

Universität Hohenheim

Fakultät für Agrarwissenschaften

Institut für Pflanzenproduktion und Agrarökologie in den Tropen und Subtropen (380)

Fg. Wasserstress-Management bei Kulturpflanzen in den Tropen und Subtropen (380c)

Prof. Dr. Folkard Asch



**Effekte von unterschiedlichen atmosphärischen Wasserdampfdruckdefiziten auf die  
Transpiration der chinesischen Steppengräser *Stipa grandis* und  
*Leymus chinensis* L.**

Freie Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung  
des akademischen Grades Bachelor of Science

Leah Kuppinger

Hohenheim, Juli 2011

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	II
Tabellenverzeichnis .....	IV
Abbildungsverzeichnis.....	IV
Abkürzungsverzeichnis.....	VI
Symbolverzeichnis .....	VII
1 Einleitung.....	8
1.1 Vorkommen und Verbreitung von <i>Leymus chinensis</i> und <i>Stipa grandis</i> .....	11
2 Keimungsversuche.....	13
2.1 Material und Methoden.....	13
2.1.1 Versuchsaufbau.....	13
2.1.2 Vorbereitung der Keimungsversuche .....	14
2.1.3 Ansetzen der CaCl <sub>2</sub> -Lösung.....	14
2.1.4 Klimakammerversuche .....	15
2.1.5 Direktsaatversuche .....	16
2.1.6 Zählen gekeimter Samen.....	18
2.1.7 Errechnung der Keimungsgeschwindigkeit .....	18
2.1.8 Statistische Auswertung.....	18
2.2 Ergebnisse .....	20
2.2.1 Keimung.....	20
2.2.1.1 Klimakammer .....	20
2.2.1.2 Direktsaat .....	21
2.2.2 Keimungsgeschwindigkeit.....	23
2.2.2.1 Klimakammer .....	23
2.2.2.2 Direktsaat .....	24
2.3 Diskussion.....	26
2.3.1 Keimung.....	26
2.3.2 Keimungsgeschwindigkeit.....	28
3 Dampfdruckdefizit-Versuch .....	29
3.1 Material und Methoden.....	29
3.1.1 Versuchsaufbau.....	29
3.1.2 Aufzucht der Pflanzen.....	30
3.1.2.1 Setzen der Keimlinge .....	30
3.1.2.1.1 Klimakammerkeimlinge .....	30
3.1.2.1.2 Direktsaatkeimlinge .....	30
3.1.2.2 Vereinzelnung .....	31
3.1.2.3 Pflege .....	31
3.1.3 Bestimmung der maximalen Wasserhaltekapazität .....	32
3.1.4 Bestimmung des Trockengewichts des Bodens.....	33
3.1.5 Bau der Versuchskammer.....	34
3.1.5.1 Kammer.....	34
3.1.5.2 Lufttrocknungssystem.....	34
3.1.5.3 Luftbefeuchtersystem.....	36
3.1.5.4 Datenlogger (Tinytag).....	37
3.1.5.5 Waage .....	38
3.1.5.6 Bodenplatte .....	38
3.1.6 Vermeidung der Evaporation.....	40
3.1.7 Evaporation- Referenztopf.....	42
3.1.8 Versuchsdurchführung.....	42

3.1.8.1	Vorbereitungen .....	42
3.1.8.2	Auswahl der Versuchspflanzen.....	43
3.1.8.3	Durchführung.....	43
3.1.8.4	Möglichkeiten zur Regulierung der Luftfeuchte.....	44
3.1.9	Messung der Blattfläche .....	45
3.1.10	Messung des Trockengewichts .....	46
3.1.11	Berechnung des Dampfdruckdefizits .....	46
3.1.12	Statistische Auswertung.....	47
3.2	Ergebnisse .....	48
3.2.1	Einfluss von Temperatur und Luftfeuchte auf das Dampfdruckdefizit ....	48
3.2.2	Einfluss des Dampfdruckdefizits auf die Transpiration.....	50
3.2.2.1	Reaktionen der Einzelpflanzen .....	52
3.3	Diskussion.....	55
3.3.1	Einfluss von Temperatur und Luftfeuchte auf das Dampfdruckdefizit ....	55
3.3.2	Einfluss des Dampfdruckdefizits auf die Transpiration.....	55
3.3.2.1	Reaktionen der Einzelpflanzen .....	57
3.4	Zusammenfassung.....	60
	Literaturverzeichnis .....	LXIII
	Anhang.....	LXVII
	Danksagung.....	LXXVI
	Eidesstattliche Erklärung .....	LXXVII

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über Varianten/Behandlungen der Keimungsexperimente .....	13
Tabelle 2: Verwendete Materialien zum Ansetzen einer 0,01-molaren CaCl <sub>2</sub> -Lösung....	14
Tabelle 3: Konzentrationsangaben der CaCl <sub>2</sub> -Lösung.....	15
Tabelle 4: Berechnung der Keimungsgeschwindigkeit .....	18
Tabelle 5: Ergebnis der einfaktoriellen Varianzanalyse des Haupteffekts Variante auf die Keimung.....	21
Tabelle 6: Ergebnis der zweifaktoriellen Varianzanalyse der Haupteffekte Gras und Variante auf die Keimung .....	22
Tabelle 7: Ergebnis der einfaktoriellen Varianzanalyse des Haupteffekte Variante auf die Keimungsgeschwindigkeit.....	24
Tabelle 8: Ergebnis der zweifaktoriellen Varianzanalyse der Haupteffekte Gras und Variante auf die Keimungsgeschwindigkeit .....	25
Tabelle 9: Kreuztabelle der Keimung des Klimakammerversuchs für <i>S. grandis</i> mit Liniendarstellung .....	LXVII
Tabelle 10: Kreuztabelle der Keimung des Direktsaatversuchs für <i>S. grandis</i> mit Liniendarstellung .....	LXVII
Tabelle 11: Kreuztabelle der Keimung des Direktsaatversuchs für <i>L. chinensis</i> mit Liniendarstellung .....	LXVII
Tabelle 12: Kreuztabelle der Keimungsgeschwindigkeiten des Klimakammerversuchs für <i>S. grandis</i> mit Liniendarstellung.....	LXVIII
Tabelle 13: Kreuztabelle der Keimungsgeschwindigkeiten des Direktsaatversuches für <i>S. grandis</i> (S) und <i>L. chinensis</i> (L) mit Liniendarstellung.....	LXVIII
Tabelle 14: t-Test zur Ermittlung signifikanter Unterschiede bei den Steigungen von <i>L. chinensis</i> und <i>S. grandis</i> .....	LXXV

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufteilung der Grasländer in China nach Ökosystemtypen (Kang <i>et al.</i> , 2007) .....	12
Abbildung 2: Petrischalen des Klimakammerversuchs mit Samen von <i>S. grandis</i> (li.) und <i>L. chinensis</i> (re.).....	16
Abbildung 3: Direktsaattöpfe befüllt mit Pflanzerde.....	17
Abbildung 4: Keimung in Prozent von <i>Stipa grandis</i> für die Klimakammerversuche.....	20
Abbildung 5: Keimung in Prozent von <i>Stipa grandis</i> und <i>Leymus chinensis</i> für die Direktsaatversuche .....	21
Abbildung 6: Keimungsgeschwindigkeit in Tagen von <i>Stipa grandis</i> für die Klimakammerversuche. ....	23
Abbildung 7: Keimungsgeschwindigkeit in Tagen von <i>Stipa grandis</i> und <i>Leymus chinensis</i> für die Direktsaatversuche. ....	24
Abbildung 8: Gekeimte Samen von <i>S. grandis</i> (li.) und <i>L. chinensis</i> (re.).....	27
Abbildung 9: Bestimmung der maximalen Wasserhaltekapazität .....	33
Abbildung 10: Lufttrocknungssystem (li.) und Stopfen (re.) .....	35
Abbildung 11: Deckel mit Regelmechanismus.....	37

Abbildung 12: Schema der Versuchskammer.....	39
Abbildung 13: <i>S. grandis</i> (li.) und <i>L. chinensis</i> (re.) mit ausgewaschenen Wurzeln.....	40
Abbildung 14: Evaporationsverluste mit und ohne Kiesabdeckung.....	41
Abbildung 15: Messung der Blattfläche .....	45
Abbildung 16: Temperatur/Luftfeuchte-Graphik mit der Transpiration (E) der 2. Versuchspflanze von <i>Stipa grandis</i> .....	48
Abbildung 17: Dampfdruckdefizit (VPD) und Transpiration (E) der 2. Versuchspflanze von <i>Stipa grandis</i> .....	49
Abbildung 18: Graphische Darstellung der durchschnittlichen Transpiration (E) gegen das Dampfdruckdefizit (VPD) der drei Versuchspflanzen von <i>L. chinensis</i> .....	50
Abbildung 19: Graphische Darstellung der durchschnittlichen Transpiration (E) gegen das Dampfdruckdefizit (VPD) der drei Versuchspflanzen von <i>S. grandis</i> .....	50
Abbildung 20: Graphische Darstellungen um am Beispiel von zwei Versuchspflanzen von <i>S. grandis</i> die Reaktion der Pflanze auf das steigende Dampfdruckdefizit (VPD) zu zeigen .....	52
Abbildung 21: Graphische Darstellungen um am Beispiel von Versuchspflanzen von <i>L. chinensis</i> die Reaktion der Pflanze auf das steigende Dampfdruckdefizit (VPD) zu zeigen .....	53
Abbildung 22: Graphische Darstellung der durchschnittlichen Transpiration (E) gegen das Dampfdruckdefizit (VPD) der drei Versuchspflanzen von <i>L. chinensis</i> .....	LXIX
Abbildung 23: Graphische Darstellung der durchschnittlichen Transpiration (E) gegen das Dampfdruckdefizit (VPD) der drei Versuchspflanzen von <i>S. grandis</i> .....	LXIX
Abbildung 24: Temperatur/Luftfeuchte-Graphik mit der Transpiration (E) der 1. Versuchspflanze von <i>L. chinensis</i> .....	LXX
Abbildung 25: Dampfdruckdefizit (VPD) und Transpiration (E) der 1. Versuchspflanze von <i>L. chinensis</i> .....	LXX
Abbildung 26: Temperatur/Luftfeuchte-Graphik mit der Transpiration (E) der 1. Versuchspflanze von <i>S. grandis</i> .....	LXXI
Abbildung 27: Dampfdruckdefizit (VPD) und Transpiration (E) der 1. Versuchspflanze von <i>Stipa grandis</i> .....	LXXI
Abbildung 28: Temperatur/Luftfeuchte-Graphik mit der Transpiration (E) der 2. Versuchspflanze von <i>L. chinensis</i> .....	LXXII
Abbildung 29: Dampfdruckdefizit (VPD) und Transpiration (E) der 2. Versuchspflanze von <i>L. chinensis</i> .....	LXXII
Abbildung 30: Temperatur/Luftfeuchte-Graphik mit der Transpiration (E) der 3. Versuchspflanze von <i>L. chinensis</i> .....	LXXIII
Abbildung 31: Dampfdruckdefizit (VPD) und Transpiration (E) der 3. Versuchspflanze von <i>L. chinensis</i> .....	LXXIII
Abbildung 32: Temperatur/Luftfeuchte-Graphik mit der Transpiration (E) der 3. Versuchspflanze von <i>S. grandis</i> .....	LXXIV
Abbildung 33: Dampfdruckdefizit (VPD) und Transpiration (E) der 3. Versuchspflanze von <i>S. grandis</i> .....	LXXIV

## Abkürzungsverzeichnis

$\text{Ca}^{2+}$  = Calcium

$\text{CaCl}_2$  = Calcium-Chlorid

ca. = circa

$\text{CO}_2$  = Kohlenstoffdioxid

D = Direktsaat

d.h. = „das heißt“

e = aktueller Dampfdruck

$e_s$  = Sättigungsdampfdruck

ER = Endoplasmatisches Retikulum

*et al.* = „und andere“ (lateinisch)

° = Grad

C = Celsius

g = Gramm

$\text{H}_2\text{O}$  = Wasser

$\text{H}_2\text{O}_{\text{dest.}}$  = destilliertes Wasser

Hz = Hertz (Frequenz)

K = Klimakammer

kPa = Kilopascal

*L. chinensis* = *Leymus chinensis* L.

li. = links

L = Liter

mL = Milliliter

mm = Millimeter

mmol = Millimol

mol = Mol (Stoffmenge)

$\text{m}^2$  = Quadratmeter

N = Nord

O = Ost

Pa = Pascal

PET = Polyethylenterephthalat

$P_{\text{max.}}$  = Druck (mechanische Spannung)

% = Prozent

PVC = Polyvinylchlorid

re. = rechts

RG = Raumgewicht

RL = relative Luftfeuchte

s = Sekunde

*S. grandis* = *Stipa grandis* P. Smirnov

T = Temperatur

VPD = Dampfdruckdefizit (vapour pressure deficit)

V = Volt (elektrische Spannung)

W = Watt (elektrische Leistung)

WHK<sub>max</sub> = maximale Wasserhaltekapazität

cm = Zentimeter

## **Symbolverzeichnis**

$\alpha$  = Alpha

$\varnothing$  = Durchmesser

$\triangleq$  = Entspricht- Zeichen

$\Sigma$  = Summenzeichen

# 1 Einleitung

Wassermangelsituationen von Pflanzen können durch Bodentrockenheit oder durch atmosphärische Dürre ausgelöst sein. Im Gegensatz zur Bodentrockenheit, die als erstes an den Wurzeln wahrgenommen wird, registriert der Spross die atmosphärische Dürre zuerst (Asch, 2005). Bodentrockenheit und deren Auswirkungen auf Pflanzen ist Thema vieler Arbeiten, so wie beispielsweise bei Xu und Zhou (2006, 2008) und Chaves *et al.* (2009). Weniger gut untersucht sind die Auswirkungen atmosphärischer Dürre. Experimente, die die Reaktion von Pflanzen auf unterschiedliche Dampfdruckdefizite bezüglich der Transpiration untersuchten, wurden von Sinclair *et al.* (2007), Sinclair *et al.* (2008), Wherley und Sinclair (2009) und Gholipour *et al.* (2010) durchgeführt. In diesen Arbeiten wurde die Transpiration ganzer Pflanzen gemessen. Im Gegensatz dazu wurde bei Franks und Farquhar (1999) nur an Einzelblättern gemessen. Bei Turner *et al.* (1984) wurden die Messungen am Blatt und an der ganzen Pflanze durchgeführt.

Von Sinclair *et al.* (2007), Sinclair *et al.* (2008), Wherley und Sinclair (2009) und Gholipour *et al.* (2010) wurden verschiedene Kammersysteme entwickelt, die es erlaubten, entweder die ganze Pflanze oder nur den Spross der zu untersuchenden Pflanzen, unterschiedlichen Dampfdruckdefiziten auszusetzen.

Gholipour *et al.* (2010) untersuchten 26 verschiedene Genotypen von Sorghum auf ihre Reaktion auf verschiedene Dampfdruckdefizite (VPD) bezüglich der Transpirationsrate. Neun Genotypen zeigten eine positive lineare Beziehung zwischen Transpirationsrate und Dampfdruckdefizit. Bei 17 Genotypen fand sich ein Schwellenwert, ab dem die Transpirationsrate mit steigendem Dampfdruckdefizit abnahm. Der Durchschnittswert für diesen Schwellenwert lag bei 2,26 kPa. Auch Wherley und Sinclair (2009) beobachteten einen solchen Schwellenwert bei den C<sub>3</sub> Gräsern, in ihrem Versuch über die unterschiedlichen Sensibilitäten von C<sub>3</sub> und C<sub>4</sub> Rasengräsern bei steigenden Dampfdruckdefiziten. Die C<sub>4</sub> Gräser zeigten, in dem experimentell erfassten Bereich, eine geringe Sensibilität für das VPD. Die C<sub>3</sub> Gräser hingegen reagierten mit einer Reduktion der Transpiration bei steigendem VPD.

Lange *et al.* (1971) konnten bei Experimenten mit *Polypodium vulgare* und *Valerianella locusta* beobachten, dass Stomata auf Veränderungen der relativen Luftfeuchte reagieren. Kurz nach Umstellung von feuchter auf trockene Luft schlossen sich die Stomata. Bei der umgekehrten Umstellung von trockener auf feuchte Luft dauerte es länger, bis die

Stomata mit einer Öffnung reagierten. Bei Behandlung von isolierter Epidermis von *Polypodium vulgare* mit nahezu wassergesättigter Luft kam es zu einer maximalen Öffnung der Stomata. Bei extrem trockener Luft wurden die Stomata komplett geschlossen und bei mittlerer relativer Luftfeuchte kam es zu einer mittleren stomatären Öffnungsweite.

„Der die Verdunstung antreibende hydraulische Gradient hängt direkt von der relativen Luftfeuchte ab. Je geringer das Sättigungsdefizit der Luft ist, desto länger können die Stomata geöffnet bleiben.“ (Stahr *et al.*, 2008).

Bei der Transpiration einer Pflanze muss beim Übertritt von den Mesophyllzellen in die interzellularen Hohlräume im Blatt Wasser in die Dampfphase übergehen. Ein Dampfdruckgefälle ermöglicht dann die Diffusion durch die Stomata nach außen. Wind oder Massenaustausch sorgen anschließend für die Wegführung des Wasserdampfes. Bei Wassermangel kann durch Regulation der Öffnungsweite der Stomata die Wasserabgabe gemindert werden (Ehlers, 1996).

Nach Sinclair *et al.* (2008) limitiert eine geringe hydraulische Leitfähigkeit bei hohem Dampfdruckdefizit die Wasserflussrate zu den Stomata, was dazu führt, dass der Turgor in den Schließzellen verringert wird. Der verringerte Turgor hat eine Abnahme der stomatären Leitfähigkeit zur Folge. Die so verringerte Transpiration stellt das Gleichgewicht zwischen Wasserflussrate und Wasserabgabe durch die Stomata bei hohem Dampfdruckdefizit wieder her. Auch bei den Experimenten von Turner *et al.* (1984) ist zu sehen, dass eine Abnahme der Blattleitfähigkeit bei steigendem Dampfdruckdefizit eine Reduktion der Transpiration zur Folge hat. Vor Abfallen der Blattleitfähigkeit stieg die Transpiration proportional mit steigendem Dampfdruckdefizit.

Die für den Versuch benötigten Pflanzen werden aus Samen gezogen. Da bei Samen von *L. chinensis* oft nur 10-20% keimen (Ma *et al.*, 2010), und für den Versuch viele Pflanzen benötigt werden, finden im Vorfeld des Hauptversuchs Keimungsversuche statt.

Die Definition der Keimung nach Bewley und Black (1994) lautet folgendermaßen: Keimung beginnt mit der Wasseraufnahme des Samens (Imbibition) und endet mit Beginn der Streckung der embryonalen Achse, gewöhnlich die Radicula (Keimwurzel). Kutschera (2002) hingegen definiert den Prozess der Keimung als die Gesamtheit der notwendigen Schritte zur Überführung eines Embryos in einen entwicklungsfähigen Keimling.

Ein notwendiger und initialer Schritt der Keimung, ist die Wasseraufnahme des Samens. Wenn optimale Bedingungen herrschen, besteht dieser aus drei Phasen (Bewley und Black, 1994):

Phase I: Da das Wasserpotential des reifen trockenen Samens um ein vielfaches niedriger ist als das des umgebenden feuchten Substrats, kann die Wasseraufnahme stattfinden.

Phase II: In dieser Phase kommt es zu keiner nennenswerten Wasseraufnahme da das Wasserpotential des Samens stark erhöht ist. Es finden aber bedeutende metabolische Prozesse in Vorbereitung auf den Austritt der Keimwurzel statt. Am Ende von Phase II ist das Erscheinen der Keimwurzel zu beobachten, und so ist die Keimung nach der Definition von Bewley und Black (1994) vollendet.

Phase III: Die dritte Phase verläuft simultan zur Streckung der Radicula. Hier kommt es wieder zur Wasseraufnahme, da das osmotische Potential durch osmotisch-aktive Substanzen aus dem Stärkeabbau erniedrigt wird (Bewley und Black, 1994).

Während der Keimung gibt die Aleuronschicht unter dem Einfluss des Embryos stärkemobilisierende Enzyme ins Endosperm ab, welche die dort vorhandenen Reservestoffe hydrolysieren. Die entstandenen Hydrolyseprodukte stehen dem wachsenden Keimling zur Verfügung. Der Einfluss des Embryos bezieht sich dabei auf die Bildung des Hormons Gibberelinsäure welches dann zu den Zellen der Aleuronschicht transportiert wird. Dort bewirkt die Gibberelinsäure die Neusynthese der Hydrolasen. Mit 70 % besteht der größte Anteil des neu synthetisierten Proteins aus  $\alpha$ -Amylase (Sitte *et al.*, 1999; Kutschera, 2002). Bei der Keimung einer Graskaryopse beginnt die Bildung der Hydrolasen, im wesentlichen  $\alpha$ -Amylase, in Phase II der Wasseraufnahme (Kutschera, 2002). Amylase wird im Endomembransystem von Aleuronzellen synthetisiert und verarbeitet (Bush *et al.*, 1989 a).

