Fakultät Agrarwissenschaften

Aus dem Institut für Kulturpflanzenwissenschaften
Universität Hohenheim
Fachgebiet Ertragsphysiologie der Sonderkulturen

&

Institut für Zierpflanzenbau
Forschungsanstalt Geisenheim

IDENTIFIZIERUNG UND QUANTIFIZIERUNG VON TROCKENSTRESSREAKTIONEN AN AUSGEWÄHLTEN ZIERPFLANZENKULTUREN

Dissertation
zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Agrarwissenschaften

vorgelegt

der Fakultät Agrarwissenschaften
von

Dipl. Agr. Biol. Theresa Krato

Aus Pforzheim

2012

Die vorliegende Arbeit wurde am 22.08.2012 von der Fakultät Agrarwissenschaften der Universität Hohenheim als ‘‘Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Agrarwissenschaften‘‘ angenommen.

Tag der mündlichen Prüfung: 20.11.2012

1. Prodekan: Prof. Dr. Markus Rodehutscord

Berichterstatter / 1. Prüfer: Prof. Dr. Jens Wünsche

Mitberichterstatter / 2. Prüfer: Prof. Dr. Traud Winkelmann

3. Prüfer: Prof. Dr. Torsten Müller

Meiner Familie gewidmet

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit wahrheitsgemäß, dass ich:

- die eingereichte Arbeit selbstständig und ohne unerlaubte Hilfsmittel angefertigt habe
- nur die im Literaturverzeichnis aufgeführten Hilfsmittel benutzt und fremdes Gedankengut als solches kenntlich gemacht habe
- die Arbeit noch keiner anderen Stelle zur Prüfung vorgelegt habe

31.10.2013, Frankfurt am Main

Ort, Datum

M. Krale

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Problemstellung 01
2. Literaturanalyse 05
    2.1 Was ist Trockenstress 05
    2.2 Was sind Trockenstressreaktionen 06
    2.3 Was ist Trockenstresstoleranz 09
    2.4 Kenntnislücken innerhalb der Literaturrecherche 10
3. Zielsetzung und Hypothesen 11
4. Material und Methoden 13
    4.1 Vegetationsversuche 13
        4.1.1 Pflanzenmaterial 14
        4.1.2 Gefäße und Substrate 16
        4.1.3 Bewässerung 17
        4.1.4 Weitere Kulturmaßnahmen 18
    4.2 De- und Rehydrierungsexperimente 21
    4.3 Physiologische Untersuchungen 26
        4.3.1 Wasserpotenzialmessungen 26
        4.3.2 Druck-Volumen-Analysen (pV-Kurven) 27
        4.3.3 Gaswechselmessungen 29
        4.3.4 Gravimetrische Transpirationsstudien an Einzelblättern 31
        4.3.5 Thermografische Untersuchungen 32
    4.4 Ertragsermittlungen 34
        4.4.1 Bestimmung der Frischmasse 34
        4.4.2 Blattflächenmessungen 34
        4.4.3 Bildanalytische Untersuchungen 35
    4.5 Statistische Auswertung 35
5. Untersuchungen zur Methodik 36
    5.1 Applikation von Trockenstress im Vegetationsversuch 36
    5.2 Untersuchungen zum Probenumfang 41
    5.3 Erarbeitung des Welke-Boniturschemas 45
    5.4 Entwicklung von Dehydrierungsexperimenten 49
    5.5 Entwicklung von Rehydrierungsexperimenten 50

6. Ergebnisse und Diskussion 52
6.1 Charakterisierung der Trockenstresstoleranz von Impatiens- und Petunien-Genotypen durch De- und Rehydrierungsexperimente 52
6.1.1 Dehydrierungsverhalten von Impatiens 52
6.1.2 Dehydrierungsverhalten von Petunien 55
6.1.3 Diskussion des Dehydrierungsverhaltens 58
6.1.4 Rehydrierungsverhalten von Impatiens 59
6.1.5 Rehydrierungsverhalten von Petunien 62
6.1.6 Diskussion der Rehydrierungsversuche 65
6.1.7 Wiederholte De- und Rehydrierungsexperimente 66
6.1.8 Diskussion Wiederholte De- und Rehydrierungs-experimente 72
6.2 Ertragsermittlungen 73
6.2.1 Bestimmung der Frischmasse 73
6.2.2 Blattflächenmessung 75
6.2.3 Bildanalytische Untersuchungen 77
6.2.4 Diskussion Ertragsermittlungen 79
6.3 Physiologische Untersuchungen 81
6.3.1 Untersuchungen zum Trieb-Wasserpotenzial 81
6.3.3 Diskussion Trieb-Wasserpotenzial 84
6.3.4 Druck-Volumen Analyse (pV-Kurven) 85
6.3.5 Diskussion Druck-Volumen Analyse 88
6.3.6 Gaswechseluntersuchungen 89
6.3.7 Diskussion Gaswechsel 94
6.3.8 Gravimetrische Transpirationsstudien an Einzelblättern 97
6.3.9 Diskussion Einzelblattuntersuchungen 99
6.3.10 Thermografische Untersuchungen 100
6.3.11 Diskussion Thermografische Untersuchungen 103
7. Abschließende Diskussion 106
7.1 Gesamtbewertung 112
8. Zusammenfassung 113
9. Summary 116
10. Literaturverzeichnis 118
11. Anhang 126

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: In den Versuchen verwendete Genotypen. 15
Tab. 2: Übersicht über die Versuchsbedingungen. 18
Tab. 3: Bedingungen in den Klimaräumen während der Dehydrierungsversuche. 20
Tab. 4: Verwendete Genotypen im Gewächshausversuch. 24
Tab. 5: Versuchsbedingungen des Gewächshausversuches. 25
Tab. 6: Ranking von Impatiens Genotypen aus 7 Dehydrierungs-experimenten. 54
Tab. 7: Ranking von Impatiens Genotypen aus 7 Dehydrierungs-experimenten. 55
Tab. 8: Ranking von Petunien Genotypen aus 7 Dehydrierungs-experimenten. 57
Tab. 9: Ranking von Petunien Genotypen aus 7 Dehydrierungs-experimenten. 57
Tab. 10: Ranking von Impatiens Genotypen aus 7 Rehydrierungs-experimenten. 61
Tab. 11: Ranking von Impatiens Genotypen aus 7 Rehydrierungs-experimenten. 61
Tab. 12: Ranking von Petunien Genotypen aus 7 Rehydrierungs-experimenten. 64
Tab. 13: Ranking von Petunien Genotypen aus 7 Rehydrierungs-experimenten. 64
Tab. 14: Systemgewicht bei Erreichen der Boniturnote 9. 66
Tab. 15: Zeit bis zum Erreichen der Boniturnote 9. 67
Tab. 16: Rehydrierungsbonitur (1-9, 9 = vollständige Rehydrierung, 1 = keine Rehydrierung) nach 24 Stunden. 68
Tab. 17: Frühmorgendliches und mittägliches Trieb-Wasserpotenzial der Genotypen Timor und Moorea am 11.05.09. 82

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Kurzfristige und langfristige Reaktionen auf Trockenstress (CHAVES *et al.*, 2003). 06
Abb. 2: Graphische Darstellung des Arbeitsplans. 12
Abb. 3: Kleinparzellenanlage im Gewächshaus. 13
Abb. 4: Exemplarische Darstellungen der Temperaturbedingungen im Gewächshaus im Frühjahr 2009. 19
Abb. 5: Exemplarische Darstellung der Luftfeuchtigkeitsbedingungen im Gewächshaus im Frühjahr 2009. 19
Abb. 6: Exemplarische Darstellung der durchschnittlichen Temperatur-verhältnisse während einer Woche in den Klimakammern im Frühjahr 2009. 20
Abb. 7: Exemplarische Darstellung der durchschnittlichen Luftfeuchtigkeitsverhältnisse während einer Woche in den Klimakammern im Frühjahr 2009. 21
Abb. 8: Pflanze des Genotyps Moorea. 22
Abb. 9 Thermografische Aufnahme eines Impatiens Genotyps (Moorea). 32
Abb. 10: Beziehung zwischen der Saugspannung des Substrates und dem Systemgewicht bei Impatiens. 37
Abb. 11: Beziehung zwischen der Saugspannung des Substrates und dem Systemgewicht bei Petunien. 38
Abb. 12: Beispielhafte Darstellung des Systemgewichts von Impatiens Neu Guinea Genotyp Moorea bei unterschiedlichem Wasser-angebot, Ausgleichsbewässerung an Tag 27. 39
Abb. 13: Beispielhafte Darstellung des Systemgewichts von Petunien des Genotyps Hot Rose Morn bei unterschiedlichem Wasserangebot, Ausgleichsbewässerung an Tag 27. 40
Abb. 14: Frischgewicht verschiedener Impatiens Genotypen bei normal feuchter Kultur (Auswertung von n = 8 Pflanzen pro Genotyp). 41
Abb. 15: Frischgewicht verschiedener Impatiens Genotypen bei trockener Kultur (Auswertung von n = 8 Pflanzen pro Genotyp). 42
Abb. 16: Frischgewicht verschiedener Petunien Genotypen bei normal feuchter Kultur (Auswertung von n = 8 Pflanzen pro Genotyp). 43
Abb. 17: Frischgewicht verschiedener Petunien Genotypen bei trockener Kultur (Auswertung von n = 8 Pflanzen pro Genotyp). 43

Abb. 18: Systemgewicht von acht Impatiens Töpfen innerhalb eines Dehydrierungsexperimentes (Timor, normal feuchte Vorkultur). 44
Abb. 19: Systemgewicht von acht Petunien Töpfen innerhalb eines Dehydrierungsexperimentes (Dark Vein, normal feuchte Vorkultur). 45
Abb. 20: Welke-Boniturschema zweier Impatiens Genotypen (links Moorea, rechts 6321). 47
Abb. 21: Welkebonitur schema zweier Petunien Genotypen (rechts Dark Vein, links White). 48
Abb. 22: Zwei Impatiens Genotypen, A vor der Rehydrierung, B nach der Rehydrierung. 51
Abb. 23: Zwei Petunien Genotypen, A vor der Rehydrierung, B nach der Rehydrierung. 51
Abb. 24: Bereinigtes Systemgewicht verschiedener Impatiens Genotypen (normal feuchte Vorkultur). 53
Abb. 25: Bereinigtes Systemgewicht verschiedener Petunien Genotypen (normal feuchte Vorkultur). 56
Abb. 26: Rehydrierungsfähigkeit verschiedener Impatiens Genotypen (normal feuchte Vorkultur) . 60
Abb. 27: Rehydrierungsfähigkeit verschiedener Petunien Genotypen (normal feuchte Vorkultur). 63
Abb. 28: Relative Frischgewichtsreduktion von Impatiens Genotypen im Vergleich zwischen Kontrollpflanzen (normal bewässert) und den mehrfach de- und rehydrierten Pflanzen. 69
Abb. 29: Schadbonitur von Impatiens Genotypen nach sechswöchiger De- und Rehydrierung. 69
Abb. 30: Relative Frischgewichtsreduktion von Petunien Genotypen im Vergleich zwischen Kontrollpflanzen (normal bewässert) und den mehrfach de- und rehydrierten Pflanzen. 70
Abb. 31: Relative Blütenreduktion von Petunien Genotypen im Vergleich zwischen Kontrollpflanzen (normal bewässert) und den mehrfach de- und rehydrierten Pflanzen. 71
Abb. 32: Schadbonitur von Petunien Genotypen nach sechswöchiger De- und Rehydrierung. 71

Abb. 33: Differenz des Frischgewichts zwischen trocken kultivierten und normal feucht kultivierten Impatiens Genotypen (n = 8) in %. 73
Abb. 34: Differenz des Frischgewichts zwischen trocken kultivierten und normal feucht kultivierten Petunien Genotypen (n = 8) in %. 74
Abb. 35: Blattfläche von zwei Impatiens Genotypen zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten. 76
Abb. 36: Frischgewicht von zwei Impatiens Genotypen in Abhängigkeit von der Blattfläche. 77
Abb. 37: Mit dem Bildanalysesystem ermittelte Pflanzenfläche von sechs Impatiens Genotypen. 78
Abb. 38: Frischgewicht von sechs Impatiens Genotypen. 79
Abb. 39: Trieb-Wasserpotenzial von Impatiens Genotypen in Abhängigkeit von der Saugspannung im Substrat. Die Messung mit allen Genotypen erfolgte zu zwei unterschiedlichen Terminen im Jahr. 83
Abb. 40: Druck-Volumen Kurve von vier Trieben vom Impatiens Genotyp Moorea. 86
Abb. 41: Druck-Volumen Kurve von vier Trieben vom Impatiens Genotyp Timor. 86
Abb. 42: Druck-Volumen Kurve von vier Trieben vom Impatiens Genotyp 0588. 87
Abb. 43: Druck-Volumen Kurve von vier Trieben vom Impatiens Genotyp 9346. 87
Abb. 44: Nettoassimilationsrate von Moorea bei unterschiedlichem Lichtangebot. 91
Abb. 45: Transpirationsrate von vier Impatiens Genotypen mit abnehmender Saugspannung im Substrat. 91
Abb. 46: Transpirationsrate von vier Impatiens Genotypen zwischen -300 und -400 hPa Saugspannung im Substrat. 92
Abb. 47: Wasserausnutzungskoeffizient von vier Impatiens Genotypen bei einsetzender Trockenheit zwischen -300 und -400 hPa. 93
Abb. 48: Stomatäre Leitfähigkeit von vier Impatiens Genotypen in Abhängigkeit vom mittäglichen Trie-Wasserpotenzial. 94
Abb. 49: Relativer Gewichtsverlust von Einzelblättern über den Zeitraum von 24 Stunden. 98

Abb. 50: Relativer Gewichtsverlust von Einzelblättern über den Zeitraum von einer Stunde. 99
Abb. 51: Pflanzentemperatur von vier Impatiens Genotypen, links gefüllte Säule bei -100 hPa, rechts gestreifte Säule bei -700 hPa Saugspannung im Substrat. 101
Abb. 52: Thermografische Aufnahme zweier Impatiens Pflanzen, links Referenzpflanze mit feuchtem und trockenem Referenzblatt, rechts Messpflanze. 102
Abb. 53: Stomatäre Leitfähigeit von vier Impatiens Genotypen in Abhängigkeit vom Crop Water Stress Index (CWSI = (Tplant-Twet)/(Tdry-Twet)). 103

Abkürzungsverzeichnis

α	Fehler 1. Art
ABA	Abscisinsäure
Akh	Arbeitskraftstunde
BN	Boniturnote
CWSI	Crop Water Stress Index
d	Tage
E	Transpirationsrate
g	stomatäre Blattleitfähigkeit oder Gramm
h	Stunde
l	Liter
n	Anzahl
NPK	Stickstoff-Phosphor-Kalium
p	Irrtumswahrscheinlichkeit
pV	Druck-Volumen
TG	Trockengewicht
Tdry	Temperatur trockene Referenzpflanze
Tplant	Temperatur Messpflanze
Twet	Temperatur feuchte Referenzpflanze
WP	Wasserpotenzial
WUE	Wasserausnutzungskoeffizient

1. Einleitung und Problemstellung

Der Klimawandel ist in diesen Zeiten ein viel diskutiertes Thema. Modelle des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2007) sagen einen Anstieg der globalen Temperatur um 1,1 - 6,4°C im Zeitraum von 1990-2100 voraus. Diese Veränderung beeinflusst die Landwirtschaft und erfordert ein unterschiedliches Ausmaß an Veränderungen je nach Standort (STÖCKLE *et al.*, 2011).
Im Rahmen der Klimawandelforschung ist die Trockenstresstoleranz, auf Grund der zentralen Bedeutung des Wassers für den pflanzlichen Stoffwechsel, ein ausführlich bearbeitetes Thema innerhalb der pflanzenphysiologischen und pflanzenbaulichen Forschung.
Im Gegensatz zu landwirtschaftlichen Kulturen sind Zierpflanzen allerdings bislang nur wenig untersucht worden, da Wasserverfügbarkeit und Wasserkosten in der intensiven Zierpflanzenproduktion Mitteleuropas bislang keine limitierenden Faktoren waren. Dies ist auch der Grund dafür, dass die in der Pflanzenphysiologie eingesetzten Messmethoden zur Charakterisierung von Stressintensität und Stressreaktionen bei Zierpflanzen nur wenig untersucht/eingesetzt worden sind.

Wassermangel gehört zu den abiotischen Stressfaktoren. Abiotische Umweltfaktoren wie Trockenheit, Salinität, Überflutungen oder extreme Temperaturen verursachen Ernteeinbußen von 50-80 % (BUCHANAN *et al*, 2000). Wassermangel gehört dabei zu den wichtigsten limitierenden Faktoren im Pflanzenanbau (CHAVES *et al.*, 2004; CODON *et al.*, 2004; FLEXAS *et al.*, 2004; GRANT *et al.*, 2007).
Wasserengpässe sind in der Zierpflanzenproduktion Mitteleuropas zwar noch selten, für viele südeuropäische Länder, sowie Überseestandorte, gestaltet sich die Versorgung mit qualitativ hochwertigem Wasser jedoch zunehmend problematisch.
Der Wettbewerb um die limitierten Wasserressourcen, die der Bewässerung gartenbaulicher Kulturen zur Verfügung stehen steigt, während die Industrie und die kommunalen Wasserversorger versuchen, den Bedarf einer stets wachsenden Verbraucherschaft zu befriedigen (EGILLA *et al.*, 2001). Mit Wasser ist aus ökologischer aber auch ökonomischer Sicht sparsam umzugehen, denn Wasser ist nicht unbegrenzt verfügbar. So muss auch der Kostenfaktor für Wasser, der sich mit steigender Nachfrage verändern wird, von den Betrieben berücksichtigt werden.

Der Preis und die Abgaben für Wasser betreffen alle gartenbaulichen Betriebe in allen Ländern (CUMMINS *et al.*, 2008).
Die Entwicklung der zunehmenden globalen Wasserknappheit wird enormen Druck auf bewässerte Anbauflächen ausüben, die nicht direkt in die Nahrungsmittelproduktion eingebunden sind (SCHULTZ und STOLL, 2010).
Vor diesem Hintergrund ist es sehr wichtig, die Effekte von Trockenheit auch auf Zierpflanzen besser zu verstehen, um beispielsweise Fortschritte in der Pflanzenzüchtung machen zu können.

Wasser wird den Pflanzen über den Boden oder das Substrat zur Verfügung gestellt, von den Wurzeln aufgenommen und durch die Leitungsbahnen in der Pflanze verteilt. Diese können das Wasser aber nur aufnehmen wenn ihre Saugkraft größer ist als die des Substrates.
Wasserverluste im Boden oder Substrat kommen durch Evaporation zustande, in der Pflanze durch Transpiration. Bleibt der Wasserstrom aus, führt dies letztlich zum Absterben der Pflanze.
Nach RÖBER (1996) wird beim gärtnerischen Anbau zwischen Boden und Substratkulturen unterschieden. Grundsätzlich gelten zwar in beiden Medien dieselben physikochemischen Gesetzmäßigkeiten, aber da den Pflanzen in gewachsenen Böden andere Wasserquellen und ein wesentlich größeres Bodenvolumen zur Verfügung stehen, ist der Wasserhaushalt in Topfkulturen mit begrenztem Substratvolumen spezifisch zu betrachten.
Für diese Arbeit werden lediglich Pflanzen verwendet die in gärtnerischen Kulturubstraten getopft sind.
Gärtnerische Substrate bestehen überwiegend aus Hochmoortorf und sind demzufolge grob strukturiert und strukturstabil.
Der hohe Grobporenvolumenanteil sorgt für schnellen Wasserabfluss. Andererseits soll das Substrat über genügend Wasserhaltekapazität verfügen, damit die Gießabstande nicht zu gering gehalten werden müssen (RÖBER, 1996).

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit Trockenstress im Zierpflanzenbau. Der Fokus liegt dabei auf Beet und Balkonpflanzen, im Speziellen bei *Impatiens* Neuguinea Grp. und *Petunia* cultivars.

Beet und Balkonpflanzen, zu denen die in der Arbeit behandelten Arten, Impatiens und Petunien gehören, erfreuen sich in Deutschland großer Beliebtheit. Die Umsatzzahlen steigen zwar nicht kontinuierlich an, aber Beet und Balkonpflanzen haben durchaus einen sicheren Markt. Da etwa 25 % aller verkauften Pflanzen in Deutschland in diese Rubrik eingruppiert werden können, wird deutlich wie begehrt diese Pflanzengruppe ist (ALTMANN, 2008).
Wie der Name ausdrückt werden Beet- und Balkonpflanzen überwiegend in Gärten, Parks und auf Terrassen und Balkonen verwendet. Ihre Saison reicht von April bis September und umfasst somit überwiegend Witterungsphasen mit hohen Temperaturen und hoher Einstrahlung.

Ästhetische und produktionstechnische Eigenschaften zählten neben der Widerstandsfähigkeit gegenüber Krankheiten und Schädlingen über viele Jahre zu den dominierenden Zielen der Zierpflanzenzüchtung (KRATO und HENDRIKS, 2011). Die Stresstoleranz und insbesondere die Trockenstresstoleranz gewinnen in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung.
Gründe hierfür sind:

1. Die Erschließung neuer Märkte, auch in trockeneren Arialen wie beispielsweise in den USA, China und Australien.
2. Die Notwendigkeit den Zierpflanzenbau an den prognostizierten Klimawandel anzupassen und einen Beitrag zu leisten, den Verbrauch der Ressource Wasser zu reduzieren.
3. Durch die Verschiebung der Vermarktungsstätten auf nationaler Ebene steigt die Nachfrage nach trockenstresstoleranten Sorten. Insbesondere der branchenfremde Handel verlangt Zierpflanzen, die ohne großen Aufwand über einen längeren Zeitraum vermarktungsfähig bleiben.
4. Im innerstädtischen Grün stehen weniger Mittel für pflegerische Maßnamen zu Verfügung, trockenstresstolerante Arten und Sorten können hier Abhilfe schaffen.
5. Bedingt durch die Mobilität der Gesellschaft ist eine kontinuierliche Versorgung von Pflanzen in Haus und Garten häufig nicht mehr gewährleistet. Es ist daher zunehmend wichtig, dass Zierpflanzen Trockenperioden ohne sichtbare Schäden überstehen.

Die Dissertation ist an ein an der Forschungsanstalt Geisenheim laufendes Projekt zur ,,Entwicklung standardisierter Screening-Verfahren zur Identifizierung und Bewertung trockenstresstoleranter Genotypen von Zierpflanzen'' angegliedert. Hierbei handelt es sich um ein Verbundprojekt, an dem neben privaten Zierpflanzenzüchtern, vertreten durch die GFP (Gemeinschaft zu Förderung der privaten deutschen Pflanzenzüchtung e.V.), auch das Forschungszentrum Jülich und die Forschungsanstalt Geisenheim beteiligt sind. Finanziert wird das Projekt durch das Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz.
Ziel dieses Projektes ist es, Zierpflanzen Genotypen in einem frühen Stadium des Züchtungsprozesses auf ihre Trockenstresstoleranz zu bewerten. Es soll hierbei ein Prüfstand zur Applikation standardisierter Trockenstressbedingungen entwickelt und praxistaugliche Messmethoden zur Quantifizierung von Trockenstressreaktionen erarbeit werden.

Ziel der Dissertation war es, die in der Literatur erwähnten Methoden zur Charakterisierung des Wasserhaushaltes von Pflanzen zu überprüfen und einfache, nicht invasive Methoden zu finden um Trockenstressreaktionen in der praktischen Züchtungsarbeit einfach und reproduzierbar erfassen zu können.
Innerhalb der Dissertation sollen unterschiedliche Genotypen der zwei Arten Impatiens und Petunien untersucht werden. Die Konzentration liegt dabei auf dem Stomatamanagement und dem Wasserpotential der Pflanzen.
Ziel ist es, zwischen den geprüften Genotypen Sensitivitätsunterschiede bezüglich der Trockenstressreaktion herauszuarbeiten.

2. Literaturanalyse

2.1 Was ist Trockenstress

Wasser ist der Hauptbestandteil aller lebenden Zellen. Pflanzen bestehen zu 80-95 % aus Wasser. Es ist für alle lebensnotwendigen Prozesse in der Pflanze entscheidend, da es unter anderem Transportmittel, Bestandteil des Stoffwechsels und Stabilitätsfaktor ist. Die Entwicklung der Pflanze hängt davon ab, wie geregelt Wasseraufnahme, Wassertransport und Wasserabgabe erfolgen können (ALTMANN, 2008). Unter Trockenstress kann es zu erheblichen Ertragsverlusten bei landwirtschaftlichen und gärtnerischen Kulturen kommen. Eine begrenzte Wassergabe kann in gewissem Umfang auch das Längenwachstum von Pflanzen reduzieren (BERTRAM, 1992). Durch Kontrolle der Wassergabe können kompakte Pflanzen hoher Qualität auch ohne Hemmstoffeinsatz produziert werden (RÖBER und SCHACHT, 2008). Wassermangel hat also nicht nur negative Konsequenzen, erst wenn aus kontrollierter geringer Wasserzufuhr Trockenstress wird kommt es zu Qualitätseinbußen. In diesem Zusammenhang erscheint die rechtzeitige Erfassung des Trockenstresses durch pflanzlich produzierte Indikatoren von Interesse (RÖBER und SCHACHT, 2008). Ein häufig verwendeter Begriff in diesem Zusammenhang ist die Wasserbilanz. Die Wasserbilanz der Pflanzen setzt sich zusammen aus Wasseraufnahme und Wasserabgabe. Die Parameter, die als geeignete Anzeigegrößen einer Wasseraufnahme dienen können, sind der Wassergehalt oder das Wasserpotential der oberirdischen Organe (WILLERT *et al.*, 1995).

Häufig werden alle von der Norm abweichenden Situationen als Stress gewertet. Stress kann Folgeerscheinungen auf verschiedenen pflanzlichen Funktionsebenen auslösen. Diese Folgeerscheinungen können wiederum weitere Prozesse in der Pflanze beeinflussen und somit selbst als Stressoren gelten (LEVITT, 1972; JONES *et al.*, 1989). Unter Stress befindet sich eine Pflanze in einem Zustand in dem ein Druck ausgeübt wird (LICHTENTHALER, 1995).

Der Begriff Trockenheit hat im wissenschaftlichen und technischen Sinn mehrere Bedeutungen. Im Gegensatz dazu steht die ursprüngliche Bedeutung geringen Niederschlags. Die Definition ist immer davon abhängig, für welche Zeitskala man sich interessiert. Diese beträgt in der Pflanzenphysiologie meistens Tage, während

es für einen Meteorologen oder Landwirt Monate oder Jahre sein können (PASSIOURA, 2007). Der Zeitraum, in dem die Pflanzen Trockenstress überstehen müssen, sollte bei der Definition von und der Diskussion über Trockenstress immer berücksichtigt werden.

Trockenstress selbst definiert den Zustand von Pflanzen, in dem ihnen zu wenig Wasser in geeignetem thermodynamischem Zustand zur Verfügung steht (LARCHER, 1994). Die Wasseraufnahme kann durch Bodentrockenheit, osmotische Wasserbindung, Bodenfrost, oder behinderte Ausdehnung des Wurzelsystems begrenzt werden. Die Trockenheitsbelastung als Stressereignis entwickelt sich im Gegensatz zu vielen anderen Stressereignissen langsam und verstärkt sich mit der Dauer der Trockenheit (LARCHER, 1994).

2.2 Was sind Trockenstressreaktionen

So wie es für den Begriff Trockenstress vielfache Definitionen gibt, so komplex sind auch die Reaktionen von Pflanzen auf Trockenheit. Eine Reaktion kann innerhalb von Sekunden, Minuten, Stunden (Veränderung der Genexpression), oder Tagen (morphologische Symptome) auftreten. In der nachfolgenden Abbildung sind einige Reaktionen zusammengefasst.

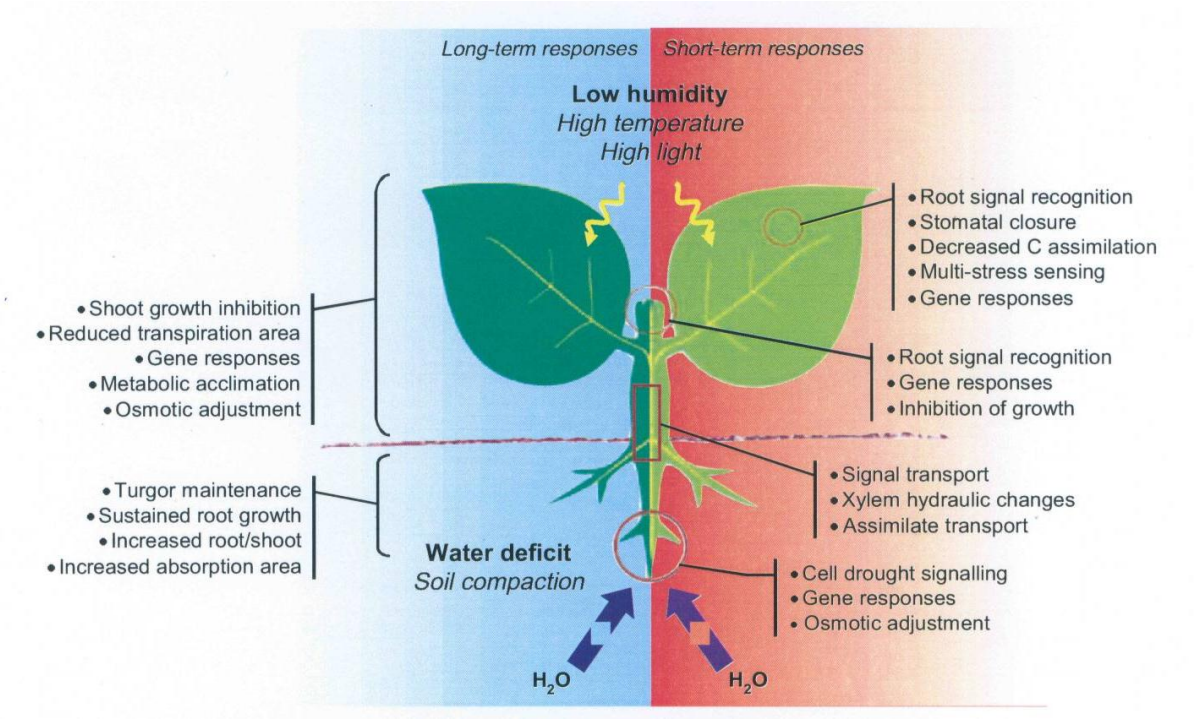


Abb. 1: Kurzfristige und langfristige Reaktionen auf Trockenstress (CHAVES *et al.*, 2003).

Die Reaktion einer Pflanze, beziehungsweise das Auftreten eines Schadens durch Stress, ist von dessen Intensität wie auch von der Dauer sowie dem Zeitpunkt der Einwirkung abhängig (LEVITT, 1972; CECCARELLI *et al.,* 1991). Aber auch von einer möglicher Akklimatisierung durch vorherige Stresseinwirkungen, oder vom Genotyp (MUNNE-BOSCH und ALEGRE, 2004). Ein milder Stress kann förderlich (adaptive Veränderungen) wirken, über einen längeren Zeitpunkt jedoch unumkehrbare Effekte auslösen, schädliche Auswirkungen haben, oder zum Tod führen (LEVITT 1972; LARCHER, 1994; CHAVES *et al.*, 2002).

Blätter und Triebe zeigen anatomisch-morphologisch und physiologisch-biochemisch unterschiedlichste Reaktionen auf Trockenheit.

Zu den anatomisch-morphologischen Symptomen zählen vor allem Welkesymptome, das Nekrotisieren von Gewebe und ein vermindertes Wachstum (TURNER, 1991; BLUM, 1996; HANSEN *et al.,* 2005; HASSANEIN und DORION, 2006).

Zu den biochemischen Reaktionen gehört die Produktion von Prolin als osmotische Anpassungsreaktion (YAMADA *et al.*, 2005). Phytohormone wie Abscisinsäure (ABA), Ethylen oder Salizylsäure können ausgehend von einer Signaltransduktion aufgrund von Stress wie Trockenheit, niedrigen Temperaturen oder Salz gebildet werden. ABA ist dabei zweifellos das Phytohormon mit der wichtigsten Bedeutung in der Stress-Signaltransduktion (XIONG et al., 2002). Nach ZHU (2002) ist die Hauptaufgabe von ABA die Regulation der pflanzlichen Wasserbalance und die osmotische Stresstoleranz. Durch Akkumulation und Freisetzung kommt es dann zum Stomataschluss (JONES, 1990; ZHU, 2002; CHAVES und OLIVEIRA*,* 2004; SCHULTZ und STOLL*,* 2010). Nach LÖSCH (2003) haben Epiderme mit geschlossenen Stomata einen drei- bis achtmal so hohen ABA-Gehalt als mit geöffneten Stomata.

Die physiologischen Mechanismen, die eine Anpassung an Wasserdefizite möglich machen und Wachstum in Stressperioden erlauben, könnten hilfreich sein, Pflanzen bezüglich Trockenstresstoleranz zu screenen und zu selektieren (GHADERI *et al.*, 2007).

Nachfolgend sind nur einige der möglichen physiologischen Reaktionen auf Trockenstress zusammengetragen. Pflanzliche Prozesse sind unterschiedlich empfindlich gegenüber trockenheitsbedingten Wasserverlusten (HSIAO, 1973).

Das Schließen der Stomata als Reaktion auf Wasserverlust ist als frühe pflanzliche Gegenmaßnahme als Schutz vor Trockenheit bekannt. Es kommt zu einer Reduktion

der Photosynthese und CO_2-Aufnahme (FLEXAS und MEDRANO, 2002). Die Reduktion des Wassergehaltes im Boden führt außerdem zu einer Reduzierung der stomatären Leitfähigkeit und der Transpirationsrate (DE LORENZI und RANA, 2001). Nach HARTUNG (1996) reagiert die stomatäre Blattleitfähigkeit (gH_2O) sensibler auf Trockenstress als die Photosynthese. Allgemein lässt sich sagen, dass es als Reaktion auf Trockenstress zur Schließung der Stomata kommt (HSIO, 1973; CHAVES *et al.*, 2002; JONES, 2004; SAIE *et al.*, 2008). Der Stomataschluss zusammen mit der Wachstumsverminderung gilt als eine der frühsten Reaktionen auf Trockenstress und schützt die Pflanze vor Wasserverlust, Dehydrierung, Xylemkavitationen und dem Tod (CHAVES *et al.*, 2003).

Wenn Pflanzen Trockenstress ausgesetzt sind, beeinflusst dies ihre Wasserflussrate (LOVISOLO und SCHUBERT, 1998). Es entstehen Embolien im Xylem, die die Leitfähigkeit beeinflussen (TYREE und SPERRY, 1989; LÖSCH, 2003). Xylemkavitationen selbst können als Trockenstresssignal bewertet werden (CHAVES *et al.*, 2003).

Eine Blockierung der Leitbahnen führt notwendigerweise zu einem absinkenden Wasserpotenzial in den verbleibenden funktionsfähigen Gefäßen (LÖSCH, 2003).

Der Gradient des Wasserpotenzials dient dazu, den Wasserverlust zu repräsentieren (BURGHARDT und RIEDERER, 2003). Die Absenkung des Wasserpotenzials im pflanzlichen Gewebe gilt als die überwiegende Ursache für hemmende bis destruktive Folgen von Trockenstress (HARTUNG, 1996).

Im Rahmen dieser Arbeit wird nicht auf die Identifizierung von chemischen oder hydraulischen Stresstransmittern eingegangen. Gegenstand der Untersuchungen ist die Änderung physiologischer Prozesse als Folge übermittelter Trockenstresssignale. Untersucht werden sollen Prozesse, die nachweislich sensibel auf Trockenstress reagieren.

2.3 Was ist Trockenstresstoleranz

Trockenstresstoleranz ist ein ungenauer Begriff und wird umso unklarer je detaillierter man ihn betrachtet (PASSIOURA, 1996).

Bei Trockenstressresistenz lassen sich bezüglich der pflanzlichen Reaktion zwei Gruppen unterscheiden, das Ertragen von Stress und die Vermeidung von Stress (LEVITT, 1980; LÖSCH, 2003). Die erste Gruppe erträgt die Trockenheit. Das Austrocknungsvermögen bzw. die Austrocknungstoleranz basiert auf der artspezifischen und adaptierbaren protoplasmatischen Eigenschaft, strenges Dehydrieren zu tolerieren (SCHALLER, 2007). Als Resistenzmaß werden Grenzwerte für den Wasserzustand pflanzlichen Gewebes (Relatives Wasserdefizit, Wasserpotenzial etc.) angegeben, bei denen erste irreversible Auswirkungen auftreten (LARCHER, 1994).

Die zweite Gruppe vermeidet bzw. verzögert ein kritisches Wasserdefizit des Gewebes durch Aufrechterhalten des Zellturgors und des Zellvolumens (LUDLOW und MUCHOW, 1990). Es wird sichergestellt, dass empfindliche Organe und cytoplasmatische Struckturen nicht vom Stressor, in diesem Fall Wassermangel beeinträchtigt werden (LÖSCH, 2003). Diese Strategien sind aber nicht exklusiv, Pflanzen können diese Reaktionstypen in der Natur miteinander kombinieren (LUDLOW, 1989).

Völlig trockentolerante Pflanzen, die den totalen Verlust von freiem protoplasmatischen Wasser unter allen Umständen überstehen können, gehören nach jetzigem Wissensstand zu den niederen Pflanzengruppen wie Algen, Moose und Flechten (OLIVER *et al.*, 1998).

Die Fähigkeit Trockenheit zu überleben steigert nicht unbedingt die Fähigkeit von Pflanzen in der Natur zu überleben. Tolerante Pflanzen sind in der Minderheit. Trockenheitssensitive Pflanzen dominieren die Vegetation der Welt. Damit stellt sich die Frage: Wie beeinflusst das Überleben der Trockenheit das pflanzliche Überleben (ALPERT und OLIVER, 2002)? Mit dieser Frage beschäftigt sich die vorliegende Arbeit.

Xerophyten gelten als trockenstresstolerant, weil sie Trockenheit überleben. Bei Kulturpflanzen geht es jedoch um Produktivität, somit müsste Trockenstresstoleranz im agrarwissenschaftlichen Zusammenhang als Ertrag in Relation zur Wasserverfügbarkeit definiert sein (PASSIOURA, 1996).

Demnach stellt sich die Frage, inwieweit man bei Zierpflanzen überhaupt von Trockenstresstoleranz im eigentlichen Sinn sprechen kann. Da es bei diesen Pflanzen nicht darum gehen kann lediglich eine Überlebensstrategie zu finden oder einen guten Ertrag zu liefern, sondern auch darum, möglichst lange ein ansprechendes Aussehen zu bewahren, wird für diese Arbeit Trockenstresstoleranz mit einem verzögerten Auftreten von Welke, fehlender Nekrotisierung, Blütenabstoßung und anderen optisch qualitätsreduzierenden Parametern gleichgesetzt.

2.4. Kenntnislücken innerhalb der Literaturrecherche

Die Literaturrecherche ergab eine Vielzahl von Methoden zur Trockenstressdetektion bei Pflanzen. Im Bereich Zierpflanzenbau konnten kaum Quellen gefunden werden, die Trockenstress bei Zierpflanzen bearbeiten. Dies mag daran liegen, dass es sich bei der Trockenstresstoleranz bisher um ein eher untergeordnetes Zuchtziel gehandelt hat. Qualitätsparameter wie Blütenfarbe oder Blühzeitpunkt lagen eher im Vordergrund der Zuchtprogramme.

Die in der Literatur gefundenen und im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Methoden zur Trockenstressdetektion wurden auf ihre Anwendbarkeit bei Zierpflanzen überprüft.

Ebenfalls wenig in der Literatur zu finden, ist die gezielte reproduzierbare Applikation von Trockenstress. Es fehlt ein konkreter Prüfstand, kontrolliert Trockenstressbedingungen erzeugen zu können. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde dafür eigens ein Verfahren entwickelt.

Durch das Fehlen eines passenden Boniturschemas um Trockenstressreaktionen bei Zierpflanzen eindeutig zu identifizieren, war das Erstellen eines solchen Schemas ein Ziel der vorliegenden Arbeit.

3. Zielsetzung und Hypothesen

Mit dem geplanten Dissertationsvorhaben in Geisenheim werden drei Ziele verfolgt:

1. Es soll ein Prüfstand entwickelt werden, um Trockenstressreaktionen von bewurzelten Jungpflanzen unter standardisierten, reproduzierbaren Bedingungen untersuchen zu können.
2. Auffinden leicht anwendbarer Methoden, um Trockenstressreaktionen an jungen Zierpflanzen einfach und zuverlässig identifizieren und quantifizieren zu können. Hierbei wird angestrebt, das Erfahrungswissen aus anderen Projekten zum Thema Trockenstress zusammen zu tragen und für Zierpflanzen zu etablieren.
3. Für eine Modellkultur sollen spezifische Trockenstressreaktionen zusammengetragen, charakterisiert und systematisiert werden.

Für die in dem Projekt zu bearbeitenden Themen wurden verschiedene Hypothesen aufgestellt, die es im Rahmen der Versuche zu bestätigen galt:

1. Trockenstresstolerante Genotypen zeigen im Austrocknungsprozess zu einem späteren Zeitpunkt Welkesymptome als weniger tolerante Genotypen (Dehydrierungsfähigkeit).
2. Trockenstresstolerante Genotypen können sich von einem Austrocknungsprozess besser erholen als weniger tolerante Genotypen (Rehydrierungsfähigkeit).
3. Die Frischmasseproduktion trockenstresstoleranter Genotypen wird von Trockenheit in der Kultur weniger beeinflusst als bei nicht trockenstresstoleranten Genotypen.
4. Das Einsetzen von Welke im Dehydrierungsversuch ist nicht ausschließlich von der Transpirationsfläche beeinflusst, sondern hauptsächlich durch physiologische Mechanismen.
5. Trockenstresstolerante Genotypen reagieren auf Trockenstress mit einer langsameren Absenkung des Wasserpotentials.
6. Trockenstresstolerante Genotypen verfügen unter Trockenstress Bedingungen über ein höheres osmotisches Potential.

7. Trockenstresstolerante Genotypen reagieren bei einsetzender Trockenheit mit einem schnelleren Stomataschluss.
8. Trockenstresstolerante Genotypen reagieren durch Stomataschluss mit einer stärkeren/schnelleren Blatterwärmung auf Trockenheit
9. Das Einzelblattverhalten stimmt mit dem der gesamten Pflanze im Austrocknungsprozess überein und kann als Schnelltest dienen.

Die Arbeiten wurden nach dem folgenden schematischen Arbeitsplan durchgeführt:

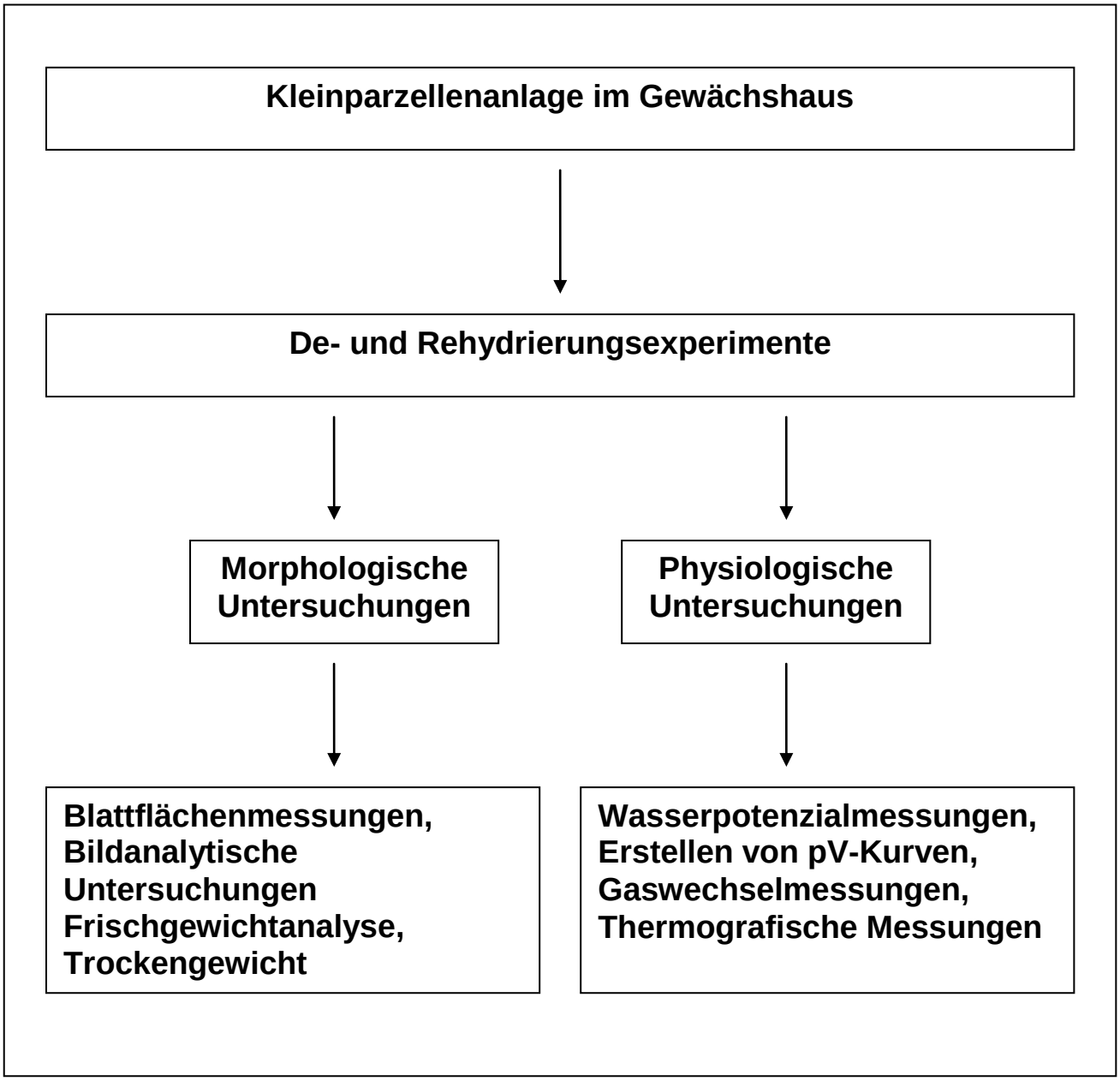


Abb. 2: Graphische Darstellung des Arbeitsplans.

4. Material und Methoden

Zur Untersuchung der Trockenstressreaktionen von Zierpflanzen wurden aufeinander aufbauende Konzepte entwickelt. Im Rahmen von Vegetationsversuchen wurde einerseits die Wachstumsbeeinträchtigung durch Trockenstress ermittelt und zum anderen unterschiedlich konditioniertes Ausgangsmaterial für De- und Rehydrierungsexperimente gewonnen. Der Schwerpunkt der Konzepte lag auf den Dehydrierungsexperimenten, in denen der Welkeverlauf in Abhängigkeit vom Wasserangebot erfasst wurde. Die Dehydrierungsexperimente wurden von physiologischen Studien (Wasserpotenzialmessungen, Gaswechselmessungen und thermografische Studien) begleitet, um Informationen über Mechanismen der Trockenstresstoleranz zu gewinnen, sowie ihre Eignung als Schnelltestverfahren zu prüfen. Die eingesetzten Methoden sind im nachfolgenden ausführlich erläutert.

