mess- und Regelsystem aufgezeichneten Daten, zum anderen durch destruktive Bonituren und Vermessungen an der Pflanze.

4.3.1 Verrechnung der computergestützten Messwerte

Die Abspeicherung der Daten auf dem Messrechner erfolgte softwareseitig in einem 15 Sekundenintervall. Zur Auswertung der Messdaten wurden zunächst die auf der lokalen Festplatte des Mess- und Regelsystems abgelegten Daten auf einen My SQL Server (MySQL, Oracle Corporation, Redwood City, USA) transferiert. Mithilfe dieser Datenbank konnten die für eine Auswertung gewünschten Versuchszeiträume und Messstellen mit den dazugehörigen Messwerten abgefragt werden. Die Rohdaten konnten bedarfsgerecht als Minuten-, Stunden-, und Tagesmittelwert ausgegeben werden. Beim Einlesen der Daten erfolgte für jeden Tag eine Plausibilitätsprüfung, wobei die Anzahl der je Tag abgespeicherten Spalten mit dem Sollwert 5760 (15 s Speicherintervall je 24 h) verglichen wurde.

Die anschließenden Berechnungen wurden mit dem Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel (Microsoft Corporation, Redwood City, USA) in der Version 2010 durchgeführt. Der Großteil der Berechnungen wurde unter Zuhilfenahme selbst programmierter Makros (Programmcode zur Durchführung bestimmter Operationen) mit der in MS Excel implementierten Software Visual Basic in der Version 8.0. Zur Erzeugung von Grafiken wurden sowohl MS Excel als auch Sigmaplot 11 (Sigmaplot, Sysstat Software Inc., San Joes, USA) genutzt.

Bei der Verarbeitung der Daten wurde seitens des Erfassungsprogramms keine Unterteilung der Daten in Tages- oder Nachtwerte vorgenommen. Diese erfolgte mittels eines Datenfilters und fand bei den Berechnungen zur Netto-Photosynthese (siehe 4.3.1.3), Respiration (siehe 4.3.1.4) und Transpiration (siehe 4.3.1.5) Anwendung.

4.3.1.1 Dichtigkeitsmessung

Zur Justierung der Berechnungsformeln und damit Steigerung der Vergleichbarkeit der TPK wurden Messungen zur Ermittlung der Undichtigkeiten der einzelnen Küvetten vorangestellt, sodass diese als küvettenpezifische (und damit nicht pflanzenverursachte) Verlustmenge bei den Berechnungen berücksichtigt werden konnte.

Um die Undichtigkeiten zu messen, wurden die TPK über einen Zeitraum von 48 h ohne Pflanzen jeweils auf eine CO₂-Konzentration von 200, 800, 1200, 1500 vpm begast und dieser Wert konstant gehalten. Die erforderliche Dauer der Nachdosierung, um den eingestellten Wert aufrechtzuhalten, wurde mit dem Dosierungsvolumen verrechnet, um die Undichtigkeit (in l h⁻¹) als küvettenpezifische Größe zu erhalten. Dabei ergibt sich die Undichtigkeit (U) als Produkt der Dauer der Dosierung (T_{dos} [s h⁻¹]), multipliziert mit dem Durchfluss (V_d [l s⁻¹]), gemessen am magnetisch-induktiven Durchflussmengenmesser, jeweils als Mittelwert je Stunde (Gl. 4.1).

$$U = T_{dos} * V_d \quad \text{Gl. 4.1}$$

Die so ermittelte Größe wurde bei allen weiteren Berechnungen, für jede Küvette gesondert berücksichtigt und in die Makros implementiert.

4.3.1.2 Blattflächenmessung

Die Blattflächen wurden mit einem Blattflächenmessgerät der Firma Li-COR (LI-3100C Area Meter, Li-COR Biosciences Inc., Lincoln, USA) erfasst. Vor jeder Versuchsauswertung wurde das Gerät einer Messgenauigkeitsprüfung, anhand eines Plättchens definierter Größe, unterzogen. Um Ungenauigkeiten vorzubeugen, wurde die Auflagefolie des Messgeräts nach ca. 5 Durchgängen gereinigt.

Anhand der zu Beginn und am Ende jedes Versuchs durchgeführten Blattflächenbestimmung (siehe 4.3.2) wurde ein lineares Modell zur

Bestimmung der jeweiligen Blattfläche für jede Küvette jedes Versuchs erstellt und bei den Berechnungen berücksichtigt.

Die verwendeten Rohdaten bezogen sich bei der Erfassung auf eine Grundfläche von 1,44 m² und wurden für sämtliche folgenden Berechnungen auf die Bezugseinheit m² Blattfläche umgerechnet. Dies wurde ermöglicht, da zum einen für jeden Versuch und jede Variante die jeweilige Blattfläche ermittelt wurde und zum anderen die Anzahl der Pflanzen je Versuchsdurchgang bekannt war.

4.3.1.3 Berechnungen zur Netto- Photosyntheserate (P_n)

Zur Berechnung von P_n wurden die erforderlichen Werte aus der Datenbank als Stundenmittelwerte über die gesamte Versuchsdauer abgefragt. Maßgebliche Größen zur Berechnungen von P_n waren die Dauer der CO₂- Begasung, der eingebrachte Volumenstrom und das molare Volumen. Dabei wurden die Faktoren Undichtigkeit (siehe 5.1.5) und die Blattfläche (siehe 4.3.1.2) berücksichtigt und die einzelnen Verrechnungsschritte über ein Visual Basic Makro in Microsoft Excel 2010 programmiert. Ferner wurde eine Einstrahlung von mehr als 8 μmol m⁻² s⁻¹ für die Berechnungen der Tag- Werte definiert. Die Berechnung der Netto- Photosynthese erfolgte nach Gleichung Gl. 4.2:

$$P_n = V_d * (T_{dos} - U) * V_m^{-1} * A^{-1} * 10^6 \text{ (}\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}\text{)} \quad \text{Gl. .4.2}$$

wobei V_d der CO₂- Zudosierung (l h⁻¹, umgeformt in l s⁻¹), T_{dos} der Dosierdauer (s h⁻¹), V_m dem molaren Volumen (l mol⁻¹) und A der Blattfläche der 34 Versuchspflanzen in den TPK (m² 34) entspricht. Abschließend wird der Term mit 10⁶ multipliziert, um P_n in der allgemein gültigen Einheit μmol m⁻² s⁻¹ darstellen zu können.

Als Besonderheit der zur Verrechnung genutzten Rohdaten aus der Datenerfassung gilt eine im Visual Basic Makro implementierte Verrechnung mit dem Faktor 10. Dieser Schritt wurde durch die Verwendung eines Messgasumschalters notwendig (siehe 4.1.3.2), da die Erfassung der Messwerte in einem Intervall von sechs Minuten ablief.

In den Morgenstunden, wenn die CO₂- Konzentration, bedingt durch die Respirationaleistung in der Nacht, oberhalb der jeweiligen Sollwerte lag, wurde ein abgewandeltes Berechnungsverfahren angewendet, da in diesen Fällen weder der Volumenstrom, noch die Dosierdauer (V_d und $T_{dos} = 0$) messbar waren. In diesem Fall wurde die stündliche CO₂- Abnahme (Aufnahme durch die Pflanzen bei Lichteinfall) in vpm als prozentualer Anteil je Stunde vom Gesamt- Küvettenluft- Volumen (1728 l) erfasst und anstelle des Produkts aus $V_d(T_{dos} - U)$ in die Berechnungen einbezogen. Auch bei diesem Berechnungsschritt wurde die ermittelte Undichtigkeit berücksichtigt (siehe 5.1.5.1). Das Verfahren wurde so lange angewendet, bis die durch Sollwertunterschreitung bedingte Zudosierung wieder einsetzte und die in Gl. 4.2 beschriebene Formel wieder Anwendung fand.

Die auf diesem Weg berechneten Daten wurden in einem Licht- Reaktions- Diagramm (light- response- curve) mit der Einstrahlung (PAR in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) auf der Abszissenachse und der Netto- Photosyntheserate (P_n in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) auf der Ordinatenachse als Punktwolke dargestellt. Mithilfe einer Sättigungsfunktion wurden die jeweiligen modellierten Kurvenverläufe für die Punktwolke ermittelt. Das für die Modellierung genutzte Modell ist in Gl. 4.3 dargestellt.

$$P_n = \alpha * \frac{1 - \beta I}{1 + \gamma I} * I - \delta \quad \text{Gl. 4.3}$$

Hierbei berechnete sich die Netto- Photosyntheserate (P_n) aus der Strahlung (I) und den mithilfe des Modells geschätzten Parametern α , β , γ und δ . Mithilfe einer üblichen Kurvendiskussion konnten die kurvenspezifischen Parameter LCP (Schnittpunkt mit der X- Achse), $P_{n \text{ max}}$ und PAR_{max} (Extremwerte der jeweiligen Funktion) berechnet werden. Diese letzteren Werte geben die maximale Netto- Photosynthese und die Einstrahlung, bei der diese verzeichnet wird, an.

Bei einem Fehlen der Einstrahlung, also bei $I = 0$, konnte durch Umformung des Terms in Gl. 4.3 die Respiration (R_d) berechnet werden (Gl.4.4) (Ye 2007, Ye

und Zhao 2010), wobei α der negativen Steigung und I_{LCP} dem errechnen Licht-Kompensationspunkt aus Gl. 4.3 entsprachen.

$$R_d = -\alpha * I_{LCP} \quad \text{Gl. 4.4}$$

Bei allen P_n - und R_d - Modellierungen wurde durch ein statistisches Testverfahren (Shapiro-Wilk Test, W-Statistik) gezeigt, dass die Punktwolken durch die zugehörigen Modelle hinreichend und statistisch signifikant ($\alpha = 0,05$) beschrieben werden. Dies gilt als Grundlage für sämtliche in 5.2 gezeigten Grafiken und wird im Folgenden nicht gesondert erwähnt.

4.3.1.4 Berechnungen zur Respiration

Für die Berechnung der Respirationsrate (R_d) anhand der gemessenen Daten wurden Stunden- und Tagesmittelwerte aus der My SQL Datenbank bezogen und in einem Visual Basic Makro mit den spezifischen Kenngrößen verrechnet. Als Nachtwerte wurde solche verwendet, die unterhalb einer Einstrahlung von $8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ lagen.

Die Berechnung der Respirationsrate erfolgte nach Gleichung Gl 4.5:

$$R_d = \left((1728 * \Delta_{vpm} * 10^{-6}) - U \right) * V_m^{-1} * A^{-1} * 10^6 \quad (\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}) \quad \text{Gl. 4.5}$$

Wobei Δ_{vpm} der Differenz der gemessenen CO_2 - Stundenmittelwerte entspricht und als Prozentwert vom Gesamt- Kuvettenluftvolumen (1728 l) berechnet wird. Über die gesamte Auswertung wurden sämtliche Berechnungen auf Basis der modellierten Blattfläche durchgeführt.

Bei der Darstellung der Respirationsergebnisse wurden die ermittelten Stundenmittelwerte (aus 15 Sekunden Messwerten generiert und aus der My SQL Datenbank in MS Excel importiert) der Respirationsdaten zu Nachtmittelwerten zusammengefasst und die Einflüsse der jeweiligen Faktoren untersucht.

4.3.1.5 Berechnungen zur Transpiration

Zur Auswertung der Transpirationsdaten wurden die Rohdaten auf Stundenbasis (aus 15 Sekunden Messwerten generiert) aus der My SQL Datenbank bezogen. Bei den bezogenen Daten handelte es sich um Impulszählungen. Zur Unterscheidung der Tages- und Nachtwerte wurden die Daten gefiltert. Dabei wurde eine Einstrahlung $> 8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ als Tag und eine Einstrahlung $< 8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ als Nacht definiert.

Mit den bekannten Volumina je Kippbewegung (30 ml, siehe 4.1.3.1) konnte die Menge des Kondensats erfasst und im Folgenden mit dem jeweiligen Einflussfaktor korreliert werden. Die Impuls- Rohdaten wurden für die gesamte TPK erfasst und bezogen sich auch auf die TPK- Grundfläche. Bei der folgenden Auswertung wurden die Werte auf die jeweilige Blattfläche umgerechnet.

4.3.2 Destruktive Bonituren

Am Tag jedes neuen Versuchsstarts wurden von den verbliebenen, nicht genutzten Versuchspflanzen (stets ca. 30 - 50 Pflanzen) des selben Satzes insgesamt sechs randomisiert ausgewählt und einer destruktiven Bonitur unterzogen, um die Ausgangsdaten der Varianten zu Versuchsbeginn zu erhalten. Dabei wurden die Werte für Höhe, Anzahl der Blätter, Blattfläche, sowie die Frisch- und Trockenmasse je Pflanze ermittelt und anschließend einer Mittelwertbildung samt Standardabweichung unterzogen.

Zur Trockenmassebestimmung wurden die ausgewerteten Pflanzen in einem Trockenofen (Memmert Universalschrank UF750, Memmert GmbH und Co. KG, Schwabach, D) für zehn Tage bei 85 °C getrocknet und anschließend erneut abgewogen. Eine Kodierung auf den Trockentütchen ermöglichte eine eindeutige Zuordnung bei der nachfolgenden Auswertung.

Nach Ablauf der Versuchslaufzeit von 30 Tagen wurden erneut destruktive Bonituren der Pflanzen durchgeführt. Diese Daten wurden an insgesamt jeweils 16 Pflanzen aus den drei TPK ermittelt. Die destruktiven Bonituren wurden zum Versuchende um die Faktoren Anzahl Blüten und Anzahl geschlossener Blüten

ergänzt. Abbildung 4.13 zeigt die Boniturmuster für geöffnete (b) und geschlossene (a) Blüten.



Abb. 4.13: Boniturstandard für Blüten geschlossen (a) und Blüten geöffnet (b).

Als weiterer Boniturparameter wurde zusätzlich der SPAD Wert (Chlorophyll-Messgerät SPAD-502, Konika Minolta, Tokyo, Japan) von fünf randomisiert ausgewählten Versuchspflanzen jeder TPK aufgenommen (insgesamt 15 Pflanzen). Je Pflanze wurden fünf Messungen an den jüngsten voll entwickelten Blättern durchgeführt und zu einem Mittelwert je Pflanze zusammengefasst. Das zu messende Blatt wird in das Messgerät eingespannt. Eine Photodiode misst die Absorption durch das Blatt in zwei Wellenlängenbereichen und kalkuliert einen numerischen SPAD- Wert. Dieser liegt zwischen null und 50 und korreliert direkt mit dem Chlorophyllgehalt der gemessenen Blätter.

4.3.3 Statistische Auswertung

Die statistische Untersuchung der einzelnen Versuchsteile fand mit der Statistikfunktion des Programms SigmaPlot statt. Dazu wurden die in MS Excel berechneten Daten in SigmaPlot importiert.

4.3.3.1 Netto- Photosynthese

Um die Kurven der P_n auf statistische Unterschiede zu untersuchen, wurde eine Varianzanalyse (ANOVA, engl. Analysis of Variance) durchgeführt. Dabei wurde

untersucht, ob die Varianz zwischen untersuchten Gruppen größer war als die Varianz innerhalb der Gruppen selbst.

Es wurden zunächst die Hypothesen getestet:

H0: kein Unterschied zwischen den Erwartungswerten

H1: Unterschied zwischen den Erwartungswerten

Um dann eindeutige Aussagen zum Unterschied der Gruppen treffen zu können, wurden multiple comparison tests durchgeführt. Getestet wurden alle Küvetten eines Versuchsdurchlaufs gegeneinander (all pairwise) mit der Holm-Sidak Methode. Dabei galt ein alpha- Wert von 0,05 als statistisch signifikant. Der Vergleich der Varianzen wurde somit als (signifikantes) Maß für die variantenbedingte Veränderung von P_n über den gesamten Versuchsverlauf gesehen.

Abhängigkeiten der Blattfläche wurden mithilfe einer Korrelationsanalyse, unter Angabe des Korrelations- Koeffizienten sowie des P- Werts (statistisch signifikant $P \leq 0,05$) berechnet und dargestellt.

Bei Vergleichen, die aus verschiedenen Versuchsdurchläufen generiert wurden, wurde über den Zwischenschritt der Erstellung einer vereinfachten LUE der Faktor Einstrahlung normiert, um so die Vergleiche einstrahlungsbereinigt darstellen zu können.

Die LUE wurde als Quotient zwischen gemessener P_n und PAR- Strahlung (jeweils als Mittelwert je Stunde) gebildet.

4.3.3.2 Destruktive Bonituren

Zum Erhalt der Daten wurden je Auswertetermin 16 Pflanzen entnommen und vermessen. Mit diesen Messdaten wurde zunächst eine deskriptive Statistik durchgeführt. Insbesondere der Mittelwert, die Standardabweichung und die Fallzahl n dienten als Grundlage für die weitere statistische Untersuchung. Die Daten jeder Versuchsreihe wurden untereinander mit einer One- Way- ANOVA auf Grundlage einer All pairwise multiplen Vergleichsmethode (Holm- Sidak

Methode) verglichen, mit dem Ziel den Einfluss der Variante ermitteln zu können. Die Resultate galten dabei als signifikant unterschiedlich, wenn der alpha- Wert von 0,05 nicht überschritten wurde.

5. Ergebnisse

5.1 Regelgenauigkeit des Systems

Die Ergebnisse zur Regelgenauigkeit des Systems wurden in die Faktoren CO₂-Konzentration, Temperatur und relative Luftfeuchte unterteilt und werden im Folgenden separat, je Faktor und Faktorstufe, dargestellt.

5.1.1 CO₂-Konzentration

Die CO₂-Konzentration galt als Kern- Untersuchungsgröße dieser Arbeit, da diese sowohl bei den Berechnungen zur Netto- Photosynthese, insbesondere beim Vergleich der jeweiligen Klimafaktoren und Küvetten, als auch bei den Messungen zur Respiration, jeweils zur Abbildung der jeweiligen Pflanzenreaktionen verwendet wurden.

Abbildung 5.1 zeigt den Verlauf der CO₂-Konzentration im Verlauf eines ausgewählten Versuchs (Versuch 1, 12.08.2012 – 12.09.2012) jeweils für drei Küvetten. Es zeigt sich sehr deutlich, dass bei der gewählten Darstellungsweise als Stundenmittelwerte je Tag eine deutliche Diskrepanz zwischen den Tages- und Nachtwerten bestand. Wurden die Sollwerte tagsüber sehr genau geregelt, so zeigte sich eine deutliche, respirationsbedingte Erhöhung der Werte in der Nacht. Die Mittelwerte der CO₂-Konzentration in der Zeit von 12.00 Uhr bis 18.00 Uhr betragen für Küvette 1 417 vpm ($\pm 26,05$ vpm; Sollwert: 400 vpm), für Küvette 2 816,80 vpm ($\pm 56,67$ vpm; Sollwert: 800 vpm) und für Küvette 3 1202,29 vpm ($\pm 82,18$ vpm; Sollwert 1200 vpm). Betrachtet man hingegen den gesamten Verlauf der CO₂-Konzentration ohne eine vorhergehende Filterung der Daten hinsichtlich der Tageszeit, also mitsamt des Respirationsanstiegs, waren die Werte zum Teil deutlich erhöht:

Küvette 1 529 vpm ($\pm 147,25$ vpm; +26,81 %), Küvette 2 892,72 vpm ($\pm 185,22$ vpm; +9,29 %) und Küvette 3 1174,12 vpm ($\pm 183,76$ vpm; -2,34 %).

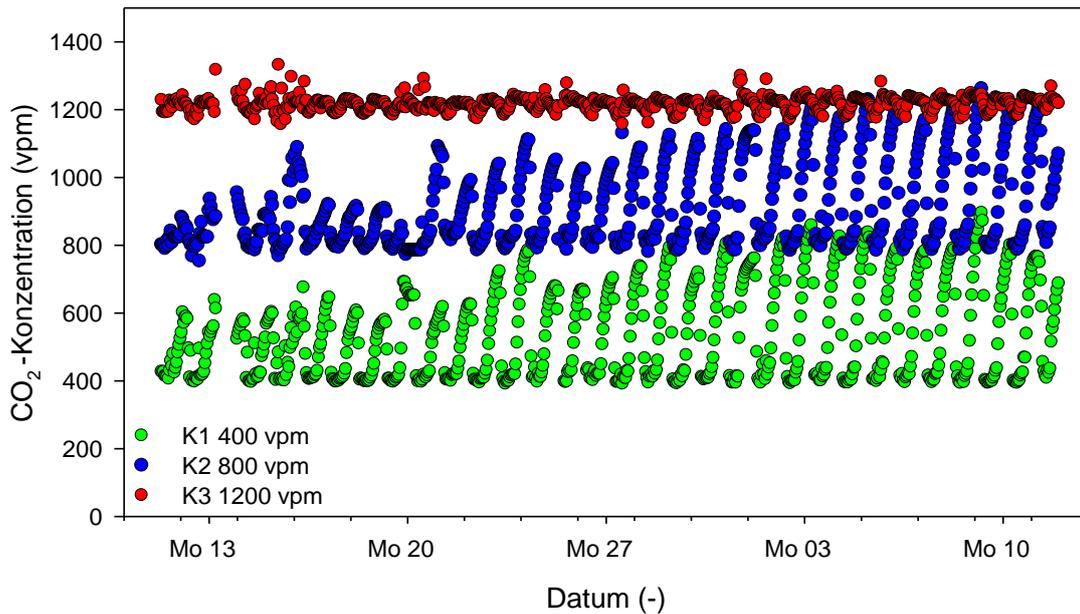


Abb. 5.1: Verläufe der CO₂-Konzentration bei 400 vpm (K1), 800 vpm (K2) und 1200 vpm (K3), als Stundenmittelwert. Die Abweichungen von dem jeweiligen Sollwert entstehen durch die Respiration nachts.

5.1.2 Temperatur

In Abbildung 5.2 ist der Verlauf der Temperaturregelung im Laufe eines beispielhaft ausgewählten Versuches (Versuch 12, 06.01.2014 – 06.02.2015) grafisch dargestellt. Die zugrunde liegenden Daten basieren auf Stundenmittelwerten und umfassen eine gesamte Versuchsperiode. Zur Vergleichsanstellung wurden Versuche mit gleicher Tag- und Nachttemperatur verwendet. Die eingestellten Sollwerte betragen im Beispielsfall 18/18 °C (K1), 30/30 °C (K2) und 10/10 °C (K3).

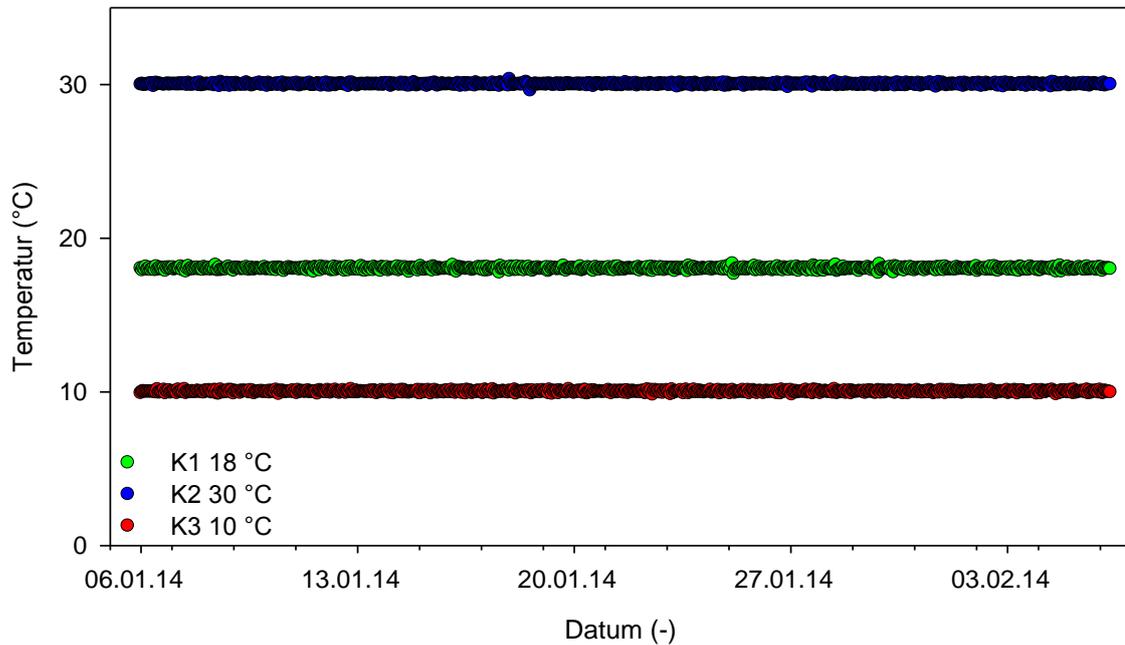


Abb. 5.2: Temperaturverlauf bei 18 °C T/N (K1), 30 °C T/N (K2) und 10 °C T/N (K3) über einen gesamten Versuchsverlauf, dargestellt als Stundenmittelwerte

Die eingestellten Sollwerte von 18/18 °C, 30/30 °C und 10/10 °C (K1, K2, K3) wurden sehr genau geregelt, was aus den geringen Streuungen um die jeweiligen Mittelwerte hervorgeht (Tab. 5.1).

Tab. 5.1: Mittelwerte mit Standardabweichung der Messung der Regelgenauigkeit bei Sollwerten von 18/18 °C in K1, 30/30 °C in K2 und 10/10 °C in K3.

	K1 18/18 °C	K2 30/30 °C	K3 10/10 °C
Mittelwert (°C)	18,01	30,00	10,01
Stabw	±0,07	±0,05	±0,06

5.1.3 Relative Luftfeuchte

Die Verläufe der relativen Luftfeuchte sind exemplarisch für Versuch 4 (24.02.2013 – 22.03.2013) in Abbildung 5.3 dargestellt. In K1 erfolgte eine Korrektur des Sollwerts von 50 % rF auf 45 % rF etwa fünf Tage nach Versuchsbeginn. Dadurch ist der anfängliche Versatz der Daten zu erklären.

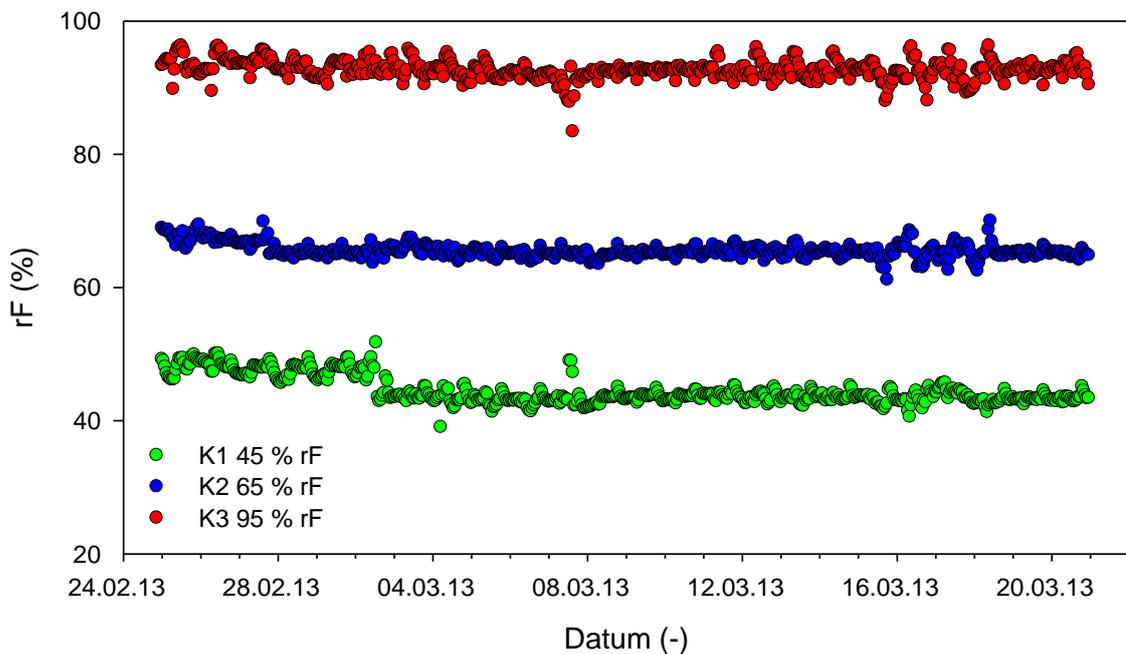


Abb. 5.3: Verläufe der relativen Luftfeuchte bei Sollwerteneinstellungen von 45 % rF (K1), 65 % rF (K2) und 90 % rF (K3) während einer Versuchsperiode, dargestellt als Stundenmittelwerte.

Der Tabelle 5.2 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen des Verlaufes der Luftfeuchtigkeit für eine Versuchsperiode (Versuch 4) zu entnehmen. Dabei wurde auch für K1 der gesamte Datenbereich verwendet und auf eine Korrektur der Anfangsdaten verzichtet.

Tab. 5.2: Mittelwerte mit Standardabweichung der Messung der Regelgenauigkeit bei Sollwerten von 45 % rF in K1, 65 % rF in K2 und 90 % rF in K3.

	K1 45%	K2 65 %	K3 90 %
Mittelwert (%)	44,45	65,46	92,60
Stabw	±2,09	±1,07	±1,40

5.1.4 Einstrahlung

Abbildung 5.4 zeigt exemplarisch den Verlauf der Einstrahlung über eine Dauer von 30 Tagen, gemessen innerhalb der Küvetten. Bei den zugrunde liegenden Messdaten handelt es sich um Versuch 3 (09.01.2013 – 06.02.2013). Eine genauere Betrachtung der Daten offenbart, dass der Verlauf der gemessenen Einstrahlung in allen drei Küvetten nahezu deckungsgleich verläuft. Diese

vergleichende Darstellung wurde für sämtliche Versuche mit Ausnahme der Schatterversuche durchgeführt, wird aber nicht gesondert dargestellt.

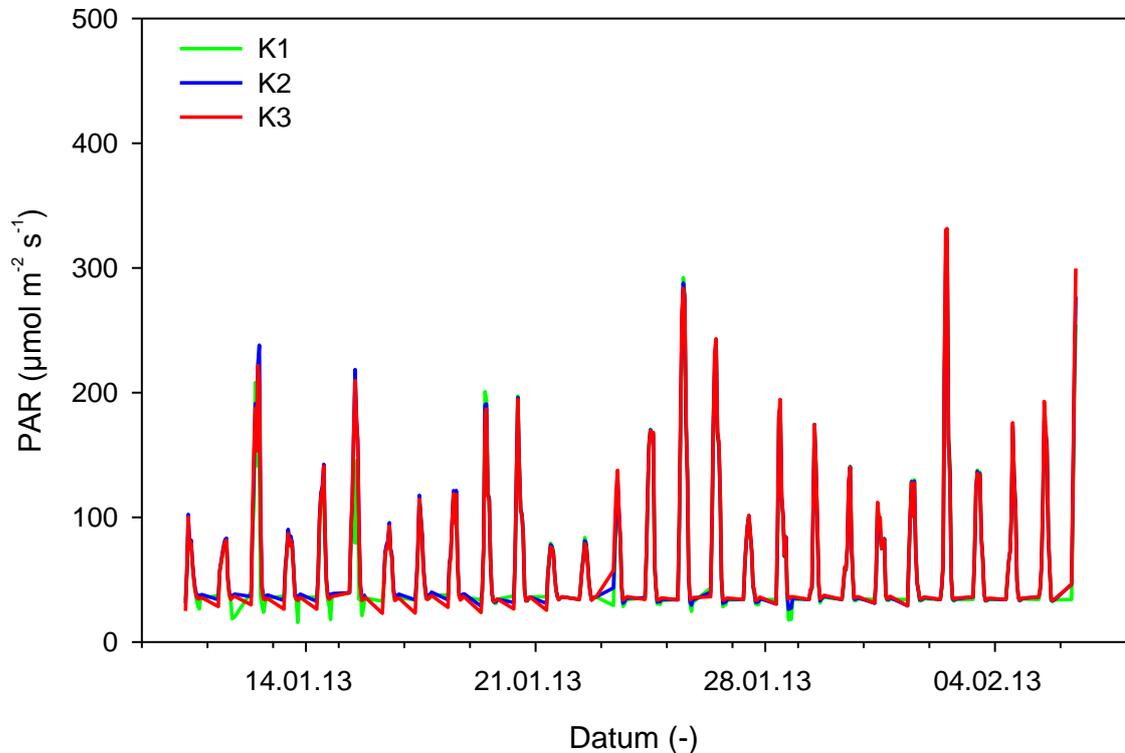


Abb. 5.4: Verläufe der Einstrahlung zur selben Versuchslaufzeit, innerhalb der Küvetten (K1, K2, K3). Dargestellt sind Stundenmittelwerte im Zeitraum von 08:00 – 20:00 Uhr über die gesamte Versuchsperiode.

Der geschilderte Sachverhalt wurde statistisch bewertet und mithilfe der Tabelle 5.3 veranschaulicht.

Anhand der angegebenen statistischen Daten in der Tabelle konnte belegt werden, dass der Vergleich über alle Küvetten keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Einstrahlung ergab. Damit wurde nachgewiesen, dass sich die Einstrahlungsverhältnisse in den Küvetten zum selben Messzeitpunkt weder quantitativ, noch statistisch belegbar voneinander unterschieden. Somit war sichergestellt, dass innerhalb eines Versuchsdurchlaufs dieselben Einstrahlungsverhältnisse vorherrschten. Dies fand in den durchgeführten Vergleichen Anwendung.

Tab. 5.3: Statistische Daten eines Vergleichs zur Einstrahlung in die Küvetten. Unterschiedliche Buchstaben weisen auf statistische Signifikanz hin (ANOVA, α : 0,05).

	K1	K2	K3
N	350	350	350
Median	49,37	51,27	51,41
25 %	34,09	35,89	35,21
75 %	92,33	96,32	97,22
ANOVA	a	a	a

5.1.5 Undichtigkeitsmessungen

Eine elementare Größe, die ein hohes Fehlerpotential für die Untersuchungen in den Küvetten bedingen könnte, waren die Undichtigkeiten des Gesamtsystems. Das betraf jede TPK für sich betrachtet, mitsamt den jeweiligen Schlauch- und Rohrdurchführungen, Schlauchzuleitungen und Anschlüssen, also das gesamte Messsystem mitsamt Peripherie. Die Abschätzung der Undichtigkeiten war notwendig um diese Verlustleistung nicht als CO₂- Konsum der Pflanze zu interpretieren und damit die Netto-Photosyntheserate genauer bestimmen zu können.

5.1.5.1 CO₂- Zudosierung als Volumenstrom

Die Ergebnisse der Undichtigkeitsmessung sind in Tabelle 5.4 in Form der CO₂-Zudosierung in l h⁻¹ dargestellt und entsprechen dem zuzuführenden Volumen je Zeiteinheit, um den jeweils gewünschten Sollwert aufrecht zu halten. Bei der Betrachtung fällt auf, dass K1 und K3 lediglich geringfügige Unterschiede zueinander aufwiesen. Im Vergleich dazu war K2 geringfügig dichter. In K2 musste bei einer CO₂- Konzentration von 800 vpm 33,9 % (-0,011 l h⁻¹), bei einer CO₂- Konzentration von 1200 vpm 45,9 % (-0,031 l h⁻¹) und bei einer CO₂- Konzentration von 1500 vpm 45,4 % (-0,044 l/h⁻¹) weniger zudosiert werden als im Vergleich zum Mittelwert von K1 und K2, um die gewünschten CO₂-Konzentrationen im Inneren der Küvette zu halten.

Diese Werte wurden zum einen bei der Berechnung der Respirationsrate (R_d) und zum anderen bei der Berechnung der Netto- Photosyntheserate (P_n) in den

Morgenstunden genutzt. Das wurde notwendig, wenn durch die erhöhten CO₂-Werte nachts, infolge der erhöhten CO₂-Konzentration durch R_d, keine Dosierdauer und kein Volumenstrom ermittelt werden konnte.

Tab. 5.4: Ergebnisse der Undichtigkeitsmessung. Die Daten zeigen die jeweilige CO₂-Zudosierung in l h⁻¹ bei der entsprechenden CO₂-Konzentration in der jeweiligen Tageslicht- Pflanzenkuvette.

CO ₂ - Kuvette	Konzentration	K1 (l h ⁻¹)	K2 (l h ⁻¹)	K3 (l h ⁻¹)
400 vpm		0,0000	0,0000	0,0000
800 vpm		0,0393	0,0298	0,0405
1200 vpm		0,0971	0,0680	0,1014
1500 vpm		0,1377	0,0969	0,1441

In Abbildung 5.5 sind die Kurvenverläufe der Undichtigkeitsmessungen für alle drei TPK als CO₂-Zudosierung in l h⁻¹ dargestellt. In der grafischen Darstellung sind die Unterschiede zwischen K1 und K3 zu K2 gut zu erkennen.

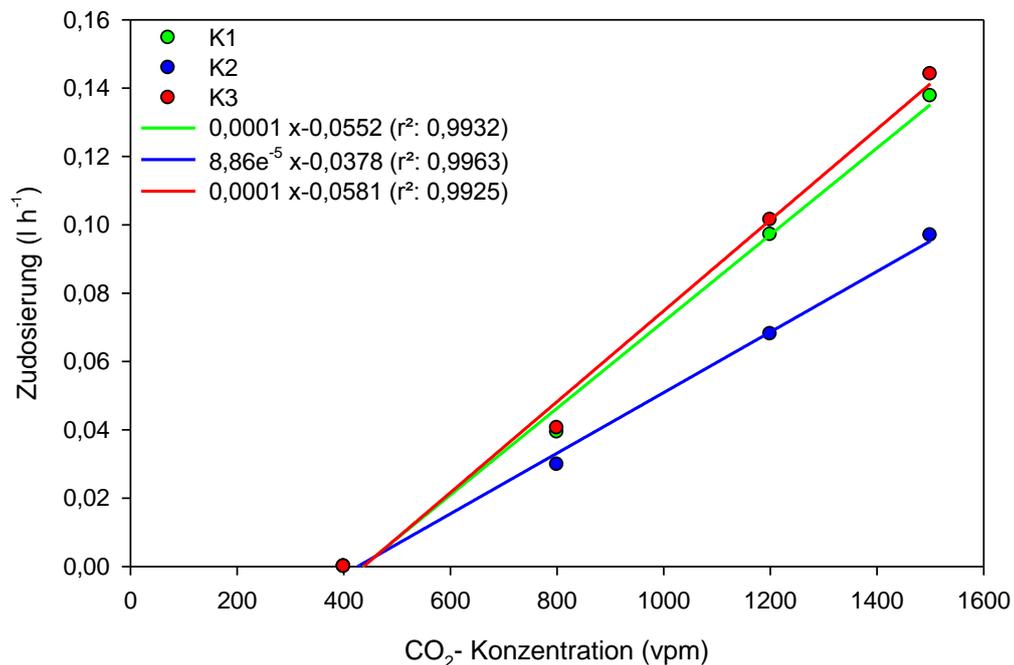


Abb. 5.5: Grafische Darstellung der Undichtigkeiten. Dargestellt ist die Zudosierung (l h⁻¹) bei der entsprechenden CO₂-Konzentration (vpm) für K1 (grün), K2 (blau) und K3 (rot).