Das Enzym  $\alpha$ -Amylase ist ein  $\text{Ca}^{2+}$ -enthaltendes Metalloprotein (Bewley and Black, 1994) und bindet ein Atom Calcium pro Molekül Protein. Die Bindung von Calcium an Amylase ist ein irreversibler Prozess und ist nötig, um die Stabilität und Aktivität aufrecht zu erhalten (Bush *et al.*, 1989 a). Elarbi *et al.* (2009) fand zusätzlich einen aktivierenden Effekt von Calcium auf  $\alpha$ -Amylase.

Calcium bildet eine enge, intramolekulare Metall-Chelat-Struktur im Amylasemolekül und verleiht ihm dadurch die strukturelle Festigkeit, die für die effektive biologische Aktivität notwendig ist. Das aktive Zentrum des Amylasemoleküls kann kollabieren,

wenn seine sekundäre und tertiäre Struktur nicht durch Calciumverbindungen stabilisiert wird (Hsiu *et al.*, 1964).

Der Gehalt von Calcium im Endoplasmatischen Retikulum (ER), wo  $\alpha$ -Amylase synthetisiert wird, ist 10 bis 15-mal höher als im Cytosol (Bush *et al.*, 1989 b). Das Endoplasmatische Retikulum akkumuliert Calcium aus dem Cytoplasma entgegen einem Konzentrationsgradienten. Bush *et al.* (1989 b) nimmt an, dass dies durch ATP-abhängige Calcium-Pumpen des ER zustande kommt. Deren Aktivität wird maßgeblich durch eine Behandlung mit Gibberelinsäure gefördert. Er schließt daraus, dass die Regulation des Calciumtransportes ins ER der Aleuronzellen durch Gibberelinsäure eine wichtige Rolle bei der Synthese von  $\alpha$ -Amylase spielt.

In den Keimungsversuchen soll untersucht werden, ob die Zugabe von  $\text{CaCl}_2$  zum Keimungsmedium das Keimungsverhalten von *L. chinensis* und *S. grandis* positiv beeinflusst. Dabei wurde für die  $\text{CaCl}_2$ -Lösung eine Konzentration von 0,01 Mol ausgewählt aufgrund der Ergebnisse von Elarbi *et al.* (2009). Er fand eine gesteigerte Aktivität von  $\alpha$ -Amylase mit 10 mmol  $\text{CaCl}_2$  gegenüber 5 mmol in den keimenden Samen von *Carthamus tinctorius* L.. Außerdem soll getestet werden ob sich ein Quellen der Samen in destilliertem Wasser vor Ablage in das Keimmedium positiv auf die Keimung auswirkt.

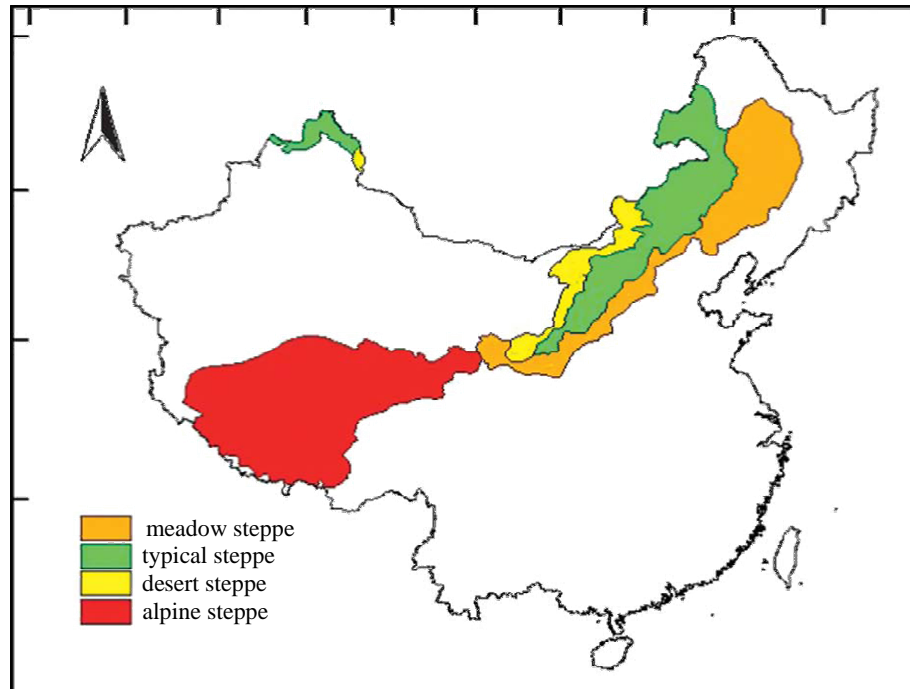
Zudem soll in dieser Arbeit untersucht werden, wie die beiden Gräser *Leymus chinensis* L. und *Stipa grandis* P. Smirnov bezüglich der Transpiration reagieren, wenn sie unterschiedlichen Dampfdruckdefiziten ausgesetzt werden. Dazu wird eine Kammer konstruiert, in der es möglich, ist durch Zufuhr von trockener oder feuchter Luft unterschiedliche Dampfdruckdefizite zu etablieren.

### **1.1 Vorkommen und Verbreitung von *Leymus chinensis* und *Stipa grandis***

*Leymus chinensis* ist ein perennierendes Rhizomgras mit guter Schmackhaftigkeit und hohem Futterwert (Xu und Zhou, 2006), das von ökonomischer und ökologischer Wichtigkeit ist (Ma *et al.*, 2010). *Stipa grandis* ist ein perennierendes Horstgras. Beide Gräser sind dominant im Steppenökosystem der Inneren Mongolei (Bai *et al.*, 2004). Wie in Abbildung 1 nach Kang *et al.* (2007) zu sehen ist, wird dieses in die "meadow"-Steppe, die "typical"- Steppe und die "desert"- Steppe unterteilt.

Die Vegetationsperiode für perennierende Gräser der Inneren Mongolei geht von Anfang April bis Ende September (Bai *et al.*, 2004). *S. grandis* und *L. chinensis* sind in der “typical“- Steppe zu finden. *L. chinensis* kommt aber auch in der “meadow“- Steppe vor (Kang *et al.*, 2007).

Traditionell dient das Grasland als Quelle für tierische Produkte wie Milch, Fleisch und Wolle. Die zunehmende Degradation und Desertifikation der Grasländer werden mit Sorge beobachtet (Kang *et al.*, 2007) und sind ein Ergebnis von Wasserknappheit kombiniert mit hohen Temperaturen und Überweidung (Xu und Zhou, 2006). Seit den 70er Jahren nahm die Bevölkerung der Grasländer aufgrund von Immigration rasch zu, und mit ihr die Anzahl der grasenden Tiere. Diese Entwicklung führte dazu, dass immer weniger Grasland pro Tier verfügbar ist, was eine starke Belastung der Flächen bedeutet. Wenn die Beweidung der Flächen eingestellt wird, können sich diese schnell wieder erholen. Wenn aber die Degradation zu weit fortgeschritten ist, gelingt die Wiederherstellung nur unter großen Anstrengungen. Deshalb ist es wichtig mit der Wiederherstellung der Grasländer rechtzeitig zu beginnen (Jiang *et al.*, 2006).



**Abbildung 1: Aufteilung der Grasländer in China nach Ökosystemtypen (Kang *et al.*, 2007)**

## 2 Keimungsversuche

### 2.1 Material und Methoden

#### 2.1.1 Versuchsaufbau

Es wurden Keimungsversuche durchgeführt bei denen das Keimungsverhalten zweier Gräser *Stipa grandis* und *Leymus chinensis* im Vergleich standen, sowie ihr Verhalten in einer Klimakammer und im Gewächshaus in Form einer Direktsaat.

Die verwendeten Samen stammen aus der Inneren Mongolei und wurden in der Songnen Grassland Ecosystem Research Station (44°36' N, 123° 31' O) gesammelt.

Im Versuch wurden vier verschiedene Varianten getestet, deren Auswirkungen sowohl in der Klimakammer (K) als auch bei der Direktsaat (D) untersucht wurden.

Tabelle 1 zeigt eine Übersicht über die Varianten und deren Behandlungen. Variante A, bei der die Samen nur mit H<sub>2</sub>O gewässert wurden, diente als Kontrollvariante. Bei Variante B wurden die Samen vor Beginn des Experiments über Nacht vorgequollen. Auch hier wurde mit H<sub>2</sub>O gewässert. Die Varianten C und D wurden ausschließlich mit einer 0,01-molaren CaCl<sub>2</sub>-Lösung gewässert. Die Samen für Variante D wurden vor Versuchsbeginn über Nacht vorgequollen. Jede Variante hatte vier Wiederholungen.

**Tabelle 1: Übersicht über Varianten/Behandlungen der Keimungsexperimente**

Klimakammer (K)		Direktsaat (D)	
Variante	Behandlung	Variante	Behandlung
AK	H <sub>2</sub> O	AD	H <sub>2</sub> O
BK	H <sub>2</sub> O +Quellen	BD	H <sub>2</sub> O +Quellen
CK	CaCl <sub>2</sub>	CD	CaCl <sub>2</sub>
DK	CaCl <sub>2</sub> + Quellen	DD	CaCl <sub>2</sub> + Quellen

Der fünfzehn Tage dauernde Versuch fand in der Klimakammer in Petrischalen. Wie auch bei Ma *et al.* (2010), Orlovsky *et al.* (2011), Chaudhuri und Wiebe (1968) wurden die Petrischalen dazu mit Filterpapier ausgestattet. Bei der Direktsaat wurden die Samen in mit Pflanzerde befüllte Plastikpflanztöpfe gesät.

Der Versuch war angelegt als eine vollständig randomisierte Blockanlage mit vier Blöcken. Jeder Block enthielt alle vier Varianten. So ergaben sich sechzehn Petrischalen

bzw. Pflanztöpfe pro Gras. Die Zuteilung zu einem Block, und der Position in diesem erfolgte durch Zufallsziehung. Wasserverluste wurden durch Wässern entsprechend der Variante alle zwei Tage ausgeglichen.

### **2.1.2 Vorbereitung der Keimungsversuche**

Die Samen von *Stipa grandis* und *Leymus chinensis* wurden für drei Wochen im Kühlschrank bei unter 0°C gelagert, da nach Kutschera (2002) ein Kältereiz bei der Überwindung der Dormanz hilfreich ist.

Bevor man mit den Keimungsversuchen beginnen konnte, mussten die Samen beider Arten sortiert werden. Bei Samen von *Stipa grandis* mussten die Grannen entfernt und leere Samen aussortiert werden. Bei Samen von *Leymus chinensis* wurden etwa gleich große Samen gewählt. Die ausgewählten Samen wurden in Petrischalen gesammelt.

Für die Quellvarianten B und D wurden Samen beider Gräser über Nacht in mit destilliertem Wasser gefüllten Bechergläsern aufbewahrt, damit diese quellen (Elarbi *et al.*, 2009).

### **2.1.3 Ansetzen der CaCl<sub>2</sub>-Lösung**

Für die Varianten C und D der Keimungsversuche wurde eine 0,01-molare CaCl<sub>2</sub>-Lösung benötigt. Die zum Ansetzen der Lösung verwendeten Materialien sind in Tabelle 2 aufgelistet. Die Lösung wurde wie folgt angesetzt:

Das Becherglas wurde auf die Waage gestellt und diese tariert. CaCl<sub>2</sub> –Pulver wurde vorsichtig mit dem Löffel in das Becherglas gegeben bis das gewünschte Gewicht angezeigt wurde. Der Trichter wurde auf den Kolben gesetzt und das Pulver zugegeben. Pulverreste im Glas und am Trichter wurden mit destilliertem Wasser abgespült und in den Kolben gegeben. Der Kolben wurde grob mit destilliertem Wasser aufgefüllt. Ein sogenannter Rührfisch wird in den Kolben gegeben, und dieser wird mit einem Stopfen verschlossen. Auf der

**Tabelle 2: Verwendete Materialien zum Ansetzen einer 0,01-molaren CaCl<sub>2</sub>-Lösung**

Becherglas (500 ml)
Löffel
Waage
Messkolben (1000 ml) + Deckel
Trichter
Spritzflasche (mit H <sub>2</sub> O <sub>dest.</sub> )
Rührfisch + Angel
Rührplatte
CaCl <sub>2</sub>

Rührplatte wurde der Inhalt bei mittlerer Stufe kurz durchgerührt. Der Kolben wurde von der Platte genommen und der Rührfisch wurde mit der Angel außerhalb der Lösung an den Kolbenhals gezogen. Mit der Spritzflasche wurde aufgefüllt, bis der durch Oberflächenspannung der Lösung entstandene Miniskus auf der 1000 mL Markierung lag. Der Rührfisch wurde wieder nach unten gelassen und der Kolben wird mit Deckel für ca. zwei Minuten auf die Rührplatte gestellt. Danach wurde der Rührfisch mit der Angel am Kolbenboden festgehalten damit der Inhalt in eine Gewindeflasche (1000 mL) gefüllt werden konnte. In Tabelle 3 ist die Konzentrationsangabe der CaCl<sub>2</sub>-Lösung zu sehen.

**Tabelle 3: Konzentrationsangaben der CaCl<sub>2</sub>-Lösung**

Molgewicht von CaCl <sub>2</sub>	147,02 g *L <sup>-1</sup> $\triangleq$ 1 mol
0,01-molare CaCl <sub>2</sub> -Lösung	1,4702 g *L <sup>-1</sup> $\triangleq$ 0,01 mol

### 2.1.4 Klimakammerversuche

Zuerst wurden alle Petrischalen (Ø 90mm; Höhe 14 mm; transparent) entsprechend der Variante und der Wiederholung gekennzeichnet. Anschließend wurde jede Petrischale mit zwei Rundfilterpapieren (Ø 90 mm; Machery-Nagel) ausgestattet und diese mit 6 mL (Ma *et al.*, 2010) H<sub>2</sub>O für die Varianten A und B oder CaCl<sub>2</sub>-Lösung für die Varianten C und D befeuchtet. Es wurden 25 Samen in jeder Petrischale gleichmäßig verteilt (siehe Abbildung 2, links). Bei den Varianten B und D wurden die vorher gequollenen Samen verwendet. Jede Variante hatte vier Wiederholungen und somit ergaben sich sechzehn Petrischalen für *Stipa grandis* und sechzehn für *Leymus chinensis*. In der Klimakammer wurden die Petrischalen der beiden Gräser jeweils in Form einer vollständig randomisierten Blockanlage angeordnet. Die Blockanlage war in vier Blöcke unterteilt und wurde parallel zur Tür der Klimakammer aufgestellt. Die Zuteilung zu einem Block und der Position in diesem erfolgte durch Zufallsziehung. Auf vier Papierkärtchen wurden die Nummern eins bis vier vermerkt. Die Kärtchen wurden durchgemischt. Bei der anschließenden Ziehung wurde festgelegt, in welchem der Blöcke die Petrischale untergebracht wurde. Das Kärtchen wurde zurückgelegt und nach erneutem Mischen wurde wieder gezogen. Diese Nummer legte nun den Platz der Petrischale innerhalb des

Blockes fest. Nach diesem Prinzip wurden alle Wiederholungen der Varianten in der Blockanlage verteilt (siehe Abbildung 2, rechts).



Abbildung 2: Petrischalen des Klimakammerversuchs mit Samen von *S. grandis* (li.) und *L. chinensis* (re.)

Bei 28°C und einer Photoperiode von 10 Stunden blieben die Samen für 15 Tage in der Klimakammer. Um ein Austrocknen der Samen zu verhindern, wird das Filterpapier jeden Tag wieder mit H<sub>2</sub>O oder der CaCl<sub>2</sub>-Lösung befeuchtet.

### 2.1.5 Direktsaatversuche

Bei der Direktsaat wurden Pflanztöpfe aus Plastik (T09 TEKU-TERRA; Pöppelman) mit einem Füllvolumen von 280 mL verwendet. Um Verunreinigungen zu vermeiden wurden die Töpfe zunächst mit Wasser gesäubert. Da die Töpfe mit einem Multiloch-Kreuzboden (6 Bodenlöcher) ausgestattet waren, wurden sie mit braunem Paketklebeband (Tesa Pack; Breite 38 mm) abgedichtet, um eine mögliche Vermischung oder Beeinträchtigung der Varianten untereinander auszuschließen. Danach wurden die Töpfe gekennzeichnet und 3 cm hoch mit Blumenerde (Danny Flor) befüllt (siehe Abbildung 3). Die Samen von *Stipa grandis* und *Leymus chinensis* wurden ca. 1 cm tief in den Boden geschoben, da bei Liu und Han (2008) 1 cm Tiefe die höchste Keimungsrate für *L. chinensis* ergab. Der Boden wurde leicht rückverfestigt um den Kapillaranschluss zu gewährleisten, da kapillare Wasserbewegungen in der Umgebung des Samens beträchtlich durch die Bodendichte beeinflusst wird (Bewley und Black, 1994). Für die Varianten B und D wurden wieder die zuvor gequollenen Samen verwendet. Anschließend wurde die Blumenerde der Varianten A und B mit 20 mL H<sub>2</sub>O befeuchtet, die der Varianten C und D mit 20 mL der

CaCl<sub>2</sub>-Lösung. Jede Variante wurde viermal wiederholt, woraus sich sechzehn Töpfe für *Stipa grandis* und sechzehn für *Leymus chinensis* ergaben. Die Töpfe für jedes Gras wurden in einer Pflanzwanne (40 cm x 60 cm) entsprechend einer vollständig randomisierten Blockanlage angeordnet und unter eine Gewächshauslampe (Professional Lightning; Typ SON-K-400; 400 W) gestellt. Die Blockanlage wurde parallel zu den Fenstern des Gewächshauses gestellt. Die Zuteilung eines Topfes zu einem Block und der Position darin wurde, wie bei der Randomisation des Klimakammerversuchs durch Zufallsziehung entschieden.

Bis die ersten Keimspresse auftraten, wurden die Töpfe von oben mit einer weiteren Pflanzwanne abgedeckt, die umgekehrt auf die untere gelegt wurde. Damit sollte vor übermäßigem Wasserverlust geschützt werden. Als Platzhalter zwischen den Wannen wurden vier Ceaprenstopfen (RG 28/30) verwendet, die an den Eckpunkten platziert wurden.



Abbildung 3: Direktsaattöpfe befüllt mit Pflanzerde

Fünfzehn Tage verbleiben die Samen im Gewächshaus. Die Temperatur im Gewächshaus beträgt 23,4°C. Da die Töpfe aber unter einer Gewächshauslampe standen und diese Wärme abstrahlte, waren die Samen ähnlichen Temperaturen ausgesetzt wie die der Klimakammerversuche. Die Photoperiode betrug zehn Stunden. Täglich wurde entsprechend der Variante gewässert.

### 2.1.6 Zählen gekeimter Samen

An den Tagen 1,3,5,7,9,11,13,15 wurde für jede Petrischale der Klimakammer und jeden Topf der Direktsaat die Anzahl der gekeimten Samen notiert um daraus später die Keimgeschwindigkeit und die Prozentzahl gekeimter Samen zu errechnen. Versuchsbeginn war Tag 0. Bei den Klimakammerversuchen galt ein Same als gekeimt, wenn die Keimwurzel zu sehen war (Ma *et al.*, 2010). Da die Samen bei der Direktsaat mit Boden bedeckt waren, konnte das Hervortreten der Keimwurzel nicht bewertet werden. Deshalb galten die Samen der Direktsaat beim ersten Erscheinen des Keimsprosses an der Bodenoberfläche als gekeimt.

### 2.1.7 Errechnung der Keimungsgeschwindigkeit

Die Keimungsgeschwindigkeit wurde wie bei Wening (2009) mit der Formel aus Tabelle 4 berechnet.

**Tabelle 4: Berechnung der Keimungsgeschwindigkeit**

---

---

$$\frac{\sum(\text{neu gekeimte Samen pro Tag} \times \text{Keimungstag (=Liegezeit)})}{\text{Anzahl der insgesamt gekeimten Samen}}$$

---

---

### 2.1.8 Statistische Auswertung

Die Auswertung der Daten der Keimungsversuche wurde mit der Prozedur MIXED des statistischen Analyseprogramm SAS (Version 9.0) durchgeführt. Bei den Klimakammerversuchen konnten nur die Ergebnisse von *S. grandis* ausgewertet werden. Nachdem die Normalverteilung der Residuen und die Varianzhomogenität nachgewiesen wurden, erfolgt eine einfaktorielle Varianzanalyse. Bei den Direktsaatversuchen konnten die Ergebnisse beider Gräser ausgewertet werden. Nach Test auf Normalverteilung und Varianzhomogenität erfolgte eine zweifaktorielle Varianzanalyse. Wenn sich dabei zeigte, dass signifikante Wechselwirkungen bei den Haupteffekten auf die Zielvariable

vorlagen, mussten die Haupteffekte nicht getestet, sondern nur die einfachen Mittelwerte verglichen werden. Dazu musste der LSD-Wert bestimmt werden. Mit Hilfe einer Kreuztabelle und des LSD-Werts konnten dann signifikante Unterschiede festgestellt werden.