4.1 Vegetationsversuche

Die Anzucht des Pflanzenmaterials erfolgte in einer Parzelle mit 2 x 24 Kleinparzellen (Abb. 3), so dass jeder Genotyp bewässerungstechnisch individuell gesteuert werden konnte. Damit waren die Voraussetzungen geschaffen, das Wasserangebot beziehungsweise die Trockenintensität für jeden Genotyp individuell zu gestalten.

Abb. 3: Kleinparzellenanlage im Gewächshaus.

4.1.1 Pflanzenmaterial

In der vorliegenden Arbeit wurden zwei verschiedene Arten und insgesamt 18 Genotypen verwendet. Beide Arten gehören zum festen Bestandteil des Beet- und Balkonpflanzen Sortiments.

***Impatiens* Neuguinea Grp.**

Weltweit gibt es mehr als 800 Impatiens Arten. Die Neuguinea Gruppe geht nach ALTMANN (2008) auf eine Kreuzung zurück die erstmals 1970 mit *Impatiens hawkeri* und anderen *Impatiens* Arten durchgeführt wurde. Diese Arten stammen aus dem Hochland von Papua-Neuguinea. Die Züchtung begann 1971 in amerikanischen Instituten. Mitte der 70er Jahre erfolgte die Einführung auf dem deutschen Markt. Mittlerweile gehören sie nach HORN (1996) zu den wirtschaftlich bedeutendsten Beet- und Balkonpflanzen.

***Petunia* Cultivars**

Petunien gehören den Nachtschattengewächsen an und sind ursprünglich in den gemäßigten bis subtropischen Gebieten Südamerikas beheimatet.

Nach intensiver Züchtungsarbeit der japanischen Firma Suntory wurde 1992 durch die Firma Kientzler unter dem geschützten Namen Surfinia™ die erste hängende großblumige Petunie in Deutschland eingeführt. Dabei handelt es sich vermutlich um eine Kreuzung aus verschiedenen Wildarten und der bekannten samenvermehrten Petunie (ALTMANN, 2008).

Mittlerweile gehören Petunien genau wie Impatiens zu sehr beliebten Zierpflanzenkulturen.

Das Pflanzenmaterial stammte von denen am Verbundprojekt beteiligten Jungpflanzenfirmen Syngenta, Kientzler und Selecta Klemm. Ein Überblick über die verwendeten Genotypen ist aus Tabelle 1 zu entnehmen.

Tab. 1: In den Versuchen verwendete Genotypen.

Art	Genotyp	Abkürzung	Herkunft
Impatiens Neuguinea Grp.	t07-1021-5	1021	Syngenta
Impatiens Neuguinea Grp.	k05-5597-5*	5597	Syngenta
Impatiens Neuguinea Grp.	k05-5993-1	5993	Syngenta
Impatiens Neuguinea Grp.	k06-6321-5*	6321	Syngenta
Impatiens Neuguinea Grp.	**i-0588-3***	**0 588**	**Syngenta**
Impatiens Neuguinea Grp.	**k02-9346-6***	**9346**	**Syngenta**
Impatiens Neuguinea Grp.	k-0833-3	0833	Syngenta
Impatiens Neuguinea Grp.	K01-8635-1	8635	Syngenta
Impatiens Neuguinea Grp.	**Paradise Moorea***	**Moorea**	**Kientzler**
Impatiens Neuguinea Grp.	**Paradise Timor***	**Timor**	**Kientzler**
Petunia Cultivars	Veranda Salomon*	Salomon	Kientzler
Petunia Cultivars	Veranda White*	White	Kientzler
Petunia Cultivars	Conchita Azur	Azur	Kientzler
Petunia Cultivars	Conchita Bluberry Frost	Blueberry Frost	Selecta Klemm
Petunia Cultivars	Famous Hot Rose Morn	Hot Rose Morn	Selecta Klemm
Petunia Cultivars	Famous Yellow	Yellow	Selecta Klemm
Petunia Cultivars	Sweet Sunshine Dark Violet*	Dark Violet	Selecta Klemm
Petunia Cultivars	Famous Lilac Dark Vein*	Dark Vein	Selecta Klemm

*Reduzierter Versuchsumfang 2010

Nachfolgend werden für die Genotypen lediglich die in Tabelle 1 aufgeführten Abkürzungen verwendet. Mit dem Begriff Impatiens sind immer *Impatiens* Neuguinea Grp. gemeint und mit Petunie immer *Petunia* Cultivars. Mit allen 18 Genotypen wurden 2009 Versuche zum Verhalten unter Trockenstressbedingungen durchgeführt. 2010 wurden die Impatiens auf die sechs mit * markierten Genotypen reduziert, die Petunien auf die vier mit * markierten Genotypen. Die Reduktion wurde vorgenommen, da sich einige Genotypen weder in Wuchsform noch in ihrem Welkeverhalten deutlich voneinander unterschieden.

Für die ausführlicheren pflanzenphysiologischen Untersuchungen wurden lediglich vier Genotypen verwendet. Bei den vier hauptsächlich verwendeten Genotypen

handelte es sich um die in Tabelle 1 fett markierten Impatiens Genotypen, Moorea und Timor der Firma Kientzler und die Genotypen 0588 und 9346 der Firma Syngenta. Ausgewählt wurden diese Genotypen, da sie sich nach ersten Vorversuchen voneinander in ihrem Welkeverhalten unterschieden. Moorea und 0588 reagierten auf Trockenstress früher mit Welkesymptomen als Timor und 9346. Die Hintergründe für dieses Verhalten galt es zu überprüfen.

Die Lieferung des Pflanzenmaterials erfolgte sowohl im Jahr 2009, als auch 2010 in zwei Sätzen. Der erste Satz wurde jeweils im Februar, der zweite im Mai geliefert. Durch die Lieferung in zwei Sätzen wurde sichergestellt, dass genügend Pflanzen zur Wiederholung und Optimierung der Versuche zur Verfügung standen. Des Weiteren, wurde dadurch durchgehend das Arbeiten mit möglichst jungem Pflanzenmaterial gewährleistet.

2011 wurden nur noch Arbeiten mit den vier Impatiens Genotypen durchgeführt, welche in Geisenheim vermehrt worden sind.

4.1.2 Gefäße und Substrate

Die von den einzelnen Züchtungsunternehmen gelieferten bewurzelten Jungpflanzen wurden nach Eintreffen in 10 Zentimeter Töpfe getopft. Das verwendete Substrat war Einheitserde P (Weißtorf-Ton-Gemisch, hoher Tongehalt, 1,5 g/l mineralischer Dünger NPK) von der Firma Patzer. Zur besseren Wiederbenetzbarkeit wurde dem Substrat werkseitig ein Tensid zugesetzt.

Zur Schaffung gleicher physikalischer und chemischer Substratbedingungen wurde das Substrat vor der Verwendung homogenisiert. Dafür wurde die Gesamtmenge Substrat durch einen Erdwolf aufgelockert, fein zerbröselt und anschließend dreimal gemischt.

Die Befüllung der Gefäße erfolgte nach Gewicht um gleichmäßige Ausgangsbedingungen zu schaffen und um im Versuchsverlauf das Gefäßgewicht als Schwellenwert für die Bewässerung heranziehen zu können.

Die Gefäßgewichte variierten zwischen den einzelnen Versuchsjahren und betrugen 2009 155 g, 2010 135 g und 2011 140g pro 10 Zentimeter Topf. Das unterschiedliche Gewicht kam zustande, da die Zusammensetzung des Substrates in jedem Jahr geringfügig anders war. Das Gewicht entsprach aber immer einem Topf der gut mit Substrat gefüllt ist. Nach der Einwaage wurden die Jungpflanzen in die

vorbereiteten Gefäße gepflanzt. Anschließend wurde jeder Topf bewässert, um dann im Gewächshaus in den Kleinparzellen aufgestellt zu werden.
Die Kleinparzellen waren 180 x 100 cm groß. Jede Art, Sorte und Behandlung (trocken und normal feucht) stand einzeln in einer Parzelle. Insgesamt wurden 48 solcher Parzellen in zwei Gewächshausabteilungen verwendet (Versuchsumfang: 3 Jahre, 2 Sätze Prüfpflanzen pro Jahr, pro Satz 1 Wiederholung).

4.1.3 Bewässerung

Die Kleinparzellen können individuell mit einem Ebbe-Flutsystem bewässert werden.
Mit der Bewässerungsdüngung wurde etwa 10 Tage nach dem Topfen begonnen. Die Bewässerung erfolgte nach einem gravimetrischen System. Dies geschah um alle Pflanzen gleich zu behandeln und um eine Differenzierung in eine normal feuchte und trockene Variante zu erreichen. Für den Versuch wurde zwischen einer trockenen und einer normal feuchten Kultur unterschieden, um gezielt Trockenstress zu applizieren und um später auf die Adaptionsfähigkeit der Pflanzen an Trockenheit schließen zu können.
Dafür wurden täglich innerhalb jeder Kleinparzelle acht Referenzpflanzen gewogen (gleichmäßige Verteilung über die Kleinparzelle war gewährleistet). Bei Unterschreitung eines festgelegten Systemgewichts (Systemgewicht = Gesamtgewicht aus Topf, Substrat, Wasser und Pflanze) wurde die Parzellen jeweils für etwa 5 Minuten mit einer Nährlösung (Tab. 2) geflutet und damit eine annähernd gleichmäßige Befeuchtung der Substrate ereicht. Die Festlegung des Systemgewichts orientierte sich an der maximalen Sättigung des Substrates und den beabsichtigten Feuchtestufen (2 Varianten). Das Systemgewicht wurde so gewählt, dass es in der normal feuchten Kultur einer maximalen Wasserkapazität von etwa 40 % entsprach und in der trockenen Kultur 25 % der maximalen Wasserkapazität. Dieses Systemgewicht wurde während der Kultur erhöht, da es sich durch den Frischmassezuwachs veränderte. Die Bewässerungsschwellenwerte für die normal feuchte und trockene Kulturführung waren in Vorversuchen festgelegt worden. Töpfe, die mit dem in den Versuchen verwendeten Substrat befüllt waren, wurden auf 100 % Wasserkapazität bewässert. Im Anschluss wurde durch Austrocknung der Töpfe das Gewicht ermittelt, ab dem kein Wasserverlust/Gewichtsverlust mehr festzustellen war. Dadurch wurden die Wasserkapazitätswerte und entsprechende Systemgewichte festgelegt.

4.1.4 Weitere Kulturmaßnahmen

Alle weiteren Kulturmaßnahmen, die bei der Versuchsführung im Gewächshaus durchgeführt worden sind, sind zur besseren Übersicht in Tabelle 2 dargestellt.

Tab. 2: Übersicht über die Versuchsbedingungen.

Kultur	**Jungpflanzen**
Töpfe	10 cm
Substrat	Einheitserde P mit Tensidzusatz
Heiztemperatur Tag [°C]	12 nach Etablierungsphase
Heiztemperatur Nacht [°C]	12
Lüftung Tag [°C]	14
Lüftung Nacht [°C]	14
Schattierung	60.000 Lux nach Etablierungsphase
Düngung (mit jeder Bewässerung)	Ferty 3-Mega: 1 g/l (18:12:18)

Während der Kultur wurden die Pflanzen ihrem Wachstum entsprechend gerückt. Bei Petunien war ein zweimaliges Stutzen der Pflanzen notwendig, um sie vor allem für die Austrocknungsversuche in einer handlichen Größe zu halten.

Durch unterschiedlichen Frischmassezuwachs innerhalb der Pflanzen eines Geotyps war der Wasserverbrauch der Pflanzen nach einiger Kulturzeit unterschiedlich, das Systemgewicht innerhalb einer Parzelle schwankte um mehr als 15 g, daher wurden Ausgleichsbewässerungen vorgenommen. Alle Pflanzen innerhalb einer Parzelle wurden auf ein gleiches Gewicht bewässert. Die Frischmasseerfassung erfolgte mindestens zweimal bei einer ca. zweimonatigen Kulturdauer.

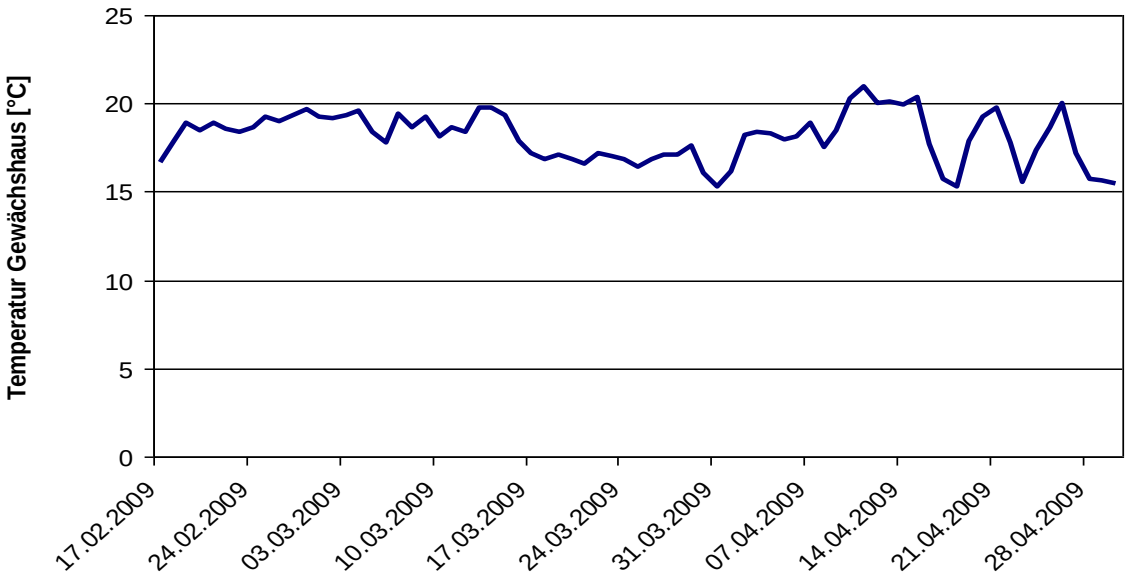


Abb. 4: Exemplarische Darstellung der Temperaturbedingungen im Gewächshaus im Frühjahr 2009.

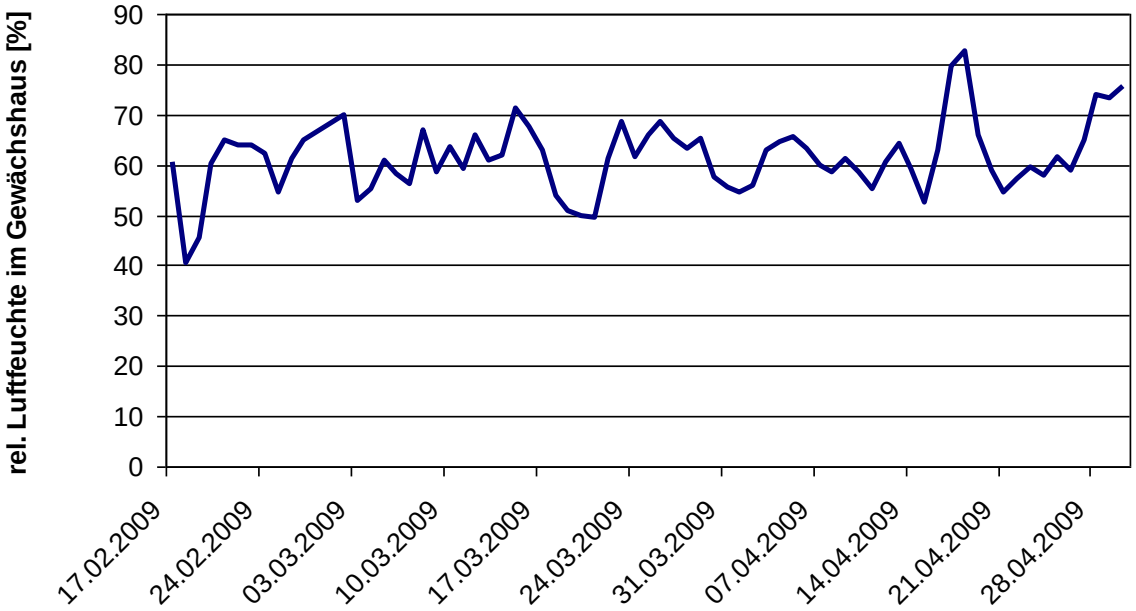


Abb. 5: Exemplarische Darstellung der Luftfeuchtigkeitsbedingungen im Gewächshaus im Frühjahr 2009.

Nach einer mindestens zweiwöchigen Etablierungsphase im Gewächshaus wurden acht Pflanzen pro Genotyp und Behandlung aus dem Gewächshaus entnommen und in Klimakammern gebracht (siehe Kapitel 4.3 Applikation von Trockenstress). Vorgesehen war die Entwicklung/Anpassung von Dehydrierungsexperimenten in Klimakammern unter standardisierten Klimabedingungen (Tab. 3). Dabei wurden die Pflanzen unter kontrollierten Bedingungen ausgetrocknet und Parameter des Boden- und Wasserhaushaltes erfasst. Es herrschten folgende Bedingungen:

Tab. 3: Bedingungen in den Klimaräumen während der Dehydrierungsversuche.

Parameter	
Temperatur	22°C
Luftfeuchtigkeit	30 - 55 %
Beleuchtung	30 µmol m^{-2} s^{-1}
Beleuchtungsdauer	16 Stunden

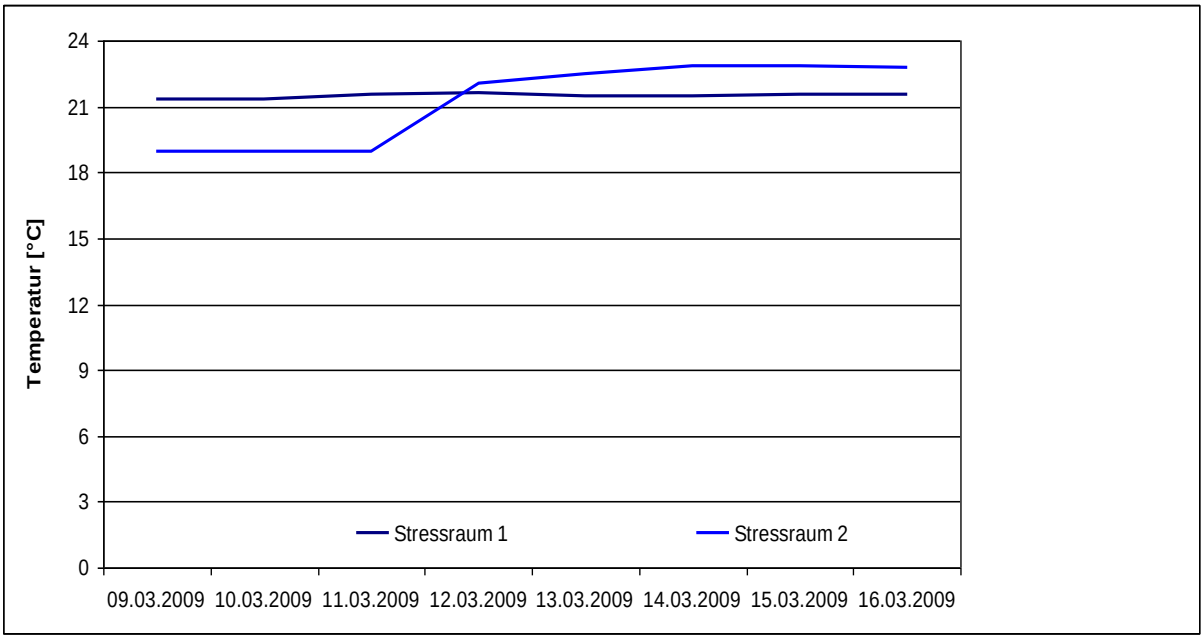


Abb. 6: Exemplarische Darstellung der Temperaturverhältnisse während einer Woche in den Klimakammern im Frühjahr 2009.

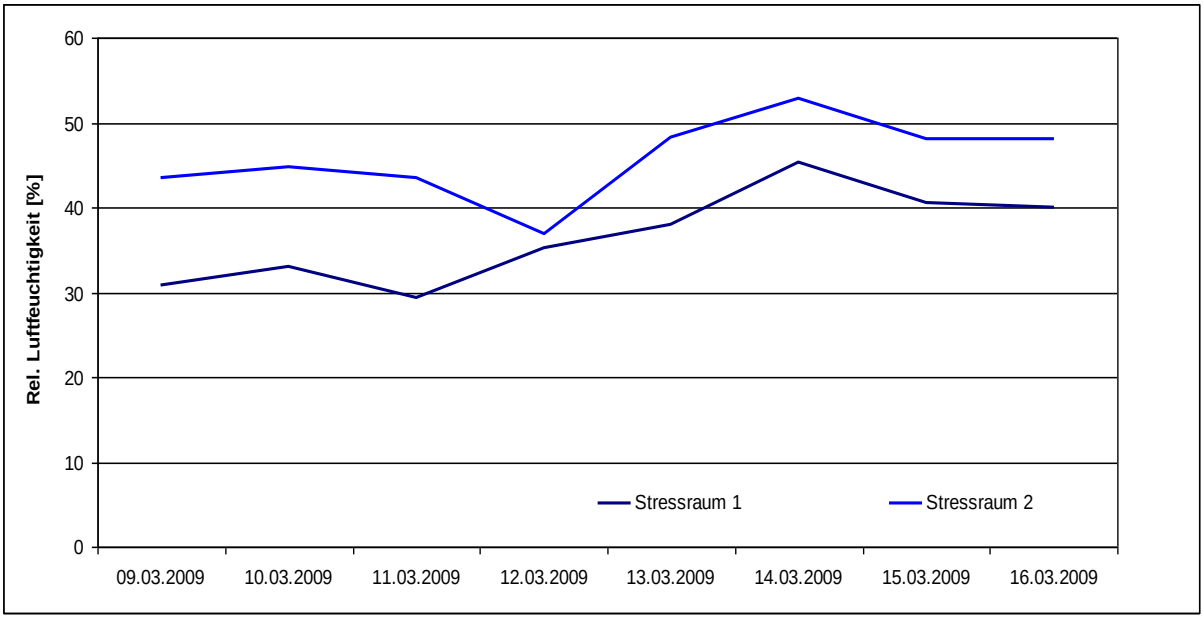


Abb. 7: Exemplarische Darstellung der Luftfeuchtigkeitverhältnisse während einer Woche in den Klimakammern im Frühjahr 2009.

Wie in Abb. 6 und 7 zu sehen schwankten die Temperaturbedingungen in Stressraum 2 um 3°C und die Luftfeuchte in beiden Räumen um ca. 20 %. Diese Schwankungen wurden als nicht versuchsbeeinflussend hingenommen.

4.2 De- und Rehydrierungsexperimente

Die Applikation von Trockenstress erfolgte durch die gezielte Austrocknung der einzelnen Genotypen, sogenannte Dehydrierungsversuche. Die Dehydrierungsversuche fanden dreimal im Jahr 2009 und viermal im Jahr 2010 statt. Dafür wurden jeweils Pflanzen aus den zwei gelieferten Pflanzensätzen verwendet, zwei Durchgänge aus dem ersten Satz und zwei Durchgänge aus dem zweiten Satz, so dass die Pflanzen nicht zu groß/alt waren.

Die Entnahme der Pflanzen für die Dehydrierungsversuche erfolgte aus den Kleinparzellen des Gewächshauses, wo die Pflanzen der in Kapitel 4.1.3 beschriebenen Differenzbehandlung unterlagen. Von jedem Genotyp wurden sowohl normal feucht, wie auch trocken kultivierte Pflanzen dem Dehydrierungsprozess unterstellt. Die Pflanzen für die Dehydrierungsversuche wurden sowohl 2009, wie 2010 nach unterschiedlich langer Differenzbehandlung in die Klimaräume gestellt. Die Differenzbehandlung betrug in den einzelnen Wiederholungen mindestens zwei und höchstens fünf Wochen.

Es wurde darauf geachtet, Pflanzen von möglichst gleicher Größe zu verwenden. Parallel wurden ebenfalls immer acht Pflanzen ausgewählt und deren Frischgewicht bestimmt. Es wurde darauf geachtet, dass die Pflanzen für die Frischgewichtermittlung denen für die Austrocknungsversuche bezüglich Wuchs und Größe möglichst ähnlich waren.

Die Dehydrierungsversuche fanden in Kunstlichträumen statt, unter den bereits in Tabelle 3 aufgeführten Klimabedingungen. Bevor die Pflanzen in die Klimaräume eingestellt worden sind, wurden sie auf ein Ausgangsgewicht gewässert, welches 50 % ihrer maximalen Wassersättigung entsprach. Durch das vorherige Topfen auf ein einheitliches Gewicht hatten alle Pflanzen die gleichen Voraussetzungen.

Im Verlauf der Dehydrierung wurden die Pflanzen einmal täglich gewogen und ihr Welkeverhalten bonitiert. Die Bonitur erfolgte auf einer Skala von 1 bis 9 (es wurden nur die ungeraden Zahlen berücksichtigt), wobei eine Pflanze mit der Note 1 keine Welkesymptome zeigte und eine Pflanze mit der Note 9 die Turgeszenz verloren hatte und auf dem Substrat zum Erliegen kam (siehe Boniturschema Kapitel 5.3). Um Rückschlüsse bezüglich der Substratfeuchte ziehen zu können, wurde bei einer Auswahl von Pflanzen die Saugspannung mit Tensiometern (Fa. TensioTechnik, Erdfeuchtesensor Bloomat Digital) ermittelt. Des Weiteren wurden zwei Pflanzen pro Genotyp über die gesamte Versuchsdauer fotografiert, um das Welkeverhalten dokumentieren zu können und ein Welkeboniturschema für jede Art und Genotyp aufstellen zu können. Wie in der nachfolgenden Abbildung 8 zu sehen, wurde mit Hilfe eines Rahmens die immer gleiche Perspektive für die Aufnahme der Pflanze gewährleistet.

Abb. 8: Pflanze des Genotyps Moorea.

Durch die Wägung und die Vergabe von Boniturnoten sollte ein Ranking der Genotypen aufgestellt werden. Es sollte der trockenstresstoleranteste Genotyp unter diesen Bedingungen ermittelt werden. Dafür wurde die Wasserkapazität bei BN 9 herangezogen.

Die Trockenstresstoleranz von Genotypen wird unter anderem auch dadurch charakterisiert, wie gut ein Genotyp sich von einem Dehydrierungsprozess erholen kann, also durch die Rehydrierungsfähigkeit.

Um diesen Regenerationsprozess zu testen, wurden die Pflanzen, nachdem sie Boniturnote 9 im Dehydrierungsversuch erreicht hatten, rehydriert.

Dafür wurden die Pflanzen aus den Klimaräumen in das Gewächshaus gebracht. Dort wurden sie mithilfe eines Untersetzers auf 70 % ihrer maximalen Wasserkapazität aufgewässert. Die Bonitur erfolgte 48 h nach der Rehydrierung. Die Boniturskala umfasste die Noten 1-9 (nur die ungeraden Zahlen wurden berücksichtigt), Boniturnote 9 bedeutete eine vollständige Rehydrierung, 1 keine Rehydrierung.

Wiederholte De- und Rehydrierungsversuche

Mit den nachfolgend beschriebenen Versuchen wurde das Ziel verfolgt, Trockenstresssituationen unter Konsumentenbedingungen zu simulieren. Typisch hierfür sind sporadische Bewässerungen im Wechsel mit sich wiederholenden Trockenstressphasen.

In der Klimakammer erfolgten diese Wechselstressversuche mit den beiden Impatiens Genotypen Moorea und Timor. Dafür wurden Pflanzen von den beiden Genotypen im Klimaraum unter den in Tabelle 2 genannten Bedingungen aufgestellt. Die Pflanzen wurden auf ein einheitliches Gewicht gebracht (50 % maximale Wasserkapazität) und dann bis zum Erreichen der Welkeboniturnote 9 dehydriert. Nach Erreichen der Boniturnote 9 wurden sie auf 70 % ihrer maximalen Wasserkapazität aufgesättigt. Im Anschluss erfolgte ein erneuter Dehydrierungsprozess. Dieser Prozess wurde dreimal mit denselben acht Pflanzen wiederholt. Ziel war es zu testen, wie oft die Pflanzen in der Lage waren sich von einem erlittenen Trockenstress zu erholen. Festgehalten wurden dabei bei jedem der drei Durchläufe folgende Parameter:

- Tage bis zum Erreichen der Welkeboniturnote 9
- Systemgewicht bei Erreichen der Welkeboniturnote 9
- Erholungsbonitur nach einem Tag Rehydrierung

Eine weitere Variante der wiederholten De- und Rehydrierungsversuche erfolgte durch eine Testung der Genotypen im Gewächshaus. Es sollte ein Screeningverfahren auf Trockenstress aufgebaut werden, welches auch von Züchtungsunternehmen umsetzbar wäre. Grundidee dieses Screeningverfahrens waren sich wiederholende De- und Rehydrierungsprozesse unter Gewächshausbedingungen.
Im Test befanden sich drei Impatiens Genotypen und fünf Petunien Genotypen mit jeweils 30 Pflanzen, wobei 10 Pflanzen auf die Kontrolle entfielen und 20 Pflanzen dem Wechselstress ausgesetzt wurden. Der Versuchszeitraum betrug sechs Wochen. In der nachfolgenden Tabelle 4 ist ein Überblick über die in diesem Versuch verwendeten Genotypen gegeben.

Tab. 4: Verwendete Genotypen im Gewächshausversuch.

Art	Genotyp	Herkunft
Impatiens	0 588	Syngenta
Impatiens	9346	Syngenta
Impatiens	Timor	Kientzler
Petunia	Dark Vein	Selecta Klemm
Petunia	Dark Violet	Selecta Klemm
Petunia	Hot Rose Morn	Selecta Klemm
Petunia	V. Salmon	Kientzler
Petunia	V. White	Kientzler

Die Bewässerung erfolgte über einen Untersetzer mit einem Fassungsvermögen von etwa 200 Milliliter. Bewässert wurde die Kontrollparzelle bei einer Unterschreitung einer Saugspannung von etwa -150 hPa (circa 40 % der max. Wasserkapazität),
die Stressvariante bei etwa -500 hPa (circa 20 % der max. Wasserkapazität). Im Rahmen von Vorversuchen wurden Eichreihen zur Charakterisierung des Zusammenhanges zwischen Saugspannung/Wasserkapzität und Systemgewicht erstellt, so dass nachfolgend das Systemgewicht zur Bewässerungssteuerung

verwendet werden konnte. Zur Ermittlung des Systemgewichtes wurden fünf repräsentative Pflanzen pro Parzelle ausgewählt und deren Gewichtsverlauf täglich überwacht. Weitere Hinweise zur Versuchsdurchführung sind aus Tabelle 5 zu entnehmen.

Tab. 5: Versuchsbedingungen des Gewächshausversuches.

Kultur	**Impatiens**	**Petunien**
Töpfe	11 cm	12 cm
Substrat	Einheitserde P mit Tensidzusatz	Einheitserde P mit Tensidzusatz
Topfvolumen	185 g Substrat je Topf (Trockengewicht) + 135 ml Wasser	230 g Substrat je Topf (Trockengewicht) + 170 ml Wasser
Topftermin	03.05.2010	03.05.2010
Beginn Differenzbehandlung	02.06.2010	02.06.2010
Heiztemperatur Tag [°C]	12	12
Heiztemperatur Nacht [°C]	12	12
Lüftung Tag [°C]	16	16
Lüftung Nacht [°C]	16	16
Schattierung	60.000 Lux ab 17.05.2010	60.000 Lux ab 17.05.2010
Düngung	Ferty 3-Mega: 0,8 g/l (18:12:18)	Ferty 3-Mega: 1,2 g/l (18:12:18)

Zur Charakterisierung der Trockenstresstoleranz der an diesem Versuch beteiligten Genotypen wurden eine Ermittlung der Frischmassereduktion durch Trockenstress sowie eine Bonitur der Schadintensität (Nekrosen 1-9) durchgeführt. Des Weiteren wurde die Reduktion der Blütenbildung durch Trockenstress erfasst. Genotypen mit einer geringen Frischmassereduktion und/oder wenigen Pflanzenschäden wurden bei der Bewertung als trockenstresstolerant eingestuft.

4.3 Physiologische Untersuchungen

Die physiologischen Untersuchungen wurden mit Impatiens durchgeführt. Impatiens reagiert von den beiden untersuchten Arten sensibler auf Trockenstress als Petunien und zeigen optisch deutliche Welkesymptome. Durch einen hohen Wasserbedarf und einen dadurch bedingten kurzen Austrocknungsprozess eignen sich Impatiens besser, um Methoden zur Trockenstressdetektion anzuwenden und auf ihre Tauglichkeit zu überprüfen.

Von den zehn im Test befindlichen Impatiens Genotypen wurden vier für die physiologischen Untersuchungen ausgewählt. Die Auswahl erfolgte aufgrund ihres Welkeverhaltens im Dehydrierungsexperiment. Es wurde darauf geachtet möglichst kontrastierende Genotypen zu wählen.

Bei den vier Genotypen handelte es sich um Timor und Moorea, der Firma Kientzler und 0 588 und 9346, der Firma Syngenta.

4.3.1 Wasserpotentialmessungen

Gemessen wurde das Trieb-Wasserpotential der vier Impatiens Genotypen Timor Moorea, 0 588 und 9346. Die Bestimmung des Wasserpotentials erfolgte nach der Druckbombenmethode von Scholander (SCHOLANDER *et al*., 1965). Die Druckbombe oder Scholanderbombe ist eine Möglichkeit auf einfache, schnelle und zuverlässige Weise das Gesamtwasserpotential von ganzen Pflanzen, Zweigen, Blättern oder sogar Blattstücken zu bestimmen (WILLERT *et al*., 1995).

Die Methode funktioniert nach dem Prinzip, dass der Wasserfaden im Xylem einer transpirierenden Pflanze unter einem Unterdruck steht. Schneidet man nun ein Blatt oder einen Trieb ab, löst sich die Xylemspannung und der Meniskus des Xylemsaftes zieht sich in die Gefäße zurück. Baut man nun den Trieb oder das Blatt in eine Druckbombe ein und erhöht langsam den Innendruck, kommt der Meniskus wieder aus der Schnittstelle. Der dann herrschende Druck ist dem negativen Druck im Xylem vor dem Abschneiden des Triebes oder Blattes näherungsweise gleichzusetzen.

Die Messungen des Trieb-Wasserpotentials wurden wie Eingangs erwähnt, mit einer Scholander Druckkammer durchgeführt. Die Methode und deren fehlerfreie Anwendung werden von TURNER (1988) erläutert.

Die Messung des Trieb-Wasserpotentials mit den vier Impatiens Genotypen fand in einem Klimaraum unter den in Tabelle 3 genannten Klimabedingungen statt.
Die Messung fand zunächst immer morgens, ohne Licht in der Klimakammer und mittags mit Licht statt. Später wurden nur noch mittägliche Wasserpotenzialmessungen durchgeführt. WILLIAMS *et al.* (2002) konnte eine gute Korrelation zwischen dem mittäglichen Wasserpotenzial und dem frühmorgendlichem Wasserpotenzial bei Wein nachweisen und auch in diesen Versuchen korrelierten die Daten gut, so dass die Messungen ohne Licht nicht weiter durchgeführt wurden. Es wurde darauf geachtet, die Messungen immer zur selben Zeit durchzuführen. Um die Pflanzen an die Klimabedingungen in dem Raum zu gewöhnen, wurden sie bereits drei Tage vor der Messung in den Raum eingestellt. Vor Beginn der Messung wurden alle Pflanzen bzw. Töpfe auf ein gleiches Gewicht gewässert, welches 50 % der max. Wasserkapazität entsprach. Pro Messzeitpunkt wurden drei Triebe einer Pflanze gemessen. Vor jeder Messung wurden die Pflanzen gewogen, zusätzlich gab es zu jeder Sorte fünf Referenzpflanzen die mit Tensiometern ausgestattet waren um Rückschlüsse auf das Wasserpotential im Substrat zum jeweiligen Messzeitpunkt ziehen zu können.
Die Untersuchungen fanden im Sommer des Jahres 2009 und 2010 statt, sowie im Frühjahr des Jahres 2011.

4.3.2 Druck-Volumen-Analyse (pV-Kurven)

Ergänzend zu den Wasserpotenzialmessungen wurden Druck-Volumen-Analysen, so genannte pV-Kurven erstellt. Für diese Messungen wurden ebenfalls die vier Genotypen Timor, Moorea, 0 588 und 9346 verwendet.
Druck-Volumen-Analysen oder pV-Kurven werden in vielfältiger Weise bei der Analyse der pflanzlichen Wasserzustandsverhältnisse eingesetzt (LÖSCH, 2003).
Die Druck-Volumen-Relation (pressure volume analysis) beschreibt die Beziehung zwischen dem Wasserpotenzial und dem symplastischen Wassergehalt von Trieben von gesättigtem Gewebe über den Turgornullpunkt hinaus (HÖFLER, 1920).
Mit deren Hilfe lassen sich in einem einzigen Arbeitsgang viele wichtige Wasserzustandsparameter ableiten, die mit anderen Methoden nur wesentlich umständlicher und zeitaufwendiger zu gewinnen sind (WILLERT et al., 1995).
Wenn Blätter austrocknen, schrumpft ihr Zellvolumen, der Turgordruck und das Wasserpotenzial nehmen ab (LENZ *et al.*, 2006). Am Turgornullpunkt ist der

Turgordruck Null, die Zellwand ist entspannt und das Zellwasserpotenzial ist gleich dem osmotischen Potenzial (SCHULZE *et al.*, 2005).

Die Druck-Volumen-Analyse beschreibt das abnehmende Wasserpotenzial als Funktion des relativen Wasserdefizits (RWD). Die Kurve selbst besteht aus einem linearen und einem nicht linearen Bereich. Der nicht lineare Bereich der Kurve setzt sich aus osmotischem Potenzial und Druckpotenzial des Gewebes zusammen, im linearen Bereich entspricht das Blattwasserpotenzial dem osmotischen Potenzial. Aus dem Übergang vom nicht-linearen in den linearen Teil kann der Turgornullpunkt graphisch ermittelt werden (SCHALLER, 2007).

Das Wasserpotenzial am Turgornullpunkt entspricht mehr oder weniger dem Wasserpotenzial, bei dem sich die Stomata schließen oder geschlossen sind (BRODRIBB *et al.*, 2003).

Da pV-Kurven je nach Gewebeart, Pflanzenalter und Kulturbedingungen unterschiedliche Verläufe haben (LÖSCH, 2003), wurde darauf geachtet, Pflanzen gleichen Alters und Triebe gleicher Ordnung bei den Messungen zu verwenden.

Die Messungen fanden in der Klimakammer unter den in Tabelle 2 genannten Bedingungen statt. Damit sich die Pflanzen an diese Bedingungen adaptieren konnten, wurden sie 3 Tage vor den Messungen in die Klimakammer eingestellt. Um pV-Kurven erstellen zu können, ist es wichtig, dass die Pflanzen über einen ausgeglichenen Wasserhaushalt verfügen. Die tagesbedingte Transpiration stellt bereits eine zu große Beeinträchtigung dar. Daher sollten die Messungen im Dunkeln stattfinden. Da die Messungen in diesem Fall nicht im Freien stattfinden, können die gut bewässerten Pflanzen 24 h vor Messbeginn mit Hilfe eines Containers abgedunkelt werden, dies stellt eine Alternative zu „predawn“ Messungen dar (WILCOX-LEE, 1987). Die Messungen selbst erfolgten dann ohne Licht in der Klimakammer. Sie fanden im Sommer 2010 sowie im Frühjahr 2011 statt. Die Messungen erfolgten in Anlehnung an die Methode nach RICHTER (1978) und SCHALLER (2007).

Vor Beginn der Messung wurden die Pflanzen auf ihr Sättigungsgewicht gewässert.

Direkt nach dem Abschneiden wurde der Trieb mit einer Analysewaage gewogen. Danach wurde er in die Scholander Bombe eingespannt. Das Wasserpotenzial wurde gemessen, anschließend wurde der Wert um 0,05 MPa erhöht und für 30 s beibehalten. Das austretende Xylemwasser wurde mit einem Zellulosetupfer aufgefangen. Trat kein Wasser mehr aus dem Trieb wurde er erneut gewogen und

die Differenz zum Sättigungsgewicht ermittelt. Als Gewichtsbezug diente der Mittelwert des Frischgewichts vor und nach jeder Scholanderbombenmessung (WILLERT *et al*, 1995). Nach der Messung wurde der Trieb in einem wieder verschließbaren Plastikbeutel aufbewahrt, um Transpirationsverluste zu vermeiden. Nach dem dritten Messdurchgang wurde der Druck 60 s lang aufrechterhalten. Nähert sich der Turgornullpunkt, verliert der Trieb deutlich weniger Wasser. Das Erreichen des Turgornullpunktes kennzeichnet sich dadurch, dass es keine Veränderung des Wasserpotenzials mehr gibt. Über diesen Punkt hinaus wurden für jeden Trieb drei Wertpaare ermittelt. Die Messung erfolgte jeweils mit vier Trieben von jedem Genotyp. Das relative Wasserdefizit (RWD) wurde gravimetrisch über den relativen Wassergehalt (RWG) bestimmt (WILLERT *et al*, 1995).

RWG = 100 x (FM-TM)/(SG-TM)	FM = Frischmasse
	TM = Trockenmasse
RWD = 1-RWG	SG = Sättigungsgewicht

4.3.3 Gaswechselmessungen

Gemessen wurde der Gaswechsel der vier Impatiens Genotypen Timor, Moorea, 0 588 und 9346. Die Messung erfolgte mit einem Gaswechselmessgerät (Steady State Porometer GFS 3000, Firma Walz).

Durch die Regulierung der Spaltöffnungsweite ist die Pflanze in der Lage, ihre transpirative Wasserabgabe entsprechend den Möglichkeiten und Bedürfnissen ihres Wasserhaushaltes anzupassen. Das Mikroklima, Differenzen der CO_2-Konzentration und der Wasserzustand der Pflanze beeinflussen den Stomataapparat. Veränderte Licht-, Luftfeuchte- und Temperatur-Bedingungen, Änderungen im blattinternen CO_2-Gehalt und hormonelle Informationen bis aus dem Wurzelraum der Pflanze lösen Stoffwechselvorgänge in den Schließzellen aus (LÖSCH, 2003).

Objekte der Gaswechselmessung sind die Wasserdampfabgabe und die CO_2-Aufnahme. Bei der Gaswechselmessung wird die molare Durchflussrate von Wasser und Kohlendioxid erfasst, dadurch kann auf den Öffnungsgrad der Stomata geschlossen werden (CAEMMERER und FARQUHAR, 1981).

Die Gaswechselmessungen mit den vier Impatiens Genotypen wurden immer um die Mittagszeit durchgeführt. Es wurde darauf geachtet die Messungen immer um dieselbe Zeit auszuführen mit maximal einer Stunde Abweichung.

Die Pflanzen für die Gaswechselmessung wurden in den Klimaräumen (Bedingungen siehe Tab. 3) aufgestellt, die Einstellung in die Klimakammer erfolgte drei Tage vor Messbeginn, um die Pflanzen an die dortigen Bedingungen zu adaptieren. Alle Pflanzen wurden auf ein gleiches Gewicht (50 % max. Wasserkapazität) gebracht und anschließend einem Dehydrierungsprozess unterworfen, dessen Verlauf durch tägliche Gaswechselmessungen begleitet wurde. Die Pflanzen wurden vor jeder Messung gewogen, zusätzlich war jede Pflanze mit einem Tensiometer ausgestattet, um die Saugspannung im Substrat ebenfalls vor jeder Messung festhalten zu können. Gemessen wurden bei allen Wiederholungen fünf Pflanzen pro Genotyp. Die Messungen fanden täglich statt, bis die Bodensaugspannung einen durchschnittlichen Wert von -700 hPa erreicht hatte. Bei den Messungen wurde, um das Blattalter als Einflussfaktor ausschließen zu können, immer das gleiche Blatt einer Pflanze gemessen. Es handelte sich dabei um das dritte voll entwickelte Blatt von oben. Die Messungen fanden im Frühjahr und Sommer 2009 und 2010 so wie im Frühjahr 2011 statt.

Um immer die gleichen Messbedingungen zu haben, wurden verschiedene Einstellungen am WALZ Steady-State-Porometer vorgenommen. Nach LÖSCH (2003) sind die wichtigsten Faktoren, die Einfluss auf das Öffnen der Spaltöffnungen haben, Licht, die Wasserpotentialverhältnisse in der Pflanze, das Dampfdruckdefizit zwischen Blatt und Luft, die Blatttemperatur und der blattinterne CO_2-Gehalt. Somit wurde darauf geachtet diese Faktoren mit Ausnahme des Wasserpotentials, durch Einstellung von Fixwerten in der Küvette, bei den Messungen gleichzuhalten.

Die Blätter wurden immer in eine Messküvette mit 3 cm^2 Fläche eingespannt. Die Luftdurchflussrate betrug 750 µmol s^{-1}, die Ventilationsgeschwindigkeit wurde mit 5 auf eine mittlere Stufe eingestellt. Eine konstante Raumluftzusammensetzung wurde durch einen 5 l-Mischbehälter gewährleistet, in den die in ca. zwei Metern Höhe angesaugte Umgebungsluft eingesaugt wurde bevor sie die Küvette durchströmte.

Ein konstantes Licht lieferte ein LED-Lichtapperat (3040 L, Walz GmbH), die Lichtstärke lag bei einer Photonendurchflussrate von 30 µmol m^{-2} s^{-1}. Des Weiteren wurde die Temperatur in der Küvette mit 23°C konstant gehalten, sowie die Luftfeuchtigkeit auf 30 % eingestellt. Diese Werte entsprachen den Werten die auch

in der Klimakammer herrschten, somit den Werten an die die Pflanzen adaptiert waren. Durch die Einstellung der Werte für Temperatur und Luftfeuchtigkeit in der Küvette ergab sich ein konstanter Wert für das Wasserdampfdruckdefizit (VPD) zwischen Blatt und Luft.

Der apparative Nullwert der Küvette zwischen dem Referenz- und Probegas-Analysator ist vor Beginn, sowie zwischen den Messungen genommen worden, um die Messwerte gegen diesen Nullwert zu korrigieren.

Messwerte wurden erfasst, wenn die CO_2 und die H_2O Konzentration in der Küvette für mindestens eine Minute konstant blieben.

Zusätzlich zu den Gaswechseluntersuchungen wurde im Frühjahr 2009 eine Lichtsättigungskurve exemplarisch für den Genotyp Moorea erstellt, um zu sehen, inwieweit die schwachen Lichtverhältnisse (30 µmol m^{-2} s^{-1}) das Öffnen der Stomata beeinflussen.

4.3.4 Gravimetrische Transpirationsstudien an Einzelblättern

Als technisch einfache Lösung um die Transpiration einer Pflanze herauszufinden, gilt der gravimetrisch erfassbare Gewichtverlust. Ähnlich dem Dehydrierungsprozess, in dem ganze Pflanzen über einen gewissen Zeitraum ohne Wasser gehalten wurden und der Gewichtsverlust erfasst wurde, sollte in diesem Fall der Gewichtsverlust einzelner Blätter erfasst werden.