5.1.5.2 CO₂- Zudosierung als Ansteuerzeit

Eine weitere Darstellungsform der Undichtigkeiten ist die ebenfalls systemrelevante Darstellung in der Einheit s h⁻¹, also der durchschnittlichen Dauer der Zudosierung (technisch betrachtet die Öffnungsdauer des Magnetventils, dargestellt als Mittelwert je Stunde), um die jeweilige CO₂-Konzentration zu halten.

Da in die Verrechnung der Netto- Photosyntheserate (siehe 4.3.1.2) der Durchfluss (T_{dos}) in Form der Zudosierung in Sekunden je Stunde (s h⁻¹) eingeht, wird auch die Undichtigkeit in dieser Form angegeben. Diese Darstellungsform der Undichtigkeit je TPK diene der Berechnung der Netto-Photosyntheserate im Fall einer aktiven Zudosierung. In Tabelle 5.5 sind die unterschiedlichen Ansteuerzeiten der Zudosierung für die drei TPK in Abhängigkeit der CO₂-Konzentration dargestellt.

Tab. 5.5: Ergebnisse der Undichtigkeitsmessung. Die Daten zeigen die jeweilige CO₂-Zudosierung in s h⁻¹ bei der entsprechenden CO₂-Konzentration in den Tageslicht- Pflanzenküvetten.

CO ₂ - Küvette	Konzentration	K1 (s h ⁻¹)	K2 (s h ⁻¹)	K3 (s h ⁻¹)
400 vpm		0,00	0,00	0,00
800 vpm		9,45	7,15	9,71
1200 vpm		22,75	16,11	24,45
1500 vpm		33,05	23,27	34,58

5.2 Untersuchungen der Netto- Photosynthese (P_n)

Die im Ergebnisteil 5.2 aufgeführten Versuche zeigen die messtechnisch erfasste und weiter berechnete Netto- Photosyntheserate (P_n in μmol m⁻² s⁻¹) je Versuch bei gegebener Einstrahlung (PAR in μmol m⁻² s⁻¹).

Während einer Versuchsreihe wurde stets nur ein Klimaparameter in drei verschiedenen Ausprägungen (Varianten in den TPK) untersucht. Zur eindeutigen Identifizierung der jeweiligen TPK in den Grafiken und Darstellungen wurden die Farben grün, blau und rot konsistent verwendet (Küvette 1 = grün; Küvette 2 = blau; Küvette 3 = rot).

Die Ergebnisse wurden zu Gruppen gleicher Einflussgrößen (CO₂, Temperatur, Einstrahlung / Schattierung und relative Luftfeuchte) zusammengefasst und sind nicht in der chronologischen Versuchsreihenfolge aufgeführt. Diese ist im Abschnitt Material und Methoden in Tabellenform zusammengefasst (Siehe 4.2.1.1).

Bei jedem Versuch wurden die dargestellten Ergebnisse auf Basis einer modellierten, individuellen Blattfläche der jeweiligen Variante berechnet. Somit beziehen sich sämtliche Ergebnisse auf einen Quadratmeter Blattfläche.

Die gezeigten Kurvenverläufe sind Modellierungen der jeweiligen, zugrundeliegenden Punktwolke. Anhand einer Beispielgrafik (Abb.5.6) soll die finale Datenaufbereitung verdeutlicht werden. Der gesamte Datensatz jedes Versuchsdurchlaufs wurde in Versuchstag eins bis 14 (graue Punkte) und in Versuchstag 15 bis 30 (schwarze Punkte) aufgeteilt. Für die Modellerstellung wurde die zweite Hälfte des Datensatzes (Versuchstag 15 -30) verwendet und zur Modellierung der Verlaufskurven verwendet. Ab diesem Zeitpunkt konnte von einem LAI von mindestens eins ausgegangen werden.

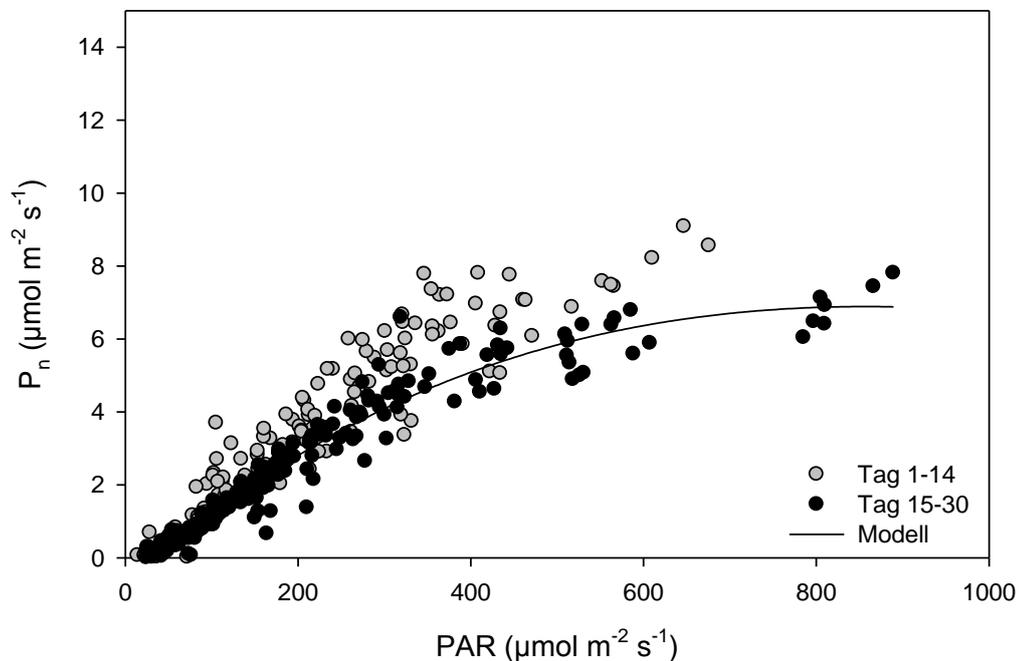


Abb. 5.6: Verarbeitung eines Modell- Datensatzes für die finale Modellerstellung. Unterteilung in erste und zweite Versuchshälfte sowie anschließende Modellerstellung für die zweite Versuchshälfte.

5.2.1 Einflussgröße CO₂

Die Untersuchungen der Veränderung der CO₂-Konzentration dienten zum einen der Ermittlung der optimalen CO₂-Konzentration der verwendeten Modellkultur von *P. zonale* und fanden bei weiteren Versuchen Anwendung. Grundsätzlich wird eine CO₂-Düngung bei Zierpflanzen nur selten eingesetzt, wodurch der Effekt und die Sinnhaftigkeit untersucht werden muss. Ferner wurde die Wirkung reduzierter und erhöhter CO₂-Konzentrationen untersucht, was insbesondere bei sehr dichten, geschlossenen und semi-geschlossenen Gewächshäusern eine Einflussgröße darstellt. Hier erreichen die Werte im geschlossenen, Energierückgewinnungs-Betrieb oftmals sehr niedrige Messwerte.

5.2.1.1 CO₂-Konzentration: 400, 800 und 1200 vpm (V1)

5.2.1.1.1 Kurvenverlauf

Der Kurvenvergleich in Abbildung 5.7 fördert große Unterschiede bei den Kurvenverläufen zu Tage. Ein Vergleich der P_n bei der 400 vpm zur 800 vpm Variante zeigte bei einer maximal gemessenen Einstrahlung von ca. 800 μmol m⁻² s⁻¹ eine Zunahme von P_n um 78 % (5,1 zu 9,1 μmol m⁻² s⁻¹). Bei einem Vergleich der 400 vpm und der 1200 vpm Variante betrug der Zuwachs bereits 133 % (5,1 zu 11,9 μmol m⁻² s⁻¹), bei gleicher Einstrahlung.

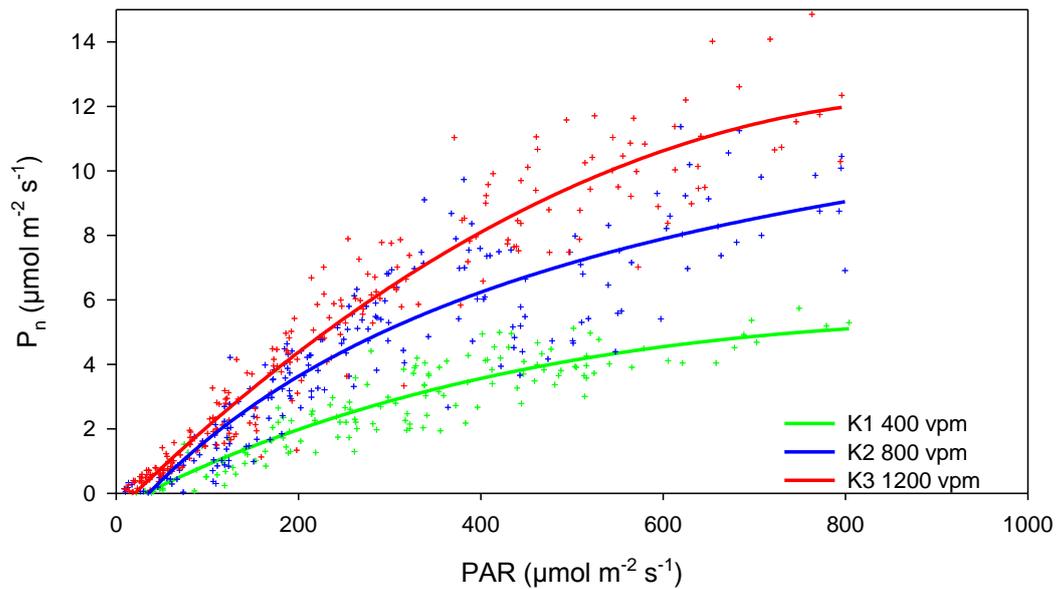
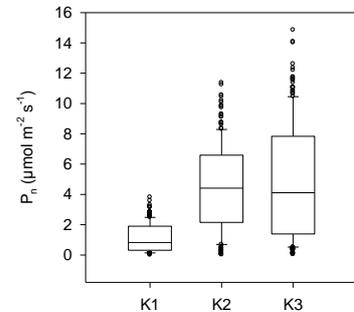


Abb. 5.7: Modellierter Verlauf von P_n bei gegebener Einstrahlung (PAR) bei 400 vpm (K1, grün), bei 800 vpm (K2, blau) und bei 1200 vpm (K3 rot).
Temp.: 18/14 °C / rF: 75 %
Datengrundlage: Stundenmittelwerte bei einer Einstrahlung $> 8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

Ein statistischer Vergleich der Kurven offenbarte, dass P_n bei der 800 vpm und der 1200 vpm Variante jeweils signifikant höher waren, als bei der 400 vpm Variante. Die Variante 800 vpm und 1200 vpm hingegen unterschieden sich untereinander nicht signifikant. Ferner sind in der Tabelle 5.6 die Modellparameter, sowie die errechneten Maxima der jeweiligen Kurven zu entnehmen. Die anhand des Modells berechneten Daten für den LCP erreichten mit zunehmender CO_2 -Konzentration den Schnittpunkt mit der X-Achse jeweils früher, also bei geringerer Einstrahlung. Die P_n erreichte über die Varianten jeweils höhere Werte mit zunehmender CO_2 -Konzentration. Die anhand der Modelle errechneten $P_{n \text{ max}}$ lagen bei der 800 vpm Variante 75,9 % und bei der 1200 vpm Variante 120,7 % über der 400 vpm Variante.

Tab. 5.6: Kurvenparameter der modellierten Funktionen bei 400 vpm (K1), bei 800 vpm (K2) und bei 1200 vpm (K3) sowie die anhand der Modelle berechneten Nullstellen (LCP), Extremwerte ($P_{n \max}$, PAR_{\max}) und die Respiration (R_d). Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten sind durch unterschiedliche Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA, $\alpha = 0,05$). Die jeweilige Datenverteilung ist als Boxplot veranschaulicht.

	K1 400 vpm	K2 800 vpm	K3 1200 vpm
r^2	0,8162	0,8043	0,9311
a	0,0150	0,0335	0,0278
b	0,0003	$-1,1369e^{-5}$	0,0005
c	0,0007	0,0021	$3,8041e^{-5}$
d	0,4702	1,1132	0,5602
R_d	-0,49	-0,98	-0,57
LCP	32,4	29,3	20,4
$P_{n \max}$	5,8	10,2	12,8
PAR_{\max}	1179,6	1274,8	981,7
ANOVA	a	b	b



5.2.1.1.2 Destruktive Bonituren

In Tabelle 5.7 sind die Ergebnisse der destruktiven Bonitur dargestellt. Ein Vergleich der Daten zeigte bei den Boniturparametern Blattfläche und Anzahl der Blätter über alle Varianten keine signifikanten Unterschiede. Die übrigen Boniturparameter wiesen mit Ausnahme des Parameters Anzahl der Blätter, zumindest im Vergleich der 400 vpm zur 800 vpm Variante stets signifikant höhere Werte auf. Einen eindeutigen Trend zeigten die Werte der 400 vpm Variante. Hier waren sämtliche Werte über alle Boniturparameter hinweg stets am niedrigsten.

Prozentual betrachtet waren die ermittelten Veränderungen von der 800 vpm zur 1200 vpm Variante als gering einzuschätzen (BF -2,6 %, FM 4,5 %, TM -4,1 %, Höhe -5,6 %, Anz. Blätter 1,6 %, Blüten geöffnet 55,5 %, Blütenansatz 9,9 %, LAI -2,78 %). Der LAI änderte sich über die Varianten in allen Fällen nur gering.

Ergebnisse

Tab. 5.7: Ergebnisse der destruktiven Bonituren zu den Versuchsvarianten 400 vpm (K1), 800 vpm (K2) und 1200 vpm (K3). Dargestellt sind die Mittelwerte mit Standardabweichung sowie der Blattflächenindex (LAI) zu Versuchsbeginn und Versuchsende. Unterschiedliche Buchstaben verdeutlichen signifikante Unterschiede (ANOVA, $\alpha = 0,05$, $n = 16$).

	K1 400 vpm		K2 800 vpm		K3 1200 vpm	
Blattfläche (cm²)	1433,82 ±263,70	a	1558,73 ±212,66	a	1517,40 ±224,64	a
Frischmasse (g)	138,45 ±21,51	a	151,84 ±18,39	ab	158,62 ±24,70	b
Trockenmasse (g)	13,13 ±2,15	a	15,16 ±2,05	b	15,78 ±2,89	b
Höhe (cm)	18,68 ±2,52	a	22,51 ±1,50	b	21,24 ±2,52	b
Anzahl Blätter (-)	50,06 ±10,15	a	55,24 ±10,13	a	56,12 ±11,55	a
Blüten geöffnet (-)	3,34 ±1,14	a	3,48 ±1,07	ab	5,41 ±1,37	b
Blütenansatz (-)	4,82 ±1,01	a	5,94 ±1,48	b	6,53 ±1,38	c
LAI_{Beginn}	0,57		0,57		0,57	
LAI_{Ende}	3,62		3,68		3,58	

5.2.1.2 CO₂- Konzentration: 1500, 400 und 200 vpm (V2)

5.2.1.2.1 Kurvenverlauf

Eine Betrachtung der Kurvenverläufe in Abbildung 5.8 zeigt deutlich wie die Einstrahlung jahreszeitbedingt auf ca. $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ reduziert war (gemessenes Maximum bei $415,79 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Diese Versuchsreihe wurde im Herbst durchgeführt. Die P_n erhöht sich bei einer Einstrahlung von $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ von der 200 vpm zur 800 vpm Variante um 53,7 % ($4,1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ auf $6,3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) und um 98,55 % bei der 1500 vpm Variante ($4,1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ auf $8,2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

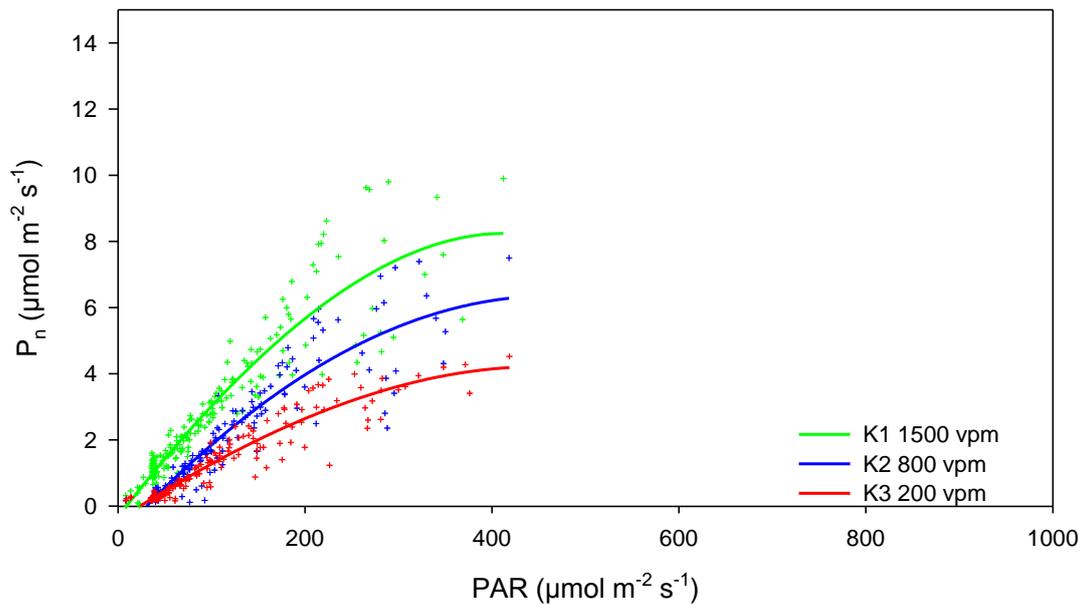
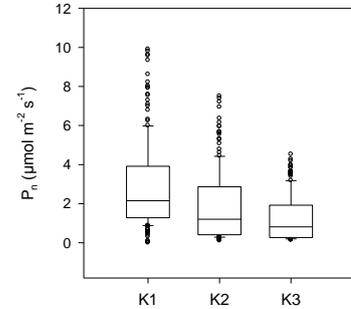


Abb. 5.8: Modellierter Verlauf von P_n bei gegebener Einstrahlung (PAR) bei 1500 vpm (K1, grün), bei 800 vpm (K2, blau) und bei 200 vpm (K3 rot). Temp.: 18/14 °C / rF: 75 %
 Datengrundlage: Stundenmittelwerte bei einer Einstrahlung $> 8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

Die statistische Betrachtung der Kurvenverläufe in Tabelle 5.8 offenbart eine signifikant höhere P_n mit zunehmender CO_2 - Konzentrationsstufe. Die modellierten P_n Maxima stiegen mit erhöhter Konzentration um 48,9 % (200 zu 400 vpm) und 46,1 % (400 zu 1200 vpm). Bei der 200 und der 400 vpm Variante lagen die Daten für LCP und PAR_{max} in einem ähnlichen Bereich, nahmen aber jeweils zur 1500 vpm Variante zum Teil deutlich ab und erreichten für den LCP Werte von 9,25 nm (-69,8 % im Vergleich zur 400 vpm Variante) und für PAR_{max} 406,79 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (-12 % im Vergleich zur 400 vpm Variante).

Tab. 5.8: Kurvenparameter der modellierten Funktionen bei 1500 vpm (K1), bei 400 vpm (K2) und bei 200 vpm (K3) sowie die anhand der Modelle berechneten Nullstellen (LCP), Extremwerte ($P_{n \max}$, PAR_{\max}) und die Respiration (R_d). Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten sind durch unterschiedliche Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA, $\alpha = 0,05$). Die jeweilige Datenverteilung ist als Boxplot veranschaulicht.

	K1 1500 vpm	K2 400 vpm	K3 200 vpm
r^2	0,8689	0,8722	0,9013
a	0,0366	0,0308	0,0186
b	0,0014	0,0011	0,0012
c	-0,0006	$-7,319e^{-5}$	-0,0004
d	0,3359	0,9124	0,4391
R_d	-0,34	-0,94	-0,45
LCP	9,25	30,59	24,08
$P_{n \max}$	8,14	6,33	4,25
PAR_{\max}	406,79	462,37	458,76
ANOVA	a	b	c



5.2.1.2.2 Destruktive Bonituren

Eine Betrachtung der Ergebnisse der destruktiven Bonituren (Tab. 5.9) zeigt, dass mit gesteigerter CO_2 -Konzentration über nahezu alle Boniturparameter hinweg eine mitunter deutliche Zunahme oder Steigerung der jeweiligen Werte erzielt werden konnte. Bei den Parametern Blütenansatz und Anzahl der geöffneten Blüten zeigte sich jeweils ein anderes Bild. Diese beiden Boniturparameter bildeten bei keiner CO_2 -Konzentrationsstufe signifikante Unterschiede aus. In beiden Fällen wies die 400 vpm Variante die jeweils höchsten Werte auf. Besonders markant war die Zunahme des LAI. Dieser erreichte bei der 200 vpm Variante einen Wert von 2,77 und steigerte sich über 3,61 (+30,3 %) bei 400 vpm auf 4,37 (+21,1 %) bei der 1500 vpm Variante.

Bei dieser Versuchsreihe wurde mit der 200 vpm zur 1500 vpm der größte Unterschied bei den Sollwerten der CO_2 -Konzentration eingestellt. Die prozentualen Veränderungen dieser beiden Varianten im Vergleich betragen für Blattfläche +57,5 %, Frischmasse +79,6 %, Trockenmasse 73,9 %, Höhe 37 %, Anz. Blätter +23,5 %, Blüten geöffnet +127,3 %, Blütenansatz -9,3 % und LAI +4,4 %.

Ergebnisse

Tab. 5.9: Ergebnisse der destruktiven Bonituren zu den Versuchsvarianten 1500 vpm (K1), 400 vpm (K2) und 200 vpm (K3). Dargestellt sind die Mittelwerte mit Standardabweichung sowie der Blattflächenindex (LAI) zu Versuchsbeginn und Versuchsende. Unterschiedliche Buchstaben verdeutlichen signifikante Unterschiede (ANOVA, $\alpha = 0,05$, $n = 16$).

	K1 1500 vpm		K2 400 vpm		K3 200 vpm	
Blattfläche (cm²)	1851,63 ±288,45	a	1561,77 ±367,80	b	1175,80 ±260,73	c
Frischmasse (g)	119,27 ±16,77	a	94,69 ±25,75	b	66,41 ±4,20	c
Trockenmasse (g)	10,68 ±1,68	a	8,66 ±2,39	b	6,14 ±1,25	c
Höhe (cm)	20,84 ±2,54	a	16,80 ±3,04	b	15,21 ±2,86	b
Anzahl Blätter (-)	42,83 ±5,72	a	41,17 ±9,62	ab	34,67 ±6,61	b
Blüten geöffnet (-)	0,75 ±0,62	a	1,00 ±1,04	a	0,33 ±0,49	a
Blütenansatz (-)	3,33 ±1,16	a	3,83 ±1,34	a	3,67 ±1,16	a
LAI_{Beginn}	0,55		0,55		0,55	
LAI_{Ende}	4,37		3,61		2,77	

5.2.1.3 CO₂- Konzentration: 400, 800 und 1200 vpm (V5)

5.2.1.3.1 Kurvenverlauf

In Abbildung 5.9 sind die P_n der Küvetten bei CO₂- Konzentrationen von 400 vpm, 800 vpm und 1200 vpm dargestellt. Die im Frühjahr (26.03 – 25.4) durchgeführten Versuche bedingten eine maximale gemessene Einstrahlung von ca. 800 nm in den TPK. Bei dieser Einstrahlung lagen die Werte für P_n bei etwa 8 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (K1 bei 400 vpm), 11 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (K2 bei 800 vpm, Zunahme etwa 37% im Vergleich zur 400 vpm Variante) und 13 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (K3 bei 1200 vpm, Zunahme etwa 62 % im Vergleich zur 400 vpm Variante). Dabei fällt P_n bei der 800 vpm Variante etwa 15 % geringer aus, im Vergleich zur 1200 vpm Variante.

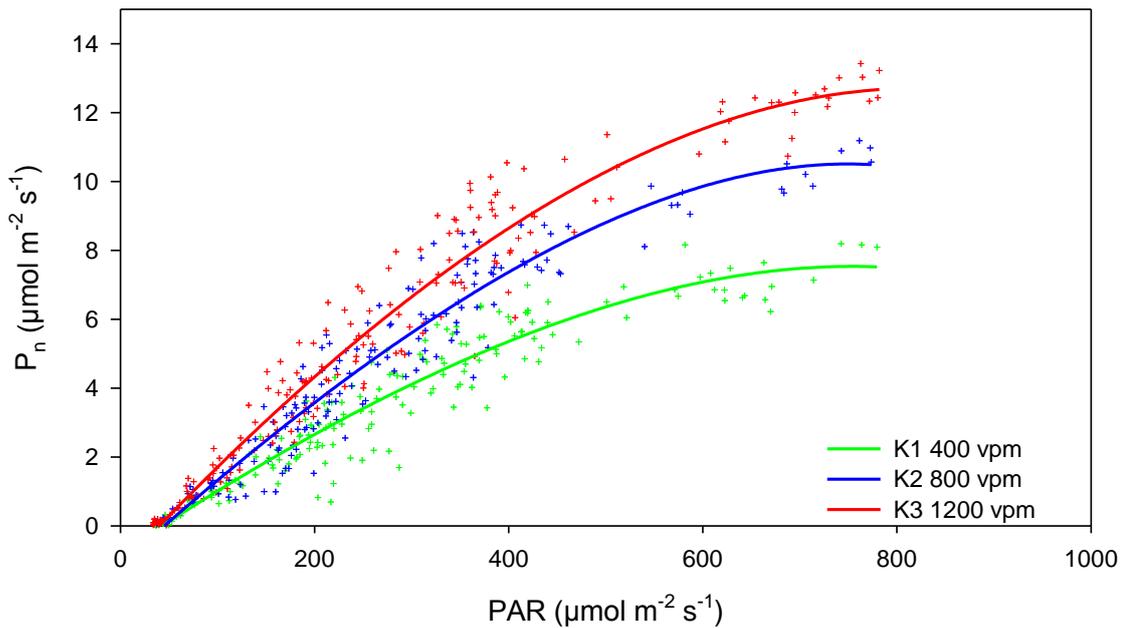


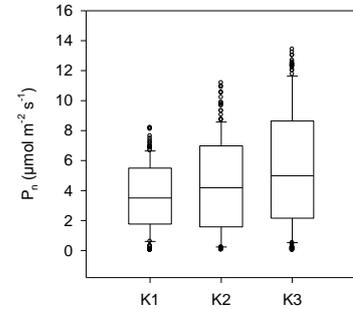
Abb. 5.9: Modellierter Verlauf von P_n bei gegebener Einstrahlung (PAR) bei 400 vpm (K1, grün), bei 800 vpm (K2, blau) und bei 1200 vpm (K3 rot).
Temp.: 18/14 °C / rF: 75 %
Datengrundlage: Stundenmittelwerte bei einer Einstrahlung $> 8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

Bei der Betrachtung der Modellparameter in Tabelle 5.10 zeigt sich, dass P_n bei der 1200 vpm Variante signifikant höher ist, als im Vergleich zur 400 vpm und 800 vpm Variante. Keine statistisch signifikanten Unterschiede zeigten sich hingegen beim Vergleich der 400 vpm und der 800 vpm Variante.

Die modellierte maximale P_n lag bei $7,27 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bei der 400 vpm Variante, $11,08 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bei der 800 vpm Variante und $12,84 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bei der 1200 vpm Variante. Damit betragen die Zuwächse 52,4 % (400 vpm zu 800 vpm) und 15,9 % (800 vpm zu 1200 vpm). Die LCP lagen bei allen Varianten in einem sehr ähnlichen Bereich. Ebenfalls nur geringe Unterschiede konnte bei einem Vergleich der PAR_{max} -Werte nachgewiesen werden. Dieser nahm mit einer Erhöhung der CO_2 -Konzentration jeweils zu (5,9 % von 400 vpm auf 800 vpm und 4,9 % von 800 vpm auf 1200 vpm). Insgesamt betrug der Anstieg im Vergleich der 400 vpm zur 1200 vpm Variante 11,1 %.

Tab. 5.10: Kurvenparameter der modellierten Funktionen bei 400 vpm (K1), bei 800 vpm (K2) und bei 1200 vpm (K3) sowie die anhand der Modelle berechneten Nullstellen (LCP), Extremwerte ($P_{n\ max}$, $PAR_{\ max}$) und die Respiration (R_d). Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten sind durch unterschiedliche Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA, $\alpha = 0,05$). Die jeweilige Datenverteilung ist als Boxplot veranschaulicht.

	K1 400 vpm	K2 800 vpm	K3 1200 vpm
r^2	0,9112	0,9339	0,9517
a	0,0188	0,0254	0,0026
b	0,0008	0,0008	0,0007
c	-0,0004	-0,0005	-0,0003
d	0,7936	1,1292	1,1984
R_d	-0,81	-1,13	-0,11
LCP	42,96	44,42	40,21
$P_{n\ max}$	7,27	11,08	12,84
$PAR_{\ max}$	732,23	775,26	813,57
ANOVA	a	b	b



5.2.1.3.2 Destruktive Bonituren

Die Resultate der destruktiven Bonituren sind der Tabelle 5.11 zu entnehmen. Die Boniturfaktoren Blattfläche, Frisch- und Trockenmasse, sowie Höhe wiesen bei der 800 vpm und der 1200 vpm Variante jeweils signifikant höhere Werte, im Vergleich zur 400 vpm Variante auf. Untereinander betrachtet zeigten sich zwischen den Varianten 800 vpm und 1200 vpm keine statistisch belegbaren Unterschiede. Bei den übrigen Boniturparametern zeigten sich über alle Varianten keine signifikanten Unterschiede. Allgemein zeigte ein Vergleich der Varianten, dass die Werte von 400 vpm zu 800 vpm und 1200 vpm stets anstiegen, eine Erhöhung der CO_2 -Konzentration also einen Anstieg der Boniturwerte mit sich brachte. Dieser Trend konnte bei einem Vergleich der 800 vpm mit der 1200 vpm Variante nur bei einigen Boniturparametern und nicht in der Ausprägung beobachtet werden.

Nur geringe Unterschiede konnten bei dem finalen LAI beobachtet werden. Der höchste Wert zeigte sich bei der 800 vpm Variante und nahm zur 400 vpm Variante um 4,8 % und zur 1200 vpm Variante um 2,5 % ab.

Tab. 5.11: Ergebnisse der destruktiven Bonituren zu den Versuchsvarianten 400 vpm (K1), 800 vpm (K2) und 1200 vpm (K3). Dargestellt sind die Mittelwerte mit Standardabweichung sowie der Blattflächenindex (LAI) zu Versuchsbeginn und Versuchsende. Unterschiedliche Buchstaben verdeutlichen signifikante Unterschiede (ANOVA, $\alpha = 0,05$, $n = 16$).

	K1 400 vpm		K2 800 vpm		K3 1200 vpm	
Blattfläche (cm ²)	1678,56 ±171,85	a	1863,20 ±305,75	b	1878,06 ±242,09	b
Frischmasse (g)	128,66 ±11,89	a	148,67 ±20,05	b	151,72 ±18,99	b
Trockenmasse (g)	13,98 ±1,80	a	17,60 ±3,24	b	18,35 ±2,79	b
Höhe (cm)	17,52 ±1,94	a	20,49 ±1,74	b	20,87 ±1,58	b
Anzahl Blätter (-)	46,75 ±5,46	a	50,19 ±6,15	a	48,06 ±7,68	a
Blüten geöffnet (-)	0,94 ±0,77	a	1,25 ±0,68	a	1,13 ±0,72	a
Blütenansatz (-)	4,06 ±0,93	a	4,31 ±1,08	a	4,86 ±1,12	a
LAI _{Beginn}	0,69		0,69		0,69	
LAI _{Ende}	4,19		4,40		4,29	

5.2.2 Einflussgröße Temperatur

Die Versuche zum Klimaparameter Temperatur dienten der Untersuchung der Integrations- und Kompensationspotentiale der Pflanzen im Hinblick auf mögliche Energieeinsparungen durch angepasste Temperatursollwerte und eine generelle Anpassung der Kulturprogramme an Niedrigenergie-Gewächshäuser. Hier standen auch Untersuchungen mit identischen Tagesmitteltemperaturen und extremen Unterschieden in der Temperaturamplitude Tag / Nacht im Fokus.

5.2.2.1 Temperatur 18/14 °C, 14/18 °C und 20/10 °C (V3)

5.2.2.1.1 Kurvenverlauf

Abbildung 5.10 zeigt die Kurvenverläufe der drei Küvetten mit unterschiedlichen Temperaturregimen bei Versuchen mit geringer Einstrahlung (09.01. – 06.02.). Bei einer maximal gemessenen Einstrahlung von $330 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, wiesen die

Kurven der 18/14 °C und 14/18 °C Variante einen Wert von 7,8 bzw. 7,9 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ für P_n auf und lagen damit sehr dicht beieinander. Bei derselben Einstrahlung betrug P_n bei der 20/10 °C Variante 8,5 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und war damit nur geringfügig erhöht. Die grafische Darstellung weist im Bereich der Einstrahlung bis ca. 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ nur sehr geringe Unterschiede in den Kurvenverläufen auf.

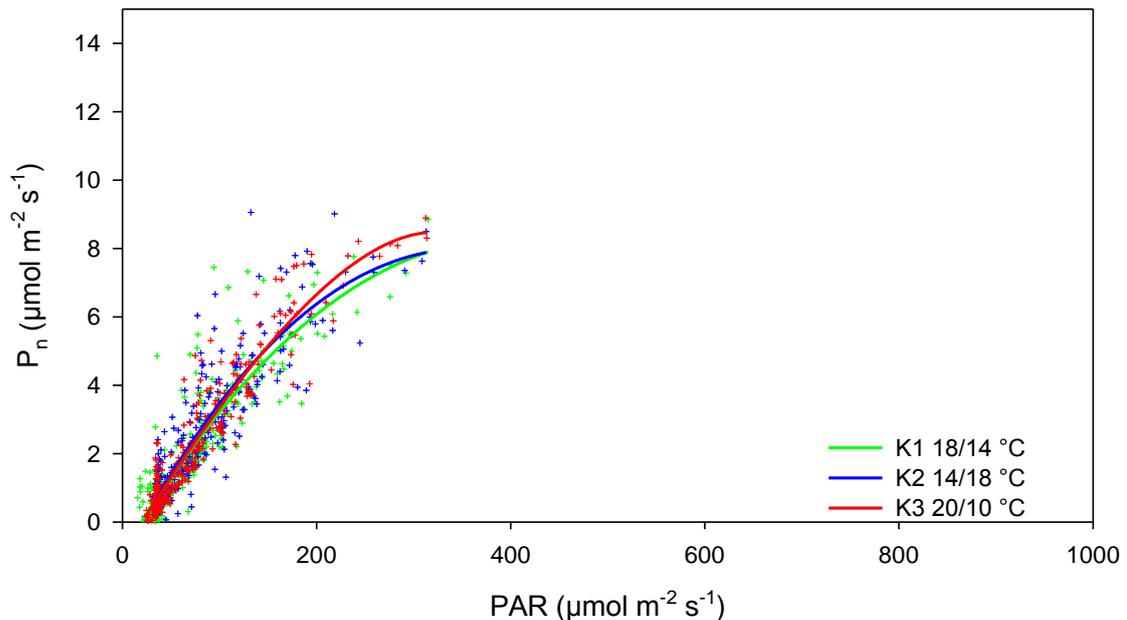


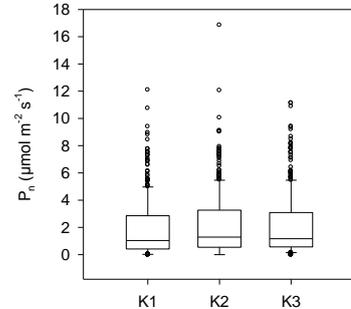
Abb. 5.10: Modellierter Verlauf von P_n bei gegebener Einstrahlung (PAR) bei 18/14 °C (K1, grün), bei 14/18 °C (K2, blau) und bei 20/10 °C (K3 rot).
 CO_2 -Konz.: 800 vpm / rF: 75 %
 Datengrundlage: Stundenmittelwerte bei einer Einstrahlung $> 8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

Ein Blick auf die identischen Kurvenparameter und die Boxplots in Tabelle 5.12 verdeutlicht den identischen Verlauf der drei Kurven zueinander. Eine statistische Betrachtung konnte keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten nachweisen.

Die berechneten Werte für LCP, P_{max} , sowie PAR_{max} wiesen ebenfalls lediglich geringe Variationen auf und lagen im Mittel bei 20,44 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($\pm 0,74$, LCP), 8,11 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($\pm 0,20$, P_{max}) und 356,05 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($\pm 35,35$, PAR_{max}).