Die Ergebnisse wurden in Form von Balkendiagrammen mit Buchstabendarstellung abgebildet. Varianten, die bei der Buchstabendarstellung denselben Buchstaben enthielten waren nicht signifikant verschieden. Der Standardfehler erscheint als Fehlerbalken in den Diagrammen.

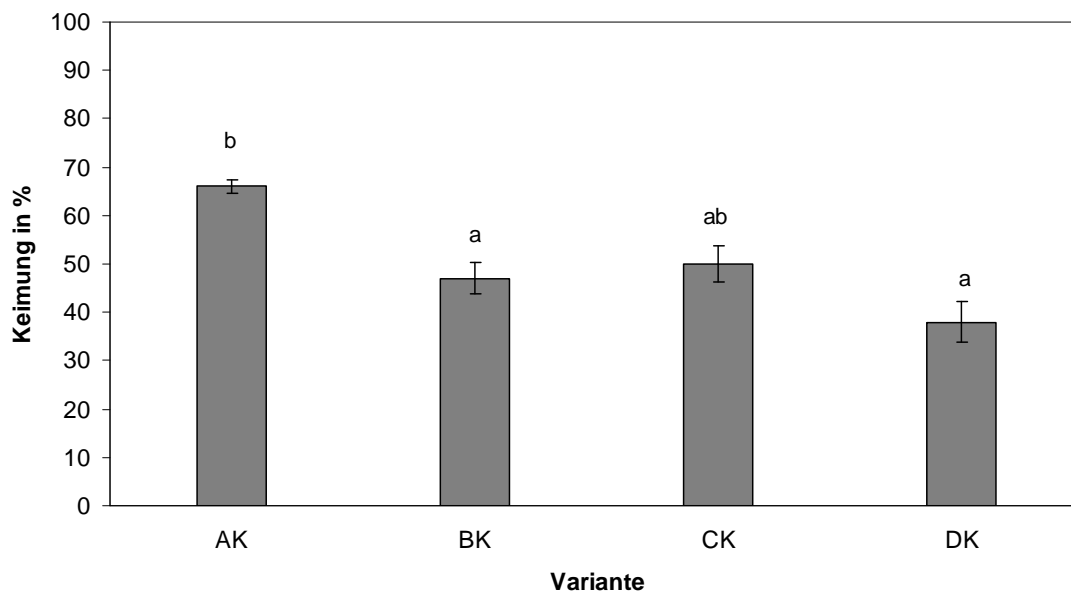
## 2.2 Ergebnisse

Hier werden nun die Ergebnisse der Keimungsversuche vorgestellt.

### 2.2.1 Keimung

#### 2.2.1.1 Klimakammer

In Abbildung 4 sind die Ergebnisse des Klimakammerversuchs dargestellt. Da es bei Samen von *L. chinensis* zu einem Totalausfall kam und kein Same keimte, können hier nur die Ergebnisse von *S. grandis* dargestellt werden.



**Abbildung 4: Keimung in Prozent von *Stipa grandis* für die Klimakammerversuche**

A, B, C, D stehen für die vier Behandlungsvarianten. Bei A und B wurden die Samen mit H<sub>2</sub>O gewässert. Bei B wurden die Samen zuvor über Nacht vorgequollen. Die Varianten C und D wurden mit einer 0,01-molaren CaCl<sub>2</sub>-Lösung gewässert. Samen von Variante D wurden über Nacht vorgequollen. Der Buchstabe K hinter den Bezeichnungen für die Variante steht hier für die Klimakammerversuche. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler.

*Stipa grandis* zeigte in diesem Versuch recht gute Ergebnisse. Der höchste Wert der gekeimten Samen von *Stipa grandis* findet sich mit 66% bei Variante A, bei der die Samen nur mit H<sub>2</sub>O gewässert wurden. Diese unterscheidet sich signifikant ( $P < 0,05$ ) von Variante B, bei der ebenfalls mit H<sub>2</sub>O gewässert wurde, die Samen aber zuvor gequollen wurden. Auch Variante D, die mit CaCl<sub>2</sub> gewässert und gequollene Samen verwendet wurden, unterscheidet sich signifikant ( $P < 0,05$ ) von der Kontrollvariante A. Die beiden Varianten, bei denen die Samen nicht vorgequollen wurden, also A und C, zeigten keine signifikanten Unterschiede.

Beim Vergleich der Varianten B, C, und D lassen sich keine signifikanten Unterschiede finden. In Tabelle 5 ist zu sehen, dass die unterschiedlichen Varianten einen signifikanten Effekt auf die Keimung von *S. grandis* hatten.

Tabelle 5: Ergebnis der einfaktoriellen Varianzanalyse des Haupteffekts Variante auf die Keimung

Effekt	Zähler Freiheitsgrade	Nenner Freiheitsgrade	F-Statistik	Pr > F
Variante	3	9	4,86	< 0,05
Block	3	9	3,08	ns

Die aus den vier Wiederholungen errechneten Mittelwerte der gekeimten Samen des Klimakammerversuchs sind in der Kreuztabelle im Anhang (Tabelle 9) zu finden. Aus der Kreuztabelle, bei der die Mittelwerte der Varianten miteinander verglichen wurden, und einer daraus abgeleiteten Liniendarstellung entstand die Buchstabendarstellung.

### 2.2.1.2 Direktsaat

Die Ergebnisse der Direktsaatversuche sind in Abbildung 5 dargestellt.

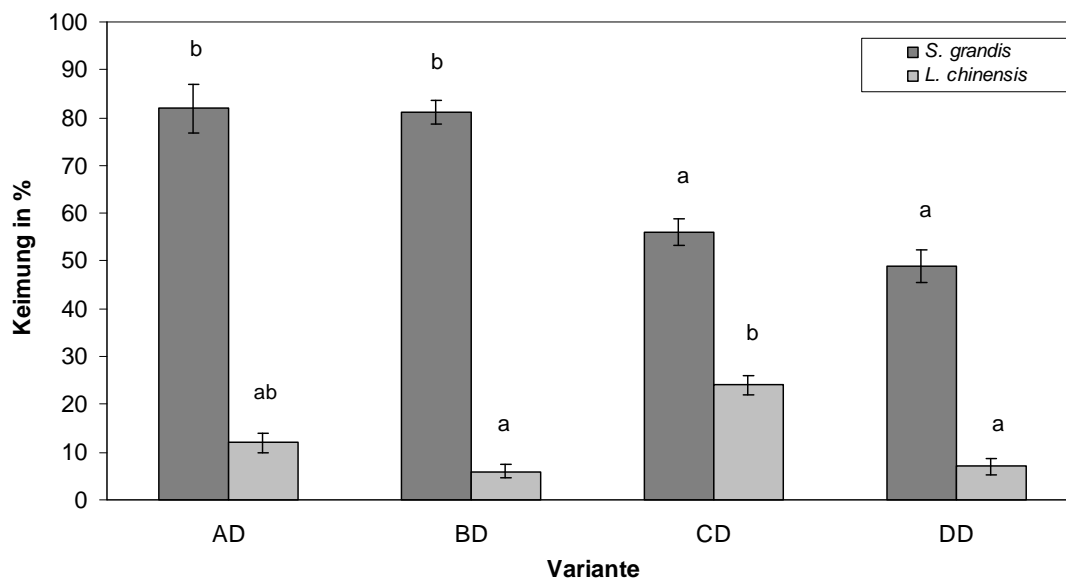


Abbildung 5: Keimung in Prozent von *Stipa grandis* und *Leymus chinensis* für die Direktsaatversuche. A, B, C, D stehen für die vier Behandlungsvarianten. Bei A und B wurden die Samen mit H<sub>2</sub>O gewässert. Bei B wurden die Samen zuvor über Nacht vorgequollen. Die Varianten C und D wurden mit einer 0,01-molaren CaCl<sub>2</sub>-Lösung gewässert. Samen von Variante D wurden über Nacht vorgequollen. Der Buchstabe D hinter den Bezeichnungen für die Variante steht hier für die Direktsaatmethode. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler.

Bei den Direktsaatversuchen schnitt *L. chinensis* besser ab als in den Klimakammerversuchen. Das beste Ergebnis wurde mit Variante C erzielt, bei der mit der CaCl<sub>2</sub>-Lösung gewässert und die Samen nicht vorgequollen wurden. Dieses unterschied sich signifikant ( $P < 0,05$ ) von B und D. Bei den Varianten A, B und D waren keine signifikanten Unterschiede zu finden. Auch zwischen A und C gibt es diese Unterschiede nicht.

*S. grandis* schien am besten auf die H<sub>2</sub>O- Bewässerung zu reagieren, da die höchsten Werte mit 82% bei Variante A und 81% bei Variante B lagen. Ein vorheriges Quellen der Samen hatte dabei keinen Einfluss auf die Keimung, da es zwischen diesen beiden Varianten keine signifikanten Unterschiede gab. Die Bewässerung mit H<sub>2</sub>O der Varianten A und B unterschied sich signifikant ( $P < 0,05$ ) von der Bewässerung mit der CaCl<sub>2</sub>-Lösung bei den Varianten C und D, wobei die letztere schlechter abschnitt. C und D zeigten keine signifikanten Unterschiede.

**Tabelle 6: Ergebnis der zweifaktoriellen Varianzanalyse der Haupteffekte Gras und Variante auf die Keimung**

Effekt	Zähler Freiheitsgrade	Nenner Freiheitsgrade	F-Statistik	Pr > F
Gras	1	21	192,03	< 0,0001
Variante	3	21	4,37	< 0,05
Gras * Variante	3	21	7,06	< 0,01
Block	3	21	1,30	ns

In Tabelle 6 sind die Ergebnisse der zweifaktoriellen Varianzanalyse dargestellt. Die Haupteffekte Gras (*L. chinensis* und *S. grandis*) und Varianten hatten signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse des Keimungsversuchs. Der Einfluss der Spezies ist sogar höchst signifikant. Da auch die Interaktion von Grasart und Variante einen signifikanten Einfluss ausübte, werden anstatt der Haupteffekte die einfachen Mittelwerte verglichen. Mit Hilfe von Kreuztabellen und dem LSD-Wert konnten dann signifikante Unterschiede ermittelt werden. Die Kreuztabellen mit daraus abgeleiteter Liniendarstellung sind im Anhang in Tabelle 10 und 11 zu finden.

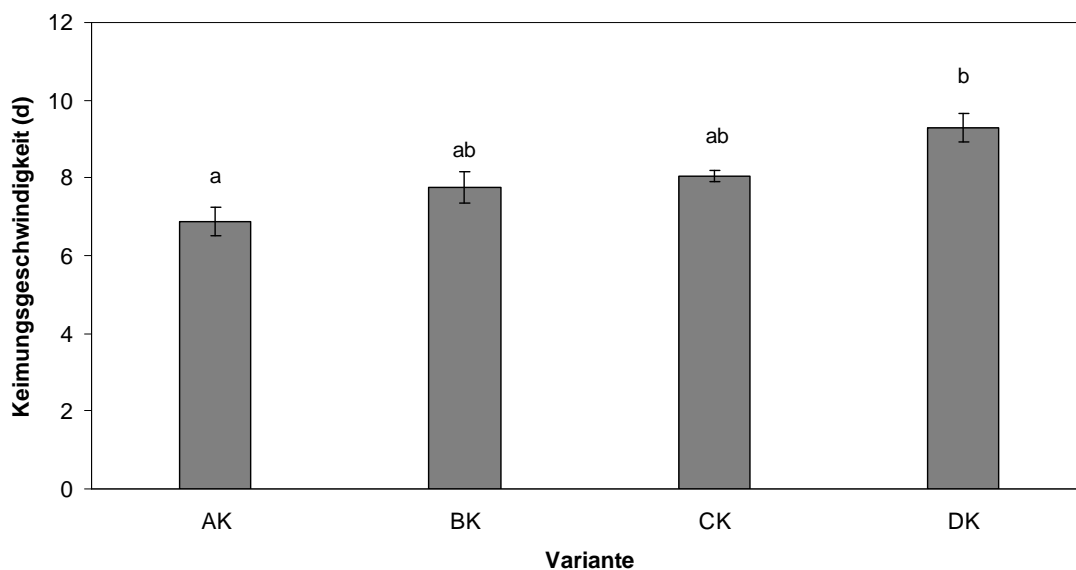
Bei den Samen der Klimakammerversuche kam es zu einem Pilzbefall. Samen beider Gräser waren befallen. Erster Schimmel zeigte sich nach 6 Tagen. Samen waren mit

Schimmelhärchen überzogen und es zeigten sich kreisrunde Ansammlungen schwarzer Punkte auf dem Filterpapier.

## 2.2.2 Keimungsgeschwindigkeit

### 2.2.2.1 Klimakammer

Die Keimungsgeschwindigkeit für *S. grandis* ist in Abbildung 6 dargestellt. Da bei dem Klimakammerversuch die Samen von *L. chinensis* nicht keimten, können hier wieder nur die Ergebnisse für *S. grandis* beschrieben werden.



**Abbildung 6: Keimungsgeschwindigkeit in Tagen von *Stipa grandis* für die Klimakammerversuche.**

A, B, C, D stehen für die vier Behandlungsvarianten. Bei A und B wurden die Samen mit H<sub>2</sub>O gewässert. Bei B wurden die Samen zuvor über Nacht vorgequollen. Die Varianten C und D wurden mit einer 0,01-molaren CaCl<sub>2</sub>-Lösung gewässert. Samen von Variante D wurden über Nacht vorgequollen. Der Buchstabe K hinter den Bezeichnungen für die Variante steht hier für die Klimakammerversuche. Der Standardfehler wird durch die Fehlerbalken angezeigt.

Variante A, bei der die Samen mit H<sub>2</sub>O bewässert wurde, war mit 6,98 Tagen am schnellsten. Beim Vergleich der beiden mit H<sub>2</sub>O bewässerten Varianten A und B zeigen sich keine signifikanten Unterschiede bei der Keimungsgeschwindigkeit. Auch die mit der CaCl<sub>2</sub>-Lösung bewässerte Variante C unterschied sich nicht von der Kontrollvariante A. Die Varianten B und C hatten sehr ähnliche Keimungsgeschwindigkeiten, die sich nicht signifikant unterschieden. Auch Variante D, bei der mit der CaCl<sub>2</sub>-Lösung bewässert und vorgequollene Samen verwendet wurden, unterschied sich nicht signifikant von den Varianten B und C. Einzig beim Vergleich der Kontrollvariante A mit Variante D ließen sich signifikante ( $P > 0,05$ ) Unterschiede feststellen. Die Kontrollvariante A hat also eine signifikant höhere Keimungsgeschwindigkeit als Variante D.

Die Mittelwerte der einzelnen Varianten sind, in der zur Analyse der Daten verwendeten Kreuztabelle im Anhang (Tabelle 12) zu finden. Die Kreuztabelle beinhaltet zudem die für die Buchstabendarstellung notwendige Liniendarstellung.

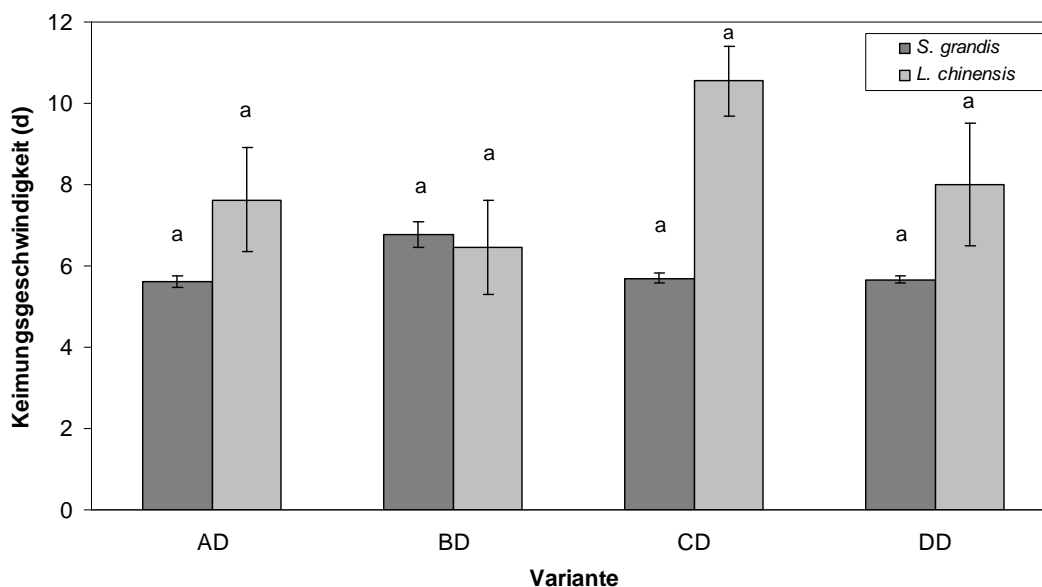
**Tabelle 7: Ergebnis der einfaktoriellen Varianzanalyse des Haupteffekte Variante auf die Keimungsgeschwindigkeit**

Effekt	Zähler Freiheitsgrade	Nenner Freiheitsgrade	F-Statistik	Pr > F
Variante	3	9	2,39	ns
Block	3	9	1,48	ns

In Tabelle 7 sind die Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalyse zu sehen. Die unterschiedlichen Varianten haben keinen signifikanten Effekt auf die Ergebnisse der Keimungsgeschwindigkeiten.

### 2.2.2.2 Direktsaat

Die Keimungsgeschwindigkeiten der Direktsaatversuche ist in Abbildung 7 für *L. chinensis* und *S. grandis* dargestellt.



**Abbildung 7: Keimungsgeschwindigkeit in Tagen von *Stipa grandis* und *Leymus chinensis* für die Direktsaatversuche.**

**A, B, C, D** stehen für die vier Behandlungsvarianten. Bei **A** und **B** wurden die Samen mit H<sub>2</sub>O gewässert. Bei **B** wurden die Samen zuvor über Nacht vorgequollen. Die Varianten **C** und **D** wurden mit einer 0,01-molaren CaCl<sub>2</sub>-Lösung gewässert. Samen von Variante **D** wurden über Nacht vorgequollen. Der Buchstabe **D** hinter den Bezeichnungen für die Variante steht hier für die Direktsaatmethode. Der Standardfehler wird durch die Fehlerbalken angezeigt.

Wie in der Abbildung 7 zu sehen ist, ergaben sich für beide Gräser *L. chinensis* und *S. grandis* bei allen vier Varianten keine signifikanten Unterschiede in den Keimungsgeschwindigkeiten.

Die Mittelwerte der Keimungsgeschwindigkeit der beiden Gräser *L. chinensis* und *S. grandis* sind in der Kreuztabelle dargestellt. Diese ist, zusammen mit einer daraus abgeleiteten Liniendarstellung im Anhang (Tabelle 13) zu finden. Die Liniendarstellung wurde benötigt um die Buchstabendarstellung zu erlangen.

**Tabelle 8: Ergebnis der zweifaktoriellen Varianzanalyse der Haupteffekte Gras und Variante auf die Keimungsgeschwindigkeit**

Effekt	Zähler Freiheitsgrade	Nenner Freiheitsgrade	F-Statistik	Pr > F
Gras	1	21	3,26	ns
Variante	3	21	0,34	ns
Gras * Variante	3	21	0,74	ns
Block	3	21	1,13	ns

Die Ergebnisse der zweifaktoriellen Varianzanalyse der Haupteffekte sind in Tabelle 8 dargestellt. Wie in der Tabelle zu sehen ist, übten die Haupteffekte Gras und Variante keinen signifikanten Unterschied auf die Keimungsgeschwindigkeit beim Direktsaatversuch aus. Die Interaktion der beiden Haupteffekte der beiden Varianten ist ebenfalls nicht signifikant.

## 2.3 Diskussion

Bei den Keimungsversuchen dieser Arbeit sollten die Auswirkungen verschiedener Behandlungen auf die Keimung und die Keimungsgeschwindigkeit zweier Gräser *L. chinensis* und *S. grandis* untersucht werden. Das Vorquellen der Samen, die Wässerung mit einer  $\text{CaCl}_2$ -Lösung und deren Kombination standen im Vergleich zur Kontrollvariante, in der nur mit  $\text{H}_2\text{O}$  gewässert wurde.