Bei den Einzelblattuntersuchungen ging es darum herauszufinden, ob ein Zusammenhang zwischen dem Wasserverlust ganzer Pflanzen und einzelner Blätter besteht. Die Einzelblattversuche wurden mit den vier Impatiens Genotypen Timor, Moorea, 0 588 und 9346 durchgeführt. Nach ersten Vorversuchen fanden die Versuche im Sommer 2010 in einer Klimakammer unter den in Tabelle 2 genannten Bedingungen statt. Die zu messenden Blätter wurden direkt an den Blattbasen der Versuchspflanzen abgetrennt und im Anschluss sofort mit einer Analysenwaage mit einer Messgenauigkeit von 100 μg gewogen. Im weiteren Versuchsverlauf wurden die Blätter in der ersten Stunde alle 15 Minuten gewogen, danach stündlich, über einen Zeitraum von acht Stunden, sowie nach 24 Stunden. In der ersten Stunde wurden die Werte im 15 Minuten Takt erfasst, da nach LÖSCH (2003) auf eine kurze Zeitspanne starker Wasserverluste bei geöffneten Stomata eine kontinuierliche geringe Gewichtsabnahme infolge kutikulärer Transpiration folgt. Verwendet wurden pro Genotyp immer acht Blätter. Um das Blattalter als Einflussfaktor ausschließen zu

können, wurde immer das dritte voll entwickelte Blatt von oben von den Versuchspflanzen entnommen.
Zwischen den Wägungen lagen die Blätter mit der Blattunterseite nach oben in luftdurchlässigen Schalen.
Nach der abschließenden Wägung nach 24 Stunden wurde das Trockengewicht der Blätter ermittelt. Dafür wurden die Blätter 24 Stunden bei 60°C im Trockenschrank getrocknet.

4.3.5 Thermografische Untersuchungen

Thermografische Untersuchungen wurden an den vier Impatiens Genotypen Timor, Moorea, 0 588 und 9346 vorgenommen. Sie erfolgten immer parallel zu den Gaswechselmessungen, um den Anstieg der Blatttemperatur mit dem Öffnungsgrad der Stomata vergleichen zu können. Die Pflanzen, die aufgenommen wurden, waren die gleichen, die auch für die stomatären Untersuchungen verwendet wurden. Die thermografischen Aufnahmen fanden ebenfalls in Klimaräumen, unter den in Tabelle 3 genannten Bedingungen statt.

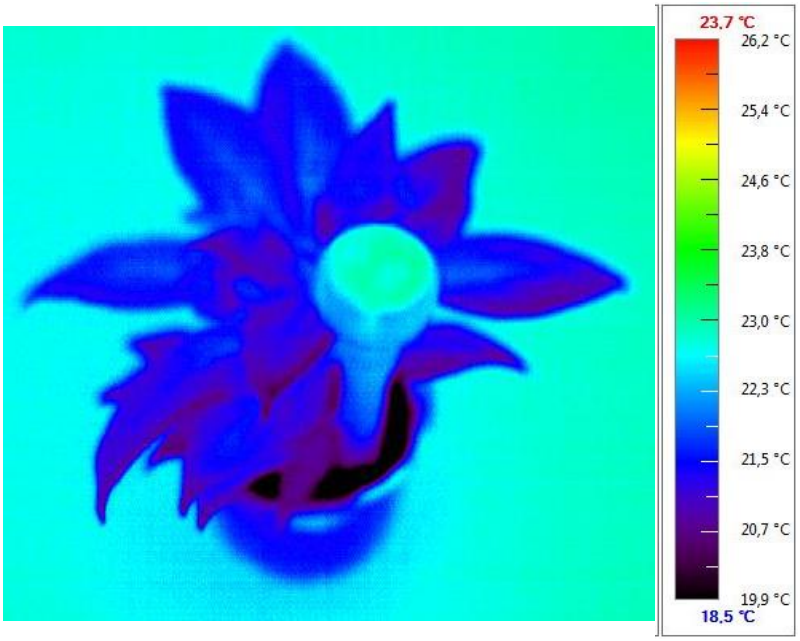


Abb. 9 Thermografische Aufnahme eines Impatiens Genotyps (Moorea).

Die Thermografie dient als Werkzeug, um die Temperatur von Pflanzen zu ermitteln. Aus der Literatur ist zu entnehmen, dass die Oberflächentemperatur von Pflanzen mit ihrem Transpirationsverhalten korreliert und somit von der Blatttemperatur auf das

Transpirationsverhalten geschlossen werden kann (JONES *et al.*, 2002, STOLL *et al.*, 2008). Je wärmer ein Blatt ist, umso weiter sind die Stomata geschlossen. Man kann also mit der Hilfe der Blatttemperatur eine Aussage über den Wasserversorungszustand der Pflanze treffen.

Der Einsatz der Thermographie um Stress bei Pflanzen zu detektieren ist häufig in der Literatur zu finden, er gilt als eine Möglichkeit zu Früherkennung (LEINONEN und JONES, 2004, GRANT *et al.,* 2006).

Die thermografischen Messungen erfolgten mit einer Wärmebildkamera (Infrared Thermography H 2640 640x480 Pixelauflösung, Firma NEC). Dafür wurden die Pflanzen aus ca. 1 m Höhe aufgenommen. Während des Experimentes wurde die Emission auf einen für Pflanzenblätter empfohlenen Bereich von 0,95 gesetzt (IDSO 1969).

Die Messungen erfolgten wie die Gaswechselmessungen über den jeweiligen Austrocknungszeitraum von 0 bis -700 hPa Saugspannung im Substrat.

Um Pflanzentemperatur und stomatäre Leitfähigkeit miteinander vergleichen zu können empfiehlt es sich die gemessenen thermografischen Daten zusammen mit aufgenommenen Referenztemperaturen zu verarbeiten.

Basierend auf dem Temperaturunterschied zwischen der gemessenen Pflanzentemperatur und der feuchten und trockenen Referenztemperatur wurde ein Index nach JONES (1999) berechnet.

$$CWSI = (Tplant-Twet)/(Tdry-Twet)$$

CWSI steht dabei für Crop Water Stress Index und geht auf IDSO und Kollegen zurück (JACKSON *et al*, 1981, IDSO, 1982).

Für die Berechnung des Index benötigt man zusätzlich zur gemessenen Pflanzentemperatur zwei Referenztemperaturen. Tdry ermittelt man, indem man ein Blatt vollständig mit Vaseline einschmiert, die Transpiration ist dadurch unmöglich und man erhält die Referenztemperatur für eine Pflanze mit geschlossenen Stomata. Twet wird ermittelt um die Temperatur darzustellen, die die Pflanze mit geöffneten Stomata darstellt. Dafür wird ein Blatt mit einer Sprühflasche mit Wasser benetzt.

Für die Auswertung wurde immer die mittlere Pflanzentemperatur, die zum Zeitpunkt der Aufnahme herrschte, verwendet.

4.4 Ertragsermittlungen

Neben physiologischen Untersuchungen wurden auch Untersuchungen zur Morphologie der Pflanze durchgeführt. Dies war wichtig, um die physiologischen Aussagen der Versuche zu stützen, indem man ausschließen konnte, dass die Unterschiede der Trockenstresstoleranz innerhalb der Genotypen vordergründig auf morphologischen Unterschieden und dabei vor allem auf Frischmasseunterschieden beruhen.

4.4.1 Bestimmung der Frischmasse

Die Bestimmung der Frischmasse der einzelnen Genotypen diente nicht nur der Ermittlung der Homogenität des Bestandes sondern auch um festzustellen, wie groß die Frischmassereduktion zwischen der feuchten und trockenen Anzucht war und die Unterschiede zwischen den Genotypen einer Art. Die Ermittlung der Frischmasse diente also auch dem Ausschluss, dass nur Wuchsunterschiede Auslöser für die Trockentoleranz sind.

Getestet wurden alle im Versuch beteiligten Genotypen von Petunien und Impatiens. Dafür wurden pro Genotyp und Variante acht Pflanzen ausgewählt, sorgfältig abgeschnitten und mittels einer Waage das Frischgewicht ermittelt.

Anschließend wurde mittels prozentualer Rechnung die Reduktion der trockenen Kultur auf die feuchte Kultur ermittelt, sowie das Frischgewicht der Genotypen miteinander verglichen.

4.4.2 Blattflächenmessungen

Es wurden Blattflächenmessungen mit den beiden Impatiens Genotypen Moorea und Timor durchgeführt. Beide Genotypen wurden bezüglich ihrer Transpirationsfläche verglichen. Ziel war es zu sehen, ob eine Sorte über deutlich mehr Blätter bzw. Blattfläche, also eine größere Transpirationsfläche verfügt und somit im Austrocknungsversuch im Nachteil ist. Die Blattflächenmessungen wurden durchgeführt mit dem Gerät LI-3100 Area Meter, Li-COR. Inc. Lincoln Nebraska. Für die Messung wurden die Blätter direkt an den Blattbasen der Versuchspflanzen abgetrennt und unmittelbar vermessen. Gleichzeitig wurde noch das Frischgewicht der gesamten Pflanze bestimmt, um auf die Beziehung zwischen Frischgewicht und Blattfläche schließen zu können.

4.4.3 Bildanalytische Untersuchungen

Zusätzlich zur Frischmassebestimmung und Blattflächenmessung wurde ein zerstörungsfreies bildanalytisches Verfahren eingesetzt um auch so die Wachstumsunterschiede zwischen der normal feuchten und trockenen Anzucht herauszufinden. Dafür wurde das WinDIAS Image Analysis System der Firma Delta-T Devices Ltd genutzt. Der Vorteil dieser Methode ist, dass sie zerstörungsfrei ist.

Bei dieser Methode wird eine Aufnahme einer Pflanze unter speziellen Lichtbedingungen erstellt. Dafür wird die Pflanze mit einer Kamera von oben aufgenommen. Die Software kann durch diese Aufnahme die zugehörige Blattfläche ermitteln. In dieser Arbeit wurde das System genutzt um das Wachstum der Pflanzen zu charakterisieren und die ermittelte Fläche mit dem jeweiligen parallel erhobenen Frischgewicht zu vergleichen. Dieses Verfahren wurde mit allen im Versuch beteiligten Genotypen durchgeführt.

4.5 Statistische Auswertungen

Statistische Analysen wurden mit SigmaPlot 11 Systat Software, Inc. durchgeführt.

Alle Daten wurden auf Normalverteilung mit dem Shapiro-Wilk Test, sowie auf Varianzhomogenität getestet.

Es wurde der t-Test für den normalverteilten paarweisen Vergleich genutzt, bei nicht normalverteilten Daten erfolgte der paarweise Vergleich mit dem Mann-Whitney Rank Sum Test. Die einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) wurde verwendet um die normalverteilten Daten zu testen. Darin ist die Grenzdifferenz mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % ($\alpha = 0{,}05$) unter Anwendung des Tukey-Tests ermittelt worden.

Lag keine Normalverteilung vor oder handelte es sich um Boniturnoten, wurde mit dem Kruskal-Wallis Test gearbeitet, der paarweise Vergleich erfolgte dann ebenfalls mit dem Tukey-Test.

Bei den tabellarisch dargestellten Daten wurde die Grenzdifferenz angegeben, sofern es sich um normalverteilte Daten handelte. In den grafischen Abbildungen wird als Streuungsmaß der Mittelwerte die Standardabweichung verwendet, da bei dem Vergleich von Genotypen die biologische Variabilität durch diesen Wert besser widergespiegelt wird, als durch den Standardfehler.

Regressionsanalysen wurden mit Excel 2003 berechnet, ihre statistische Signifikanz wurde mit SigmaPlot 11 ermittelt.

5. Untersuchungen zur Methodik

5.1 Applikation von Trockenstress im Vegetationsversuch

Zur individuellen Bewässerung kleiner Pflanzenbestände verfügt die Forschungsanstalt Geisenheim über eine Kleinparzellenanlage mit 2 x 24 Parzellen, die getrennt voneinander bewässert werden können. Die Parzellengröße beträgt 180 x 100 cm und kann je nach Pflanzengröße 20 bis 80 Töpfe aufnehmen. Damit sind die Voraussetzungen gegeben, das Wasserangebot und damit die Trockenintensität parzellenspezifisch zu gestalten.

Im Rahmen eines Vegetationsversuches wurde einerseits unterschiedlich konditioniertes Pflanzenmaterial für die De- und Rehydrierungsversuche herangezogen und zum anderen die Wirkung von moderatem Trockenstress auf die Wachstumsleistung von Genotypen geprüft. Zur Bewässerungssteuerung sollten Tensiometer zum Einsatz kommen, wie sie in der Literatur zur Erzeugung von kontrolliertem Trockenstress beschrieben sind.

In einem Versuch von HASSANEIN und DORION (2006) wird beispielsweise die feuchte Variante bei -200 hPa und die trockene Variante bei einem Wasserpotential im Substrat von -800 hPa bewässert. Der Ansatz der Tensiometersteuerung war auch zunächst für die in Geisenheim durchgeführten Versuche geplant.

Vorgesehen waren in diesem Zusammenhang Bewässerungsschwellenwerte, die in Vorversuchen ermittelt worden waren, von -120 hPa für die feuchte Anzucht und -360 hPa für die Trockenstressvariante.

Im Rahmen der in 2008 durchgeführten methodischen Untersuchungen hat sich allerdings gezeigt, dass sichtbare Trockenstressreaktionen vor allem bei Petunien erst bei einer Saugspannung von unter -500 hPa auftreten. Unter diesen Bedingungen geraten Tensiometer an den Rand ihres Messbereichs oder müssen intensiv überwacht werden. Das Leistungsspektrum der verwendeten Tensiometer reicht bis zu einem Wert von -750 hPa, danach besteht die Gefahr, dass die Tensiometer leerlaufen. Das Wiederauffüllen mit Wasser ist schwierig, da das unmittelbar umgebende Substrat sich dann ebenfalls anfeuchtet. Des Weiteren besteht bei sich wiederholenden Austrocknungsprozessen die Gefahr, dass sich die Tensiometer vom organischen Substrat ablösen.

Das Konzept einer automatischen Bewässerungssteuerung mittels Tensiometer musste daher aufgegeben und durch eine gravimetrische Bewässerungssteuerung

ersetzt werden. Hierbei wurden acht Referenzpflanzen pro Parzelle täglich gewogen und bei Unterschreitung eines bestimmten Bewässerungsschwellenwertes einem etwa 10-12-minütigen Anstauvorgang ausgesetzt.

Mit Hilfe von Eichkurven, wie in Abb. 10 und 11 gezeigt, lassen sich dann aus den Systemgewichten (Topf + Substrat + Pflanze + Wasser = Systemgewicht) Rückschlüsse auf die durchschnittliche Saugspannung der Substrate ziehen.

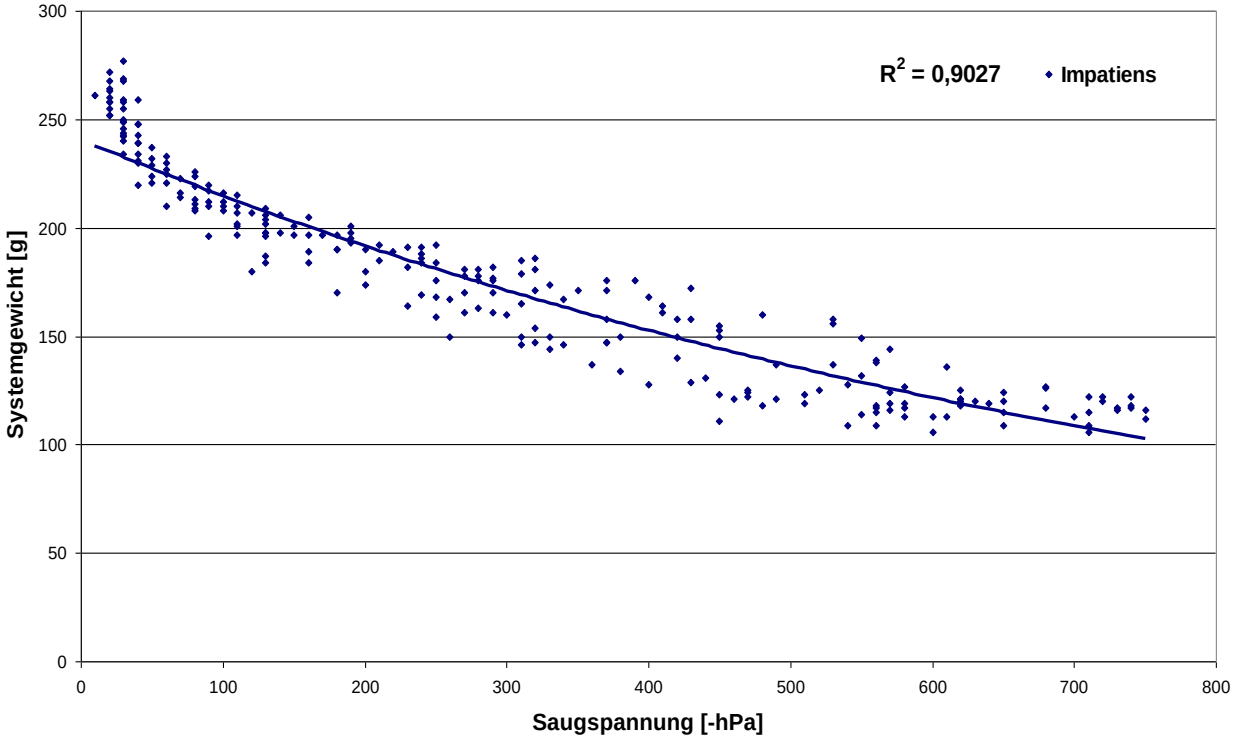


Abb. 10: Zusammenhang zwischen der Saugspannung des Substrates und dem Systemgewicht bei Impatiens.

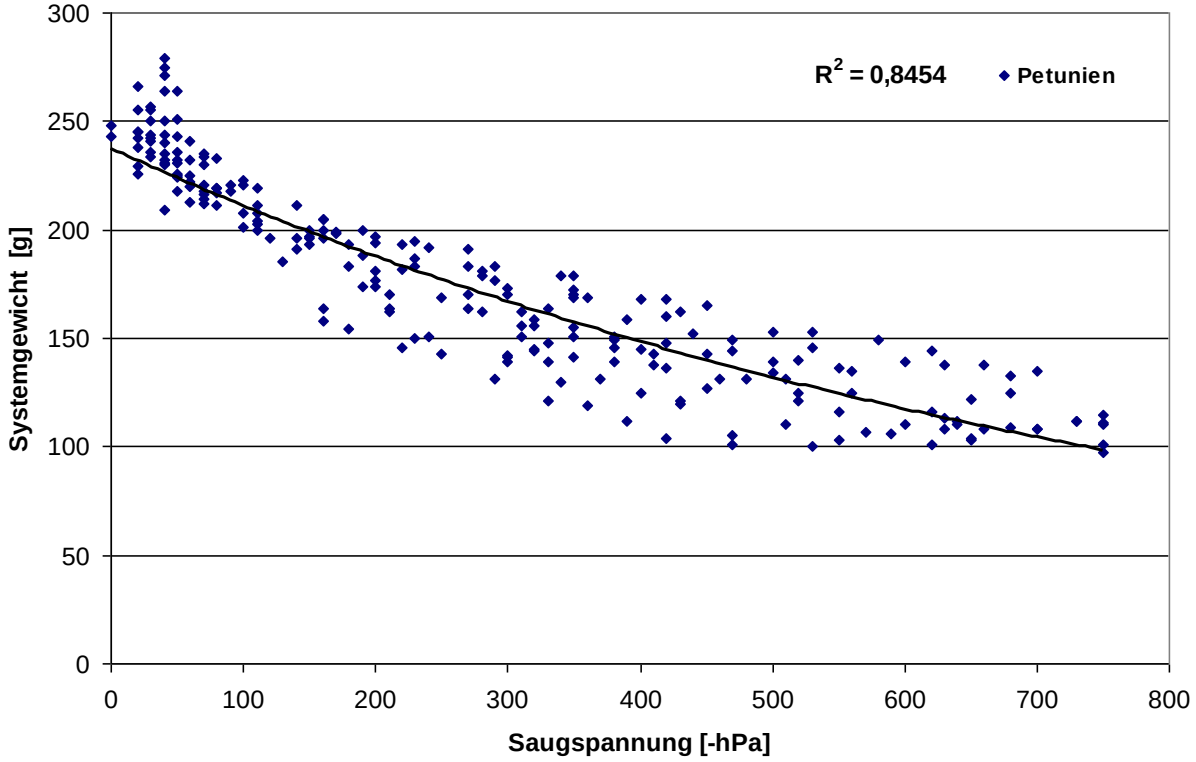


Abb. 11: Zusammenhang zwischen der Saugspannung des Substrates und dem Systemgewicht bei Petunien.

Bei dem gravimetrischen Verfahren ist theoretisch jedes Wasserangebotsniveau realisierbar und reproduzierbar. Problematisch hieran ist allerdings der hohe Messaufwand. Wie Aufzeichnungen ergeben haben, sind zur Betreuung von 48 Parzellen etwa 1,5 AKh pro Tag notwendig.

In den nachfolgenden zwei Abbildungen (12 + 13) ist gezeigt, inwieweit mit Hilfe des gravimetrischen Verfahrens ein unterschiedliches Wasserangebot realisiert werden kann und ob sich die normal feuchte und die trockene Variante signifikant voneinander unterscheiden.

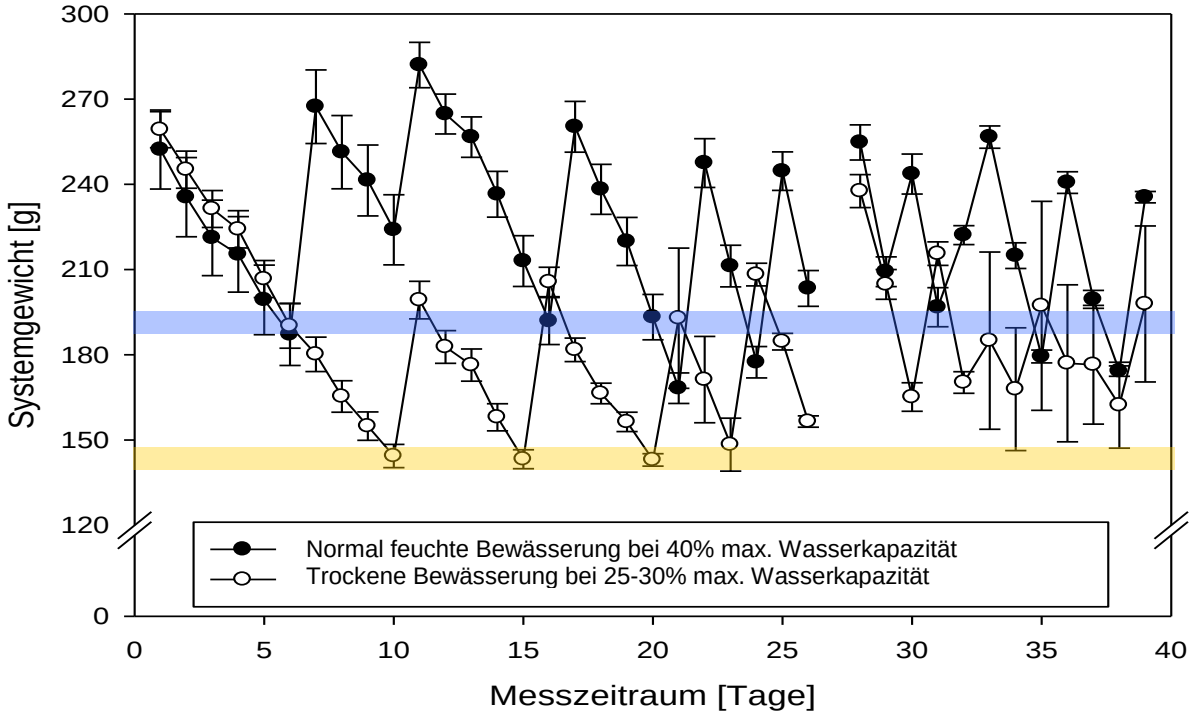


Abb. 12: Beispielhafte Darstellung des Systemgewichts von Impatiens Neu Guinea Genotyp Moorea bei unterschiedlichem Wasserangebot, Ausgleichsbewässerung an Tag 27. Angegeben sind die Mittelwerte ± Standardabweichung.

Abbildung 12 zeigt beispielhaft an dem Impatiens Neu Guinea Genotyp Moorea, wann die Pflanzen innerhalb der Parzellen bewässert wurden. In diesem Beispiel ist der zweite Kulturverlauf gezeigt (Topfen 26.05.09, Start Differenzbehandlung 04.06.09, Ende Anzucht 12.07.09). Nach einer ca. zehntägigen Einwurzelungsphase der Pflanzen startete die Differenzbehandlung. Beide Varianten starteten mit etwa demselben Ausgangsgewicht. Sie wurden so lange nicht bewässert, bis sie ihren Schwellenwert unterschritten hatten (190 g bzw. 150 g). In Abbildung 12 kann man erkennen, dass es deutliche Unterschiede zwischen den Varianten gab, mit nur geringen Standardabweichungen innerhalb der Variante. Aufgrund des unterschiedlichen Frischmassezuwachses innerhalb eines Genotyps vergrößert sich die Standardabweichung zwischen den zu wiegenden Töpfen. Um den Bestand während der Kultur möglichst homogen zu halten, wurde während des Versuchs eine Ausgleichsbewässerung durchgeführt. In Abbildung 12 ist dies an Tag 27 zu erkennen.

Der Begriff Ausgleichsbewässerung steht dafür, dass jeder Topf gewogen wurde und durch Wasserzugabe auf dasselbe Gewicht gebracht wurde. Danach ging die Differenzbehandlung wieder wie beschrieben weiter.

Abbildung 13 zeigt den Vorgang der Ausgleichsbewässerung für Petunien exemplarisch für den Genotyp Hot Rose Morn. Der Vorgang entsprach dem für Impatiens.

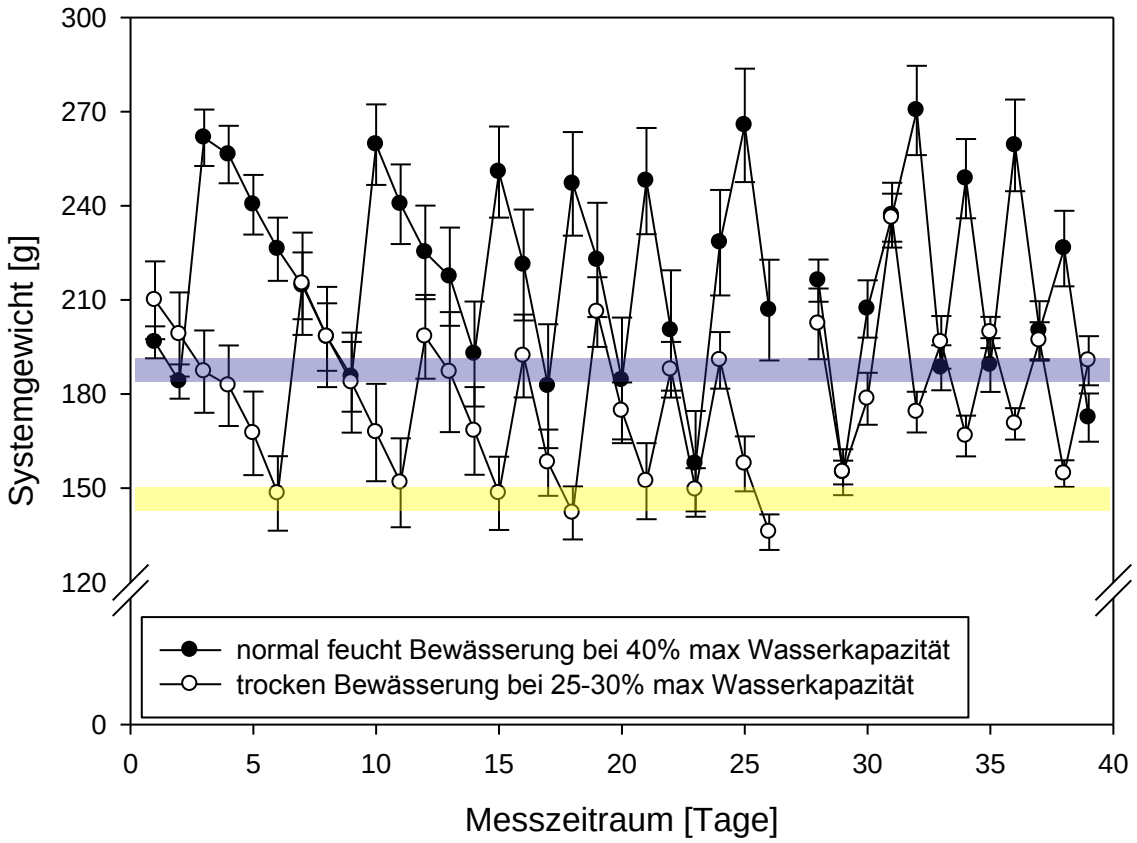


Abb. 13: Beispielhafte Darstellung des Systemgewichts von Petunien des Genotyps Hot Rose Morn bei unterschiedlichem Wasserangebot, Ausgleichsbewässerung an Tag 27. Angegeben sind die Mittelwerte ± Standardabweichung.

Die Abbildungen 12 und 13 zeigen, die unterschiedliche Bewässerung der normal feuchten und trockenen Variante. Ein paarweiser Vergleich mit dem t-Test zeigte, dass es zwischen den beiden Bewässerungsvarianten höchst signifikante Unterschiede gab (Signifikanzniveau $p \leq 0{,}001$) und somit ein differenziertes Wasserangebot für die beiden Varianten vorlag.

5.2 Untersuchungen zum Probenumfang

Wie bereits beschrieben wurden zur Bewässerungssteuerung acht Pflanzen pro Parzelle herangezogen. In Vorversuchen war nun zu klären, ob das Pflanzenmaterial ausreichend homogen ist und ob acht Pflanzen für die Untersuchungen in den De- und Rehydrierungsversuchen ausreichten

Hierfür wurden parallel zur Einstellung der Pflanzen in die Klimakammer acht Pflanzen pro Genotyp und Bewässerungsvariante bezüglich ihres Frischgewichtes ausgewertet. Nachfolgend in Abbildung 14 ist beispielhaft an einer Impatiens Kultur (Satz zwei 2009) für alle vier Sätze die Frischgewichtsauswertung aufgezeigt.

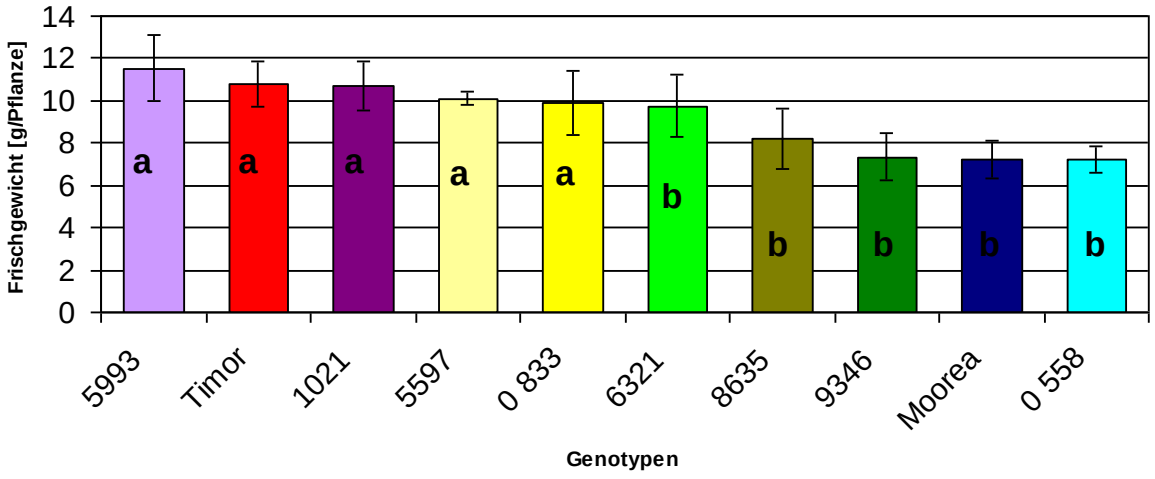


Abb. 14: Frischgewicht verschiedener Impatiens Genotypen bei normal feuchter Kultur (n = 8 Pflanzen pro Genotyp). Angegeben sind Mittelwerte ± Standardabweichung. Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Genotypen (Tukey-Test, $p \leq 0{,}05$).

In Abbildung 14 ist zu erkennen, dass die verwendeten Impatiens Neu-Guinea Genotypen über ein unterschiedliches Frischgewicht verfügten, während die Standardabweichung innerhalb eines Genotyps gering war. Es lassen sich zwei signifikant verschiedene Wuchstypgruppen bilden.

Die nachfolgenden Abbildungen 15-17 zeigen die gleichen Ermittlungen für die trockene Impatiens Kultur des zweiten Satzes 2009, sowie für die normal feuchte und trockene Petunien Kultur des ersten Satzes 2009.

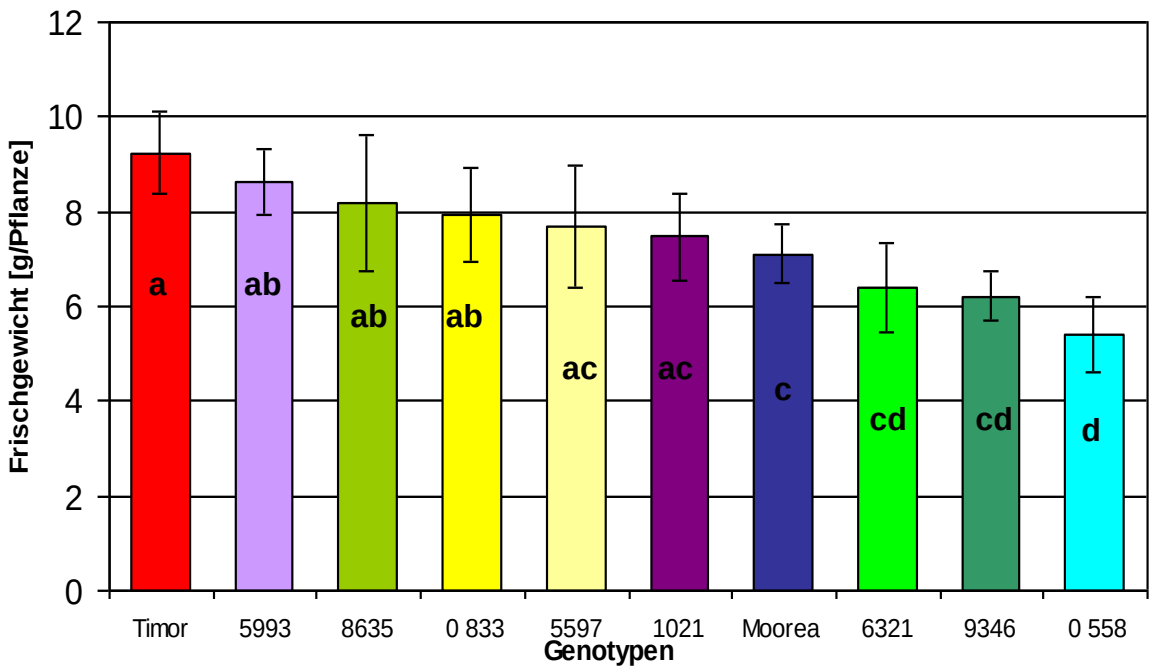


Abb. 15: Frischgewicht verschiedener Impatiens Genotypen bei trockener Kultur (n = 8 Pflanzen pro Genotyp). Angegeben sind Mittelwerte ± Standardabweichung. Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Genotypen (Tukey-Test, $p \leq 0,05$).

Wie bei der normal feuchten Kultur zeigte sich der Pflanzenbestand innerhalb eines Genotyps, erkennbar an der geringen Standardabweichung homogen. Die Varianzanalyse zeigte drei signifikant unterschiedliche Wuchstypgruppen, damit variieren die zehn Genotypen etwas stärker in ihrem Wuchs als bei der normal feuchten Anzucht.

Die nachfolgende Abbildung 16 zeigt die Frischgewichtermittlung für die normal feuchte Kultur von Petunien. Auch hier war der Pflanzenbestand eines Genotypes, wie sich anhand der geringen Standardabweichung entnehmen lässt, homogen.

Allerdings variierte der Wuchs zwischen den Genotypen stärker als bei Impatiens, es ließen sich kräftige Wuchstypen und eher schwachwüchsige erkennen.

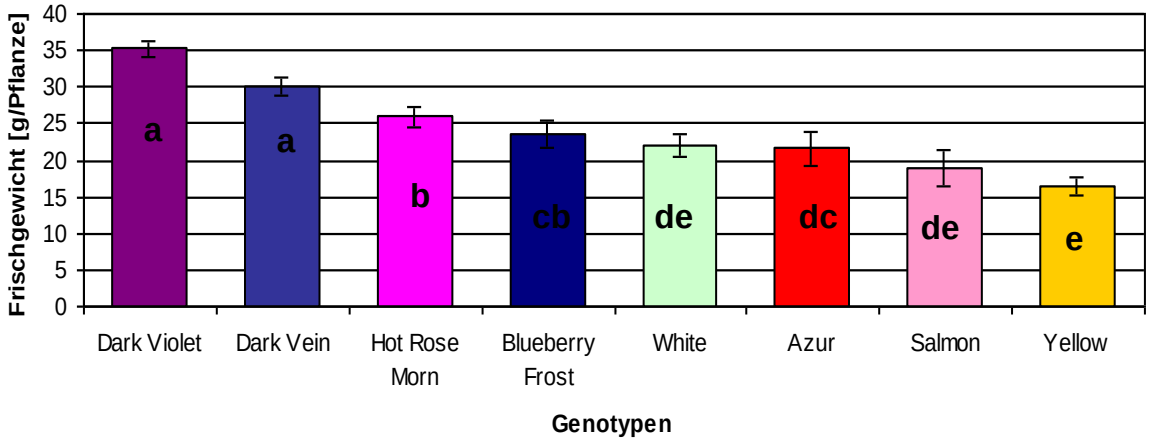


Abb. 16: Frischgewicht verschiedener Petunien Genotypen bei normal feuchter Kultur (n = 8 Pflanzen pro Genotyp). Angegeben sind Mittelwerte ± Standardabweichung. Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Genotypen (Tukey-Test, p ≤ 0,05).

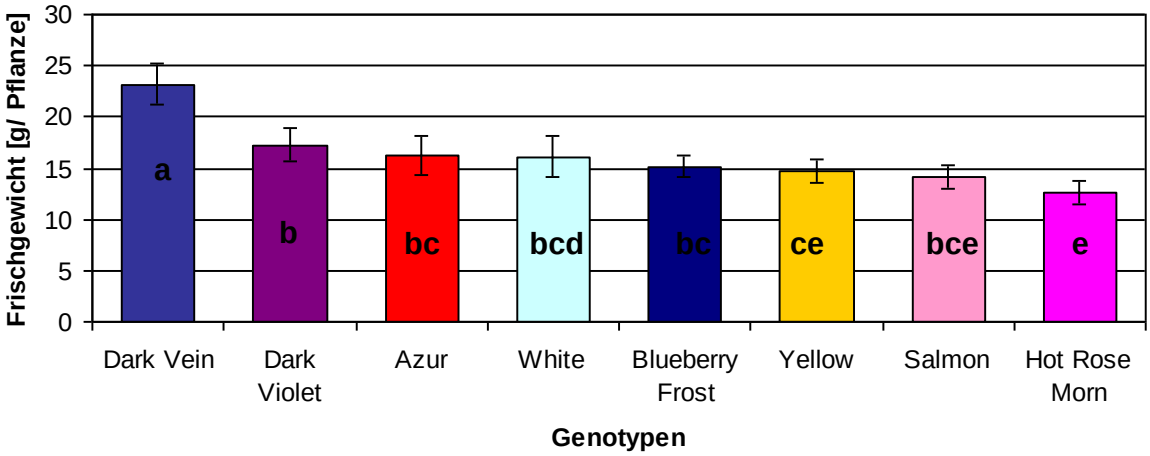


Abb. 17: Frischgewicht verschiedener Petunien Genotypen bei trockener Kultur (n = 8 Pflanzen pro Genotyp). Angegeben sind Mittelwerte ± Standardabweichung. Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Genotypen (Tukey-Test, p ≤ 0,05).

Aus Abbildung 17 lässt sich, wie auch aus Abbildung 16 erkennen, dass die Petunien Genotypen sich stärker im Wuchs unterschieden als die Impatiens, die Pflanzen eines Genotyps aber einheitlich waren.

Die Abbildungen verdeutlichen, dass sich mit dem Verfahren der gravimetrischen Bewässerungssteuerung und der Wägung von acht Pflanzen homogenes Pflanzenmaterial erzeugen lässt.

Neben einer Homogenitätsprüfung des Pflanzenmaterials galt es zu klären, ob ein Probenumfang von acht Töpfen für Dehydrierungsexperimente ausreicht. Hierfür wurde das Systemgewicht im Rahmen des Dehydrierungsexperimentes ermittelt und die Standartabweichung berechnet.

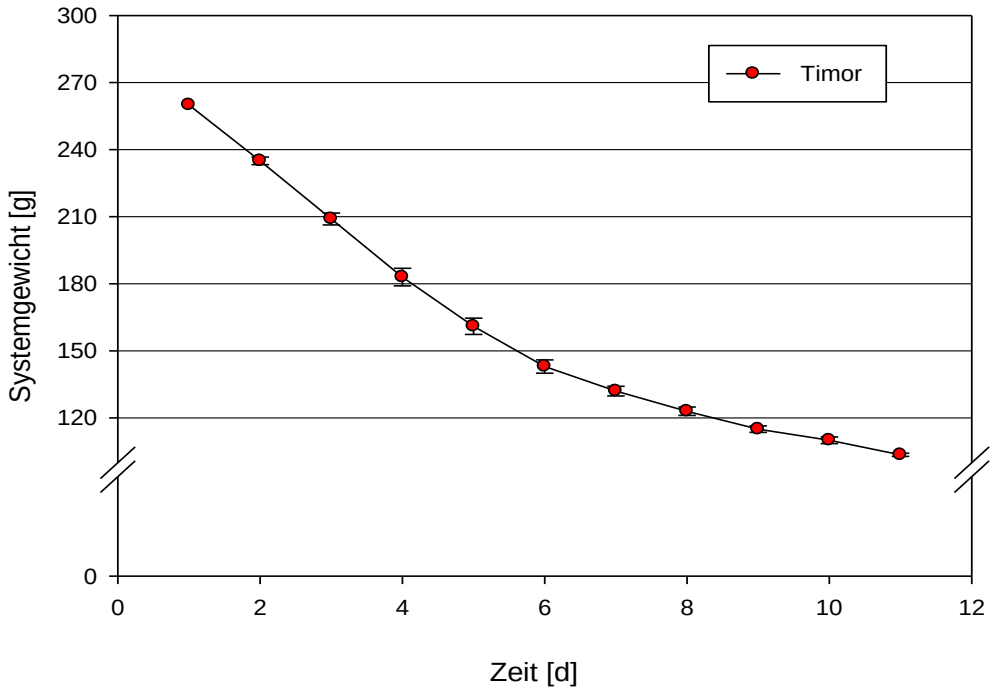


Abb. 18: Systemgewicht von acht Impatiens Töpfen innerhalb eines Dehydrierungsexperimentes (Timor, normal feuchte Vorkultur). Angegeben sind Mittelwerte ± Standardabweichung.

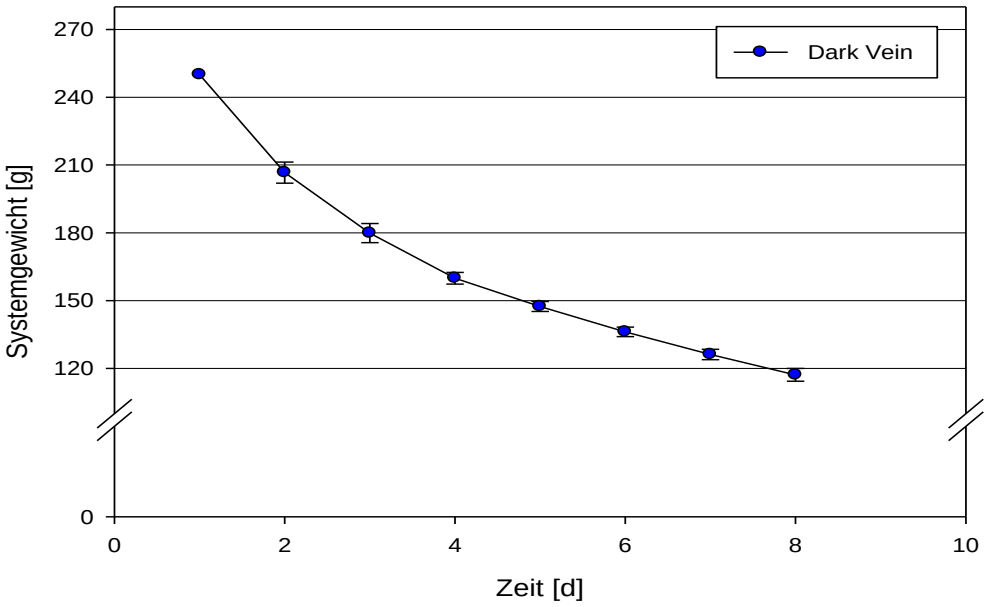


Abb. 19: Systemgewicht von acht Petunien Töpfen innerhalb eines Dehydrierungsexperimentes (Dark Vein, normal feuchte Vorkultur). Angegeben sind Mittelwerte ± Standardabweichung.

Die Untersuchungen in den Klimakammern erfolgten immer mit acht Pflanzen. Wie man in Abbildung 18 und 19 exemplarisch für jeweils einen Genotyp erkennen kann, war dieser Umfang ausreichend. Die geringe Standardabweichung lässt erkennen, dass der Gewichtsverlauf während der Austrocknung kaum variierte. Die Pflanzen eines Genotyps verloren mit der Zeit sehr einheitlich an Gewicht.

5.3 Erarbeitung von Welke-Boniturschema

Welke ist das auffälligste Merkmal von Trockenstress. Es ist optisch einfach zu registrieren und für Zierpflanzen ein wichtiges Qualitätsmerkmal. Da bislang kein standardisiertes Boniturschema von Welkesymptomen vorlag, war die Erstellung ein wichtiger methodischer Teil der Arbeit. Es galt zu überprüfen, ob sich die Genotypen innerhalb einer Art hinsichtlich ihres Welkeverhaltens unterscheiden.

Durch das tägliche Fotografieren von zwei Pflanzen pro Genotyp während des Dehydrierungsprozesses wurde der vorschreitende Welkeverlauf dokumentiert. Dadurch kann ein Welkeboniturschema für Impatiens und Petunien erstellt werden.

Diese wurden im Verlauf der Arbeit als Grundlage für die Bewertung der Genotypen bezüglich ihres Welkegrads verwendet. Mit Hilfe des Schemas konnte die

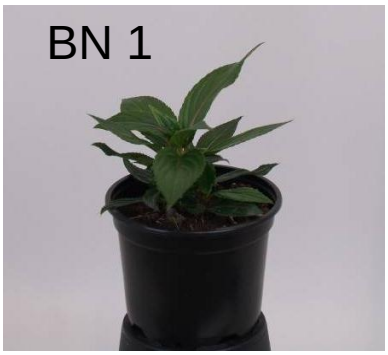
Welkeintensität der Pflanzen im Dehydrierungsprozess sicher charakterisiert werden. Das Schema ermöglichte auch die Einteilung der Pflanzen in unterschiedliche Klassen, was ihre Sensibilität bezüglich der Reaktion auf Trockenstress betrifft.

Das Boniturschema berücksichtigt die Boniturnoten 1-9 wobei nur die ungeraden Zahlen verwendet werden. Insgesamt werden also fünf Boniturnoten vergeben, wobei bei der Boniturnote 1 noch keine Welkesymptome gezeigt werden, die Pflanze ist turgeszent. Die Pflanzen bei der Boniturnote 9 sind vollständig welk, so dass Trieb und Blätter auf dem Substrat liegen.