Tab. 5.12: Kurvenparameter der modellierten Funktionen bei 18/14 °C (K1), bei 14/18 °C (K2) und bei 20/10 °C (K3) sowie die anhand der Modelle berechneten Nullstellen (LCP), Extremwerte ($P_{n\ max}$, $PAR_{\ max}$) und die Respiration (R_d). Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten sind durch unterschiedliche Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA, $\alpha = 0,05$). Die jeweilige Datenverteilung ist als Boxplot veranschaulicht.

	K1 18/14 °C	K2 14/18 °C	K3 20/10 °C
r^2	0,8956	0,8969	0,9050
a	0,0480	0,0553	0,0461
b	0,0012	0,0013	0,0020
c	0,0002	0,0005	-0,0013
d	0,9213	1,1417	0,9141
R_d	-0,95	-1,19	-0,93
LCP	19,74	21,47	20,12
$P_{n\ max}$	8,32	7,84	8,19
$PAR_{\ max}$	400,62	353,39	314,15
ANOVA	a	a	a



5.2.2.1.2 Destruktive Bonituren

Die in Tabelle 5.13 dargestellten Ergebnisse der destruktiven Bonituren zeigen lediglich beim Parameter Höhe signifikante Unterschiede zwischen den Varianten auf. Bei diesem Parameter konnte mit zunehmender Tagestemperatur auch eine Zunahme der Pflanzenhöhe erfasst werden.

Tendenziell zeigen die Daten über viele Boniturparameter, dass die 14/18 °C Variante die geringsten Werte aufwies.

Der zum Versuchsende ermittelte LAI unterschied sich zwischen den Varianten nur gering.

Ergebnisse

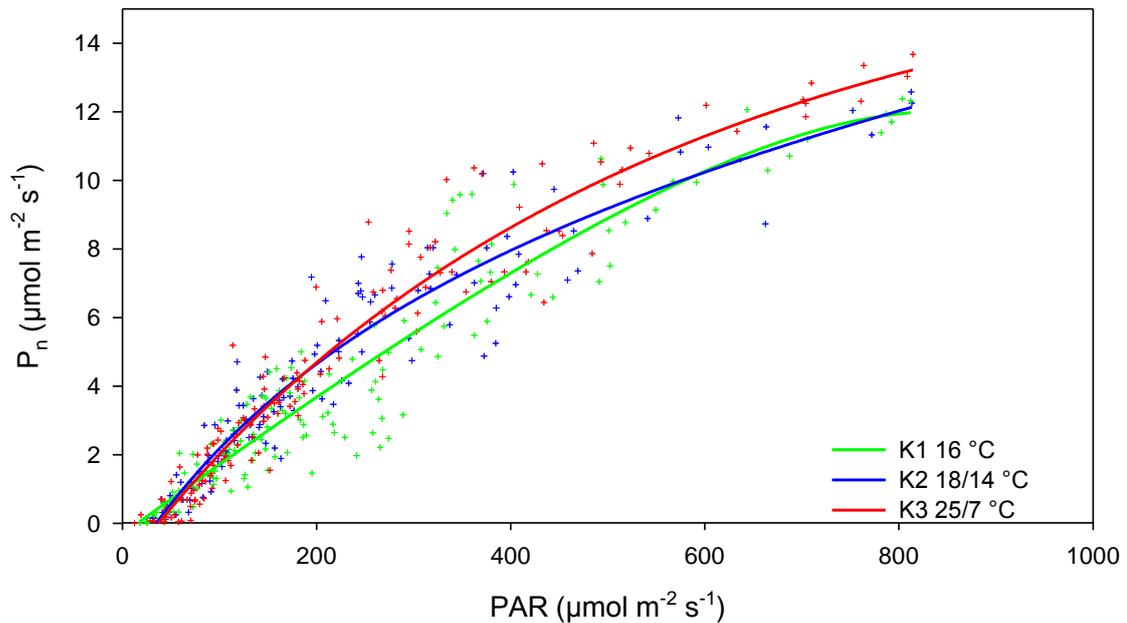
Tab. 5.13: Ergebnisse der destruktiven Bonituren zu den Versuchsvarianten 18/14 °C (K1), 14/18 °C (K2) und 20/10 °C (K3). Dargestellt sind die Mittelwerte mit Standardabweichung sowie der Blattflächenindex (LAI) zu Versuchsbeginn und Versuchsende. Unterschiedliche Buchstaben verdeutlichen signifikante Unterschiede (ANOVA, $\alpha = 0,05$, $n = 16$).

	K1 18/14 °C		K2 14/18 °C		K3 20/10 °C	
Blattfläche (cm²)	1291,04 ±152,02	a	1197,40 ±216,45	a	1170,76 ±193,18	a
Frischmasse (g)	66,55 ±9,18	a	59,44 ±11,69	a	65,87 ±11,06	a
Trockenmasse (g)	5,78 ±0,83	a	5,13 ±1,34	a	5,79 ±1,01	a
Höhe (cm)	20,48 ±2,77	a	18,19 ±2,04	b	22,82 ±3,32	c
Anzahl Blätter (-)	21,29 ±3,38	a	20,21 ±3,36	a	19,64 ±3,88	a
Blüten geöffnet (-)	0 ±0	a	0 ±0	a	0 ±0	a
Blütenansatz (-)	1,71 ±0,61	a	1,57 ±0,76	a	1,57 ±0,65	a
LAI_{Beginn}	0,52		0,52		0,52	
LAI_{Ende}	3,04		2,82		2,76	

5.2.2.2 Temperatur 16/16 °C, 18/14 °C und 25/7 °C (V9)

5.2.2.2.1 Kurvenverlauf

In Abbildung 5.11 sind die P_n - Kurvenverläufe bei den Varianten 16/16 °C, 18/14 °C und 25/7 °C und somit einer Tagesmitteltemperatur von 16 °C dargestellt. Diese Versuchsreihe wurde vom 16.08 – 17.09 durchgeführt und erreichte eine vergleichsweise hohe Einstrahlung. Die maximal gemessene Einstrahlung lag bei ca. $815 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. In diesem Bereich betrug P_n bei der 16/16 °C Variante $11,9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und bei der 18/14 °C Variante $12,2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Im Vergleich dazu lag P_n bei der 25/7 °C Variante bei $13,2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Damit erhöhten sich die Werte um 2,5 % im Vergleich der Variante 16/16 °C mit der Variante 18/14 °C und um 8,2 % im Vergleich der Varianten 18/14 °C und 25/7 °C.

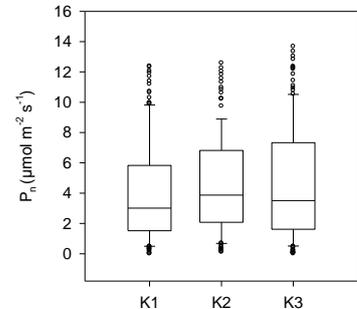


**Abb. 5.11: Modellierter Verlauf von P_n bei gegebener Einstrahlung (PAR) bei 16/16 °C (K1, grün), bei 18/14 °C (K2, blau) und bei 25/7 °C (K3 rot).
CO₂-Konz.: 800 vpm / rF: 75 %
Datengrundlage: Stundenmittelwerte bei einer Einstrahlung > 8 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$**

Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten konnten nicht ermittelt werden. Bei der Betrachtung der in Tabelle 5.14 dargestellten Modellparameter lässt sich ein eindeutiger Trend aufzeigen. Die aus dem Modell berechneten Werte für LCP, $P_{n \max}$ und PAR_{\max} waren jeweils bei der Variante 16/16 °C am geringsten, wohingegen die beiden anderen Varianten nur geringe Unterschiede aufwiesen. Im Vergleich zur 16/16 °C Variante lag der LCP bei der 18/14 °C Variante $19,3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und bei der 25/7 °C Variante $21,4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ hinter dem Licht- Kompensationspunkt der Variante 16/16 °C. Die modellierte maximale Einstrahlung wurde bei der 16/16°C Variante bei einer Einstrahlung von $923,5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ errechnet und erreichte einen Wert für P_n von $10,8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Die jeweiligen Werte für 18/14 °C und 25/7 C lagen für P_n um 10,8 % und 34,1 % und für PAR_{\max} um 44,7 % respektive 58,1 % höher.

Tab. 5.14: Kurvenparameter der modellierten Funktionen bei 16/16 °C (K1), bei 18/14 °C (K2) und bei 25/7 °C (K3) sowie die anhand der Modelle berechneten Nullstellen (LCP), Extremwerte ($P_{n \max}$, PAR_{\max}) und die Respiration (R_d). Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten sind durch unterschiedliche Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA, $\alpha = 0,05$). Die jeweilige Datenverteilung ist als Boxplot veranschaulicht.

	K1 16/16 °C	K2 18/14 °C	K3 25/7 °C
r^2	0,8950	0,9084	0,9421
a	0,0207	0,0454	0,0375
b	0,0008	-0,0003	0,0001
c	-0,0007	0,0029	0,0011
d	0,3223	1,4519	1,3277
R_d	-0,32	-1,58	-1,39
LCP	15,59	34,85	36,98
$P_{n \max}$	10,80	11,97	14,48
PAR_{\max}	923,50	1336,21	1460,09
ANOVA	a	a	a



5.2.2.2 Destruktive Bonituren

Tabelle 5.15 zeigt die Ergebnisse der destruktiven Bonituren. Über sämtliche Boniturparameter konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den Varianten 16/16 °C und 18/14 °C festgestellt werden. Bei der Variante 25/7 °C war der Parameter Blattfläche mit 990,15 cm² ($\pm 192,78$) signifikant kleiner, der Parameter Höhe mit 15,82 ($\pm 2,13$) aber signifikant größer, als bei den Varianten 16/16 °C und 18/18 °C. Beim Parameter Anzahl der geöffneten Blüten wies die Variante 25/7 °C signifikant höhere Werte zur Variante 16/16 °C, nicht jedoch zur Variante 18/14 °C auf. Nur sehr geringe Unterschiede wurden bei dem LAI festgestellt.

Ergebnisse

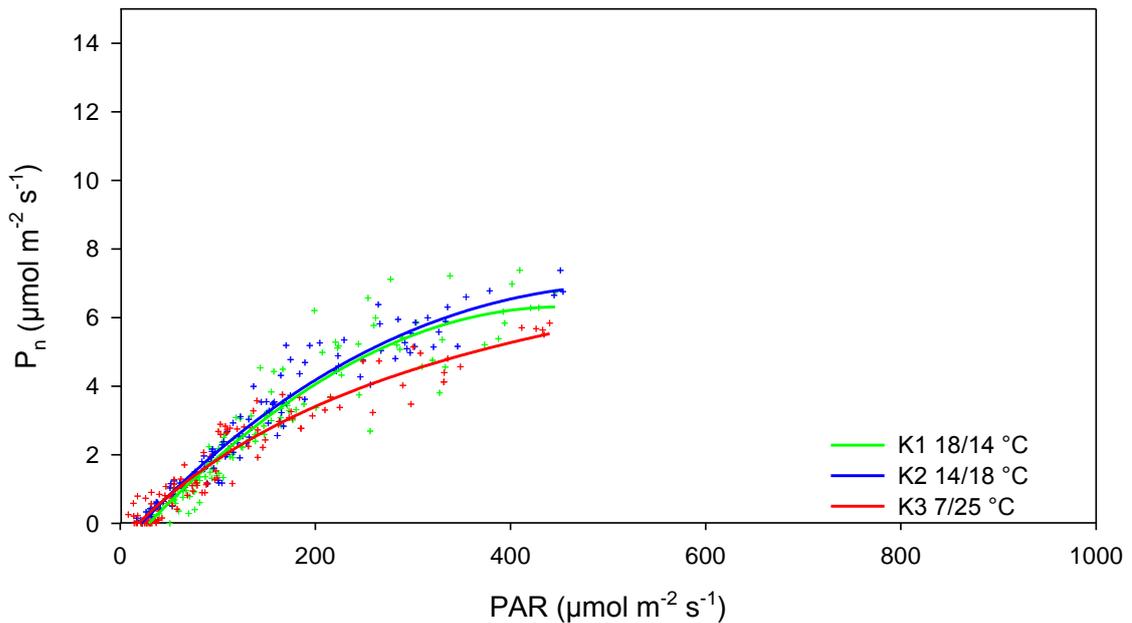
Tab. 5.15: Ergebnisse der destruktiven Bonituren zu den Versuchsvarianten 16/16 °C (K1), 18/14 °C (K2) und 15/7 °C (K3). Dargestellt sind die Mittelwerte mit Standardabweichung sowie der Blattflächenindex (LAI) zu Versuchsbeginn und Versuchsende. Unterschiedliche Buchstaben verdeutlichen signifikante Unterschiede (ANOVA, $\alpha = 0,05$, $n = 16$).

	K1 16/16 °C		K2 18/14 °C		K3 25/7 °C	
Blattfläche (cm ²)	1175,24 ±143,65	a	1138,61 ±202,11	a	990,15 ±192,78	b
Frischmasse (g)	91,41 ±10,74	a	92,67 ±18,90	a	90,98 ±17,01	a
Trockenmasse (g)	9,84 ±1,12	a	9,76 ±1,91	a	9,58 ±1,64	a
Höhe (cm)	13,01 ±1,19	a	13,26 ±1,81	a	15,82 ±2,13	b
Anzahl Blätter (-)	48,56 ±6,53	a	47,75 ±6,57	a	45,75 ±5,64	a
Blüten geöffnet (-)	1,63 ±1,41	a	2,44 ±1,09	ab	2,88 ±0,89	b
Blütenansatz (-)	5,00 ±1,32	a	4,00 ±1,03	a	4,00 ±0,89	a
LAI _{Beginn}	0,47		0,47		0,47	
LAI _{Ende}	2,77		2,69		2,34	

5.2.2.3 Temperatur 18/14 °C, 14/18 °C und 7/25 °C (V10)

5.2.2.3.1 Kurvenvergleich

In Abbildung 5.12 sind die P_n - Kurvenverläufe bei den Temperaturvarianten 18/14 °C (K1), 14/18 °C (K2) und 7/25 °C (K3) dargestellt. Bei diesem im Herbst (24.09 – 24.10) durchgeführten Versuchsssetup betrug die Tagesmitteltemperatur 16 °C. Die maximale gemessene Einstrahlung betrug $440 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Bei diesem Wert war P_n bei der Variante 7/25 °C am geringsten und wies einen Wert von $5,5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ auf. Mit $6,3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bei der 18/14 °C Variante und $6,8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bei der 14/18 °C Variante lagen die Werte um 14,5 % respektive 23,6 % höher. Im Verlauf der Funktionen sind nur geringe Unterschiede zwischen den 18/14 °C und 14/18 °C zu erkennen. Davon abweichend ist der Verlauf der Kurve für die Variante 7/25 °C etwas flacher.

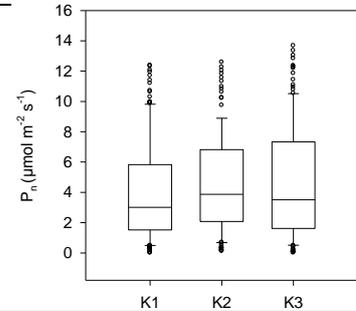


**Abb. 5.12: Modellierter Verlauf von P_n bei gegebener Einstrahlung (PAR) bei 18/14 °C (K1, grün), bei 14/18 °C (K2, blau) und bei 7/25 °C (K3 rot).
CO₂-Konz.: 800 vpm / rF: 75 %
Datengrundlage: Stundenmittelwerte bei einer Einstrahlung > 8 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$**

Die in Tabelle 5.16 dargestellten Kurvenparameter zeigen, dass die Steigungen (a) der modellierten Kurven nahezu identisch sind. Ferner konnte mit zunehmender Nachttemperatur eine Verschiebung des LCP in Richtung früher einsetzendem LCP beobachtet werden. Bei einem Vergleich der Extremwerte der Funktionen waren diese durchmischt. Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten konnten nicht ermittelt werden. Die höchste modellierte P_n wurde bei der Variante 14/18 °C ermittelt und nahm zur 18/14 °C Variante um 12,7% und zur 7/25 °C Variante um 18,6 % ab. Im Gegensatz dazu wurde die Einstrahlung, bei der die höchste P_n modelliert wurde bei der 7/25 °C Variante berechnet und verschob sich mit steigender Tagtemperatur um 39,3 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (6,3 %) und 106,9 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (19 %) in Richtung Achsenursprung.

Tab. 5.16: Kurvenparameter der modellierten Funktionen bei 18/14 °C (K1), bei 14/18 °C (K2) und bei 7/25 °C (K3) sowie die anhand der Modelle berechneten Nullstellen (LCP), Extremwerte ($P_{n \max}$, PAR_{\max}) und die Respiration (R_d). Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten sind durch unterschiedliche Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA, $\alpha = 0,05$). Die jeweilige Datenverteilung ist als Boxplot veranschaulicht.

	K1 18/14 °C	K2 14/18 °C	K3 7/25 °C
r^2	0,9009	0,9438	0,9266
a	0,0318	0,0313	0,0312
b	0,0011	0,0008	$-2,21e^{-5}$
c	$-4,02e^{-6}$	0,0004	0,0029
d	0,9110	0,6605	0,5589
R_d	-0,94	-0,68	-0,59
LCP	29,61	21,66	18,89
$P_{n \max}$	6,32	7,24	5,89
PAR_{\max}	454,96	561,86	601,11
ANOVA	a	a	a



5.2.2.3.2 Destruktive Bonituren

Signifikante Unterschiede zwischen allen Varianten zeigten sich bei den Boniturparametern Blattfläche, Frischmasse, Trockenmasse und Höhe. Mit steigender Tagtemperatur (und sinkender Nachttemperatur) erhöhten sich jeweils die gemessenen Werte. Ein Vergleich der 7/25 °C Variante mit der 14/18 °C Variante zeigt eine Zunahme der Blattfläche um 20,6 %, der Frischmasse um 21,8 %, der Trockenmasse um 25,5 % und der Pflanzenhöhe um 14,2 %. Ein Vergleich der 7/25 °C Variante mit der 18/14 °C Variante zeigt eine Zunahme von 31,5 % bei der Blattfläche, 42,2 % bei der Frischmasse, 43,5 % bei der Trockenmasse und 59,4 % bei der Höhe und lagen damit nochmals höher. Die übrigen Boniturparameter unterscheiden sich nicht signifikant voneinander (Tab. 5.17).

Mit abnehmender Tagtemperatur verringerte sich der LAI von 3,99 um 8,27 % und um 24,1 % jeweils zur 18/14 °C Variante.

Tab. 5.17: Ergebnisse der destruktiven Bonituren zu den Versuchsvarianten 18/14 °C (K1), 14/18 °C (K2) und 7/25 °C (K3). Dargestellt sind die Mittelwerte mit Standardabweichung sowie der Blattflächenindex (LAI) zu Versuchsbeginn und Versuchsende. Unterschiedliche Buchstaben verdeutlichen signifikante Unterschiede (ANOVA, $\alpha = 0,05$, $n = 16$).

	K1 18/14 °C		K2 14/18 °C		K3 7/25 °C	
Blattfläche (cm²)	1691,31 ±231,99	a	1550,58 ±235,18	b	1285,83 ±212,50	c
Frischmasse (g)	106,36 ±14,10	a	91,10 ±16,21	b	74,81 ±11,01	c
Trockenmasse (g)	9,63 ±1,48	a	8,42 ±1,51	b	6,71 ±1,09	c
Höhe (cm)	18,83 ±2,19	a	13,49 ±1,52	b	11,81 ±1,72	c
Anzahl Blätter (-)	39,44 ±4,95	a	38,31 ±5,33	a	38,19 ±6,58	a
Blüten geöffnet (-)	0,31 ±0,60	a	0,13 ±0,34	a	0,06 ±0,25	a
Blütenansatz (-)	3,19 ±0,83	a	3,00 ±0,73	a	3,56 ±0,81	a
LAI_{Beginn}	0,53		0,53		0,53	
LAI_{Ende}	3,99		3,66		3,03	

5.2.2.4 Temperatur 18/18, 30/30 und 10/10 °C (V 11)

5.2.2.4.1 Kurvenvergleich

In Abbildung 5.13 sind die Kurvenverläufe bei einer Tag-, Nachttemperatur von 18 °C (K1), 30 °C (K2) und 10 °C (K3) dargestellt. Diese Versuchsreihe wurde im Winter (06.01 – 06.02) durchgeführt. Es konnte nur eine geringe Einstrahlung in die TPK ermittelt werden. Die dargestellten Kurven offenbaren geringe Unterschiede beim Vergleich der 18/18 °C zur 30/30 °C Variante, und größere Unterschiede hinsichtlich des Verlaufs dieser beiden zur 10/10 °C Variante. Bei den modellierten P_n , bei einer gemessenen maximalen Einstrahlung von ca. $306 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ lagen die Werte für K1 bei $5,3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, für K2 bei $6,4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und für K3 bei $7,0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

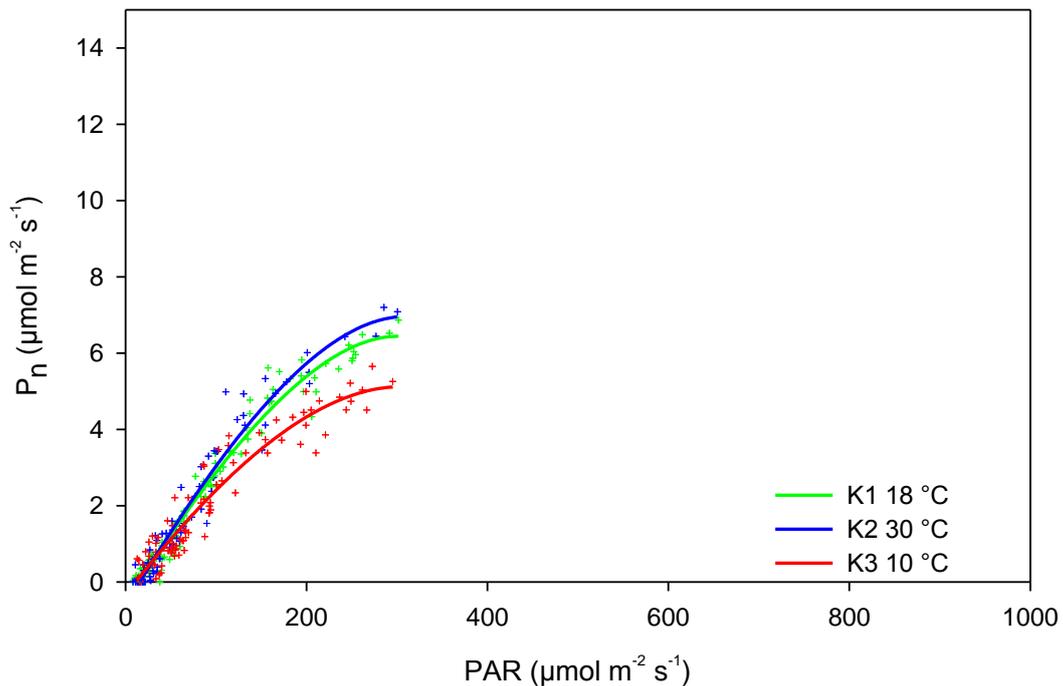
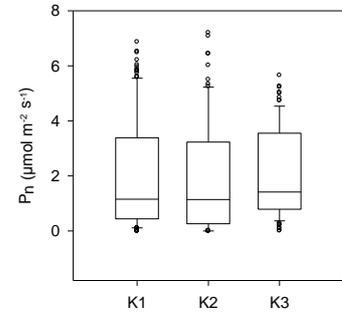


Abb. 5.13: Modellierter Verlauf von P_n bei gegebener Einstrahlung (PAR) bei 18/18 °C (K1, grün), bei 30/30 °C (K2, blau) und bei 10/10 °C (K3 rot). CO_2 -Konz.: 800 vpm / rF: 75 %
 Datengrundlage: Stundenmittelwerte bei einer Einstrahlung $> 8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

Tabelle 5.18 zeigt die Parameter der Funktionen. Untereinander betrachtet konnten keine signifikanten Unterschiede der Varianten zueinander ermittelt werden. Dies wird durch die Ähnlichkeiten der Modellparameter verdeutlicht. Die aus dem Modell berechneten Werte für LCP und $P_{n \max}$ waren bei der 10/10 °C Variante in beiden Fällen am geringsten. Zu den 18/18 °C und 30/30 °C Varianten betragen die Unterschiede beim LCP 34 % und 40,6 % und bei $P_{n \max}$ 34,9 % und 29,4 %. Die Einstrahlung, bei der die höchste P_n berechnet wurde, lag im Vergleich der Varianten sehr dicht beieinander und wurde zunächst bei der 30/30 °C Variante bei $299,3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ erreicht.

Tab. 5.18: Kurvenparameter der modellierten Funktionen bei 18/18 °C (K1), bei 30/30 °C (K2) und bei 10/10 °C (K3) sowie die anhand der Modelle berechneten Nullstellen (LCP), Extremwerte ($P_{n\ max}$, $PAR_{\ max}$) und die Respiration (R_d). Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten sind durch unterschiedliche Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA, $\alpha = 0,05$). Die jeweilige Datenverteilung ist als Boxplot veranschaulicht.

	K1 18/18 °C	K2 30/30 °C	K3 10/10 °C
r^2	0,9763	0,9568	0,9164
a	0,0377	0,0404	0,0308
b	0,0020	0,0020	0,0019
c	-0,0013	-0,0011	-0,0009
d	0,5633	0,6311	0,3431
R_d	-0,57	-0,64	-0,35
LCP	15,10	15,85	11,27
$P_{n\ max}$	6,88	6,60	5,10
$PAR_{\ max}$	314,15	299,25	305,03
ANOVA	a	a	a



5.2.2.4.2 Destruktive Bonituren

Ein Überblick über die Ergebnisse der destruktiven Bonituren ist in Tabelle 5.19 dargestellt. Bei den Boniturparametern Frischmasse und Höhe unterschieden sind alle Varianten signifikant voneinander, bei den Parametern Trockenmasse und Blüten geöffnet gab es über die Varianten keine signifikanten Effekte. Mit Ausnahme der Boniturparameter Trockenmasse, Blüten geöffnet und Blütenansatz waren die Werte bei der 10 °C Variante stets am geringsten ausgeprägt. So waren die Pflanzen hinsichtlich des Boniturparameters Höhe bei der 10/10 °C Variante 35,6 % kleiner als bei der 18/18 °C Variante und 27,7 % kleiner als bei der 18/18 °C Variante. Auch in Bezug auf den Boniturparameter Blattfläche waren die Pflanzen in der 10/10 °C Variante mit 729,70 cm² ($\pm 105,76$) im Mittel sehr gering und insgesamt 35,6 % geringer als bei der 18/18 °C und 27,7 % geringer als bei der 30/30 °C Variante. Damit verlief auch der LAI in der entsprechenden Anordnung und erreichte bei der 10/10 °C Variante einen Wert von nur 1,72.

Ergebnisse

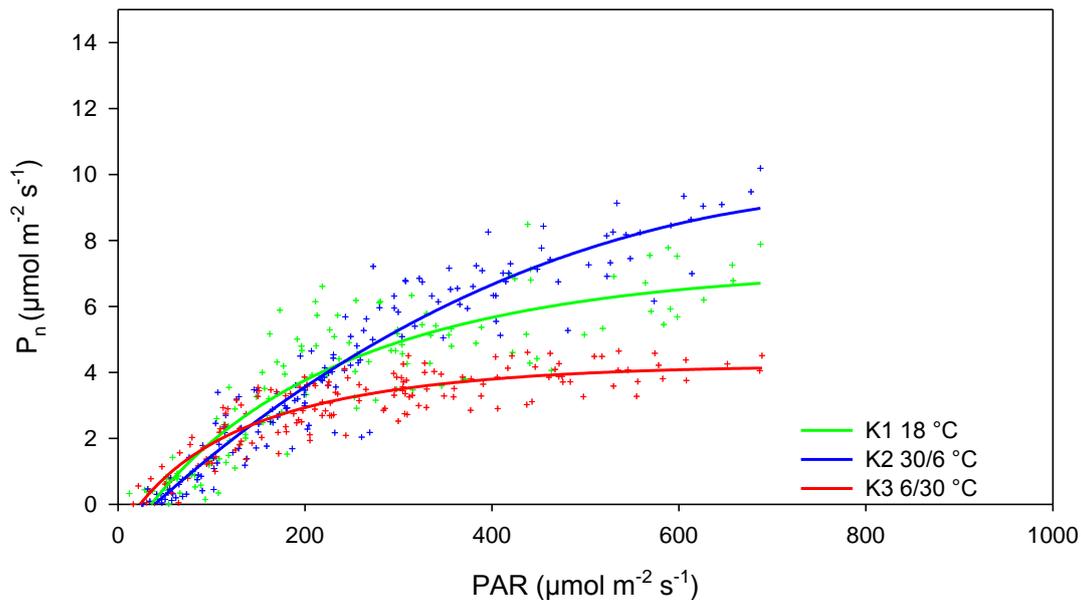
Tab. 5.19: Ergebnisse der destruktiven Bonituren zu den Versuchsvarianten 18/14 °C (K1), 30/30 °C (K2) und 10/10 °C (K3). Dargestellt sind die Mittelwerte mit Standardabweichung sowie der Blattflächenindex (LAI) zu Versuchsbeginn und Versuchsende. Unterschiedliche Buchstaben verdeutlichen signifikante Unterschiede (ANOVA, $\alpha = 0,05$, $n = 16$).

	K1 18/18 °C		K2 30/30 °C		K3 10/10 °C	
Blattfläche (cm²)	1132,24 ±166,13	a	1009,65 ±180,42	a	729,70 ±105,76	b
Frischmasse (g)	56,10 ±8,67	a	48,71 ±8,99	b	39,25 ±6,07	c
Trockenmasse (g)	4,62 ±0,82	a	3,98 ±0,73	a	4,09 ±0,71	a
Höhe (cm)	18,05 ±2,47	a	21,48 ±2,39	b	9,39 ±1,17	c
Anzahl Blätter (-)	22,06 ±4,04	a	22,00 ±3,80	a	17,19 ±4,88	b
Blüten geöffnet (-)	0,00 ±0,00	a	0,25 ±0,45	a	0,19 ±0,40	a
Blütenansatz (-)	2,13 ±0,72	a	0,88 ±0,72	b	1,81 ±0,54	a
LAI_{Beginn}	0,52		0,52		0,52	
LAI_{Ende}	2,67		2,38		1,72	

5.2.2.5 Temperatur 18/18, 30/6 und 6/30 °C (V12)

5.2.2.5.1 Kurvenvergleich

Abbildung 5.14 zeigt die Kurvenverläufe der P_n bei den Varianten 18/18 °C, 30/6 °C und 6/30 °C. Diese Versuchsreihe wurde im Frühjahr durchgeführt (04.03 – 02.04) und es konnte eine vergleichsweise hohe Einstrahlung in die TPK gemessen werden. Das Einstrahlungsmaximum betrug ca. 685 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. In diesem Punkt erreichte P_n in K1 6,7 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, in K2 8,9 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ in K3 3,9 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Bis zu einer Einstrahlung von ca. 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ verlaufen die Kurven nahezu identisch und ändern dann ihren Verlauf. Dabei führte die nächst höher gelegene Tagestemperatur zu einer Steigerung von P_n um jeweils ca. 2 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.



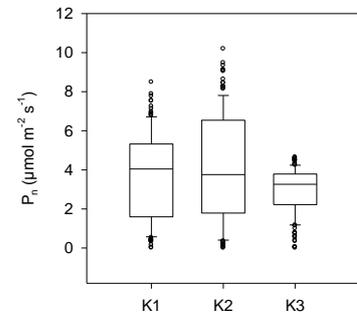
**Abb. 5.14: Modellierter Verlauf von P_n bei gegebener Einstrahlung (PAR) bei 18/18 °C (K1, grün), bei 30/6 °C (K2, blau) und bei 6/30 °C (K3 rot). CO_2 -Konz.: 800 vpm / rF: 75 %
Datengrundlage: Stundenmittelwerte bei einer Einstrahlung $> 8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$**

In Tabelle 5.20 sind die Modellparameter der Versuchsreihe dargestellt. Beim Kurvenvergleich konnten signifikante Unterschiede festgestellt werden. Demnach waren die P_n bei der Variante 6/30 °C signifikant niedriger, als bei den beiden übrigen Varianten, die sich untereinander nicht statistisch nachweisbar unterschieden. Die Verteilung der Daten, die anhand des gezeigten Boxplots erkennbar ist, verdeutlicht diese Unterschiede.

Die modellierten Daten wiesen für $P_{n \max}$ Werte von $3,96 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ für die 6/30 °C Variante, $6,68 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, für die 18/18 °C Variante (+68,7 %) und $9,57 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ für die 30/6 °C Variante (+141,7 % im Vergleich zur 6/30 °C Variante). Die Daten verdeutlichen, dass $P_{n \max}$ bei der 18/18 °C und der 6/30 °C Variante bereits bei der in den TPK gemessenen, maximalen Einstrahlung erreicht wurde. Die modellierten Werte von PAR_{\max} variierten jeweils um etwa $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und lagen bei der 6/30 °C Variante mit $710,1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ am niedrigsten, gefolgt von der 30/6 °C Variante (+24,4 %) und der 18/18 °C Variante (+6,8 % im Vergleich zur 30/6 °C und +32,8 % im Vergleich zur 6/30 °C Variante).

Tab. 5.20: Kurvenparameter der modellierten Funktionen bei 18/18 °C (K1), bei 30/6 °C (K2) und bei 6/30 °C (K3) sowie die anhand der Modelle berechneten Nullstellen (LCP), Extremwerte ($P_{n \max}$, PAR_{\max}) und die Respiration (R_d). Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten sind durch unterschiedliche Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA, $\alpha = 0,05$). Die jeweilige Datenverteilung ist als Boxplot veranschaulicht.

	K1 18/18 °C	K2 30/6 °C	K3 6/30°C
r^2	0,7861	0,9096	0,7803
a	0,0456	0,0272	0,0491
b	0,0002	0,0005	0,0002
c	0,0035	0,0003	0,0071
d	1,4341	1,0350	0,9907
R_d	-1,62	-1,07	-1,16
LCP	35,62	39,27	23,68
$P_{n \max}$	6,68	9,57	3,96
PAR_{\max}	943,19	883,04	710,07
ANOVA	a	a	b



5.2.2.5.2 Destruktive Bonituren

Der Tabelle 5.21 sind die Ergebnisse der destruktiven Bonituren zu entnehmen. Aus ihr geht hervor, dass über alle Boniturparameter bei der Variante 6/30 °C die niedrigsten Boniturwerte ausgewertet wurden und diese, bis auf die Boniturparameter Blüten geöffnet und Blütenansatz, auch stets signifikant niedriger waren, im Vergleich zur 18/18 °C Variante. Bei den Boniturparametern Frisch- und Trockenmasse unterschieden sich sämtliche Boniturwerte signifikant voneinander.

Tab. 5.21: Ergebnisse der destruktiven Bonituren zu den Versuchsvarianten 18/18 °C (K1), 30/6 °C (K2) und 6/30 °C (K3). Dargestellt sind die Mittelwerte mit Standardabweichung sowie der Blattflächenindex (LAI) zu Versuchsbeginn und Versuchsende. Unterschiedliche Buchstaben verdeutlichen signifikante Unterschiede (ANOVA, $\alpha = 0,05$, $n = 16$).

	K1 18/18 °C		K2 30/6 °C		K3 6/30 °C	
Blattfläche (cm ²)	1602,48 ±184,82	a	1236,31 ±146,19	b	1230,97 ±141,90	b
Frischmasse (g)	110,04 ±11,84	a	98,35 ±12,58	b	85,31 ±10,59	c
Trockenmasse (g)	12,56 ±1,41	a	10,39 ±1,42	b	8,62 ±1,19	c
Höhe (cm)	18,98 ±2,10	a	19,53 ±2,80	a	10,48 ±1,20	b
Anzahl Blätter (-)	38,25 ±3,54	a	37,44 ±4,20	a	43,13 ±7,19	b
Blüten geöffnet (-)	1,06 ±0,75	a	1,06 ±0,66	a	0,88 ±0,70	a
Blütenansatz (-)	4,063 ±0,75	a	3,94 ±0,83	a	3,75 ±0,66	a
LAI _{Beginn}	0,54		0,54		0,54	
LAI _{Ende}	3,78		2,92		2,91	

5.2.3 Einflussgröße Schattierung (PAR)

In geschlossenen und semi- geschlossenen Gewächshäusern ist ein erhöhter konstruktiver Aufwand notwendig, insbesondere im Dachbereich. Dadurch verringert sich die Lichttransmission und damit letztlich die auf Bestandesebene auftreffende Einstrahlung zum Teil merklich.

Die Untersuchungen in dem folgenden Abschnitt zielten demnach auf die Reaktionen der Pflanzen auf diese geminderten Einstrahlungswerte und ermittelten inwieweit eine Kompensation der geringeren Einstrahlung durch eine CO₂- Düngung erfolgen konnte. Um diese Fragen zu beantworten wurden zum einen Schattiergewebe mit unterschiedlichen Schattiereigenschaften (50 % und 65 % Schattierwirkung) verwendet sowie unterschiedliche CO₂- Konzentrationen in der jeweiligen Lichtsituation eingestellt.