### 2.3.1 Keimung

Die Ergebnisse der Keimung von *S. grandis* zeigten, dass sowohl bei den Klimakammerversuchen als auch bei den Direktsaatversuchen die mit  $\text{H}_2\text{O}$  bewässerte Variante A stets die besten Resultate lieferte. Die erwarteten positiven Effekte der Wässerung mit der  $\text{CaCl}_2$ -Lösung traten nicht auf. Bei den Direktsaatversuchen unterschieden sich die mit  $\text{H}_2\text{O}$  bewässerten Varianten signifikant von den mit  $\text{CaCl}_2$ -Lösung bewässerten Varianten, wobei letztere schlechter abschnitten. Dies steht in Kontrast zu den Ergebnissen von Shaikh *et al.* (2007), der zeigte, dass eine Behandlung der Samen von *Urochondra setulosa* mit  $\text{CaCl}_2$  eine höhere Keimung ergab, als die Kontrollvariante mit destilliertem Wasser. Solch ein Ergebnis zeigte sich in diesen Keimungsversuchen nur bei den Direktsaatversuchen von *L. chinensis*. Variante C, bei der mit der 0,01-molaren  $\text{CaCl}_2$ -Lösung bewässert wurde unterschied sich dort signifikant von den Varianten B und D.

Bei dem Klimakammerversuch hatten die Quellvarianten B und D von *S. grandis* signifikant schlechtere Ergebnisse als die Kontrollvariante A. Auch bei dem Direktsaatversuch war die Keimung der Quellvariante D von *L. chinensis* signifikant geringer als die der ungequollenen Variante C. Marcar (1986) der die Samen von *Lolium rigidum* vor dem Keimungsexperiment für 12 und 24 Stunden in belüftetem destilliertem Wasser platzierte fand ebenfalls keinen signifikanten Effekt dieser Behandlung auf die Keimungsrate.

Es zeigte sich also, dass *L. chinensis* eher auf eine Behandlung mit der  $\text{CaCl}_2$ -Lösung ansprach als *S. grandis*. Das Vorquellen hingegen brachte bei beiden Gräsern keine Verbesserung der Keimung, bei den meisten eher eine Verschlechterung.

In Abbildung 8 sind gekeimte Samen von *S. grandis* beim Klimakammerversuch und von *L. chinensis* bei der Direktsaat zu sehen.



Abbildung 8: Gekeimte Samen von *S. grandis* (li.) und *L. chinensis* (re.)

Bei dem Klimakammerversuch keimten keine Samen von *L. chinensis*.

Ma *et al.* (2010) fand heraus, dass die Dormanz von *L. chinensis* Samen hauptsächlich nicht von endogenen Hormonen wie Gibberelinsäure oder Abscisinsäure kontrolliert wird. Viel eher sind die mechanische Resistenz der Spelzen, die hemmenden Eigenschaften des Endosperms und die Keimungstemperatur Faktoren, die die Dormanz und die Keimung von *L. chinensis* kontrollieren. Da in den Keimungsversuchen dieser Arbeit die Spelzen der *L. chinensis* Samen nicht entfernt wurden, könnte hier die Ursache für die niedrige Keimung des Grases liegen.

Dormanz kann auch durch eine extrem harte Samenschale verursacht sein. Diese verhindert das Eintreten von Wasser in den Samen, und so fehlt die wesentliche Voraussetzung für die Keimung (Bewley und Black, 1994). Nach Adkins (2002) ist eine solche Unterbindung der Wasseraufnahme bei Gräsern aber eher unüblich.

Wie in den Ergebnissen bereits erwähnt, war bei den Klimakammerversuchen ein Pilzbefall der Samen zu beobachten. Sowohl gekeimte als auch nicht gekeimte Samen waren befallen. Auch Wening (2009) konnte einen solchen Schimmelbefall der Samen in ihren Experimenten feststellen. Da bei den Samen keine Oberflächensterilisation durchgeführt wurde und die Petrischalen steril waren, wird vermutet, dass die Erreger in den Samen mit eingeschleppt wurden. Die Samen beider Gräser stammen nicht aus einer Saatgutproduktion, sondern wurden an ihrem natürlichen Standort, der inneren Mongolei, gesammelt. Bei den Samen wurde keine Oberflächensterilisation durchgeführt, da sich in Vorversuchen zeigte, dass die Keimungsraten bei dieser Behandlung drastisch verringert waren. Der Pilzbefall könnte möglicherweise eine Ursache für die geringe Keimungsfähigkeit der Samen von *L. chinensis* in der Klimakammer sein. Samen von *S. grandis* keimten jedoch trotz des Pilzbefalls.

### 2.3.2 Keimungsgeschwindigkeit

Bei der Keimungsgeschwindigkeit von *S. grandis* bei den Klimakammerversuchen zeigten sich keine signifikanten Unterschiede beim Vergleich der ungequollenen Varianten A und C mit den gequollenen Varianten B und D. Einzig die Variante D unterschied sich signifikant von der Kontrollvariante A. Das Vorquellen der Samen und die Wässerung mit der  $\text{CaCl}_2$ -Lösung verlangsamten den Prozess der Keimung.

Bei der Direktsaat ließen sich bei beiden Gräsern *S. grandis* und *L. chinensis* keine signifikanten Unterschiede bei den vier Varianten finden. Da die Samen bei der Direktsaat mit Boden bedeckt waren, konnten gekeimte Samen erst als solche erkannt werden, wenn der Keimspross an der Bodenoberfläche erschien. Bei den Keimungsversuchen in der Klimakammer konnten gekeimte Samen sofort anhand des Austretens der Radicula erkannt werden. Dieser Umstand sollte für die Samen der Klimakammer vorteilhaft sein. Da aber die Samen die Direktsaat nur sehr flach gesät wurden sollte dieser Vorteil nicht sehr groß sein. Betrachtet man die Mittelwerte der Varianten von *S. grandis* in der Klimakammer im Vergleich zur Direktsaat, so zeigten jedoch die Samen der Direktsaat bei allen Varianten bessere Ergebnisse als beim Klimakammerversuch.

Es zeigte sich also, dass die Methode der Direktsaat für die Keimung beider Gräser besser geeignet war. Sowohl die Anzahl der gekeimten Samen, als auch die Keimungsgeschwindigkeit war bei den Direktsaatversuchen höher als in den Klimakammerversuchen. Dies gilt vor allen für die Samen von *L. chinensis*, welche in der Klimakammer überhaupt nicht keimten.

## 3 Dampfdruckdefizit-Versuch

### 3.1 Material und Methoden

#### 3.1.1 Versuchsaufbau

Reaktionen in der Transpiration zweier Gräser *Stipa grandis* und *Leymus chinensis* auf unterschiedliche Dampfdruckdefizite wurden getestet. Wie bei Wherley und Sinclair (2009) wurden verschiedene Feuchtigkeitsstufen in einer Kammer durch Vorbehandlung der Luft etabliert, um Bereiche von Dampfdruckdefiziten zu erlangen.

In einer Kammer wurden Luftfeuchten von 25%, 50% und 75% eingestellt und dabei die Transpiration der Gräser bestimmt. Mit einem Sensor wurden Temperatur und relative Luftfeuchte während des Versuchs gemessen und daraus später die Dampfdruckdefizite errechnet (Wherley und Sinclair, 2009).

In einer Kammer wurde die jeweilige Feuchtigkeitsstufe durch einen Lufttrocknungs- und einen Luftbefeuchtersystem eingestellt. Dann wurde die Pflanze in der Kammer auf einer Waage platziert. Mit der Waage konnte der durch Evapotranspiration verursachte Wasserverlust beobachtet werden. Mit einer Stoppuhr wurde gemessen, wie lang ein Gewichtsverlust von 0,1 g benötigte. Es wurde so lange gemessen, bis die Zeitintervalle der Gewichtsverluste annähernd konstant waren. Wenn dieser Fall eintrat, wurde die Pflanze wieder aus der Kammer entfernt und die nächste Stufe wurde eingestellt. Begonnen wurde mit der niedrigsten Stufe, also einer relativen Luftfeuchte von 25%. Es folgten 50% und 75% relativer Luftfeuchte.

Da mit der Waage der Gewichtsverlust der Evapotranspiration ermittelt wurde, war es nötig einen Referenztopf mit in die Kammer zu stellen. Der Referenztopf mit Boden aber ohne Pflanze lieferte Daten über die Evaporation. So konnte später die Transpiration rechnerisch ermittelt werden. Um Evaporationsverluste gering zu halten wurde der Boden in den Versuchstöpfen und im Referenztopf mit einer Schicht Kies überdeckt.

Pro Tag wurde ein Exemplar von *Stipa grandis* und eines von *Leymus chinensis* gemessen. In den drei Versuchstagen wurden insgesamt drei Pflanzen je Gras gemessen. Wenn die Pflanze alle drei Stufen durchlaufen hatte, wurden die Blattfläche und das Trockengewicht bestimmt.

### 3.1.2 Aufzucht der Pflanzen

#### 3.1.2.1 Setzen der Keimlinge

##### 3.1.2.1.1 Klimakammerkeimlinge

Die aus dem Klimakammerversuchen hervorgegangenen Keimlinge wurden im Gewächshaus in Töpfe gesetzt. Es wurden Pflanztöpfe (TEKU-Tainer; MQC; Kantenmaß oben 11 cm x 11cm; Höhe 12 cm; Pöppelmann) mit einem Füllvolumen von 1000 mL verwendet. Zunächst wurden die Töpfe gewaschen um unerwünschte Verschmutzungen zu entfernen. Die Töpfe waren mit einem Multiloch- Kreuzboden ausgestattet. Da unter sehr kontrollierten Bedingungen gearbeitet werden sollte, wurden sie von unten mit transparentem Paketklebeband (Tesa Pack; Breite 38 mm) abgedichtet. Jeder Topf wurde mit einem gekennzeichneten Etikettenkleber versehen.

Die abgedichteten Töpfe wurden alle bis zu einem Gewicht von 660 g mit Boden befüllt. Der Boden wurde mit einer Sprühflasche angefeuchtet. Mit einem dünnen Stäbchen wurden nun in jeden Topf vier 2-2,5 cm tiefe Löcher gebohrt. Die Löcher wurden nun wieder mit der Sprühflasche befeuchtet, damit dem Keimling nach dem Setzen sofort Wasser zur Verfügung steht. Je ein Keimling wurde in die vier Löcher gesetzt. Somit ergab sich eine Pflanzdichte von vier Pflanzen pro Topf (Wang *et al.*, 2008). Samen und Keimwurzel wurden mit Boden bedeckt und dieser rückverfestigt. Die Rückverfestigung diente, wie auch schon beim Direktsaatversuch beschrieben, dem Kapillaranschluss.

Nachdem die Keimlinge gesetzt waren, wurden die Töpfe unter Gewächshauslampen (400 W; Professional Lightning; Typ SON-k-400) gestellt. Es wurde täglich gegossen. Der Bodenfeuchtegehalt wurde auf 70% der maximalen Wasserhaltekapazität angehoben (Wang *et al.*, 2008).

##### 3.1.2.1.2 Direktsaatkeimlinge

Auch die Keimlinge der Direktsaat sollten in Töpfe gesetzt werden. Dazu mussten diese aber erst aus ihren Direktsaattöpfen gelöst werden. Der Boden in den Töpfen wurde stark befeuchtet, was ein Herauslösen erleichterte. Der Boden wurde mitsamt den Keimlingen aus den Direktsaattöpfen genommen. In einer mit Wasser gefüllten Wanne wurden die Keimlinge aus dem Boden gelöst. Die Vorbereitung der Töpfe und das Setzen der Keimlinge liefen ab, wie bei den Klimakammerkeimlingen beschrieben.

### 3.1.2.2 Vereinzeln

Keimlinge von *Stipa grandis* und *Leymus chinensis* wurden je zu viert in den Pflanztöpfen gezogen. Nach 75 Tagen Wachstum in den Töpfen hatten die Pflanzen in ihrer Spross- und Wurzelmasse zugelegt was den Raum in den Töpfen sehr beengt. Zur besseren Entwicklung der Individuen wurden die Pflanzen einzeln in Töpfe gesetzt. Zudem wurden bei den späteren Versuchen Reaktionen einzelner Pflanzen gemessen.

40 Pflanztöpfe (TEKU-Tainer; MQC; Kantenmaß oben 11 cm x 11cm; Höhe 12 cm; Volumen 1000 mL; Pöppelmann) wurden mit Paketklebeband (Tesa Pack; Breite 38 mm) unten abgedichtet. Das Leertopfgewicht wurde gewogen und ein durchschnittliches Gewicht von 27,7 g ermittelt. Die abgedichteten Töpfe wurden mit Boden befüllt, bis ein Gewicht von 660 g erreicht war und beschriftet. Der Boden wurde anschließend befeuchtet.

Die mit vier Pflanzen besetzten Töpfe wurden vor dem Umsetzen stark gegossen, was später das Herauslösen erleichterte. Nach kurzer Einwirkzeit wurde der Boden mit den vier Pflanzen aus dem Topf gelöst und zum weiteren Einwirken für fünf Minuten in eine mit Wasser gefüllte Wanne gestellt. Darin wurde sämtlicher Boden von den Wurzeln gelöst, damit kein Boden mit in die neuen Pflanztöpfe kam und dessen Gewicht verfälschte. Ein zusätzliches Gewicht durch eingebrachten Boden hätte die maximale Wasserhaltekapazität der Töpfe verändert und so zu einer inhomogenen Wässerung geführt.

Die von Boden befreiten Einzelpflanzen wurden nun in die vorbereiteten Töpfe gesetzt. Jeweils zwanzig Pflanzen von *S. grandis* und zwanzig von *L. chinensis* wurden vereinzelt. In den angefeuchteten Boden wurde mit einem dünnen Stab ein Loch in die Mitte des Topfes gebohrt, in welches die Pflanze gesetzt wurde. Die Wurzeln und ein Teil des Sprosses wurden mit Boden bedeckt und dieser durch Andrücken rückverfestigt. Die Töpfe wurden auf 70% der maximalen Wasserhaltekapazität aufgewässert.

### 3.1.2.3 Pflege

Die Pflanzen wurden täglich mit Hilfe einer Waage (Kern PCB; Messbereich Maximal 2000 g, Ablesbarkeit d 0,1 g) auf 70% der Wasserhaltekapazität aufgewässert. Die Anordnung der Töpfe wurde alle 2-3 Tage zufällig verändert um Konkurrenz um Wachstumsfaktoren wie Licht, Temperatur zu vermeiden und die Pflanzen unter konstanten und gleichen Bedingungen zu halten. Während der Aufzucht der Pflanzen

betrug die durchschnittliche Temperatur tagsüber 30,3°C und die relative Luftfeuchte 39,3%. Nachts lagen die durchschnittlichen Werte bei 23,7°C und 60,1% relativer Luftfeuchte. Die Aufzucht fand unter 400 W Gewächshauslampen (Professional Lightning; Typ SON-K-400) statt, mit einem Tag-Nacht-Programm von 10 Stunden Licht und 14 Stunden Dunkelheit.

Bei Versuchsbeginn waren die Pflanzen 124 Tage alt. Die lange Wachstumsphase begründete sich einerseits in der Anforderung mit adulten Pflanzen zu arbeiten. Andererseits erlitten die Pflanzen am Tag 82 eine erhebliche Schädigung durch einen Gewächshausdefekt, welcher eine enorme Temperaturerhöhung bis zu 52°C zu Folge hatte. Damit sich die Pflanzen von den Schäden erholen konnten ließ man sie noch weitere sechs Wochen wachsen. Diese erholten sich sehr schnell wieder, jedoch mussten extrem beschädigte und verdorrte Blätter entfernt werden.

### 3.1.3 Bestimmung der maximalen Wasserhaltekapazität

Alef (1991) definiert die maximale Wasserhaltekapazität ( $WHK_{max}$ ) eines Bodens als die von 100 g Trockensubstanz aufgenommene Wassermenge.

Wenn die Wasserhaltekapazität eines Bodens überschritten ist, kommt es zu Versickerungen (Bossel, 2004).

Zur Bestimmung der maximalen Wasserhaltekapazität wurden fünf Pflanztöpfe (TEKU-Tainer; MQC; Kantenmaß oben 11 cm x 11cm; Höhe 12 cm; Volumen 1000 mL; Pöppelmann) bis ca. 2 cm unter Rand mit Boden befüllt. Vorher wurde das Leergewicht des Topfes bestimmt. Nachdem die Töpfe mit Nummern von eins bis fünf versehen waren, wurde das Gewicht jedes Topfes im unbewässerten Zustand festgehalten. Der verwendete Boden enthielt noch einen gewissen Anteil Restfeuchte, der später durch Trocknung im Trockenofen bestimmt wurde.

Nun wurde der Boden mit Wasser gesättigt. Dazu wurden die fünf Töpfe in eine Pflanzwanne gestellt und diese mit Wasser gefüllt. Durch den Multiloch-Kreuzboden der Töpfe konnte sich der Boden von unten mit Wasser voll saugen. Zusätzlich wurde der Boden alle 30 Minuten von oben gewässert. Nachdem der Boden übermäßig mit Wasser voll gesogen war, wurde eine Multitopfpflanzplatte umgekehrt in die Mitte der Wanne gelegt und die Töpfe auf diese Erhöhung gestellt (siehe Abbildung 9). Da die Multitopfpfplatten unten Löcher hatten, konnte das überschüssige Wasser der Töpfe abtropfen.



**Abbildung 9: Bestimmung der maximalen Wasserhaltekapazität**

Eine umgedrehte Pflanzwanne, die von oben auf die Töpfe gelegt wurde verhinderte Wasserverluste durch Evaporation. Nach 24 Stunden waren immer noch Sickertropfen am Boden der Töpfe sichtbar. Sobald kein Abtropfwasser am Boden der Töpfe mehr erschien (Alef, 1991), was nach 48 Stunden der Fall war, wurden die Töpfe gewogen. Aus der Differenz zwischen ungewässertem und wassergesättigtem Boden wurde die Wasserhaltekapazität des Bodens errechnet. Aus den Daten der fünf Töpfe wurde ein Durchschnittswert errechnet.

### **3.1.4 Bestimmung des Trockengewichts des Bodens**

100 g Boden wurden bei 105 °C in einen Trockenofen bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Die Temperatur im Trockenschrank sollte nicht mehr als 105°C betragen, da sonst das Wasser in den Tonmineralen oder in Kristallen, welches nicht zur Restfeuchte zählt, mit entweicht (Stahr *et al.*, 2008).

### 3.1.5 Bau der Versuchskammer

#### 3.1.5.1 Kammer

Das Grundgerüst der Kammer wurde aus Dachlatten mit 4,5 cm Breite und 2,5 cm Dicke gefertigt. Die Latten wurden auf die entsprechende Länge abgesägt und mit sechzehn verzinkten Stahlwinkeln (60 mm x 60 mm x 16 mm) verbunden. Die Kammer hatte am Ende eine Größe von 40 cm x 40 cm x 100 cm. Für die Verkleidung diente eine durchsichtige Gartenbaufolie (Gutttagliss-Solair-Extra; PET). Wichtig war hier die Auswahl einer für den Garten-/Gewächshausbau geeigneten Folie, da sonst die Gefahr bestand, dass photosynthetisch aktive Strahlung nicht durchdringen konnte. Aus der Folie wurden vier große Stücke für die Seitenwände (38 cm x 98 cm) und ein kleines (38 cm x 38 cm) für das Dach zurechtgeschnitten. Die Folie wurde mit Schrauben (verzinkt; 3,5 mm x 20 mm; Connex) und Tackernadeln (Höhe 8 mm; Länge 10,6 mm; Breite 1,25 mm; Lux Werkzeuge) am Grundgerüst befestigt. Zur Abdichtung wurden die Verbindungsstellen von innen mit Aquariumssilikon bestrichen.

An der rechten Seitenwand wurde eine 40 cm x 50 cm große Tür installiert um das Befüllen der Kammer zu erleichtern. Die Tür wurde, wie die Kammer, aus Dachlatten, Gartenbaufolie und vier Stahlwinkeln (verzinkt; 40 mm x 40 mm x 16 mm) gebaut und mit zwei Scharnieren (schmal; 80 mm x 41 mm) befestigt. Ein Sturmhaken (Schwinn-DIY; Haken 60 mm lang) diente als Riegel.