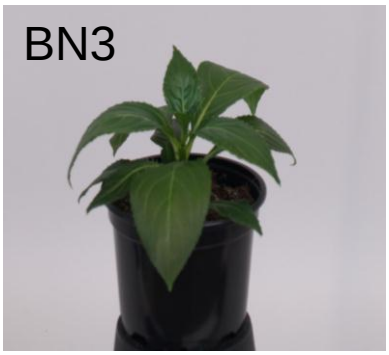
Wie man in den Abbildungen 20 und 21 erkennen kann, ähnelt sich das Welkeverhalten der Genotypen innerhalb einer Art. Auch das Verhalten zwischen den Arten unterschied sich nicht deutlich voneinander. Innerhalb einer Art kommt es je nach Größe der Pflanze, beziehungsweise Länge des Triebs früher oder später zu einem Umknicken des Triebes. Das Verhalten der Blätter ist jedoch immer gleich. Beginnend mit leichter Welke über das Einrollen der Blätter bis zum Einsetzen von Nekrosen.

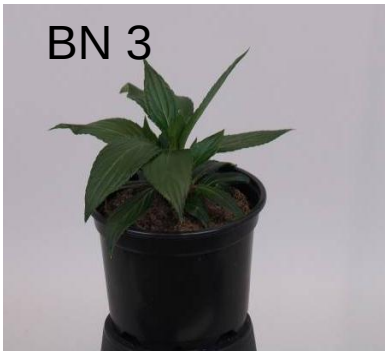
Bei Petunien kam es zusätzlich zur Welke zu einem Farbverlust der Blätter. Während des Austrocknens verändern die Blätter die Farbe von einem satten grünen Ton in einen leicht gräulichen Farbton.

Moorea 6321

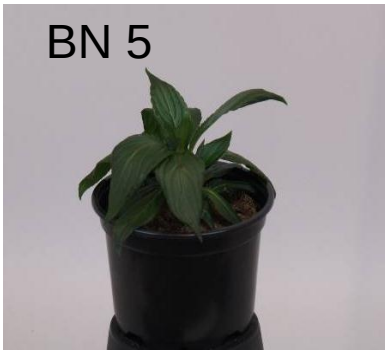


BN 1: keine Welkesymptome erkennbar

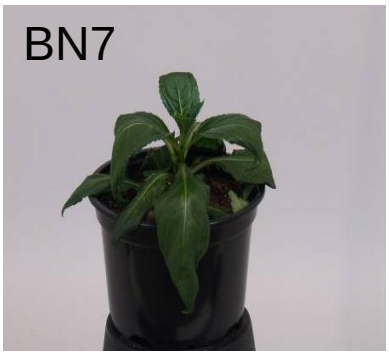




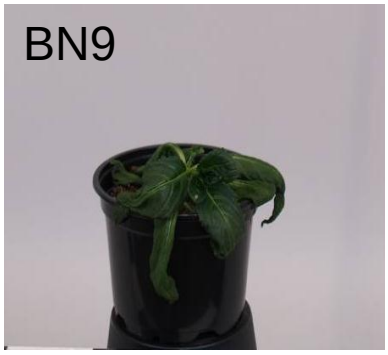
BN 3: erste Blätter sind welk

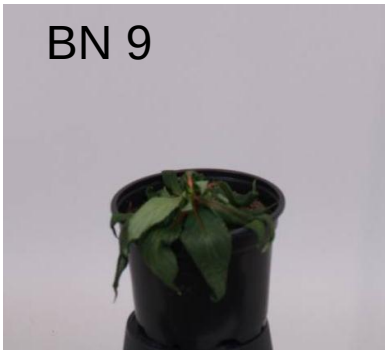


BN 5: alle Blätter sind welk



BN 7: Blattränder rollen sich ein

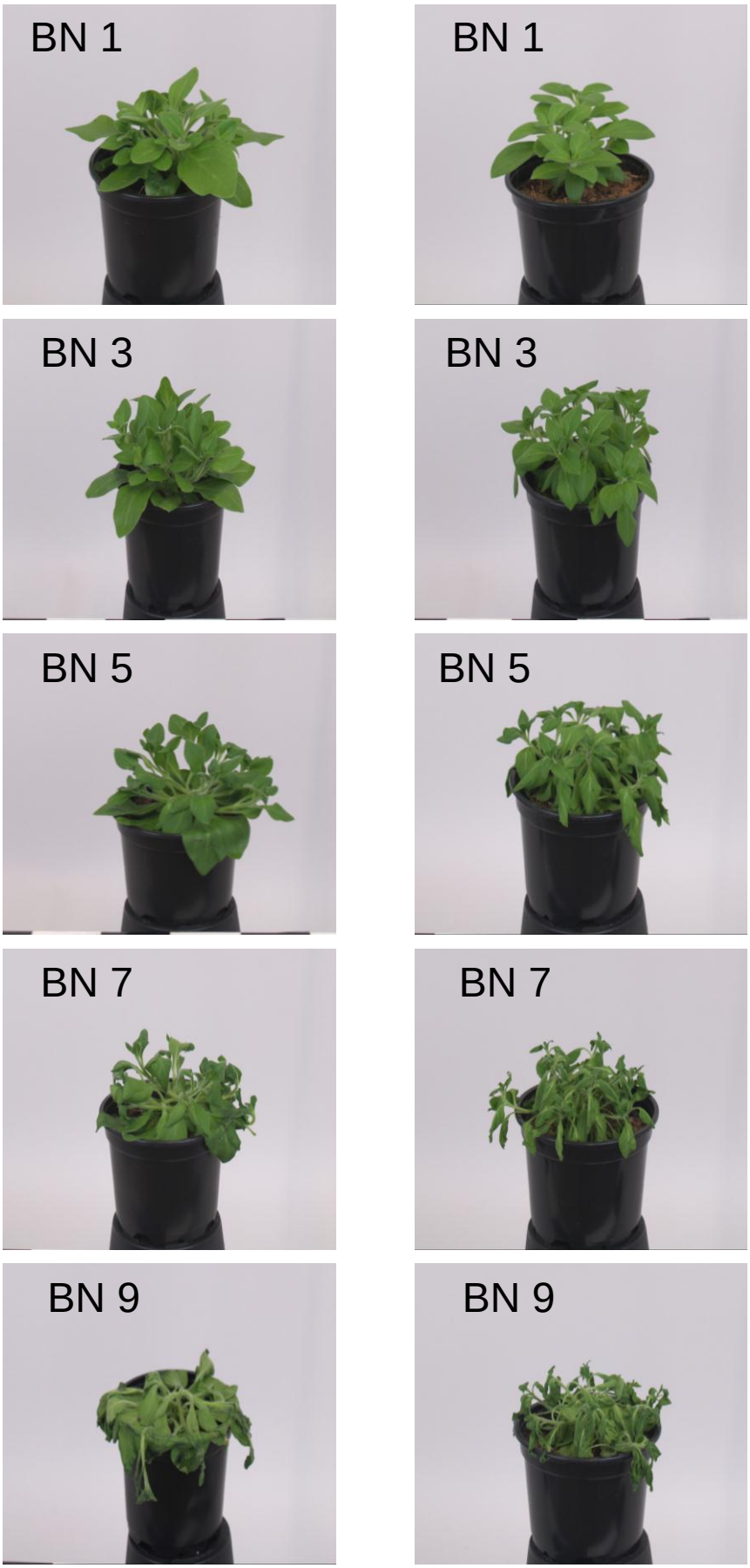




BN 9: Blätter und Trieb auf dem Substrat liegend

Abb. 20: Welke-Boniturschema zweier Impatiens Genotypen (links Moorea, rechts 6321).

Dark Vein White



BN 1: keine Welkesymptome erkennbar

BN 3: erste Blätter sind welk

BN 5: alle Blätter sind welk

BN 7: Blattränder rollen sich ein

BN 9: Blätter und Trieb auf dem Substrat liegend

Abb. 21: Welkeboniturschema zweier Petunien Genotypen (rechts Dark Vein, links White).

5.4 Entwicklung von Dehydrierungsexperimenten

Dehydrierungsexperimente dienen dazu, dass Verhalten von Pflanzen bei fortschreitender Trockenheit im Boden oder Substrat zu studieren. Sie sind in der Literatur unter anderem von LIZANA *et al.* (2006) beschrieben. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden alle Dehydrierungsexperimente in Klimakammern durchgeführt um standardisierte Bedingungen sicherzustellen. Während des Dehydrierungsverlaufs wurden die Töpfe täglich gewogen und der Welkestatus bonitiert. Als Trockenstresssensitiv wurden die Genotypen eingestuft, die bereits bei geringem Wasserverlust mit Welkesymptomen reagierten, während die toleranteren Genotypen erst später, bei größerem Wasserverlust mit Welke reagierten.

Ziel war es, ein Ranking der Genotypen aufzustellen, welches auf dem Welkeverhalten basierte. Also wie lang kann ein Genotyp ohne Wasser auskommen bis er Boniturnote 9 erreicht?

Durch das tägliche Wiegen der Pflanzen und die Ermittlung des Gewichtsverlustes konnten die Genotypen in drei Klassen bezüglich ihrer Trockenstresstoleranz eingeteilt werden. Tolerant, durchschnittlich tolerant und sensibel. Diese Klassifizierung wird in den nachfolgenden Abbildungen mithilfe der Farben grün für tolerant, gelb für durchschnittlich und rot für sensibel dargestellt. Die Klassifizierung erfolgte durch das Ermitteln des Systemgewichtes bei Erreichen der Boniturnote 9.

Um die Genotypen besser miteinander vergleichen zu können, wurde das Frischgewicht als Störfaktor eliminiert, so dass wüchsigere Genotypen nicht besser bewertet wurden als kleinere Genotypen. Dafür wurde von dem bei Boniturnote 9 ermittelten Systemgewicht ein vergleichbares mittleres Frischgewicht abgezogen. Dieses vergleichbare mittlere Frischgewicht wurde erhoben, indem zeitgleich zur Einstellung der Pflanzen in die Klimakammern Referenzpflanzen bezüglich ihres Frischgewichtes ausgewertet wurden. Das Frischgewicht wurde jeweils von acht Pflanzen ermittelt. Zum Ende des Versuches wurde das Mittlere Frischgewicht vom mittleren Systemgewicht bei Boniturnote 9 abgezogen. Dieses wurde in dieser Arbeit als bereinigtes Gewicht bezeichnet. Ein Genotyp wird umso besser bewertet, je geringer sein bereinigtes Gewicht ist. Da er dann trotz hohem Wasserverlust länger gebraucht hat, um BN 9 zu erreichen, als ein Genotyp mit weniger Wasserverlust. Als gut bewertet wird also ein Genotyp der trotz Wasserverlust seinen Zierwert möglichst lange aufrecht erhalten kann.

5.5 Entwicklung von Rehydrierungsexperimenten

Das Rehydrierungsvermögen einer Pflanze, also wie gut sie sich von einem erlittenen Dehydrierungsprozess erholen kann, wurde als weiterer Faktor ihrer Trockenstresstoleranz angesehen.

Ziel der Versuche war es festzustellen, ob alle im Dehydrierungsversuch beteiligten Genotypen in der Lage sind, sich nach Erreichen der Welkeboniturnote 9 wieder zu erholen und wieder einen Zierwert zu erreichen. Dafür wurden sie auf 70 % ihrer maximalen Wasserkapazität aufgesättigt und nach zwei Tagen erfolgte eine Rehydrierungsbonitur (1 = keine Regeneration, 9 = keine zurückbehaltenen Schäden).

In den Abbildungen 22 und 23 ist beispielhaft für jeweils zwei Genotypen die Rehydrierungsfähigkeit aufgezeigt. Wie auf den Bildern zu erkennen ist, sind kaum Schäden aus dem Austrocknungsprozess zurückgeblieben. Die Pflanzen wuchsen danach normal weiter und waren nicht von Pflanzen zu unterscheiden, die den Austrocknungsprozess nicht durchlaufen hatten.

Wie bei den Austrocknungsprozessen wurde auch für die Rehydrierungsfähigkeit ein dreistufiges Wertungssystem aufgestellt. Auch hier wurden die Farben grün, gelb und rot eingesetzt um tolerante, durchschnittliche und sensible Genotypen zu kennzeichnen.

Moorea 6321

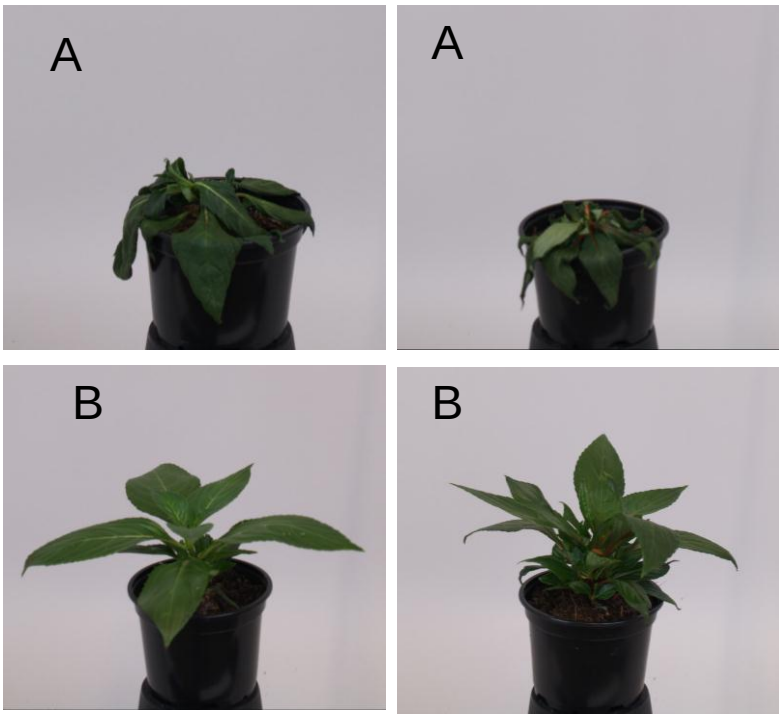


Abb. 22: Zwei Impatiens Genotypen, A vor der Rehydrierung, B nach der Rehydrierung.

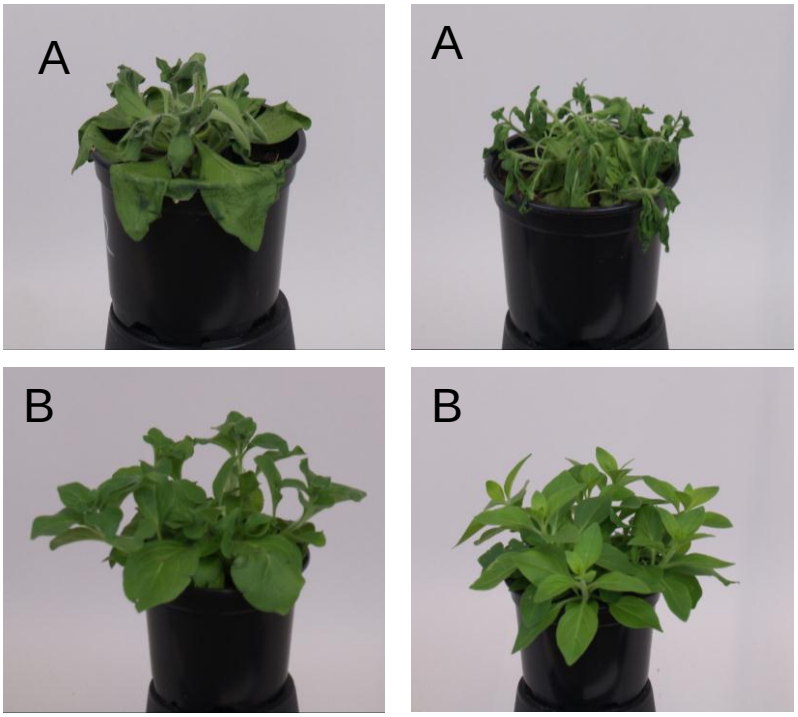


Abb. 23: Zwei Petunien Genotypen, A vor der Rehydrierung, B nach der Rehydrierung.

6. Ergebnisse und Diskussion

6.1 Charakterisierung der Trockenstresstoleranz von Impatiens- und Petunien-Genotypen durch De- und Rehydrierungsexperimente

Wie bereits im Methodenteil erläutert, wurden die Genotypen einem De- und Rehydrierungsexperiment unterworfen, um sie bezüglich ihrer Trockenstresstoleranz zu bewerten.

6.1.1 Dehydrierungsverhalten von Impaniens

Ziel dieser Experimente war es eine Rangfolge der Genotypen bezüglich ihres Welkeverhaltens aufzustellen. Neben dem Ranking der Genotypen wurde auch der Einfluss des Wasserangebotes während der Vorkultur auf das Welkeverhalten im Austrocknungsprozess geprüft.

Für die Untersuchungen wurden die Pflanzen unter kontrollierten Bedingungen aufgestellt und täglich der Wasserverlust des Systems und das Welkeverhalten bonitiert. Bei Erreichen der Welkeboniturnote 9 wurde das Systemgewicht (Pflanze, Substrat und Gefäß) erfasst und davon die an Referenzpflanzen erhobene Frischmasse abgezogen (bereinigtes Systemgewicht). Das bereinigte Systemgewicht wurde benutzt, um ein Ranking der Genotypen hinsichtlich ihrer Dehydrierungstoleranz aufzustellen (siehe Kapitel 5.4).

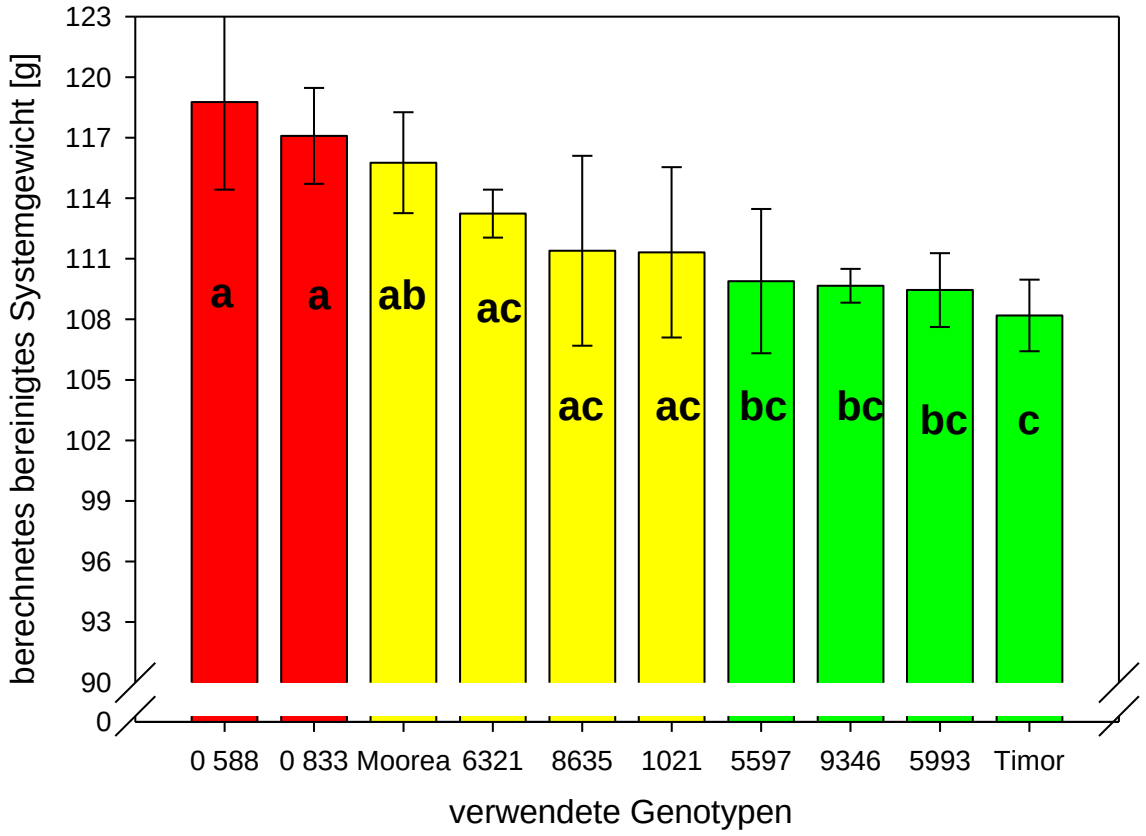


Abb. 24: Bereinigtes Systemgewicht verschiedener Impatiens Genotypen (normal feuchte Vorkultur). Angegeben sind Mittelwerte ± Standardabweichung. Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Genotypen (Tukey-Test, $p \leq 0{,}05$).

Abbildung 24 zeigt exemplarisch für eine Wiederholung des Dehydrierungsexperimentes das bereinigte Systemgewicht der Genotypen bei Erreichen des Welkestadiums 9. Genotypen die bei einem vergleichsweise hohen bereinigten Gewicht (hoher Restwassergehalt im Substrat) diese Welkestufe erreichten, wurden als sensibel, mit mittlerem Restwassergehalt als durchschnittlich und mit geringem Restwassergehalt als tolerant eingestuft. Im dargestellten Beispiel lassen sich drei Reaktionsgruppen bilden, wobei grün für tolerant, gelb für durchschnittlich und rot für sensibel steht.

Das Ranking nach dem bereinigten Gewicht bei der Welkeboniturnote 9 wurde im weiteren Verlauf der Arbeit für alle sieben Dehydrierungsversuche vorgenommen. Im Versuchsjahr 2010 wurde die Anzahl Genotypen durch Lieferschwierigkeiten der

Züchterfirmen, von zehn auf sechs reduziert. Die Dehydrierungsversuche erfolgten von diesem Zeitpunkt an mit den Genotypen:

5597, 6321, 0588, 9346, Moorea und Timor.

Nachfolgend ist eine zusammenfassende Tabelle für die Bewertung dieser sechs Impatiens Genotypen dargestellt. Auch in dieser Tabelle wurden die Farben grün für tolerant, gelb für durchschnittlich und rot für sensibel verwendet. Außerdem wurden zur Verdeutlichung die Zahlen eins (tolerant) bis drei (empfindlich) vergeben.

Tab. 6: Ranking von Impatiens Genotypen aus 7 Dehydrierungsexperimenten.

	Wiederholungen						
Genotyp	1/2009 normal feucht	2/2009 normal feucht	3/2009 normal feucht	1/2010 normal feucht	2/2010 normal feucht	3/2010 normal feucht	4/2010 normal feucht
9346	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**
5597	**1**	**1**	**2**	**1**	**1**	**1**	**2**
Timor	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**
Moorea	**2**	**3**	**3**	**2**	**2**	**2**	**2**
6321	**3**	**2**	**2**	**2**	**3**	**3**	**2**
0 588	**3**	**3**	**3**	**3**	**3**	**3**	**3**

Tab. 7: Ranking von Impatiens Genotypen aus 7 Dehydrierungsexperimenten.

	Wiederholungen						
Genotyp	1/2009 trocken	2/2009 trocken	3/2009 trocken	1/2010 trocken	2/2010 trocken	3/2010 trocken	4/2010 trocken
9346	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**
5597	**1**	**2**	**3**	**2**	**2**	**1**	**1**
Timor	**2**	**1**	**2**	**2**	**1**	**2**	**2**
Moorea	**2**	**2**	**3**	**2**	**2**	**3**	**2**
6321	**3**	**3**	**2**	**2**	**3**	**2**	**3**
0 588	**3**	**3**	**3**	**3**	**3**	**3**	**3**

Aus den Tabellen 6 und 7 kann man entnehmen, dass sich die Genotypen in ihrem Dehydrierungsverhalten systematisch voneinander unterscheiden. Die Genotypen 9346 und 5597 lagen unabhängig von der Vorkultur im oberen Drittel, die Genotypen 6321 und 0588 im unteren Drittel des Rankings. Lediglich der Genotyp 5597 wich in einem Experiment (3/2009) um 2 Stufen von seiner üblichen Bewertung ab. Die Art der Vorkultur (normal feucht und trocken) hatte zwar keinen gravierenden Einfluss auf die Rangfolge der Genotypen, allerdings brauchten die Genotypen im Schnitt 1-3 Tage länger um Welkeboniturnote 9 zu erreichen (Anhang Abb. 1 und Abb. 2). Dieser Sachverhalt wird als Anpassungsreaktion interpretiert. An Trockenstress gewöhnte Pflanzen behalten somit bei Wassermangel länger ihren Zierwert als nicht angepasste Pflanzen.

6.1.2 Dehydrierungsverhalten von Petunien

Für Petunien wurde in den Dehydrierungsversuchen ebenfalls ein Ranking der Trockenstresstoleranz aufgestellt. Dafür wurde genauso vorgegangen wie bei Impatiens (Siehe Kapitel 6.1.1). Auch die Fragestellung war die gleiche: Unterscheiden sich die Genotypen in ihrer Dehydrierungstoleranz und welchen Einfluss hat die Vorkultur auf das Dehydrierungsverhalten der Genotypen?

In der nachfolgenden Abbildung 25 ist das bereinigte Gewicht für Petunien dargestellt.

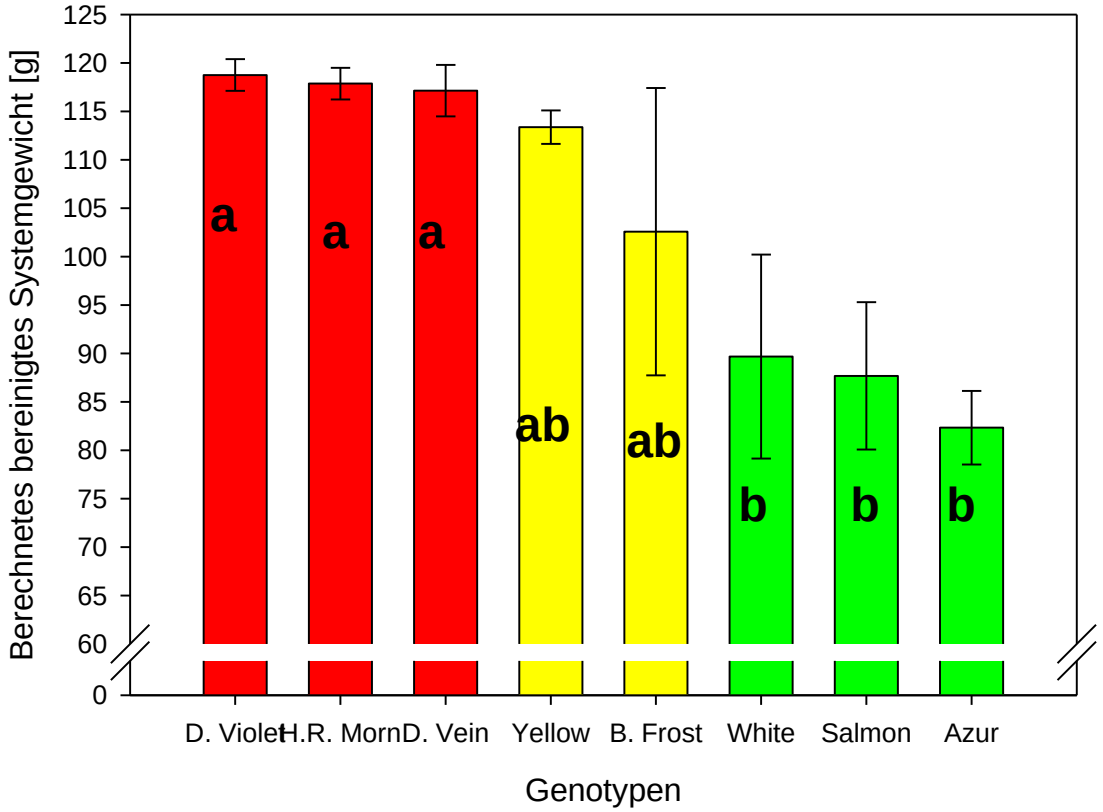


Abb. 25: Bereinigtes Systemgewicht verschiedener Petunien Genotypen (normal feuchte Vorkultur). Angegeben sind Mittelwerte ± Standardabweichung. Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Genotypen (Tukey-Test, $p \leq 0{,}05$).

Die Bewertung der Genotypen nach dem bereinigten Gewicht bei BN 9 wurde im weiteren Verlauf der Arbeit für alle Dehydrierungsversuche vorgenommen. Wobei im Versuchsjahr 2010 die Anzahl Genotypen von acht auf vier reduziert wurde. Die Dehydrierungsversuche erfolgten nur noch mit folgenden Genotypen:

Salmon, White, Dark Violet, Dark Vein.

Nachfolgend ist eine zusammenfassende Tabelle für die Bewertung dieser vier Petunien Genotypen dargestellt. (Auch in dieser Tabelle wurden die Farben grün für tolerant, gelb für durchschnittlich und rot für sensibel verwendet). Außerdem wurden zur Verdeutlichung die Zahlen eins (tolerant) bis drei (empfindlich) vergeben.

.

Tab. 8: Ranking von Petunien Genotypen aus 7 Dehydrierungsexperimenten.

	Wiederholungen						
Genotyp	1/2009 normal feucht	2/2009 normal feucht	3/2009 normal feucht	1/2010 normal feucht	2/2010 normal feucht	3/2010 normal feucht	4/2010 normal feucht
Dark Violet	**3**	**1**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**
Salmon	**1**			**1**	**3**	**2**	**3**
White	**1**			**2**	**2**	**3**	**3**
Dark Vein	**3**	**2**	**2**	**3**	**2**	**2**	**3**

Tab. 9: Ranking von Petunien Genotypen aus 7 Dehydrierungsexperimenten.

	Wiederholungen						
Genotyp	1/2009 trocken	2/2009 trocken	3/2009 trocken	1/2010 trocken	2/2010 trocken	3/2010 trocken	4/2010 trocken
Dark Violet	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**
Salmon	**1**			**1**	**3**	**2**	**1**
White	**2**			**1**	**1**	**3**	**1**
Dark Vein	**3**	**2**	**2**	**3**	**3**	**2**	**3**

In Tabelle 8 und 9 sind die Ergebnisse für die Dehydrierungsexperimente mit Petunien in normal feuchter und trockener Vorkultur dargestellt. Leider kam es 2009 zu einem Lieferausfall der beiden Genotypen Salmon und White, so dass zwei Dehydrierungsexperimente ohne die genannten Genotypen durchgeführt werden mussten.

Wie bei Impatiens, kann man auch bei Petunien erkennen, dass sich die Genotypen in ihrem Dehydrierungsverhalten unterscheiden. Es gibt in den Wiederholungen allerdings mehr Abweichungen um ein bis zwei Stufen, daher ist das Ranking bei den Petunien weniger eindeutig als bei den Impatiens.
Die Vorkultur hatte wie bei Impatiens keinen gravierenden Einfluss auf das Verhalten der Genotypen. Erneut konnte lediglich der Zeitpunkt bis zum Erreichen der Boniturnote 9 durch eine trockene Vorkultur verlängert werden. Somit scheinen alle in diesen Experimenten berücksichtigten Petunien das gleiche Adaptionspotenzial zu besitzen

6.1.3 Diskussion des Dehydrierungsverhaltens

Sichtbare Welke gehört zu den meisten beobachteten Antworten von Pflanzen auf Trockenstress (JONES, 1990). Das Dehydrieren von Pflanzen ist ein in der Literatur anerkanntes Verfahren, um die Trockenstresstoleranz zu detektieren (HASSANEIN *et al.*, 2006; VECCHIA *et al.,* 1998).
Auch in den eigenen Untersuchungen wurde der Zusammenhang zwischen dem Wasserverlust der Substrate (Systemgewicht) und dem Welkeverhalten der Genotypen untersucht.
Für eine objektive Bewertung des Welkeverlaufes wurde in Vorversuchen für die geprüften Arten ein spezifisches Boniturschema entwickelt. Das in den Versuchen aufgestellte Welkeboniturschema und der gravimetrisch erfasste Wasserverlust ermöglicht die Einteilung der Genotypen in unterschiedliche Klassen was ihre Sensibilität bezüglich Trockenstresses betrifft. Es erlaubt, die Trockenstressreaktionen bzw. Reaktionen auf den Dehydrierungsprozess bei den vorgesehenen Modellkulturen zu charakterisieren.
Insgesamt wurden 2009 und 2010 sieben Dehydrierungsversuche in Klimakammern unter standardisierten Bedingungen durchgeführt. Wie bereits erwähnt, lässt sich der Welkestatus mit Hilfe von einem artspezifischen Welkeschema präzise erfassen. Problemtisch dagegen ist die Verwendung eines nicht bereinigten Systemgewichtes um ein Ranking der Genotypen aufzustellen. Es ist nahe liegend, dass die unterschiedliche Frischmasse der jeweiligen Pflanzen das Systemgewicht beeinflusst. Um diesen Effekt zu minimieren, wurden parallel zu den im Dehydrierungsexperiment befindlichen Pflanzen von acht Referenzpflanzen das Frischgewicht ermittelt und vom Systemgewicht subtrahiert. Wegen der in

Vorversuchen ermittelten geringen Streuung der Frischgewichte innerhalb eines Genotyps (siehe 5.2) erscheint dieses Verfahren zulässig. Anfänglich wurde versuchsweise das Frischgewicht der in den Dehydrierungsexperimenten befindlichen Pflanzen nach einer Rehydrierung zur Frischgewichtskorrektur herangezogen. Nachteilig hierbei ist allerdings, dass sich die Pflanzen unterschiedlich stark rehydrieren. Der Fehler, der durch eine unterschiedliche Rehydrierungsintensität auftritt, war größer, als der durch die Verwendung von Referenzpflanzen entstehende. Daher wurde für die Berechnung des bereinigten Sytemgewichtes grundsätzlich das mittlere Frischgewicht von Referenzpflanzen verwendet.

Wie bereits erwähnt, verhielten sich die Impatiens Genotypen hinsichtlich ihrer Trockenstresstoleranz in den Wiederholungen sehr ähnlich und ermöglichten somit ein klares Ranking. Bei den geprüften Petunien war die Rangfolge zwischen den Wiederholungen weniger einheitlich. gewisse Tendenzen hinsichtlich der Trockenstresstoleranz ließen sich jedoch auch hier feststellen. Hieraus wird geschlossen, dass sich die an Zierpflanzen angepassten Dehydrierungsexperimente in der vorgestellten Form als aussagekräftige und einfach durchzuführende Tests zur Charakterisierung der Trockenstresstoleranz eignen.

6.1.4 Rehydrierungsverhalten von Impatiens

Ein weiteres wichtiges Merkmal für die Trockenstresstoleranz von Zierpflanzen ist die Rehydrierungsfähigkeit nach Trockenstress und intensiver Welke. Mit den nachfolgend beschriebenen Experimenten soll der Frage nachgegangen werden, ob sich die Genotypen nach Erreichen des Welkeboniturstadiums 9 wieder erholen können und ob sich die Genotypen in ihrem Rehydrierungsverhalten voneinander unterscheiden.

Hierzu wurden die Substrate der im Dehydrierungsprozess befindlichen Pflanzen nach Erreichen der Welkeboniturnote 9 auf 70 % der maximalen Wasserkapazität aufgesättigt und nach 48 Stunden der Grad der Rehydrierung bonitiert.

Die Skala reichte von 1-9 wobei eine 1 für eine irreversible Welke und keine Erholung steht und 9 für die vollständige Rehydrierung (ohne Zurückbleiben von Schäden).

Die Genotypen wurden wie beim Dehydrierungsexperiment in drei unterschiedliche Toleranzgruppen eingeteilt. Die Farbe grün symbolisiert in den nachfolgenden

Darstellungen tolerante Genotypen, gelb durchschnittliche und rot sensible Genotypen.

Die nachfolgende Abbildung zeigt beispielhaft die Rehydrierungsbonitur von 10 Impatiens Genotypen nach 48 Stunden Rehydrierung.

Für die Auswertung der Rehydrierungsbonitur wurde von den jeweils acht Pflanzen pro Genotyp der Median der Boniturnote gebildet.

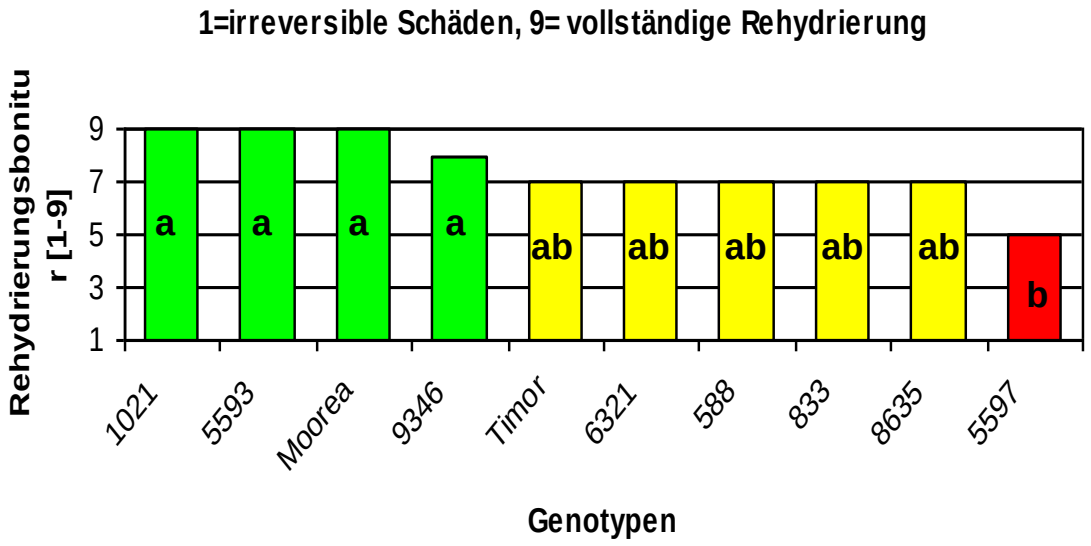


Abb. 26: Rehydrierungsfähigkeit verschiedener Impatiens Genotypen (normal feuchte Vorkultur). Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Genotypen (Tukey-Test, $p \leq 0{,}05$).

Wie in Abbildung 26 zu sehen ist, lassen sich aufgrund der bonitierten Unterschiede zwischen den Genotypen drei Gruppen bilden (tolerant bis sensibel). Zur besseren Darstellung ist im Anschluss ein Ranking für die sieben Wiederholungen der Rehydrierung tabellarisch dargestellt.

Es wurden wie bei den Dehydrierungsversuchen nur die sechs Genotypen berücksichtigt, mit denen in allen Wiederholungen gearbeitet worden war.

Tab.10: Ranking von Impatiens Genotypen aus 7 Rehydrierungsexperimenten.

	Wiederholungen						
Genotyp	1/2009 normal feucht	2/2009 normal feucht	3/2009 normal feucht	1/2010 normal feucht	2/2010 normal feucht	3/2010 normal feucht	4/2010 normal feucht
Timor	2	1	1	1	1	1	1
Moorea	1	1	1	1	2	1	1
9346	1	1	1	3	1	1	2
0 588	2	2	1	1	2	2	2
6321	2	2	1	2	3	2	3
5597	3	3	2	2	2	2	3

Tab.11: Ranking von Impatiens Genotypen aus 7 Rehydrierungsexperimenten.

	Wiederholungen						
Genotyp	1/2009 trocken	2/2009 trocken	3/2009 trocken	1/2010 trocken	2/2010 trocken	3/2010 trocken	4/2010 trocken
Timor	2	1	1	1	1	1	1
Moorea	2	1	1	1	2	1	1
9346	1	1	3	3	2	1	2
0 588	3	1	2	1	2	2	2
6321	2	1	3	2	3	3	2
5597	3	3	2	1	2	3	3

Aus Tabelle 10 und 11 ist zu entnehmen, dass einige Genoytpen sich in den meisten Wiederholungen gut von der intensiven Welke erholt haben und ihren Zierwert weitgehend wieder herstellen konnten. Andere dagegen verhielten sich in den Wiederholungen unterschiedlich und wieder andere zeigten ein überwiegend schlechtes Rehydrierungsvermögen. Es wurde allerdings in keiner Wiederholung

eine Boniturnote schlechter als 5 vergeben. Es kam also immer zu einer Rehydrierung des Gewebes, wobei teilweise Nekrosen zurückgeblieben sind.
Vergleicht man das Ranking der feuchten und der trockenen Vorkultur, so fällt auf, dass die Vorkultur keinen Einfluss darauf hatte. Die Rangfolge der Genotypen ist für beide Vorkulturen gleich.
Die Genotypen können sich demnach von einem Dehydrierungsprozess und BN 9 erholen. Es gibt Unterschiede zwischen den Genotypen, diese sind aber weniger ausgeprägt als im Dehydrierungsverhalten.

6.1.5 Rehydrierungsverhalten von Petunien

Auch hier galt es zu klären, inwieweit sich die Genotypen von dem erlittenen Stress im Dehydrierungsexperiment erholen konnten und ob sie sich in ihrem Rehydrierungsverhalten voneinander unterschieden.
Dafür wurden die Petunien wie die Impatiens nach Erreichen der Boniturnote 9 im Dehydrierungsexperiment auf 70 % ihrer maximalen Wasserkapazität aufgesättigt und dadurch rehydriert. Auch hier erfolgte im Anschluss eine Rehydrierungsbonitur auf einer Skala von 1-9 (nur die ungeraden Zahlen wurden berücksichtigt) wobei 9 eine vollständige Rehydrierung ohne das zurückbleiben von Schäden umschrieb und 1 eine irreversible Welke bewertete, bei der es zu keiner Rehydrierung kam.
Die Genotypen wurden wie beim Dehydrierungsexperiment in drei unterschiedliche Toleranzgruppen eingeteilt. Die Farbe grün symbolisiert in den nachfolgenden Darstellungen tolerante Genotypen, gelb durchschnittliche und rot sensible Genotypen.
Die nachfolgende Abbildung 27 zeigt beispielhaft die Rehydrierungsbonitur von acht Petunien Genotypen nach 48 Stunden Rehydrierung. Für die Auswertung der Rehydrierungsbonitur wurde von den jeweils acht Pflanzen pro Genotyp der Median der Bonitur gebildet.

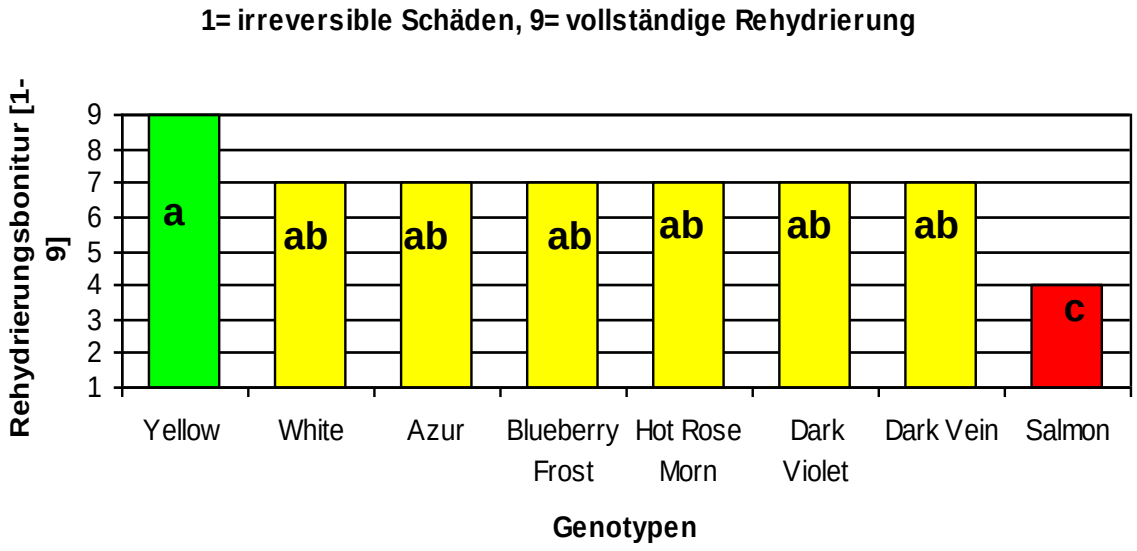


Abb. 27: Rehydrierungsfähigkeit verschiedener Petunien Genotypen (n = 8) (normal feuchte Vorkultur). Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Genotypen (Tukey-Test, $p \leq 0{,}05$).

Aufgrund der bonitierten Unterschiede lassen sich drei Gruppen bilden (tolerant bis sensibel). Zur besseren Darstellung ist im Anschluss ein Ranking für die sieben Wiederholungen der Rehydrierung tabellarisch dargestellt.

Es wurden wie bei den Dehydrierungsversuchen nur die vier Genotypen berücksichtigt mit denen in allen Wiederholungen gearbeitet worden war.

Tab.12: Ranking von Petunien Genotypen aus 7 Rehydrierungsexperimenten.

	Wiederholungen						
Genotyp	1/2009 normal feucht	2/2009 normal feucht	3/2009 normal feucht	1/2010 normal feucht	2/2010 normal feucht	3/2010 normal feucht	4/2010 normal feucht
Dark Vein	**2**	**1**	**3**	**1**	**1**	**2**	**1**
White	**2**			**2**	**2**	**1**	**2**
Salmon	**3**			**2**	**2**	**1**	**2**
Dark Viollet	**2**	**1**	**3**	**3**	**3**	**2**	**2**

Tab.13: Ranking von Petunien Genotypen aus 7 Rehydrierungsexperimenten.

	Wiederholungen						
Genotyp	1/2009 trocken	2/2009 trocken	3/2009 trocken	1/2010 trocken	2/2010 trocken	3/2010 trocken	4/2010 trocken
Dark Vein	**1**	**1**	**3**	**1**	**1**	**1**	**2**
White	**2**			**1**	**2**	**1**	**2**
Dark Violet	**1**	**1**	**3**	**3**	**3**	**2**	**2**
Salmon	**3**			**3**	**2**	**1**	**2**

Bei der Rehydrierung der Petunien gab es genau wie bei der Dehydrierung 2009 den Ausfall der beiden Genotypen Salmon und White, so dass diese in zwei Wiederholungen nicht berücksichtigt werden konnten.

Betrachtet man das Ranking der normal feuchten und trockenen Vorkultur, so lässt sich erkennen, dass es keinen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis hatte.

Das Rehydrierungspotenzial der Genotypen lag nah beieinander. Es gab keinen Genotyp der sich nicht von Trockenstress erholen konnte (Boniturnote 1) und keinen Genotyp der in allen Wiederholungen Boniturnote 9, also eine vollständige Rehydrierung erreichte. Die Tabellen 12 und 13 zeigen aber, dass sich mit Hilfe von Wiederholungen ein Ranking aufstellen lässt.

6.1.6 Diskussion der Rehydrierungsversuche

Die meisten Studien über Trockentoleranz konzentrieren sich darauf, wie Pflanzen die Trockenheit überstehen. Im Vergleich hierzu gibt es nur wenige Arbeiten zum Rehydrierungsvermögen von Pflanzen, so wie es hier getestet wurde. Also zum wiederaufsättigen des Substrates nach einem Austrocknen des Substrates.

In der Literatur wird Rehydrierung als ein Prozess verstanden, in dem die Reparatur des physiologischen Schadens und die Restaurierung der metabolischen Aktivität stattfindet (SHERWIN und FARRANT, 1996). Arbeiten zum Rehydrierungsvermögen von Zierpflanzen finden sich ausschließlich im Schnittblumenbereich und beschäftigen sich damit wie das „Vasenleben“ durch Rehydrierungsmaßnahmen (zum Beispiel Neuanschnitt nach Trockentransport) verlängert werden kann (MORTENSEN und FJELD, 1995; MARISSEN, 2005). Bei der Rehydrierung von Pflanzen mit Wurzeln sind jedoch weitere Mechanismen beteiligt. Auch war die Intensität der Welke bei Erreichen der Boniturnote 9 so ausgeprägt, dass eine Rehydrierung wie bei Schnittblumen beschrieben wenig wahrscheinlich erschien.