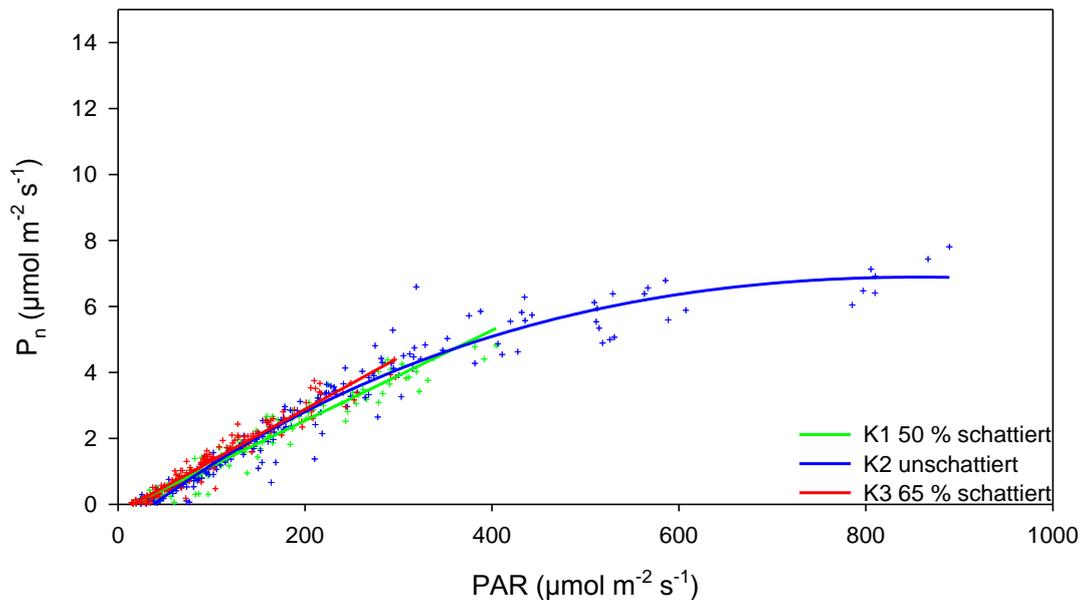
Als Besonderheit bei der Auswertung dieser Versuchsreihe musste bei den schattierten Varianten ein linearer Zusammenhang ($f[x] = ax + b$) zwischen P_n und der Einstrahlung angenommen werde, da die verwendete Hyperbel-

Funktion zur Ermittlung der P_n in diesen Fällen keine plausiblen Werte lieferte. Anhand der beobachteten Datenverteilung konnte nur ein linearer Anstieg ohne Abklingen erfasst und dementsprechend keine Hyperbelfunktion angepasst werden. Ein statistischer Vergleich dieser Versuche untereinander war nur eingeschränkt möglich und beschränkte sich daher auf die deskriptive Statistik.

5.2.3.1 Lichtminderung durch Schattierung (50 % schattiert, ungeschattiert und 65 % schattiert) bei je 400 vpm CO₂ (V6)

5.2.3.1.1 Kurvenvergleich

Die Kurvenverläufe der Versuchsvarianten 65 % schattiert, 50 % schattiert und ungeschattiert sind in Abbildung 5.15 dargestellt. Die Versuchsreihe wurde im Frühsommer (08.05 – 05.06) durchgeführt und erreichte in der ungeschattierten TPK ein Einstrahlungsmaximum von ca. $898 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Es zeigte sich, dass die Einstrahlung durch das verwendete Gewebe mitunter deutlich reduziert wurde. Ein visueller Vergleich der Kurven lässt erkennen, dass im Bereich der gegebenen Einstrahlung auch P_n identisch verlief und einen ähnlichen Wert erreichte. Bei einer Einstrahlung von ca. $295 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, dem Maximum der 65 % schattierten Variante (K3), wurden in K1 Werte von $3,84 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, in K2 $3,95 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und in K3 $4,15 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ gemessen. Bei einer Einstrahlung von ca. $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, dem Maximum der 50 % schattierten Variante, erreichte das Modell bei dieser Variante einen P_n - Wert von $5,27 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Mit $5,11 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ erreichte K2 in diesem Punkt einen ähnlichen Wert.



**Abb. 5.15: Modellierter Verlauf von P_n und Einstrahlung (PAR) bei 50 % schattiert (K1, grün), ungeschattiert (K2, blau) und bei 65% schattiert (K3, rot). CO_2 -Konzentration: 400 vpm / Temp.: 18/14 °C / rF: 75 %
Datengrundlage: Stundenmittelwerte bei einer Einstrahlung $> 8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$**

Die Kurvenparameter der Funktionen sind der Tabelle 5.22 zu entnehmen. Hierbei gilt zu beachten, dass die Daten von K1 und K3 mit einer linearen Funktion angepasst wurden und daher nur die Parameter a (Steigung) und b (Achsenabschnitt) gegeben waren.

Eine statistische Auswertung der Daten für den Bereich der gleichen Einstrahlung in sämtlichen Küvetten, also dem maximalen Einstrahlungsbereich von K3, förderte keine signifikanten Unterschiede zu Tage.

Anhand der gezeigten Daten konnte eine deutliche Verschiebung der LCP Werte beobachtet werden. Lag der Wert bei der ungeschattierten Variante mit $38,03 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ am höchsten, nahm er mit der Schattierung um 64,6 % zur 50 % schattierten und um 58,3 % zur 65 % schattierten Variante ab.

Tab. 5.22: Kurvenparameter der modellierten Funktionen bei 50 % schattiert (K1), ungeschattiert (K2) und bei 65 % schattiert (K3) sowie die anhand der Modelle berechneten Nullstellen (LCP), Extremwerte ($P_{n \max}$, PAR_{\max}) und die Respiration (R_d). CO₂-Konzentration 400 vpm.

	K1 50 % schattiert	K2 ungeschattiert	K3 65 % schattiert
r^2	0,9456	0,9417	0,9485
a	0,0137	0,0221	0,0156
b	-0,2004	0,0005	-0,2472
c	--	0,0005	--
d	--	0,8091	--
R_d	-0,20	-0,84	-0,25
LCP	14,62	38,03	15,85
$P_{n \max}$	--	6,77	--
PAR_{\max}	--	828,43	--
ANOVA	a	a	a

5.2.3.1.2 Destruktive Bonituren

Mit Ausnahme des Boniturparameters Blattfläche, bei dem keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten nachgewiesen werden konnten, waren bei den weiteren Parametern stets signifikante Unterschiede beim Vergleich zumindest einiger Küvetten untereinander vorhanden. Damit war in dieser Versuchsanstellung der Trend zu erkennen, dass die Parameter Frischmasse, Trockenmasse und Höhe bei der ungeschattierten Variante stets die geringsten Werte aufwiesen, die im Vergleich der ungeschattierten mit den schattierten Varianten auch immer signifikant waren. Ein umgekehrtes Bild zeigte sich bei dem Vergleich der übrigen Boniturparameter, ebenfalls der ungeschattierten mit den schattierten Varianten. Hier waren die Werte der ungeschattierten Variante stets signifikant höher. Dem Messwert für die Blattfläche folgend, konnte bei einem Vergleich der LAI die geringste Ausprägung in der ungeschattierten Variante beobachtet werden. Die Zunahme zur 50 % schattierten betrug 7,54 % und zur 65 % schattierten 1,3 %.

Tab. 5.23: Ergebnisse der destruktiven Bonituren zu den Versuchsvarianten 50 % schattiert (K1), ungeschattiert (K2) und 65 % schattiert (K3). Dargestellt sind die Mittelwerte mit Standardabweichung sowie der Blattflächenindex (LAI) zu Versuchsbeginn und Versuchsende. Unterschiedliche Buchstaben verdeutlichen signifikante Unterschiede (ANOVA, $\alpha = 0,05$, $n = 16$).

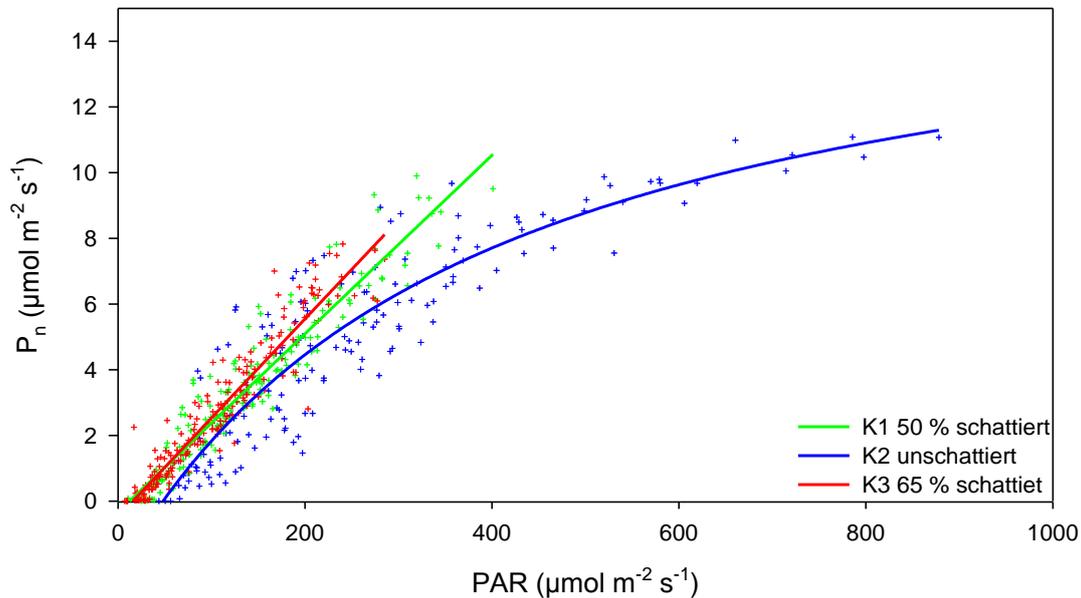
	K1		K2		K3	
	50 % schattiert		ungeschattiert		65 % schattiert	
Blattfläche	2176,23	a	1994,76	a	2044,51	a
(cm²)	±181,23		±229,53		±233,36	
Frischmasse	170,82	a	136,89	b	149,33	b
(g)	±15,73		±16,71		±18,51	
Trockenmasse	16,23	a	12,37	b	13,99	c
(g)	±1,87		±1,48		±1,90	
Höhe	21,12	a	18,29	b	21,26	ac
(cm)	±1,42		±2,24		±2,13	
Anzahl Blätter	63,15	a	78,23	b	61,77	ac
(-)	±6,19		±11,10		±6,86	
Blüten geöffnet	0,62	a	1,77	b	0,69	ac
(-)	±0,62		±0,70		±0,82	
Blütenansatz	4,77	a	6,54	b	5,85	ab
(-)	±1,76		±1,65		±1,29	
LAI_{Beginn}	1,38		1,38		1,38	
LAI_{Ende}	5,13		4,71		4,83	

5.2.3.2 Lichtminderung durch Schattierung (50 % schattiert, ungeschattiert und 65 % schattiert) bei je 800 vpm CO₂ (V7)

5.2.3.2.1 Kurvenvergleich

Bei diesen Varianten blieb die Schattierung der Küvetten bestehen, jedoch wurde die CO₂-Konzentration in allen Küvetten auf 800 vpm verdoppelt. Diese Versuchsreihe wurde im Sommer durchgeführt (12.06 – 12.07). Auch hier musste ein linearer Anstieg der Funktionen für die beiden schattierten Varianten angenommen werden. Die in Abbildung 5.16 dargestellten Kurvenverläufe zeigen, dass die modellierten Verläufe von K1 (50 % schattiert) und K3 (65 % schattiert) über den gesamten Verlaufsbereich oberhalb der Kurve von K2 (ungeschattiert) verlaufen. Bei einer Einstrahlung von ca. 280 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, dem Maximum der 65 % schattierten Variante lag P_n bei 7,28 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (K1), bei 6,01 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (K2) und bei 8,04 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (K3). Das Einstrahlungsmaximum der Variante K3 lag bei ca. 400 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und erreichte dabei eine maximale P_n von 10,5 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. In diesem Bereich erreichte P_n bei K2 7,7 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und lag damit im modellierten Verlauf

deutlich geringer. Das Einstrahlungsmaximum der ungeschattierten Variante erreichte bei $778 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ das Einstrahlungsmaximum und eine dazugehörige maximale P_n von $11,3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.



**Abb. 5.16: Modellierter Verlauf von P_n und Einstrahlung (PAR) bei 50 % schattiert (K1, grün), ungeschattiert (K2, blau) und bei 65% schattiert (K3, rot).
 CO_2 - Konzentration: 800 vpm / Temp.: 18/14 °C / rF: 75 %
 Datengrundlage: Stundenmittelwerte bei einer Einstrahlung $> 8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$**

In Tabelle 5.24 sind die zu den Kurvenverläufen gehörigen Parameter dargestellt. Ein Vergleich der Varianten K1 und K3 verdeutlicht die identischen Verläufe der linearen Funktionen. Sowohl die Steigungen als auch die Achsenabschnitte (Schnittpunkt mit der Y- Achse) unterschieden sich nur gering voneinander. Der anhand der Modelle ermittelte LCP war für die ungeschattierte Variante am höchsten und nahm zur 50 % schattierten Variante um 31,8 % und zur 65 % schattierten Variante um 24,8 % ab. Die ermittelte maximale P_n wurde auf $18,42 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, bei einer Einstrahlung von $1545,08 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ modelliert.

Für den gemeinsamen Einstrahlungsbereich (maximaler Einstrahlungsbereich von K3) wurde eine statistische Auswertung durchgeführt, mit dem Ergebnis, dass keine signifikanten Unterschiede zwischen den drei Varianten ermittelt werden konnten.

Ergebnisse

Tab. 5.24: Kurvenparameter der modellierten Funktionen bei 50 % schattiert (K1), ungeschattiert (K2) und bei 65 % schattiert (K3) sowie die anhand der Modelle berechneten Nullstellen (LCP), Extremwerte ($P_{n \max}$, PAR_{\max}) und die Respiration (R_d). CO_2 -Konzentration 800 vpm.

	K1 50 % schattiert	K2 ungeschattiert	K3 65 % schattiert
r^2	0,9341	0,9525	0,9150
a	0,0282	0,0403	0,0303
b	-0,4002	0,0002	-0,4742
c	--	0,0008	--
d	--	0,8220	--
R_d	-0,40	-0,84	-0,47
LCP	14,19	20,82	15,65
$P_{n \max}$	--	18,42	--
PAR_{\max}	--	1545,08	--
ANOVA	a	a	a

5.2.3.2.2 Destruktive Bonituren

Insgesamt betrachtet lagen die Boniturdaten der ungeschattierten im Vergleich zu den schattierten Varianten bei den Parametern Blattfläche, Frischmasse, Trockenmasse und Höhe jeweils höher, bei den Boniturparametern Blattanzahl, Blüten geöffnet und Blütenansätze jeweils niedriger als bei den schattierten Varianten. Eine detaillierte Verteilung der Signifikanzen zwischen den Varianten ist der Tabelle 5.25 zu entnehmen. Mit einem LAI_{Beginn} von 1,05 waren die Pflanzen zum Versuchsbeginn etwas weiter entwickelt als bei anderen Versuchen.

Tab. 5.25: Ergebnisse der destruktiven Bonituren zu den Versuchsvarianten 50 % schattiert (K1), ungeschattiert (K2) und 65 % schattiert (K3). Dargestellt sind die Mittelwerte mit Standardabweichung sowie der Blattflächenindex (LAI) zu Versuchsbeginn und Versuchsende. Unterschiedliche Buchstaben verdeutlichen signifikante Unterschiede (ANOVA, $\alpha = 0,05$, $n = 16$).

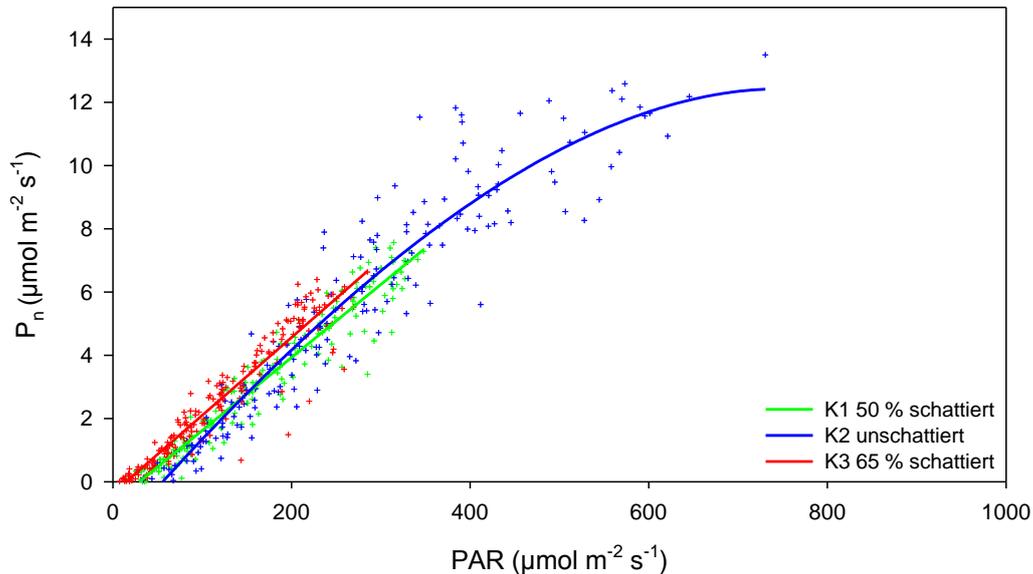
	K1		K2		K3	
	50 % schattiert		ungeschattiert		65 % schattiert	
Blattfläche (cm²)	1318,01	a	1126,15	b	1246,60	ab
	±126,15		±182,77		±155,88	
Frischmasse (g)	101,75	a	74,18	b	98,12	ac
	±8,40		±11,74		±10,51	
Trockenmasse (g)	9,64	a	7,06	b	9,23	ac
	±1,40		±1,19		±1,00	
Höhe (cm)	13,91	a	11,93	b	12,13	bc
	±1,06		±1,13		±0,86	
Anzahl Blätter (-)	47,69	a	58,06	b	40,13	c
	±6,90		±7,34		±5,73	
Blüten geöffnet (-)	0,69	a	1,25	a	0,56	a
	±0,70		±0,86		±0,73	
Blütenansatz (-)	3,38	a	4,56	b	3,44	a
	±0,72		±1,15		±0,51	
LAI _{Beginn}	1,05		1,05		1,05	
LAI _{Ende}	3,07		2,66		2,94	

5.2.3.3 Lichtminderung durch Schattierung (50 % schattiert, ungeschattiert und 65 % schattiert) bei je 1200 vpm CO₂ (V8)

5.2.3.3.1 Kurvenvergleich

Eine weitere Steigerung der CO₂-Konzentration auf 1200 vpm führte zu den Kurvenverläufen, die in Abbildung 5.17 dargestellt sind. Diese Versuchsreihe wurde im Sommer durchgeführt (08.07 – 11.08) und wies dadurch relativ hohe Einstrahlungswerte auf. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass sich die modellierten Funktionen im Bereich des jeweiligen Einstrahlungsbereichs nur sehr gering voneinander unterschieden. Bei der in K3 (65 % schattiert) gemessenen maximalen Einstrahlung von 285 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ erreichte diese einen Wert von 6,7 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Im selben Einstrahlungsbereich lag P_n bei K2 (ungeschattiert) bei 6,6 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und K1 (50 % schattiert) bei 6,1 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Damit betrug die prozentuale Steigerung von P_n im Vergleich K1 zu K2 8,2 % und im Vergleich K2 zu K3 1,5 % und war damit in diesem Punkt sehr gering. Die maximale Einstrahlung in der 50 % schattierten Variante lag bei ca. 345 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und erreichte dort eine P_n von 7,3 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Der Wert in K2

erreichte an dieser Steile $7,6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und war mit 4,1 % auch nur geringfügig höher. Die maximale Einstrahlung wurde in der ungeschattierten Variante bei $730 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ gemessen und erreichte eine P_n von $12,4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.



**Abb. 5.17: Modellierter Verlauf von P_n und Einstrahlung (PAR) bei 50 % schattiert (K1, grün), ungeschattiert (K2, blau) und bei 65 % schattiert (K3, rot). CO_2 -Konzentration: 1200 vpm / Temp.: 18/14 °C / rF: 75 %
Datengrundlage: Stundenmittelwerte bei einer Einstrahlung $> 8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$**

Die zu den modellierten Kurvenverläufen gehörigen Parameter sind der Tabelle 5.26 zu entnehmen. Eine statistische Untersuchung für den gemeinsamen Einstrahlungsbereich lieferte keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten. Durch die Annahme einer linearen Funktion für die schattierten Varianten, konnten auch keine Extremwerte des Modells ermittelt werden. Der LCP lag bei den schattierten Varianten jeweils niedriger, unterschied sich aber nur geringfügig. Von der ungeschattierten Variante aus betrachtet, lag der LCP bei der 50 % schattierten $34 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (-60,9 %) und bei der 65 % schattierten Variante 41 % (-73,3 %) vor dem der ungeschattierten Variante.

Ergebnisse

Tab. 5.26: Kurvenparameter der modellierten Funktionen bei 50 % schattiert (K1), ungeschattiert (K2) und bei 65 % schattiert (K3) sowie die anhand der Modelle berechneten Nullstellen (LCP), Extremwerte ($P_{n \max}$, PAR_{\max}) und die Respiration (R_d). CO_2 -Konzentration 1200 vpm.

	K1 50 % schattiert	K2 ungeschattiert	K3 65 % schattiert
r^2	0,9357	0,9022	0,9077
a	0,0231	0,0325	0,0247
b	-0,6898	0,0008	-0,3678
c		-0,0004	
d		1,7743	
R_d	-0,50	-1,81	-0,37
LCP	21,86	55,87	14,89
$P_{n \max}$		12,17	
PAR_{\max}		732,23	
ANOVA	a	a	a

5.2.3.3.2 Destruktive Bonituren

Die Ergebnisse der destruktiven Bonituren sind in Tabelle 5.27 dargestellt. Mit Blick auf die Daten lässt sich erkennen, dass sich bei den Boniturparametern Blattfläche, Frischmasse, Trockenmasse und Höhe jeweils niedrigere Werte bei der ungeschattierten Variante (K2), im Vergleich zur 50 % schattierten Variante (K1) und zur 65 % schattierten Variante (K3) beobachten ließ. Diese Werte waren jeweils signifikant geringer bei der Variante in K2. Bei den übrigen Boniturparametern zeigte sich ein umgekehrtes Bild und die Werte bei K2 waren jeweils höher als in den übrigen beiden Küvetten. Signifikante Unterschiede konnten beim Vergleich der Boniturparameter Blattanzahl und Anzahl der geöffneten Blüten beim Vergleich von K2 und K3 festgestellt werden, wobei die Werte der ungeschattierten Variante höher lagen.

Tab. 5.27: Ergebnisse der destruktiven Bonituren zu den Versuchsvarianten 50 % schattiert (K1), ungeschattiert (K2) und 65 % schattiert (K3). Dargestellt sind die Mittelwerte mit Standardabweichung sowie der Blattflächenindex (LAI) zu Versuchsbeginn und Versuchsende. Unterschiedliche Buchstaben verdeutlichen signifikante Unterschiede (ANOVA, $\alpha = 0,05$, $n = 16$).

	K1		K2		K3	
	50 % schattiert		ungeschattiert		65 % schattiert	
Blattfläche (cm²)	1293,01	a	967,52	b	1210,90	a
	±91,34		±118,88		±230,98	
Frischmasse (g)	137,94	a	106,43	b	130,40	a
	±18,19		±10,59		±13,16	
Trockenmasse (g)	12,16	a	10,11	b	12,51	a
	±1,06		±1,37		±1,19	
Höhe (cm)	19,69	a	14,36	b	17,82	c
	±2,20		±1,95		±3,19	
Anzahl Blätter (-)	58,69	a	64,44	a	54,00	b
	±5,71		±10,62		±9,12	
Blüten geöffnet (-)	4,06	a	4,56	a	2,69	b
	±1,24		±1,46		±1,19	
Blütenansatz (-)	4,31	a	4,88	a	4,69	a
	±1,20		±1,50		±1,14	
LAI_{Beginn}	0,62		0,62		0,62	
LAI_{Ende}	3,05		2,28		2,85	

5.2.4 Einflussgröße Luftfeuchte

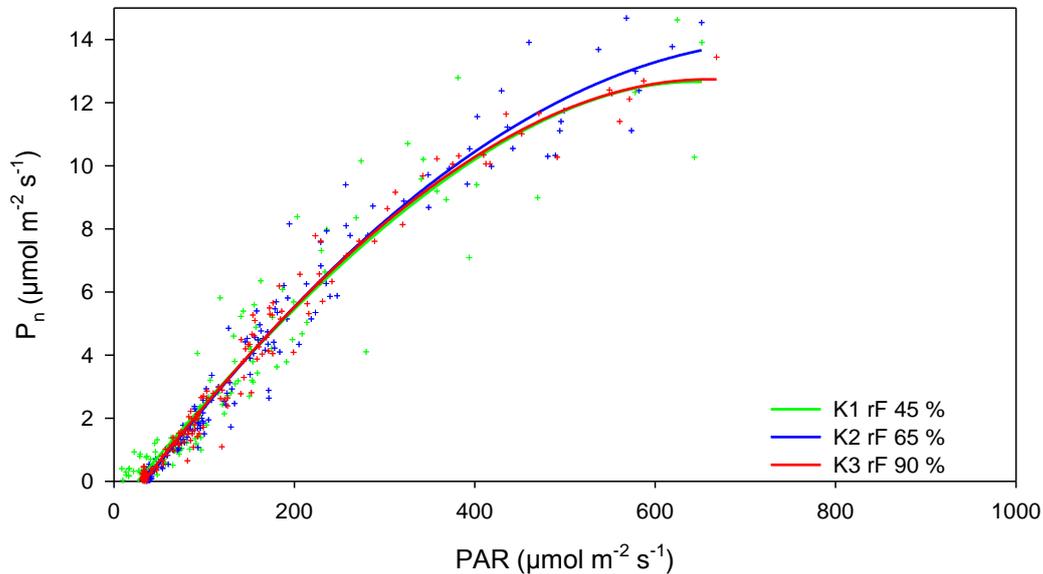
In geschlossenen und semi-geschlossenen Gewächshäusern ist durch die Betriebsweise und die verwendeten Materialien in der Umhausung mit einer erhöhten relativen Luftfeuchtigkeit zu rechnen. Dies wiederum kann Auswirkungen auf die Kultur haben. Im Folgenden werden Untersuchungen zu den Reaktionen der Pflanzen auf eine erhöhte relative Luftfeuchte beschrieben.

5.2.4.1 Relative Luftfeuchte 45, 65 und 90 % (V4)

5.2.4.1.1 Kurvenvergleich

Die Abbildung 5.18 zeigt die P_n Kurvenverläufe bei relativen Luftfeuchten von 45 %, 65 % und 90 %. Über nahezu den gesamten Einstrahlungsbereich verliefen die Kurven deckungsgleich. Erst bei ca. $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ veränderte sich die Kurve des modellierten Verlaufs der 65 % rF Variante (K2) und erreichte bei einer Einstrahlung von $650 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ einen Wert von $13,7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Die verbleibenden Varianten unterschieden sich in diesem Punkt mit

12,6 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (K1) und 12,8 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (K3) nur sehr gering. Prozentual betrachtet lag P_n in diesem Punkt bei K1 8,0 % und bei K3 6,6 % unter dem Wert der 45 % rF Variante.

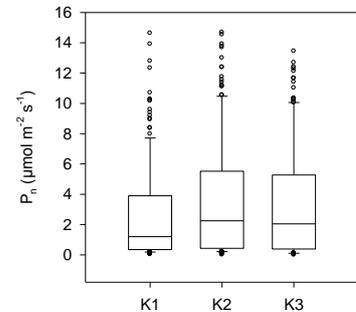


**Abb. 5.18: Modellierter Verlauf von P_n und Einstrahlung (PAR) bei 45 % rF (K1, grün), bei 65 % rF (K2, blau) und bei 90 % rF (K3 rot).
CO₂-Konzentration: 800 vpm / Temp.: 18/14 °C
Datengrundlage: Stundenmittelwerte bei einer Einstrahlung > 8 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$**

Ein Vergleich der Parameter der Kurven (Tab. 5.28) zeigt die identischen Verläufe der Kurven anhand der geringen Unterschiede. Statistisch betrachtet unterschied sich P_n über den Versuch betrachtet zwischen den Varianten, nicht signifikant. Die mithilfe der Modelle berechneten Werte für $P_{n \max}$ wiesen nur geringe Unterschiede auf. Die zugehörigen Einstrahlungen variierten indes mehr. Bei der 45 % rF Variante wurde $P_{n \max}$ als erstes erreicht, gefolgt von der 90 % rF Variante (+4,7 % mehr Strahlung erforderlich) und letztlich bei der 65 % rF Variante (+6,2 % mehr Strahlung erforderlich, im Vergleich zur 90 % rF Variante). Die 45 % rF Variante erreichte den LCP als erste bei 26,17 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Die LCP der beiden übrigen Varianten unterschieden sich nur gering.

Tab. 5.28: Kurvenparameter der modellierten Funktionen bei 45 % rF(K1), bei 65 % rF (K2) und bei 90 % rF (K3) sowie die anhand der Modelle berechneten Nullstellen (LCP), ($P_{n \max}$, PAR_{\max}) und die Respiration (R_d). Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten sind durch unterschiedliche Buchstaben gekennzeichnet (ANOVA, $\alpha = 0,05$). Die jeweilige Datenverteilung ist als Boxplot veranschaulicht.

	K1 rF 45 %	K2 rF 65 %	K3 rF 90 %
r^2	0,9184	0,9681	0,9802
a	0,0350	0,0390	0,0381
b	0,0009	0,0007	0,0008
c	-0,0005	-9,93e ⁻⁵	-0,0003
d	0,9062	1,3415	1,2205
R_d	-0,92	-1,37	-1,24
LCP	26,17	35,14	32,57
$P_{n \max}$	13,09	13,67	13,63
PAR_{\max}	666,67	741,59	698,10
ANOVA	a	a	a



5.2.4.1.2 Destruktive Bonituren

In Tabelle 5.29 sind die Ergebnisse der destruktiven Bonituren aufgelistet. Ein eindeutiger, aus der Tabelle hervorgehender Trend war die Erhöhung sämtlicher Boniturwerte mit einer einhergehenden Erhöhung der relativen Luftfeuchte. Eine Erhöhung der relativen Luftfeuchtigkeit von 65 % auf 90 % führte zu signifikant höheren Werten bei den Boniturfaktoren Blattfläche, Frischmasse, Höhe und Anzahl der Blätter. Beim Vergleich der Boniturparameter von K1 und K2 zeigten sich über sämtliche erhobenen Daten keine signifikanten Unterschiede.

Diesem Trend der Steigerung der Werte mit zunehmender relativer Luftfeuchte folgte auch die Entwicklung des LAI und stieg um 5,3 % respektive 3,5 % im Vergleich zur jeweils nächsten Variante mit höherer relativer Luftfeuchte.

Tab. 5.29: Ergebnisse der destruktiven Bonituren zu den Versuchsvarianten 45 % rF (K1), 65 % rF (K2) und 95 % rF (K3). Dargestellt sind die Mittelwerte mit Standardabweichung sowie der Blattflächenindex (LAI) zu Versuchsbeginn und Versuchsende. Unterschiedliche Buchstaben verdeutlichen signifikante Unterschiede (ANOVA, $\alpha = 0,05$, $n = 16$).

	K1 rF 45 %		K2 rF 65 %		K3 rF 90 %	
Blattfläche (cm ²)	1368,59 ±128,31	a	1440,42 ±171,99	a	1612,27 ±166,06	b
Frischmasse (g)	83,01 ±9,18	a	88,67 ±11,66	a	103,41 ±16,59	b
Trockenmasse (g)	8,92 ±1,45	a	9,05 ±1,48	a	10,13 ±2,13	a
Höhe (cm)	18,03 ±2,46	a	17,65 ±1,57	a	20,50 ±2,84	b
Anzahl Blätter (-)	27,75 ±3,57	a	27,94 ±3,68	a	33,81 ±4,12	b
Blüten geöffnet (-)	0,13 ±0,34	a	0,56 ±0,51	ab	0,69 ±0,48	b
Blütenansatz (-)	2,88 ±0,62	a	2,69 ±0,70	a	2,88 ±0,81	a
LAI _{Beginn}	0,52		0,52		0,52	
LAI _{Ende}	3,23		3,40		3,81	

5.3 Untersuchungen zum Einfluss der Faktoren Temperatur, CO₂- Konzentration, PAR- Strahlung und Blattfläche auf die Respiration und die Transpiration (Kondensatmenge)

5.3.1 Respiration

Im Folgenden werden die Untersuchungen zum Einfluss der Klimafaktoren Einstrahlung (PAR), Blattfläche, Temperatur und CO₂ Konzentration auf die Respirationsrate der Pflanzen dargestellt. Da die Respiration eine Abgabe von CO₂ darstellt und damit ein negatives Vorzeichen aufweist, wurden bei der Darstellung ebenfalls ins Negative ragende Säulen gewählt. In den textlichen Beschreibungen wird eine Erhöhung der Respirationsrate mit einer höheren CO₂- Abgabe gleichgesetzt und meint damit negativer werdende Werte.

5.3.1.1 Einstrahlung

Bei der Untersuchung des Einflusses der Einstrahlung auf die Respiration (Abb. 5.19) konnte gezeigt werden, dass die Einstrahlung einen signifikanten Effekt auf die Respiration ausübte. Demnach unterschieden sich die Varianten ungeschattiert, 50 % und 65 % schattiert jeweils signifikant voneinander dahingehend, dass mit zunehmender Schattierwirkung die Respirationsrate sank. Die Mittelwerte samt Standardabweichung je Versuch erreichten Werte von $-1,96 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($\pm 0,65$) für die ungeschattierte Variante, $-1,03 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($\pm 0,34$) für die 50 % schattierte Variante und $-0,54 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($\pm 0,27$) für die 65 % schattierte Variante. Das entsprach einer prozentualen Abnahme von 47,4 % im Vergleich ungeschattiert zu 50 % schattiert und 72,4 % im Vergleich ungeschattiert zu 65 % schattiert. Im Vergleich der schattierten Varianten untereinander wurde durch eine zusätzliche Schattierwirkung von 15 % eine weitere Abnahme der Respirationsrate von 47,6 % ermittelt.

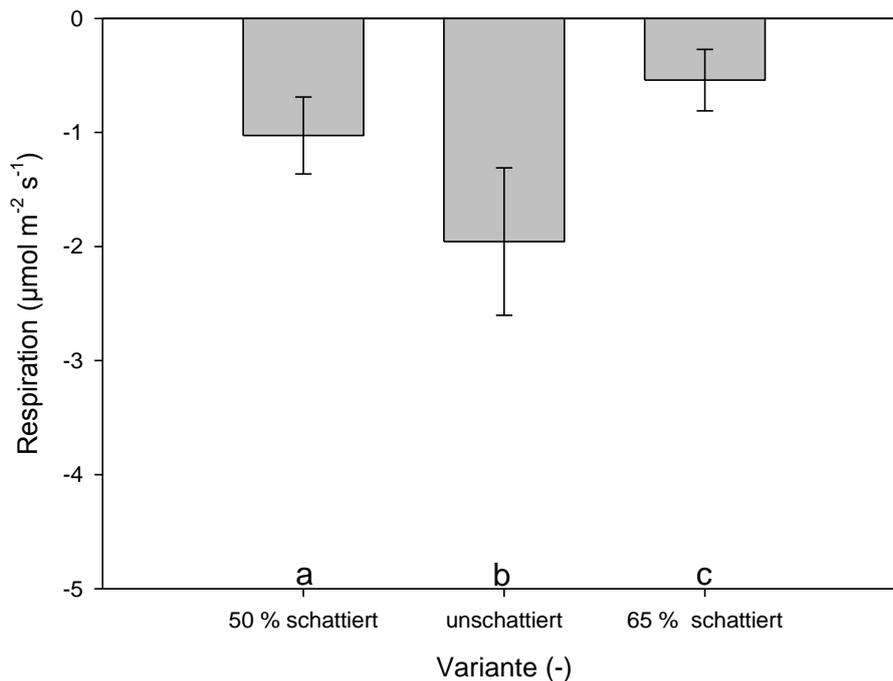


Abb. 5.19: Respiration in Abhängigkeit der Einstrahlung (50 % schattiert, ungeschattiert und 65 % schattiert).
Temp.: 18/14 °C, CO₂- Konz.: 800 vpm / rF: 75 %
ANOVA Signifikanzlevel $\alpha = 0,05$, Daten aus Versuch 7

5.3.1.2 Blattfläche

Der Einfluss der Blattfläche auf die Respiration wurde anhand einer Korrelationsanalyse (Pearson Correlation, $P = < 0,05$) ermittelt. Dabei wurde der Einfluss einer zunehmenden Blattfläche auf die Veränderung der Respiration während der Versuchslaufzeit untersucht. Zur Untersuchung der Korrelation wurde ein Quotient aus R_d und der PAR- Einstrahlung gebildet, um so den Einfluss der Einstrahlung zu eliminieren. Bei den verwendeten Daten handelt es sich um Rohdaten, die nicht mit der Blattfläche korrigiert wurden. Zum einen wurden Versuche mit reduzierter Einstrahlung (obere Tabellenhälfte) und zum anderen Versuche nach KEA (T: 18/14 °C, rF: 75%, CO₂: 800 vpm, untere Tabellenhälfte) miteinander verglichen.

In Tabelle 5.30 sind die Ergebnisse der Korrelationsanalyse dargestellt. Bei den gezeigten Varianten war der ermittelte Einfluss zwischen Respiration und Blattfläche stets signifikant und negativ korreliert. Daraus geht hervor, dass mit einer zunehmenden Blattfläche eine Steigerung der Respirationsrate ermittelt werden konnte. Die negative Korrelation bedeutet einen negativer werdenden Wert für R_d , mit zunehmender Blattfläche.

Tab. 5.30: Ergebnisse der Korrelationsanalyse zwischen der Respirationsrate (R_d) und der Blattfläche (BF). Die Daten stammen aus verschiedenen Versuchsdurchläufen und wurden einstrahlungsbereinigt (R_d/PAR), aber nicht blattflächenkorrigiert verrechnet. Pearson Product Moment Correlation, signifikant bei $p < 0,05$

Testvariante	Corr Koeff	P Wert
V7_K1 R_d/PAR vs BF	-0,927	5,91 e ⁻¹⁰
V7_K2 R_d/PAR vs BF	-0,979	3,45 e ⁻¹⁵
V7_K3 R_d/PAR vs BF	-0,724	1,40 e ⁻⁴
V3_K1 R_d/PAR vs BF	-0,834	1,88 e ⁻⁹
V5_K2 R_d/PAR vs BF	-0,779	7,38 e ⁻⁶
V7_K2 R_d/PAR vs BF	-0,743	1,90 e ⁻⁶

5.3.1.3 Temperatur

Der Einfluss der Temperatur auf die Respiration ist der Abb. 5.20 zu entnehmen. Die dargestellten Daten wurden dem Versuch zwölf entnommen.