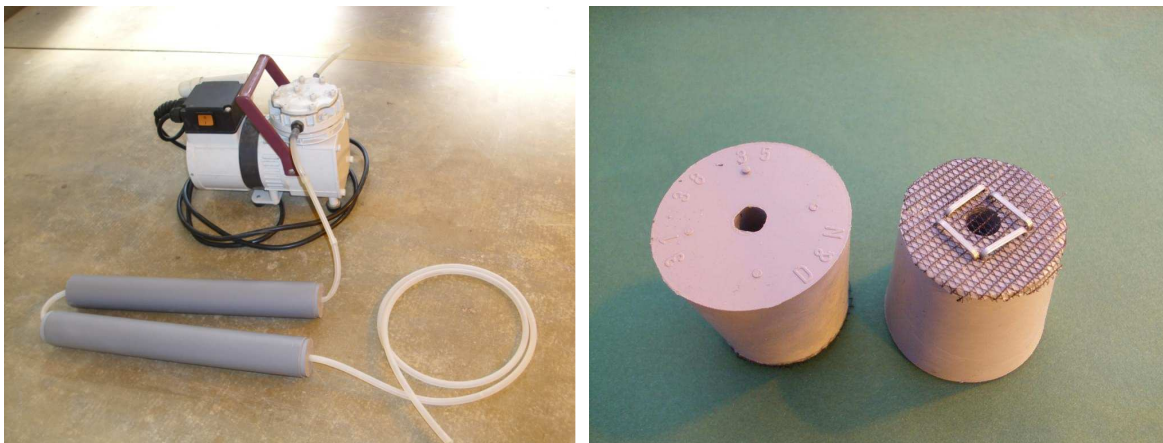
Damit ein gewisser Luftaustausch stattfinden konnte, werden mit dem LötKolben Löcher in 80 cm Höhe in die Seitenwände, in das Dach und die Tür gebrannt. Der Luftaustausch stellt sicher, dass während der Versuche kein CO<sub>2</sub> Mangel auftrat (Gholipoor *et al.*, 2010).

#### 3.1.5.2 Lufttrocknungssystem

Das Grundprinzip des Lufttrockners bestand darin, Gewächshausluft durch ein Röhrensystem mit Trockenperlen zu pumpen und die dadurch getrocknete Luft in die Kammer zu leiten. Auch Wherley und Sinclair (2009) ließen Luft durch mit Trocknungsmittel gefüllte Röhren strömen, bevor sie diese in eine Kammer leiteten.

Zwei Polypropylenröhren mit 30 cm Länge und 4 cm Außendurchmesser wurden mit Trocknungsmittel (Silika Gel Orange; 1-3 mm, Indikator, Perlform) gefüllt. Stopfen (Rotilabo-Stopfen mit Bohrung; Ø unten 31 mm, Ø oben 38 mm, Ø Höhe 35 mm, Ø Bohrung 7 mm) verschließen an beiden Enden die Röhren. Die Röhren wurden durch

Silikonschläuche ( $\varnothing$  innen 5 mm;  $\varnothing$  außen 7 mm; Wandstärke 1 mm) miteinander verbunden, durch die später die Luft gepresst wurde. Um zu verhindern, dass Silikagel-Kügelchen in die Schläuche eindringen und diese verstopfen, wurden an der Bodenseite der Stopfen Fliegengitternetzstücke (Maschenweite 2 mm) mit Tackernadeln (Höhe 8 mm; Länge 10,6 mm; Breite 1,25 mm; Lux Werkzeuge) und wasserfestem Klebstoff (Tangit PVC-U; Spezialklebstoff von Henkel) befestigt (siehe Abbildung 10, rechts). Die miteinander verbundenen Röhren wurden an einem Ende durch einen Silikonschlauch ( $\varnothing$  innen 5 mm;  $\varnothing$  außen 7 mm; Wandstärke 1 mm) mit einer Membran-Vakuumpumpe (KF Neuberger; Netzanschluss 239 V/ 50 Hz;  $P_{\max}$  4 bar) verbunden. Am anderen Ende führte ein weiterer Silikonschlauch derselben Größe die nun getrocknete Luft auf Höhe des Ventilatorgehäuses in die Kammer.



**Abbildung 10: Lufttrocknungssystem (li.) und Stopfen (re.)**

Das Lufttrocknungssystem ist in Abbildung 10 (links) dargestellt.

Das verwendete Silikagel war mit einem Farbindikator ausgestattet. Die Kügelchen veränderten ihre Farbe von orange nach farblos wenn sie wassergesättigt waren. So konnte neues Silikagel eingefüllt werden, wenn zu sehen war, dass ein Großteil der benutzten Kügelchen farblos war.

Wenn das System nicht in Gebrauch war, wurden die Bohrungen der Stopfen mit Klebeband (Tesa Pack; Breite 38 mm) verschlossen, damit keine Feuchtigkeit der Umgebungsluft in die Röhren eindrang.

### 3.1.5.3 Luftbefeuchtersystem

Das Grundprinzip des Luftbefeuchters bestand darin, die von einem Ultraschallvernebler produzierte feuchte Luft mit Hilfe eines Ventilators durch ein Schlauchsystem in die Kammer zu leiten.

Ein 5 Liter Plastikeimer (Höhe 19,5 cm; Ø 21 cm; Jockey) wurde als Wasserbehälter für den Ultraschallvernebler (Fogstar 100; Seliger) verwendet. Durch die schwingende Glasmembrane des Nebblers entstand Ultraschall der Wasser zu feinem Wassernebel zerstäubte. Der Vernebler wurde auf dem Boden des Eimers platziert und dieser zu Hälfte mit Wasser gefüllt. In den Deckel des Eimers wurde ein Loch mit dem Durchmesser des verwendeten HT Reinigungsrohr (aus Polypropylen) geschnitten. Deckel und Rohr wurden mit Schrauben (verzinkt; 3,5 mm x 20 mm; Connex) verbunden und die Verbindungsstelle mit Aquariumssilikon abgedichtet. Ein HT Flexschlauch (Außendurchmesser 5 cm) wurde auf 55 cm zugeschnitten und mit dem Reinigungsrohr verbunden. Am oberen Teil des Schlauchs wurde ein Aufsatzstück montiert. Für das Aufsatzstück wurde ein Plastiktopf (TEKU-Tainer; MQC; Kantenmaß oben 11 cm x 11cm; Höhe 12 cm; Volumen 1000 mL; Pöppelmann) halbiert und der Boden entfernt. An den Boden des Topfes wurde ein Stück Gartenbaufolie (Guttagliss-Solair-Extra; PET) angepasst und mit Schrauben (verzinkt; 3,5 mm x 20 mm; Connex) befestigt. In die Mitte der Folie wurde ein Loch mit der Größe des Schlauchs geschnitten. Schlauch und Folie wurden wieder mit Schrauben verbunden und die Verbindungsstelle mit Silikon abgedichtet.

Das Aufsatzstück wurde benötigt um das Nebblersystem mit dem Ventilatorgehäuse zu verbinden. Dieses konnte später einfach aufgesteckt werden.

Auch für das Ventilatorgehäuse wurde ein Plastiktopf (TEKU-Tainer; MQC; Kantenmaß oben 11 cm x 11cm; Höhe 12 cm; Volumen 1000 mL; Pöppelmann) verwendet dessen Boden entfernt wurde. Der Ventilator (MAG8012LB-025; 12 V; Elektrosil GmbH) wurde mit Schrauben im Gehäuse fixiert. Damit die Luftzirkulation während des ganzen Ablaufs konstant war, arbeitete der Ventilator während allen drei Stufen relativer Luftfeuchte. Das Gehäuse wurde nun in der seitlichen Kammerwand befestigt. Dazu musste eine entsprechende Öffnung in die Folie geschnitten und unterhalb der Öffnung eine Trägerleiste installiert werden. Das Ventilatorgehäuse wurde halb durch die Öffnung geschoben und an der Trägerleiste befestigt. Zusätzlich wurde das Gehäuse von außen mit schwarzem Klebeband (Tesa extra power Universal; Breite 50 mm) an der Folie fixiert. Das Klebeband verhinderte außerdem das Austreten von Wasserdampf.

Bei Testläufen zeigte sich, dass sich schnell Kondenswasser im Gehäuse ansammelt. Um das zu verhindern wurde ein Rücklaufsystem entwickelt. Am hinteren Ende des Gehäuses wurde mit einem LötKolben ein kleines Loch eingebracht. Da das Gehäuse mit leichter Schräglage nach hinten montiert war, konnte das Kondenswasser nach hinten und durch das Loch ablaufen. Das austretende Wasser wurde von einem unter dem Loch befindlichen Trichter (Ø 7 cm, Höhe 7 cm) aufgefangen und über einen Silikonschlauch (Ø innen 6 mm; Ø außen 9 mm; Wandstärke 1,5 mm) zum Eimer zurück geführt.



Abbildung 11: Deckel mit Regelmechanismus

Das HT Reinigungsrohr hatte in der Mitte eine Reinigungsöffnung, die mit einem Schraubdeckel verschlossen war. Hier wurde ein Regelmechanismus installiert. Dazu wurde mit einer Laubsäge eine halbmondförmige Öffnung in den Deckel gesägt. Aus Gartenbaufolie wurde ein kreisförmiges Stück in der Größe des Deckels zugeschnitten und mit einer Edelstahlschraube am Deckel befestigt. Auf die Schraube war von vorn eine Stopfmutter aufgedreht die unbeabsichtigtes auf-/festdrehen der Schraube beim Regeln verhinderte. Durch hin- und herdrehen konnte die Öffnungsweite reguliert werden. In Abbildung 11 ist dieser Regelmechanismus zu sehen. Die Öffnungsweite hatte Einfluss auf die Intensität des durch das Rohr transportierten Nebels.

### 3.1.5.4 Datenlogger (Tinytag)

Für den Versuch war es nötig drei unterschiedliche Levels relativer Luftfeuchte zu erreichen und diese konstant zu halten. Zur Kontrolle der relativen Luftfeuchte wurde ein TinyView 2 Miniatur Temperatur/ Feucht-Datenlogger mit LCD-Display (TV-4506; -25 °C → +85 °C; 0 → 100 %RL) eingesetzt, welches relative Luftfeuchte und Temperatur über einen Sensor maß. Messwerte wurden an das Gerät weitergeleitet und konnten am

Display abgelesen werden. So wurden Abweichungen von gewünschten Werten sichtbar und es konnte gegengesteuert werden.

Durch eine in 35 cm Höhe befindliche Öffnung in der Seitenwand konnte der Sensor in der Kammer platziert werden.

### **3.1.5.5 Waage**

Für den Versuch wurde eine Kern PCB Laborwaage (Messbereich Max. 2000 g, Ablesbarkeit d 0,1 g) verwendet. Für das Netzkabel wurde eine Kerbe in die rechte Holzplatte des Kammerbodens gesägt. Somit konnte das Waagenkabel aus der Kammer herausgeführt und Schäden am Kabel vermieden werden.

### **3.1.5.6 Bodenplatte**

Die Kammer und das Luftbefeuchtungssystem wurden auf eine 80 cm x 40 cm Leimholzplatte aus Fichtenholz gestellt. Dies schuf einen ebenen Untergrund und gab der Konstruktion Stabilität.

Die fertige Kammer wurde unter eine Gewächshauslampe (400 W; Professional Lightning; Typ SON-k-400) gestellt. Eine Schemazeichnung der Kammer mit Lufttrocknungs- und Luftbefeuchtungssystem ist in Abbildung 12 zu sehen.

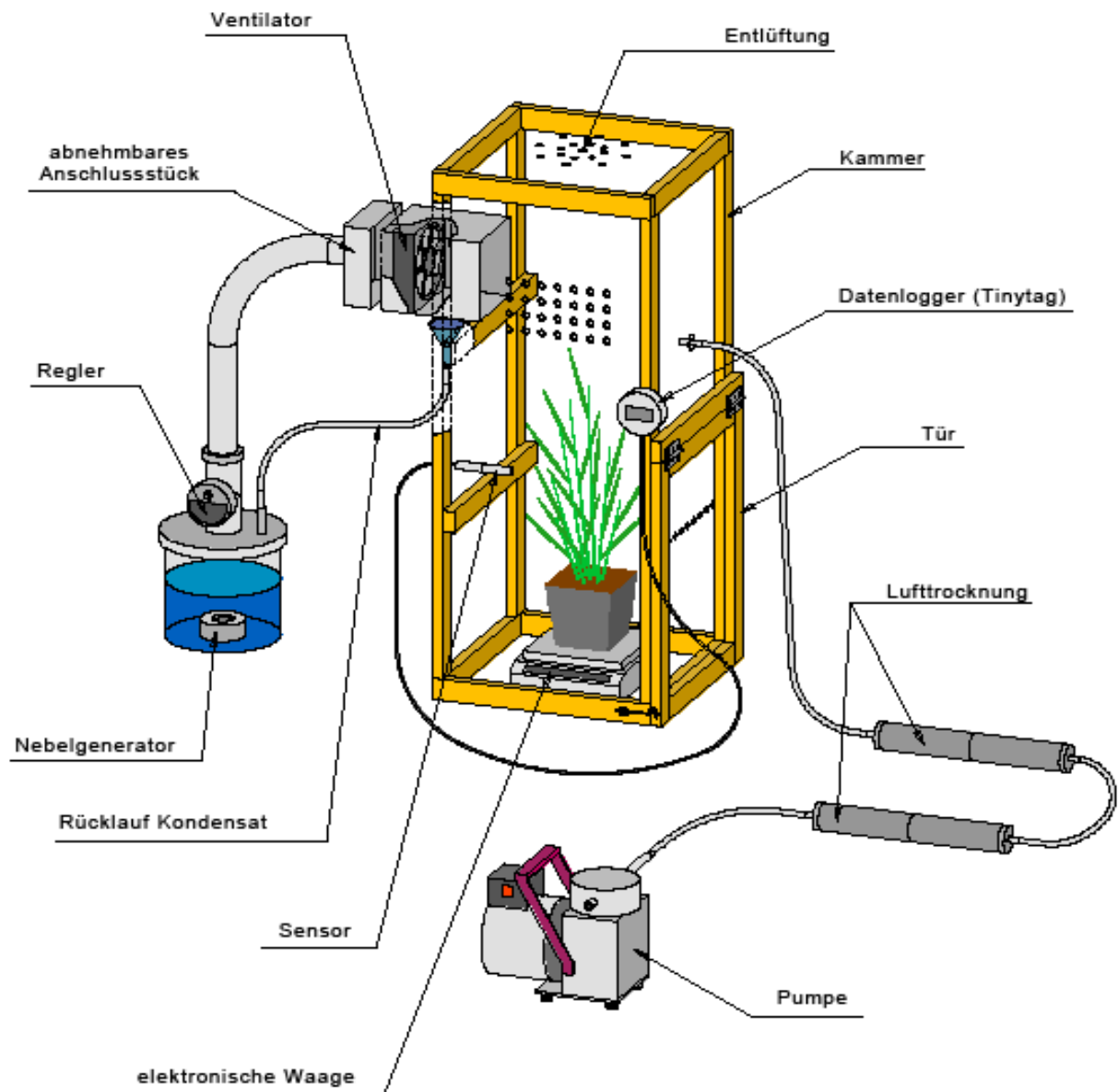


Abbildung 12: Schema der Versuchskammer

### 3.1.6 Vermeidung der Evaporation

Für den Versuch sollte die Evaporation in den Versuchstöpfen auf ein Minimum reduziert werden. Dies sollte mit einer Schicht Kies geschehen. Eine Abdeckung des Bodens mit Alufolie, wie sie bei Gholipoor *et al.* (2010) zur Unterbindung der Evaporation verwendet wurde, war aufgrund der Morphologie der Gräser nicht möglich. Wie in Abbildung 13 zu sehen ist, bildete *Leymus chinensis* unterirdische Ausläufer (Rhizome) welche über den ganzen Topfquerschnitt wieder auftauchten. *Stipa grandis* hatte sehr feine federartige Blätter. Hieraus war ersichtlich, dass sich Kies für die Bodenbedeckung am besten eignete.



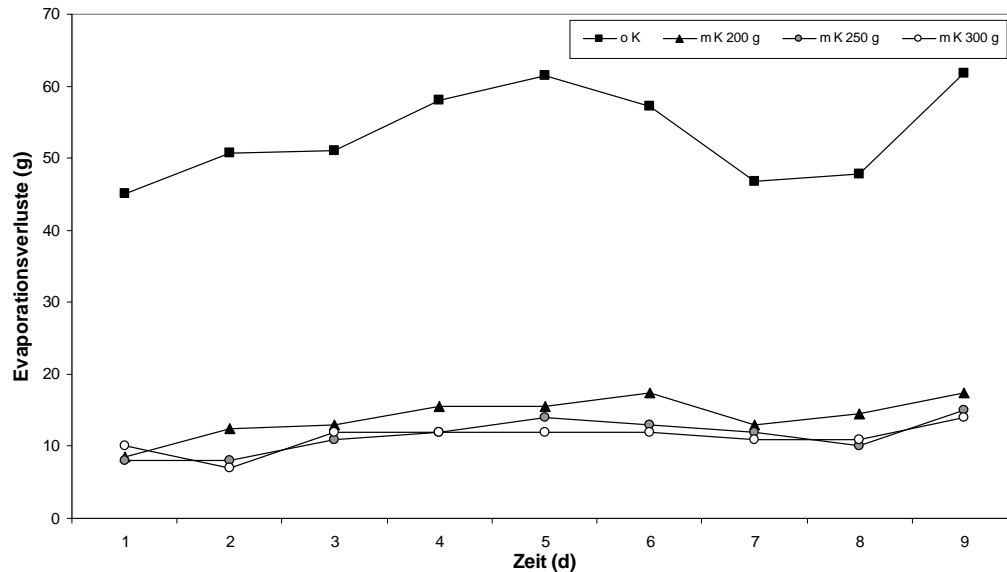
Abbildung 13: *S. grandis* (li.) und *L. chinensis* (re.) mit ausgewaschenen Wurzeln

Wasserverluste ohne jegliche Abdeckung sollten Wasserverlusten mit Bodenabdeckung gegenüber gestellt werden. Es wurden Mengen von 200 g, 250 g und 300 g Kies geprüft. Damit man aussagekräftige Werte erhielt, wurden die gleichen Bedingungen wie bei den Versuchspflanzen geschaffen. Sieben Pflanztöpfe (TEKU-Tainer; MQC; Kantenmaß oben 11 cm x 11cm; Höhe 12 cm; Volumen 1000 mL; Pöppelmann) wurden gereinigt, von unten mit Klebeband abgedichtet und bis zu einem Gewicht von 660 g mit Boden befüllt. Es wurde auf 80% der Wasserhaltekapazität aufgewässert.

Vier Töpfe dienten zur Ermittlung der Evaporation ohne Abdeckung. Aus deren Daten wurde später ein Durchschnittswert errechnet. In drei Töpfen wurde der Wasserverlust

mit Kiesabdeckung gemessen. Der Boden in den Töpfen wurde mit 200 g, 250 g und 300 g Kies bedeckt.

Die sieben Töpfe standen unter einer Gewächshauslampe (400 W; Typ SON-K-400). Ihre Positionen wurden täglich zufällig gewechselt. Neun Tage lang wurden die Töpfe im 24-Stunden-Rhythmus gewogen, Gewichtsverluste notiert und wieder aufgewässert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 14 dargestellt.



**Abbildung 14: Evaporationsverluste mit und ohne Kiesabdeckung**

Im Diagramm sind Wasserverluste durch Evaporation in Gramm dargestellt. Ohne Abdeckung mit Kies (o K) und mit 200, 250 und 300 g Kiesabdeckung (m K) .

Eine Abdichtung mit 300 g Kies ergab die kleinsten Evaporationsverluste. Eine weitere Erhöhung der Kiesmenge war nicht sinnvoll, da die Unterschiede bei 250 g und 300 g schon nicht mehr gravierend waren. Durchschnittlich lagen die Verluste mit 250 g Kies bei 11,4 g. Bei 300 g Kies lagen sie bei 11,2 g. Im Vergleich zu 14,2 g durchschnittlichem Wasserverlust mit 200 g Kies zeigte sich aber eine verringerte Evaporation durch mehr Kies. Töpfe ohne Abdeckung verloren durchschnittlich 53,2 g Wasser.

Der später im Versuch verwendete Kies wurde in einer Pflanzwanne ausgebreitet und zum trocknen für zwei Tage unter eine Gewächshauslampe gestellt.

### 3.1.7 Evaporation- Referenztopf

Um die bei dem Versuch ermittelte Evapotranspiration rechnerisch in Evaporation und Transpiration trennen zu können, war es nötig während des Versuchs einen Referenztopf mitzuführen, der Daten zur Evaporation angab.

Ein Pflanztopf (TEKU-Tainer; MQC; Kantenmaß oben 11 cm x 11cm; Höhe 12 cm; Volumen 1000 mL; Pöppelmann) wurde mit Klebeband abgedichtet, mit Boden befüllt und dieser mit 300 g Kies bedeckt. Aufgewässert wurde auf 80% der Wasserhaltekapazität. Größe des Topfes, Bodenmenge, Wassergehalt und Kiesabdeckung (300 g) entsprachen denen der Töpfe der Versuchspflanze.

Der Referenztopf stand während des Versuchs mit in der Kammer und war so den gleichen Bedingungen ausgesetzt wie die Versuchspflanze. Durch Wiegen des Referenztopfes bei Beginn und am Ende der jeweiligen Stufe relativer Feuchtigkeit wurden die Wasserverluste durch Evaporation ermittelt.