Für Zierpflanzen besitzt das Rehydrierungsverhalten eine besondere Bedeutung, da es die Wiederherstellung des Zierwertes nach temporärem Trockenstress beschreibt. Trockenstressbedingungen treten unter praktischen Bedingungen sowohl im Handelskanal wie auch beim Kunden in Gärten und auf Balkonen auf.

Es wurde wie für die Dehydrierungsversuche ein Ranking der Genotypen bezüglich ihres Regenerationspotenzials aufgestellt.

Die Rehydrierungsbonitur erfolgte grundsätzlich nach 48 h, da nach VECCHIA *et al.* (1998) die Rehydrierung der Blätter und die Reorganisation der Gewebemorphologie bei *Sporobolus stapfianus* (einem Ziergras) erst nach zwei Tagen abgeschlossen war. Diese Erfahrung am beschriebenen Ziergras wurde für die eigenen Untersuchungen als Orientierungshilfe genutzt.

Das Ranking hinsichtlich der Rehydrierungsfähigkeit war weniger eindeutig als hinsichtlich der Dehydrierungstoleranz. Die Bewertung der Genotypen ist auch in

sofern schwierig, als dass Pflanzen miteinander verglichen werden die unterschiedlich lang dehydriert wurden. Die Zeit bis zum Erreichen der Welkeboniturnote 9 war unterschiedlich lang und damit auch der Wasserverlust im Substrat. Daher sind die Voraussetzungen für die Genotypen unterschiedlich.

6.1.7 Wiederholte De- und Rehydrierungsexperimente

Um das Zusammenspiel von Dehydrierung und Rehydrierung besser zu verstehen, wurden Versuche durchgeführt, in denen Pflanzen den Prozess wiederholter De- und Rehydrierung unterworfen wurden. In diesem Zusammenhang sollte auch der Frage nachgegangen werden, ob ein mehrmaliges Dehydrieren die Rehydrierungsfähigkeit beeinflusst. Daneben sollte geklärt werden, ob die in einfachen Dehydrierungsexperimenten als tolerant eingestuften Genotypen sich auch in wiederholten De- und Rehydrierungsexperiment als robust erweisen.

Die Untersuchungen wurden sowohl in Klimakammern (nur bei den Impatiens Genotypen Moorea und Timor) und im Gewächshaus mit Petunien und Impatiens durchgeführt.

Klimakammerversuch:

Für den Versuch in der Klimakammer wurden jeweils acht Pflanzen der beiden Genotypen Moorea und Timor einem dreimaligen Wechsel aus De- und Rehydrierung ausgesetzt. Nachfolgend sind die Ergebnisse für diesen Versuch aufgezeigt.

Tab. 14: Systemgewicht der Impatiens Genotypen Timor und Moorea (n = 8) bei Erreichen der Boniturnote 9. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Tukey-Test, $p \leq 0{,}001$) zwischen den Genotypen.

Dehydrierung	Genotyp	Systemgewicht [g]	Grenzdifferenz]
1	Moorea	126,8 a	3,64
1	Timor	120,5 b	
2	Moorea	126,4 a	2,74
2	Timor	122,9 b	
3	Moorea	128,1 a	3,54
3	Timor	119,3 b	

Ein Vergleich des Systemgewichts innerhalb einer Wiederholung zeigt signifikante Unterschiede zwischen den beiden Genotypen auf (t-Test). Timor wies in allen Fällen ein niedrigeres Systemgewicht bei Erreichen der Boniturnote 9 auf als Moorea. Dieser Sachverhalt wird damit in Verbindung gebracht, dass Timor den Wasservorrat im Substrat weiter absenken kann als Moorea.
In der nachfolgenden Tabelle 15 ist die Zeit die die Genotypen brauchten um Boniturnote 9 zu erreichen dargestellt. Der Vergleich der Genotypen erfolgte immer innerhalb einer Wiederholung.

Tab. 15: Zeit bis zum Erreichen der Boniturnote 9 (n = 8). Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Tukey-Test, $p \leq 0{,}001$) zwischen den Genotypen.

Dehydrierung	Genotyp	Zeit [d]
1	Moorea	9,5 a
1	Timor	10,62 b
2	Moorea	12,62 a
2	Timor	13,5 b
3	Moorea	9,5 a
3	Timor	10,2 a

Auch hinsichtlich der Dehydrierungsdauer unterschieden sich die Genotypen signifikant voneinander.
Im Vergleich zu Moorea, war Timor immer der Genotyp, der durchschnittlich länger brauchte bis er die Boniturnote 9 erreichte.
Nach jedem der drei Dehydrierungsvorgänge wurden die Pflanzen auf 70 % ihrer maximalen Wasserkapazität rehydriert. In der nachfolgenden Tabelle 16 ist die Rehydrierungsbonitur dargestellt.
Auch hier erfolgte der Vergleich der beiden Genotypen innerhalb einer Wiederholung.

Tab.: 16 Rehydrierungsbonitur (1-9, 9 = vollständige Rehydrierung, 1 = keine Rehydrierung) nach 24 Stunden (n = 8). Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Tukey-Test, $p \leq 0{,}001$) zwischen den Genotypen.

Dehydrierung	Genotyp	Bonitur
1	Moorea	9 a
1	Timor	9 a
2	Moorea	7 a
2	Timor	9 b
3	Moorea	7 a
3	Timor	9 b

Ein Vergleich der Daten zeigt, dass sich Timor nach der zweiten und dritten Wiederholung des Dehydrierungsprozesses signifikant besser erholen konnte als Moorea.

Gewächshausversuch:

Im Gewächshaus wurden drei Impatiens Genotypen und fünf Petunien Genotypen einer sechswöchigen Phase aus De- und Rehydrierung ausgesetzt.

Erfasst wurden die Frischmassereduktion durch Trockenstress bei beiden Arten, sowie die Reduktion der Blütenbildung bei Petunien. Bei Impatiens traten innerhalb des Versuchszeitraumes keine Blüten auf. Die Bonitur der Pflanzen erfolgte in Form einer Schadbonitur auf einer Skala von 1-9, wobei 1 den Zustand beschreibt in dem keine Schäden vorliegen und 9 den Zustand wenn nahezu alle Pflanzenteile irreversibel geschädigt sind. Nachfolgend sind die Ergebnisse für Impatiens dargestellt.

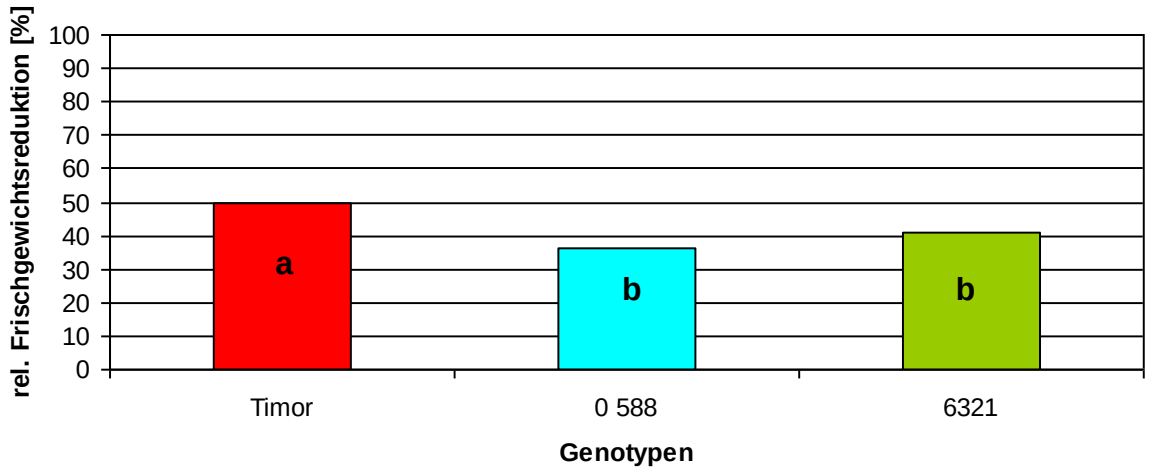


Abb. 28: Relative Frischgewichtsreduktion von Impatiens Genotypen im Vergleich zwischen Kontrollpflanzen (normal bewässert) und den mehrfach de- und rehydrierten Pflanzen. Kleinbuchstaben kennzeichnen die signifikanten Unterschiede zwischen den Genotypen (Tukey-Test, $p \leq 0{,}05$).

Die Frischgewichtsreduktion der Genotypen liegt zwischen 35 und 50 %. Die geringste Reduktion zeigt der Genotyp 0 588, wobei die Variation zwischen den beiden Genotypen 0 588 und 6321 als gering einzustufen ist.

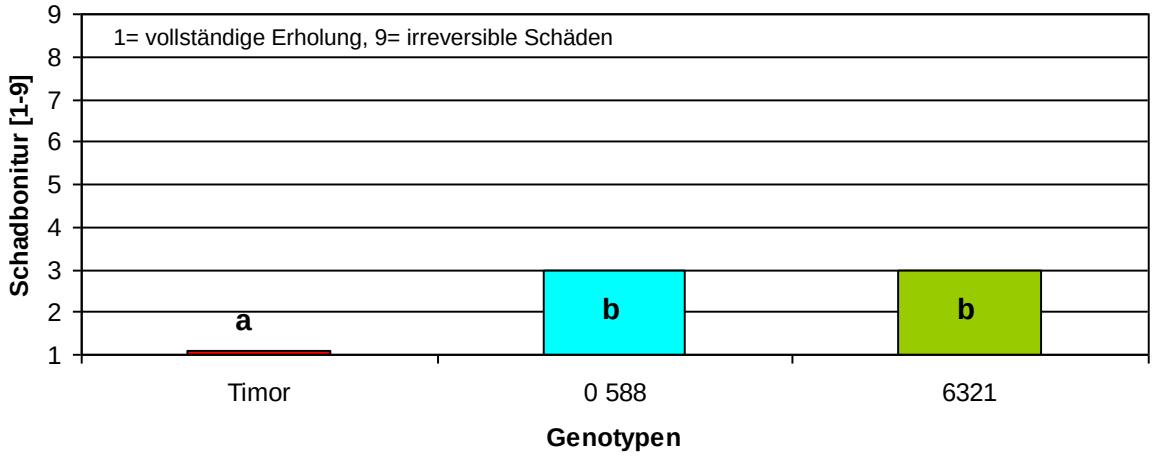


Abb. 29: Schadbonitur von Impatiens Genotypen (n = 8) nach sechswöchiger De- und Rehydrierung. Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Genotypen (Tukey-Test, $p \leq 0{,}05$).

Bei Timor kam es nach sechs Wochen Wechselstress zu keiner sichtbaren Schädigung des Gewebes. Auch die anderen beiden Genotypen hatten nur leicht geschädigtes Gewebe in Form von Nekrosen. Nachfolgend sind die Ergebnisse für Petunien dargestellt.

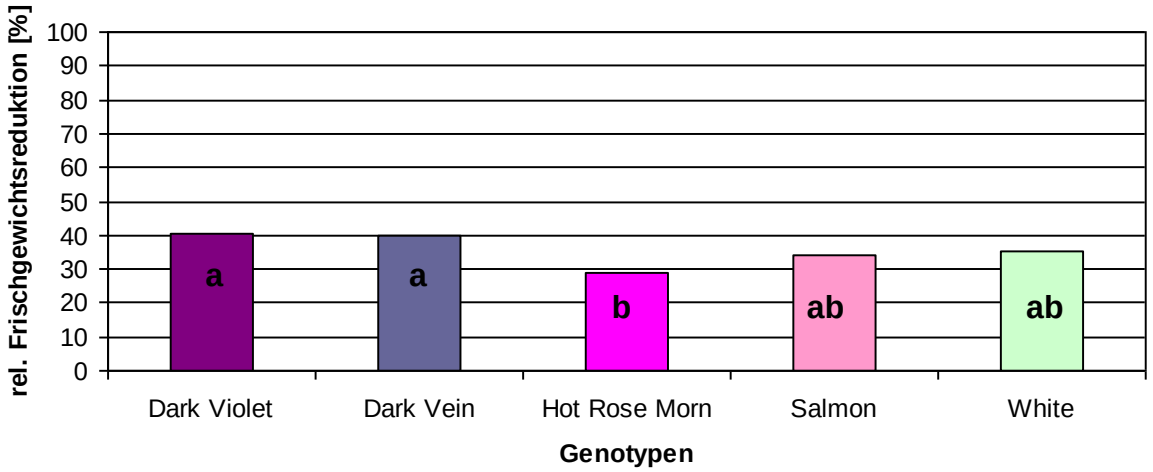


Abb. 30: Relative Frischgewichtsreduktion von Petunien Genotypen im Vergleich zwischen Kontrollpflanzen (normal bewässert) und den mehrfach de- und rehydrierten Pflanzen. Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikanten Unterschiede zwischen den Genotypen (Tukey-Test, $p \leq 0{,}05$).

Betrachtet man Abbildung 30 so fällt auf, dass die Reduktion des Frischgewichts für alle Genotypen zwischen 30 und 40 % beträgt. Hot Rose Morn ist der Genotyp mit der geringsten Frischmassereduktion. Allerdings liegen die Werte so nah beieinander, dass die Variation zwischen den Genotypen generell als gering einzustufen ist.

Nachfolgend ist die Reduktion der Blütenbildung für die beteiligten Genotypen aufgezeigt

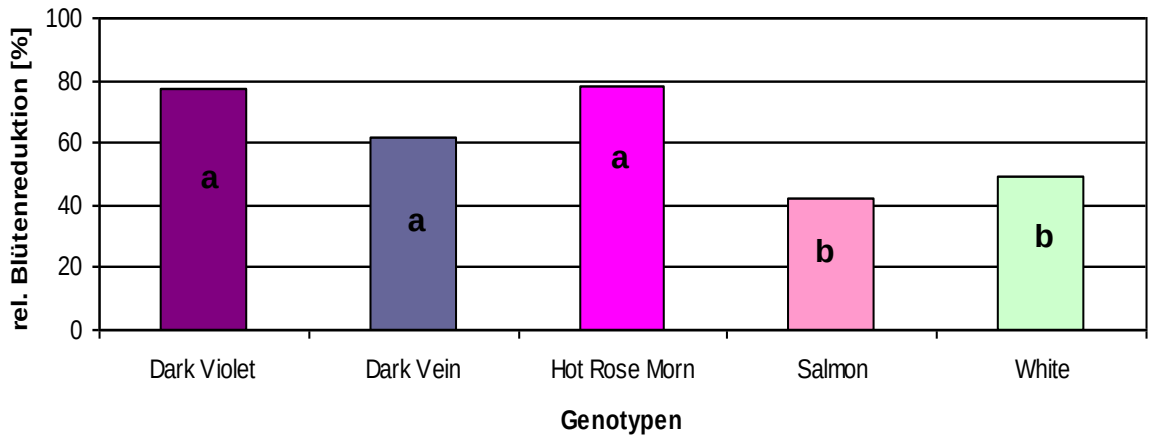


Abb. 31: Relative Blütenreduktion von Petunien Genotypen im Vergleich zwischen Kontrollpflanzen (normal bewässert) und den mehrfach de- und rehydrierten Pflanzen. Kleinbuchstaben kennzeichnen die Unterschiede zwischen den Genotypen (Tukey-Test, $p \leq 0{,}05$).

Aus Abbildung 31 lässt sich erkennen, dass die Reduktion der Blütenbildung der gestressten Genotypen im Vergleich zu den normal feucht kultivierten Genotypen zwischen 40 und 80 % beträgt. Die beiden Genotypen Salmon und White sind durch Trockenstress deutlich weniger in der Blütenproduktion gehemmt worden als die anderen drei Genotypen.

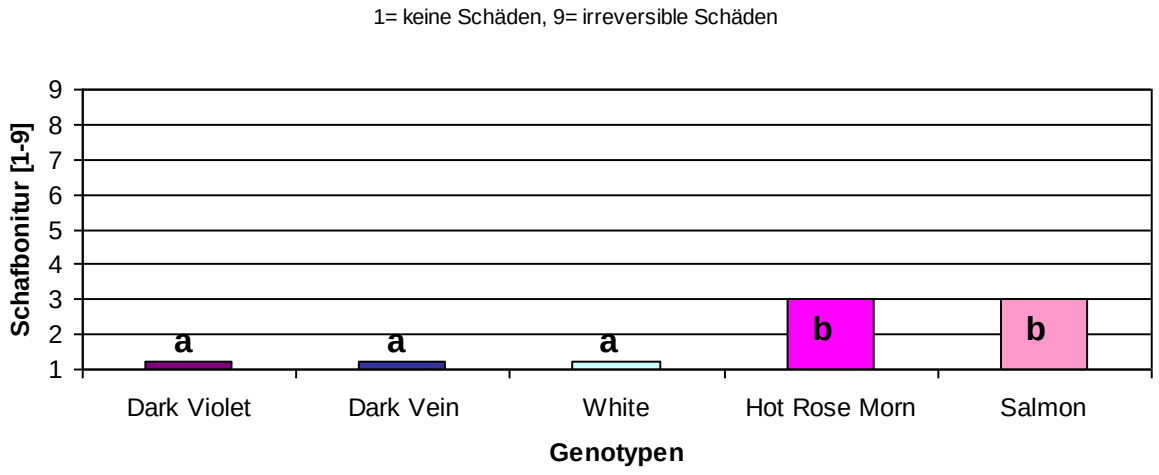


Abb. 32: Schadbonitur von Petunien Genotypen (n = 8) nach sechswöchiger De- und Rehydrierung. Angegeben sind Mittelwerte ± Standardabweichung. Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Genotypen (Tukey-Test, $p \leq 0{,}05$).

Wie bei Impatiens traten auch bei Petunien nach sechswöchiger De- und Rehydrierung kaum Schäden auf (Abb. 32). Lediglich zwei der fünf Genotypen behielten leichte Nekrosen zurück.

6.1.8 Diskussion wiederholte De- und Rehydrierungsexperimente

Um den Wechsel von feuchtem Substrat und austrocknendem Substrat genauer zu Untersuchen wurden ein Klimakammer- und ein Gewächshausversuch durchgeführt.
In den Untersuchungen mit den zwei Impatiens Genotypen in der Klimakammer zeigte sich Timor in allen überprüften Faktoren als der tolerantere der beiden Genotypen. Dieses Ergebnis stimmt mit dem in den Dehydrierungsexperimenten aufgestellten Ergebnis überein. Bei den Rehydrierungsversuchen mit Impatiens gab es keinen Unterschied zwischen Moorea und Timor. Allerdings hat sich auch in den Untersuchungen zum wiederholten De- und Rehydrierungsverhalten der Unterschied im Rehydrierungsverhalten erst nach der ersten Wiederholung herauskristallisiert, so dass auch diese Ergebnisse übereinstimmen. Nach den Versuchen zum De- und Rehydrierungsverhalten wird Timor als der tolerantere Genotyp eingestuft.
Mit dem Gewächshausversuch wurde neben dem Faktor der mehrmaligen De- und Rehydrierung mit dem gleichen Pflanzenmaterial auch noch der Faktor Strahlung neu einbezogen. Die im Gewächshaus aufgetretenen kleinflächigen Nekrosen wurden auf eine Kombination von Trockenstress und Strahlunsgsstress zurückgeführt, da sie in der Klimakammer, mit deutlich geringerer Einstrahlung, nicht aufgetreten sind.
Auch hier waren die bewerteten Faktoren frei gewählt, da sich keine Hinweise in der Literatur fanden.
Die Frischgewichtsreduktion wurde aufgrund der Hypothese bewertet, dass ein trockentoleranter Genotyp unter trockenen Bedingungen seine Frischmasse weniger reduziert als ein sensibler Genotyp. Betrachtet man das Ergebnis für Impatiens aus den Dehydrierungsversuchen und das im Gewächshaus aufgestellte Ranking konnte diese These nicht bestätigt werden. Der als tolerant eingestufte Genotyp Timor hatte die größte Frischmassereduktion zu verzeichnen (Abb. 26).
Bei Petunien waren die Unterschiede in der Frischmassereduktion zu gering, um ein Ranking aufstellen zu können (Abb. 28).
Die Blütenbildung wurde als wichtig erachtet, da die Anzahl Blüten wichtig für den Zierwert einer Pflanze ist. Hier konnten nur die Petunien bewertet werden, da die Impatiens keine Blüten ausgebildet hatten. Hinsichtlich der Blütenbildung lässt sich

keine gute Übereinstimmung mit dem Ranking aus den Dehydrierungsversuchen erkennen. Somit kann nicht gesagt werden, ob sich der Faktor Blüte eignet um Genotypen bezüglich ihrer Trockenstresstoleranz zu bewerten.

6.2 Ertragsermittlungen

6.2.1 Bestimmung der Frischmasse

Die Ermittlung der Frischmasse diente unter anderem der Fragestellung, ob trockenstresstolerante Genotypen bei trockener Kultivierung eine geringere Frischmassereduktion aufweisen als weniger tolerante Genotypen.

Dafür wurde von jeweils acht Pflanzen pro Genotyp das Frischgewicht aus normal feuchter und trockener Kultur ermittelt.

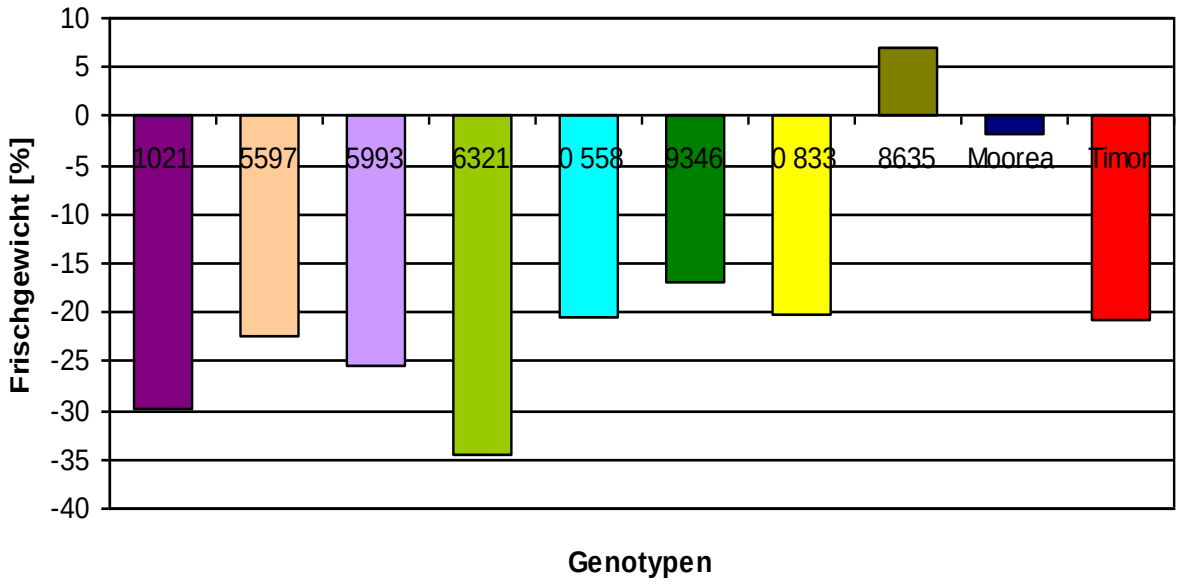


Abb. 33 : Differenz des Frischgewichts zwischen trocken kultivierten und normal feucht kultivierten Impatiens Genotypen (n = 8) in %.

Betrachtet man die Frischmassebildung der einzelnen Genotypen unter normal feuchter und trockener Kulturführung wie in den Untersuchungen zur Methodik in Abbildung 14 und 15 dargestellt, so sieht man, dass sich nur wenige Genotypen statistisch signifikant voneinander unterscheiden.

Auch die Unterschiede in der Ertragsreduktion waren nicht sonderlich groß. Der Genotyp 8635 fällt besonders auf, da er in trockener Kulturführung mehr Frischmasse gebildet hat als unter normal feuchter Kultivierung. Dieser Unterschied ist jedoch nicht statistisch signifikant.

Betrachtet man die vier, mit physiologischen Messungen genauer untersuchten, Genotypen Moorea, Timor, 0 588 und 9346, so bildet Moorea unter trockener Kultur die meiste Frischmasse, gefolgt von 9346, Timor und 0 588.
Dieses Ranking stimmt nicht mit dem im Dehydrierungsexperiment aufgestellten Ranking überein.

Die Ertragsermittlung wurde auch für Petunien durchgeführt.

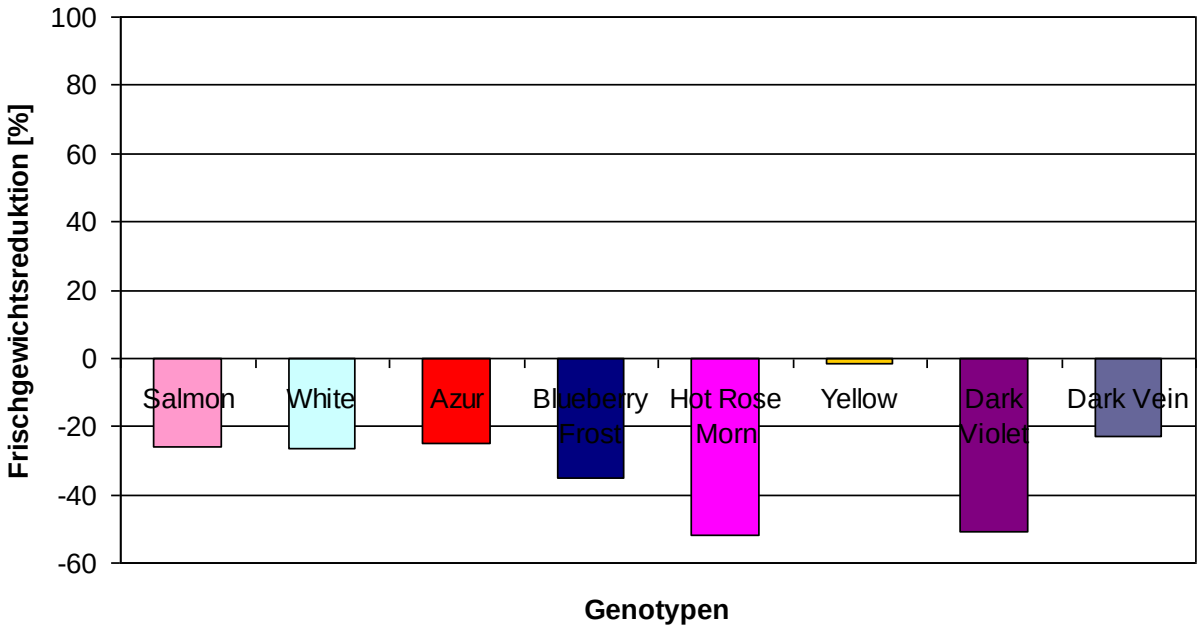


Abb. 34: Differenz des Frischgewichts zwischen trocken kultivierten und normal feucht kultivierten Petunien Genotypen (n = 8) in %.

Betrachtet man die Frischgewichtsermittlung für Petunien in Abbildung 16 und 17, so lassen sich auch hier lediglich drei Gruppen bilden die sich statistisch signifikant voneinander unterscheiden. In Abbildung 34 fällt besonders der Genotyp Yellow auf, seine Frischmassereduktion ist besonders gering. Allerdings, hatte er unter normal feuchter Kultur die geringste Frischmasse gebildet, er ist der kleinste von den untersuchten Genotypen. Hot Rose Morn und Dark Violet fallen durch eine besonders starke Frischmassereduktion auf. Sie würden demnach schlecht bewertet werden. Vergleicht man die vier Genotypen Salmon, White, Dark Violet und Dark Vein, für die in Dehydrierungsexperimenten ein Ranking aufgestellt worden ist, so wäre die Reihenfolge aufgrund der Frischmassereduktion wie folgt:

1. Dark Vein
2. Salmon
3. White
4. Dark Violet

Dieses Ranking stimmt nicht mit dem im Dehydrierungsexperiment aufgestellten Ranking überein.

6.2.2 Blattflächenmessungen

Die Blattflächenmessungen dienten im Wesentlichen der Klärung zweier unterschiedlicher Fragestellungen. Zum einen ging es darum zu prüfen, ob die unterschiedliche Dehydrierungsgeschwindigkeit der Genotypen möglicherweise nur ein Effekt der Blattfläche ist. Es sollte mit Hilfe dieser Messungen ausgeschlossen werden, dass Genotypen nur aufgrund einer größeren Blattfläche schneller welken.

Zum anderen sollte geprüft werden wie gut Blattflächenmessungen mit dem Frischgewicht korrelieren. Das Frischgewicht ist schnell ermittelt, während die Messungen jedes einzelnen Blattes mit dem Blattflächenmessgerät deutlich zeitraubender sind.

Um diese Fragen zu beantworten, wurde die Blattfläche der beiden Impatiens Genotypen Moorea und Timor gemessen, im Anschluss daran wurden die Blätter gewogen und so das Frischgewicht ermittelt. Diese Ermittlung wurde nach zwei Wochen wiederholt.

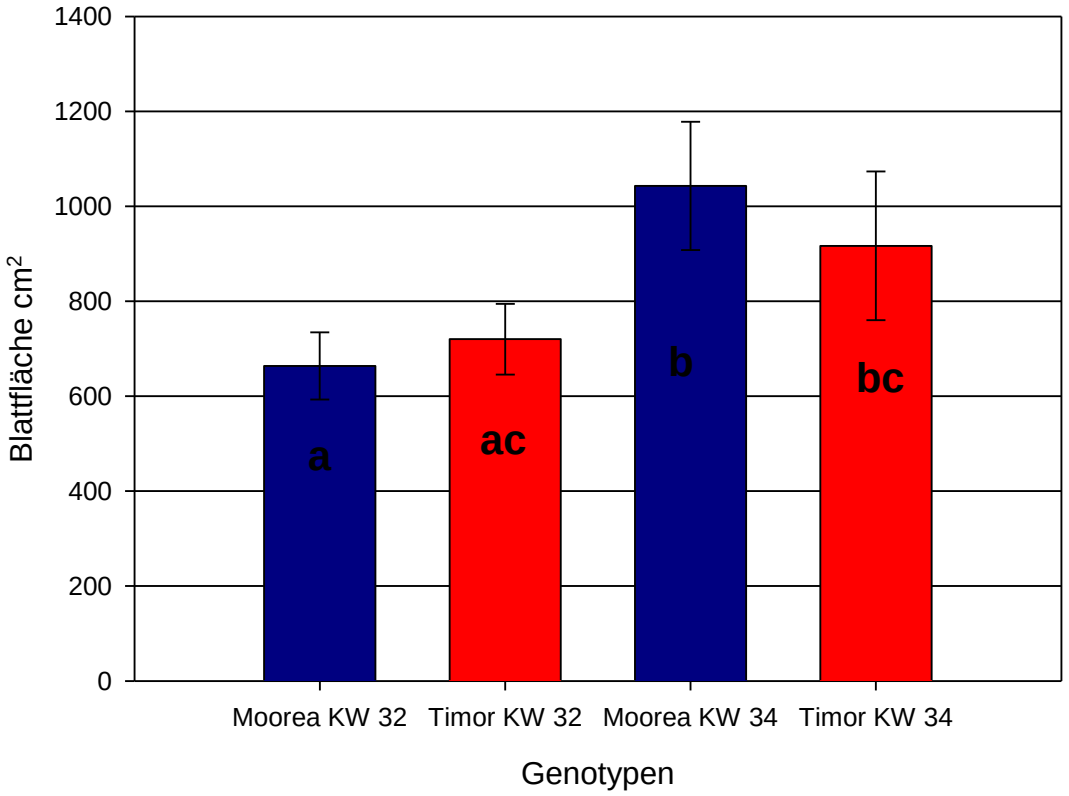


Abb. 35: Blattfläche von zwei Impatiens Genotypen (n = 8) zu zwei unterschiedlichen Kalenderwochen (KW). Angegeben sind Mittelwerte ± Standardabweichung. Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Tukey-Test, $p \leq 0{,}05$).

Betrachtet man Abbildung 35, so ist zu sehen, dass Moorea nach zwei Wochen signifikant mehr Blattfläche gebildet hat. Timor hat auch einen Blattflächenzuwachs zu verzeichnen, dieser Zuwachs ist allerdings nicht signifikant. Innerhalb einer Woche unterschieden sich beide Genotypen nicht signifikant voneinander was ihre Blattfläche angeht. Timor zeigte allerdings immer eine höhere Dehydrierungstoleranz als Moorea.

Wie Blattfläche und Frischgewicht eines Genotyps miteinander korrelieren, ist in der nachfolgenden Abbildung 36 dargestellt.

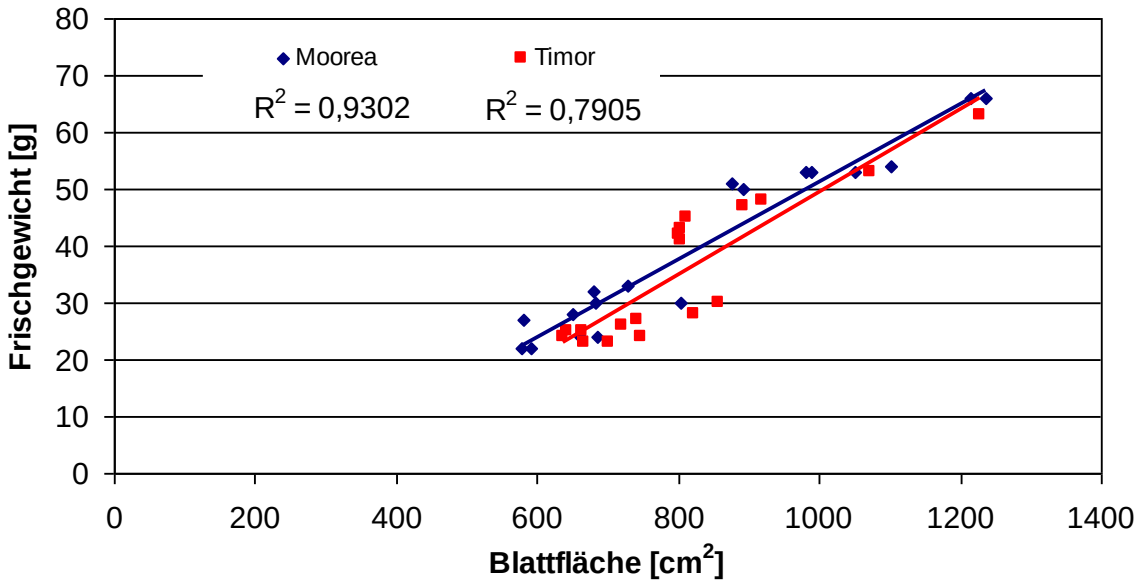


Abb. 36: Frischgewicht von zwei Impatiens Genotypen in Abhängigkeit von der Blattfläche.

Betrachtet man die beiden dargestellten Regressionskoeffizienten mit 0,93 und 0,79, so wird deutlich, dass aufwendige Blattflächenmessungen für die Ertragsermittlung nicht nötig sind. Es genügt, die Frischmasse zu ermitteln um Wuchsunterschiede zwischen den Genotypen festzustellen.

6.2.3 Bildanalytische Untersuchungen

Auch bei den bildanalytischen Untersuchungen ging es darum, den Ertrag von Pflanzen zu ermitteln. Vorteil dieser Methode ist, dass sie im Gegensatz zu Frischgewichtermittlungen oder Blattflächenmessungen zerstörungsfrei ist.

Dies hat den Vorzug, dass die gleichen Pflanzen im Kulturverlauf mehrmals vermessen werden könnten. Die zu klärende Frage war, inwieweit das ermittelte Schattenbild einer Pflanze das parallel ermittelte Frischgewicht der gleichen Pflanzen widerspiegelt.

Die nachfolgenden Abbildungen (37, 38) zeigen die bildanalytisch erhobene Blattfläche und das Frischgewicht der sechs, im Dehydrierungsexperiment verwendeten Impatiens Genotypen im Vergleich.

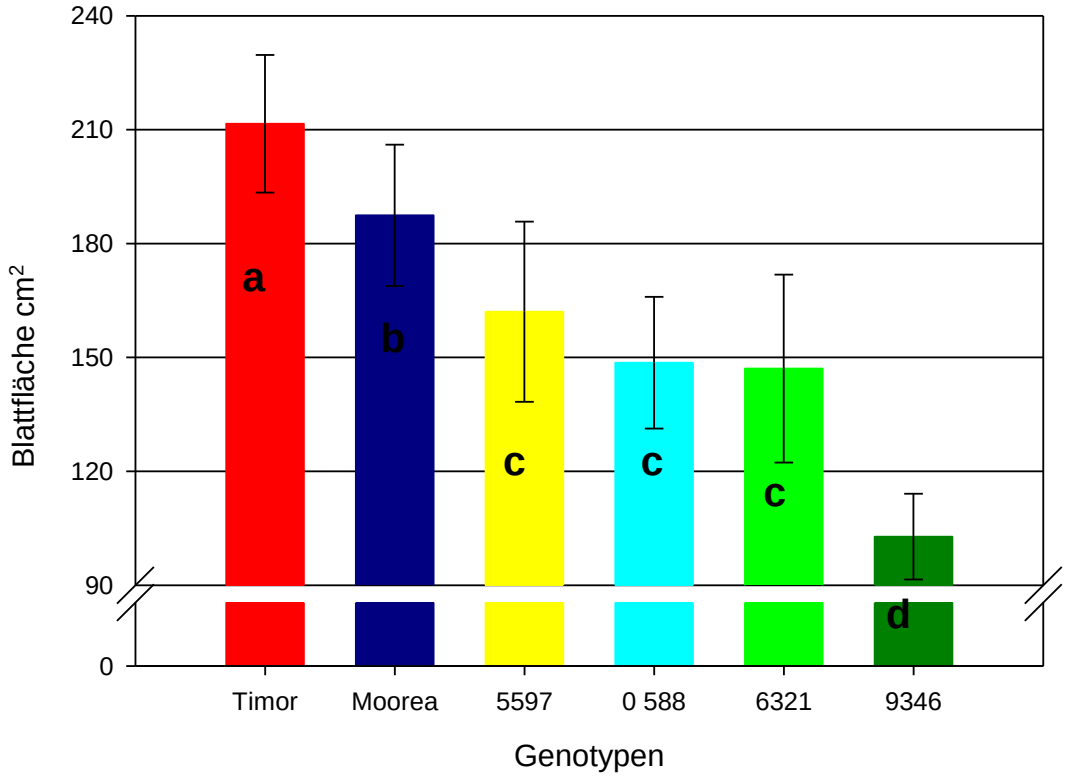


Abb. 37: Mit dem Bildanalysesystem ermittelte Blattfläche von sechs Impatiens Genotypen. Angegeben sind Mittelwerte ± Standardabweichung. Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Genotypen (Tukey-Test, $p \leq 0{,}05$).

In Abbildung 37 lassen sich vier signifikant verschiedene Wuchstypen erkennen. Sie sind der Größe nach dargestellt. Demnach wäre Timor der Genotypen mit der größten Blattfläche, 9346 der mit der kleinsten.
In der Abbildung 38 ist das entsprechende Frischgewicht der Genotypen dargestellt. Auch hier erfolgte die Darstellung zur besseren Vergleichbarkeit in absteigender Reihenfolge, der Genotyp mit dem höchsten Frischgewicht steht links, gefolgt von den entsprechend kleineren Genotypen.

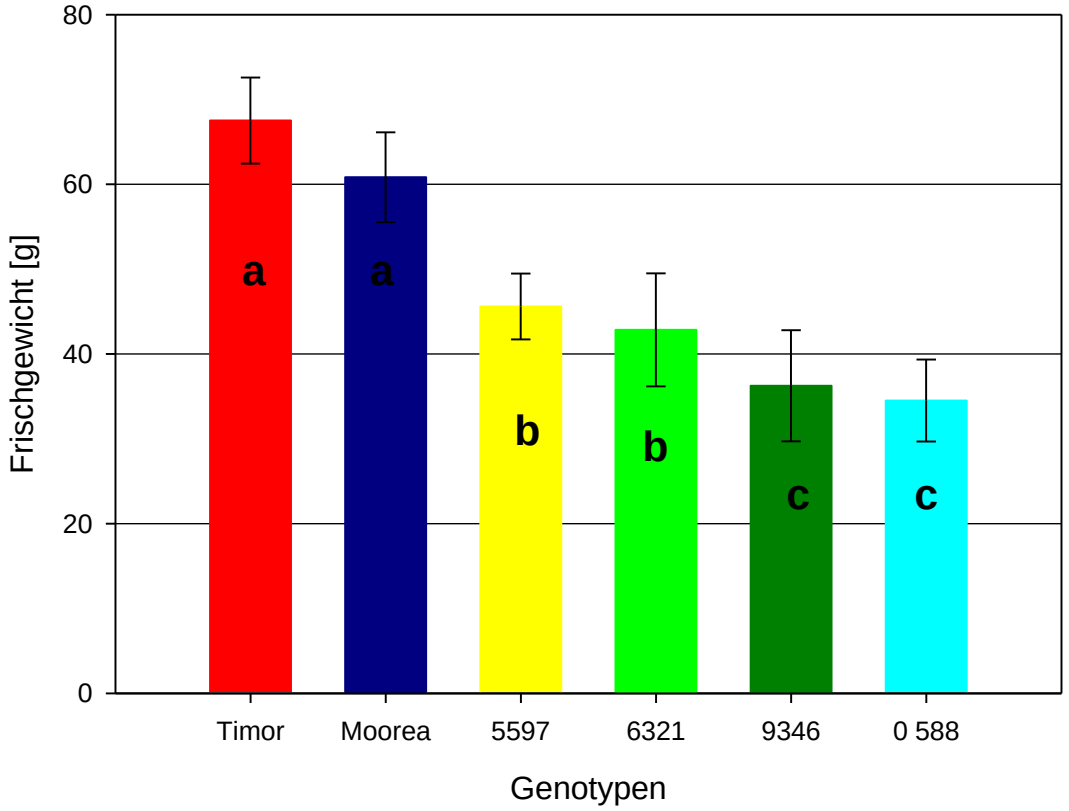


Abb. 38: Frischgewicht von sechs Impatiens Genotypen. Angegeben sind Mittelwerte ± Standardabweichung. Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Genotypen (Tukey-Test, $p \leq 0{,}05$).

Mit dem parallel zu den bildanalytischen Aufnahmen ermittelten Frischgewicht lassen sich nur noch drei signifikant voneinander verschiedene Wuchstypen erkennen.
Auch hier ist Timor der Genotyp, der die meiste Frischmasse gebildet hat. Der Genotyp mit der geringsten Frischmassebildung ist 0 588. Allerdings gibt es keinen statistisch signifikanten Unterschied zum Genotyp 9346, der bei der bildanalytischen Untersuchung die geringste Blattmasse aufwies.
Der Vergleich der beiden Abbildungen lässt den Schluss zu, dass mit der Bildanalyse das Größenverhältnis ermittelt werden kann. Eine Nutzung der Methode zur Zwischenauswertung des Massenzuwachses ist demnach denkbar.

6.2.4 Diskussion Ertragsermittlung

Es ist bekannt, dass Trockenheit zu einem reduzierten Wachstum führt. Die Theorie besagt, dass trockenstresstolerante Pflanzen ihre Fitness maximieren, indem sie ihre Blattgröße minimieren (HESCHEl und RIGINOS, 2004). GIVNISH (1979) stellte die

Hypothese auf, dass schmale Blätter die Fitness unter trockenen Bedingungen maximieren, da die abnehmende Oberfläche schmaler Blätter die Austrocknung vermindert.

Im Gegensatz dazu steht diese Versuchsfrage, die den Zusammenhang zwischen toleranten Genotypen und einer geringen Wachstumsdepression unter trockenen Bedingungen zu finden versucht. Dies würde bedeuten, dass man unter Wassereinsparung immer noch qualitativ gute Ware produzieren könnte.

Das dafür aufgestellte Ranking deckt sich leider nicht vollständig mit dem Ranking das in den Dehydrierungsversuchen aufgestellt wurde.

Die Frischgewichtsermittlung und der Vergleich mit den Blattflächenmessungen haben gezeigt, dass der Zusammenhang zwischen den beiden Parametern so gut ist, dass aufwendige Blattflächenmessungen nicht notwendig sind. Gerade mit Petunien und deren klebrigen Blättern wäre eine Blattflächenmessung keine einfach anzuwendende Methode.

Die Versuche zur Blattflächenmessung haben außerdem gezeigt, dass obwohl die Transpirationsfläche einen großen Einfluss auf das Dehydrierungsverhalten von Pflanzen hat, in diesem Fall die Unterschiede zwischen den beiden Genotypen Moorea und Timor nicht groß genug sind um als alleiniger Faktor zu gelten. Die Transpirationsfläche allein ist also nicht ausschlaggebend für die unterschiedlich lange Haltbarkeit im Dehydrierungsexperiment.

Bildanalytische Untersuchungen haben sich als wertvolle Ergänzung zu den Frischgewichtsermittlungen gezeigt. Ihr großer Vorteil ist, dass sie zerstörungsfrei sind und somit optimal angewendet werden können, um während dem Kulturverlauf das Wachstum der Genotypen verfolgen zu können, ohne dabei Versuchspflanzen zu verlieren.

6.3 Physiologische Untersuchungen

Untersuchungen zur Physiologie der Pflanzen unter Trockenstress wurden durchgeführt, um Ursachen zu finden, warum die Genotypen sich im Dehydrierungsverhalten bzw. in ihrer Trockentoleranz unterscheiden. Mit Hilfe von physiologischen Untersuchungen sollte das in den Dehydrierungsexperimenten aufgestellte Ranking weiter untersucht und Mechanismen der Trockenstresstoleranz aufgespürt werden.

Die physiologischen Untersuchungen wurden aus zeittechnischen Gründen nur mit Impatiens durchgeführt. Dabei wurden vier Genotypen für die Untersuchungen ausgewählt: Moorea, Timor, 0 588 und 9346. Diese zeichneten sich durch eine unterschiedliche Dehydrierungstoleranz aus.

6.3.1 Untersuchungen zum Trieb-Wasserpotenzial

Die Druckbombe oder Scholanderbombe ist eine Möglichkeit auf einfache, schnelle und zuverlässige Weise das Gesamtwasserpotential von ganzen Pflanzen, Zweigen, Blättern oder sogar Blattstücken zu bestimmen (WILLERT *et al*., 1995).

Die Versuchsfrage war, welchen Einfluss das Wasserpotential auf die Trockenstresstoleranz hat?

Man kann unterstellen, dass trockenstresstolerante Genotypen den Wasserhaushalt unter Trockenstress besser regulieren und daher das Wasserpotenzial langsamer absenken. Präzisiert lautet die Frage also, erreichen sensible Genotypen schneller ein negativeres Wasserpotential als tolerantere Genotypen?

In Vorversuchen wurden Messungen zum frühmorgendlichen und mittäglichen Trieb-Wasserpotenzial durchgeführt. Dafür wurden von den Genotypen Moorea und Timor jeweils drei Triebe um 07:00 Uhr ohne Lichtquelle und um 13: 00 mit Licht
(30 µmol m^{-2} s^{-1}) in der Klimakammer gemessen.

Tab. 17: Frühmorgendliches und mittägliches Trieb-Wasserpotenzial der Genotypen Timor und Moorea (n = 8) am 11.05.09. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Messzeitpunkten (Tukey-Test, $p \leq 0{,}05$).