Die Temperatursollwerte waren während des Versuchs auf eine gleiche Tag- / Nachttemperatur von 10 °C (K3), 18 °C (K1) und 30 °C (K2) eingestellt.

Die berechneten Mittelwerte lagen bei $-1,05 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($\pm 0,54$) bei 10 °C in K3, $-1,49 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($\pm 0,81$) bei 18 °C in K1 und $-2,67 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($\pm 1,12$) bei 30 °C in K2. Das entsprach einer Zunahme von 41,7 % im Vergleich der 10/10 °C mit der 18/18 °C Variante, respektive 9,7 % im Vergleich der 30/30 °C mit der 18/18 °C Variante. Die prozentuale Zunahme im Vergleich der 10/10 °C mit der 30/30 °C Variante betrug 154,3 %.

Die durchgeführte statistische Untersuchung zeigte signifikante Unterschiede zwischen allen Varianten. Mit zunehmender Nachttemperatur stieg die Respiration jeweils signifikant an und erreichte bei der 30 °C Variante die maximale Respirationsrate.

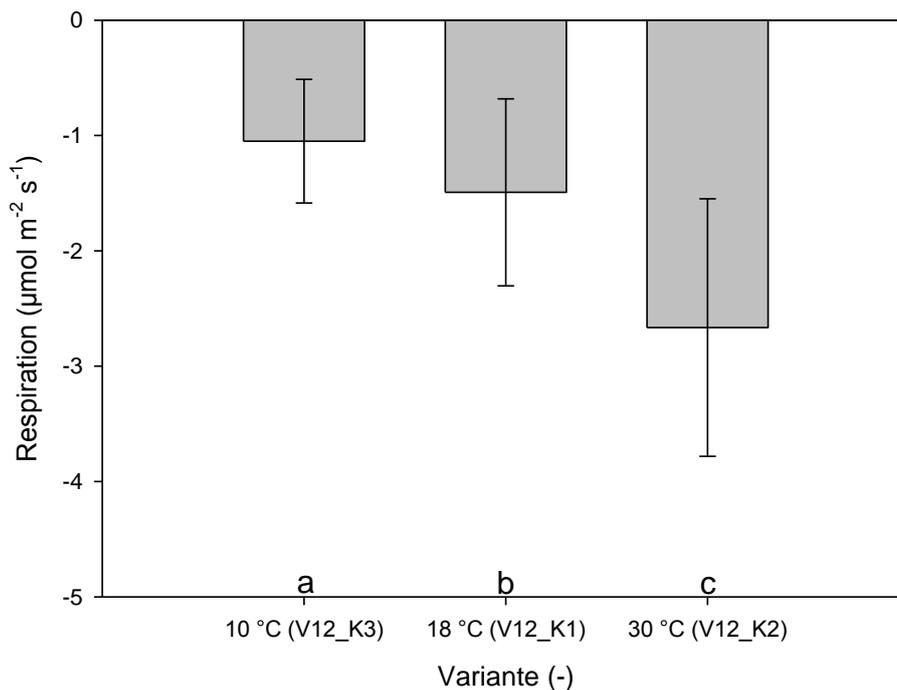


Abb. 5.20: Respiration in Abhängigkeit der Temperatur bei 10/10 °C (K3), 18/18 °C (K1) und 30/30 °C (K2).

CO₂-Konz.: 800 vpm / rF: 75 % / PAR: identisch je TPK
ANOVA Signifikanzlevel $\alpha = 0,05$, Daten aus Versuch 12

5.3.1.4 Relative Luftfeuchte

In Abbildung 5.21 ist der Einfluss der relativen Luftfeuchte auf die Respiration dargestellt. Die zugrundeliegenden Daten wurden dem Versuch vier entnommen. Mit abnehmender relativer Luftfeuchte, bzw. zunehmendem Sättigungsdampfdefizit der Luft, erhöhte sich die Respirationsrate. Die dargestellten Ergebnisse wiesen im Vergleich untereinander allesamt signifikante Unterschiede auf.

Hinsichtlich der Mittelwerte wurden bei 45 % rF (K1) im Mittel $-2,14 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($\pm 0,51$), bei 65 % rF (K2) $-1,59 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($\pm 0,47$) und bei 90 % rF (K3) $-1,29 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($\pm 0,35$) errechnet. Das ergab eine prozentuale Abnahme von 25,7 % im Vergleich der 45 % mit der 65 % Variante und 18,9 % im Vergleich der 65 % mit der 90 % Variante. Insgesamt nahm die Respirationsrate im Vergleich zwischen der niedrigsten und der höchsten relativen Luftfeuchtigkeit um 39,7 % ab.

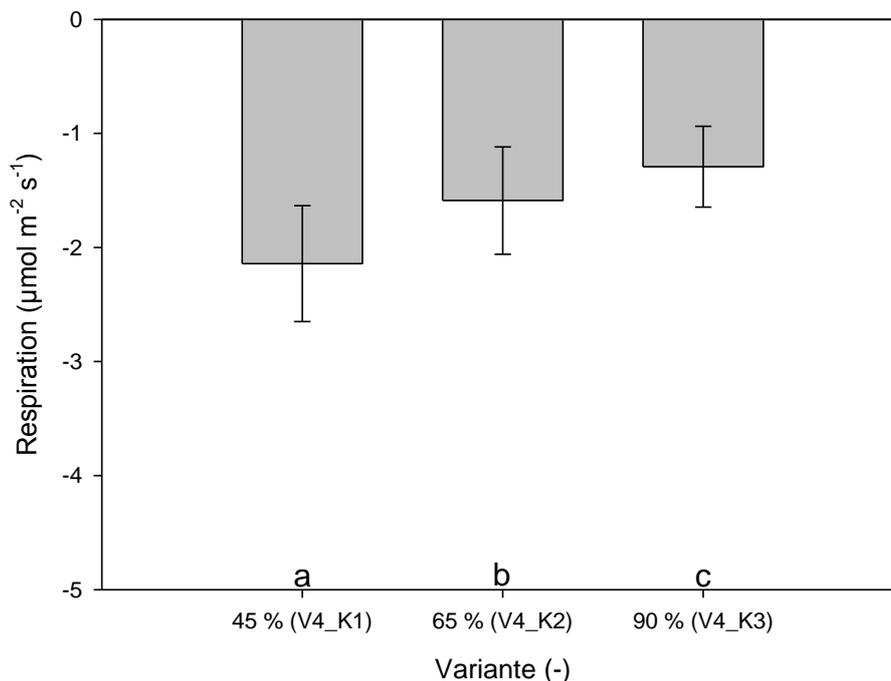


Abb. 5.21: Respiration in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte bei 45 % rF (K1), 65 % rF (K2) und 95 % rF (K3).
Temp.: 18/14 °C / CO₂- Konz.: 800 vpm / rF: 75 % / PAR: identisch je TPK
ANOVA Signifikanzlevel $\alpha = 0,05$, Daten aus Versuch 4

5.3.1.5 CO₂- Konzentration

Abbildung 5.22 zeigt die Respiration bei unterschiedlichen CO₂-Konzentrationen. Die Daten wurden den Versuchen zwei (K1: 1500 vpm, K3: 200 vpm) und fünf (K1: 400 vpm, K2: 800 vpm, K3: 1200 vpm) entnommen. Die gewählte Darstellungsform ermöglicht die vergleichende Präsentation der absoluten Messwerte mit ansteigender CO₂- Konzentration (200 vpm, 400 vpm, 800 vpm, 1200 vpm und 1500 vpm) in einem Säulendiagramm.

Mithilfe eines statistischen Vergleichs konnten signifikante Unterschiede zwischen einigen Varianten ermittelt werden. Zur Berechnung der Statistik wurde zunächst ein Quotient aus Respiration und PAR- Strahlung ($R_d \text{ PAR}^{-1}$) des vorangegangenen Tages gebildet, um die Daten aus verschiedenen Versuchsdurchläufen einstrahlungskorrigiert vergleichen zu können.

Es zeigte sich, dass die Respirationsraten der Varianten 200 vpm, 400 vpm und 800 vpm jeweils signifikant höher lagen, als bei den Varianten 1200 vpm und 1500 vpm, die sich untereinander nicht signifikant unterschieden. Ebenfalls signifikante Unterschiede wies die Variante 200 vpm zu den Varianten 400 vpm und 800 vpm auf. Die letzteren unterscheiden sich ebenfalls nicht signifikant voneinander.

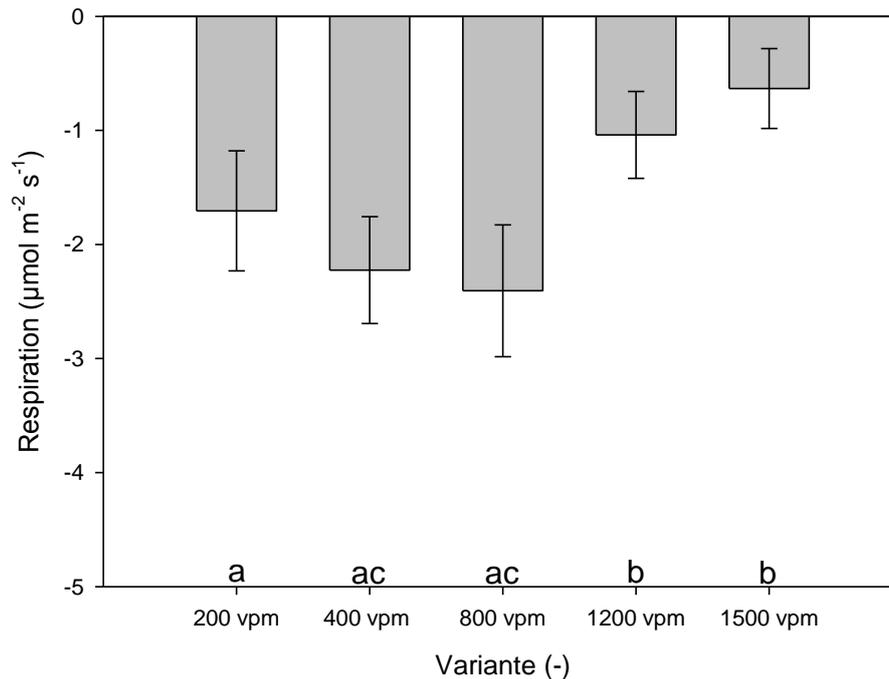


Abb. 5.22: Respiration in Abhängigkeit der CO₂- Konzentration (200 vpm, 400 vpm, 800 vpm, 1200 vpm und 1500 vpm). Für die Statistik wurde das Verhältnis der Respiration zur Einstrahlung am Tag verwendet ($R_d \text{ PAR}^{-1}$)
 Temp.: 18/14 °C / rF: 75 % / PAR: variierend zwischen V2 und V5
 ANOVA Signifikanzlevel $\alpha = 0,05$, Daten aus Versuch 2 und 5

Mit steigender CO₂- Konzentration erhöhte sich die Respirationsrate zunächst und erreichte bei der 800 vpm Variante das Maximum. Die prozentuale Zunahme betrug 30,5 % im Vergleich der 200 mit der 400 vpm Variante und 8,1 % im Vergleich der 400 mit der 800 vpm Variante. Mit einer weiteren Erhöhung nahm die Respirationsrate dann schlagartig ab und sank um 56,8 %, im Vergleich der 800 vpm zur 1200 vpm Variante und um 73,7 % im Vergleich der 800 vpm mit der 1500 vpm Variante. Die Mittelwerte samt Standardabweichung sind der Tabelle 5.31 zu entnehmen.

**Tab. 5.31: Mittelwerte samt Standardabweichung (in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) der Respirationsraten bei unterschiedlichen CO_2 - Konzentrationen. Die dargestellten Ergebnisse entstammen den Versuchen (V) zwei und fünf. Die jeweilige TPK ist mit K gekennzeichnet
Temp.: 18/14 °C / rF:75 %**

Testvariante	Mittelwert	Stabw
V2_K3 200 vpm	-1,705	0,527
V5_K1 400 vpm	-2,225	0,469
V5_K2 800 vpm	-2,406	0,578
V5_K3 1200 vpm	-1,039	0,381
V2_K3 1500 vpm	-0,633	0,349

5.3.2 Kondensat

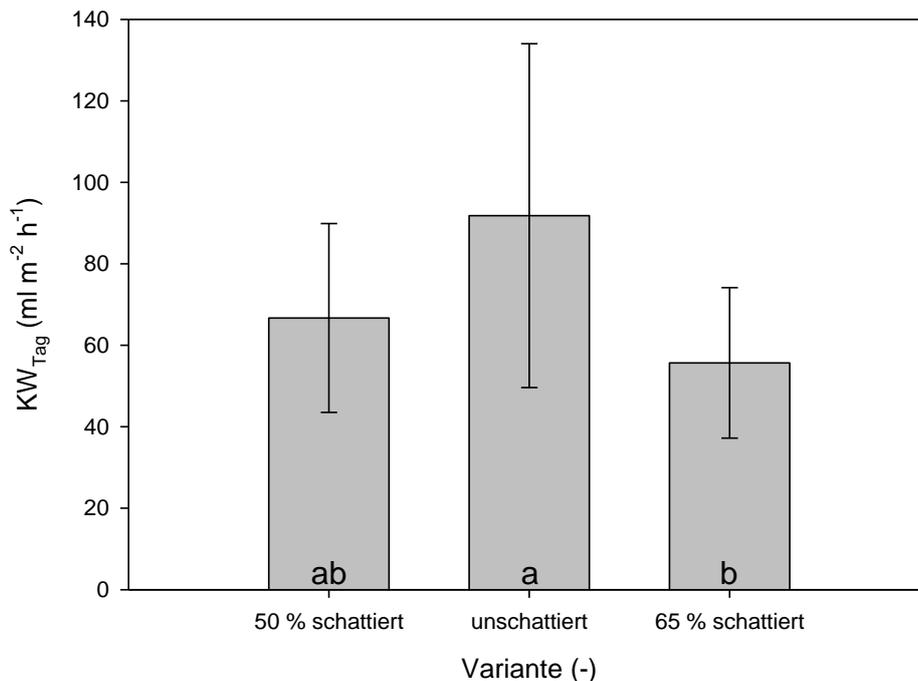
Eine weitere untersuchte Größe war die Quantität des anfallenden Kondensats. Bei der Auswertung der Ergebnisse wurde keine Unterteilung in verschiedene Wasserströme innerhalb des Systems vorgenommen. Die Gesamtkondensatmenge je Zeiteinheit wurde als Ergebnis der Evapotranspiration und der periodischen Wasserzufuhr während der Bewässerungsphasen, mit einhergehender Verdunstung auf dem Küvettenboden, erfasst. Eine weitere Unterscheidung bei der messtechnischen Erfassung war systembedingt nicht möglich, weswegen im Folgenden nicht der Begriff Evapotranspiration / Evapotranspirationsrate, sondern Kondensat oder Kondensationsrate verwendet wird.

5.3.2.1 Einstrahlung

In Abbildung 5.23 ist der Einfluss des Faktors Einstrahlung auf die ermittelte Kondensatmenge in einem Säulendiagramm dargestellt. Die Versuchsdaten entstammen dem Versuch 7.

Die Kondensatmenge stieg mit zunehmender Einstrahlung im Mittel von $55,7 \text{ ml m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ($\pm 18,5 \text{ ml m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) bei der 65 % schattierten Variante, auf $66,7 \text{ ml m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ($\pm 23,1 \text{ ml m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) bei 50 % schattierten Variante und erreichte mit $91,8 \text{ ml m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ($\pm 42,2 \text{ ml m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) bei der Variante ohne Einstrahlungsreduzierung den höchsten Wert. Das entsprach einer mittleren prozentualen Zunahme von 19,8 % (65 % zu 50 % schattiert), respektive 37,6 % (50 % schattiert zu ungeschattiert). Die Menge an gemessenem

Kondensat war bei der ungeschattierten Variante signifikant höher als bei der 65 % schattierten Variante. Ein statistisch belegbarer Unterschied zwischen der 50 % schattierten Variante zu den beiden übrigen konnte nicht erbracht werden. Allerdings zeichnete sich ein deutlicher Verlaufstrend ab.



**Abb. 5.23: Kondensatmenge in Abhängigkeit der Einstrahlung (K1: 50 % schattiert, K2: ungeschattiert, K3: 65 % schattiert).
Temp.: 18/14 °C / CO₂- Konz.: 800 vpm / rF: 75 %
ANOVA Signifikanzlevel $\alpha = 0,05$, Daten aus Versuch 7**

5.3.2.2 Blattfläche

Um einen Vergleich des Einflusses der Blattfläche auf die Kondensatmenge darstellen zu können, wurden Versuche aus unterschiedlichen Versuchsdurchläufen gewählt. Bei den gewählten Versuchen zum einen die Standardeinstellungen nach KAE (Temp: 18/14 °C, rF: 75 %, CO₂: 800 vpm) und zum anderen die Schattierungsversuche mit deutlichen Unterschieden in der Blattflächenausprägung eingestellt. Da bereits ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Einstrahlung und der Kondensatmenge aufgezeigt werden konnte (vgl. 5.3.3.1), wurde für die Tageswerte ein Quotient aus PAR- Strahlung und

Kondensatmenge gebildet (KW/PAR), um so den Effekt der Einstrahlung berücksichtigen zu können.

Die einstrahlungskorrigierten Tageswerte sowie die unveränderten Nachtwerte der Kondensatmenge wurden in einer Korrelationsanalyse (Pearson Correlation, $P = < 0,05$) gegen die jeweilige Blattfläche aufgetragen und ein eventuell vorhandener linearer Zusammenhang getestet (Tab. 5.32). Dabei muss erwähnt werden, dass die verwendeten Daten zuvor nicht mit der jeweiligen Blattfläche korrigiert, sondern auf Basis der Erfassungseinheit (TPK) mit einer Grundfläche von 1,44 m² verwendet wurden.

Sowohl bei den Tag- als auch bei den Nacht- Berechnungen ergab sich über alle Testvarianten ein deutlicher linearer Zusammenhang. Die positiv korrelierten Daten weisen demnach auf eine Zunahme des Kondensats mit ansteigender Blattfläche hin. Der ermittelte Zusammenhang war in allen betrachteten Fällen signifikant.

Tab. 5.32: Ergebnisse der Korrelationsanalyse zwischen der Kondensatmenge und der Blattfläche (BF). Die Daten stammen aus verschiedenen Versuchsdurchläufen (V: Versuch. K: TPK). Zur Berechnung der Tageswerte (obere Hälfte) wurde zunächst ein Quotient (KW/PAR) zur Einstrahlungsbereinigung gebildet. Pearson Product Moment Correlation, signifikant bei $p < 0,05$, $n=30$

Testvariante	Corr Koeff	P Wert
V3_K1 $KW_{\text{Tag}}/\text{PAR}$ vs BF	0,852	4,50e ⁻⁹
V5_K2 $KW_{\text{Tag}}/\text{PAR}$ vs BF	0,760	4,31e ⁻⁶
V7_K2 $KW_{\text{Tag}}/\text{PAR}$ vs BF	0,898	3,21e ⁻⁹
V7_K1 $KW_{\text{Tag}}/\text{PAR}$ vs BF	0,832	1,59e ⁻⁶
V7_K2 $KW_{\text{Tag}}/\text{PAR}$ vs BF	0,829	6,39e ⁻⁷
V7_K3 $KW_{\text{Tag}}/\text{PAR}$ vs BF	0,847	6,51e ⁻⁷
V3_K1 KW_{Nacht} vs BF	0,845	4,16e ⁻⁹
V5_K2 KW_{Nacht} vs BF	0,882	5,91e ⁻⁸
V7_K2 KW_{Nacht} vs BF	0,872	1,75e ⁻¹⁰
V7_K1 KW_{Nacht} vs BF	0,816	3,74e ⁻⁶
V7_K2 KW_{Nacht} vs BF	0,762	3,83e ⁻⁵
V7_K3 KW_{Nacht} vs BF	0,542	9,15e ⁻³

5.3.2.3 Temperatur

Zur Untersuchung des Einflusses der Temperatur auf die Kondensatmenge Tag und Nacht wurde ein Versuchssetup mit variierten Temperaturen, aber ansonsten gleichen Einstellungen und im selben Einstrahlungsbereich durchgeführt (Abb. 5.24).

Die hohen Tag/Nacht Temperaturunterschiede zwischen der Variante 30/6 °C und 6/30 °C führten zu signifikanten Unterschieden zwischen diesen Varianten. Auch die Variante 18/18 °C und 30/6 °C zeigten untereinander signifikante Unterschiede. Im Allgemeinen konnte eine Zunahme der Kondensatmenge mit zunehmender Tagtemperatur (6 °C, 18 °C und 30 °C) beobachtet werden. Die Mittelwerte stiegen dabei von 45,07 ml m⁻² h⁻¹ (±31,12) bei der 6/30 °C Variante auf 55,95 ml m⁻² h⁻¹ (±18,47) bei der 18/18 °C Variante und erreichten den höchsten Wert bei 79,7 ml m⁻² h⁻¹ (±30,54) bei der 30/6 °C Variante. Das entsprach einer prozentualen Zunahme von 24,1 % respektive 42,4 % beim selben Variantenvergleich.

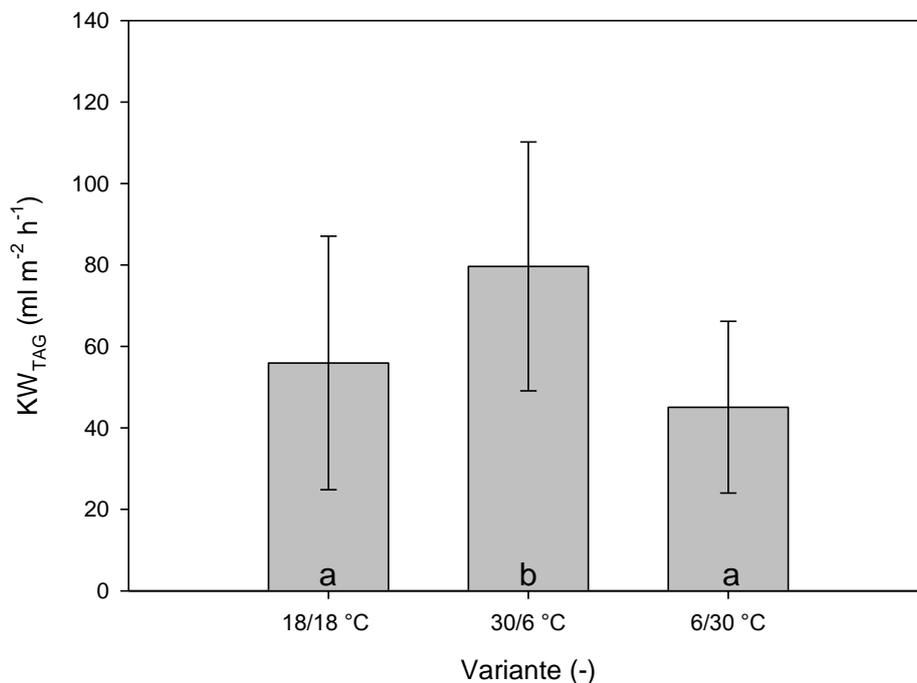


Abb. 5.24: Kondensatmenge am Tag in Abhängigkeit unterschiedlicher Temperaturen (K1: 18/18 °C, K2: 30/6 °C, K3: 6/30 °C), bei gleicher Einstrahlung. CO₂-Konz.: 800 vpm / rF: 75 % ANOVA Signifikanzlevel $\alpha = 0,05$, Daten aus Versuch 12

Ein etwas abgeändertes Bild ergab sich bei der Betrachtung der Kondensatmenge nachts (Abb. 5.25). Bei einem direkten Vergleich der Varianten 30/6 °C und 6/30 °C zeigten sich auch hier signifikante Unterschiede zwischen diesen Varianten. Damit führte eine Umkehrung der Temperaturbedingungen Tag/Nacht jeweils zu einer signifikanten Änderung der Kondensatmenge. Die Kondensatmenge der 30/6 °C Variante war verglichen mit der 18/18 °C Variante ebenfalls signifikant höher. Die Mittelwerte erreichten mit zunehmender Nachttemperatur Werte von 18,8 ml m⁻² h⁻¹ (±10,9) bei der 30/6 °C Variante, 22,9 ml m⁻² h⁻¹ (±9,8) bei der 18/18 °C Variante und 32,4 ml m⁻² h⁻¹ (±12,2) bei der. Auch hier ist ein deutlich zu ersehender Trend der Wertentwicklung zu sehen, da mit zunehmender Nachttemperatur ein Anstieg der Kondensationsrate zu verzeichnen ist.

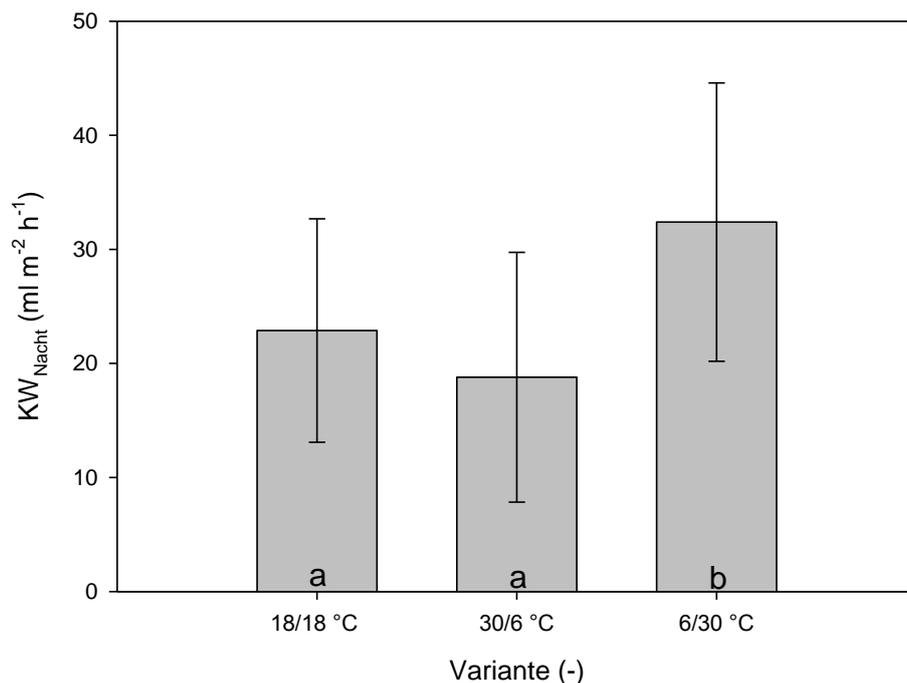


Abb. 5.25: Kondensatmenge in der Nacht in Abhängigkeit unterschiedlicher Temperaturen (K1: 18/18 °C, K2: 30/6 °C, K3: 6/30 °C), bei gleicher Einstrahlung. CO₂- Konz.: 800 vpm / rF: 75 %
ANOVA Signifikanzlevel $\alpha = 0,05$, Daten aus Versuch 12

5.3.2.4 Relative Luftfeuchte

Der Einfluss der relativen Luftfeuchte auf die Kondensatmenge ist in Abbildung 5.26 dargestellt. Die zugrunde liegenden Daten wurden dem Versuch vier entnommen. Mit einer Erhöhung der relativen Luftfeuchte ging eine Reduzierung der Kondensatmenge einher, wobei die ermittelten Mengen der 45 % rF und 65 % rF Variante (K1 und K2) jeweils signifikant höher waren als die in der 90 % rF Variante (K3) ermittelte Kondensatmenge. Ein signifikanter Unterschied zwischen der 45 % rF und 65 % rF Variante war nicht nachweisbar. Die ermittelten Mittelwerte lagen bei $102,2 \text{ ml m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ($\pm 38,21$) bei der 45 % Variante, $89,4 \text{ ml m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ($\pm 32,9$) bei der 60 % Variante und $56,6 \text{ ml m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ($\pm 38,3$) bei der 90 % Variante.

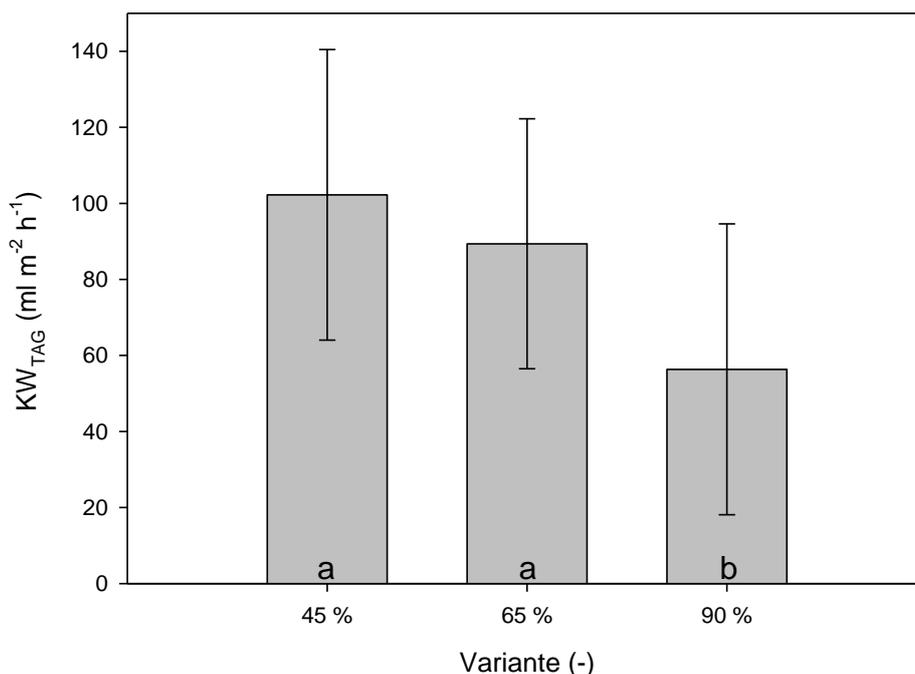


Abb. 5.26: Kondensatmenge am Tag in Abhängigkeit unterschiedlicher relativer Luftfeuchtigkeiten (K1: 45 %, K2: 65 %, K3: 90 %), bei gleicher Einstrahlung. CO_2 -Konz.: 800 vpm / Temp.: 18/14 °C
ANOVA Signifikanzlevel $\alpha = 0,05$, Daten aus Versuch 4

5.3.2.5 CO_2 -Konzentration

Der Einfluss der CO_2 -Konzentration auf die Kondensatmenge ist in Abbildung 5.27 dargestellt. Die zur Verrechnung genutzten Daten wurden dem Versuch

fünf entnommen (26.3 – 25.4). Durch eine Steigerung der CO₂- Konzentration von 400 vpm auf 800 vpm und auf 1200 vpm konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den Varianten und damit der gemessenen Kondensatmenge ermittelt werden. Die Mittelwerte lagen mit 65,0 ml m⁻² h⁻¹ (±27,4) bei der 400 vpm Variante in K1, 63,6 ml m⁻² h⁻¹ (±30,6) bei der 800 vpm Variante in K2 und 68,7 ml m⁻² h⁻¹ (±31,7) bei der 1200 vpm Variante in K3 sehr eng beieinander.

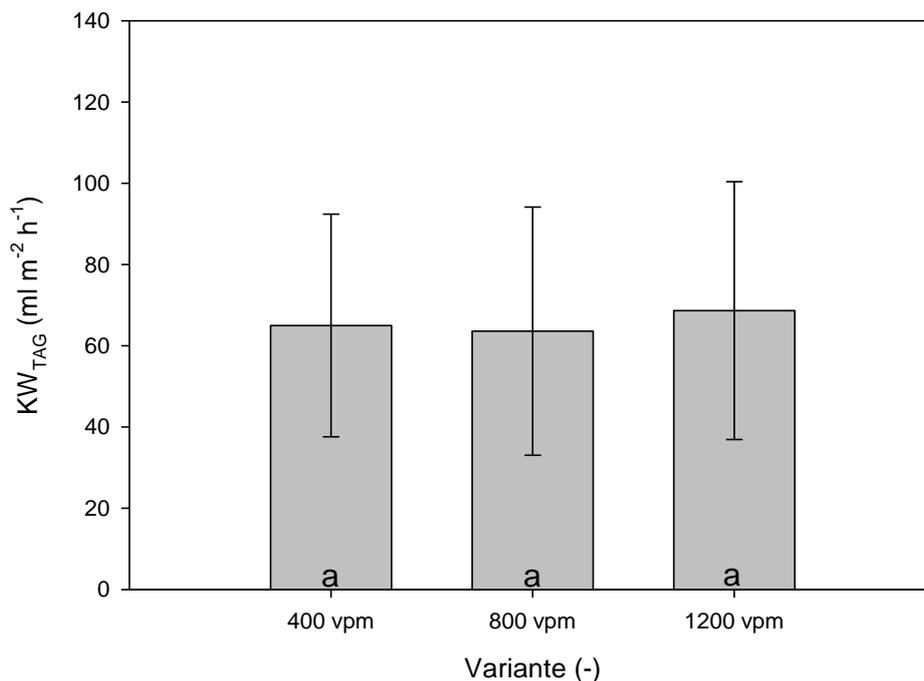


Abb. 5.27: Kondensatmenge am Tag in Abhängigkeit unterschiedlicher CO₂- Konzentrationen (V:5, K1: 400 vpm, K2: 800 vpm, K3: 1200 vpm), bei gleicher Einstrahlung.

Temp.: 18/14 °C / rF: 75 %

ANOVA Signifikanzlevel $\alpha = 0,05$, Daten aus Versuch 5

Auch ein Vergleich der Nachtwerte desselben Versuchs (Abb. 5.28) erbrachte keine signifikanten Unterschiede zwischen den Vergleichsvarianten. Bei diesem Vergleich lagen die Werte im Mittel bei 15,3 ml m⁻² h⁻¹ (±5,1) bei der 400 vpm Variante in K1, 13,7 ml m⁻² h⁻¹ (±4,8) bei der 400 vpm Variante in K2 und 14,1 ml m⁻² h⁻¹ (±3,6) bei der 400 vpm Variante in K3 und wiesen damit ebenfalls nur sehr geringe Unterschiede im Vergleich der Varianten untereinander auf. Die

berechneten prozentualen Unterschiede beliefen sich im Vergleich von K1 zu K2 auf -10,4 % und im Vergleich von K2 zu K3 2,8 %.

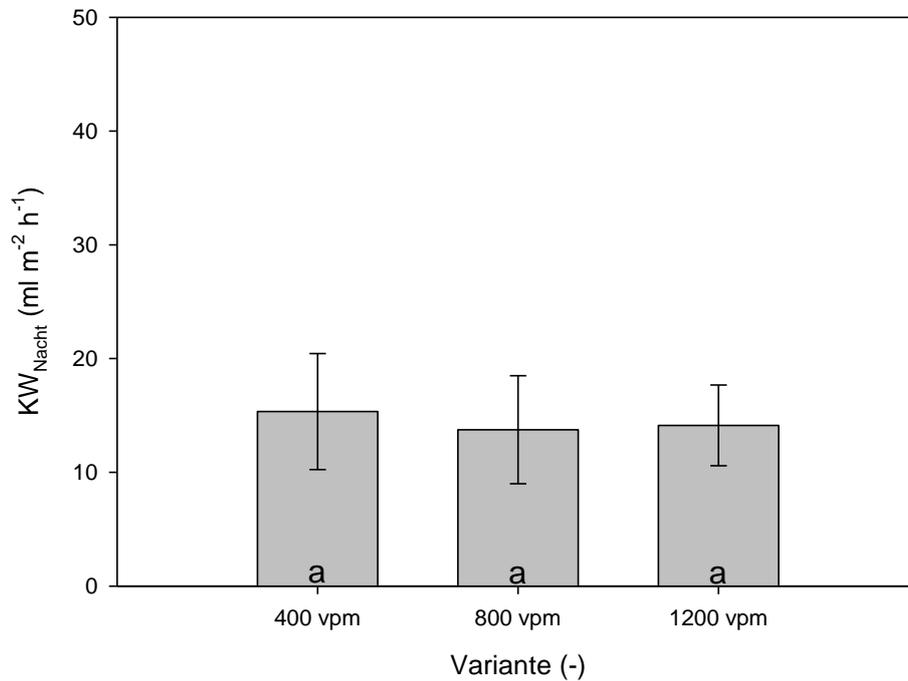


Abb. 5.28: Kondensatmenge in der Nacht in Abhängigkeit unterschiedlicher CO₂- Konzentrationen (V: 5, K1: 400 vpm, K2: 800 vpm, K3: 1200 vpm), bei gleicher Einstrahlung.
Temp.: 18/14 °C / rF: 75 %
ANOVA Signifikanzlevel $\alpha = 0,05$, Daten aus Versuch 5

6. Diskussion

6.1 Tageslicht- Pflanzenküvette (TPK)

Anhand der aufgezeigten Ergebnisse hinsichtlich der Regelgenauigkeit (CO₂-Konzentration, Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit), der statistisch nicht belegbaren Unterschiede bei der Einstrahlung und der nur sehr geringen und in den Berechnungen stets berücksichtigten, küvetten-spezifischen Undichtigkeiten, werden die einzelnen Küvetten K1 bis K3 als Wiederholungen angesehen. Das gleiche gilt für den Vergleich von Versuchen, die in unterschiedlichen Zeiträumen durchgeführt wurden. Dabei wurden Scheinwiederholungen als tatsächliche Replikate gewertet, wodurch erst eine Vergleichbarkeit der Versuche gewährleistet wurde. Zwar muss davon ausgegangen werden, dass die statistisch ermittelten Unterschiede nicht ausschließlich durch die Varianten bedingt sind (Zufallsfehler nicht unabhängig). Dennoch ist die Anwendung von Schein- Replikaten legitim um eine geringe Anzahl vorhandener Wiederholungen zu kompensieren (Stahel 2000). Eine statistisch betrachtet korrekte Untersuchung würde das Vorhandensein weiterer, äußerst identischer TPK voraussetzen. Bei drei unterschiedlichen Varianten mit jeweils fünf Wiederholungen (Kessler 2007, Stahel 2000) bedeutet das eine Anzahl von 15 TPK, was aus zahlreichen Gründen (Kosten, Platzbedarf etc.) nur schwer realisierbar wäre. Der Grad der Exaktheit bei der Fertigung (und Wiederholung dieser) wäre in so einem Fall nur maschinell denkbar.