### 3.1.8 Versuchsdurchführung

#### 3.1.8.1 Vorbereitungen

Eine Stunde vor Versuchsbeginn wurde die Pflanze gewogen und auf 80% der Wasserhaltekapazität aufgewässert. Die Pflanze musste ausreichend mit Wasser versorgt sein um das Auftreten eines Trockenstresses durch den Boden zu vermeiden. Bei dem Versuch sollten nur die Auswirkungen einer veränderten atmosphärischer Bedingungen untersucht werden. Ein Stress durch Bodentrockenheit hätte die Ergebnisse verfälscht. Dies wurde durch ausreichendes Wässern vermieden.

Um Wasserverluste durch Evaporation möglichst gering zu halten, wurde der Boden in der Pflanztöpfen mit einer Schicht Kies überzogen. In Vorversuchen zeigte sich eine Menge von 300 g Kies als optimal. Der Kies wurde nach dem Wässern und kurz vor Versuchsbeginn in die Töpfe gegeben, damit sich das Gießwasser unterhalb der schützenden Kiesschicht befand. Bevor der Versuch begann wurde die Gewächshauslampe, unter der die Kammer stand, angeschaltet.

### 3.1.8.2 Auswahl der Versuchspflanzen

Der Bestand von *Leymus chinensis* und *Stipa grandis* setzte sich aus je 20 Pflanzen zusammen. Vor Beginn wurden Exemplare für den Versuch ausgewählt und gekennzeichnet. Je drei Pflanzen von *Leymus chinensis* und drei von *Stipa grandis*.

Es wurden Pflanzen gewählt, die in Größe und Wuchsform möglichst homogen in ihrem Erscheinungsbild waren.

### 3.1.8.3 Durchführung

Die Versuche fanden vom 21.-23. September 2010 in einem Gewächshaus der Universität Hohenheim statt. An jedem Versuchstag wurde um ca. 08.15 Uhr mit dem Versuch begonnen.

Zuerst musste eine relative Luftfeuchte von 25% in der Kammer eingestellt werden. Dies geschah mit Hilfe des Lufttrocknungssystems. Wenn konstante Werte erreicht waren, wurde die Versuchspflanze in der Kammer auf der Waage platziert und der Referenztopf wurde nach Messung des Startgewichts ebenfalls in die Kammer gestellt.

Bei der Versuchspflanze sollte die Zeit gemessen werden, die für einen Gewichtsverlust von 0,1 g benötigt wurde. Wenn die Nachkommastelle der Waagenanzeige zum ersten Mal umsprang wurde mit den Messungen begonnen. Um am Beginn des Zeitintervalls anfangen zu können, war es wichtig diesen Zeitpunkt abzutun.

Mit einer Stoppuhr maß man nun die Zeit vom ersten Umspringen der Nachkommastelle bis zum nächsten Umspringen, also bis eine Gewichtsreduktion von 0,1 g eintrat. Dies wurde so lange wiederholt, bis die Messwerte annähernd konstant waren. Wenn dieser Fall eintrat, wurden die Messungen beendet. Die Versuchspflanze und der Referenztopf wurden aus der Kammer genommen. Das Endgewicht des Referenztopfes wurde notiert.

Nun wurde in der Kammer mit Hilfe des Luftbefeuchtersystems eine relative Luftfeuchte von 50% erzeugt. Die Versuchspflanze wurde wieder in der Kammer auf der Waage platziert und auch der Referenztopf wurde nach Gewichtsbestimmung in die Kammer gestellt. Nach dem gleichen Prinzip wie oben beschrieben, wurden wieder Zeitmessungen bis zu konstanten Werten durchgeführt und Versuchspflanze und Referenztopf aus der Kammer genommen. Das Endgewicht des Referenztopfes wurde bestimmt.

Mit dem Luftbefeuchtersystem wurde die höchste Stufe, also 75% relativer Luftfeuchte eingestellt. Wenn auch hier annähernd konstante Zeitintervalle auftraten, galt diese Feuchtestufe als abgeschlossen. Natürlich wurden auch hier das Start- und Endgewicht des Referenztopfes notiert.

Wenn die Versuchspflanze alle drei Stufen durchlaufen hatte, war für sie das Experiment beendet und es wurden Blattfläche und Trockenmasse bestimmt.

An jedem der insgesamt drei Versuchstage wurde ein Exemplar von *Leymus chinensis* und eines von *Stipa grandis* untersucht. Somit wurden insgesamt drei Pflanzen von *L. chinensis* und drei von *S. grandis* untersucht. Täglich wurde mit einer Pflanze von *Leymus chinensis* begonnen. Danach durchlief die Pflanze von *Stipa grandis* das Prozedere.

Während des Versuchs lag die Tag-/Nacht-Temperatur bei 29,6/ 26 °C. Die relative Luftfeuchte betrug tagsüber 33,9% und nachts 49,7%.

### 3.1.8.4 Möglichkeiten zur Regulierung der Luftfeuchte

#### **Stufe 1: 25% relativer Luftfeuchte**

Wenn die relative Luftfeuchte unter 25% fiel, konnte mit einem kurzfristigen Ausschalten der Pumpe gegengesteuert werden. Zusätzlich konnte für wenige Augenblicke das Aufsatzstück des Luftbefeuchtersystems vom Ventilatorgehäuse genommen werden, was Gewächshausluft in die Kammer brachte. Die relative Luftfeuchte der Gewächshausluft während der Versuchstage lag durchschnittlich bei 33,9%.

#### **Stufe 2: 50% relativer Luftfeuchte**

Hier konnte mit Erhöhung der Wassermenge im Eimer reguliert werden. Der Nebel musste so eine längere Strecke durch das Wasser zurücklegen, was zu einer verminderten Abgabe an die Luft führte. Durch die verminderte Nebelmenge konnten Feineinstellungen mit dem Regler effizienter realisiert werden. Bei zu hohen Werten relativer Luftfeuchte konnte der Regler von der Reinigungsöffnung genommen oder der Nebler kurzfristig abgeschaltet werden.

#### **Stufe 3: 75% relativer Luftfeuchte**

Die Wassermenge im Eimer wurde stark vermindert was zu einer erhöhten Nebelproduktion führte. Hohe Nebelmengen waren nötig um 75% relativer Luftfeuchte zu erreichen. Wenn die relative Luftfeuchte 75% überstieg konnte wieder der Deckel abgenommen oder der Ultraschallvernebler ausgeschaltet werden.

Bei dieser hohen Stufe war es wichtig, die Beschattungen des Gewächshauses zu schließen, um eine drastische Erhöhung der Temperatur zu vermeiden. Geschah dies nicht, konnten 75% relativer Luftfeuchte nicht erreicht werden.

### 3.1.9 Messung der Blattfläche

Nachdem die Pflanze die drei Stufen relativer Luftfeuchte durchlaufen hatte, war für dieses Exemplar der Versuch beendet. Nun musste die Blattfläche der Pflanze bestimmt werden. Dazu wurden die Blätter von der Pflanze entfernt und gesammelt. Bei *L. chinensis* wurden die Blätter direkt am Stängel abgetrennt und bei *S. grandis* oberhalb der Bodenoberfläche.

Damit die Blätter sich bis zur Messung nicht zusammenrollten, wurden sie mit einem angefeuchteten Papierhandtuch in einer Klarsichthülle aufbewahrt.



Abbildung 15: Messung der Blattfläche

Die Blattfläche wurde von einer Apparatur erfasst, welche sich aus einem Lichttisch, einer Kamera, einer Reglereinheit und einem Bildschirm zusammensetzte. Zuerst musste die Kamera mit Musterschablonen kalibriert werden. Wenn das geschehen war, konnten die Blätter auf den Lichttisch gelegt werden (siehe Abbildung 15). Bei der Platzierung auf dem Tisch war darauf zu achten, dass die Blätter nicht außerhalb des Erfassungsbereichs der Kamera waren und es nicht zu Überschneidungen untereinander kam. Auf dem Bildschirm war der Schattenriss der Blätter zu sehen. Aus der Differenz zwischen heller unbedeckter und dunkler bedeckter Fläche wurde die Blattfläche berechnet.

### 3.1.10 Messung des Trockengewichts

Die gesamte oberirdische Biomasse der Versuchspflanze wurde in einem Papierfaltenbeutel (Pap Star) gesammelt und dieser beschriftet. Bei Pflanzen von *L. chinensis* wurde die Biomasse in Blätter- und Stängelmasse unterteilt und getrennt aufbewahrt.

Der Papierfaltenbeutel mit dem Pflanzenmaterial wurde nun in einem Trockenschrank bei 60 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet (Wang *et al.*, 2008) und anschließend gewogen.

### 3.1.11 Berechnung des Dampfdruckdefizits

Aus der mit dem Tinytag Datenlogger gemessenen Temperatur und relativen Luftfeuchte wurde das Dampfdruckdefizit (VPD) errechnet. Das Dampfdruckdefizit wurde aus der Differenz zwischen dem Sättigungsdampfdruck ( $e_s$ ) und dem aktuellen Dampfdruck ( $e$ ) berechnet (Schulze *et al.*, 2002).

$$\text{VPD} = e_s - e$$

Der Sättigungsdampfdruck ( $e_s$ ) wurde nach Jones (1992) mit der unten stehenden Formel (1) berechnet.

---


$$e_{s(T)} = a \exp\{b T / c + T\} \quad (1)$$

---

mit  $a = 613,75$ ;  $b = 17,502$ ;  $c = 240,97$ ;  $T$  in °C;  $e_s$  in [Pa]

Zur Umwandlung von Pa in kPa (2) wurde der errechnete Sättigungsdampfdruck ( $e_s$ ) durch 1000 geteilt.

---


$$\frac{e_s}{1000} \quad (2)$$


---

Aus der Formel (3) zur Berechnung der relativen Luftfeuchte (RL) (Ehlers, 1996) konnte durch Umformung (4) der aktuelle Dampfdruck (e) errechnet werden.

$$\mathbf{RL = ( e / e_s ) \times 100} \quad (3)$$

$$\mathbf{e = e_s \times (RL / 100)} \quad (4)$$

### 3.1.12 Statistische Auswertung

Um die Reaktionen der Versuchspflanzen auf das variierende Dampfdruckdefizit auswerten zu können, wurde wie folgt vorgegangen:

Bei jeder der drei Stufen relativer Luftfeuchte waren nach einer gewissen Anpassungszeit relativ konstante Transpirationsraten zu beobachten. Diese Bereiche, in denen das VPD und die Transpiration gleich bleibende Werte annahmen, wurden festgelegt. Aus diesen Bereichen wurde dann ein Durchschnittswert für das Dampfdruckdefizit und die Transpiration errechnet. Dies geschah bei allen Luftfeuchtestufen der drei Versuchspflanzen von *L. chinensis* und *S. grandis*. Durch alle Messpunkte wurde eine Regressionsgerade gelegt. Das Ergebnis ist in den Abbildungen 18 und 19 dargestellt.

Nun konnten die Steigungen der Geraden von *L. chinensis* und *S. grandis* verglichen werden.

Ein Zweistichproben t-Test unter Annahme gleicher Varianzen wurde mit dem Microsoft Office Programm Exel (Version 2003) durchgeführt, um zu prüfen, ob es signifikante Unterschiede bei den Steigungen der beiden Gräser gab. Dazu wurden an die Messpunkte der Einzelpflanzen Regressionsgeraden angepasst. Somit erhielt man drei Steigungen für jedes Gras (siehe Anhang, Abbildung 23, 24), die als Stichproben für den t-Test genutzt wurden.

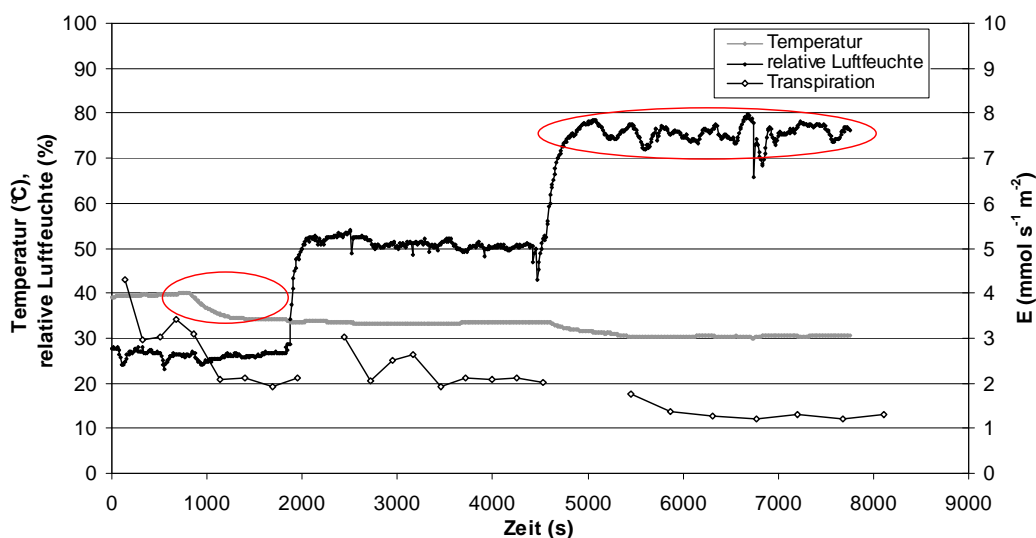
## 3.2 Ergebnisse

Hier soll zuerst darauf hingewiesen werden, dass die Anzahl der gemessenen Pflanzen gering war und dass es Fehlerquellen gab, die die Messdaten beeinflussen haben könnten. Somit wollen die hier präsentierten Ergebnisse keinen Anspruch auf absolute Gültigkeit erheben. Dieses Experiment war eher dafür gedacht, um zu sehen ob ein solches System so überhaupt funktioniert und was es zu verbessern gilt.

### 3.2.1 Einfluss von Temperatur und Luftfeuchte auf das Dampfdruckdefizit

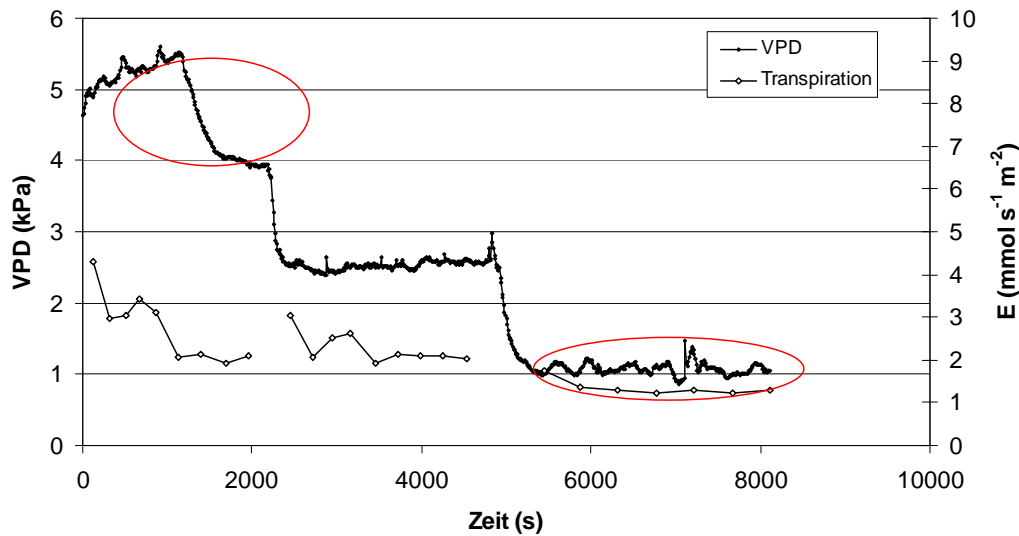
Während der Versuche wurden neben der Transpiration auch die Temperatur und die relative Luftfeuchte erfasst. Diese, mit dem Tinytag-Datenlogger gemessenen Daten und die Transpiration sind in Abbildung 16 dargestellt. Zu sehen ist, dass die gewünschten Stufen relativer Luftfeuchte, also 25%, 50% und 75% bis auf kleine Schwankungen konstant gehalten werden konnten. Da man annahm, dass die Temperatur relativ konstant sein würde, gab es keine Apparatur zur Regulierung der Temperatur. Deshalb wies diese etliche Schwankungen auf.

Aus den Daten der Temperatur und relativer Luftfeuchte wurde das Dampfdruckdefizit errechnet. Dies, zusammen mit der Transpiration, ist in Abbildung 17 zu sehen.



**Abbildung 16: Temperatur/Luftfeuchte-Graphik mit der Transpiration (E) der 2. Versuchspflanze von *Stipa grandis***

Dargestellt ist die Temperatur in °C, die relative Luftfeuchte in Prozent und die Transpiration (E) in mmol pro Sekunde pro m<sup>2</sup> Blattfläche über die Zeit in Sekunden.



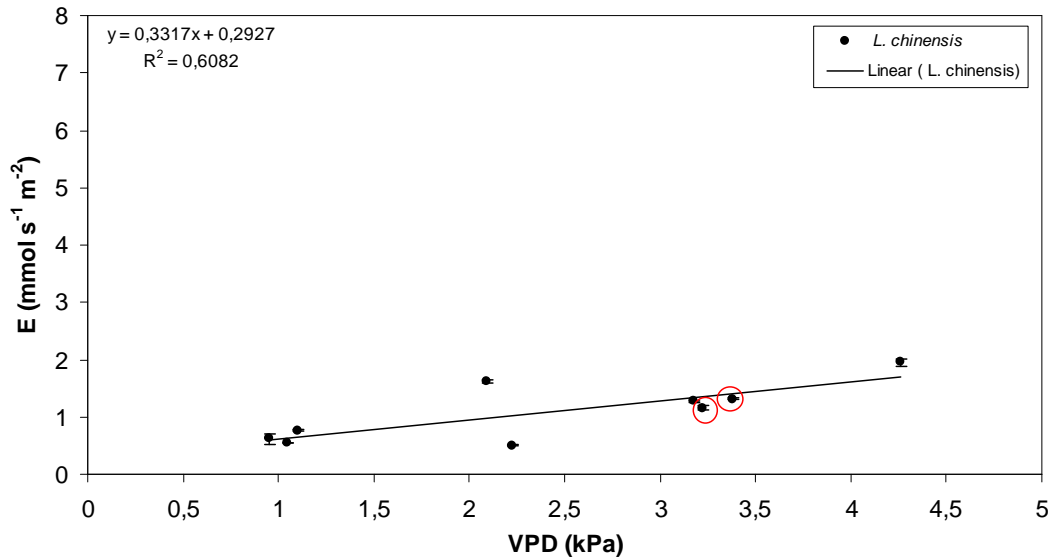
**Abbildung 17: Dampfdruckdefizit (VPD) und Transpiration (E) der 2. Versuchspflanze von *Stipa grandis***

Dargestellt ist das Dampfdruckdefizit in kPa und die Transpiration (E) in mmol pro Sekunde pro m<sup>2</sup> Blattfläche über die Zeit in Sekunden.

In Abbildung 16 ist bei der Luftfeuchtestufe von 25% bei konstanter relativer Feuchtigkeit ein Abfall der Temperatur zu beobachten. Dass dies direkte Auswirkungen auf das VPD hatte, ist in Abbildung 17 zu sehen. Sobald die Temperatur fiel, sank auch das VPD. Wenn Temperatur und relative Luftfeuchte konstant waren, blieb es auch das Dampfdruckdefizit, wie es bei der 50% Feuchtestufe beobachtet werden kann. Ein dritter Fall trat bei der Stufe relativer Feuchtigkeit von 75% auf. Dort war die Temperatur konstant und nur die relative Luftfeuchte unterlag kleinen Schwankungen. Jede dieser kleinen Schwankungen ist direkt am VPD ablesbar.

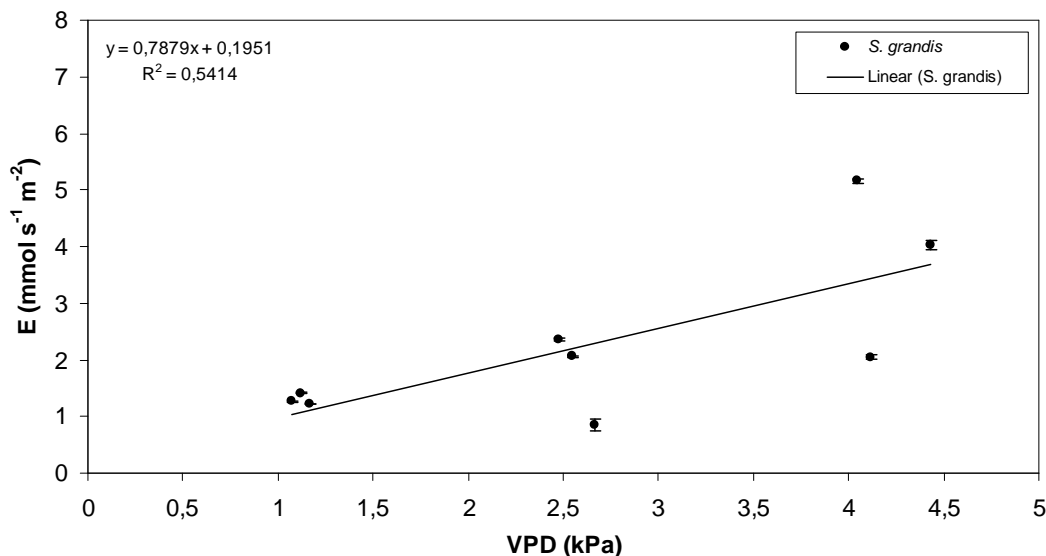
### 3.2.2 Einfluss des Dampfdruckdefizits auf die Transpiration

In den Abbildungen 18 und 19 sind Durchschnittswerte der konstanten Transpirationsraten gegen die durchschnittlichen Werte des Dampfdruckdefizits dargestellt. An die Datenpunkte wurden Regressionsgeraden angepasst.