Genotyp	Zeit	Trieb-WP [-MPa]	Saugspannung Substrat [-hPa]	Zeit	Trieb WP [-MPa]	Saugspannung Substrat [-hPa]	Grenz-differenz
Timor	07:00	0,213 a	83,3	13:00	0,173 a	150	0,005
Moorea	07:00	0,187 a	90	13:00	0,282 a	153	0,008

Die Tabelle 17 zeigt das für Moorea und Timor gemessene Wasserpotenzial zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten. Morgens bevor das Licht in der Klimakammer angeschaltet worden war und mittags nach fünf Stunden Belichtung (30 µmol m^{-2} s^{-1}). Die Versorgung des Substrates mit Wasser war wie sich an der Saugspannung erkennen lässt zu diesem Zeitpunkt noch gut. Die Tabellen zeigen, dass für beide Genotypen zwischen den frühmorgendlichen und den mittäglichen Trieb-Wasserpotenzialmessungen kein statistisch signifikanter Unterschied festgestellt werden konnte. Aufgrund dieser Ergebnisse erfolgten die weiteren Untersuchungen nur noch zur Mittagszeit.

Die vier Genotypen Moorea, Timor, 0 588 und 9346 wurden für die Untersuchungen zum Trieb-Wasserpotenzial in der Klimakammer einem Dehydrierungsprozess unterworfen. Die Messungen erfolgten an jeweils drei Trieben über einen Zeitraum von 0 bis -700 hPa Saugspannung im Substrat.

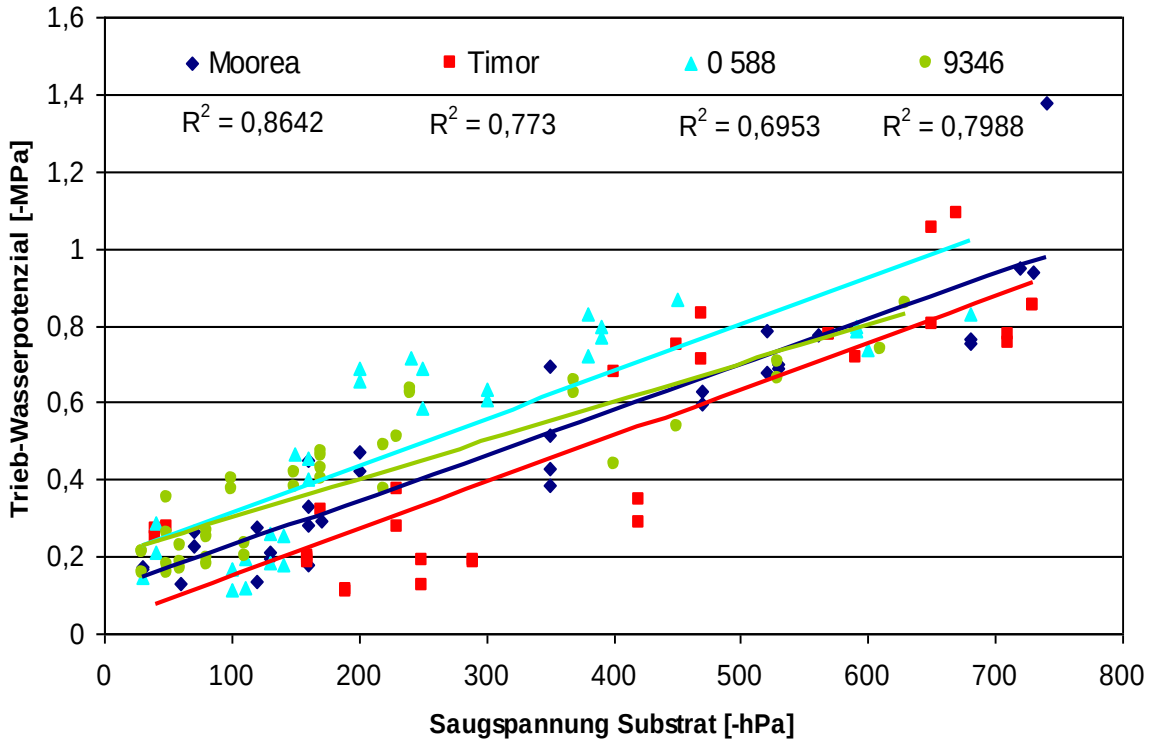


Abb. 39: Trieb-Wasserpotenzial von Impatiens Genotypen in Abhängigkeit von der Saugspannung im Substrat. Die Messung mit allen Genotypen erfolgte zu zwei unterschiedlichen Terminen im Jahr.

In Abbildung 39 ist das Trieb-Wasserpotential in Abhängig von der Saugspannung im Substrat aufgetragen. Die Regressionskoeffizienten zeigen einen erwartungsgemäß guten Zusammenhang zwischen Trieb-Wasserpotential und Saugspannung. Zu Beginn der Messung bei guter Wasserversorgung im Substrat hatten alle Genotypen ein hohes Trieb-Wasserpotenzial. Mit zunehmender Trockenheit reagierten die Genotypen mit einer unterschiedlich starken Absenkung des Trieb-Wasserpotenzials. Betrachtet man den Bereich zwischen -300 und -400 hPa Saugspannung im Substrat also den Bereich beginnender Trockenheit, so zeigt sich, dass Timor mit einer geringeren Absenkung des Trieb-Wasserpotenzials reagierte als beispielsweise der Genotyp 0 588.

Der Genotyp Timor hat sich bereits im Vorfeld bei den De- und Rehydrierungsversuchen als trockenstresstoleranter Genotyp gezeigt. Er reagierte in den Untersuchungen zum Wasserpotenzial durch eine vergleichsweise langsame Absenkung des Trieb-Wasserpotenzials. Der Genotyp 9346 hatte allerdings bei gleicher Saugspannung im Substrat ein negativeres Trieb-Wasserpotenzial als Timor

und Moorea und würde somit nach diesem Ranking als sensibler eingestuft im Gegensatz zu seiner Beurteilung im Dehydrierungsexperiment.
Die Unterschiede im Wasserpotential zwischen den Genotypen sind allerdings nicht statistisch signifikant. Somit lassen sich aus diesem Versuch nur Tendenzen bezüglich der Trockenstresstoleranz eines Genotyps erkennen.

6.3.3 Diskussion Trieb-Wasserpotenzial

Die Messung des Trieb-Wasserpotenzials mittels der so genannten Scholander Druckkammer zählt zu den klassischen Methoden der Stressphysiologie.
Sie gehört zu einem der besten „Instrumente“ um frühe Anzeichen von Trockenstress zu detektieren (PRIVE und DURICE, 2003), obwohl es sich dabei leider um eine destruktive Methode handelt. Ein Vorteil der Methode ist die einfache Handhabung, und die gute Transportierbarkeit (PRIVE und DURICE, 2003).
Nach ZIMMERMANN *et al.* (2008) ist die Messung des Wasserpotenzials mit der Scholander Bombe allerdings langsam, nicht automatisierbar und ermöglicht nur punktuelle Messungen. Fraglich an der Messmethode sind auch gemessene Werte über 1 MPa (ZIMMERMANN *et al.*, 2004), Werte in dieser Höhe traten in den hier durchgeführten Messungen kaum auf. Allerdings stellt sich die Frage, welchen Druck eine krautige Pflanze wie Impatiens aufbauen kann. Aufgrund der hohen Annerkennung der Methode in der Literatur wurden die Messungen aber trotzdem durchgeführt und ausgewertet.
Während der Vorversuche ist parallel das frühmorgendliche Wasserpotenzial von Boden und Pflanze bestimmt worden. Es beschreibt den Zustand des pflanzlichen Wasserhaushalts nach nächtlicher Wiederaufsättigung (REICH UND HINCKLEY, 1989).
Das frühmorgendliche Wasserpotential gemessen als Trieb-Wasserpotenzial, stellt eine indirekte Messung des Bodenmatrixpotenzials dar (RICHTER, 1997).
Zwischen morgendlichem und mittäglichem Trieb-Wasserpotenzial konnten in diesen Versuchen keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Eine mögliche Erklärung dafür könnte der natürliche Tag Nacht Rhythmus der Pflanze sein. Die Messungen fanden zwar im Dunkeln statt, aber erst um sieben Uhr morgens. Für die Pflanze ist es unter natürlichen Umständen schon hell. Pflanzen unterliegen aber einer circadianen Rhythmik, auch bekannt als endogene Rhythmik.
Der Begriff endogener Rhythmus wird benutzt um biologische Prozesse zu beschreiben, die sich periodisch verändern obwohl die Außenbedingungen gleich

bleiben (BÜNNING, 1956). Allerdings wurden die Pflanzen zur Vermeidung dieses Problems bereits drei Tage vor Messbeginn in die Klimakammer eingestellt.

Eine weitere Erklärung dafür, dass sich keine Unterschiede zwischen frühmorgendlichem und mittäglichem Wasserpotenzial aufzeigen ließen, könnte die Tatsache sein, dass es in der Klimakammer zu keiner massiven Strahlungsänderung kommt, verglichen mit Freilandbedingungen. Die vorherrschenden Lichtbedingungen sind mit 30 µmol m^{-2} s^{-1} gering und stellen keinen Stressfaktor für die Pflanzen dar, so dass der Effekt der circadianen Rhythmik wenn überhaupt sehr gering ist.

Für die Fragestellung war der Zeitpunkt der Messung auch nicht von Wichtigkeit, da die Genotypen lediglich hinsichtlich ihrer Reaktion auf das Austrocknen des Substrates miteinander verglichen werden sollten. Die Messbedingungen mussten also für alle Genotypen gleich sein und diese Bedingung war durch die Messungen in der Klimakammer erfüllt.

Tägliche Wasserpotenzialmessungen, wie in diesem Versuch durchgeführt, liefern Auskunft über verschiedene Faktoren, wie über den Wasserbedarf, über die Bodenwasserverfügbarkeit oder die stomatäre Regulierung (CHONE *et al.*, 2001).

In diesen Untersuchungen ging es um den Wasserbedarf der Genotypen. Genauer darum, dass trockentolerante Genotypen, aufgrund eines geringeren Wasserverbrauchs während eines Dehydrierungsprozesses später mit einer Absenkung des Trieb-Wasserpotenzials reagieren als sensible Genotypen.

In den Untersuchungen zum Trieb-Wasserpotenzial konnte ein statistisch nicht abgesichertes Ranking bezüglich der Trockenstresstoleranz der Genotypen aufgestellt werden.

Dieses deckt sich zum Großteil mit dem Ranking das in den Dehydrierungsexperimenten aufgestellt wurde. Die Versuche zum Wasserpotenzial geben Hinweise darauf, dass trockenstresstolerante Genotypen ihr Trieb-Wasserpotenzial langsamer absenken als weniger tolerante Genotypen

6.3.4 Druck-Volumen Analyse (pV-Kurven)

PV-Kurven werden häufig genutzt um die Wasserverhältnisse im Pflanzengewebe zu beschreiben (SUN, 2002). Die Druck-Volumen-Relation (pressure volume analysis) beschreibt die Beziehung zwischen dem Wasserpotenzial und dem symplastischen Wassergehalt von Trieben von gesättigtem Gewebe über den Turgornullpunkt hinaus (HÖFLER, 1920). Die pV-Kurven wurden für die vier Impatiens Genotypen aufgestellt.

Es sollte das Trieb-Wasserpotenzial am Turgornullpunkt und das relative Wasserdefizit ermittelt werden. Die zu beantwortende Frage war, ob trockentolerante Genotypen ihren Turgornullpunkt bei einem negativeren Wasserpotenzial aufzeigen und ein höheres Wasserdefizit haben können.

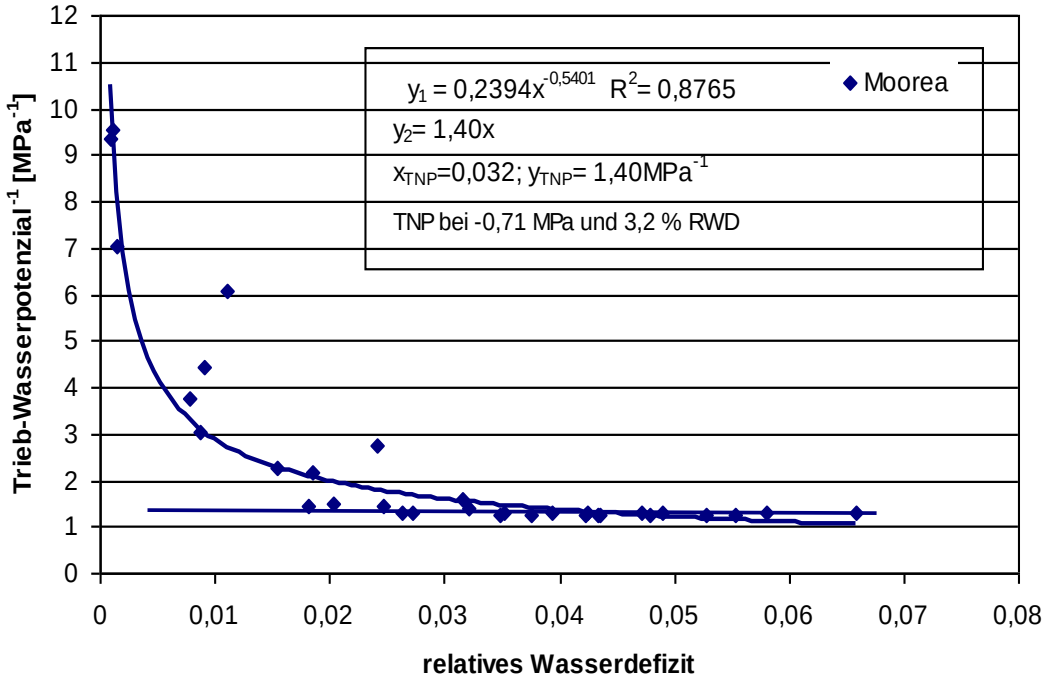


Abb. 40: Druck-Volumen Kurve von vier Trieben vom Impatiens Genotyp Moorea.

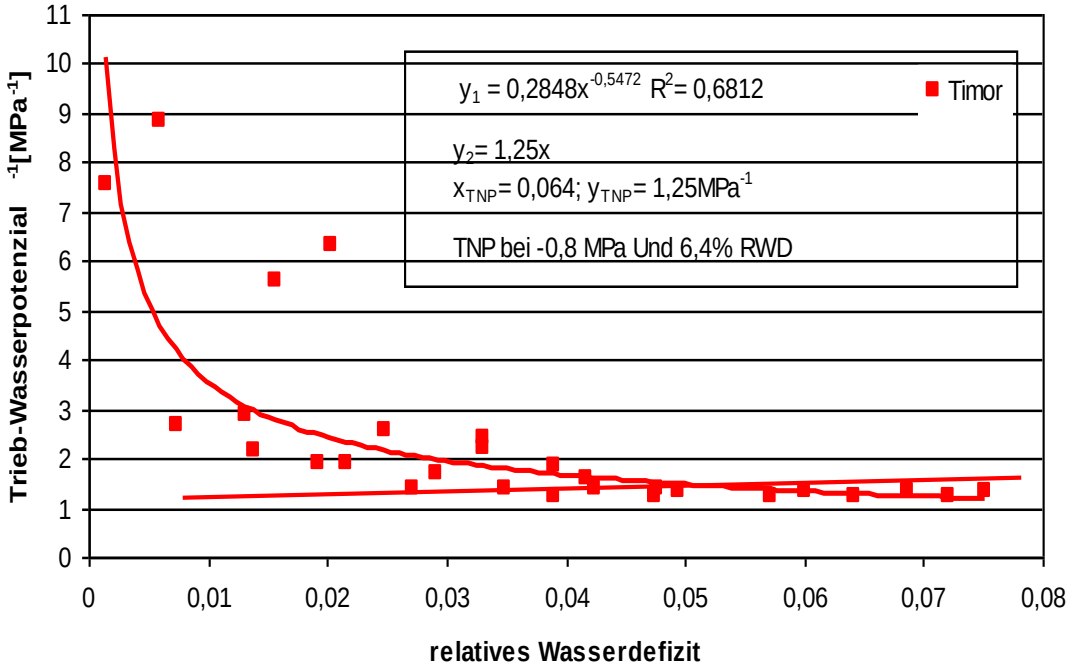


Abb. 41: Druck-Volumen Kurve von vier Trieben vom Impatiens Genotyp Timor.

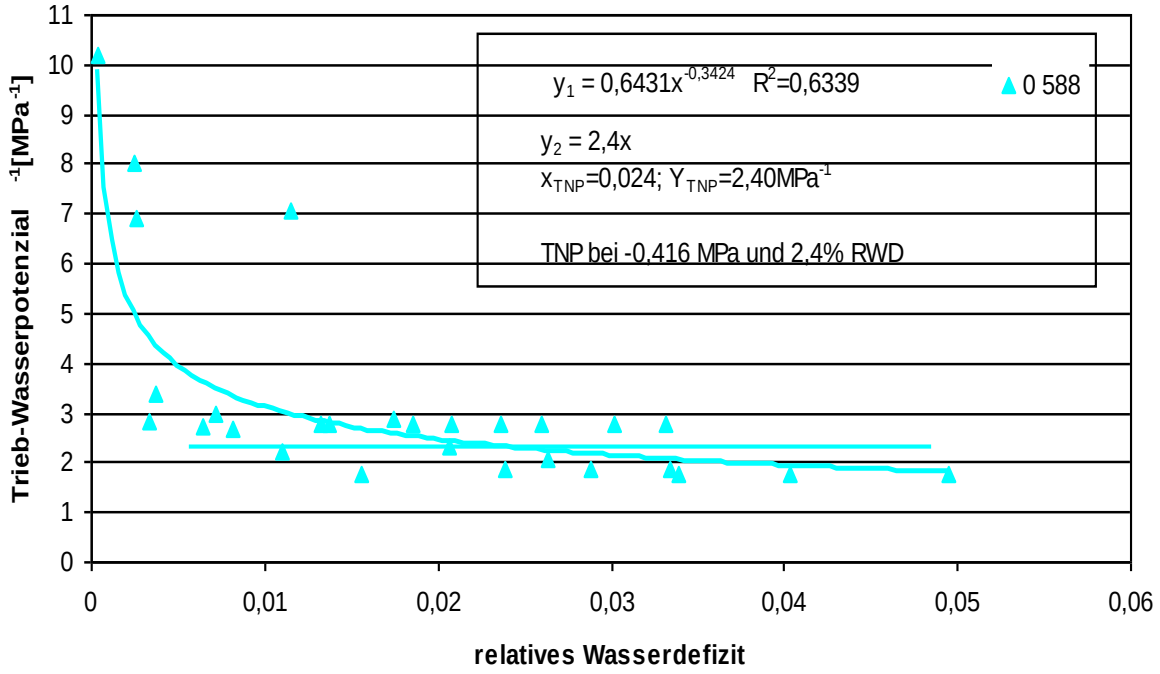


Abb. 42: Druck-Volumen Kurve von vier Trieben vom Impatiens Genotyp 0588.

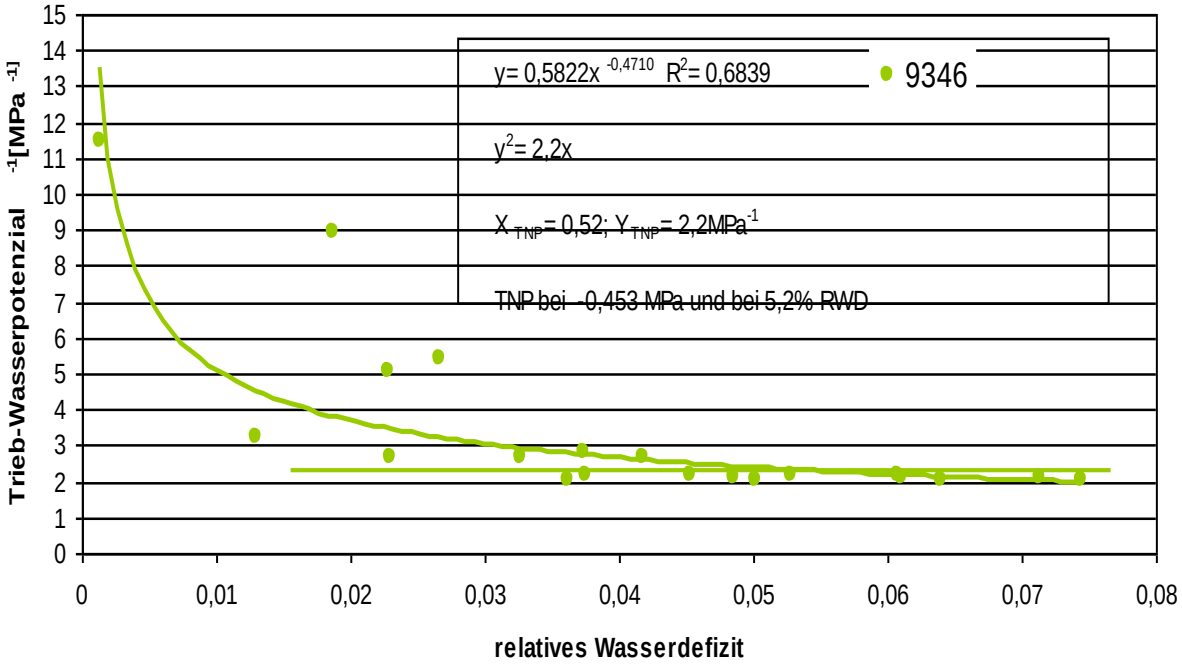


Abb. 43: Druck-Volumen Kurve von vier Trieben vom Impatiens Genotyp 9346.

Die Abbildungen 40 bis 43 beschreiben den Verlauf des Trieb-Wasserpotenzials in Abhängigkeit vom relativen Wasserdefizit. Anhand des Übergangs vom nicht linearen Bereich der Kurve in den linearen Bereich kann der Turgornullpunkt graphisch ermittelt werden.

Die Genotypen unterschieden sich in ihrem Trieb-Wasserpotenzial und dem relativen Wasserdefizit am Turgornullpunkt.

Bei Timor setzte der Ausfall des Druckpotenzials erst bei einem um ca. 0,4 MPa niedrigeren Wasserpotenzial ein, bei Moorea bei einem ca. 0,3 MPa niedrigeren Wasserpotenzial, als bei 9346 und 0588. Das osmotische Potenzial war demzufolge in Trieben von Timor und Moorea höher.

6.3.5 Diskussion Druck-Volumen Analyse

Die durchgeführten pV-Analysen dienten dazu, die Aussage über das Trieb-Wasserpotenzial der Genotypen zu erweitern, da bei der Messung des Trieb-Wasserpotenzials der Genotypen keine statistisch signifikanten Unterschiede gefunden werden konnten. Mit Hilfe der pV-Analysen lassen sich Rückschlüsse über die Lage des Turgornullpunktes ziehen. So können die Genotypen genauer differenziert werden.

pV-Analysen erlauben die Aussage, ob der Abfall des Wasserpotenzials an der Akkumulation von Osmolyten liegt oder an dem abnehmenden Wassergehalt der Zellen (SUAREZ, 2011). Dafür wurde in diesen Versuchen das Trieb- Wasserpotenzial in Abhängigkeit vom relativen Wasserdefizt dargestellt.

Betrachtet man die vier Kurvenverläufe bezüglich des relativen Wasserdefizits am Turgornullpunkt, so ist zu erkennen, dass der relative Wassergehalt mit 97,6 bis 93,6 noch sehr hoch ist, Grund dafür könnte sein, dass Impatiens eine Kultur ist, die hauptsächlich aus Wasser besteht.

Ziel des Versuches war es erneut die vier Genotypen bezüglich ihrer Trockentoleranz zu bewerten. pV-Kurven Verläufe sind zumindest teilweise genetisch bestimmt und sind ein wichtiger Teil der „Trockenantwort-Strategie“ (LENZ *et al.*, 2006).

Aus den erstellten Abbildungen ist zu entnehmen, dass sich die pV-Kurven der einzelnen Genotypen deutlich von einander unterscheiden lassen und somit das Aufstellen eines Rankings ermöglichen.

Dieses Ranking ist unterschiedlich, je nachdem ob man das relative Wasserdefizit oder das Trieb-Wasserpotenzial zum Zeitpunkt des Turgornullpunktes betrachtet.

Ranking nach RWD:	Ranking nach Trieb-Wasserpotenzial:
1. Timor	1. Timor
2. 9346	2. Moorea
3. Moorea	3. 9346
4. 0 588	4. 0 588

In beiden Fällen stimmen die Plätze eins und vier überein. Betrachtet man das in den Dehydrierungsexperimenten aufgestellte Ranking, wo 9346 und Timor als tolerant, Moorea als durchschnittlich und 0 588 als sensibel eingestuft wurde, deckt sich das Ergebnis für das Ranking nach dem RWD zum Zeitpunkt des Turgornullpunktes besser mit dem Dehydrierungsranking. Das Ranking nach dem Trieb-Wasserpotenzial am Turgornullpunkt deckt sich mit dem Ranking welches nach den Trieb-Wasserpotenzialmessungen aufgestellt worden ist.

Im Vergleich zu den Trieb-Wasserpotenzial Messungen lassen sich durch das Aufstellen von pV-Kurven mehr Informationen gewinnen Es kann eine Aussage über das osmotische Potenzial der Genotypen getätigt werden. Am Turgornullpunkt ist die Zellwand entspannt und das Zell-Wasserpotenzial ist gleich dem osmotischen Potenzial (SCHULZE *et al.,* 2005). Daher ist ein mit Hilfe der pV-Kurven aufgestelltes Ranking aussagekräftiger, da sich mehr Hintergründe für die Trockenstresstoleranz herauslesen lassen. Diese Studie deutet darauf hin, dass die toleranteren Typen wie Timor über ein höheres osmotisches Potenzial verfügen.

6.3.6 Gaswechseluntersuchungen

Durch die Regulierung der Spaltöffnungsweite ist die Pflanze in der Lage, ihre transpirative Wasserabgabe entsprechend den Möglichkeiten und Bedürfnissen ihres Wasserhaushaltes anzupassen (LÖSCH, 2003).

Die zu untersuchende Hypothese lautet, dass eine Pflanze, die schnell mit Stomataschluss auf Trockenheit reagiert, einen Dehydrierungsprozess länger übersteht.

Es galt den Zusammenhang zwischen dem Verhalten eines Genotyps im Dehydrierungsexperiment und dem Stomatamanagement aufzuzeigen. Lässt ein Genotyp, der sich im Dehydrierungsexperiment als empfindlich gezeigt hat die Stomata länger offen als ein als tolerant eingestufter Genotyp?

Um diese Fragestellung zu klären, wurde das Stomatamanagement der vier Impatiens Genotypen Timor, Moorea, 0588 und 9346 untersucht. Dafür wurden sie über eine Austrocknungsdauer von 0 bis -700 hPa Saugspannung im Substrat täglich mit dem Walz-Gaswechselmessgerät gemessen. Die Messungen wurden zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Jahr durchgeführt, um einen jahreszeitlichen Effekt auszuschließen. Da die Messungen unter relativ geringen Lichtverhältnissen (30 µmol m^{-2} s^{-1}) in den Klimakammern stattfanden, wurde in einem Vorversuch, für den Genotyp Moorea eine Lichtsättigungskurve angefertigt. Mit Hilfe der Kurve sollte belegt werden, dass die Pflanzen auch bei einer geringen Lichtintensität ihre Stomata noch geöffnet haben und die Lichtverhältnisse für einen Vergleich der Genotypen ausreichend waren. Zur Überprüfung wurden sechs Pflanzen bei unterschiedlichem Lichtangebot von 0-2000 µmol m^{-2} s^{-1} gemessen.

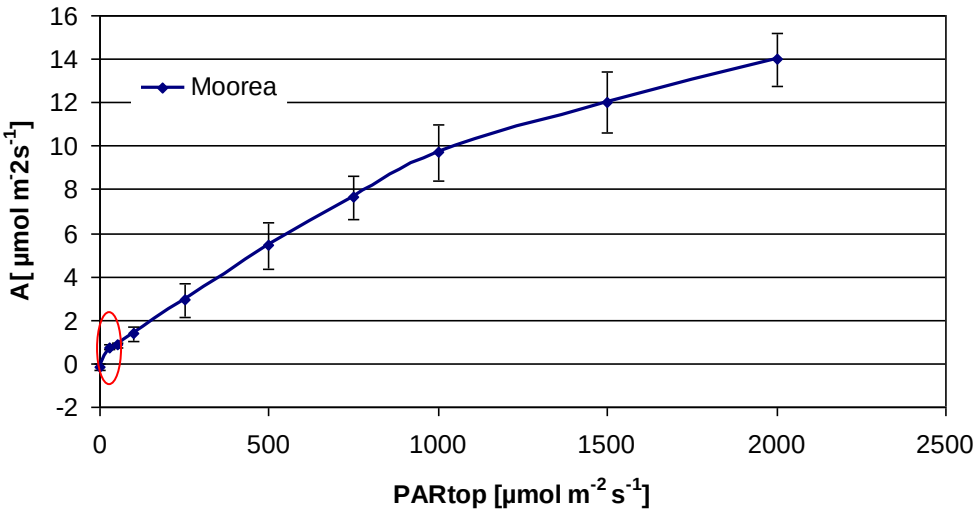


Abb. 44: Nettoassimilationsrate von Moorea bei unterschiedlichem Lichtangebot.

Wie die Abbildung 44 zeigt, ist die Assimilationsrate bei niedrigem Lichtangebot erwartungsgemäß deutlich reduziert. Die Stomata sind jedoch noch geöffnet und es findet ein Gasaustausch statt. Da die Lichtbedingungen für alle Genotypen gleich waren, ist die Vergleichbarkeit gegeben. Daher erfolgten die Transpirationsstudien mit den vier Impatiens Genotypen unter diesen geringen Lichtverhältnissen.

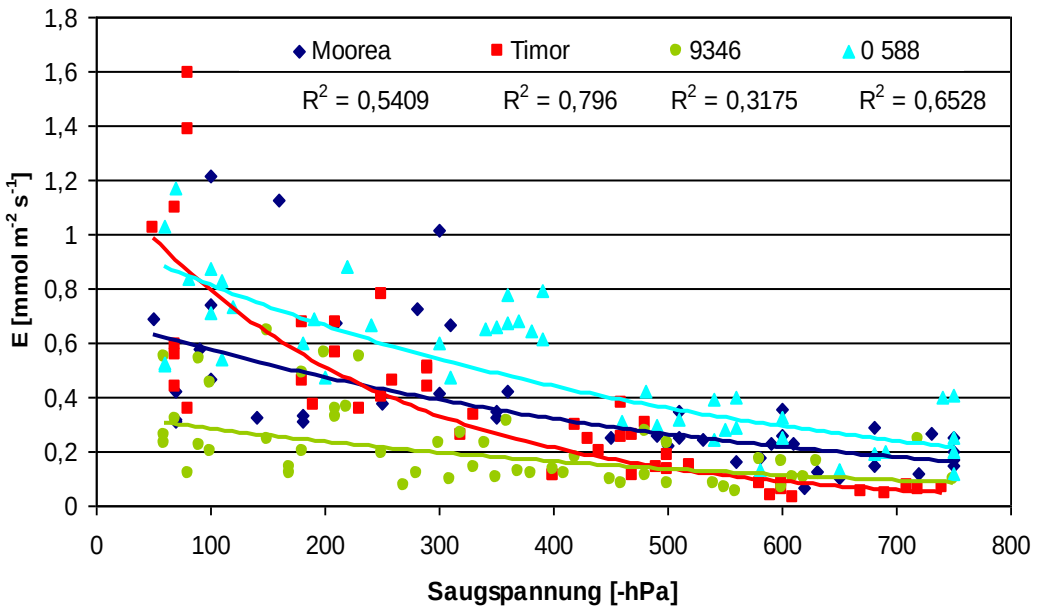


Abb. 45: Transpirationsrate von vier Impatiens Genotypen mit abnehmender Saugspannung im Substrat (exponentielle Funktion).

Betrachtet man die Transpirationsrate der vier Genotypen, so ist ein unterschiedlicher Kurvenverlauf zu erkennen (Abb. 45). Die stärkste Abhängigkeit von der Saugspannung zeigte Timor, zu Beginn bei feuchtem Substrat verfügte dieser Genotyp über eine verhältnismäßig hohe Transpirationsrate, die sich mit zunehmender Trockenheit stark verringerte. Vergleicht man den als ebenfalls tolerant eingestuften Genotyp 9346 mit Timor stellte sich der Verlauf vollkommen anders dar. Dieser Genotyp hatte bereits bei feuchtem Substratzustand eine geringe Transpirationsrate, die im Verlauf noch weiter abnahm. Die höchste Transpirationsrate zeigte der als sensibel eingestufte Genotyp 0 588. Er verfügte auch über die höchste verbliebene Transpirationsrate bei 700 hPa Saugspannung im Substrat.

Die abnehmende Transpirationsrate deutet auf ein Schließen der Stomata hin. Der Versuch zeigte also, dass Genotypen, die erst spät mit Stomataschluss auf Trockenheit reagieren, früher welken.

Zur Verdeutlichung sind in der nachfolgenden Abbildung 46 die Transpirationsraten der einzelnen Genotypen zwischen -300 und -400 hPa mit einsetzender Trockenheit und Welke aufgezeigt.

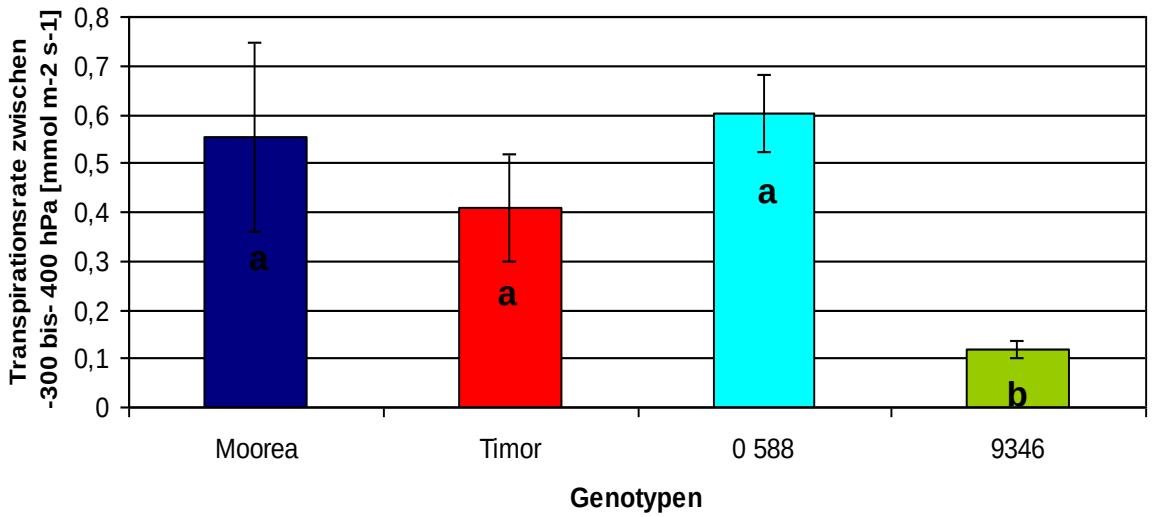


Abb. 46: Transpirationsrate von vier Impatiens Genotypen zwischen -300 und -400 hPa Saugspannung im Substrat (n = 16) Angegeben sind Mittelwerte ± Standardabweichung. Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Genotypen (Tukey-Test, $p \leq 0{,}05$).

Es wird noch einmal deutlich, dass die beiden im Dehydrierungsexperiment als tolerant eingestuften Genotypen Timor und 9346 zum Zeitpunkt einsetzender Trockenheit eine geringere Transpirationsrate hatten als Moorea und 0 588, also früher mit Stomataschluss reagierten. Die Tendenz ist deutlich, auch wenn nur der Unterschied zum Genotyp 9346 statistisch signifikant war.

Eine weitere Kenngröße, die sich mit den Gaswechselmessungen ermitteln lässt, ist der Wasserausnutzungskoeffizient (WUE). Dabei werden die Nettophotosynthese (A) und die Transpiration (E) in Beziehung gesetzt.

Letztlich lässt sich aus der WUE der einzelnen Genotypen Rückschlüsse darüber ziehen, wie viel Masse sie unter trockenen Bedingungen produzieren können. Da in diesem Experiment aber nach Pflanzen gesucht wurde die mit schnellem Stomataschluss auf Trockenheit reagieren, ist ein kleiner WUE kein Nachteil für den Genotyp.

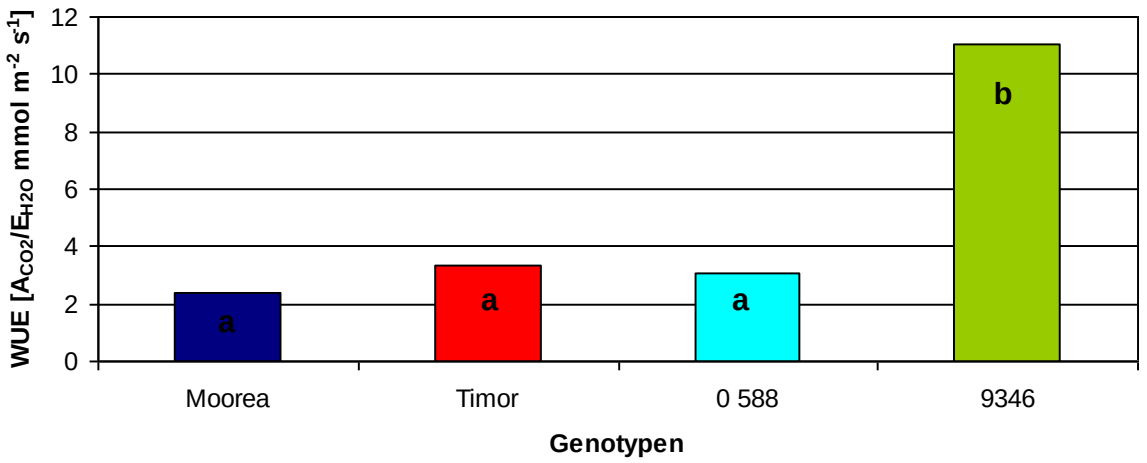


Abb. 47: Wasserausnutzungskoeffizient von vier Impatiens Genotypen bei einsetzender Trockenheit zwischen -300 und-400 hPa. Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Genotypen (Tukey-Test, $p \leq 0,05$).

In Abbildung 47 ist der Wasserausnutzungskoeffizient der vier Genotypen bei einsetzender Trockenheit dargestellt. Der Genotyp 9346 hatte einen statistisch signifikant höheren WUE als die anderen drei Genotypen, diese unterschieden sich nur gering voneinander.

In der Arbeit wurde nicht nur der Zusammenhang des Stomataschlusses und der zunehmenden Trockenheit im Substrat betrachtet, sondern auch die Auswirkungen einer Abnahme des Trieb-Wasserpotenzials bei den einzelnen Genotypen auf den Öffnungsgrad der Stomata. Dafür ist in der nachfolgenden Abbildung 46 die Beziehung der stomatären Leitfähigkeit zum mittäglichen Trieb-Wasserpotenzial dargestellt.

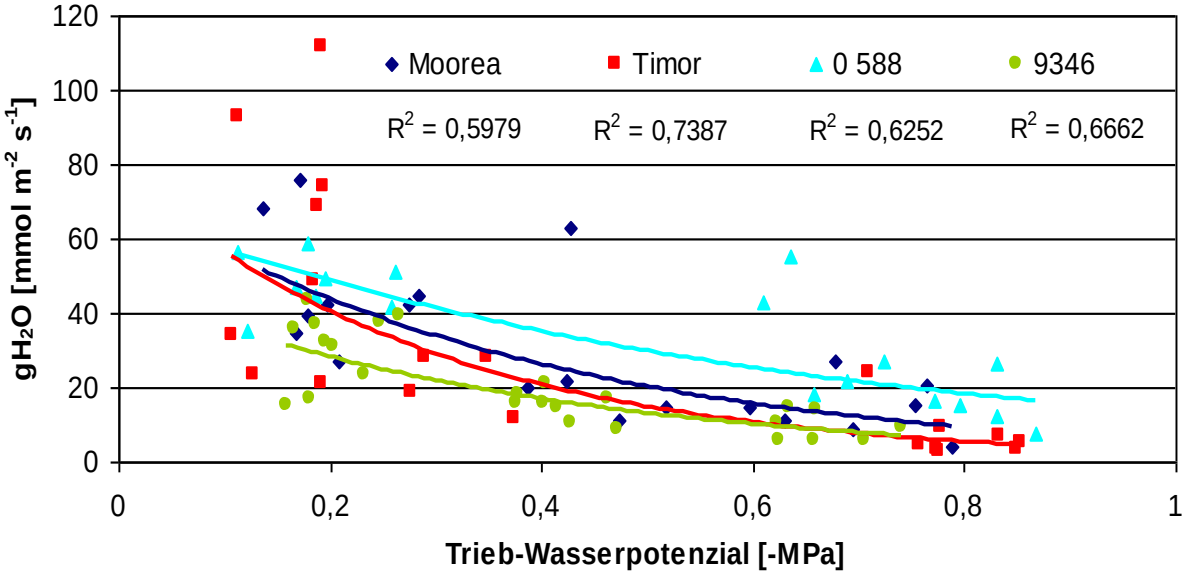


Abb. 48: Stomatäre Leitfähigkeit von vier Impatiens Genotypen in Abhängigkeit vom mittäglichen Trieb-Wasserpotenzial.

Hier zeigt sich der Zusammenhang zwischen dem Trieb-Wasserpotenzial und der stomatären Leitfähigkeit. Bei allen Genotypen sank die stomatäre Leitfähigkeit mit negativerem Wasserpotenzial. Aus der Abbildung ist weiterhin zu entnehmen, dass dieser Zusammenhang bei den einzelnen Genotypen unterschiedlich stark ausgeprägt war. Timor reagierte schneller mit dem Schließen der Stomata als 0 588. Dies passt zu den Ergebnissen, die für die Messungen der Transpirationsrate und des Trieb-Wasserpotenzials in Abhängigkeit von der Substratfeuchte ermittelt worden waren.

6.3.7 Diskussion Gaswechsel

Stomata spielen eine sehr wichtige Rolle in der Überlebensstrategie von Pflanzen unter Trockenstress. Unter Trockenstressbedingungen schließen Pflanzen ihre Stomata um die Transpiration und den damit verbundenen Wasserverlust zu reduzieren (SAIE *et al.*, 2008). Daher die Annahme, dass die Genotypen die im Dehydrierungsexperiment als tolerant eingestuft wurden, früher mit Stomataschluss auf Trockenheit reagierten als sensibel eingestufte Genotypen.

Das Lichtangebot, unter dem die Messungen stattfanden, war mit 30 µmol m^{-2} s^{-1} gering. Die Stomata waren unter diesen Bedingungen aber noch geöffnet, es fand

noch ein Gasaustausch statt. Da die Bedingungen für alle Genotypen gleich waren, sind die gemessenen Werte miteinander vergleichbar. Da die Dehydrierungsexperimente ebenfalls unter diesen Lichtbedingungen stattfanden und die Ergebnisse der Gaswechselmessungen mit ihnen verglichen werden sollten, wurde keine höhere Belichtungsintensität gewählt. Im Vordergrund der Untersuchungen stand der Trockenstress und die Reaktion der Genotypen auf das Austrocknen des Substrates. Strahlung sollte als Faktor ausgeschlossen werden, um nur Trockenstressreaktionen zu ermitteln. Daher wurden die geringen Lichtverhältnisse in diesen Versuchen akzeptiert.

Der Zusammenhang zwischen dem Stomataverhalten und dem Einsetzen von Welke sollte in diesem Versuch aufgezeigt werden.

Durch die in dem Versuch erhobenen Daten kam es zu folgendem Ranking:

1. 9346
2. Timor
3. Moorea
4. 0 588

Dieses Ranking stimmt mit dem im Dehydrierungsexperiment aufgestellten Ranking überein. Man könnte auch Timor den ersten Platz zuteilen, da er eine flexiblere Reaktion zeigt als 9346.

Bei geringer Wasserverfügbarkeit kann die stomatäre Leitfähigkeit beeinflusst sein bevor sich der Wasserstatus der Pflanzen verändert. Die stomatäre Leitfähigkeit ist demnach ein besserer Indikator für trockenen Boden als das Wasserpotential einer Pflanze, (GRANT *et al.*, 2006). Auch in dieser Arbeit schien das Stomatamanagement besser geeignet als das Trieb-Wasserpotenzial, um ein Ranking der Genotypen aufstellen zu können.

Man muss allerdings berücksichtigen, dass zwei Reaktionstypen gefunden worden sind.

Während Timor, Moorea und 0 588 die Transpirationsrate mit zunehmender Trockenheit deutlich verringerten, zeigte 9346 bereits bei feuchtem Substrat eine geringe Transpirationsrate. Dieses Verhalten passte zum Wuchshabitus. Die nur wenig geöffneten Stomata könnten eine mögliche Erklärung für seinen schwachen Wuchs sein.

Allerdings wurde im Rahmen der Arbeit die Stomatadichte der einzelnen Genotypen nicht überprüft. Es fand keine Stomatazählung statt. Es wäre also auch möglich, dass

der Genotyp 9346 über eine geringere Stomtaanzahl verfügt als beispielsweise der Genotyo 0 588.

Stomata halten den Wasserverlust im Verhältnis zum aufgenommenen CO_2 möglichst gering (COWAN, 1977, COWAN und FARQUHAR 1977). Die optimale Transpirationsrate oder der Effekt von Wassermangel auf die physiologischen Prozesse von Pflanzen werden durch diese Hypothese jedoch nicht erklärt (JONES, 1998). Dafür könnte die Ermittlung des Wasserausnutzungskoeffizienten nützlich sein.

Der Wasserausnutzungskoeffizient (WUE) steht für das Verhältnis zwischen dem während der Photosynthese aufgenommenen CO_2 und dem während der Transpiration verbrauchten H_2O (CODON *et al.*, 2004).

Für mehrjährige Pflanzen ist ein hoher WUE und eine geringe stomatäre Leitfähigkeit vermutlich ein Vorteil unter Trockenstress, für kurzlebigere Pflanzen kann ein niedriger WUE aber einen Vorteil bedeuten (HESCHEL *et al.*, 2005).

In diesem Versuch wurde mit einjährigen Pflanzen gearbeitet. Sie wurden als trockentolerant eingestuft, wenn sie früh mit Stomataschluss auf Trockenheit reagierten. Die Folge wäre ein niedriger WUE. Demnach würden Timor, Moorea und 0 588 besser bewertet als 9346. Allerdings stand der Wasserausnutzungskoeffizent (WUE) in diesen Versuchen eher im Hintergrund des Interesses, da die Lichtbedingungen in der Klimakammer wesentlich geringer waren als unter Gewächshausbedingungen. Der Wert für den WUE könnte sich unter anderen Bedingungen deutlich verändern. Zum anderen stand die Produktivität der Genotypen in diesen Versuchen nicht im Vordergrund, sondern der Zierwert, also wie lange sie einen Dehydrierungsprozess überstehen können ohne Welke zu zeigen. Dafür ist aber das schnelle Schließen der Stomata unter Trockenstressbedingungen von Vorteil.

Der Versuch zeigte auch eine signifikante Beziehung zwischen dem mittäglichen Trieb-Wasserpotenzial und der stomatären Leitfähigkeit. WILLIAMS *et al.* (2011) konnten für Wein ebenfalls eine signifikante Beziehung zwischen diesen Parametern ermitteln. Die Ergebnisse passen dazu, dass sowohl der Stomataschluss, als auch das Trieb-Wasserpotenzial eine enge Beziehung zum Wassergehalt im Substrat zeigen. Auch wenn viele Signale einen Einfluss auf das Schließen der Stomata unter Trockenheit haben und ABA, hydraulische Signale oder Aquaporine einen größeren Einfluss darauf ausüben als die Veränderung des Blatt Wassergehalts (LOVISOLO *et*

al, 2010), so scheint bei Impatiens das Trieb-Wasserpotenzial ebenfalls einen Einfluss auszuüben.