Eine Besonderheit der durchgeführten Untersuchungen ist dabei die gezielte Untersuchung der spezifischen Eigenschaften und Optima der untersuchten Pflanzen. Das Integrationspotential in veränderte und zum Teil auch extreme Bedingungen kann auch bei Pflanzen innerhalb einer Art stark variieren und genutzt werden, um die Klimaführung pflanzenspezifisch zu optimieren mit dem Ziel, den Energieeinsatz zu reduzieren (Akyazi *et al.* 2015, Koning 1990, Körner *et al.* 2007, Rijdsdijk und Vogelezang 2000).

Beim Vergleich der erzielten Resultate mit den Daten aus der Literatur gibt es Limitierungen, die es zu beachten gilt. In der vorliegenden Arbeit wurden die

Netto- Photosyntheserate und die Kondensatmenge über einen Zeitraum von 30 Tagen erfasst. Da diese stets, von den sich bei den Versuchsdurchführungen verändernden Einstrahlungswerten beeinflusst wurden, wurde eine zeitlich abhängige, mittlere Veränderung erfasst und modelliert. Die überwiegende Anzahl der zum Vergleich zur Verfügung stehenden Literatur wurde hingegen mit einer zum Teil deutlich kürzeren Versuchsdauer durchgeführt und zeigt vielmehr Momentaufnahmen eines vergleichbaren Sachverhalts (Farquhar *et al.* 2001). Ferner unterscheiden sich auch die Erfassungssysteme. So wurde bei einem überwiegenden Großteil der zum Vergleich dienenden Literatur auf Blattküvetten zurückgegriffen, die durch das Messverfahren an sich und einer Änderung des Mikroklimas (z.B. durch Ventilation der Küvetten, Einstrahlung, Temperatur und Luftfeuchte etc.) höhere Messwerte liefern (Burkart *et al.* 2007, Goulden und Field 1994, Hurry *et al.* 2005, Sellers *et al.* 1992).

Im Allgemeinen ist es schwierig die geschilderten Ergebnisse sowohl in der Diskussion, als auch in der Wirkung auf die Pflanze getrennt voneinander zu betrachten. Die einzelnen physikalischen Größen sind sehr eng miteinander verwoben und bilden ein Geflecht aus zusammenhängendem, in ihrer Vielzahl und jeweiligen Ausprägung die Reaktion der Pflanzen gemeinsam beeinflussendem Zusammenwirken (Gates 1968). Dennoch wurde versucht die einzelnen Größen getrennt voneinander zu vermessen, zu betrachten, zu diskutieren und mit der jeweils verfügbaren Literatur zu verknüpfen, da es ein Anspruch des entwickelten Messsystems ist, eben diese Reaktionen und Auswirkungen auf die Pflanzen getrennt voneinander erfassen und quantifizieren zu können.

6.2 Netto- Photosynthese (P_n)

Das Erfassen und Vergleichen von P_n , oder weniger spezifisch dem Gaswechsel, ist eine weit verbreitete und intensiv genutzte Methode bei Pflanzenuntersuchungen (Egle 1960, Farquhar *et al.* 2001, Long und Bernacchi 2003), die in der vorliegenden Arbeit ebenfalls Anwendung fand. Dabei gilt es, ein besonderes Augenmerk auf die einzelnen Verrechnungsschritte und die

Bezugsfläche zu richten, um so eine mögliche Vergleichbarkeit unterschiedlicher Systeme zu gewährleisten. Nach Sellers *et al.* (1992) ist der Unterschied in der Netto- Photosynthese zwischen Einzelblattmessungen und Bestandesmessungen sehr hoch. Dies hängt maßgeblich mit den unterschiedlichen Kapazitäten des Photosyntheseapparats zwischen beschatteten und nicht beschatteten Blättern und der entsprechenden Auswahl des zu vermessenden Blattes zusammen. Beschattete Blätter besitzen eine geringere photosynthetische Kapazität und erfahren deutlich schneller eine Sättigung des Photosyntheseapparats (Bjorkmann 1981, Sellers *et al.* 1992). Eine weitere Einschränkung der Vergleichbarkeit entsteht durch die plane Anbringung des Blattes in der Blattküvette und den permanenten Luftzug durch diese, was zu einer Änderung der Grenzschicht (boundary layer) und damit dem α - Wert führt. Auch dies führt zu einer Überschätzung der Daten, die aus Blattküvetten- Systemen gewonnen wurden (Egle 1960). Damit sind insbesondere Systeme, die den Gaswechsel einzelner Blätter erfassen für eine Vergleichsanstellung mit den durchgeführten Versuchen in Bezug auf die absoluten Werte nur bedingt vergleichbar.

Als Kritikpunkt kann hier aufgefasst werden, dass die Messungen als Gesamt-Gaswechsel innerhalb der TPK erfasst, aber im Anschluss auf die Bezugsebene Blattfläche umgewandelt wurden. Dadurch wurden dementsprechend auch die beschatteten Blätter miterfasst, in den Berechnungen aber nicht gesondert verarbeitet. Durch diese Mess- und Umrechnungsprozedur konnten die Unterschiede in der Blattflächenentwicklung einbezogen werden.

Ferner entstehen Unterschiede in der Netto- Photosyntheseleistung – auch bei Versuchen mit Pflanzen des selben Genotyps als Ausgangsmaterial – durch Unterschiede hinsichtlich der Reflektionseigenschaften des Blattwerks und damit der Nutzbarkeit der auftreffenden PAR- Strahlung und Regulierung der stomatären Leitfähigkeit, durch Faktoren wie Temperatur, Wasserdampfgehalt der Luft und Wasserpotential der Blätter (Seller 1985, Seller 1987).

Ein nicht zu unterschätzender Einfluss geht auch von der Jahreszeit und der Lichtsituation zum Zeitpunkt der Versuchsanstellung bzw. Stecklingsproduktion und Wachstumsphase dieser aus. Im Vergleich zwischen den Sommer- und

Wintermonaten herrschen – trotz Zusatzbelichtung im Winter – andere Kulturbedingungen vor, die wiederum die Morphologie und Physiologie der Pflanzen beeinflussen (Onada *et al.* 2004).

6.2.1 Einstrahlung

Bei der Betrachtung der Kurvenverläufe der in 5.2.3 durchgeführten Schattierungsversuche kristallisieren sich zwei Zusammenhänge heraus:

Zum einen konnte hier erneut der eindeutige Anstieg der Netto-Photosyntheserate durch eine Erhöhung der CO₂-Konzentration bei den schattierten Varianten aufgezeigt werden. Dabei stimmt auch das Maß der Zunahme der Netto-Photosyntheserate sehr gut mit anderen Versuchen mit den gleichen Grundeinstellungen überein und spiegelt einmal mehr die hohe Reproduzierbarkeit der Ergebnisse wieder.

Zum anderen ähneln sich die Steigungen sowie die Ausprägung der Werte bei gemessenen und vergleichbaren Einstrahlungswerten der drei Varianten innerhalb eines Versuchs (siehe 5.2.3.1, 5.2.3.2 und 5.2.3.3) jeweils sehr stark. Es kann also davon ausgegangen werden, dass ein bestimmter PAR- Bereich oder Wert zu einer bestimmten Netto-Photosyntheserate führt, wenn die übrigen Bedingungen gleich sind (in diesem Fall der Schattiergrad), sodass auch hier die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse eindeutig belegt werden kann.

In Abb. 6.1 sind die Kurven aus den verschiedenen Schattierversuchen, jeweils in der Variante 65 % schattiert, zusammengestellt (siehe rote Kurve der Versuche 5.2.3.1, 5.2.3.2 und 5.2.3.3). Es kann deutlich aufgezeigt werden, wie eine gesteigerte CO₂-Konzentration die Steigung der Kurven und die maximale Netto-Photosyntheseleistung beeinflusst. Die P_n beträgt im Mittel 1,96 μmol m⁻² s⁻¹ (±1,26) bei der 400 vpm Variante, 3,15 μmol m⁻² s⁻¹ (±2,01) bei der 800 vpm Variante und 3,76 μmol m⁻² s⁻¹ (±2,06) bei der 1200 vpm Variante. Damit beträgt die prozentuale Zunahme von P_n im Mittel 60,4 % (Vergleich 400 vpm zu 800 vpm) respektive 91,73 % (400 vpm zu 1200 vpm).

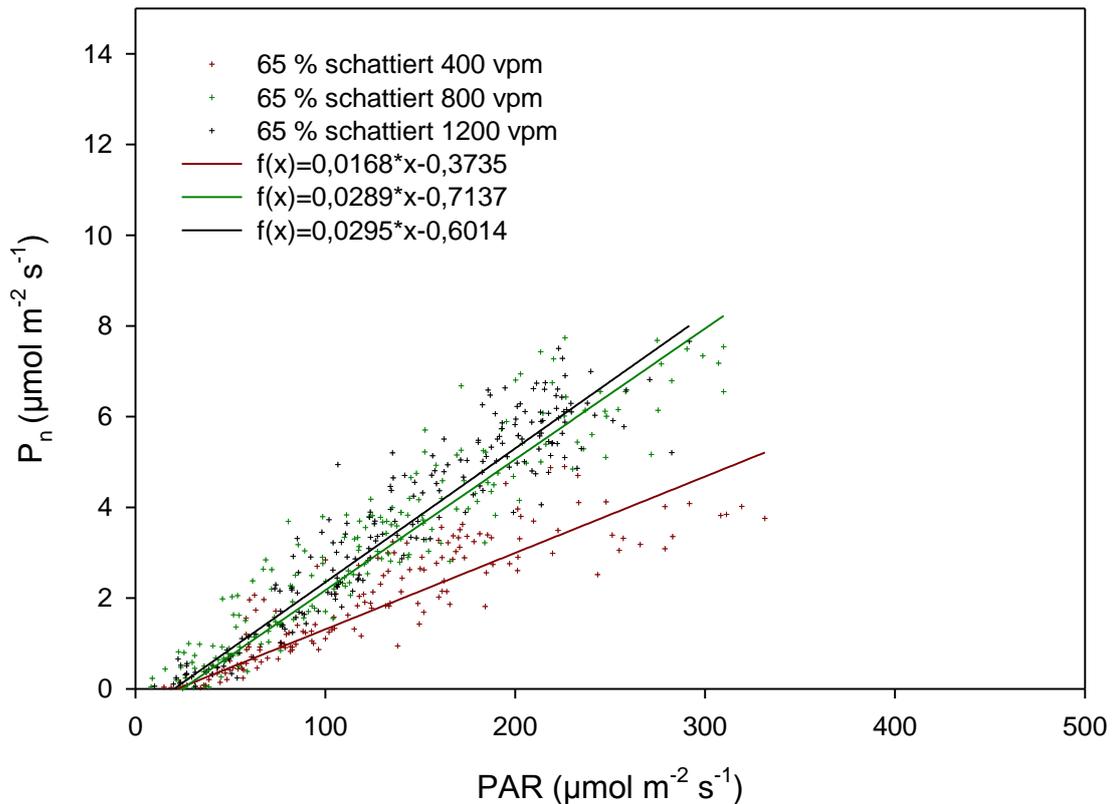


Abb. 6.1: Vergleichende Darstellung der Kurven aus den Schatterversuchen bei unterschiedlichen CO₂- Konzentrationen (400 vpm, 800 vpm und 1200 vpm). Dargestellt sind die 65 % schattierten Varianten von Versuch 6 (dunkelrot), Versuch 7 (dunkelgrün) und Versuch 8 (schwarz), jeweils als Punktwolke und modellierter Verlauf.

Für einen statistischen Vergleich (ANOVA, Signifikanzlevel $\alpha = 0,05$) dieser drei Kurven wurde eine vereinfachte LUE aus dem Verhältnis P_n zu PAR innerhalb der jeweiligen Variante gebildet. Dabei konnte ermittelt werden, dass durch die Erhöhung der CO₂- Konzentration von 400 vpm auf 800 vpm und auf 1200 vpm jeweils ein signifikanter Anstieg von P_n zu verzeichnen war. Zwischen der 800 vpm und der 1200 vpm Variante wurde kein signifikanter Unterschied gefunden. Es wird daher angenommen, dass bei reduzierten Lichtverhältnissen eine CO₂- Düngung als sinnvoll erachtet werden kann.

Die Ergebnisse der destruktiven Bonituren können für einen Vergleich nicht hinzugezogen werden, da aufgrund unterschiedlich weit entwickelter Pflanzen zum jeweiligen Versuchsbeginn (siehe Daten LAI_{Beginn} der destruktiven

Bonituren in 5.2.3.1.2, 5.2.3.2.2 und 5.2.3.3.2) der folgende Biomasseaufbau durch höhere Startwerte nicht repräsentativ ist.

Ein Vergleich der Ergebnisse der destruktiven Bonituren innerhalb eines Versuchs (zwischen den Varianten) zeigt bei sämtlichen durchgeführten Schatterversuchen (siehe 5.2.3.1, 5.2.3.2 und 5.2.3.3) zum Teil deutlich gesteigerte Werte bei den Boniturfaktoren Blattfläche, Frisch- und Trockenmasse sowie Höhe. Trotz der reduzierten Lichtverhältnisse konnte demnach ein höherer Biomassezuwachs verzeichnet werden, was im Einklang mit der verfügbaren Literatur steht und bei zahlreichen Arten beobachtet werden konnte (Lambers und Posthumus 1980, Poorter und Nagel 2000, Schulze *et al.* 2002). Nach Attridge (1990) erzeugt eine Beschattung fakultative Schattenpflanzen, die sich durch eine geringere Photosyntheseleistung je Blattfläche und ein gesteigertes Blattfläche- zu Trockenmasse- Verhältnis auszeichnen. Beides konnte durch die durchgeführten Untersuchungen bestätigt werden.

6.2.2 Temperatur

Der Effekt der Temperatur auf physiologische Prozesse innerhalb der Pflanze wurde in zahlreichen Untersuchungen belegt und ist schon seit geraumer Zeit bekannt (Lambers *et al.* 2008, Went 1953).

Bei den durchgeführten Versuchen konnten lediglich bei der 6/30 °C Variante des Versuchs 12 (siehe 5.2.2.5) signifikante Unterschiede zu den übrigen beiden Varianten aufgezeigt werden. Bei genauer Betrachtung zeigt sich aber, dass bei dieser Versuchsreihe, die im Frühjahr stattfand, eine regelmäßig hohe Einstrahlung zu verzeichnen war. Bei den Versuchen zehn (siehe 5.2.2.3) und elf (siehe 5.2.2.4) hingegen, diese Versuche wurden im Herbst und Winter durchgeführt, lag die Einstrahlung deutlich niedriger und eine ähnlich niedrige Temperatur war nun nicht mehr signifikant unterschiedlich zu den übrigen Varianten. Damit stellte bei diesen Versuchen nicht die Temperatur, die Pelargonien ohnehin in einem breiten Bereich tolerieren (Montero *et al.* 2001, The Herb Society of America), sondern die Einstrahlung den limitierenden Faktor dar. Auch Welander (1983) konnte einen signifikanten Einfluss der

Temperatur auf die Netto- Photosyntheserate nur im Zusammenwirken mit einer hohen Einstrahlung nachweisen. Montero *et al.* (2001) konnten in ihren Untersuchungen, in mediterranem Klima, mit hoher Einstrahlung, (Gewächshausversuche) bei *P. zonale* keine signifikante Änderung der Netto-Photosyntheserate bis zu einer Temperatur von 36 °C ermitteln.

Die jeweils dargestellte PAR- Einstrahlung umfasst den gesamten, während eines Versuches ermittelten Einstrahlungsbereich, gibt jedoch keine Auskunft auf die grundsätzliche Verteilung dieser Daten (z.B. je Stunde). Herrscht beispielsweise über einen längeren Versuchszeitraum eine hohe Einstrahlung, dann hat auch die Temperatur durchaus einen deutlichen Effekt auf die Netto-Photosyntheserate und kann dann einen limitierenden Faktor darstellen (Welander 1983). Der von der internationalen Herb Society (The Herb Society of America) für *Pelargonium zonale* empfohlene optimale Temperaturbereich von 18,3 – 23,9 °C (65 – 75 F) am Tag und 10 – 15 °C (50 – 60 F) in der Nacht kann als Standardeinstellung mit guten Resultaten bestätigt werden. Allerdings zeigt sich, dass mitunter extreme Abweichungen davon nicht automatisch zu einer signifikanten Veränderung der Netto- Photosyntheserate und der destruktiven Boniturdaten führen. Mit diesen Erkenntnissen sind nach wie vor übliche, starre Temperatur- Sollwerteinstellungen und -Vorgaben bei der Pflanzenproduktion zu überdenken. Diese Gedankengänge werden in der neueren Literatur auch geäußert (Körner und Van Straten 2008, Pasgianos *et al.* 2003, Van Straten *et al.* 2000), finden aber bis dato kaum Anwendung im Produktionsgartenbau.

Es kann zum Beispiel über eine einstrahlungsabhängige Reduzierung der Sollwerte der Heizungsregelung nachgedacht werden. Bei so einem Ansatz würde der Klimacomputer die Anpassungen automatisch vornehmen und durch hinterlegte Algorithmen und Messdaten bedarfsorientiert die Sollwerte verändern.

Neben der Lufttemperatur, die zur Verarbeitung der Daten und Regelung der TPK genutzt wurde, waren auch Blatttemperaturfühler auf Basis von Thermoelementen installiert worden (zwei je TPK). Da die Pflanzen aber über eine Dauer von 30 Tagen unangetastet in den Küvetten verblieben, war schon

nach kurzer Zeit kein Kontakt zwischen Pflanze und Sensor mehr hergestellt. Diese Daten wurden verworfen. Die Entwicklung der Blatttemperatur ist ein wichtiges Maß für die Beschreibung der Reaktion der Pflanze auf bestimmte Reize und kann auch als Maß für Pflanzenstress herangezogen werden (Eamus und Shanahan 2002, Meler *et al.* 1999). Nach Jones (1992) ist die Blatttemperatur eine Funktion der Lufttemperatur und Einstrahlung und eine maßgebliche Größe zum Aufzeigen des Pflanzenzustandes. Allerdings birgt die Blatttemperaturerfassung einige Schwierigkeiten. Dazu zählen unter anderem die nicht destruktive Anbringung an der Pflanze, Strahlungsschutz, adäquate Auswertung der Messspannung (μV) etc. (Gaastra 1959). Abhilfe – zumindest in einigen Bereichen – könnte der kombinierte Einsatz mit berührungslosen Messinstrumenten (remote measurements) wie präzisen IR- Thermometern und Kamerasystemen sein (Ehret *et al.* 2001).

6.2.3 Relative Luftfeuchte

Bei den Versuchen mit variiertem Luftfeuchte (siehe 5.2.4) konnte über die Varianten kein signifikanter Unterschied der Netto- Photosyntheserate ermittelt werden. Auch Mitchell (1936) konnte keine signifikanten Unterschiede bei der CO_2 - Fixierung bei *Pelargonium*, *Primula* und *Brassica oleracea* durch eine Reduzierung der relativen Luftfeuchtigkeit bei einer Temperatur von 25 °C ermitteln. Dabei wurde der Gaswechsel sowohl voll turgeszenter, als auch welker Blätter in Glaszylindern vermessen. Erst das Zusammenspiel einer erhöhten Temperatur und einer reduzierten relativen Luftfeuchte führte zu einer signifikanten Reduzierung der Fixierung. Bei einer relativen Luftfeuchtigkeit unterhalb von 30 % konnte dann ein einsetzendes Schließen der Stomata beobachtet werden (Mitchell 1936, Tibbitts 1979).

Sheriff (1977) konnte belegen, dass bei Pelargonien mit zunehmendem Wasserdampfdruckdefizit (Sättigungsdefizit) zur Umgebungsluft die Wasseraufnahme in gleichem Maß steigt und die Verluste so ausgeglichen werden. Da bei der eigenen Versuchsanstellung die Pflanzen stets gut mit Wasser versorgt waren (tägliche Anstaubewässerung), war die Kompensation der Verluste stets ausreichend gewährleistet, sodass kein absoluter Stomatenschluss auftrat. Das wiederum würde zu einer dramatischen

Reduzierung der CO₂- Fixierung führen, da das CO₂ die Stomata als Haupt-Eintrittspforte für den Gasaustausch nicht mehr passieren könnte (Farooq *et al.* 2009, Mitchell 1936).

Der in der Literatur für zahlreiche Arten beschriebene Stomataschluss bei einer niedrigen relativen Luftfeuchtigkeit (hohes Sättigungsdampfdefizit der Luft) zur Vermeidung übermäßigen Wasserverlusts (Taiz und Zeiger 2006) konnte nicht nachgewiesen werden.

6.2.4 CO₂- Konzentration

Die Untersuchungen zu den in Kapitel 5.2.1 durchgeführten Versuchen lieferten signifikante Unterschiede bei zahlreichen Vergleichen. Die ermittelten Werte sind mit denen aus der Literatur von der Größenordnung her vergleichbar (Kelly *et al.* 1990, Murthy *et al.* 2005, Gifford und Morison 1984). Besonders markant ist dabei der stets zu verzeichnende, signifikante Anstieg der Netto-Photosyntheserate bei einer Verdopplung der CO₂- Konzentration von 400 auf 800 vpm (siehe 5.2.1.1. und 5.2.1.3). Eine weitere Erhöhung der Konzentration brachte bei beiden Versuchsanstellungen keine weitere Steigerung mit sich. Allerdings war bei beiden Versuchsanstellungen eine hohe Einstrahlung zu verzeichnen, als im Vergleich zu dem im Herbst (siehe 5.2.1.2) durchgeführten Versuch, bei dem abweichende CO₂- Konzentrationen gewählt wurden. Zwar sind die einzelnen Varianten (200, 800 und 1500 vpm) signifikant unterschiedlich, aber ein Vergleich mit denselben Konzentrationsstufen (400, 800 und 1200 vpm) ist nicht anzustellen.

Die Abhängigkeit der Auswirkung der CO₂- Konzentration auf die Netto-Photosyntheserate ist stark temperaturabhängig (Vines *et al.* 1982). Indes sind bei dem durchgeführten Versuch (siehe 5.2.1.2) die Unterschiede der Varianten (CO₂- Konzentrationen) so gravierend, dass die Unterschiede trotz der geringen Einstrahlung signifikant sind.

Eine bei allen destruktiven Bonituren der Versuchsvarianten signifikant höhere Blattfläche bei einer Erhöhung der CO₂- Konzentration wurde auch von Morison und Gifford (1984) beobachtet. Bei den destruktiven Bonituren konnte über alle Versuche jeweils eine Erhöhung der Blattfläche sowie der Frischmasse festgestellt werden. In sämtlichen untersuchten Fällen war die prozentuale

Zunahme der Frischmasse höher, als die der Blattfläche und kann mit einer unter erhöhter CO₂-Konzentration einsetzenden Zunahme der Blattdicke erklärt werden (Kelly *et al.* 1990).

Eine kleine, aber dennoch vorhandene Quelle für Ungenauigkeiten bei der Bestimmung der Netto-Photosynthese war der Eintrag von CO₂ durch das Substrat, der bei den Berechnungen nicht weiter berücksichtigt wurde. Nach Wildung *et al.* (1975) beträgt die Bodenrespirationsrate bei einem Volumen von 200 cm² (ca. 500 g) ca. 0,5 g C m⁻² d⁻¹ bei 18 - 24 °C, was bei der Annahme von reinem CO₂ etwa 0,0102 µmol m⁻² s⁻¹ entspricht. Diese Messungen wurden auf biologisch intakten Graslandböden mit einer hohen Bodenaktivität durchgeführt.

Um einen eindeutigen Beweis im Hinblick auf die Kompensationsmöglichkeiten der Netto-Photosyntheserate bei reduzierter Einstrahlung durch eine erhöhte CO₂-Konzentration erbringen zu können, hätte ein geändertes Versuchssetup mit weiteren TPK durchgeführt werden müssen, da neben dem Faktor Schattierung auch der Faktor CO₂-Konzentration innerhalb einer Versuchsreihe variiert werden müsste. Indirekt kann dieser Nachweis dennoch erbracht werden.

6.3 Respiration

Untersuchungen bei zahlreichen Pflanzenspezies belegen, dass Pflanzen etwa 33% des in der Photosynthese fixierten Kohlenstoffs durch die Respiration wieder abgeben (Mcree und Amthor 1982). Andere Arbeiten beziffern den Anteil auf 50 % des gesamten, aus der Photosynthese gewonnenen Kohlenstoffs (abzüglich der Photorespiration), wodurch dieser Anteil dann für Wachstum, Vermehrung und Nährstoffversorgung nicht mehr verfügbar ist (Ryan 1991). Damit ist die Respiration ein eminent wichtiger, den Biomasseaufbau maßgeblich beeinflussender Prozess und detaillierte Kenntnisse zur Reduzierung der Respiration sind von großer Bedeutung. Nach Ryan (1991) liegt die Respiration bei einer Vielzahl von Pflanzen im Mittel bei etwa zwei µmol m⁻² s⁻¹. Auch Atkin und Tjoelker (2003) konnten für zahlreiche Arten eine

Respiration in dieser Größenordnung ermitteln. Dies deckt sich quantitativ sehr gut mit den Ergebnissen in der vorliegenden Arbeit.

Bei der Erfassung der Respiration in den Versuchen wurde von einer System-Gesamt-Respiration ausgegangen und die Bodenrespiration – die Summe aller metabolischen Prozesse, die zu einer Freisetzung von CO₂ aus dem Boden (Substrat) führen (Lundegård 1927) – nicht weiter berücksichtigt. Durch das relativ kleine Volumen der Versuchstöpfe, der sehr geringen mikrobiellen Aktivität und quantitativ vernachlässigbaren Abbauprozessen des organischen Materials (Torfsubstrat) ist das zumindest für die Betrachtung des Substrats legitim (Singh und Gupta 1977). Bezogen auf die reine Respiration der Wurzeln gibt es in der Literatur nur sehr wenige Angaben (Poorter *et al.* 1988). Gifford *et al.* (1985) beziffern diese für Weizen, der in großvolumigen Containern kultiviert wurde, auf 30 bis 40 nmol g⁻¹ h⁻¹. Die Werte sind sehr niedrig und damit vernachlässigbar.

Da mit Ausnahme der Schattierversuche bei sämtlichen Versuchsanstellungen und folgenden Vergleichen dieselbe Einstrahlung vorherrschte, wurden die gezeigten Ergebnisse nicht mit den Einstrahlungsdaten korrigiert

6.3.1 Einstrahlung

Eine signifikante Abhängigkeit der Respiration zur Einstrahlung konnte festgestellt werden (siehe 5.3.1.1). Mit zunehmendem Schattiergrad wird die Respiration vermindert. Sowohl die nachts gemessenen, als auch die über eine Umformung des P_n-Modells berechneten Respirationsraten ($R_d = -\alpha \cdot I_{LCP}$, siehe 4.3.1.3) liegen über alle Varianten mit zunehmendem Schattiergrad tiefer. Diese Ergebnisse sind über alle Messungen konsistent. Den Effekt einer Reduzierung der Respiration durch Reduzierung der Einstrahlung konnten auch Brooks und Farquhar (1985) nachweisen. Reich *et al.* (1998) gehen davon aus, dass die Dunkelrespiration proportional mit der maximalen Netto-Photosynthese (P_{n max}) ansteigt. Als Begründung für diese Variation kann eine zunehmende Produktion von Stärke, oder allgemeiner Kohlenhydraten, am Tag bei einer höheren Einstrahlung angeführt werden, was wiederum eine erhöhte Respirationsrate zur Folge hat (Brooks und Farquhar 1985, Hurry *et al.* 2005, Noguchi 2005,

Reich *et al.* 1998). Bei den ungeschattierten Varianten vermehrt gebildete Metabolite werden auch vermehrt veratmet und stehen somit nicht für eine Erhöhung der Biomasse (siehe 5.2.3.1.2, 5.2.3.2.2 und 5.2.3.3.2) zur Verfügung. Noguchi (2005) argumentiert für diesen Fall mit einer Reduzierung von Photosynthaten (Produkte der Photosynthese, z.B. Kohlenhydrate) und damit reduzierten 'Kosten' für die Aufrechterhaltung energieintensiver Stoffwechselprozesse.

Untersuchungen von Sims und Pearcy (1997) belegen, dass der Transfer von Pflanzen von geringer zu hoher Einstrahlung zu einer Anpassung der Respiration, nicht aber zu einer Anpassung der Photosyntheserate führt. Auf die durchgeführten Versuche übertragen, erfolgte eine Erhöhung der Respirationsrate demnach sowohl durch die reduzierte Einstrahlung, als auch durch den Transfer der Versuchspflanzen von den Tischen im Gewächshaus in die geschattierten TPK.

Untersuchungen, die den Langzeiteinfluss reduzierter Einstrahlung auf die Respiration untersuchen sind nur spärlich vorhanden. Stattdessen befasst sich eine Mehrheit der Autoren mit dem Abklingen der Respiration infolge einer einsetzenden Belichtung in variierten Intensitäten bzw. mit dem Anteil der Dunkelrespiration (R_d) am Tage (Villar *et al.* 1995). In zahlreichen wissenschaftlichen Veröffentlichungen wird die Respiration direkt mit der Steigung der Netto- Photosyntheserate korreliert (Reich *et al.* 1998, Ye 2007, Ye *et al.* 2010). Da diese bei den geschattierten Varianten geringer ausfällt, kann auch das als Zeichen der reduzierten Respirationsraten in Folge einer reduzierten Einstrahlung gewertet werden.

6.3.2 Blattfläche

Die in den Versuchen ermittelte signifikante Korrelation zwischen der Zunahme der Blattfläche und dem Anstieg der Respirationsrate wird auch durch die Literatur belegt. Diese Zunahme wird als eine logische Konsequenz der erhöhten Anzahl an Mitochondrien mit zunehmender Blattfläche und dementsprechend an den Respirationsprozessen beteiligter Zellorganellen gewertet (Griffin *et al.* 2000, Noguchi 2005).

Da jedoch bei den für die Untersuchungen ausgewählten Versuchen auch die Einstrahlungsbereiche (in besonderem Maße bei den Schatterversuchen) variierten (siehe 5.3.1.2), bleibt der exakte Nachweis der blattflächenabhängigen Respiationsveränderung in der vorliegenden Arbeit offen. Durch Einbringung der Versuche nach KAE wurden weitere Vergleichsvarianten hinzugefügt, die zumindest für zwei Vergleiche (V5 und V7) einen identischen Einstrahlungsbereich aufwiesen.

Es erscheint schwierig, den genauen Effekt der Blattfläche auf die Respiration anhand der möglichen Vergleichspaarungen der vorliegenden Versuche zu bestimmen.

Wie in 6.3.1 beschrieben übt die Einstrahlung einen deutlichen Effekt auf die Respiration aus. Diesen gilt es durch eine geänderte Versuchsdurchführung exakt zu bestimmen. Dazu müssten Versuche unter gleichen Bedingungen, insbesondere gleichen Einstrahlungswerten, durchgeführt werden. Um eine unterschiedliche Blattfläche bei identischen Kulturbedingungen zu erreichen, könnten Pflanzen mit unterschiedlichem LAI_{Beginn} als Varianten eingesetzt werden. Aber auch hier ist die eindeutige Vergleichbarkeit zumindest zu hinterfragen, da ein unterschiedliches Pflanzen- oder Blattalter ebenfalls zu einer Veränderung der Respiration führt (Brooks und Farquhar 1985, Tissue *et al.* 2002).

Diese grundsätzliche Diskussion zum Einfluss der Blattfläche gilt in weiten Teilen auch für die Transpiration (siehe 6.4.2) und wird dort nicht erneut aufgeführt.

6.3.3 Temperatur

Anhand der durchgeführten Versuche konnte ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Respiration und der Temperatur in Form einer Zunahme mit steigender Temperatur aufgezeigt werden. Auch Evensen und Olson (1992) konnten bei *Pelargonium x domesticum* einen Anstieg der Respiration mit steigender Temperatur aufzeigen. Die dort ermittelten Werte liegen bei der Sorte 'Majestic' bei $-1,5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (bei 16 °C Nachttemperatur) und sind damit vergleichbar mit den in den vorliegenden Versuchen ermittelten Werten. Die von Raison (1980) beobachtete, deutliche Abnahme der Respiration bei

Temperaturen um 10 °C konnte anhand der vorliegenden Ergebnisse ebenfalls belegt werden. In einem Temperaturbereich von 0 – 30 °C verringert sich die Respiration im 10 °C Intervall um den Faktor zwei (Atkin und Tjoelker 2003, Taiz und Zeiger 2006). Diese Werte konnten in einer ähnlichen Ausprägung auch in den vorliegenden Versuchen beobachtet werden $-1,05 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($\pm 0,54$) bei 10 °C, $-1,49 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($\pm 0,81$) bei 18 °C und $-2,67 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($\pm 1,12$) bei 30 °C.

Ow *et al.* (2007) konnten bei ihren Untersuchungen ebenfalls einen signifikanten Anstieg der Respiration durch eine Erhöhung der Temperatur in einem Bereich von 15 °C bis 25 °C belegen. Dabei stellten sie fest, dass, obgleich die Respiration anstieg, die Netto- Photosyntheserate von einer Temperaturerhöhung gänzlich unbeeinflusst blieb. Diese Ergebnisse decken sich exakt mit den in dieser Arbeit gefundenen Resultaten und deuten auf eine abweichende physiologische Wirkung des Klimaparameters Temperatur bezüglich der Respiration und der Netto- Photosyntheserate hin. Für diese ungleiche Wirkung der Temperatur ist nach Atkin und Tjoelker (2003) wahrscheinlich das Coenzym Q₁₀ (auch Ubichinon-10 oder Q₁₀) mitverantwortlich, die genaue Wirkweise aber derzeit noch nicht bekannt. Obgleich bereits bekannt ist, dass – physiologisch betrachtet – eine Reduzierung der Enzymkapazität zu einer Reduzierung der Respiration mit abnehmender Temperatur führt, sind insbesondere die zugrunde liegenden Faktoren der dynamischen Reaktion der Respiration auf Kurz- und Langzeit Temperaturunterschiede (Akklimation) unbekannt (Atkin und Tjoelker 2003).

6.3.4 Relative Luftfeuchte

Auf Grundlage der ermittelten Daten konnte ein signifikanter Unterschied zwischen den Versuchsvarianten (rF: 45 %, 65 % und 90%, siehe 5.3.2.3) ermittelt werden. Obgleich diese Unterschiede bei den Daten für die Netto- Photosyntheserate nicht nachgewiesen werden konnten, erscheinen sie dennoch schlüssig im Gesamtkontext. Werden die Daten der destruktiven Bonituren hinzugezogen, so fällt auf, dass die Unterschiede, in einigen Fällen statistisch signifikant, in allen Fällen aber dem Trend der Respirationsdaten

folgen. Demnach stehen die Werte der Boniturparameter Blattfläche, Frisch- und Trockenmasse, sowie Höhe im Einklang mit der gemessenen Respiration, wobei gilt, je höher die Respiration ausfällt, desto geringer die absoluten Werte der Boniturparameter.

Wissenschaftliche Arbeiten, die die Zusammenhänge zwischen der relativen Luftfeuchte bzw. dem Sättigungsdampfdefizit der Umgebungsluft und der Respiration untersuchen, sind nur spärlich vorhanden.

6.3.5 CO₂-Konzentration

Bei der Betrachtung der Respiration in Abhängigkeit von der CO₂-Konzentration konnten bei einigen Untersuchungen signifikante Unterschiede festgestellt werden. Nach Poorter *et al.* (1988) erhöht sich die Respiration zunächst durch eine Erhöhung der CO₂-Konzentration von 350 auf 700 µl l⁻¹. Die ermittelte Steigerung war allerdings nur in den ersten 14 Tagen nach Versuchsbeginn zu beobachten. In den folgenden 16 Tagen war die Respiration dann nur geringfügig und nicht signifikant erhöht. Da der Zeitraum der ersten 14 Tage nach Versuchsbeginn in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt wurde, stimmen zumindest die gezeigten Ergebnisse sehr gut mit den Angaben aus der Literatur überein. Besondere Beachtung sollte dabei dem Vergleich zwischen der 800 vpm Variante mit der 1200 und 1500 vpm Variante geschenkt werden. Hier führt eine zusätzliche Erhöhung der CO₂-Konzentration zu einer deutlichen Abnahme der Respiration, was auch in der Literatur beschrieben wird (Bunce 2005, Jahnke 2001, Ryan 1991). Murthy *et al.* (2005) konnten dies auch für zahlreiche weitere Kulturen belegen, sodass von einem artübergreifenden Zusammenhang ausgegangen werden kann.

Der direkte Effekt von CO₂ auf die Enzyme der Respiration ist äußerst gering (Gonzales- Meler und Taneva 2005). Dadurch werden die Unterschiede bei den Respirationsraten zwischen den sehr niedrigen (200 vpm) und sehr hohen (1200 vpm und 1500 vpm) Konzentrationen mit hoher Wahrscheinlichkeit maßgeblich durch das jeweilige CO₂-Angebot beeinflusst.

Nach Tissue *et al.* (2002) und Griffin *et al.* (2000) steigt die Anzahl der Mitochondrien infolge zunehmender CO₂-Konzentration deutlich an und damit

die Mitochondriendichte je Bezugsgröße (Blattfläche). Auf der anderen Seite führte die gesteigerte Anzahl an Mitochondrien nicht zu einer Steigerung der Respiration bei ihren Untersuchungen. Nach Auffassung von Griffin et al (2000) geht diese Steigerung auf einen ebenfalls erhöhten Energiebedarf am Tag infolge der vermehrten Kohlenstofffixierung und damit einhergehend der gesteigerten Stoffwechselprozesse und erforderlichen Metabolite zurück. Zusätzlich setzt bei hohen CO_2 -Konzentrationen aber auch eine Konkurrenz zwischen benötigtem O_2 und vermehrt vorhandenem CO_2 ein, wodurch die Respiration in den Mitochondrien inhibiert wird (Gonzales-Meler und Taneva 2005).