**Abbildung 18:** Graphische Darstellung der durchschnittlichen Transpiration ( $E$ ) gegen das Dampfdruckdefizit (VPD) der drei Versuchspflanzen von *L. chinensis*

Dargestellt ist das Dampfdruckdefizit in kPa und die Transpiration in mmol pro Sekunde pro m<sup>2</sup> Blattfläche über die Zeit in Sekunden. Eine Regressionsgerade ( $y = 0,3317x + 0,2927$ ) wurde an die Datenpunkte angepasst. Der Standardfehler wird durch die Fehlerbalken ausgedrückt.



**Abbildung 19:** Graphische Darstellung der durchschnittlichen Transpiration ( $E$ ) gegen das Dampfdruckdefizit (VPD) der drei Versuchspflanzen von *S. grandis*

Dargestellt ist das Dampfdruckdefizit in kPa und die Transpiration in mmol pro Sekunde pro m<sup>2</sup> Blattfläche über die Zeit in Sekunden. Eine Regressionsgerade ( $y = 0,7879x + 0,1951$ ) wurde an die Datenpunkte angepasst. Der Standardfehler wird durch die Fehlerbalken ausgedrückt.

In den Abbildungen ist zu sehen, dass beide Regressionsgeraden eine positive Steigung haben. Die Steigung der Regressionsgeraden von *L. chinensis* beträgt 0,3317 und ist kleiner als die von *S. grandis* mit 0,7879. Ein durchgeführter t-Test ergab signifikante Unterschiede bei den beiden Steigungen.

In Abbildung 18 sind zwei Datenpunkte durch Kreise markiert. Dies sind die Datenpunkte der Versuchspflanzen 2 und 3 bei 25% relativer Luftfeuchte. Im Vergleich zu anderen Datenpunkten bei 25% Luftfeuchte, die zwischen einem VPD von 4,0 und 4,6 kPa lagen, sind diese beiden markierten Punkte bei sehr kleinen VPD-Werten zu finden. Hier zeigt sich wieder die Problematik der unkontrollierbaren Temperaturschwankungen. Bei Versuchspflanze zwei und drei von *L. chinensis* lag die Temperatur während der 25% Luftfeuchtestufe deutlich niedriger als bei den restlichen Versuchspflanzen. Dies führte zu den niedrigen Werten des Dampfdruckdefizits der beiden Punkte.

Die Transpiration der Pflanzen wurde auf die Blattfläche bezogen. Bei der Blattflächenmessung der Versuchspflanzen von *S. grandis* wich eine Pflanze in ihrem Wert sehr stark von den anderen ab. Da aber das Trockengewicht dieser Versuchspflanze den Trockengewichten der zwei anderen Pflanzen von *S. grandis* ähnelte, und da vor dem Versuch äußerlich homogene Pflanzen ausgewählt wurden, erscheint diese Abweichung merkwürdig. Die Vermutung liegt nahe, dass es sich um einen Messfehler handeln könnte. Über die spezifische Blattfläche (Blattfläche bezogen auf die Trockenmasse (Schulze *et al.*, 2002)) der zwei anderen Pflanzen von *S. grandis* wurde die Blattfläche dieser Pflanze berechnet.

Wenn die Pflanzen dieses Versuchs in der Kammer neuen Umweltbedingungen ausgesetzt waren, variierte die Transpiration in den ersten Minuten sehr stark, bis sie sich auf ein konstantes Niveau einpendelte. Dies ist in den Abbildungen 17, 25, 27, 29, 31,33 zu sehen. Die Anpassungszeit der Versuchspflanzen betrug durchschnittlich 19 Minuten.

### 3.2.2.1 Reaktionen der Einzelpflanzen

Im Folgenden soll nun die Reaktion der Einzelpflanzen auf das steigende Dampfdruckdefizit veranschaulicht werden.

Diese soll beispielhaft an zwei Pflanzen von *S. grandis* und zwei von *L. chinensis* demonstriert werden. Die vier in Abbildung 20 und 21 dargestellten Graphiken sind nach dem Beispiel von Franks und Farquhar (1999) entstanden.

#### *S. grandis*

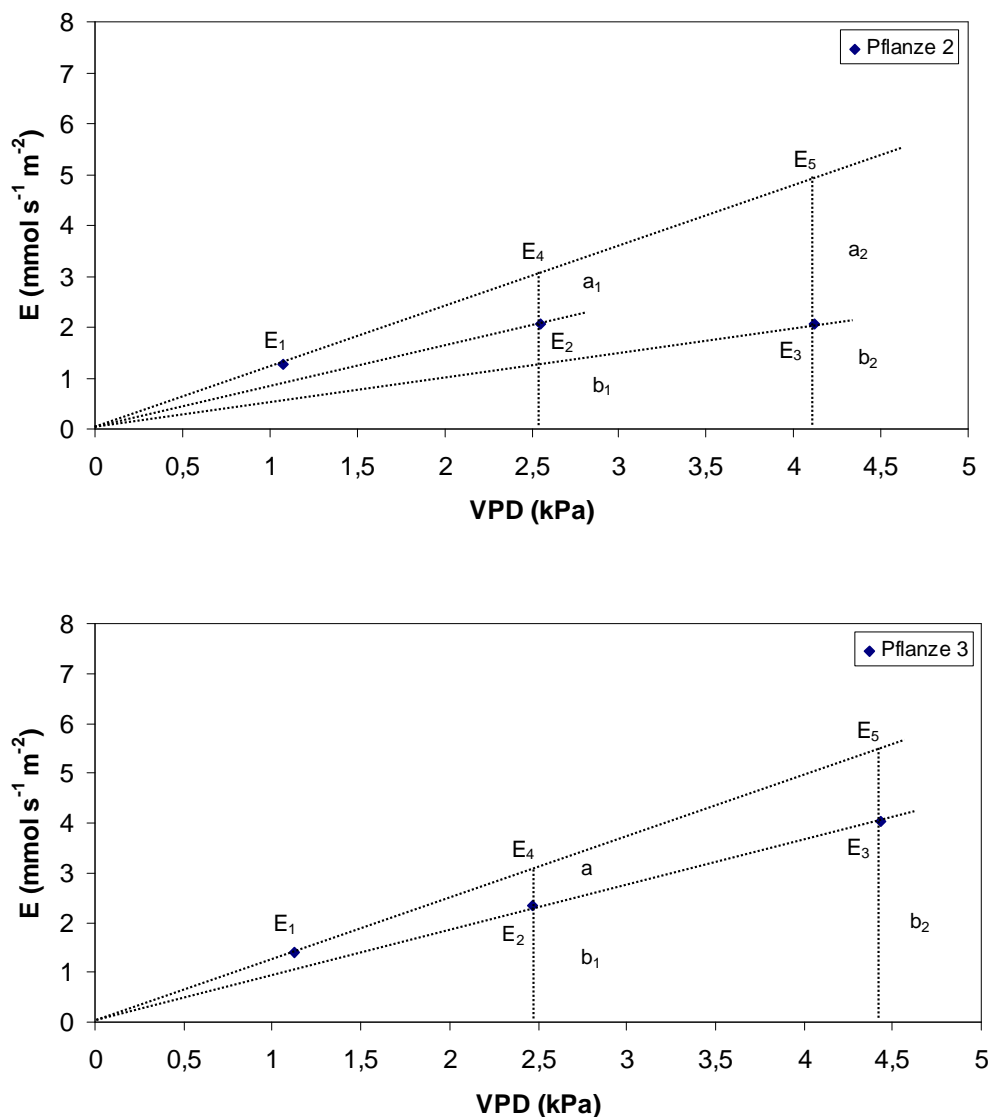
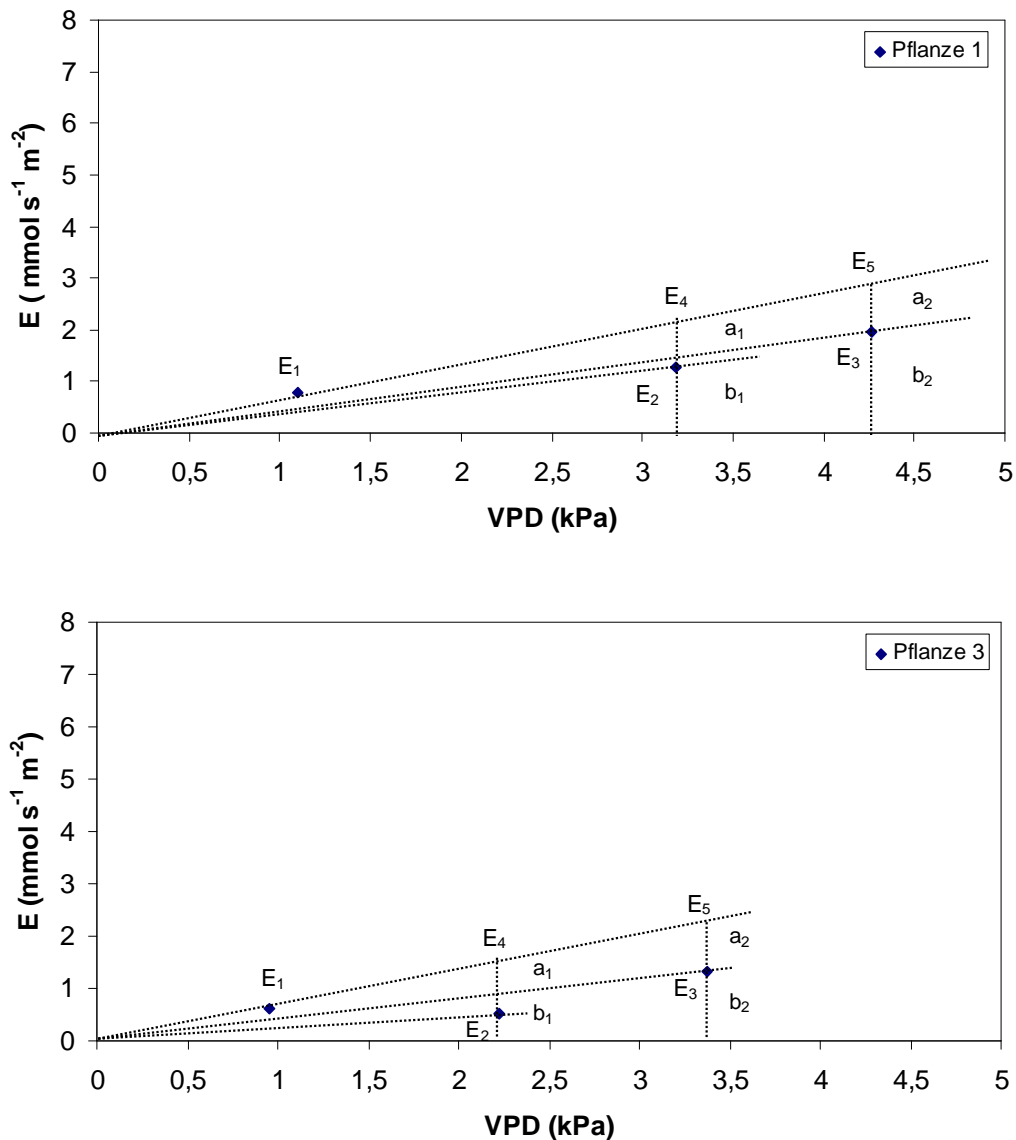


Abbildung 20: Graphische Darstellungen um am Beispiel von zwei Versuchspflanzen von *S. grandis* die Reaktion der Pflanze auf das steigende Dampfdruckdefizit (VPD) zu zeigen

Abgebildet ist die Transpiration (E) in  $\text{mmol pro Sekunde pro m}^2$  Blattfläche gegen das Dampfdruckdefizit in kPa. E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub> und E<sub>3</sub> bezeichnen die Transpirationsdatenpunkte aus den Versuchen. E<sub>4</sub> und E<sub>5</sub> zeigen die theoretische Transpiration ohne Regulation der Stomata. a bezeichnet die Reduktion der Transpiration durch schließen der Stomata und b ist die Transpiration mit Reduktion durch Stomatenschluss.

*L. chinensis*

**Abbildung 21: Graphische Darstellungen um am Beispiel von Versuchspflanzen von *L. chinensis* die Reaktion der Pflanze auf das steigende Dampfdruckdefizit (VPD) zu zeigen**

Abgebildet ist die Transpiration (E) in  $\text{mmol pro Sekunde pro m}^2$  Blattfläche gegen das Dampfdruckdefizit in kPa. E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub> und E<sub>3</sub> bezeichnen die Transpirationsdatenpunkte aus den Versuchen. E<sub>4</sub> und E<sub>5</sub> zeigen die theoretische Transpiration ohne Regulation der Stomata. a bezeichnet die Reduktion der Transpiration durch schließen der Stomata und b ist die Transpiration mit Reduktion durch Stomatenschluss.

In den Graphiken sind die Datenpunkte der Einzelpflanzen aus den Abbildung 18 und 19 eingetragen. Diese Punkte sind mit E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub> und E<sub>3</sub> gekennzeichnet. Die durch den Datenpunkt E<sub>1</sub> gehende Linie zeigt die steigende Transpiration bei steigendem VPD ohne Regulation der Stomata. Wie in den Graphiken zu sehen ist, liegen die Punkte E<sub>2</sub> und E<sub>3</sub> immer unterhalb dieser Linie. Die Differenzen zwischen der theoretischen Transpiration E<sub>4</sub> und E<sub>5</sub> und der wirklichen Transpiration E<sub>2</sub> und E<sub>3</sub> werden mit a gekennzeichnet und drücken nach die Reduktion durch Stomatenschluss aus.

Bei Pflanze 2 von *S. grandis* ist  $a_1$ , also die Differenz zwischen  $E_2$  und  $E_4$ , relativ klein. Die Erhöhung des VPD führte nur zu einer Minderung der Transpiration. Bei der weiteren Erhöhung des VPD reagierte die Pflanze mit einer stärkeren Reduktion der Transpiration. Zu sehen ist dies anhand des Vergleichs von  $a_2$  mit  $a_1$ , wobei  $a_2$  um einiges größer ist als  $a_1$ .

Bei Pflanze 3 von *S. grandis* verhält es sich anders. Die Datenpunkte  $E_2$  und  $E_3$  liegen auf einer Linie. Das anfänglich steigende VPD hat eine Regulation der Transpiration durch die Stomata bei  $E_2$  zur Folge. Die Differenz zwischen  $E_2$  und  $E_4$  wird wieder mit  $a$  bezeichnet. Ein weiterer Anstieg des VPD zieht aber keine weitere Regulation der Stomata nach sich.

Die beiden Individuen von *L. chinensis* zeigen ein einander ähnliches Verhaltensmuster. Bei beiden ist das  $a_1$  größer als das  $a_2$ . Bei steigendem VPD erfolgt also eine Minderung der Transpiration. Wenn das VPD weiter steigt, reagiert die Pflanze nicht mit einer weiteren Rückregulierung, sondern mit der gegenteiligen Reaktion. Die Stomata öffnen wieder und die Transpiration steigt.

### 3.3 Diskussion

#### 3.3.1 Einfluss von Temperatur und Luftfeuchte auf das Dampfdruckdefizit

In den Abbildungen 16 und 17 ist zu sehen, wie die Temperatur das VPD beeinflusst. Der Sättigungsdampfdruck ( $e_s$ ) wird stark von der Temperatur beeinflusst. Steigt die Temperatur so steigt auch der Sättigungsdampfdruck (Ehlers, 1996). Da das VPD aus der Differenz zwischen dem Sättigungsdampfdruck und dem aktuellen Dampfdruck errechnet wird (Schulze *et al.*, 2002), wirken sich Änderungen der Temperatur auf das VPD aus. Steigende Temperaturen lassen den Sättigungsdampfdruck steigen, was einen Anstieg des VPD zur Folge hat.

Wie in den Abbildungen 16 und 17 zu sehen ist, können auch Schwankungen der relativen Luftfeuchte Einfluss auf den VPD-Verlauf nehmen. Die Berechnung des aktuellen Dampfdrucks ( $e$ ) (Kapitel 3.1.11) enthält die Komponente der relativen Luftfeuchte. Steigt die relative Luftfeuchte, so wird der aktuelle Dampfdruck ( $e$ ) größer und die Differenz zwischen  $e_s$  und  $e$  kleiner, d.h. das VPD wird verringert.

Die relative Luftfeuchte in der Kammer lässt sich sehr gut durch die installierten Regelmechanismen regulieren und auf den gewünschten Level einstellen. Zur Kontrolle der Temperatur gibt es solche Mechanismen nicht. Wenn für weitere VPD-Experimente konstante Dampfdruckdefizite etabliert werden wollen, so muss es eine Möglichkeit zur Regelung der Temperatur in der Kammer geben.

#### 3.3.2 Einfluss des Dampfdruckdefizits auf die Transpiration

In diesem Versuch sollten die Einflüsse des Dampfdruckdefizits auf die Transpiration der beiden Gräser *L. chinensis* und *S. grandis* untersucht werden.

Wie in den Abbildungen 18 und 19 zu sehen ist, stieg die Transpiration mit steigendem VPD. Auch Gholipoor *et al.* (2010) fand bei neun Genotypen von Sorghum einen linearen Anstieg der Transpiration mit steigendem VPD. Die restlichen 17 Genotypen seines Versuchs zeigten jedoch einen Schwellenwert bei einem VPD zwischen 1,6 und 2,7 kPa, ab dem die Transpiration mit steigendem VPD weniger stark zunahm und eine zweite Gerade mit geringerer Steigung angepasst werden musste. Da die Menge der Messwerte von *L. chinensis* und *S. grandis* sehr klein war, konnte ein solcher Schwellenwert bei den beiden Gräsern nicht festgestellt werden. Daher wurde an die Daten eine lineare Regression angepasst.

Die Diffusion von Wasserdampf aus dem Blatt in die umgebende Atmosphäre erfolgt aufgrund von Konzentrationsunterschieden (Ehlers, 1996). Wenn die Konzentrationsunterschiede gering sind, wie in diesem Versuch bei 75% relativer Luftfeuchte, so ist die Transpiration entsprechend klein. Bei 25% relativer Luftfeuchte war dieser Konzentrationsunterschied größer und die Transpiration entsprechend höher.

Bei Turner *et al.* (1984) war bei *Helianthus annuus*, *Helianthus nuttallii*, *Vigna unguiculata* und bei Vertretern von holzigen Spezies zu sehen, dass die Transpiration proportional mit dem VPD anstieg. Durch die erhöhte Transpiration muss auch der Wassertransport in der Pflanze erhöht sein. Wenn bei hoher Wasserabgabe nicht mehr schnell genug Wasser nachgeliefert werden kann entsteht ein Defizit im Gewebe (Ehlers, 1996). Bei Turner *et al.* (1984) ist zu sehen, dass dann die Blattleitfähigkeit abnimmt und die Transpiration verringert wird.

Ein Vergleich der Steigungen von *L. chinensis* und *S. grandis* (Abbildung 18, 19) ergab, dass diese sich signifikant unterschieden. Die beiden Gräser unterscheiden sich also in ihrer Reaktion auf das Dampfdruckdefizit. Bei einem Anstieg des VPD erhöhte sich die Transpiration von *S. grandis* mehr als die von *L. chinensis*. In den Abbildungen 18 und 19 kann zusätzlich gesehen werden, dass die Transpiration von *S. grandis* höher lag, als die von *L. chinensis*.

Die Wasserabgabe eines Blattes erfolgt hauptsächlich durch dampfförmige Abgabe durch die Stomata. Ein kleiner Teil wird aber auch durch die wachshaltige Kutikula abgegeben (Ehlers, 1996). Diese kutikuläre Transpiration zeigt sich in den Abbildungen 18 und 19 dadurch, dass die Regressionsgeraden nicht beim Nullpunkt starten, sondern bei den y-Achsenabschnitten 0,2927 und 0,1952.

In der Versuchskammer waren die Pflanzen ständig neuen relativen Luftfeuchten ausgesetzt, an die sie sich anpassen mussten. Diese Anpassung dauerte durchschnittlich 19 Minuten. Nach dieser Anpassungsphase erreichte die Transpiration konstante Werte. Auch in den Versuchen von Sinclair *et al.* (2008) mit verschiedenen Genotypen von Sojabohne wurden, bei Einstellung einer neuen relativen Luftfeuchte ca. 20 Minuten benötigt bis konstante Transpirationsraten erreicht wurden.