6.3.8 Gravimetrische Transpirationsstudien an Einzelblättern

Die Methode der Einzelblattwägung wurde als Vereinfachung der Gaswechselmessungen durchgeführt. Man kann mit dieser Methode innerhalb kürzester Zeit mehr Blätter messen als dies mit einem Gaswechselmessgerät möglich wäre. Daneben wurde mit dieser Methode die Vereinfachung der Dehydrierungsexperimente angestrebt. Die Hypothese lautete, dass der Gewichtsverlust von Einzelblättern dem Gewichtsverlust durch Transpiration von Pflanzen entspricht. Bei den Einzelblattuntersuchen ging es im Wesentlichen um zwei Fragen:

1. Kann man die Ergebnisse aus dem Dehydrierungsexperiment mit einzelnen Blättern nachstellen?
2. Decken sich die Ergebnisse für das Stomatamanagement mit den Austrocknungsverhalten einzelner Blätter?

Dafür wurden jeweils acht Blätter der vier Impatiens Genotypen Moorea, Timor, 0588 und 9346 über einen Zeitraum von 24 Stunden ausgetrocknet (4 Wdh.). Die Messungen fanden in der Klimakammer unter standardisierten Bedingungen statt (siehe Material und Methoden). Während der ersten Stunde wurden sie in Intervallen von 15 Minuten gewogen, in den darauf folgenden sieben Stunden wurden sie stündlich gewogen, dann wieder nach 24 Stunden.

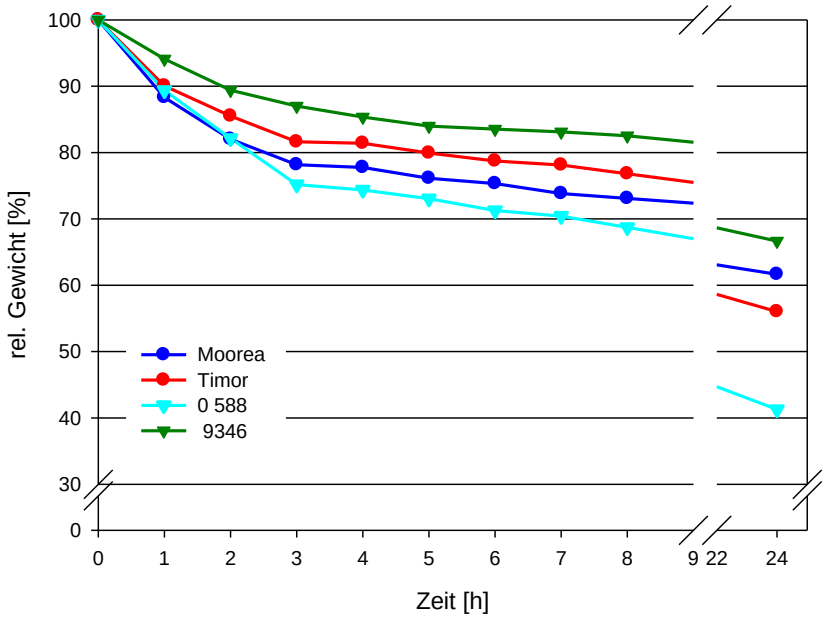


Abb. 49: Relativer Gewichtsverlust von Einzelblättern über den Zeitraum von 24 Stunden.

Der Gewichtsverlust im Zeitraum von 24 h spiegelte das Ergebnis der Transpirationsstudien wieder (Abb. 49). Moorea und 0588 verloren über den gleichen Zeitraum mehr Gewicht, also Wasser, als die anderen beiden Genotypen. Die Unterschiede sind allerdings nicht statistisch signifikant.

In der nachfolgenden Abbildung 50 ist der Gewichtsverlust über einen Zeitraum einer Stunde dargestellt. Die Unterschiede zwischen den Genotypen sind nicht statistisch signifikant, die Tendenz bleibt aber gleich.

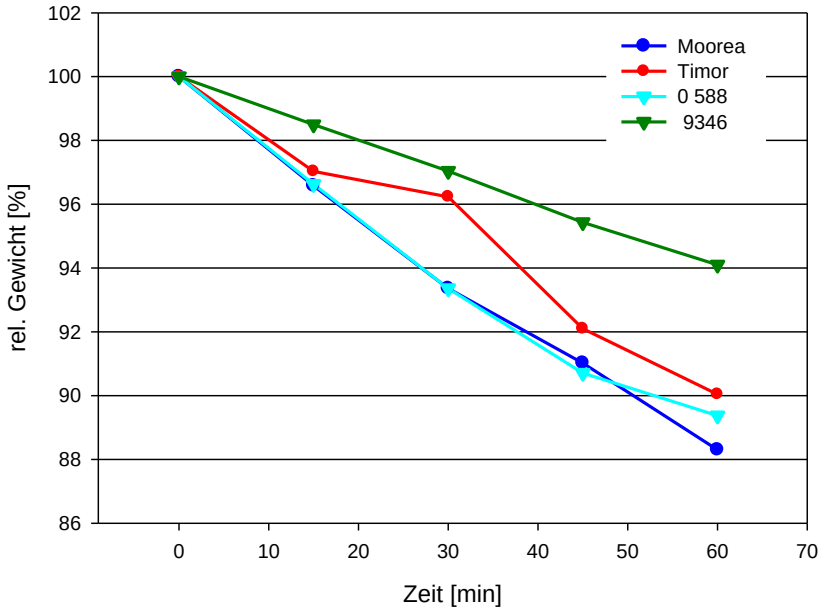


Abb. 50: Relativer Gewichtsverlust von Einzelblättern über den Zeitraum von einer Stunde.

6.3.9 Diskussion Einzelblattuntersuchungen

In diesen Versuchen zeigte sich, dass die Ergebnisse für das Austrocknungsverhalten von Einzelblättern eng mit den Ergebnissen für das Stomatamanagement und dem Dehydrierungsverhalten von Pflanzen verknüpft sind. In allen drei Untersuchungen konnte das gleiche Ranking aufgestellt werden.

1. 9346
2. Timor
3. Moorea
4. 0 588

Die Versuche zum Einzelblattverhalten sollten als möglicher Schnelltest dienen um in kürzester Zeit eine Aussage über das Dehydrierungsverhalten von Genotypen zu erhalten.

Blätter repräsentieren den Hauptzusammenhang zwischen Pflanze und Atmosphäre (BURGHARDT und RIEDERER, 2003). Über sie erfolgt die Transpiration, somit wäre es möglich über das Dehydrierungsverhalten von Einzelblättern Rückschlüsse auf das Transpirationsverhalten ziehen zu können. Um diese zu konkretisieren wurde der Gewichtsverlust innerhalb der ersten Stunde genauer verfolgt, da sich die Stomata bei abgetrennten Blättern innerhalb einer Stunde, meist innerhalb der ersten 5-30 Minuten schließen und dann nur noch eine kutikuläre Transpiration stattfindet (LÖSCH, 2003).

Die in diesen Versuchen erzielten Ergebnisse deuten darauf hin, dass das Dehydrierungserhalten von Einzelblättern einen Hinweis auf das Verhalten von Pflanzen unter Trockenstressbedingungen geben kann. Einzelblätter auszutrocknen könnte daher durchaus als Schnelltest beziehungsweise Vortest dienen, um Genotypen bezüglich ihrer Trockentoleranz zu bewerten.
Diese Erkenntnisse sind nicht ganz neu, es gibt dazu bereits Studien bei Rosen, auch hier wurden Blätter ausgetrocknet um das Stomatamanagement zu testen (MORTENSEN und GISLEROD, 2000; MARISSEN, 2005).

6.3.10 Thermografische Untersuchungen

Wie bereits zuvor erläutert, sind Transpirationsstudien mit Hilfe von Porometern zeitaufwendig und wegen der punktuellen Messungen können sie auch Schwankungen unterworfen sein. Verschiedene Arbeiten beispielsweise von Jones (2004, 2007) zeigten, dass Transpirationsstudien auch mit Hilfe der Thermografie möglich sind. In diesen Arbeiten ist gezeigt worden, dass ein Zusammenhang zwischen der Blatttemperatur und dem Öffnungsgrad der Stomata besteht. Nachfolgend soll also der Frage nachgegangen werden, ob die Thermografie auch bei Impatiens einsetzbar ist.
Ziel der Thermografischen Untersuchungen in dieser Arbeit war es, eine Korrelation zwischen der Pflanzentemperatur und dem Öffnungsgrad der Stomata zu überprüfen. Die Hypothese lautete, je höher die Blatttemperatur einer Pflanze ist, umso weiter sind ihre Stomata geschlossen.
Die Untersuchungen erfolgten erneut mit den vier Impatiens Genotypen Moorea, Timor, 0 588 und 9346. Die thermografischen Aufnahmen wurden parallel zu den Gaswechselmessungen durchgeführt, über einen Austrocknungsbereich des Substrates von 0 bis -700 hPa.
Um die Aufnahmen hinsichtlich ihrer Tauglichkeit für Impatiens bewerten zu können, wurde zunächst überprüft, ob im Laufe des Dehydrierungsprozesses eine Blatterwärmung festzustellen war. Dafür wurde die Pflanzentemperatur bei ca. -100 hPa und bei ca. -700 hPa Saugspannung im Substrat verglichen.

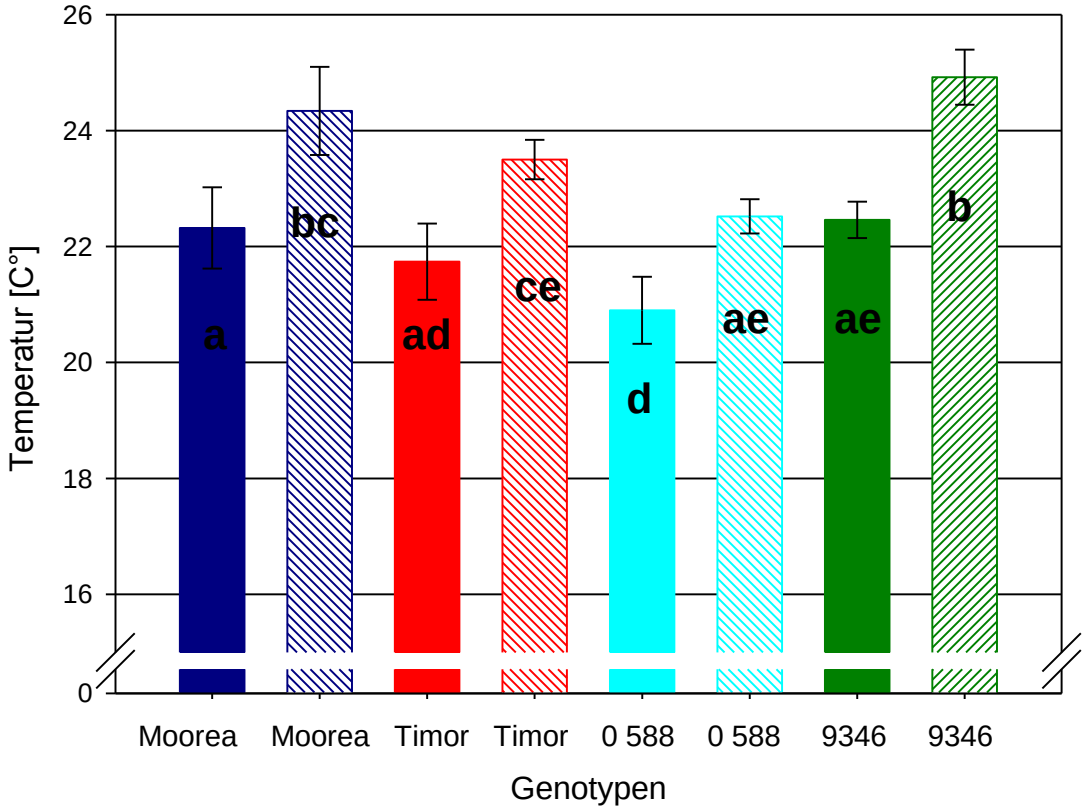


Abb. 51: Pflanzentemperatur von vier Impatiens Genotypen, links gefüllte Säule bei -100 hPa, rechts gestreifte Säule bei -700 hPa Saugspannung im Substrat (n = 8). Angegeben sind Mittelwerte ± Standardabweichung. Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Genotypen (Tukey-Test, $p \leq 0{,}05$).

Aus Abbildung 51 ist zu entnehmen, dass sich alle Genotypen im Rahmen des Dehydrierungsprozesses signifikant erwärmt haben. Die Erwärmung betrug ca. 2 °C. Statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Genotypen sind nur teilweise vorhanden.

Um den Zusammenhang zwischen stomatärer Leitfähigkeit und Pflanzentemperatur zu verdeutlichen, wurde der Crop Water Stress Index (CWSI) ermittelt. Dafür wurde mit jedem Bild die Aufnahme einer Pflanze, im Vergleich mit einem feuchtem und trockenem Referenzblatt getätigt.

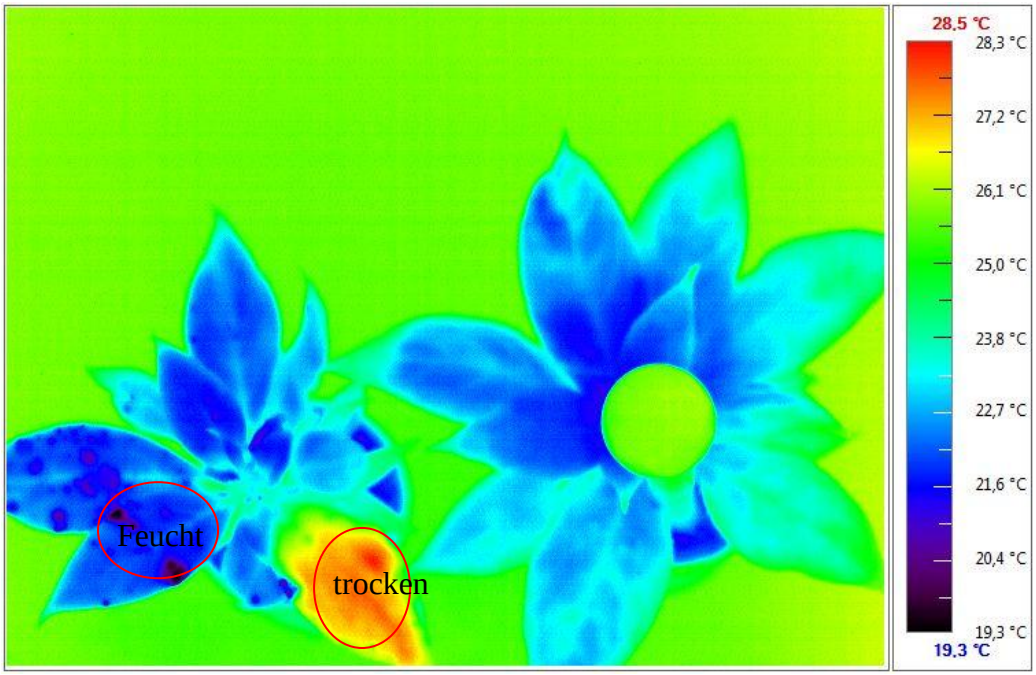


Abb. 52: Thermografische Aufnahme zweier Impatiens Pflanzen, links Referenzpflanze mit feuchtem und trockenem Referenzblatt, rechts Messpflanze.

Die Aufnahme in Abbildung 52 zeigt die Messpflanze in noch relativ feuchtem Zustand bei ca. -200 hPa Saugspannung im Substrat. Die linke Referenzpflanze wurde täglich bewässert, so dass sie nie unter -150 hPa Saugspannung im Substrat austrocknete. Zusätzlich wurde ein Blatt mit Wasser besprüht, welches als feuchte Referenz diente. Es ist kaum ein Unterschied zu den anderen Blättern sichtbar, da die Pflanze gut mit Wasser versorgt war. Das trockene Referenzblatt war mit Vaseline bestrichen, dadurch war es deutlich wärmer als die restliche Pflanze.
Mit Hilfe dieser Referenzen wurde der CWSI berechnet. In der nachfolgenden Abbildung 53 ist die Beziehung der stomatären Leitfähiogkeit und des CWSI dargestellt.

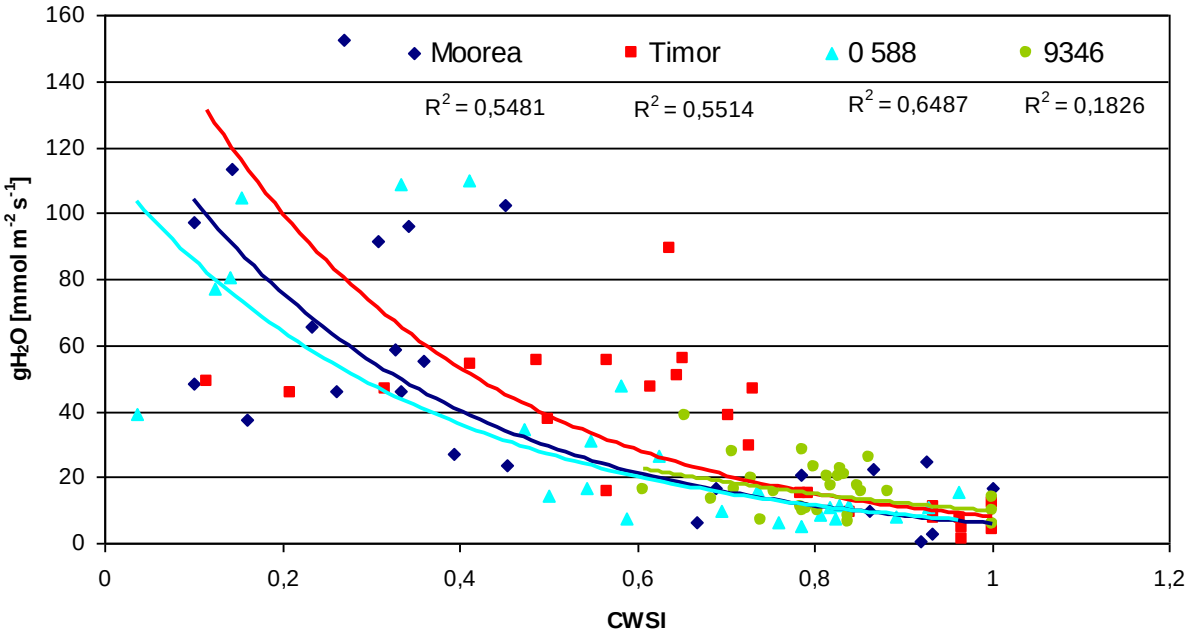


Abb. 53: Stomatäre Leitfähigeit von vier Impatiens Genotypen in Abhängigkeit vom Corp Water Stress Index (CWSI = (Tplant-Twet)/(Tdry-Twet)).

Die stomatäre Leitfähigkeit nahm mit zunehmendem CWSI ab. Dies war bei allen vier Genotypen der Fall. Allerdings war der Zusammenhang zwischen den beiden Werten für den Genotyp 9346 am wenigsten ausgeprägt. Auch bei diesem Genotyp kam es zwar wie in Abbildung 51 zu sehen, zu einem deutlichen Anstieg der Pflanzentemperatur, aber erst am letzten Messtag bei ca. -700 hPa. Davor war die Pflanzentemperatur relativ gleich bleibend. Für die anderen drei Genotypen lässt sich mit Hilfe dieser Messung folgendes Ranking aufstellen:

6.3.11 Diskussion Thermografische Untersuchungen

Das Interesse an der Verwendung von Infrarot Messungen, um die Pflanzentemperatur als Indikator für Stress zu nutzen, dauert schon viele Jahre an. Frühere Arbeiten kommen beispielsweise von JACKSON *et al.,* (1981) oder IDSO, (1982). IDSO (1982) war es auch der den Crop Water Stress Index (CWSI) definierte. Bisherige thermografische Untersuchungen sind hauptsächlich an Wein getätigt worden, zu Zierpflanzen konnte keine Literatur gefunden werden. Daher ging es in diesem Versuch zunächst darum herauszufinden, inwieweit bei Zierpflanzen die

Temperatur geeignet ist, um Rückschlüsse auf den stomatären Öffnungsgrad zu ziehen.

Dafür wurde zunächst einmal die Temperatur bei feuchtem und trockenem Substrat verglichen. Alle Genotypen zeigten eine signifikante Erwärmung. Problematisch an dieser Messung war, dass sie in Klimakammern stattfand und es auch dort zu Schwankungen in Temperatur und Luftfeuchte kommen kann (siehe Abb. 6 und 7). Des Weiteren können ein Anspringen der Lüftung und der dadurch entstehende Luftzug zum Schließen der Stomata führen, so dass die Temperatur im Moment der Aufnahme verfälscht sein kann. Ohne Informationen zu diesen Einflussfaktoren ist die Messung der Blatttemperatur nicht aussagekräftig genug, um Rückschlüsse auf Transpiration oder stomatäre Leitfähigkeit zu ziehen (LEINONEN und JONES 2004).

Eine Möglichkeit dieses Problem zu umgehen ist, feuchte und trockene Referenzoberflächen als Basis zu nutzen, die unter den gleichen Bedingungen aufgenommen werden und diese mit den gemessenen Blatttemperaturen zu vergleichen (JONES, 1999).

Mit Hilfe dieser Referenztemperaturen berechnet sich der von IDSO (1982) definierte Crop Water Stress Index (CWSI = (Tplant-Twet)/(Tdry-Twet)).

So können Umweltfaktoren herausgerechnet werden. Ein Problem, dass trotz Berechnung des Index bestehen bleibt, ist der Unterschied in der Einstrahlung, oder ob alle Blätter die gleiche Ausrichtung zur Sonne haben, welche die Energiebalance beeinflusst (JONES *et al.*, 2002). Dieses Problem wurde durch das Arbeiten in der Klimakammer unter immer gleichen Lichtbedingungen umgangen.

Der CWSI wurde auch in diesem Versuch verwendet. Versuche im Weinbau haben gezeigt, je näher der Wert des CWSI an eins ist, umso gestresster ist die Rebe (WHEATON *et al.*, 2011). Auch in diesen Versuchen ist davon auszugehen, dass die Pflanze einem höheren Stress ausgesetzt ist, je näher der Wert des CWSI an eins liegt, da dann die trockene Referenztemperatur, die eine Pflanze mit geschlossenen Stomata symbolisiert, gleich der gemessenen aktuellen Pflanzentemperatur ist.

Der Zusammenhang zwischen dem Schließen der Stomata, also dem Abnehmen der stomatären Leitfähigkeit, und dem Anstieg des CWSI konnte auch in diesem Versuch nachgewiesen werden.

Lediglich beim Genotyp 9364 war kein ausgeprägter Zusammenhang zu erkennen. Nach der Hypothese müsste dieser Genotyp, da er allgemein über eine niedrige

Transpirationsrate verfügt, durchgehend eine höhere Temperatur aufweisen als die anderen drei Genotypen. Dies war nicht feststellbar.

Für die anderen drei Genotypen lässt sich folgendes Ranking aufstellen:

1. Timor
2. Moorea
3. 0 588

Dieses stimmt mit dem in den Gaswechselmessungen aufgestellten Ranking überein. Somit lässt sich sagen, dass auch für Impatiens die Pflanzentemperatur als Indikator für den Öffnungsgrad der Stomata dienen kann.

Der Vorteil thermographischer Messungen ist eine schnellere Durchführbarkeit als Gaswechselmessungen und die Möglichkeit mehrere Pflanzen auf einmal zu erfassen. Dadurch eignet sich die Methode auch für die praktische Pflanzenzüchtung.

7. Abschließende Diskussion

Die Dissertation ist angegliedert an ein an der Forschungsanstalt Geisenheim laufendes Projekt zur ,,Entwicklung standardisierter Screening-Verfahren zur Identifizierung und Bewertung trockenstress-toleranter Genotypen von Zierpflanzen''
Es sollte ein praxisverwertbares Screeningkonzept zur Identifizierung trockenstresstoleranter Genotypen von Beet- und Balkonpflanzen entwickelt werden.
Das Konzept sah einen Prüfstand vor, um Trockenstress reproduzierbar zu erzeugen. Der Prüfstand bestand aus einem drei-Stufen-Konzept: (i) Vegetationsversuche im Gewächshaus, um Wachstumsminderung und Adaption an Trockenstress zu überprüfen, (ii) De- und Rehydrierungsexperimente um den Faktor Welke als geeigneten Parameter für ein Ranking zu evaluieren und (iii) Physiologische Untersuchungen zur Trockenstresstoleranz. In der vorliegenden Dissertation wurden schwerpunktmäßig die Stufen zwei und drei bearbeitet. Der Fokus der Dissertation lag dabei auf Impatiens *NeuGuinea* Grp.

Einer der Arbeitsschwerpunkte war das Welkeverhalten als Indikator der Trockenstresstoleranz. In diesem Zusammenhang wurde der Bergriff Trockenstresstoleranz folgendermaßen definiert: Trockentolerant ist der Genotyp, der seinen Zierwert ohne Wasserzufuhr am längsten aufrecht halten kann. Anders gesagt, wann reagiert ein Genotyp mit Welke innerhalb eines Dehydrierungsprozesses. Dafür wurde ein Dehydrierungsexperiment am Standort etabliert, welches für den praktischen Zierpflanzenzüchter leicht nachzumachen ist. Das Dehydrieren von Pflanzen ist ein in der Literatur anerkanntes Verfahren, um die Trockenstresstoleranz zu detektieren (HASSANEIN *et al.*, 2006; VECCHIA *et al.,* 1998). Das Ranking der Genotypen, welches innerhalb der Dehydrierungsexperimente aufgestellt wurde, diente als Eichung, um die anderen getesteten Methoden auf ihre Eignung zu überprüfen.
In den Untersuchungen zum Dehydrierungsverhalten haben sich Widersprüche in den Wiederholungen gezeigt, die Vorbehandlungseffekte waren nur teilweise erkennbar (Tabelle 6-9). Dies kann auf verschiedenen Ursachen beruhen. Es wurde versucht die Dehydrierungsexperimente immer mit dem gleichen **Wasserzustand des Substrates** zu beginnen (4.1.2). Da die Versuche aber über mehrere Jahre mit

leicht variierender Substratzusammensetzung stattfanden, könnte darin ein möglicher Fehler liegen.

Um die **Blattfläche** als Einflussfaktor zu eliminieren wurde das Ranking anhand des bereinigten Gewichts aufgestellt (5.4). Für die Ermittlung des bereinigten Gewichts wurde ein Referenzfrischgewicht verwendet. Es ist zwar versucht worden die Blattfläche als Einflussfaktor auf das Welkeverhalten auszuschließen, durch die Verwendung von Referenzpflanzen könnte dort aber ein möglicher Fehler liegen.

Ein weiteres Problem ist die **Exaktheit der Welkebonitur**. Die Bonitur erfolgte täglich zur gleichen Zeit. Innerhalb dieses Zeitfensters übersprangen die Pflanzen teilweise eine Boniturnote. Um das Verfahren zu optimieren müsste möglicherweise zwei bis dreimal am Tag bonitiert werden, was den Aufwand erheblich vergrößern würde. Außerdem bleibt trotz genau gefertigtem Boniturschema die subjektive Wahrnehmung als Fehlerquelle. Um diesen Fehler zu minimieren, wurde die Bonitur ausschließlich von zwei Personen durchgeführt. Es bleibt aber bei einem grundsätzlichen Problem des Rankings, da es sich nicht um metrische Daten handelt.

Das Dehydrierungsexperiment wurde aber vor allem auf der Grundlage kreiert, den Züchtern ein schnelles leicht reproduzierbares Screening-Verfahren zur Verfügung zu stellen. Seine Eignung dafür ist allerdings nicht endgültig geklärt. Die Ergebnisse konnten zwar zum Großteil reproduziert werden, die Anrwendung setzt aber Klimakammern und durch das Topfen auf ein einheitliches Gewicht eine gewisse Ausstattung an Räumlichkeiten und Arbeitskräften voraus.

Neben dem Dehydrierungsverhalten der Pflanzen wurde auch deren Regenerationspotenzial überprüft, also die Reparatur eines physiologischen Schadens (SHERWIN *et al.*, 1996). Die Untersuchungen zum Rehydrierungsverhalten der Genotypen wurden aus versuchstechnischen Gründen im Gewächshaus durchgeführt. Aufgrund der sich ändernden Einstrahlung waren **keine einheitlichen klimatischen Bedingungen** gegeben, wie es im Dehydrierungsexperiment der Fall war. Dies wäre eine Erklärung dafür, dass das Ranking der Genotypen sich weniger eindeutig zeigte als das für die Dehydrierung erstellte Ranking (Tab. 10-13). Eine weitere Erklärung für die im Ranking aufgetretenen Unstimmigkeiten könnte die unterschiedliche Ausgangsposition der Pflanzen sein. Es wurden Pflanzen miteinander verglichen die unterschiedlich lang dehydriert worden waren. Die Zeit bis

zum Erreichen der Welkeboniturnote 9 war unterschiedlich lang und damit auch der **Wasserverlust im Substrat**. Physiologisch wurde der Rehydrierungsprozess nicht weiter untersucht. Abschließend kann aber festgehalten werden, dass alle Genotypen in der Lage waren sich von einem Dehydrierungsprozess mit Welkeboniturnote 9 zu erholen. Bei einigen Genotypen blieben zwar Nekrosen zurück oder es kam zum Abstoßen einzelner Blätter, dies war aber nach ca. zwei Wochen Kulturführung nicht mehr erkennbar.

Mit Hilfe physiologischer Messmethoden sollte die Trockenstresstoleranz der einzelnen Genotypen untersucht werden. Im Fokus der Untersuchungen standen das Trieb-Wasserpotenzial und das Stomatamanagement der Genotypen.
Wasserpotenzialmessungen gehören in der Literatur zu den Standartmethoden, um den Wasserhaushalt von Pflanzen zu untersuchen (RICHTER, 1997; PRIVE *et al.*, 2003). Das mittägliche Blatt-Wasserpotenzial oder Trieb-Wasserpotenzial dient als Standardparameter um den pflanzlichen Wasserstatus zu bestimmen (SELLES *et al.,* 2004). Die Messung des mittäglichen Wasserpotenzials wurde auch in dieser Arbeit durchgeführt, um die Genotypen miteinander zu vergleichen. Eine transpirationsbedingte Wasserabgabe bewirkt einen Turgorverlust des Mesophylls, welcher ein Absinken (Negativ-Werden) des Wasserpotenzials nach sich zieht (SCHALLER, 2007). Die Hypothese dieser Arbeit lautete, dass trockenstresstolerante Genotypen den Wasserhaushalt unter Trockenstress besser regulieren und daher das Wasserpotenzial langsamer absenken.
Der Genotyp 0 588 zeigte frühzeitig Welke und eine starke Absenkung des Trieb-Wasserpotenzials, Timor dagegen mit geringerer Welkeneigung zeigte ein höheres Wasserpotenzial bei gleicher Saugspannung im Substrat. Aber der im Dehydrierungsexperiment als am besten eingestufte Genotyp (9346) reagierte mit einem rascheren Abfall des Wasserpotenzial als es der Hypothese nach zu erwarten gewesen wäre. Daher kann man sagen, dass das Ranking, das für die vier getesteten Genotypen aufgrund der Trieb-Wasserpotenzialmessungen aufgestellt worden war, nur teilweise in dem für das Dehydrierungsexperimente aufgestellten Ranking übereinstimmt. Gründe hierfür könnten sein, dass es sich bei den Messungen mit der Scholander Bombe nach ZIMMERMANN *et al.* (2004) **nur um punktuelle Messungen** handelt. Außerdem wurde dass **mittägliche Wasserpotenzial** der Genotypen erfasst. Nach WILLIAMS und ARAUJO (2002) besteht

eine gute Korrelation zwischen mittäglichem Wasserpotenzial und dem frühmorgendlichen Wasserpotenzial, Vorversuche bestätigten diese Aussage.
Aber die im Tagesverlauf zunehmende Trockenheit der Luft bewirkt Wasserverluste in den Blättern, die nicht völlig kompensiert werden können. Als Folge sinkt das Wasserpotenzial (SCHALLER, 2007). Das frühmorgendliche Wasserpotenzial stellt ein Gleichgewichts-Wasserpotenzial dar, da zu diesem Zeitpunkt keine Transpiration stattfindet. So könnte die Messung des mittäglichen Wasserpotenzials eine mögliche Fehlerquelle darstellen und der Genotyp 9346 möglicherweise sensibler darauf reagieren als die anderen drei Genotypen.
Die Messung des Wasserpotenzials allein ist nicht aussagekräftig genug um die Genotypen hinsichtlich ihrer Trockenstresstoleranz zu bewerten. Des Weiteren handelt es sich um eine invasive Methode und stellt somit für die Züchter einen Nachteil dar.
Im Vergleich zu den Trieb-Wasserpotenzial Messungen lassen sich durch das Aufstellen von pV-Kurven mehr Informationen gewinnen. Es kann eine Aussage über das osmotische Potenzial der Genotypen getätigt werden. Am Turgornullpunkt ist die Zellwand entspannt und das Zell-Wasserpotenzial ist gleich dem osmotischen Potenzial (SCHULZE *et al.,* 2005). Betrachtet man die erstellten Druck-Volumen-Analysen der einzelnen Genotypen, so ist zu erkennen, dass der Genotyp 9346 seinen Turgornullpunkt bei einem um ca. 0,4 MPa geringeren Treib-Wasserpotenzial Wert hatte als Timor oder Moorea. Demnach verfügt er über ein geringeres osmotisches Potenzial. Allerdings war das relative Wasserdefizit am Turgornullpunkt vergleichsweise höher als bei Moorea oder 0 588. Diese Studie deutet darauf hin, dass die toleranteren Typen wie Timor über ein höheres osmotisches Potenzial verfügen.
Betrachtet man das Trieb-Wasserpotenzial der vier Genotypen im Zusammenhang mit deren stomatärer Leitfähigkeit, so stimmt das erstellte Ranking mit dem für die Dehydrierungsexperimente erstellten Ranking überein. Auf einen Anstieg des Trieb-Wasserpotenzials reagierten alle Genotypen mit dem Schließen der Stomata. 9346 und Timor senkten die stomatäre Leitfähigkeit allerdings stärker ab als Moorea und 0 588, die im Dehydrierungsexperiment als sensibel eingestuft worden waren. Die Betrachtung des Wasserpotenzials allein ist also nicht aussagekräftig genug um die Genotypen zu bewerten. Bezieht man aber pV-Kurven und stomatäre Messungen in die Bewertung der Genotypen mit ein, also das Zusammenspiel aus Wasserpotenzial

und Transpirationsrate, so erhält die Messung eine vielfältigere Aussagekraft und kann zur Bewertung der Trockenstresstoleranz genutzt werden.

Unter Trockenstressbedingungen schließen Pflanzen ihre Stomata um die Transpiration und den damit verbundenen Wasserverlust zu reduzieren (SAIE, *et al*, 2008). JONES *et al* (1991) sagen, dass es die Hauptaufgabe der Stomata ist, Schaden unter Wassermangel zu minimieren. Der größte Schaden für Zierpflanzen ist der Verlust des Zierwertes, beispielsweise durch Welke. Daher lautete die aufgestellte Hypothese, dass trockenstresstolerante Genotypen früher mit Stomataschluss auf einsetzende Trockenheit reagieren. Es wird postuliert, dass frühzeitiger Stomataschluss Turgeszenzverluste vermeidet und somit Welke vorbeugt. Die Reaktionskette, die vorausgesetzt wurde, lautete:

Absinken des WP im Substrat = Stomataschluss = geringe Absenkung des WP im Trieb = späte Welke.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher die Transpirationsrate der Genotypen in Abhängigkeit von der Saugspannung im Boden betrachtet. Die Genotypen reagierten hypothesenkonform. 9346 und Timor sind in den Dehydrierungsexperimenten als tolerant eingestuft worden und reagierten auf das Austrocknen des Substrates schneller mit Stomataschluss als die als sensibel eingestuften Genotypen Moorea und 0 588. Die beiden toleranteren Genotypen verfügten auch über eine geringere Transpirationsrate bei 700 hPa Saugspannung im Substrat. Es lassen sich allerdings zwei Strategien erkennen. Während Timor mit feuchtem Substrat über eine „hohe“ Transpirationsrate verfügt und diese mit Austrocknung des Substrats immer geringer wird, hat der Genotyp 9346 bereits bei feuchtem Substrat eine vergleichsweise niedrige Transpirationsrate, die dann noch weiter absinkt.

Demnach kann festgehalten werden, dass sowohl beim Wasserpotenzial als auch beim Gaswechsel eine Beziehung zum Welkeverhalten der Genotypen besteht. Aber dies lässt sich nur mit Hilfe von Dehydrierungsexperimente feststellen und kann nicht als Frühindikator genutzt werden. Die Messmethoden eignen sich also nicht für ein Schnellscreening der Genotypen, sie können lediglich die Beobachtungen aus dem Dehydrierungsexperiment erklären.

Eine weitere getestete Methode war die Thermografie. Von ihr wurde sich eine schnellere Aussage über das Verhalten der Genotypen unter Trockenstress erhofft. Diese Methode bietet die Möglichkeit, die Temperatur einer ganzen Pflanze zu erfassen, während die durchgeführten Gaswechselmessungen (GFS 3000, Firma Walz) den Nachteil haben, dass immer nur ein Blatt einer Pflanze gemessen werden kann. Die Problematik der Einzelblattbetrachtung statt einer Pflanze oder einem Pflanzenbestand wird auch von JONES (1998) kritisch bewertet.

Thermografische Aufnahmen haben das Potenzial direkte Blattmessungen zu ersetzen und unterstützen eine robustere Messung des pflanzlichen Wasserstatus (COHEN *et al*, 2005). Viele Arbeiten beschäftigen sich mit dem Zusammenhang der stomatären Leitfähigkeit oder des Stomataschlusses und der Blatterwärmung (JONES *et al.*, 2002, LEINONEN *et al.*, 2004, FUENTES *et al.*, 2005, GRANT *et al.*, 2006).

In der vorliegenden Arbeit sollte gezeigt werden, dass auch bei Zierpflanzen ein enger Zusammenhang zwischen stomatärer Leitfähigkeit und Blatttemperatur besteht.

Betrachtet man das Ergebnis, so ist zu erkennen, dass bei allen Genotypen die Temperatur mit sinkender stomatärer Leitfähigkeit ansteigt. Allerdings sind die Regressionskoeffizienten mit 0,18-0,64 nicht vollkommen zufrieden stellend. Die in den genannten Arbeiten erzielten Werte liegen eher bei ca. 0,9. Die Arbeiten wurden aber größtenteils an Wein aufgestellt. Der Aufbau einer Rebe ist ganz anders als der einer Impatienspflanze, so dass darin möglicherweise der Ursprung des Unterschieds liegt. Für den praktischen Zierpflanzenzüchter bietet sich auch die Möglichkeit Stecklinge in einer Steckpalette aufzunehmen und so mehrere Genotypen auf einmal zu vergleichen.

Ein Anstieg der Temperatur lies sich bereits feststellen, bevor die Pflanzen optisch mit Welke reagierten und kann somit als Frühindikator für Trockenstress dienen.

Insgesamt ist die Bewertung der Methode aber noch nicht abgeschlossen, weitere Untersuchungen müssten folgen. Die Perspektive ist aber vor allem aufgrund der Einfachheit und Geschwindigkeit der Methode gegeben.

7.1 Gesamtbewertung

Alle in der Arbeit getesteten Methoden wurden anhand des für die Genotypen aufgestellten Rankings bewertet. Alle aufgestellten Rankings basieren auf dem Austrocknen des Substrates. Das Bodenwasserdefizit und die konsequente Absenkung des Boden-Wasserpotenzials dienen häufig als der vorgegebene Stress in einem System. Der Blattwasserstatus ist dann ein Resultat des Bodenwasserdefizits (JONES, 2007). Da alle Rankings auf dieser Grundlage beruhen, lassen sie sich gut miteinander vergleichen. Nach HALL *et al*. (2005) hängt ein Ranking immer stark von der gewählten Umwelt ab. Die hier beschriebenen Experimente fanden mit Ausnahme der Rehydrierungsversuche alle in der Klimakammer unter standardisierten Bedingungen statt, um den Fehler des klimatischen Einflusses gering zu halten.

Die Dehydrierungsexperimente haben sich trotz des damit verbundenen Aufwands als einfache und geeignete Methode zur Charakterisierung des Welkeverhaltens, also einem wichtigen Parameter der Trockenstresstoleranz von Zierpflanzen, gezeigt. Die parallel verlaufenden physiologischen Messungen unterstützen die im Dehydrierungsexperiment getroffenen Aussagen und erklären einen Teil der Ursachen für das unterschiedliche Verhalten der Genotypen. Das Dehydrierungsexperiment erfasst allerdings keine weiteren marktbedeutenden Parameter der Trockenstresstoleranz wie die Reduzierung der vegetativen und generativen Leistung. Erste Untersuchungen im Freiland haben gezeigt, dass das in Klimakammern aufgestellte Ranking und das Welkeverhalten von Genotypen nicht zwangsläufig mit der multiplen Umwelttoleranz im Freiland korrespondiert. Die Einstrahlung hat einen großen Einfluss auf das Verhalten der Genotypen unter Trockenstress. Für den Konsumenten wäre daher eine Kombination von Trocken- und Strahlungsstresstoleranz wünschenswert. In Geisenheim läuft derzeit ein Folgeprojekt zum Thema „Strahlungsstresstolerante Zierpflanzen“, um die Genotypen auch bezüglich dieses Faktors zu bewerten und es den Züchtern zu ermöglichen, Pflanzen auf den Markt zu bringen die Trocken- und Strahlungsstresstolerant sind.

8. Zusammenfassung

Die vorgelegte Dissertation befasst sich mit der Entwicklung eines praxistauglichen Screening-Verfahrens zur Identifizierung trockenstresstoleranter Genotypen von Zierpflanzen. Damit sollen Voraussetzungen zur Wassereinsparung in der Produktion, zur Ausdehnung der Märkte auf wärmere Regionen und zur Verbesserung der Transporttoleranz geschaffen werden.

Die Arbeit wurde im Rahmen eines Verbundprojektes unter Beteiligung von vier Züchtungsunternehmen, dem Forschungszentrum Jülich, der Forschungsanstalt Geisenheim, sowie der GFP durchgeführt. Aufgabe und Ziel der Dissertation war es, ein Boniturschema zur Quantifizierung von Trockenstressreaktion zu erarbeiten, Dehydrierungsexperimente unter gleich bleibenden Klimabedingungen zu entwickeln und nach physiologischen Markern der Trockenstresstoleranz zu suchen. Die Untersuchungen wurden schwerpunktmäßig an Genotypen von *Petunia* Cultivars und *Impatiens* Neu Guinea Grp. durchgeführt. Hierbei wurden folgende Ergebnisse erzielt:

1. Das im Rahmen von Dehydrierungsexperimenten erarbeitete artspezifische **Boniturschema** basiert auf einer exakten Beschreibung des Welkeverlaufs. Bewertet wird der Welkegrad mit Hilfe von Boniturnoten (Note 1 bis 9). Berücksichtigt wurde dabei neben der Blattstellung auch die Oberflächenbeschaffenheit und Farbe der Blätter. Das Schema erwies sich in den Untersuchungen als hinreichend objektiv und präzise. Mit seiner Hilfe konnten die Genotypen hinsichtlich ihrer Trockenstresstoleranz bewertet werden.

2. In Klimakammern wurden die Genotypen unter standardisierten Bedingungen ausgetrocknet. Dabei wurde sowohl der Wasserverlust im Substrat festgehalten, wie auch das Auftreten von Welke. Die **Dehydrierungsexperimente** wurden hinsichtlich der Klimabedingungen (Temperatur, Luftfeuchte und Bestrahlungsstärke) und des Spross- und Substratvolumenverhältnisses so gestaltet, dass die Boniturnote 9 je nach Stresstoleranz der Genotypen und der Vorbehandlung in etwa 5 bis 9 Tagen erreicht wurde. Damit war auch bei einer nur einmal täglichen Bonitur eine ausreichende Differenzierung zwischen den Genotypen gewährleistet.

Das zur Charakterisierung der Stressintensität verwendete Systemgewicht (Substrat und Pflanze) ist allerdings um das Frischgewicht der Genotypen zu korrigieren.

Die untersuchten Impatiens Genotypen verhielten sich hinsichtlich ihrer Trockenstresstoleranz in vielen Wiederholungen als ähnlich und ermöglichten somit ein klares Ranking. Bei den geprüften Petunien Genotypen war die Rangfolge in den einzelnen Wiederholungen dagegen nicht so klar. In diesem Zusammenhang wurde jedoch auch festgestellt, dass das Wasserangebot in der Anzuchtphase ebenfalls einen Einfluss auf das Welkeverhalten nehmen kann.

3. Um **physiologische Marker** für eine Trockenstresstoleranz aufzuspüren, wurden Wasserpotenzialstudien, Gaswechselmessungen und thermografische Untersuchungen im Rahmen von Dehydrierungsexperimenten durchgeführt.

Hierbei hat sich gezeigt, dass trockenstresstolerante Genotypen hinsichtlich der Absenkung des Trieb-Wasserpotenzials tendenziell später und weniger ausgeprägt auf ein Austrocknen der Substrate reagieren als sensible Genotypen. Die Abhängigkeit des Trieb-Wasserpotenzials vom Wasserangebot im Substrat war allerdings nur schwach ausgeprägt und die Differenzierung zwischen den in den Untersuchungen befindlichen Genotypen gering, unter anderem auf Grund der großen Streuung der Messwerte. Deutlich sensibler reagierte die Transpirationsrate der Pflanzen auf das Wasserangebot. Das mit Hilfe dieses Parameters aufgestellte Ranking der Genotypen stimmte mit dem Ranking das aufgrund des Welkeverhaltens im Rahmen der Dehydrierungsexperimente aufgestellt wurde überein. Somit erscheint das Stomatamanagement als aussichtsreicher Indikator für die Identifizierung von Trockenstresstoleranz.

Mit Hilfe der thermografischen Aufnahmen konnte gezeigt werden, dass sich die Pflanzen mit abnehmender Substratfeuchte und dem Schließen der Stomata deutlich erwärmen. Für Impatiens kann die Pflanzentemperatur als Indikator für den Öffnungsgrad der Stomata dienen.

4. Aus den vorgelegten Ergebnissen kann man schließen, dass sich die beschriebenen Dehydrierungsexperimente derzeitig als das einfachste und für die Praxis am besten realisierbare Verfahren zur Identifizierung trockenstresstoleranter Genotypen von Impatiens und Petunien präsentieren. Parallel zur Erfassung des Welkeverlaufs durchgeführte physiologische Messungen, insbesondere die Erfassung des stomatären Öffnungsgrades, unterstützen das Ranking und erklären einen Teil der Ursachen für das unterschiedliche Verhalten der Genotypen. Das Dehydrierungsexperiment erfasst allerdings nicht die für den Produzenten besonders

wichtigen Parameter der Trockenstresstoleranz wie zum Beispiel die Abhängigkeit der vegetativen und generativen Leistung vom Wasserangebot.