Diese deutliche Reduzierung der Respiration bei hohen CO_2 -Konzentrationen kann auch im Kapitel Regelgenauigkeit des Systems (siehe 5.1.1) grafisch beobachtet werden. Die dargestellten Verläufe können – je Küvette – in zwei Bereiche unterteilt werden. Zum einen in den Bereich der aktiven Regelung am Tag, wo nur geringfügige Abweichungen zwischen Soll- und Istwert auftreten und den Bereich der CO_2 -Abgabe durch die Respiration (nachts), was einen teils deutlichen Anstieg der CO_2 -Konzentration bedingt. Es liegt die Vermutung nahe, dass ein Aspekt der Reduzierung der Respiration das CO_2 -Konzentrationsgefälle zwischen Interzellularräum der Pflanze und der hohen Konzentration der Küvettenluft ist.

6.4 Kondensat



Abb. 6.2: Kondensat an der Innenseite der TPK infolge einer Taupunktunterschreitung

Bei der Erfassung der aus dem System ausfallenden Kondensatmenge ist es unter bestimmten Versuchs- und Umgebungsbedingungen zu einer Unterschreitung der Taupunkttemperatur und damit zu einem Auskondensieren des Wasserdampfs an der Innenseite der den Pflanzenraum umgebenden Stegdoppelplatte gekommen (Abb. 6.2). Die 'no drop'-Beschichtung des

Materials verhinderte zwar zuverlässig das Auftreten von Tropfenbildung, war jedoch bei einer permanenten Wasserzufuhr ab einem bestimmten Punkt nicht mehr wirksam, sodass sich die ablaufenden Tropfen in der Wanne sammelten, in das Bewässerungsbehältnis geleitet wurden und so nicht über den Kippmechanismus geführt und damit der Erfassung entzogen wurden.

Die Transpirationsleistung von Pflanzen hängt von einer Vielzahl von Umgebungsfaktoren, maßgeblich der Einstrahlung, der Temperatur, der relativen Luftfeuchte und der CO₂-Konzentration, ab (Sellers *et al.* 1992). Da die Transpiration und damit die Transpirationsrate immer ein Zusammenspiel zahlreicher, gleichzeitig auftretender Stimuli ist, deren Einflüsse oftmals nicht sauber voneinander getrennt werden können, sind in der Literatur teilweise widersprüchliche Werte angegeben (Gates 1968). Ein entscheidender Faktor der Aussagekraft der eigenen Ergebnisse sind dabei die identischen Einstellungen und Sollwerte der weiteren Faktoren sowie Klimaeinstellungen der Versuche, da die Transpiration in einem sehr hohen Maß von weiteren Umweltfaktoren und deren Intensität abhängt (Stocker 1956).

Für die Vergleichsanstellung mit Werten aus der Literatur werden Kondensat und Transpiration synonym verwendet. Diese Annahme ist durch die unbekanntem zusätzlichen Ein- und Austräge (Evaporation, Kondensation an Innenwand und Bauteilen etc.) fehlerbehaftet, aber hinsichtlich des Verlaufs und der Größenordnung der Werte durchaus als Vergleich heranziehbar.

Ein wichtiger Effekt der Transpiration, der durch den Phasenübergang des Wassers von flüssig zu gasförmig auftritt, ist die Verdunstungskühlung. Durch diesen physikalischen Vorgang kann unter Extrembedingungen die Blatttemperatur deutlich abgesenkt werden, was sonst letale Folgen für das Blatt und letztlich die gesamte Pflanze hätte (Lamber *et al.* 2008). Gleichzeitig stellt die Transpiration durch den mitunter enormen Eintrag an Wasserdampf in die Gewächshausatmosphäre einen nicht zu vernachlässigenden Energie- (latente Wärme) und damit Kostenfaktor dar. Der energieintensive Phasenübergang entzieht der Gewächshausatmosphäre Energie, die dann, insbesondere nachts und bei kalter Witterung durch das Heizsystem zusätzlich bereitgestellt werden muss (Akyazi *et al.* 2015, Schuch 2014). Damit stellt die Reduzierung der Transpiration eines Pflanzenbestandes ein weiteres

Energiesparpotential dar. Eine Reduzierung der Transpiration durch kulturtechnische oder konstruktive (z.B. energiesparende) Maßnahmen innerhalb des Gewächshauses kann die Stoffströme und Transportwege von Nährstoffen innerhalb der Pflanze soweit beeinträchtigen, dass dies wiederum zu einer Nährstoffunterversorgung und damit Mangelsymptomen bei der Kultur führen kann (Tantau und Akyazi 2014).

6.4.1 Einstrahlung

Ein signifikanter Einfluss der Einstrahlung auf die Transpiration konnte bei den Versuchen in 5.3.3.1 nachgewiesen werden. Der anfänglich angenommene Einfluss einer lichtinduzierten Stomataöffnung (Scarth und Shaw 1950) wurde durch weitere Untersuchungen belegt und gleichzeitig eingeschränkt. Aktuelle Forschungsergebnisse belegen das Vorhandensein eines Regelmechanismus im Spaltöffnungsapparat, der eine Öffnung der Stomata durch Licht im Wellenlängenbereich von 430 – 450 nm (blau) induziert (Assmann 1993, Kinoshita *et al.* 2001). Mit einer Öffnung oder Schließung der Spaltöffnungen geht auch eine Veränderung der stomatären Leitfähigkeit einher (Collatz *et al.* 1991).

In den vorliegenden Versuchen konnte der Effekt der Lichtintensität durch die Verwendung von Schattiergewebe, also durch eine quantitative Reduktion der Gesamteinstrahlung auf die Pflanze, erfasst werden. Bedingt durch die Art und Weise der Versuchsanstellung, insbesondere dem Fehlen von Untersuchungen bei verschiedenen Wellenlängen, einer präzisen Erfassung der Lichtqualität sowie der (online-) Transpirationsdaten und / oder dem Grad der Stomataöffnung, sind weitere und tiefergehende Aussagen nicht zu treffen.

Insgesamt kommen potentiell mehrere Effekte, die auch in der Literatur gut beschrieben sind, zum Tragen. Zum einen ist die Transpiration eine direkte Wirkung auf die vom Blatt absorbierte Energiemenge (Nobel 2009, Pieruschka *et al.* 2010), die unter schattierten Bedingungen zwangsläufig geringer ausfällt. Demnach fällt auch deswegen die Transpiration geringer aus. Des Weiteren wird auch die Anzahl der Stomata je Blatt durch die Schattiermaßnahmen

beeinflusst und reduziert sich mit abnehmender Einstrahlungsintensität (Allard *et al.* 1991, Cooper und Qualls 1967).

6.4.2 Blattfläche

In sämtlichen durchgeführten Korrelationsanalysen, die den Einfluss zwischen Blattfläche und Transpiration untersuchten, konnte ein starker linearer Zusammenhang zwischen der Zunahme der Blattfläche und der Zunahme der Kondensatmenge erfasst werden. Dieser Zusammenhang wird auch in weiteren wissenschaftlichen Arbeiten erfasst (Nobel 2009, Vertessy *et al.* 1995). Die zur Korrelationsanalyse genutzten Daten wurden als Rohdaten, ohne vorangehende Blattflächenkorrektur, verrechnet. Bei den Berechnungen wurden die Tageswerte mit der Einstrahlung verrechnet, um so einstrahlungskorrigierte Werte zu erhalten.

Die Transpiration der Pflanzen läuft maßgeblich kontrolliert und über die Stomata ab. Diese fungieren als aktiv regelbarer Kanal für CO₂/O₂ (Photosynthese und Respiration) und ebenso für H₂O (Transpiration) (Willmer und Fricker 1983). Generell bedingt eine höhere Blattfläche auch eine höhere Anzahl von Stomata. Dabei gilt, dass voll entwickelte Blätter eine geringere Stomatadichte aufweisen, als juvenile (Muenscher 1915, Taiz und Zeiger 2006). Schletz (2008) konnte bei *P. zonale* unter optimalen Kulturbedingungen eine Stomatadichte von ca. fünf bis acht je mm² ermitteln. Die Stomatadichte auf einem Blatt kann allerdings auch innerhalb einer Art, abhängig von den äußeren Einflüssen und dem Entwicklungsstand deutlich variieren (Sreelakshmi *et al.* 2014, Willmer und Fricker 1983). So ermittelte Muenscher (1915), ebenfalls bei *P. zonale* eine mittlere Anzahl von 52 bis 210 Stomata, je nach Dauer und Datum (Jahreszeit) der Kultur.

Zu den beeinflussenden und für diese Untersuchungen relevanten Faktoren zählt in erster Linie die Einstrahlung, da die weiteren, einen maßgeblichen Einfluss ausübenden Klimaparameter, über alle Vergleiche konstant gehalten wurden (Temp.: 18/14 °C, rF: 75 %, CO₂: 800 vpm). Größere Blätter sowie eine höhere Anzahl dieser, bedingen auch eine höhere potentielle Absorptionsfläche für die auftreffende Strahlung. Nach Pieruschka *et al.* (2010) wird dadurch eine vermehrt ablaufende Umwandlung sensibler in latente Energie (Wasserdampf)

im Blatt forciert, was wiederum die Transpiration entlang des Gradienten des Wasserdampfdruckdefizits, durch die Stomata erhöht.

6.4.3 Temperatur

Anhand der durchgeführten Ergebnisse konnten ein Einfluss der Temperatur auf die Kondensatmenge festgestellt werden, der jedoch nicht über alle Varianten signifikant ist (siehe 5.3.3.3). Ein eindeutiger Trend der Versuchsergebnisse ist aber ersichtlich: Die Kondensatmenge nimmt mit zunehmender Temperatur zu. Dieser Zusammenhang wird auch in der Literatur beschrieben und ist, physikalisch betrachtet, dem größer werdenden Sättigungsdampfdefizit der Atmosphäre und damit der zunehmenden Differenz zwischen Küvettenluft und Interzellularraum geschuldet (Tibbitts 1979). Das wird verdeutlicht, wenn die jeweiligen Sättigungsdampfdruckdifferenzen nach Murray (1967) berechnet werden. Diese betragen für die Tageswerte bei 6 °C -0,3 kPa, bei 18 °C -0,6 kPa und bei 30 °C -1 kPa. Damit findet nahezu eine Verdopplung der Werte mit steigender Temperaturvariante statt.

Nach Moore *et al.* (2013) ist die Transpirationsrate in der Regel bei 20 °C – 30 °C am höchsten, da in diesem Bereich die Stomata bei zahlreichen Pflanzenarten am weitesten geöffnet sind. Das deckt sich mit den Ergebnissen in dieser Arbeit.

6.4.4 Relative Luftfeuchte

Die Versuchsergebnisse in 5.3.3.4 zeigen eine eindeutige Zunahme der Transpiration (Kondensatbildung) mit sinkender relativer Luftfeuchte und damit steigendem Sättigungsdampfdruckdefizit der Luft. Anhand der Ergebnisse konnte ein eindeutiger Datentrend aufgezeigt werden (102,2 ml m⁻² h⁻¹ [±38,2] bei 45 % rF, 89,4 ml m⁻² h⁻¹ [±32,9] bei 60 % rF und 56,6 ml m⁻² h⁻¹ [±38,3] bei 90 % rF). Dies deckt sich hinsichtlich des Verlaufs sehr gut mit den Ergebnissen aus der Literatur. Auch dort wird beschrieben, wie die Transpiration (porometrisch gemessene Flussrate) und die Wasseraufnahme bei *Pelargonium zonale* mit zunehmendem Sättigungsdampfdruckdefizit weiterhin ansteigen und die Stomata scheinbar nicht schließen. Diese Strategie wird als

Anpassung an den im Ursprung ariden Lebensraum der Pflanze verstanden (Sheriff 1977). Ein weiterer Anpassungsmechanismus ist ein hohes Blattwasserpotential innerhalb der Pflanzenzellen (Jiyue 1991). Durch die tägliche Anstaubbewässerung ist ferner davon auszugehen, dass das Substrat durchgängig feucht und eine konstante Wasserversorgung der Wurzeln gewährleistet war.

Als weiterer Beleg für diese Strategie können die Kurvenverläufe der Netto-Photosyntheserate in 5.2.4.1.1 herangezogen werden. Da Wasserdampf und CO₂ über denselben Weg in die bzw. aus der Pflanze gelangen (Taiz und Zeiger 2006) und die Kurvenverläufe sich nur marginal und statistisch nicht signifikant unterscheiden, kann auch dies als Beleg für einen ausbleibenden Stomataschluss mit zunehmendem Sättigungsdampfdefizit gewertet werden.

Die genauen physiologischen Vorgänge und Mechanismen der stomatären Reaktion auf den atmosphärischen Wassergehalt der Luft, bzw. der Blatt- Luft-Differenz, sind nach wie vor in weiten Teilen ungeklärt. Generell akzeptiert ist, dass mit steigender Differenz der stomatäre Leitwert abnimmt (Easmus und Shanahan 2002).

6.4.5 CO₂- Konzentration

Ein Einfluss der CO₂- Konzentration auf die Kondensatbildung konnte bei den durchgeführten Versuchen weder am Tag noch in der Nacht festgestellt werden. Die erzielten Ergebnisse weisen keine signifikanten Unterschiede und auch keinen Trend in den Daten auf.

In zahlreichen wissenschaftlichen Arbeiten wird vermittelt, dass die stomatäre Leitfähigkeit und damit in direkter Weise die Öffnung der Stomata unter anderem vom CO₂- Partialdruck der Luft abhängig ist. Dabei führt eine geringe CO₂- Konzentration in der Luft zu einem Öffnen, eine hohe CO₂- Konzentration zu einem Schließen der Stomata und damit einer Veränderung der Transpiration (Collatz *et al.* 1991, Hättenschwiler *et al.* 2002, Norby *et al.* 1999). Baker und Allen (1994) konnten bei Reis eine Abnahme der transpirierten Wassermenge um ca. 23 % bei einer Erhöhung der CO₂- Konzentration von 330 vpm auf 900 vpm feststellen. Auf der anderen Seite zeigten Shaer und Bavel (1987), deren Versuche nicht wie bei den vorangegangenen Autoren in

‘open- top chambers’ (nach oben offene Freilandversuchsanlage) im Feldeinsatz durchgeführt wurden, sondern unter kontrollierten Bedingungen mit der CO₂- Konzentration als einziger Variation, dass eine erhöhte CO₂- Konzentration nur marginale Unterschiede in der Transpirationsrate bedingte. Demnach sind die in der Literatur dargelegten Ergebnisse nicht konsistent. Das liegt unter anderem an den zahlreichen Einflüssen, die eine Reaktion der Stomata bedingen können. Zu diesen zählen Lichtintensität und Lichtqualität, Wasserstatus der Pflanze, relative Luftfeuchtigkeit (VPD), Verfügbarkeit verschiedener Metabolite, Blatttemperatur und eben auch der CO₂- Partialdruck der Luft (Nobel 2009, Schulze *et al.* 2002, Taiz und Zeiger 2006). Diese Reaktionen sind aber zum Teil sehr unterschiedlich zwischen verschiedenen Arten und auch sehr stark von dem Zusammenwirken von weiteren Umweltfaktoren abhängig (Nobel 2009). Zahlreiche Autoren verstehen die Reaktionen der Stomata auf diese Einflüsse nicht als starres System, sondern eher als Regel- oder Rückkopplungsschleife (Aubinet *et al.* 1989, Collatz *et al.* 1990, Sellers *et al.* 1992, Tricker *et al.* 2005). Farquhar und Sharkey (1982) vergleichen das System mit einer Kosten- Nutzen- Analyse, wobei auf der einen Seite die Reduzierung des Wasserverlusts durch das Schließen der Stomata und auf der andern Seite die Zugewinne durch eine mögliche Steigerung der Netto- Photosynthese bei geöffneten Stomata steht. Da bei den hier durchgeführten Versuchen die Bedingungen nach KAE eingestellt waren, die Pflanzen eine gute Wasser- und Nährstoffversorgung hatten und die solare Einstrahlung in die TPK relativ hoch war, ist von keinem limitierenden Faktor auszugehen, der einen möglichen Stomataschluss bedingt hätte. Durch diesen wäre der Hauptaufnahmeweg für CO₂ geschlossen, was zu einer deutlichen Reduktion der Photosynthese geführt hätte (Farooq *et al.* 2009).

7. Fazit und Ausblick

Mit der vorliegenden Arbeit konnte gezeigt werden, dass mit Hilfe des entwickelten Systems Untersuchungen zu unterschiedlichen (extrem-) Klimabedingungen reproduzierbar durchgeführt werden können. Zudem war es möglich, die online erfassten und anhand von destruktiven Bonituren gemessenen Werte in einem Gesamtkontext, der die Auswirkungen auf zahlreiche, zusammenhängende Reaktionsbereiche der Pflanze beschreibt, zu erfassen.

In sich anschließenden Arbeiten müssen die Ergebnisse in einem größeren Maßstab, wie zum Beispiel in dem ZINEG- Gewächsaus, verifiziert werden.

Sämtliche Küvettensysteme, die zur Untersuchung von Pflanzenreaktionen herangezogen werden, beeinflussen mehr oder weniger die Interaktion Pflanze – Umwelt und liefern so niemals gänzlich unbeeinflusste Ergebnisse. Diese Einflussnahme gilt und galt es bei diesen Untersuchungen zu minimieren (Gaastra 1959). Allerdings bleibt die Frage nach einer geeigneten und die Pflanzen oder den Bestand gänzlich nicht beeinflussenden Messmethodik. Für den Vergleich der Ergebnisse innerhalb der Gesamtheit der hier durchgeführten Versuchsanstellung, also Versuch X mit Versuch Y, bzw. Variante X mit Variante Y ist die Beantwortung von geringer Relevanz, da alle Pflanzen dem selben Einfluss durch das Messsystem ausgesetzt waren. Aber die Frage zur Übertragbarkeit der Ergebnisse (Modelle) muss gestellt werden, da bei der Versuchsanstellung mit einer relativ kleinen Anzahl an Versuchsgliedern (Versuchspflanzen) in einem artifiziiellen Systemen gearbeitet wurde und die Übertragbarkeit der Resultate auf größere und natürliche Einheiten oder ganze Ökosysteme (upscaling) in weiteren Untersuchungen noch erfasst werden muss (Jarvis 1995, Körner *et al.* 2007).

In diesem Zusammenhang müssen die vorliegenden Ergebnisse in weiterführenden Arbeiten und Forschungsvorhaben in der Praxis bzw. auf einer höheren Skalierungsebene validiert werden. Hierzu würde sich das ZINEG Forschungsgewächshaus in Hannover Ahlem als äußerst geeignet erweisen.

In der vorliegenden Arbeit wurden signifikante Einflüsse einiger Klimaeinstellungen auf verschiedene Pflanzenreaktionen (z.B. P_n , R_d , KW, aber auch destruktive Boniturparameter) ermittelt. Allerdings determinieren diese Kriterien nicht den Marktwert eines Produkts. Hier sind Wuchseigenschaften, Blütenausbildung etc. die entscheidenden Faktoren. Bei den durchgeführten Untersuchungen konnte nicht immer eine Korrelation zwischen den CO_2 basierten Ergebnissen (z.B. P_n oder R_d) und den destruktiven Bonituren ermittelt werden. Selbst die Zusammenhänge zwischen Daten von P_n und den finalen Trockenmassen sind in einigen Versuchen nicht eindeutig erkennbar. Ähnliche Beobachtungen machte auch Ottosen (1990) bei verschiedenen Kulturen und auch innerhalb einer Art, bei verschiedenen Klonen. Sesták et al (1985) konnten eine hohe Korrelation zwischen P_n und dem Biomasseaufbau bei jungen Blättern, nicht aber bei älteren und seneszenten Blättern feststellen. Infolge der Ontogenese und in Abhängigkeit von Umweltbedingungen, verändern sich Anforderungen in der Verteilung und des Bedarfs für Kohlenhydrate und der Metabolite durch eine Verschiebung der Erfordernisse im Stoffwechsel für Aufrechterhaltung, Wachstum und Speicherung (Larcher 2003).

Die Wahl der Modellpflanze *P. zonale* kann kontrovers diskutiert werden. Auf der einen Seite bietet die Kultur ein enorm hohes Marktpotential mit hohen Absätzen und einer hohen Importanz für die Märkte (www.destatis.de), die sich zudem sehr gut vegetativ vermehren lässt, wodurch sich der Einfluss der genetisch bedingten Ergebnisabweichung in den Versuchsergebnissen ausklammern lässt. Auf der anderen Seite handelt es sich bei Pflanzen der Gattung *Pelargonium* generell um sehr robuste Pflanzen, die eine hohe Toleranz für abiotische Stressfaktoren besitzen (Montero *et al.* 2001, Rajeswara Rao *et al.* 1996, Sánchez- Blanco *et al.* 2009, Welander 1983).

Die gemessenen Reaktionen der Pflanzen wurden über sämtliche Versuche mit einer konstanten Ventilatorumdrehzahl und dementsprechend mit demselben Luftstrom durch die Küvette durchgeführt. Messungen mit einem Hitzdraht-Anemometer (Ergebnisse nicht gezeigt) ergaben eine Windgeschwindigkeit von ca. $0,2 \text{ m s}^{-1}$. Eine Vergleichbarkeit mit einem konventionellen Gewächshaus

war damit gegeben. Nobel (2009) gibt eine übliche Windgeschwindigkeit von $< 0,4 \text{ m s}^{-1}$ als Versuchsbedingung bei Pflanzenversuchen unter kontrollierten Bedingungen an. Allerdings ist die Luftbewegung um die Pflanze eine wichtige Größe, die wiederum die Transpiration in hohem Maße beeinflusst (Aubinet *et al.* 1989, Gasstra 1959, Nobel 2009), was als weitere Versuchsvariante Berechtigung gefunden hätte. Eine genauere Erfassung der (Evapo-) Transpiration, die eine entscheidende Größe zur Ermittlung des Pflanzenzustandes und der Reaktion auf spezifische Klimabedingungen ist, muss bei weiterführenden Studien mit dem dargestellten System realisiert werden. Dies kann in Form von Waagen geschehen, die in die TPK integriert werden, Messdaten online erfassen und eine direkte Korrelation mit den untersuchten Parametern ermöglichen würden.

Eine gesteigerte Untersuchungsvielfalt der TPK könnte durch die Anbringung einer Lichtquelle innerhalb der Küvetten gewährleistet werden. Die verwendete Zusatzbelichtung musste aufgrund der Wärmeentwicklung einen ausreichend hohen Abstand zu den Kunststoffteilen der Küvette aufweisen. Dadurch war die zusätzlich erzielte Lichtintensität nur sehr gering (ca. $40 - 50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ je TPK). Mit dem derzeit in weiten Zügen noch als Forschungsfeld betrachteten Bereich der LED Belichtung im Unterglasanbau können damit weitreichende Untersuchungsmöglichkeiten geschaffen werden. Die Auswirkungen unterschiedlicher Lichtqualitäten auf Pflanzen und teilweise sogar innerhalb derselben Art sind mannigfaltig (Appelgren 1990, Bornwaßer 2011, Kim *et al.* 2004). Ferner kann, bedingt durch die kompakte Bauform der LEDs, auch eine Art Gitterstruktur mit lichtdurchlässiger Anordnung der LEDs in modularer Bauweise in den TPK platziert werden, wodurch auch der Einsatz von LEDs als Zusatzbelichtung getestet werden könnte (Barta *et al.* 1992, Bula *et al.* 1991).

Die einzigartige Möglichkeit der Konstanthaltung sämtlicher Klimaparamater, in Kombination mit variabel steuerbaren Lichtverhältnissen, sowohl die Quantität, als auch die Qualität betreffend, ermöglichen intensive und aussagekräftige Forschungsvorhaben zu zahlreichen Forschungsschwerpunkten.

8. Zusammenfassung

Die Bedeutung der Effizienzsteigerung, insbesondere durch eine möglichst hohe Reduzierung des Energieeinsatzes im Unterglasanbau ist von zunehmendem Interesse und betrifft die gesamte Gartenbaubranche (Hoffmann und Rath 2013, Huges 2000; Solomon *et al.* 2007). Die entsprechenden Produktionszahlen und umgesetzten Beträge verdeutlichen diese Notwendigkeit, da ein enormer Anteil der Produktionskosten für den Faktor Energie aufgebracht werden muss, aber gleichwohl durch geeignete Maßnahmen deutlich reduziert werden kann (Rout *et al.* 2008, Tantau 1998). In einem bundesweiten Kooperationsprojekt mit Standorten in Berlin, Hannover, Osnabrück und Schifferstadt wurde versucht, in einem systemorientierten Ansatz, also der Kombination technischer Innovationen einhergehend mit angepassten Kulturprogrammen, einer deutlichen Energieeinsparung Rechnung zu tragen. Im Rahmen der technischen Innovationen und abgeänderten Betriebsweise verändern sich die Klimabedingungen in einem Gewächshaus mitunter deutlich, was wiederum zum Teil mannigfaltige Auswirkungen auf die Pflanzenbestände mit sich bringen kann (Akyazi *et al.* 2015, Akyazi und Tantau 2012, Tantau *et al.* 2011).

Im Rahmen der hier verfassten Arbeit sollten die in Niedrigenergie-Gewächshäusern, wie zum Beispiel des ZINEG- Forschungsgewächshauses in Hannover Ahlem, entstehenden, zum Teil extremen Klimabedingungen für Pflanzen auf die jeweiligen Reaktionen der Pflanzen untersucht werden. Insbesondere die Fragen zu den Integrations- und Kompensationspotentialen der Pflanzen standen dabei im Fokus der Untersuchungen. Als Messkriterien der Pflanzenreaktionen auf die Extrembedingungen wurden die Auswirkungen auf die Netto- Photosyntheserate, die Respiration, die Evapotranspiration (online, nicht destruktiv) sowie den Habitus der Pflanze (destruktiv) erfasst.

In drei eigens für diese Untersuchungen entwickelten, vollautomatisierten Tageslicht- Pflanzenküvetten wurden zahlreiche, zuweilen extreme, Sollwerteeinstellungen festgelegt. Nach anfänglichen Messungen der systemimmanenten Eigenschaften der Mess- und Regeltechnik (Einstellungen

der Durchflüsse, Bewässerungseinstellungen, Kalibrierung der Sensoren, Untersuchungen zur Regelgenauigkeit etc.) wurde eine anschließende Überprüfung der Mess- und Regeltechnik mit einhergehender Dichtigkeitsmessung des Gesamtsystems vorgenommen.

Als Versuchspflanze diente *Pelargonium zonale* var. 'Präludium', die in ausreichender Stückzahl aus Stecklingen einer Mutterpflanzenkultur generiert wurden. Insgesamt wurden 34 Pflanzen je Variante (102 je Versuch) für die Untersuchungen verwendet. Zur Durchführung der Versuche wurde je Versuchsdurchgang ein Faktor der regelbaren Klimaparameter (Temperatur, CO₂-Konzentration, relative Luftfeuchtigkeit und Schattiergrad) in dreifacher Ausprägung (Variante) untersucht.

Die Regelgenauigkeit und Dichtigkeit des Systems konnte mit sehr guten Ergebnissen und nur geringen Streuungen überzeugen (siehe 5.1).

Bei den Versuchen zur CO₂-Konzentration bewirkte eine Steigerung dieser bis 800 vpm stets eine signifikante Steigerung der Netto-Photosyntheserate und brachte in der Regel auch eine Erhöhung der Werte der destruktiven Bonituren mit sich. Über diese Konzentration hinaus konnten signifikante Unterschiede nur bei einer verringerten Einstrahlung aufgezeigt werden. Letzteres galt auch für die Respirationmessungen. Die Evapotranspiration veränderte sich nicht durch eine erhöhte CO₂-Konzentration.

Die Temperatureinstellungen wirkten sich nur in Kombination eines hohen Einstrahlungsbereiches, einhergehend mit sehr niedrigen Temperaturen, signifikant auf die Netto-Photosyntheserate aus. Bezüglich des Einflussfaktors Temperatur wurden bei den Untersuchungen zur Respiration und Evapotranspiration in der Mehrzahl der Versuche signifikante Unterschiede gefunden und in sämtlichen Untersuchungen ein eindeutiger Trend ermittelt. Dabei stiegen sowohl die Transpiration als auch die Respiration mit zunehmender Temperatur an.

Untersuchungen zur relativen Luftfeuchtigkeit lieferten bezüglich der Netto-Photosyntheserate keine signifikanten Unterschiede und zeigten sehr identische Kurvenverläufe. Davon abweichend nahmen die Werte der Boniturparameter mit steigender relativer Luftfeuchte zu und waren zwischen den Varianten 45 % rF und 90 % rF auch mehrheitlich signifikant erhöht. Bei

den Respirations- und Transpirationsmessungen konnten eindeutige Trends aufgezeigt werden, die bei zahlreichen Vergleichen auch signifikante Unterschiede lieferten. Demnach verringerten sich die Respirations- und Transpirationsraten, mit einer Zunahme der relativen Luftfeuchtigkeit.

Die Anwendung des Schattiergewebes zur Reduzierung der Einstrahlung lieferte in den vergleichbaren Bereichen der Netto- Photosyntheserate, also den Bereichen der gleichen Einstrahlung keine Unterschiede. Ein Vergleich der destruktiven Boniturparameter wies bei den Parametern Blattfläche, Frisch- und Trockenmasse sowie Höhe bei der ungeschatteten Variante stets niedrigere Werte und bei den Parametern Anzahl der Blätter und Anzahl geschlossener und geöffneter Blüten stets höhere Werte auf. Diese benannten Unterschiede waren in der Regel auch signifikant.

Anhand der Versuche respektive Ergebnisse konnte gezeigt werden, dass mit dem entwickelten System wichtige Parameter zur Feststellung des Einflusses von Klimasituationen online erfasst und reproduzierbar wiedergegeben werden können. Folglich kann das beschriebene System zur Erfassung der Reaktionen der Pflanze auf teils extreme Klimabedingungen eingesetzt werden. Insbesondere die Regelgenauigkeit und die weiten Sollwert-Einstellungsbereiche des Systems bieten Spielraum für zahlreiche weitere Untersuchungsmöglichkeiten.

Eine weitere zu untersuchende Fragestellung betrifft die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf (nächst) größere Maßstäbe. Dazu sollten die Ergebnisse und Einstellungen im ZINEG Gewächshaus angewendet und untersucht werden.

Durch eine Ausstattung der Tagelicht- Pflanzenküvetten mit LEDs würden weitere, mannigfaltige Untersuchungsmöglichkeiten entstehen.

Der Aufbau weiterer Tageslicht- Pflanzenküvetten würde die Möglichkeit schaffen, weitere Varianten zeitgleich und unter identischen Einstrahlungsbedingungen zu testen.

9. Literaturverzeichnis

Akyazi, G., Beßler, B., Horscht, M., Knösel, K., Ludolph, D. und Tantau, H.-J. (2015). Gewächshaus mit maximaler Wärmedämmung, ZINEG- Haus-Hannover, in: Niedrigenergiegewächshäuser, Ergebnisse des ZINEG-Verbundprojekts. KTBL- Schrift 509

Akyazi, G. und Tantau, H.-J. (2012). ZINEG – the low energy greenhouse: an innovative greenhouse with new climate control strategies supported by phytomonitoring data. *Acta Horticulturae* 956: 39 – 42

Akyazi, G. und Tantau, H.-J. (2014). The use of daylight plant cuvettes to measure climate parameters independently. *Acta Horticulturae* 1037: 509 – 515

Allard, G., Nelson, C.J. und Pallardy, S.G. (1991). Shade effects on growth to tall fescue: I. Leaf anatomy and dry matter partitioning. *Crop Science* 31 (1): 163 – 167

Atkin, O.K. und Tjoelker, M.G. (2003). Thermal acclimation and the dynamic response of plant respiration to temperature. *Trends in Plant Science* 8 (7): 343 – 351

Avola, G., Cavallaro, V., Patanè, C. und Riggi, E. (2008). Gas exchange and photosynthetic water use efficiency in response to light, CO₂ concentration and temperature in *Vicia faba*. *Journal of Plant Physiology* 165 (8): 796 – 804

Amer, F.A. und Williams, W.T. (1958). Drought- resistance in *Pelargonium zonale*. *Annals of Botany* 22 (3): 369 – 379

Appelgren, M. (1990). Effects of light quality on stem elongation of *Palargonium* in vitro. *Scientia Horticulturae* 45 (3): 345 – 351

Arndt, M., Nairz, O., Vos- Andreae, J., Keller, C., van der Zouw, G. und Zeilinger, A. (1999). Wave- particle duality of C₆₀ molecules. *Nature* 401 (6754): 680 – 682

Assmann, S.M. (1993). Signal transduction in guard cells. *Annual Review of Cell Biology* 9: 345 – 375

Atkin, O.K. und Tjoelker, M.G. (2003). Thermal acclimation and the dynamic response of plant respiration to temperature. *Trend in Plant Science* 8 (7): 343 – 351

Attridge, T.H. (1990). Light and plant responses: a study of plant photophysiology and the natural environment. Cambridge University Press, 1. Aufl.

Aubinet, M., Deltour, J und Helleux, D.D. (1989). Stomatal regulation in greenhouse crops: analysis and simulation. *Agricultural and Forest Meteorology* 48 (1/2): 21 – 44

Baker, J.T. und Allen, L.H. (1994). Assessment of the impact of rising carbon dioxide and other potential climate changes on vegetation. *Environmental Pollution* 83 (1/2): 223 – 235

Barta, D.J., Tibbitts, T.W., Bula, R.J. und Morrow, R.C. (1992). Evaluation of light emitting diode characteristics for a space- based plant irradiation source. *Advances in Space Research* 12 (5): 141 – 149

Boote, K.J. und Pickering, N.B. (1994). Modelling photosynthesis of row crop canopies. *HortScience* 29 (12): 1423 – 1434

Bjorkmann, O. (1981). Responses to different quantum flux densities, in: *Physiological Plant Ecology I, responses to the physical environment*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1. Aufl.

Bornwaßer, T. (2011). Energieeffizienzsteigerung pflanzlicher In- vitro-Kulturverfahren mit Hochleistungs- LED- Belichtungssystemen. Dissertation an der Leibniz Universität Hannover, Naturwissenschaftliche Fakultät, FG Biosystem- und Gartenbautechnik

Boyer, J.S. (1982). Plant productivity and environment. *Science* 218: 443 – 448

Brauer, M. (2006). Untersuchungen zu technischen Möglichkeiten der Gestaltung des Mikroklimas in geschlossenen Innenräumen. Dissertation an der Humboldt Universität zu Berlin, Landwirtschaftlich- Gärtnerische Fakultät, FG Biosystemtechnik

Brooks, A. und Farquhar, G.D. (1985). Effect of temperature on the CO₂/O₂ specificity of ribulose- 1,5- biphosphate carboxylase/oxygenase and the rate of respiration in the light. *Planta* 165 (3): 397 – 406

Bula, R.J., Morrow, R.C., Tibbits, T.W., Barta, D.J., Ignatius, R.W. und Martin, T.S. (1991). Light- emitting diodes as a radiation source for plants. *HortScience* 26 (2): 203 – 205

Bunce, J.A. (2005). Response of respiration of soybean leaves grown at ambient and elevated carbon dioxide concentrations to day-to-day variations in light and temperature under field conditions. *Annals of Botany* 95 (6): 1059 – 1066

Burkart, S., Manderscheid, R., Weigel, H.-J. (2007). Design and performance of a portable gas exchange chamber system for CO₂- and H₂O- flux measurements in crop analysis. *Environmental and Experimental Botany* 61 (1): 25 – 34

Buwalda J.G., Green, T.G.A., Meekings, J.S. und Coneybear, D.J. (1992). Measurement of canopy gas exchange of Kiwifruit vines using a suite of whole-canopy cuvettes. *Environmental and Experimental Botany* 32 (4): 425 – 438

Chen, J.M., Rich, P.M., Gower, S.T., Norman, J.M. und Plummer, S. (1997). Leaf area index of boreal forests: theory, techniques, and measurement. *Journal of Geophysical Research* 102 (D24): 29429 – 29443

Collatz, G.J., Ball, J.T., Grivet, C und Berry, J.A. (1991) Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration: a model that includes a laminar boundary layer. *Agricultural and Forest Meteorology* 54 (2/3/4): 107 – 136

Cooper, C.S. und Qualls, M. (1967). Morphology and chlorophyll content of shade and sun leaves of two legumes. *Crop Science* 7 (6): 672 – 673

Eamus, D. und Shanahan, S.T. (2002). A rate equation model of stomatal responses to vapour pressure deficit and drought. *BMC Ecology* 2 (8): 1 – 14

Egle, K. (1960). Landpflanzen, in: *Encyclopedia of Plant Physiology – The Assimilation of Carbon Dioxide Pt.2*. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, 1. Aufl.