### 3.3.2.1 Reaktionen der Einzelpflanzen

Betrachtet man die einzelnen Pflanzen, so lassen sich unterschiedliche Reaktionen auf das steigende VPD beobachten. Was bei allen Pflanzen jedoch gleich war, ist die grundsätzliche Reaktion der Stomata auf das VPD. Die Datenpunkte  $E_2$  und  $E_3$  aller Pflanzen lagen unterhalb der durch  $E_1$  gehenden Linie der Transpiration ohne Stomataschluss. Es muss also eine Rückregulation der Transpiration durch die Stomata gegeben haben. Schon Lange *et al.* (1971) zeigte, dass Stomata auf Veränderungen der relativen Luftfeuchte reagieren. Bei der Behandlung von isolierter Epidermis von *Polypodium vulgare* mit nahezu wassergesättigter Luft kam es zu einer maximalen Öffnung der Stomata. Bei extrem trockener Luft schlossen die Stomata komplett.

Bei der 2. Versuchspflanze von *S. grandis* (Abbildung 20) scheint es, als schlosse die Pflanze mit ansteigendem VPD zunehmend ihre Stomata, da eine Minderung der Transpiration bei steigendem VPD beobachtet werden konnte. Durch diese Rückregulation verhinderte die Pflanze allzu große Wasserverluste durch den hohen Verdunstungsanspruch der Atmosphäre bei einem hohen VPD.

Auch bei Pflanze 3 von *S. grandis* scheint es, als reagierte die Pflanze auf eine Erhöhung des VPD mit einer Verringerung des stomatären Spalts, da die Transpiration verringert wurde. Da  $E_2$  und  $E_3$  auf einer Linie liegen, kam es vermutlich zu keiner weiteren Regulation der Stomata als das VPD weiter stieg. Die Zunahme der Transpiration wurde durch das zunehmende Defizit der Atmosphäre bei gleich bleibender stomatärer Öffnungsweite verursacht.

Bei der 2. Versuchspflanze von *L. chinensis* kam es bei der ersten Steigerung des VPD zu einer drastischen Reduktion der Transpiration, sodass  $E_2$  sogar kleinere Werte annahm als  $E_1$ . Die Pflanze reagierte hier sehr empfindlich auf die Steigerung des VPD und verringerte ihre Wasserverluste extrem. Bei dem höchsten VPD wurden die Stomata vermutlich wieder geöffnet, da die Menge des transpirierten Wassers anstieg. Ähnlich verhielt sich die 1. Versuchspflanze von *L. chinensis*, die ebenfalls bei der zweiten Erhöhung des VPD mehr transpirierte als bei der ersten Erhöhung.

Während des Versuchs lagen die Temperaturen bei 25% relativer Luftfeuchte über 30 °C. Um einer Denaturierung der Proteine durch sehr hohe Temperaturen entgegenzuwirken, können Pflanzen ihre Blattemperatur senken. Dies geschieht durch die Transpiration, die eine Kühlung bewirkt und somit die Blattemperatur absenkt (Schulze *et al.*, 2002). Da die Pflanzen vor Versuchsbeginn auf 80% der  $WHK_{\max}$  gewässert wurden, stand *L. chinensis* ausreichend Wasser zur Verfügung um die Transpiration zu erhöhen und so einer Überhitzung zu entgehen. Von Xu und Zhou (2006) konnte gezeigt werden, dass es

bei ausreichender Bodenfeuchte und hohen Temperaturen zu einer Öffnung der Stomata von *L. chinensis* kommt.

*S. grandis* scheint an solch hohe Temperaturen eher angepasst zu sein, da es bei dem höchsten VPD zu keiner Steigerung der Transpiration durch die Pflanze kam. Die zweite Versuchspflanze von *S. grandis* verringert sogar ihre Transpiration. Die vorübergehende Einschränkung der Transpiration eine Strategie um Austrocknung zu entgehen (Sitte *et al.*, 1999). Dies stimmt mit den Aussagen Bai *et al.* (2004) überein, die beobachteten, dass *L. chinensis* empfindlicher gegenüber Trockenheit ist, als *S. grandis*.

In der Arbeit von Xu und Zhou (2006) stellte sich heraus, dass *L. chinensis* bei Wassermangelsituationen im Boden eine niedrige Toleranz für hohe Temperaturen hat.

Wenn *L. chinensis* in ihren Versuchen extremer Bodentrockenheit ausgesetzt war, nahm die stomatäre Leitfähigkeit ab. Bei hohen Temperaturen hingegen nahm diese zu. Wenn Wasserstress und hohe Temperaturen gleichzeitig auftraten kam es zu einer Abnahme der stomatären Leitfähigkeit. Wenn also Hitze und Dürre gleichzeitig auftreten, stellt dies ein Problem für die Pflanze dar, da die Transpiration stark begrenzt ist (Schulze *et al.*, 2002). Ein Absenken der Blattoberflächentemperatur durch erhöhte Transpiration ist in einer solchen Situation für *L. chinensis* nicht möglich.

Eine Ausnahme bei *S. grandis* bildet die erste Versuchspflanze. In Abbildung 23 (siehe Anhang) ist zu sehen, dass diese Pflanze ähnlich wie die beiden Beispieldpflanzen von *L. chinensis* (Abbildung 21) auf das steigende VPD reagiert. Da die Temperatur in der Kammer bei dieser Pflanze denen der anderen beiden Pflanzen von *S. grandis* in etwa entspricht, kann hier nicht der Grund für das abweichende Verhalten liegen. Da die Anzahl der gemessenen Pflanzen sehr klein war, kann nicht gesagt werden ob es sich bei dieser Pflanze nur um eine Ausnahme oder einen Messfehler handelte.

Mit der im Versuch verwendeten Kammer war es möglich die Transpiration der Versuchspflanzen bei unterschiedlichen Dampfdruckdefiziten zu messen. Die Einstellung der relativen Luftfeuchte mit dem Luftbefeuchtungs- und Lufttrocknungssystem gelang. Jedoch gab es einige Fehlerquellen, die Einfluss auf die gemessenen Daten gehabt haben könnten.

Eine mögliche Fehlerquelle war die Methode der Zeitmessung der Gewichtsreduktion durch Evapotranspiration. Aufgrund einer technischen Störung der Waage war es nicht möglich diese mit einem Computer zu verbinden, damit der Gewichtsverlust automatisch

erfasst würde. Stattdessen musste dies manuell mit einer Stoppuhr durchgeführt werden, was natürlich nicht hundertprozentig genau sein konnte. Die Ablesbarkeit der Waage betrug 0,1 Gramm. Eine feinere Waage, mit beispielsweise 0,01 Gramm Ablesbarkeit würde genauere Daten liefern. Zudem waren die Schwankungen der Temperatur in der Kammer nicht zu kontrollieren, was zu Unregelmäßigkeiten im VPD-Verlauf führte. Die Methode der Lufttrocknung durch die zwei mit Silikagel gefüllten Röhren ließ das Absenken der relativen Luftfeuchte auf 25% zu. Dies dauerte jedoch bis zu 20 Minuten. Die Erhöhung der Luftfeuchte hingegen brauchte nur drei bis vier Minuten. Um also ein rasches Umschalten auch von feuchter auf trockene Luft möglich zu machen, müsste eine effizientere Methode gefunden werden.

### 3.4 Zusammenfassung

Im Vorfeld des VPD-Versuchs wurden Keimungsversuche durchgeführt. Dazu wurden die Samen von *S. grandis* und *L. chinensis* unterschiedlichen Behandlungen unterzogen.

Untersucht wurde, ob eine Wässerung der Samen mit einer 0,01-molaren  $\text{CaCl}_2$ -Lösung und ein Vorquellen der Samen die Anzahl der gekeimten Samen und die Keimungsgeschwindigkeit verbessern würden. Bei der Kontrollvariante wurde nur mit  $\text{H}_2\text{O}$  gewässert. Die Keimungsversuche wurden einmal in einer Klimakammer durchgeführt, in der die Samen in Petrischalen auf Filterpapier gesät wurden. Zum andern wurde dieser Versuch im Gewächshaus wiederholt, wo die Samen direkt in den Boden gesät wurden.

Es zeigte sich, dass bei den vorgequollenen Samen weniger keimten als bei den ungequollenen.

Bei *S. grandis* war die höchste Anzahl gekeimter Samen bei der Direktsaat und in der Klimakammer bei der Kontrollvariante zu finden. Die Wässerung mit der  $\text{CaCl}_2$ -Lösung führte nicht zu einer Erhöhung der Keimung.

Die Samen von *L. chinensis* keimten bei dem Klimakammerversuch überhaupt nicht. Auch bei der Direktsaat keimte nur ein kleiner Prozentsatz. Dabei hatten jedoch die mit der  $\text{CaCl}_2$ -Lösung gewässerten Samen mitunter die besten Ergebnisse.

Beide Gräser lieferten bei der Direktsaat im Gewächshaus bessere Ergebnisse als in der Klimakammer.

Neben dem Prozentsatz gekeimter Samen wurde auch die Keimungsgeschwindigkeit errechnet. Bei *S. grandis* waren die vorgequollenen Samen tendenziell immer langsamer als die ungequollenen. Die Samen der Kontrollvariante waren am schnellsten. Bei *L. chinensis* waren die Vorgequollenen Samen tendenziell schneller.

Bei der Direktsaat im Gewächshaus zeigten die Samen beider Gräser sowohl bei der Anzahl gekeimter Samen als auch bei der Keimungsgeschwindigkeit bessere Ergebnisse als in der Klimakammer. Diese Methode schien also die bessere von beiden zu sein.

Beim VPD-Versuch sollte die Transpiration zweier Gräser bei unterschiedlichen Dampfdruckdefiziten gemessen werden. Dazu wurde eine Kammer konstruiert, in der es möglich war die relative Luftfeuchte zu variieren. Dazu wurde getrocknete bzw. befeuchtete Luft in die Kammer geleitet. Eine Kontrolle der Temperatur in der Kammer war jedoch nicht möglich, was zu Schwankungen im VPD Verlauf führte. In der Kammer wurden relative Luftfeuchten von 25%, 50% und 75% eingestellt. Bei allen drei relativen Luftfeuchten wurde mit einer Waage der Gewichtsverlust der Pflanze, also die Evapotranspiration, gemessen, bis konstante Werte eintraten. Nach Abzug der Evaporation erhielt man die Werte der Transpiration.

Die Versuchspflanzen beider Gräser reagierten auf das steigende Dampfdruckdefizit mit einer Steigerung der Transpiration. Sie reagierten also auf den zunehmenden Verdunstungsanspruch der Atmosphäre in der Kammer. Bei 25% relativer Luftfeuchte ist die Luft in der Kammer trocken und der Konzentrationsunterschied zwischen Blatt und Atmosphäre groß. Dementsprechend transpiriert die Pflanze viel. Bei 75% ist dieser Konzentrationsunterschied geringer in die Transpiration kleiner.

An die Datenpunkte von *S. grandis* und *L. chinensis* wurden Regressionsgeraden angepasst. Mit einem t-Test wurde ermittelt, dass sich die Steigungen der beiden Regressionsgeraden voneinander unterscheiden. Da die Steigung der Gerade von *S. grandis* größer war, reagierte diese stärker auf das steigende Dampfdruckdefizit. Bezogen auf die Blattfläche war auch die Transpiration bei *S. grandis* höher.

Bei der Betrachtung der Einzelpflanzen zeigten sich Unterschiede in der Reaktion auf das steigende VPD bei den beiden Gräsern. *S. grandis* schloss mit steigendem VPD zunehmend seine Stomata. Auch *L. chinensis* verringerte bei steigendem VPD zunächst seine Transpiration. Als aber das VPD weiter stieg erhöhte sich die Transpiration wieder. Da bei diesem hohen VPD in der Kammer auch hohe Temperaturen herrschten, musste die Pflanze die Transpiration erhöhen um so die Blatttemperatur unter der Umgebungstemperatur zu halten. *S. grandis* schien die hohen Temperaturen besser zu vertragen und musste die Transpiration nicht erhöhen. Da *S. grandis* auf Trockenheit nicht so empfindlich reagiert wie *L. chinensis*, erscheint diese Beobachtung sinnvoll.

Mit der für diesen Versuch konstruierten Kammer konnte die Reaktion der beiden Gräser auf das Dampfdruckdefizit beobachtet werden. Wenn ein System zur Kontrolle der Temperatur in der Kammer installiert werden würde und andere technische Mängel

beseitigt, dann ist die Kammer ein brauchbares System zur Messung der Transpiration bei unterschiedlichen Dampfdruckdefiziten.

## Literaturverzeichnis

**Adkins S.W., Bellairs S.M., Loch D.S.** (2002) Seed dormancy mechanisms in warm season grass species. *Euphytica* **126**: 13-20

**Alef K.** (1991) Methodenhandbuch Bodenmikrobiologie: Aktivitäten, Biomasse, Differenzierung. Ecomed Verlagsgesellschaft Landsberg/Lech

**Asch F.** (2005) Pflanzliche Reaktionen auf abiotischen Stress unter veränderlichen Umweltbedingungen. Kumulative Habilitationsschrift für das Fachgebiet Pflanzenphysiologie/Agrarökologie. Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

**Bai Y., Han X., Wu J., Chen Z., Li L.** (2004) Ecosystem stability and compensatory effects in the Inner Mongolia grassland. *Nature* **431**: 181-184

**Bewley J.D. and Black M.** (1994) SEEDS Physiology of Development and Germination. 2. Auflage. Plenum Press, New York

**Bossel H.** (2004) Systemzoo 2: Klima, Ökosysteme und Ressourcen. Books on Demand GmbH Norderstedt

**Bush D.S., Sticher L., van Huystee R., Wagner D., Jones R.L.** (1989a) The Calcium Requirement for Stability and Enzymatic Activity of Two Isoforms of Barley Aleurone  $\alpha$ -Amylase. *The Journal of Biological Chemistry* **264**: 19392-19398

**Bush D.S., Biswas A.K., Jones R.L.** (1989b) Gibberellic-acid-stimulated  $\text{Ca}^{2+}$  accumulation in endoplasmic reticulum of barley aleurone:  $\text{Ca}^{2+}$  transport and steady-state levels. *Planta* **178**: 411-420

**Chaudhuri I.I. and Wiebe H.H.** (1968) Influence of calcium pretreatment on wheat germination on saline media. *Plant and Soil* **28**: 208-216

**Chaves M.M., Flexas J., Pinheiro C.** (2009) Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. *Annals of Botany* **103**: 551-560

**Ehlers W.** (1996) Wasser in Boden und Pflanze; Dynamik des Wasserhaushalts als Grundlage von Pflanzenwachstum und Ertrag. Verlag Eugen Ulmer Stuttgart

**Elarbi ben M., Khemiri H., Jridi T., Hamida ben J.** (2009) Purification and characterization of  $\alpha$ -Amylase from safflower (*Carthamus tinctorius* L.) germinating seeds. C.R. Biologies **332**: 426-432

**Franks P.J. und Farquhar G.D.** (1999) A relationship between humidity response, growth form and photosynthetic operating point in C<sub>3</sub> plants. Plant, Cell and Environment **22**: 1337-1349

**Gholipoor M., Prasad P.V.V., Mutava R.N., Sinclair T.R.** (2010) Genetic variability of transpiration response to vapor pressure deficit among sorghum genotypes. Field Crops Research **119**: 85-90

**Jiang G., Han X., Wu J.** (2006) Restoration and Management of the Inner Mongolia Grassland Require a Sustainable Strategy. Ambio **35**:269-270

**Jones H.G.** (1992) Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology. 2<sup>nd</sup> ed. Cambridge University Press

**Hsiu J., Fischer E.H., Stein E.A.** (1964) Alpha-Amylases as Calcium-Metalloenzymes. II. Calcium and the Catalytic Activity. Biochemistry **3**: 61-66

**Kang L., Han X., Zhang Z., Sun O.J.** (2007) Grassland ecosystems in China: review of current knowledge and research advancement. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences **362**: 997–1008.

**Kutschera U.** (2002) Prinzipien der Pflanzenphysiologie. 2. Auflage. Heidelberg, Berlin; Spektrum Akad. Verlag

**Liu G.X., Han J.G.** (2008) Seedling establishment of wild and cultivated *Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel. under different seeding depths. Journal of Arid Environments **72**: 279-284

**Lange O.L., Lösch R., Schulze E.-D., Kappen L.** (1971) Response of Stomata to Changes in Humidity. *Planta (Berl.)* **100**: 76-86

**Ma H., Liang Z., Wu H., Huang L., Wang Z.** (2010) Role of endogenous hormones, glumes, endosperm and temperature on germination of *Leymus chinensis* (Poaceae) seeds during development. *Journal of Plant Ecology* **3**: 269–277

**Marcar N.E.** (1986) Effect of calcium on the salinity tolerance of Wimmera ryegrass (*Lolium rigidum* Gaud., ev. Wimmera) during germination. *Plant and Soil* **93**: 129-132

**Orlovsky N.S., Japakova U.N., Shulgina I., Volis S.** (2011) Comparative study of seed germination and growth of *Kochia prostrata* and *Kochia scoparia* (Chenopodiaceae) under salinity. *Journal of Arid Environments* **75**: 532-537

**Schulze E.-D., Beck E., Müller-Hohenstein K.** (2002) Pflanzenökologie. Spektrum Akad. Verlag, Heidelberg; Berlin

**Shaikh F., Gul B., Li W., Liu X., Khan M.A.** (2007) Effect of calcium and light on the germination of *Urochondra setulosa* under different salts. *Journal of Zhejiang University SCIENCE B* **8**: 20-26

**Sinclair T., Fiscus E., Wherley B., Durham M., Rufty T.** (2007) Atmospheric vapour pressure deficit is critical in predicting growth response of “cool-season” grass *Festuca arundinacea* to temperature change. *Planta* **227**: 273-276

**Sinclair T.R., Zwieniecki M.A., Holbrook N.M.** (2008) Low leaf hydraulic conductance associated with drought tolerance in soybean. *Physiologia Plantarum* **132**: 446-451

**Sitte P., Ziegler H., Ehrendorfer F., Bresinsky A.** (1999) Strasburger Lehrbuch der Botanik. **34.** Aufl.. Heidelberg; Spektrum, Akad. Verl.

**Stahr K., Kandeler E., Herrmann L., Streck T.** (2008) Bodekunde und Standortlehre, Grundwissen Bachelor. Verlag Eugen Ulmer Stuttgart

**Turner N.C., Schulze E.-D., Gollan T.** (1984) The response of stomata and leaf gas exchange to vapour pressure deficits and soil water content I. Species comparisons at high soil water contents. *Oecologia (Berlin)* **63**: 338-342

**Wang J.H., S.P. Wang, Schnug E., Haneklaus S., Patton B., Nyren P.** (2008) Competition between *Stipa grandis* and *Cleistogenes squarrosa*. *Journal of Arid Environments* **72**: 63-72

**Wherley B.G., Sinclair T.R.** (2009) Differential sensitivity of C4 and C3 turfgrass species to increasing atmospheric vapour pressure deficit. *Environmental and Experimental Botany* **67**: 372-376

**Wening A.S.** (2009) Keimungsverhalten von *Lolium perenne* unter Einfluss von Isoflavonen und Rotklee-Extrakten mit Berücksichtigung verschiedener Extraktionsverfahren. Masterarbeit. Justus-Liebig-Universität Gießen

**Xu Z.Z., Zhou G.S.** (2006) Combined effects of water stress and high temperature on photosynthesis, nitrogen Metabolism and lipid peroxidation of a perennial grass *Leymus chinensis*. *Planta* **224**: 1080-1090

**Xu Z., Zhou G.** (2008) Response of leaf stomatal density to water status and its relationship with photosynthesis in a grass. *Journal of Experimental Botany* **59**: 3317-3325

## Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich,

Kuppinger, Leah

Geboren am 15.09.1987

Matrikelnummer 426626

an Eides statt, dass die vorliegende, an diese Erklärung angefügte Bachelor-Arbeit selbständig und ausschließlich unter Zuhilfenahme der im Literaturverzeichnis genannten Quellen angefertigt wurde und noch an keiner anderen Stelle vorgelegt wurde.

Betreuender Dozent: Prof. Dr. Asch und Dr. Marcus Giese

Thema der Arbeit:

Effekte von unterschiedlichen atmosphärischen Wasserdampfdruckdefiziten auf die Transpiration der chinesischen Steppengräser *Stipa grandis* und *Leymus chinensis* L.

Semester: Sommersemester 2011

Ich erkläre weiterhin, dass der betreuende Dozent ein unverschlüsseltes digitales Textdokument (in einem Format doc, docx, odt, pdf, rtf) der Arbeit übermittelt wurde, das in Inhalt und Wortlaut ausnahmslos der gedruckten Ausfertigung entspricht. Mir ist bekannt, dass diese digitale Version anhand der Analyse auf Plagiate überprüft werden kann.

---

Ort, Datum, Unterschrift