5. Evaluierungsuntersuchungen im Freiland haben gezeigt, dass das in Klimakammern aufgestellte Ranking der Trockenstresstoleranz nur bedingt mit der komplexen Stresstoleranz gegenüber hohen Temperaturen, hoher Einstrahlung und Trockenstress korrespondiert. In einem Folgeprojekt soll deshalb ein Screeningkonzept entwickelt werden, in dem die komplexe Klimastresstoleranz geprüft werden kann.

9. Summary

The present thesis gives attention to the development of a practicable screening process for the identification of drought-stress tolerant ornamental plants. Requirements are to be created in terms of reduced water use, market expansion to warmer regions and increased ability of transportation.

The studies were included into a cooperative research project involving 4 plant breeding companies, research centre Jülich, research institute Geisenheim and the GFP. Scope of the thesis was the deployment and evaluation of an assessment scheme to quantify drought-stress reactions, the development of dehydration experiments under stationary climatic conditions and to search for physiological markers of drought-stress tolerance. The experiments were mainly conducted on *Petunia* Cultivars and *Impatiens* Neu Guinea Grp. Genotypes.

Main results of the investigation are listed below:

1. The species specific **assessment schemes** are based on an accurate visual characterization of the wilting process. The wilting is rated using ranks from 1 – 9. Assessed parameters were the phyllotaxy, surface texture and leaf color. The assessment schemes were proved to be acceptably objective and precise during the experiments and the genotypes were evaluated accordingly.

2. The plants were dried out under standardized conditions in climate chambers. The decrease of water as well as the occurrence of wilting was recorded. Climatic conditions (temperature, humidity and radiation) in **dehydration experiments** were set up to reach a rank of 9 in 5 to 9 days according to drought-stress tolerance and pretreatment of genotypes. For this reason, an adequate differentiation between genotypes was ensured even with a single assessment per day. However, the system weight (substrate and plant), which was used to characterize the stress intensity has to be corrected about the fresh weight of plants.

The investigated genotypes of *Impatiens* behaved similarly regarding to their drought-stress tolerance in many replications and consequently allowed for a ranking. In contrast, the ranking order of investigated genotypes of *Petunia* was vague in experimental replications. However, an influence of water supply on the wilting behavior of plants was detected in this context.

3. In order to search for **physiological markers** of drought-stress tolerance, studies on water potential, gas exchange and thermal imaging were conducted in line with the dehydrogenation experiments. A tendency was shown, that drought-stress

tolerant genotypes reacted later and less distinctive on drying of the substrate compared to susceptible plants. But a correlation between water potential of shoots and water supply in the substrate as well as a differentiation between genotypes was certainly week. This was mainly due to high variation of data. The transpiration rate of investigated plants reacted more on water supply though. The ranking, which was based on the parameter transpiration rate correlated well with the ranking of the wilting behavior from the dehydrogenation experiments. Consequently, the stomata management appears to be a promising indicator of drought-stress tolerance.

Thermal imaging showed an increase of leaf temperature with decreasing moisture content of the substrate. Accordingly, the leaf temperature of *Impatiens* can serve as an indicator for the opening rate of stomata.

4. Currently, the dehydrogenation experiments can be considered as the easiest and most practicable approach to identify drought-stress tolerant genotypes of *Impatiens* and *Petunia* due to the results of the present thesis. Physiological measurements supported the ranking of genotypes, which was developed according to the dehydrogenation experiments. Especially, data on the opening rate of stomata illustrated differences between the tested genotypes.

However, the dehydrogenation experiment does not provide information of the dependence of vegetative and generative performance of plants on water supply, which is very important for producers of ornamentals.

5. The ranking of drought-stress tolerance from climatic chambers corresponds only partly with results of experiments under field conditions. Therefore, a screening concept has to be developed in a subsequent project to investigate the complex context of climate-stress tolerance.

10. Literaturverzeichnis

ALPERT, P. UND M. J. OLIVER, 2002: Drying without dying. In desiccation and survival of plants drying without dying. In M. BLACK und H.W. PRITCHARD, 4-43, CABI Publishing.

ALTMANN, A., 2008: Produktion von Beet und Balkonpflanzen. Ulmer Verlag.

BERTRAM, L., 1992: Stem elongation of *Dendranthema* and tomato plants in relation to day and night temperatures. Acta Horticulturae **327**, 61-69.

BENTRUP, F. W. und U. ZIMMERMANN, 2008: A novel, non-invasive, online-monitoring, versatile and easy plant-based probe for measuring leaf water status. Journal of Experimental Botany, **59**, 3157-3167.

BRODRIBB, T. J., N. M. HOLBROOK, E. J. EDWARDS und M. V. GUTIERREZ, 2003: Relations between stomatal closure, leaf turgor and xylem vulnerability in eight tropical dry forest trees. Plant Cell and Enviroment, **26**, 443-450.

BUCHANAN, B., W. GRUISSEM und R. JONES, 2000: Biochemestry and molecular biology of plants. American Scociety of Plants Physiologists.

BLUM, A., 1996: Crop response to drought and the interpretation of adaption. Plant Growth Regulation, **20**, 135-148.

BÜNNING, E., 1956: Endogenous rhythms in plants. Annual Review of Plant Physiology **7**, 71-90.

BURGHARDT, M. und M. RIEDERER, 2003: Ecophysiological relevance of cuticular transpiration of deciduous and evergreen plants in relation to stomatal closure and leaf water potential. Journal of Experimental Botany, **54**, No. 389, 1941-1949.

CAEMMERER, S. von und G. D. FARQUHAR, 1981: Some relationships between the biochemistry of photosynthesis and the gas exchange of leaves. Planta, **153**, 376-387.

CECCARELLI, S., E. ACEVEDO und S. GRANDO, 1991: Breeding for yield stability in unpredictable environments: single traits, interaction between traits and architecture of genotypes. Euphytica, **56**, 169-185.

CHAVES, M. M., J. S. PEREIRA, J. MAROCO, M. L. RODIGUES, C. P. P. RICARDO, M. L. OSORIO, I. CARVALHO, T. FARIA UND C. PINHEIRO, 2002: How plants cope with water stress in the field? Photosynthesis and Growth. Annals of Botany, **89**, 907-916.

CHAVES, M. M., J. P. MAROCA und J. S. PEREIRA, 2003: Understanding plant response to drought - from genes to the whole plants. Functional Plant Biology, **30**, 239-264.

CHAVES, M. M. und M. M. OLIVEIRA, 2004: Mechanisms underlying plant resilience to water deficits: prospects for water-saving agriculture. Journal of Experimental Botany, **55**, 2365-2384.

CHONE, X., C. VAN LEEUWEN, D. DUBOURDIEU und J. P. GAUDILLERE, 2001: Stem water potential is a sensitive indicator of grapevine water status. Annals of Botany, **87**, 477-483.

CODON, A. G., R. A. RICHARDS, G. J. REBETZKE und G. D. FARQUHAR, 2004: Breeding for high water-use efficiency. Journal of Experimental Botany, **55**, 2447-2460.

COHEN, Y., V. ALCHANATIS, M. MERON, Y. SARANGA und J. TSIPRIS 2005: Estimation of leaf water potential by thermal imagery and spatial analysis. Journal of Experimental Botany, **56**, 1843-1852.

COWAN, I. R., 1977: Stomatal behaviour and environment. Advances in Botanical Research, **4**, 117-228.

COWAN, I. R. und G. D. FARQUHAR, 1977: Stomatal function in relation to leaf metabolism and environment. Symposium of Society for Experimental Biology, **31**, 471-505.

CUMMINS, T., A. WATSON und J. COOKE, 2008: How much will horticulturists pay for water? Acta Horticulturae, **792**, 201-208.

DE LORENZI, F. und G. RANA, 2001: Sap flow transpiration measurements in a table grape vineyard growing in southern italy. Acta Horticulturae, **537**, 71-175.

EGILLA, J. N., F. T. DAVIES und J. M. C. DREW, 2001: Effect of potassium on drought resistance of *Hibiscus rosa-sinensis* cv. Leprechaun: plant growth, leaf macro- and micronutrient content and root longevity. Plant and Soil, **229**, 213-224.

FLEXAS, J. und H. MEDRANO, 2002: Drought-inhibition of photosynthesis in C_3 plants: stomatal and non stomatal limitations revisited. Annals of Botany, **89**, 183-189.

FLEXAS, J., J. BOTA, J. CIFRE, J. ESCALANO, J. GALMES, J. GULIAS, E. K., LEFI, S. MARTINEZ-CANELLAS, M. MORENO, M. RIBAS-CARBO, D. RIERA, B. SAMPOL und H. MEDRANO, 2004: Understanding down-regulation of photosynthesis under water stress: future prospects and searching for physiological tools for irrigation management. Annals of Applied Biologists, **144**, 273-283.

FUENTES, S., J. P. CONROY, G. KELLY, M. COLLINS und G. ROGERS, 2005: Use of infrared thermography to assess spatial and temporal variability of stomatal conductance of grapevines under partial rootzone drying: an irrigation scheduling application. Acta Horticulturae, **689**, 309-316.

GHADERI, N., A. SIOSEMARDEH und S. SHAHOEI, 2007: The effect of water stress on some physiological characteristics in `Rashe` and `Khoshnave` grape cultivars. Acta Horticulturae, **754**, 317-322.

GIVNISH, T. J., 1979: On the adaptive significance of leaf form. In O. T. SOLBRIG, S. JAIN, G. B. JOHNSON und P. H. RAVEN, Topics in Plant population biology, 375-407, Columbia University Press, New York, New York, USA.

GRANT, O. M., M. M. CHAVES und H. G. JONES, 2006: Optimizing thermal imaging as a technique for detecting stomatal closure induced by drought stress under greenhouse conditions. Physiologia Plantarum, 1-12.

GRANT, O. M., L. TRONINA, H. G. JONES und M. M. CHAVES, 2007: Exploring thermal imaging variables for the detection of stress responses in grapevine under different irrigation regimes. Journal of Experimental Botany, **58**, 815-825.

HALL, N. M. H. GRIFFITHS, J. A. CORLETT, H. G. JONES, J. LYNN und G. J. KING, 2005: Relationships between water-use traits and photosynthesis in *Brassica oleracea* resolved by quantitative genetic analysis. Plant Breeding, **124**, 557-564.

HARTUNG, W., 1996: Stress bei Pflanzen. In C. BRUNOLD., A. RÜEGSEGGER und R. BRÄNDLE, 119-131, UTB Verlag Paul Haupt, Bern, Stuttgart, Wien.

HANSEN, C. W., K. K. PETERSEN und A. K. LARSEN, 2005: Effects of reduced nutrient and water availability on plant growth and post production quality of *Hibiscus rosa-sinensis*. Acta Horticulturae, **669**, 269-274.

HASSANEIN, A. und N. DORION, 2006: Determining morphological and physiological parameters for the selection of drought-tolerant geraniums (pelargonium x hortorum L. H. Bailey). Journal of Horticultural Science and Biotechnology, **81** (4), 707-713.

HESCHEL, M. S. und C. RIGINOS, 2005: Mechanisms of selection for drought stress tolerance and avoidance in *Impatiens capensis* (*Balsaminaceae*). American Journal of Botany, **92**, 37-44.

HÖFLER, K., 1920: Ein Schema für die osmotische Leistung der Pflanzenzelle. Beriche der Deutschen Botanischen Gesellschaft, **38**, 288-298.

HORN, W., 1996: Zierpflanzenbau. Blackwell Wissenschaft.

HSIAO, T., 1973: Plant response to water stress. Annual Review of Plant Physiology, **24**, 519-570.

IDSO, S. B., R. D. JACKSON, W. L. EHRLER und S. T. MITCHEL, 1969: A method for determination of infrared emittance of leaves. Ecology, **50**, 899-902.

IDSO, S. B., 1982: Non-water-stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. Agricultural Meterology, **27**, 59-70.

IPCC, 2007: Synthesis report. Intergovernmental panel for climate change, fourth assessment report.

JACKSON, R. D., S. B. IDSO, R. J. REGINATO und P. J. PINTER JR, 1981: canopy temperature as a drought stress indicator. Water Resources Research, **17**, 1133-1138.

JONES, H. G., T. J. FLOWERS und M. B. JONES, 1989: Plants under stress. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

JONES, H. G, 1990: Plant water relations and implications for irrigation scheduling. Acta Horticulturae, **278**, 67-76.

JONES, H. G. und R. A. SUTHERLAND, 1991: Stomatal control of xylem embolism. Plant Cell and Enviroment, **6**, 607-612.

JONES, H. G., 1998: Stomatal control of photosynthesis and transpiration. Journal of Experimental Botany, **49**, 387-398.

JONES, H. G., 1999: Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as a possible aid to irrigation scheduling. Agricultural and Forest Meteorology, **95**, 139-149.

JONES, H. G., M. STOLL, T. SANTOS, C. DE SOUSA, M. M. CHAVES und O. M. GRANT, 2002: Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: application to grapevine. Journal of Experimental Botany, **53**, 2249-2260.

JONES, H. G., 2004: Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant based methods. Journal of Experimental Botany, **55**, 2427-2436.

JONES, H. G., 2007: Monitoring plant and soil water status: established and novel methods revisited and their relevance to studies of drought tolerance. Journal of Experimental Botany, **58**, 119-130.

KRATO, T. und L. HENDRIKS, 2011: Indikatoren der Trockenstresstoleranz von Beet- und Balkonpflanzen. DGG-Proceedings, **1**, 1-5.

LARCHER, W., 1994: Ökophysiologie der Pflanzen. Ulmer Verlag.

LEINONEN, I. und H. G. JONES, 2004: Combining thermal and visible imagery for estimating canopy temperature and identifying plant stress. Journal of Experimental Botany, **55** (401), 1423-1431.

LENZ, T. I., I. J. WRIGHT und M. WESTOBY, 2006: Interrelations among pressure-volume curve traits across species and water availability gradients. Physiologia Plantarum, **127**, 423-433.

LEVITT, J., 1972: Response of plants to enviromental stress. Academic Press, New York, USA.

LICHTENTHALER, H. K., 1995: Vegetation stress: an introduction to the stress concept in plants. Plant Physiology, **148**, 4-14.

LIZANA, C., M. WENTWORTH, J. P. MARTINEZ, D. VILLEGAS, R. MENESES, E. H. MURCHIE, C. PASTENES, B. LECARI, P. VERNIERI, P. HORTON und M. PINTO, 2006: Differential adaption of two varieties of common bean to abiotic stress. Journal of Experimental Botany, **57** (3), 685-697.

LÖSCH, R., 2003: Wasserhaushalt der Pflanzen. Verlag Quelle und Meyer Biologie.

LOVISOLO, C. und A. SCHUBERT, 1998: Effects of water stress on vessel size and xylem hydraulic conductivity in *Vitis vinifera* L. Journal of Experimental Botany, **49**, 693-700.

LOVISOLO, C., I. PERRONE, A. CARRA, A. FERRANDINO, J. FLEXAS, H. MEDRANO und A. SCHUBERT, 2010: Drought induced changes in development and function of grapevine (*Vitis* ssp.) organs and in their hydraulic and non hydraulic interactions at the whole plant level: a physiological and molecular update. Functional Plant Biology, **37**, 98-116.

LUDLOW, M. und R. MUCHOW, 1990: A critical evaluation of traits for improving crop yield in water-limited environments. Advances in Agronomy, **43**, 107-153.

LUDLOW, M., 1989: Strategies of response to water stress. In: Structural and functional responses to environmental stresses: water shortage. Hrsg. K. H. Kreeb, H. Richter und T.M. Hinckley, SPB Academic: The Hague, 269-281.

MARISSEN, N., 2005: Postharvest quality of roses as related to preharvest conditions. Acta Horticulturae, **669**, 255-262.

MORTENSEN, L. M. und T. FJELD, 1995: High air humidity reduces the keeping quality of cut roses. Acta Horticulturae, **405**, 148-155.

MORTENSEN, L. M. und H. R. GISLEROD, 2000: Effect of air humidity on growth keeping quality, water relations ans nutrient content of cut roses. Gartenbauwissenschaft, **65**, 40-44.

MUNNE-BOSCH, S. und L. ALEGRE, 2004: Die and let live: leaf senescence contributes to plant survival under drought stress. Functional Plant Biology, **31**, 203-216.

OLIVER, M. J., A. J. WOOD und P. O`MAHONY, 1998: To dryness and beyond – preparation for the dried state and rehydradtion in vegetative dessication tolerant plants. Plant Growth Regulation, **24**, 193-201.

PASSIOURA, J. B., 1996: Drought and drought tolerance. Plant Growth Regulation, **20**, 79-83.

PASSIOURA, J.B., 2007: The drought environment: physical, biological and agricultural perspectives. Journal of Experimental Botany, **58**, 113-117.

PRIVE, J. P. und J. DURICE, 2003: Evaluation of plant and soil moisture sensors for the detection of drought stress in raspberry. Acta Horticulturae, **618**, 391-396.

REICH, P. und T. HINCKLEY, 1989: Influence of pre-dawn water potential and soil-to-leaf hydraulic conductance on maximum daily diffusive conductance in two oak species. Functional Ecology, **3**, 719-726.

RICHTER, H., 1978: A diagram for the description of water relations in plant cells and organs. Journal of Experimental Botany, **29**, 1197-1203.

RICHTER, H., 1997: Water relations of plants in the field: some comments on the measurement of selected parameters. Journal of Experimental Botany, **48** (1), 1-7.

RÖBER, R., 1996: Zierpflanzenbau. In W. Horn, S127-34, Blackwell Wissenschaft.

RÖBER, R. und H. SCHACHT, 2008: Pflanzenernährung im Gartenbau. Ulmer Verlag.

SAIE, A., Z. ZAMANI und A. R. TALAIE, 2008: Stomatal behavior of Olive Cv. Zard under drought stress conditions. Acta Horticulturae, **791**, 507-512.

SCHALLER, J., 2007: Quantifizierung des Wasserhaushaltes von Spargel (*Asparagus officinalis* L.) unter besonderer Berücksichtigung von Trockenstress. Dissertation Justus-Liebig-Universität Gießen.

SCHOLANDER, P. F., H. T. HAMMEL, E. D. BRADSTREET und E. A. HEMMINGSEN, 1965: Sap pressure in vascular plants. Science, **148**, 339-346.

SCHULTZ, H. R. und M. STOLL, 2010: Some critical issues in environmental physiology of grapevines: future challenges and current limitations. Australian Journal of Grape and Wine Research, **16**, 4-24.

SELLES, G., R. FERREYRA, I. MUNOZ und H. SILVA, 2004: Physiological indicators of plant water status as criteria for irrigation scheduling in table grapes cv. Crimson Seedles, irrigated by drip. Acta Horticulturae, **664**, 599-605.

SCHULZE, E. D., E. BECK und K. MÜLLER-HOHENSTEIN, 2005: Pflanzenökologie. Springer Verlag Heidelberg.

SHERWIN, H. W. und J.M. Farrant 1996: Differences in rehydration of three desiccation-tolerant angiosperm species. Annals of Botany, **78**, 703-710.

STÖCKLE, C. O., J. MARSAL und J. M. VILLAR, 2011: Impact of climate change on irrigated tree fruit production. Acta Horticulturae, **889**, 41-52.

STOLL, M., H. R. SCHULZ und B. BERKELMANN-LOEHNERTZ, 2008: Exploring the sensitivity of thermal imaging for *Plasmopara viticola* pathogen detection in grapevines under different water status. Functional Plant Biology, **35**, 281-288.

SUAREZ, N., 2011: Comparative leaf anatomy and pressure-volume analysis in plants of *Ipomoea pes-caprea* experimenting saline and/or drought stress. International Journal of Botany, **7**, 53-62.

SUN, W. Q., 2002: Methods for the study of water relations under desiccation stress. In desiccation and survival of plants drying without dying. M. BLACK und H.W. PRITCHARD, CABI publishing, 47-93.

TURNER, L.B., 1991: The effect of water stress on the vegetative growth of white clover (*Trifolium repens* L.): comparison of long-term water deficit and a short term developing water stress. Journal of Experimental Botany, **42**, 311-316.

TURNER, N.C., 1988: Measurement of plant water status by the pressure chamber technique. Irrigation Science, **9**, 289-308.

TYREE, M. T. und J. S. SPERRY, 1989: Vulnerability of xylem to cavitation and embolism. Annual Review of Plant Physiology and Molecular Biology, **40**, 19-38.

VECCHIA, F. D., T. EL ASMAR, R. CALAMASSI, N. RASCIO UND C. VAZZANA, 1998: Morphological and ultrastructural aspects of dehydration and rehydration in leaves of *Sporobolus stapfianus*. Plant Growth Regulation, **24**, 219-228.

WHEATON, A. D., I. GODWIN, X. WANG, B. MORAN und W. YANG, 2011: Use of thermal imagery to detect water stress during berry ripening in *Vitis vinifera* L. `Cabernet Sauvignon´. Acta Horticulturae, **889**, 123-130.

WILLCOX-LEE, D., 1987: Soil matrix potential, plant water relations and growth in asparagus. Horticultural Science, **22**, 22-24.

WILLERT, D. J., R. MATYSSEK und W. HERPPICH, 1995: Experimentelle Pflanzenökologie: Grundlagen und Anwendungen. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York.

WILLIAMS, L. E. und F. J. ARAUJO, 2002: Correlations among predawn leaf, midday leaf and midday stem water potential and their correlations with other measures of soil and plant water status in *Vitis vinifera*. Journal of the American Society of Horticultural Science, **127,** 448-454.

WILLIAMS, L. E., P. BAEZA und P. VAUGHN, 2011: Midday measurements of leaf water potential and stomatal conductance are highly correlated with daily water use of Thompson seedless grapevines. Irrigation Science, Online First, 15. März 2011.

XIONG, L., K. S. SCHUMAKER und J. K. ZHU, 2002: Cell signalling during cold, drought and salt stress. The Plant Cell, 165-183.

YAMADA, M., H. MORISHITA, K. URANO, N.SHIOZAKI, K.YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K. SHINOZAKI und Y. YOSHIBA, 2005: Effects of free praline accumulation in petunias under drought stress. Journal of Experimental Botany, **56**, 1975-1981.

ZHU, J-K., 2002: Salt and drought stress signal transduction in plants. Plant Biology **53**, 247-273.

ZIMMERMANN, U., H. SCHNEIDER, L. WEGNER und A. HAASE, 2004: Water ascent in tall trees: does evolution of land plants rely on a highly metastable state? New Phytologist, **162**, 575-615.

I. Anhang

Zu Kapitel 6.1 Charakterisierung der Trockenstresstoleranz von Impatiens- und Petunien- Genotypen durch De- und Rehydrierungsexperimente:

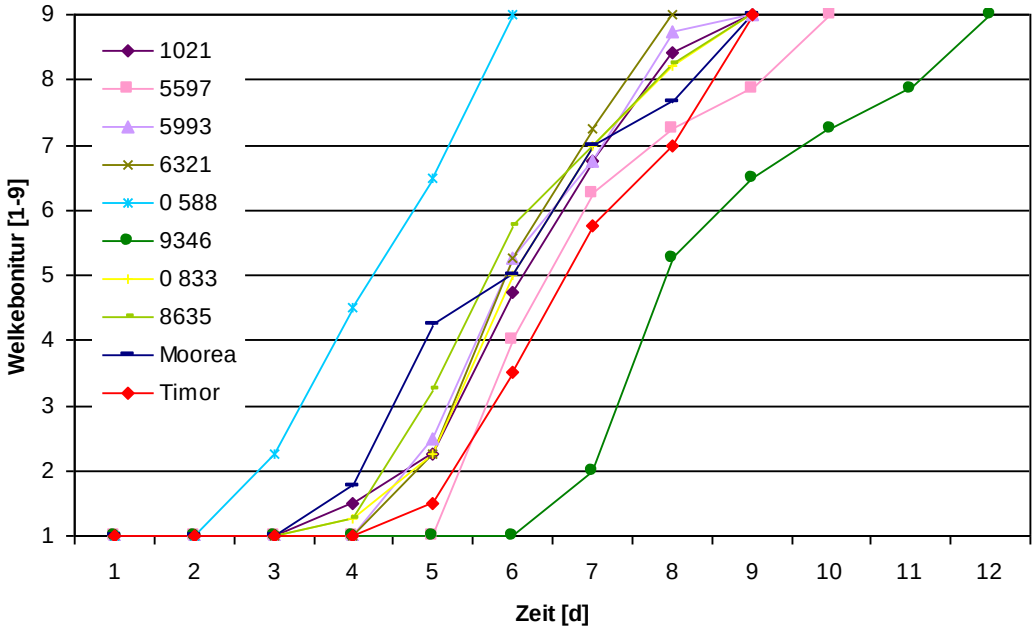


Abb. 1: Welkeverlauf von zehn normal feucht kultivierten Impatiens Genotypen in Abhängigkeit von der Zeit.

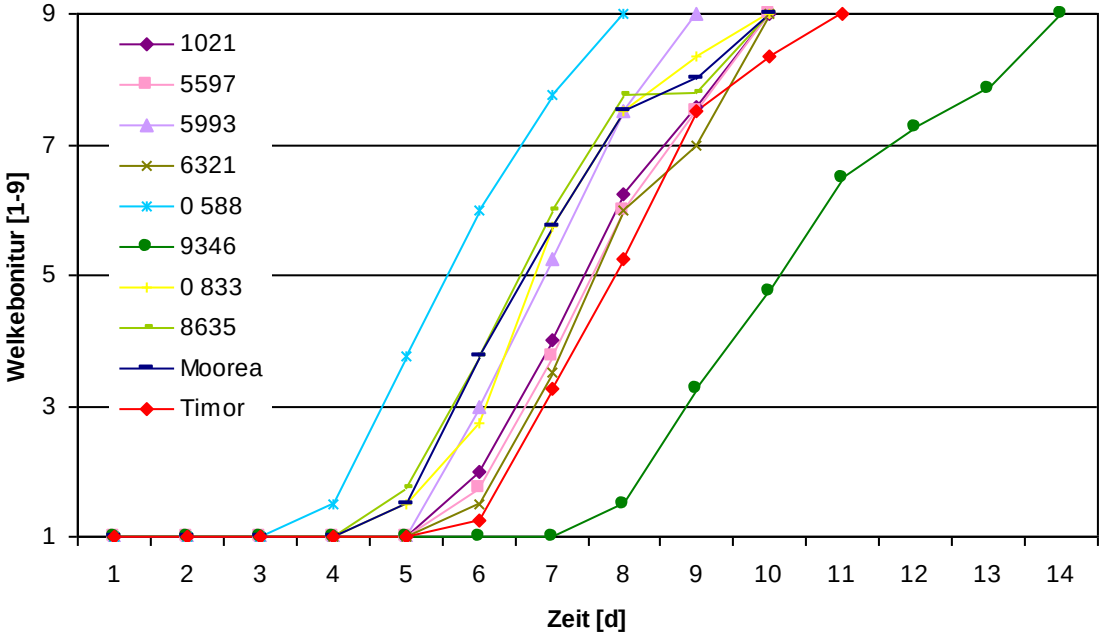


Abb. 2: Welkeverlauf von zehn trocken kultivierten Impatiens Genotypen in Abhängigkeit von der Zeit.

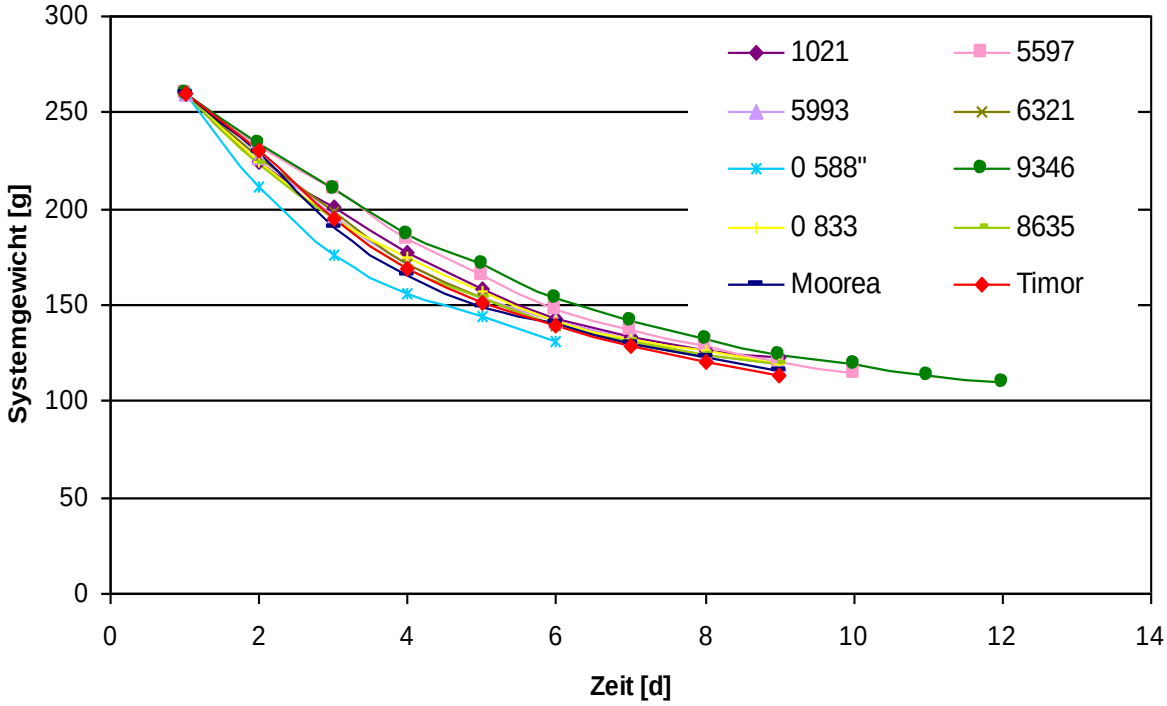


Abb. 3: Systemgewicht von zehn normal feucht kultivierten Impatiens Genotypen in Abhängigkeit von der Zeit.

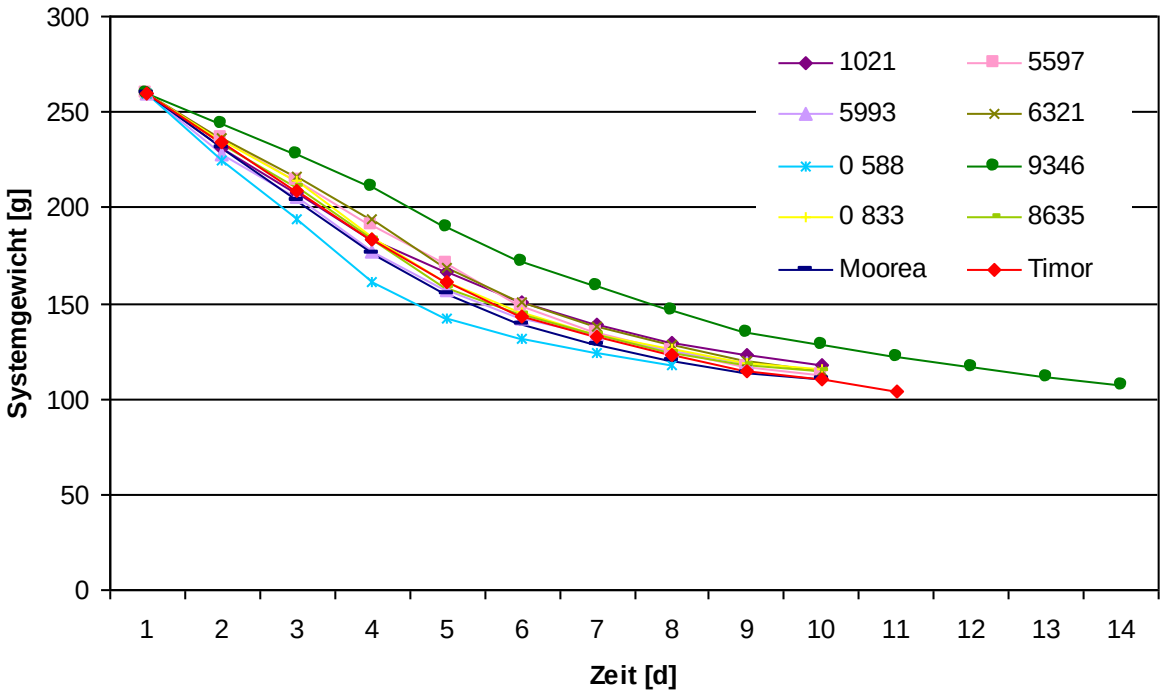


Abb. 4: Systemgewicht von zehn trocken kultivierten Impatiens Genotypen in Abhängigkeit von der Zeit.

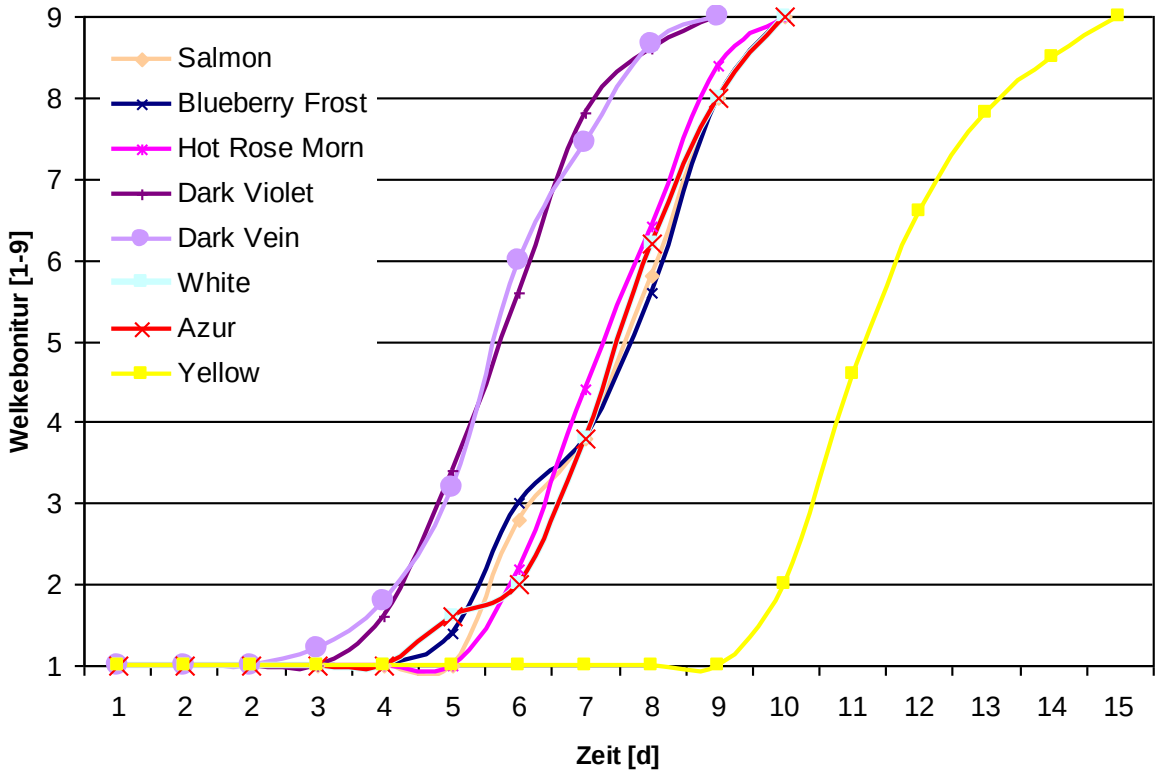


Abb. 5: Welkeverlauf von acht normal feucht kultivierten Petunien Genotypen in Abhängigkeit von der Zeit.

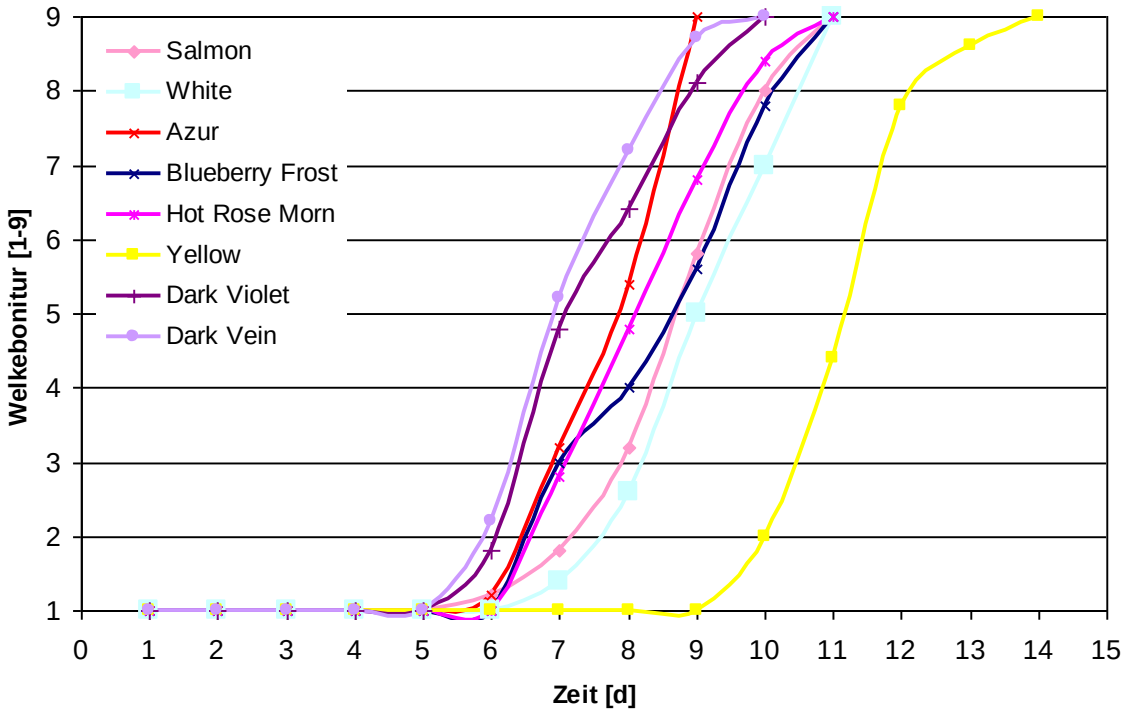


Abb. 6: Welkeverlauf von acht trocken kultivierten Petunien Genotypen in Abhängigkeit von der Zeit.

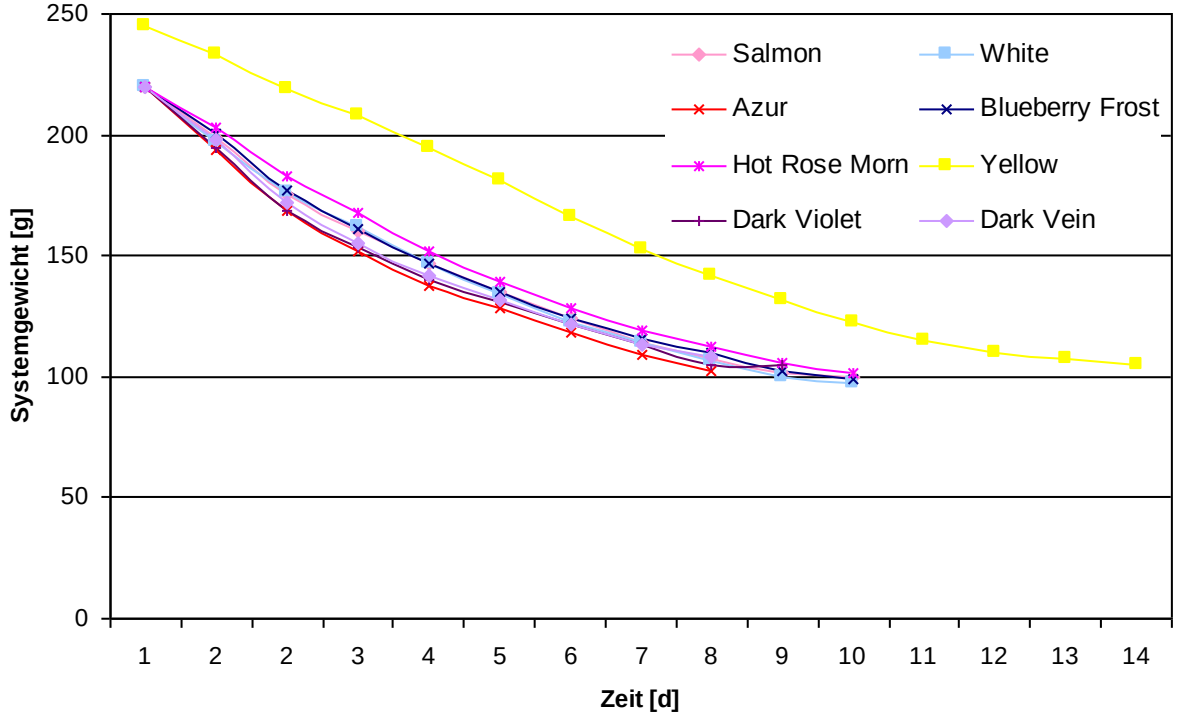


Abb. 7: Systemgewicht von acht normal feucht kultivierten Petunien Genotypen in Abhängigkeit von der Zeit.

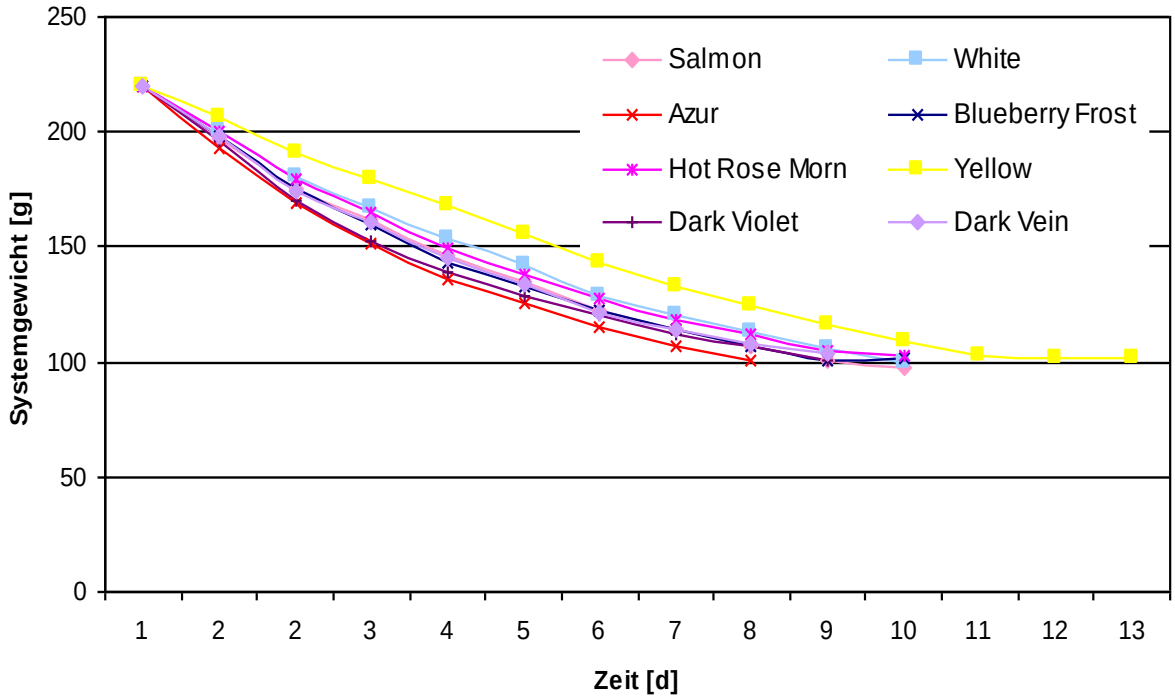


Abb. 8: Systemgewicht von acht trocken kultivierten Petunien Genotypen in Abhängigkeit von der Zeit.

Zu Kapitel 6.3.8 Gravimetrische Transpirationsstudien an Einzelblättern:

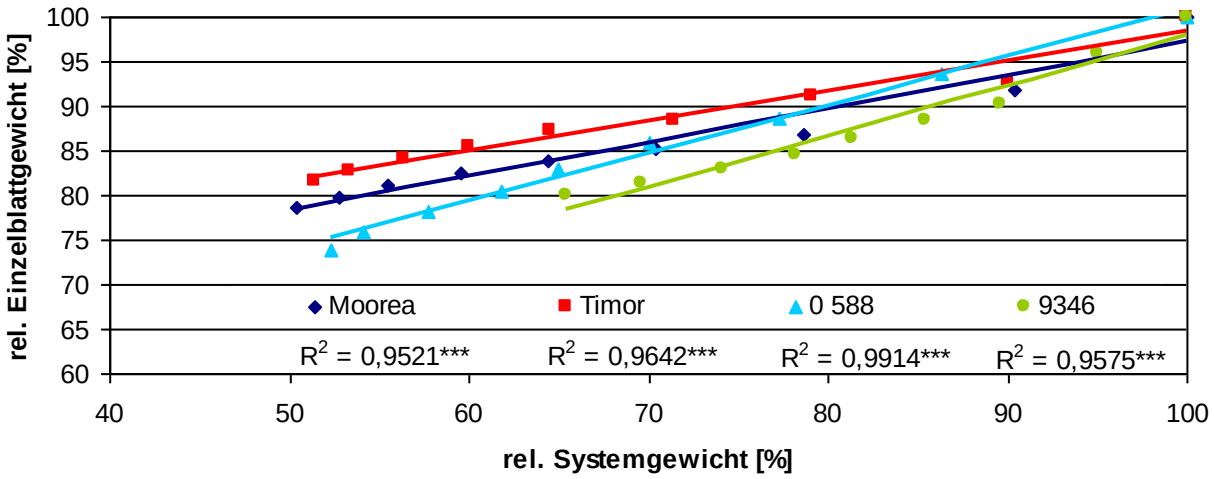


Abb. 9: Relative Einzelblattgewichte von vier Impatiens Genotypen in Abhängigkeit von deren relativen Systemgewicht.

Förderung

Die Förderung des Vorhabens erfolgte aus Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) über die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung im Rahmen des Programms zur Innovationsförderung.

Lebenslauf

Name	Theresa Elisabeth Krato, geb. Kogge	
Geburtsdatum	13.10.1983	
Geburtsort	Pforzheim	
Familienstand	verheiratet, eine Tochter	
Schulbildung	1990-1994	Sonnenhofgrundschule in Pforzheim
	1994-2003	Freie Waldorfschule Goetheschule in Pforzheim
Studium	2003-2008	Universität Hohenheim, Studium der Agrarbiologie
Tätigkeiten	2008-2011	wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Forschungsanstalt Geisenheim, Institut für Zierpflanzenbau

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die dazu beigetragen haben, dass ich den „Lebensabschnitt Promotion“ erfolgreich beenden konnte.

Mein besonderer Dank gilt dabei Prof. Dr. Ludger Hendriks, für die Überlassung des Themas und die Freiheit und das Vertrauen bei der Bearbeitung, sowie für all die anregenden Gespräche.
Auch beim restlichen Team des Instituts für Zierpflanzenbau möchte ich mich herzlich für die Unterstützung bedanken.

Bei Prof. Dr. Jens Wünsche möchte ich mich herzlich für die Betreuung meiner Arbeit bedanken. Bei Frau Prof. Dr. Traud Winkelmann bedanke ich mich für die Übernahme als zweiter Prüfer meiner Arbeit.

Bedanken möchte ich mich auch bei der Arbeitsgruppe „Trockenstress“ für all die anregenden Diskussionen und dass es mir möglich war, im Rahmen dieser Arbeitsgruppe über den "Tellerrand" der eigenen Arbeit hinauszublicken.

Ganz besonders danke ich auch meiner Familie, die mich über all die Jahre immer unterstützt hat und durch schulische Ausbildung, Studium und Promotion begleitet hat.

Bedanken möchte ich mich natürlich auch bei meinem Mann der mich immer unterstützt hat und stets ein offenes Ohr für mich hatte.