Egle, K. und Schenk, W. (1953). Der Einfluss der Temperatur auf die Lage des Kompensationspunktes. *Planta* 43 (2): 83 – 97

Ehret, D.L., Anthony, L., Bittman, S., Lin, W. und Shelford, T. (2001). Automated monitoring of greenhouse crops. *Agronomie* 21 (4): 403 – 414

Evensen, K.B. und Olson, K.M. (1992). Forcing temperature affects postproduction quality, dark respiration rate, and ethylene responsiveness of *Pelargonium x domesticum*. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 117 (4): 596 – 599

Exarchou, E. (2006). Steuerung von Bewässerungssystemen im Gewächshaus mit Hilfe des Phytomonitoring. Dissertation an der Humboldt Universität zu Berlin, Landwirtschaftlich- Gärtnerische Fakultät, FG Biosystemtechnik

- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D. und. Basra, S.M.A. (2009). Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development* 29 (1): 185 – 212
- Farquhar. G.D. und Caemmerer, S.v. (1981). Some relationship between biochemistry of photosynthesis and the gas exchange of leaves. *Planta* 153 (4): 376 – 387
- Farquhar. G.D., Caemmerer, S.v. und Berry, J.A. (1980). A biochemical model of Photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta* 149 (1): 78 – 90
- Farquhar. G.D., Caemmerer, S.v. und Berry, J.A. (2001). Models of photosynthesis. *Plant Physiology* 125 (1): 42 – 45
- Farquhar, G.D. und Sharkey, T.D. (1989). Stomatal conductance and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology* 33: 317 – 345
- Gaastra, P. (1959). Photosynthesis of crop plants as influenced by light, carbon dioxide, temperature and stomatal diffusion resistance. *Mededelingen van de Landbouwhogeschool te Wageningen, Nederland*. 59 (13): 1 – 68
- Gagnin, S. und Dansereau, B. (1990). Influence of light and photoperiod on growth and development of gerbera. *Acta Horticulturae* 272: 145 – 152
- Gates, D.M. (1969). Transpiration and leaf temperature. *Annual Review of Plant Physiology* 19: 211 – 238
- Ghannoum, O. und Conroy, J.P. (1998). Nitrogen deficiency precludes a growth response to CO₂ enrichment in C₃ and C₄ *Panicum* grasses. *Australian Journal of Plant Physiology* 25: 627 – 636

Ghannoum, O., von Caemmerer, S., Barlow, E.W.R., und Conroy J.P (1997). The effect of CO₂ enrichment and irradiance on the growth, morphology and gas exchange of a C3 (*Panicum laxum*) and a C4 (*Panicum antidotale*) grass. Australian Journal of Plant Physiology 24: 227 – 237

Gifford, R.M. und Morison, J.I.L (1984). Photosynthesis, water use and growth of a C4 grass stand at high CO₂ concentration. Photosynthesis Research 7: 69 – 76

Gifford, R.M., Lambers, H und Morison, J.I.L. (1985). Respiration of crop species under CO₂ enrichment. Physiologia Plantarum 63 (4): 351 – 356

Goins, G.D., Yorio, N.C., Sanwo, M.M. und Brown, C.S. (1997). Photomorphogenesis, photosynthesis, and seed yield of wheat plants grown under red light- emitting diodes (LEDs) with and without supplemental blue lighting. Journal of Experimental Biology 48 (7): 1407 – 1413

González-Meler, M.A. und Taneva, L. (2005). Respiration in photosynthetic cells: gas exchange components, interactions with photorespiration and the operation of mitochondria in the light, in: Advances in Photosynthesis and Respiration – Plant respiration: From Cell to Ecosystem, Springer Verlag, 18. Aufl.

Goulden, M.L. und Field, C.B. (1994). Three methods for monitoring the gas exchange of individual tree canopies: ventilated- chamber, sap- flow and Penman- Monteith measurement on evergreen oaks. Functional Ecology 8 (1): 125 – 135

Griffin, K.L., Anderson, O.R., Gastrich, M.D., Lewis, J.D., Lin, G., Schuster, W., Seemann, J.R., Tissue, M.H. und Whitehead, D (2000). Plant growth in elevated CO₂ alters mitochondrial number and chloroplast fine structure. Proceedings of the National Academy of Science 98 (5): 2473 – 2478

Hättenschwiler, S., Handa, I.T., Egli, L., Asshoff, R., Ammann, W. und Körner, C. (2002). Atmospheric CO₂ enrichment of alpine treeline conifers. *New Phytologist* 156 (3): 363 – 375

Heldt, H.-W. und Piechulla, B. (2015). *Pflanzenbiochemie*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 5. Aufl.

Hendricks, L. (1997). Regelstrategien im Überblick, in: *Temperaturregelstrategien / Forschungsanstalt Geisenheim*. Bernhard Thalacker Verlag GmbH und Co KG, Braunschweig, 1. Aufl.

Hock, B. und Elstner, E.F. (1988). *Schadwirkungen auf Pflanzen*. Lehrbuch der Pflanzentoxikologie. Wissenschaftsverlag Mannheim, Wien, Zürich, 2. Aufl.

Hoffmann, H. und Rath, T. (2013). High resolved simulation of climate change impact on greenhouse energy consumption in Germany. *European Journal of Horticultural Science* 77 (6): 241 – 248

Hughes, L. (2000). Biological consequences of global warming: Is the signal already apparent? *Trends in Ecology and Evolution* 15 (2): 56 – 61

Hurry, V., Igamberdiev, A.U., Keerberg, O., Pärnik, T., Atkin, O.K., Castells, J.-Z. und Gardestöm, P (2005). Respiration in photosynthetic cells: gas exchange components, interactions with photorespiration and the operation of mitochondria in the light, in: *Advances in Photosynthesis and Respiration – Plant respiration: From Cell to Ecosystem*, Springer Verlag, 18. Aufl.

Jarvis, P.G. (1995). Scaling processes and problems. *Plant, Cell and Environment* 18 (10): 1079 – 1089

Jahnke, S. (2001). Atmospheric CO₂ concentration does not directly affect leaf respiration. *Plant, Cell and Environment* 24 (11): 1139 – 1151

Janka, E., Körner, O., Rosenqvist, E. und Ottosens, C.O. (2016). A coupled model of leaf photosynthesis, stomatal conductance, and energy balance for chrysanthemum (*Dendratherma grandiflora*). *Computers and Electronics in Agriculture*. 123: 264 – 274

Jones, H.G. (1992). *Plants and microclimate, a quantitative approach to environmental plant physiology*. Cambridge University Press, Cambridge, 3. Aufl.

Kacira, M., Sase, S., Okushima, L., Ling, P.L. (2005). Plant response- based sensing for control strategies in sustainable greenhouse production. *Journal of Agricultural Meteorology* 61 (1):15 – 22

Kasperbauer, M.J. (1971). Spectral distribution of light in tobacco canopy and effects of end- of- day quality on growth and development. *Plant Physiology* 47 (6): 775 – 778

Kim, S.-J., Hahn, E.-J., Heo, J.-W. und Peak, K.-Y. (2004). Effects on LEDs on net photosynthetic rate, growth and leaf stomata of chrysanthemum plantlets in vitro. *Scientia Horticulturae* 101 (1/2/3): 143 – 151

Kimball, B.A. (1995). Carbon dioxide and agricultural yield: an assemblage and analysis of 430 prior observations. *Agronomy Journal* 75 (5): 779 – 788

Kinoshita, T., Doi, M., Suetsugu, N., Kagawa, T., Wada, M. und Shimazaki, K.-i. (2001). Phot 1 and phot 2 mediate blue light regulation of stomatal opening. *Nature* 414: 656 – 660

Kelly, D.W., Hicklenton, P.R. und Reekie, E.G. (1990). Photosynthetic response of geranium to elevated CO₂ as affected by leaf age and time of CO₂ exposure. *Canadian Journal of Botany* 69 (11): 2482 – 2488

Kessler, W., (2007). *Multivariate Datenanalyse für die Pharma, Bio- und Prozessanalytik*. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 1. Aufl.

Klopotek, Y., George, E., Druge, U. und Kläring, P. (2012). Carbon assimilation of petunia cuttings in a non- disturbed rootign environment: response to environmental key factors and adventitious root formation. *Scientia Horticulturae* 145: 118 – 126

Koning, A.N.M. (1990). Long term temperature integration of tomato. Growth and development under alternating temperature regimes. *Scientia Horticulturae* 45 (1/2): 117 – 127

Körner, O., Aaslyng, J.M., Andreassen, A.U. und Holst, N. (2007). Microclimate prediction for dynamic greenhouse climate control. *HortScience* 42 (2): 272 – 279

Körner, O. und Van Straten, G. (2008). Decision support for dynamic greenhouse climate control strategies. *Computers and Electronics in Agriculture* 60 (1): 18 – 30

Lambers, H. und Posthumus, F. (1980), The effect of intensity and relative humidity on growth rate and root respiration of *Plantago lanceolata* and *Zea mays*. *Journal of Experimental Botany* 31 (125): 1621 – 1630

Lambers, H., Chapin, F.S. und Pons, T.L (2008). *Plant Physiological Ecology*. Springer- Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2. Aufl.

Lambers, H., Robinson, S.A. und Carbo, M.-R. (2005). Regulation of Respiration in vivo, in: *Advances in Photosynthesis and Respiration – Plant Respiration: Form Cell to Ecosystem*. Springer-Verlag, 18. Aufl.

Lange, O.L. (1962). Otto Ludwig Lange: Eine „Klapp- Küvette“ zur CO₂- Gaswechselregistrierung an Blätter von Freilandpflanzen mit dem URAS. *Berichte der Deutschen Botanischen Gesellschaft* 75 (2): 41 - 50

Lamber, H und Poorter, H. (1992). Inherent variation in growth rate between higher plants: a search for physiological causes and ecological consequences, in *Advances in Ecological Research* 23: 187 – 261

Langton, F.A., Adams, S.R. und Cockshull, K.E. (2003). Effect of photoperiod on leaf greenness of four bedding plant species. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 78 (3): 400 – 404

Larcher, W. (2003). *Physiological plant ecology: ecophysiological and stress physiology of functional groups*. Springer- Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 4. Aufl.

Laties, G.C. (1952). Respiration and cellular work and the regulation of the respiration rate in plants, in *survey of biological progress*. Academic Press Inc. New York, 1. Aufl.

Lee, I. und Amasio, R.M. (1995). Effect of vernalisation, photoperiod, and light quality on the flowering phenotype of *Arabidopsis* plants containing the FRIGIDA gene. *Plant Physiology* 108 (1): 157 – 162

Leuning, R. (1995). A critical appraisal of a combined stomatal- photosynthesis model for C₃ plant. *Plant, Cell and Environment* 18 (4): 339 – 355

Livingston, N.J., Davies, G.J., Eby, B.M., Filek, G., Fuchs, E.E., Pepin, S. und Percy, R.E. (1994). A whole- plant cuvette system to measure short- term responses of conifer seedlings to environmental change. *Tree Physiology* 14 (7/8/9): 759 – 768

Lobos, G.A. und Hancock, J.F. (2015). Breeding blueberries for a changing global environment: a review. *Frontiers in Plant Science* 6 (782): 1 – 14

Long, S.P. und Bernacchi C.J. (2003). Gas exchange measurements, what can they tell us about the underlying limitations to photosynthesis? Procedures and sources of error. *Journal of Experimental Botany* 54 (392): 2393 – 2401

Lundegårdh, H. (1927). Carbon dioxide evolution of soil and crop growth. *Soil Science* 23 (6): 417 – 453

Mäkinen, S. (1987). A multi- sample method for net CO₂ exchange rate measurements with a trap- type cuvette. *Scientia Horticulturae* 33 (3/4): 159 – 166

Manning, W.J. und Tiedemann, A.v. (1995). Climate change: potential effects of increased atmospheric carbon dioxide (CO₂), ozone (O₃), and ultraviolet-b (UV-B) radiation on plant diseases. *Environmental Pollution* 88 (2): 219 – 245

Marriott, M.F.-H. und Blankenship, R.E. (2011). Evolution of photosynthesis. *Annuals Review of Plant Biology* 62: 515 – 548

Massman, W.J. und Ham, J.M. (1994). An evaluation of a surface energy balance method for partitioning ET data into plant and soil components for a surface with partial canopy cover. *Agricultural and Forest Meteorology* 67 (3/4): 253 – 267.

McCree K.J. (1972): Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. *Agricultural and Forest Meteorology* 10: 443 – 453

McCree, K.J. und Amthor, M.E. (1982). Effects of diurnal variation in temperature on the carbon balances of white clover plants. *Crop Science* 22 (4): 822 – 827

Meler, M.A.-G., Carbo, M.-R., Giles, L. und Siedow, N (1999). The effect of growth and measurement temperature on the activity of the alternative respiratory pathway. *American Society of Plant Physiologists* 120 (3): 765 – 772

Mitchell, J.W. (1936). Effect of atmospheric humidity on rate of carbon fixation by plants. *Botanical Gazette* 98 (1): 87 – 104

- Monteith, J.L. (1977). Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of The Royal Society B Biological Sciences* 2 (1): 277 – 294
- Montero, J.I., Antón, A., Munoz, P. und Lorenzo, P. (2001). Transpiration from geranium grown under high temperatures and low humidities in greenhouses. *Agricultural and Forest Meteorology* 107 (4): 323 – 332
- Moore, R., Clark, W.D. und Vodopich, D.S. (2003). *Botany*. McGraw- Hill Education, Boston, 2. Aufl.
- Morrison, J. und Gifford, R.M. (1984). Plant Growth and Water Use With Limited Supply in High CO₂ Concentrations. 1. Leaf Area, Water Use and Transpiration. *Australian Journal of Plant Physiology* 11 (5): 361 – 374
- Muenschler, W.L.C. (1915). A study of the relation of transpiration to the size and number of stomata. *American Journal of Botany* 2 (9): 487 – 504
- Murray, F.W. (1967). On the computation of saturation vapor pressure. *Journal of Applied Meteorology* 6 (1): 203 – 204
- Murthy, R., Barron- Gafforf, G., Dougherty, P.M., Engels, V.C., Krieve, K., Handley, L., Klimas, C., Potosnaks, J., Zarnoch, S.J. und Zhang, J. (2005). Increased leaf area dominates carbon flux response to elevated CO₂ in stands of *Populus deltoides* (Bartr.). *Global Change Biology* 11 (5): 716 – 731
- Nobel, P.S. (2009). *Physicochemical and environmental plant physiology*. Elsevier Academic Press, Amsterdam, Boston, Heidelberg, London, Ney York, Oxford, Paris, San Diego, San Francisco, Singapore, Sydney, Tokio, 4. Aufl.
- Noguchi, K. (2005). Effects of light intensity and carbohydrate status on leaf and root respiration, in: *Advances in Photosynthesis and Respiration – Plant respiration: From Cell to Ecosystem*, Springer- Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 18. Aufl.

Norby, R.J., Wullschleger, S.D., Gunderson, C.A., Johnson, D.W. und Ceulemans, R. (1999). Tree responses to rising CO₂ in field experiments: implications for the future. *Plant, Cell and Environment* 22 (6): 683 – 714

Onoda, Y., Hikosaka, K. und Horose, T. (2004). Seasonal change in the balance between capacities of RuBP carboxylation and RuBP regeneration affects CO₂ response of photosynthesis in *Polygonum cuspidatum*. *Journal of Experimental Botany* 56 (412): 755 – 763

Ottosen, C.O. (1990). Growth versus net photosynthesis in clones of *Ficus benjamina*. *HortScience* 25 (8): 956 – 957

Ow, L.F., Griffin, K.L., Whitehead, D., Walcroft, A.S. und Turnbull, M.H. (2007). Thermal acclimation of leaf respiration but not photosynthesis in *Populus deltoides x nigra*. *New Phytologist* 178 (1): 123 – 134

Ozkan, B., Fert, C. und Karadeniz, C.F. (2005). Energy cost analysis for greenhouse and open- field grape production. *Energy* 32 (8): 1500 – 1504

Pasgianos, G.D., Arvantis, K.G., Polycarpou, P. und Sigrimis, N. (2003). A nonlinear feedback technique for greenhouse environmental control. *Computers and Electronics in Agriculture* 40 (1/2/3): 153 – 177

Peleg, M. Yeh, I. und Altman, R.B. (2002). Modelling biological processes using workflow and Petri Net models. *Bioinformatics* 18 (6): 825 – 837

Pieruschka, R., Huber, G. und Berry, J.A. (2010). Control of transpiration by radiation. *Proceedings of the National Academy of Science* 107 (30): 13372 – 13377

Poorter, H. und Nagel, O. (2000). The role of biomass allocation in the growth response to plants to different levels of light, CO₂, nutrients and water; a quantitative review. *Australian Journal of Plant Physiology* 27: 595 – 607

Poorter, H., Pot, S. und Lambers, H. (1988). The effect of an elevated atmospheric CO₂ concentration on growth, photosynthesis and respiration of *Plantago major*. *Physiologia Plantarum* 73 (4): 553 – 559

Proff, B., (2003). Automationssystem zur Untersuchung von Gaswechsel- und Transportprozessen an Pflanzen. Promotion an der Universität Duisburg-Essen

Raison, J.K., (1980). Effect of low temperatures on respiration, in: The biochemistry of plants: a comprehensive treatise. Volume 2. Metabolism and respiration. Academic Press, New York, 1. Aufl.

Rao, B.R.R., Kaul, P.N., Mallavarupa, G.R. und Ramesh, S. (1996). Effect of seasonal climatic changes of rose-scented geranium (*Pelargonium* species). *Biochemical Systematics and Ecology* 24 (7/8): 627 – 635

Rawson, H.M. und Begg, J.E. (1977). The Effect of Atmospheric Humidity on Photosynthesis, Transpiration and Water User Efficiency of Leaves of Several Plant Species. *Planta* 134 (1): 5 – 10

Reich, P.B., Walter, M.B., Ellsworth, D.S., Vose, J.M., Volin, J.C., Gresham, C. und Bowman, W.D. (1998). Relationships of leaf dark respiration to leaf nitrogen, specific leaf area and leaf life-span: a test across biomes and functional groups. *Oecologia* 114 (4): 471 – 782

Rijsdijk, A.A. und Vogelezang, J.V.M. (2000). Temperature integration on a 24-hour base: a more efficient climate control strategy. *Acta Horticulturae* 519: 163 – 170

Riechers G.H., und Strain, B.R. (1988). Growth of blue grama (*Bouteloua gracilis*) in response to atmospheric CO₂ enrichment. *Canadian Journal of Botany* 66 (8): 1570 – 1573

Rodriguez, D., Ewert, F., Goudriaan, J., Manderscheid, R., Burkart, S. und Weigel, H.J. (2001). Modelling the response of wheat canopy assimilation to atmospheric CO₂ concentrations. *New Phytologist* 150 (2): 337 – 346

Rosenzweig, C., Karoly, D., Vicarelli, M., Neofotis, P., Wu, Q., Casassa, G., Menzel, A., Root, T.L., Estrella, N., Seguin, B., Tryjaowski, P., Liu, C., Rawlins, S. und Imeson, A. (2008). Attributing physical and biological impacts to anthropogenic climate change. *Nature* 453: 353 – 358

Rout, U.K., Akimoto, K., Sano, F., Oda, J., Homma, T. und Tomoda, T. (2008). Impact assessment of the increase in fossil fuel prices on the global energy system, with and without CO₂ concentration stabilization. *Energy Policy* 36 (9): 3477 – 3484

Ryan, M.G. (1991). Effects of climate change on plant respiration. *Ecological Applications* 1 (2): 157 – 167

Saeki, T. (1960). Interrelationship between leaf amount, light distribution and total photosynthesis in a plant community. *Botanical Magazine* 73: 55 – 63

Sánchez- Blanco, M.J., Alvarez, S., Navarro, A. und Banon, S. (2009). Changes in leaf water relations, gas exchange, growth and flowering quality in potted geranium plants irrigated with different water regimes. *Journal of Plant Physiology* 166 (5): 467 – 476

Salisbury, F.B. (1996). Units, symbols and terminology für plant physiology. A reference for presentation of research results in the plant science. Oxford University Press, New York, Oxford, 1. Aufl.

Sarabia, E.R.-F., Segura, L. E., Gómez, I.G., Maroto, J.J.R., Bueno, R.M. und Areal, J.L.D (2009). Investigations of the influence of humidity on the ultrasonic agglomeration of submicron particles in diesel exhaust. *Ultrasonics* 41 (3): 177 – 281

Scarsh, G.W. und Shaw, M. (1950). Stomatal movement and photosynthesis in pelargonium. I. Effects of light and carbon dioxide. *Plant Physiology* 26 (2): 207 – 225

Schletz, R. (2008). Stomata densities of developing and mature leaves of geranium. *Essay* 6 (1): 129 – 132

Schmidt, U. (2004). Decision support für greenhouse climate control using a computerised Mollier diagram. *Acta Horticulturae* 654: 187 – 194

Schmidt, U. (2005). Microclimate control in greenhouses based on phytomonitoring data and Mollier phase diagram. *Acta Horticulturae* 691: 125 – 132

Schmidt, U., Schuch, I., Dannehl, D., Moreno, R.S., Aguilar, A.R. und Lopez, I. (2014). Long time plant exchange measurements in semi closed and ventilated greenhouses. *Acta Horticulturae* 1037: 469 – 476

Schuch, I. (2014). Methoden zur energetischen Bewertung von geschlossenen Gewächshausanlagen unter Berücksichtigung von Enthalpiedifferenzen. Dissertation an der Humboldt Universität zu Berlin, Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät, FG Biosystemtechnik

Schulze, D.-E., Beck, E. und Müller- Hohenstein, K. (2002). *Pflanzenökologie*. Springer- Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1. Aufl.

Schymanski, S.J., Roderick, M.L., Sivapalan, M., Hutley, L.B. und Beringer, J. (2007). A test of the optimality approach to modeling canopy properties and CO₂ uptake by natural vegetation. *Plant, Cell and Environment* 30 (12): 1586 – 1598

Sellers, P.J. (1985). Canopy reflectance, photosynthesis, and transpiration. *International Journal of Remote Sensing* 6 (8): 1335 – 1372

Sellers, P.J. (1987). Canopy reflectance, photosynthesis, and transpiration, II The role of biophysics in the linearity of their interdependence. *Remote Sensing of Environment* 21 (2): 143 – 183

Sellers, P.J., Berry, J.A., Collatz, G.J., Field, C.B. und Hall, F.G. (1992). Canopy reflectance, photosynthesis, and transpiration. III. A reanalysis using improved leaf models and a new canopy integration scheme. *Remote Sensing of Environment* 42 (3): 187 – 216

Sellers, P.J., Mintz, Y., Sud, Y.C. und Dalcher, A. (1986). A simple model (SiB) for use within generalö circulation models. *Journal of Atmospheric Sciences* 43 (6): 505 – 531

Sellers, P.J., Randall, D.A., Collatz, G.J., Berry, J.A., Field, C.B., Dazlich, D.A., Zhang, D.A., Collelo, G.D. und Bounoua, L. (1996). A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I: model formulation. *Journal of Climate* 9 (4): 676 – 705

Sesták, Z., Tichá, I., Catský, J., Solárová, J., Pospisilová, J. und Hodánová, D. (1985). Integration of photosynthetic characteristics during leaf development, in *Photosynthesis during leaf development*, Dr W. Junk Publishers Dordrecht, Boston, Lancaster, 1. Aufl.

Shaer, Y.A. und Van Bavel, C.H.M. (1987). Relative role of stomata and aerodynamic resistances in transpiration of tomato crop in a CO₂- enriched greenhouse. *Agricultural and Forestry Meteorology* 41 (1): 77 – 85

Sheriff, D.W. (1977). The Effect of Humidity on Water Uptake by, and Viscous Flow Resistance of, Excised Leaves of a Number of Species: Physiological and Anatomical Observations. *Journal of Experimental Botany* 28 (107): 1399 – 1407

Singh, J.S. und Gupta, S.R. (1977). Plant Decomposition And Soil Respiration In Terrestrial Ecosystems. *The Botanical review*. 43 (4): 449 – 528

Sims, D.A. und Pearcy, R.W. (1991). Photosynthesis and respiration in *Alocasia macrorrhiza* following transfer to high and low light. *Oecologia* 86 (3): 447 – 453

Sionit, N., Patterson, D.T., (1984). Responses of C₄ grass to atmospheric CO₂ enrichment. I. Effect of Irradiance. *Oecologia* 65 (1): 30 – 34

Smith, G.F., King, A.T. und Wilkins, D. (2007). Optics and Photonics: An Introduction. John Wiley and Sons, 2. Aufl.

Solomon, S., Quin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K., Tignor, M. und Miller, H. (2007). The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Technical Report, Intergovernmental Panel on Climate Change

Sreelakshmi, V., Sruthy, E.P.M und Shereena, J. (2014). Relationship between the leaf area and taxonomic importance of foliar stomata. *International Journal of Research in Applied, Natural and Social Science*. 2 (7): 53 – 60

Stahel, W. (2000). Statistische Datenanalyse – Eine Einführung für Naturwissenschaftler. Vieweg Verlag Braunschweig, Wiesbaden, 3. Aufl.

Stuefer, J.F. und Huber, H. (1998). Differential effects of light quantity and spectral light quality on growth, morphology and development of two stoloniferous *Potentilla* species. *Oecologia* 117 (1): 1 – 8

Sung, D.-Y, Kaplan, F., Lee, K.-J. und Guy, C.L. (2003). Acquired tolerance to temperature extremes. *Trends in Plant Science*. 8 (4): 179 – 187

Stitt, M. und Hurry, V. (2002). A plant for all seasons: alterations in photosynthetic carbon metabolism during cold acclimation in *Arabidopsis*. *Current Opinion in Plant Biology* 5 (3): 199 – 206

Stocker, O. (1956). Die Abhängigkeit der Transpiration von den Umweltfaktoren. In Handbuch der Pflanzenphysiologie. Springer Verlag OHG Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1. Aufl.

Tanaka, M., Takamura, T., Watanabe, H., Endo, M., Yanagi, T. und Okamoto, K. (1998). In vitro growth of *Cymbium* plantlets cultured under super bright red and blue light- emitting diodes (LEDs). Journal of Horticultural Science and Biotechnology 73 (1): 39 – 44

Tantau, H.-J. (1979). Analyse des Regelverhaltens klimatisierter Gewächshäuser als Grundlage zur Auswahl und Entwicklung geeigneter Regler. Institut für Technik in Gartenbau und Landwirtschaft, Universität Hannover, Gartenbautechnische Informationen Heft 7

Tantau, H.-J. (1998). Energy saving potential of greenhouse climate control. Mathematics and Computers in Simulation 48 (1): 93 – 101

Tantau, H.-J. und Akyazi, G. (2014). Latent heat transfer in a low energy greenhouse (ZINEG). Acta Horticulturae 1037: 137 – 145

Tantau, H.-J., Meyer, J., Schmidt, U. und Bessler, B. (2011). Low energy greenhouse – a system approach. Acta Horticulturae 893: 75 – 84

Taiz, L. und Zeiger, E., (2006). Plant Physiology. Springer- Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 4. Aufl.

Taylor, G.E. jr. und Tingey, D.T. (1981). Physiology of Ecotopic Plant Response to sulfur dioxide in *Geranium carolinianum* L.. Oecologia 49 (1): 76 – 82

Thomas, M.D. und Hill, G.R., (1937). The continuous measurement of photosynthesis, respiration, and transpiration of alfalfa and wheat growing under field conditions. Plant Physiology 12 (2): 285 – 307

Thornley, J.H.M. und Johnson, I.R. (1990). Plant crop modeling: a mathematical approach to plant and crop physiology. Oxford University Press, Oxford, 1. Aufl.

Tibbits, T.W. (1979). Humidity and plants. Bioscience 29 (6):358 – 363

Tissue, D.T., Lewis, J.D., Wullschleger, S.D., Amthor, J.S., Griffin, K.L. und Anderson, O.R. (2002). Leaf respiration at different canopy positions in sweetgum (*Liquidambar styracilua*) grown in ambient and elevated concentrations of carbon dioxide in the field. Tree Physiology 22 (15/16): 1157 – 1166

Ton, Y., (1997). Phytomonitoring system. In IV International congress on new agricultural Technologies: 89 – 95

Ton, Y., und Kopyt, M., (2003^a). Phytomonitoring: A Bridge from Sensors to Information Technology for Greenhouse Control. Acta Horticulturae 614: 639 – 644

Ton, Y. und Kopyt, M. (2003^b). Phytomonitoring information and decision-support system for crop growing. Proceedings of second international symposium on intelligent information technology in agriculture (ISITA2003) 39 – 43.

Tricker, P.J., Trewin, H., Kull, O., Clarkson, G.J.J., Eensalu, E. Colella, A., Doncaster, C.P., Sabatti, M. und Taylor, G. (2005). Stomatal conductance and not stomatal density determines the long- term reduction in leaf transpiration of poplar in elevated CO₂. Oecologia 143 (4): 652 – 660

Tripathy, B.C. und Brown, C.S. (1995). Root- shoot interaction in the greening of wheat seedlings grown under red light. Plant Physiology 107 (2): 407 – 411

Tröster, B. (2016). Blumen und Zierpflanzenmarkt 2015 – klassische Topfsortimente schwächeln. Zentralverband Gartenbau Report 42 (4/5) 11 – 12

Turner, A. Beale, J., Faure, S., Dunford, R.P. und Laurie, D.A. (2005). The pseudo- response regulator Ppd- H1 provides adaption to photoperiod in barley. *Science* 310 (5750): 1031 – 1034

Udink ten Cate, A.J., Bot, A.J. und Van Dixtorn, J.J. (1978). Computer control of greenhouse climates. *Acta Horticulturae* 87: 265 – 272

Van Straten, G., Challa, H. und Buwalda, F. (2000). Towards user accepted optimal control of greenhouse climate. *Computers and Electronics in Agriculture* 26 (3): 221 – 238

Vertessy, R.A., Benyon, R.G., O'Sullivan, S.K. und Gribben, P.R. (1995). Relationships between stem diameter, sapwood area, leaf area and transpiration in a young mountain ash forest. *Tree Physiology* 15 (9): 559 – 567

Villar, R., Held, A.A. und Merino, J. (1995). Dark leaf respiration in light and darkness of an evergreen and a deciduous plant species. *Plant Physiology* 107 (2): 421 – 427

Vines, H.M., Armitag, A.M., Chen, S., Tu, Z. und Black, C.C. (1982). A Transient Burst of CO₂ from Geranium Leaves during Illumination at various Light Intensities as a Measure of Photorespiration. *Plant Physiology* 70 (2): 629 – 631

Wand, S.J.E., Midgley, G.F., Jones, M.N. und Curtis P.S. (1999). Responses of wild C₄ and C₃ grass (*Poaceae*) species to elevated atmospheric CO₂ concentration: a test of current theories and perceptions. *Global Change Biology* 5 (6): 723 - 741

Wildung, R.E., Garland, T.R. und Buschbom, R.L. (1975). The Interdependent effects of soil temperature and water content on soil respiration rate and plant root decomposition in arid grassland soils. *Soil Biology and Biochemistry* 7 (6): 373 – 378

Willert, D.J. von, Matyssek, R. und Herppich, W. (1995). Experimentelle Pflanzenökologie: Grundlagen und Anwendungen. Georg Thieme Verlag, 1. Aufl.

Welander T.N. (1983). Effect of temperature and irradiance on vegetative and generative development in *PELARGONIUM x HORTORUM* 'RADIO'. *Scientia Horticulturae* 21 (3): 283 – 290

Went, F.W. (1953). The effect of temperature on plant growth. *Annual Review of Plant Physiology* 4: 347 – 362

Willmer, C. und Fricker, M. (1996). Stomata. Springer Science and Business Media, B.V., 2. Aufl.

Wit, C.T.d. (1965). Photosynthesis of leaf canopies. Agricultural Research Report 663, Wageningen, The Netherlands

Ye, Z.-P. (2007). A new model for relationships between irradiance and the rate of photosynthesis in *Oryza sativa*. *Photosynthetica* 45 (4): 637 – 640

Ye, Z. und Zhao, Z. A modified rectangular hyperbola to describe the light response curve of photosynthesis of *Bidens pilosa* L. grown under low and high light conditions. *Frontiers of Agriculture in China* 4 (1): 50 – 55

Zhao, D., Reddy, K.R., Kakani, V.G. und Reddy, V.R. (2005). Nitrogen deficiency effects on plant growth, leaf Photosynthesis, and hyperspectral reflectance properties of sorghum. *European Journal of Agronomy* 22 (4): 391 – 403

Internetquellen

Statistisches Bundesamt,

<https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/LandForstwirtschaftFischerei/ObstGemueseGartenbau/Tabellen/Zierpflanzenanbau.html>:

Zugriff: 10.04.2016

The Herb Society of America

<http://www.herbsociety.org/factsheets/Pelargonium%20Guide.pdf>

Zugriff: 11.02.2016

Zentralverband Gartenbau e.V.,

<http://www.g-net.de/gartenbau-allgemein-421.html>

Zugriff: 29.03.2016

www.licor.com

<https://www.licor.com/env/products/photosynthesis/LI-6400XT/>

Zugriff: 24.03.2016

<http://phyto-sensor.com>

Zugriff: 23.03.2016

www.ppsystems.com

<http://ppsystems.com/ciras3-portable-photosynthesis-system/>

Zugriff: 25.03.2016

www.walz.com

http://www.walz.com/products/gas_exchange/overview.html

Zugriff: 26.03.2016

www.zineg.net

Zugriff: 15.01.2016

10. Anhang

10.1 Veröffentlichungen

Rezensierte Zeitschriften

Akyazi, G. und Tantau, H.-J. (2014): The use of daylight plant cuvettes to measure climate parameters independently. Acta Hort. (ISHS) 1037: 509 – 515

Akyazi, G. und Tantau, H.-J. (2012): ZINEG – The Low Energy Greenhouse: an Innovative Greenhouse with New Climate Control Strategies Supported by Phytomonitoring Data. Acta Hort. (ISHS) 927:39 – 42

Tantau, H.-J. und Akyazi, G. (2014): Latent heat transfer in a low energy greenhouse (ZINEG). Acta Hort. (ISHS) 1037:137 – 145

Nicht rezensierte Zeitschriften

Akyazi, G., Beßler, B., Horscht, M., Knösel, K., Ludolph, D. und Tantau, H.-J. (2015). Gewächshaus mit maximaler Wärmedämmung, ZINEG- Haus-Hannover, in: Niedrigenergiegewächshäuser, Ergebnisse des ZINEG-Verbundprojekts. KTBL- Schrift 509

Tantau, H.-J., Akyazi, G und Knösel, K. (2012): Was ein Gewächshaus mit maximaler Wärmedämmung bringen kann. TASPO 37, 11.

Akyazi, G. (2010): Die Kombination ist entscheidend. TASPO Magazin

Akyazi, G. und Horscht, M. (2010): Hannover: Maximale Wärmedämmung im Fokus. TASPO Zeitung 48

Akyazi, G. und Horscht, M. (2010): Gewächshäuser mit maximaler Wärmedämmung und geschlossener Betriebsweise. KTBL Sonderheft zur IPM

Akyazi, G. und Horsch, M. (2010): Gewächshaus mit maximaler Wärmedämmung, Nutzung solarer Überschussenergie, geschlossener Betriebsweise und Integrationsstrategien bei Topfzierpflanzen. TASPO Jahresheft 2010

Tagungsbeiträge / Vorträge

Akyazi, G. und Tantau, H.-J. (2014): The use of daylight plant cuvettes to measure climate parameters independently. Greensys (ISHS), Jeju – Korea

Tantau, H.-J. und Akyazi, G. (2013): Latent heat transfer in a low energy greenhouse (ZINEG). Greensys (ISHS), Jeju – Korea

Tantau, H.-J., Horsch, M., Knösel, K., Akyazi, G. und Ludolph, D. (2011): Erste Ergebnisse aus dem ZINEG-Gewächshaus in Hannover und MySQL. , KTBL-Arbeitstagung Osnabrück, 19.-22. September 2011

Akyazi, G. und Tantau, H.-J. (2011): Phytomonitoring System To Detect Negative Growth Conditions For Plants. Greensys (ISHS), Halkidiki – Griechenland

Akyazi, G. und Tantau, H.-J. (2010): Greenhouse with Maximum Thermal Insulation - Climate Control Based on `Speaking Plant Approach`. International Horticultural Congress (ISHS), Lissabon – Portugal

Akyazi, G. und Tantau, H.-J. (2010): Gewächshaus mit maximaler Wärmedämmung. Internationale Pflanzenmesse (IPM) Essen

Poster

Akyazi, G. und Tantau, H.-J. (2011): Phytomonitoring System To Detect Negative Growth Conditions For Plants. Greensys (ISHS), Halkidiki – Griechenland

Akyazi, G. und Tantau, H.-J. (2011): Systementwicklung zur Erfassung von Phytosignalen basierend auf dem `Speaking Plant Approach`. 47. Gartenbauwissenschaftliche Jahrestagung (DGG), Hannover

Akyazi, G. und Tantau, H.-J. (2010): Gewächshaus mit maximaler Wärmedämmung., Internationale Pflanzenmesse (IPM) Essen

10.2 Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Gökhan Akyazi
Geburtsdatum: 29.05.1982
Geburtsort: Werther (Westf.)

Akademische Laufbahn

2009 – 2016 Leibniz Universität Hannover
Promotion

2007 – 2009 Leibniz Universität Hannover
Master of Science (M. Sc.)

2004 – 2007 Leibniz Universität Hannover
Bachelor of Science (B. Sc.)

Berufliche Laufbahn

2015 Wissenschaftliche Hilfskraft
Leibniz Universität Hannover

2009 – 2014 Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Leibniz Universität Hannover

2007 – 2009 Studentische Hilfskraft
Leibniz Universität Hannover

10.3 Danksagung

Mein ganz besonderer Dank geht an Herrn Prof. Dr. H.-J. Tantau. Neben der Zurverfügungstellung des Themas, der exzellenten Betreuung als Doktorvater, wertvollen Hinweisen und Diskussionen, ist auch eine tiefgehende Freundschaft entstanden.

Herrn Prof. Dr. U. Schmidt danke ich für die Übernahme des Korreferats und der stets guten Zusammenarbeit während der Projektphase und auch darüber hinaus.

Den Kollegen der Abteilung Biosystemtechnik (BGT) möchte ich für die unzähligen hilfreichen Kommentare, Diskussion und Hilfestellungen bedanken. Dieser Dank richtet sich auch explizit an die Kollegen aus der Werkstatt, die durch ihre Erfahrung und ihren technischen Sachverstand einen großen Teil zum Gelingen und Erfolg dieser Arbeit beigetragen haben. Die Zeit mit Euch allen am BGT war großartig!

Zu großem Dank bin ich auch den Projektförderern (BMU, BMEL, BLE und Landwirtschaftliche Rentenbank) verpflichtet. Sie haben durch ihre Fördergelder diese Arbeit erst ermöglicht. Insbesondere Herrn T. Hölscher (BLE) sei für seine unkomplizierte Hilfe bei der Mittelumwidmung zur Realisierung des Versuchsstandes herzlich gedankt.

Mit der größte Dank geht an meine Familie. Sie hat mich fortwährend unterstützt, stets an mich geglaubt, mich durch schwierige Zeiten begleitet und mir alles ermöglicht.

Nicht zuletzt geht ein sehr großer Dank an meine Freundin Annica, die mir, besonders zum Ende der Arbeit, viel Kraft und Energie geschenkt hat.