

Justus-Liebig-Universität Gießen
Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung I
und
Forschungsanstalt Geisenheim
Fachgebiet Zierpflanzenbau

**Ultraschallemissionen als Wasserstress-Signale
an gärtnerischen Kulturpflanzen**

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Agrarwissenschaften
des Fachbereiches Agrarwissenschaften, Ökotropologie und
Umweltmanagement
der Justus-Liebig-Universität Gießen

vorgelegt von
Elena-Aida Schmid
aus Iași, Rumänien

Gießen 2010

Vorsitzender:	Prof. Dr. E.-A. Nuppenau
Erster Gutachter:	Prof. Dr. Dr. h.c. W. Friedt
Zweiter Gutachter:	Prof. Dr. L. Hendriks
Prüfer:	Prof. Dr. B. Honermeier
Prüfer:	Prof. Dr. S. Schnell
Tag der mündlichen Prüfung:	19. Februar 2010

Meinem Mann und
meiner Cousine Liliana
gewidmet

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
2	STAND DES WISSENS	3
2.1	Wasserstress-Signale von Pflanzen	3
2.1.1	Überblick über Wasserstress-Reaktionen von Pflanzen.....	3
2.1.2	Kavitationen als Wasserstress-Signale	5
2.2	Messungen von Wasserstress-Signalen an Pflanzen	7
2.2.1	Übersicht über gängige Methoden zur Charakterisierung des Wasserhaushaltes.....	7
2.2.2	Einsatz der Ultraschalltechnik zur Messung von Kavitationen.....	11
2.2.3	Einsatz der Ultraschalltechnik in der stressphysiologischen Forschung..	12
2.2.4	Ansätze zum Einsatz der Ultraschalltechnik für Steuerungszwecke im Pflanzenbau.....	13
2.2.5	Kritische Betrachtung der Ultraschalltechnik und Kenntnislücken beim Einsatz.....	15
3	FRAGESTELLUNG	17
4	MATERIAL UND METHODEN	19
4.1	Pflanzliches Versuchsmaterial	19
4.1.1	<i>Rosa hybrida</i>	19
4.1.2	<i>Syringa vulgaris</i>	20
4.1.3	<i>Asparagus officinalis</i>	21
4.2	Versuchsdurchführung	22
4.3	Messmethoden	25
4.3.1	Durchführung von Ultraschallmessungen.....	25
4.3.2	Blatt-, Wurzel- und Stammwasserpotentialmessungen	26
4.3.3	Bodenwasserpotentialmessungen.....	27
4.3.4	Welkebonituren.....	27
4.4	Versuchsumgebung	29
4.5	Statistische Auswertung	29
5	ERGEBNISSE	30
5.1	Ultraschalluntersuchungen an <i>Rosa hybrida</i>	30
5.1.1	Einfluss der Messposition auf das Auftreten von Ultraschallemissionen .	30
5.1.2	Einfluss des Entwicklungsstadiums des Triebes auf das Auftreten von Ultraschallemissionen.....	32
5.1.3	Ultraschallemissionen im Tagesgang	34
5.1.4	Einfluss der Wasserversorgung auf das Auftreten von Ultraschallemissionen.....	36
5.1.5	Zusammenhang zwischen dem Wasserpotential der Versuchspflanzen und dem Auftreten von Ultraschallemissionen.....	43
5.1.6	Diskussion der Ergebnisse bei <i>Rosa hybrida</i>	49
5.2	Ultraschalluntersuchungen an <i>Syringa vulgaris</i>	56
5.2.1	Einfluss der Messposition auf das Auftreten von Ultraschallemissionen .	56
5.2.2	Ultraschallemissionen im Tagesgang	57
5.2.3	Einfluss der Wasserversorgung auf das Auftreten von Ultraschallemissionen.....	59
5.2.4	Zusammenhang zwischen dem Wasserpotential der Versuchspflanzen und dem Auftreten von Ultraschallemissionen	65
5.2.5	Diskussion der Ergebnisse bei <i>Syringa vulgaris</i>	70

5.3	Ultraschalluntersuchungen an <i>Asparagus officinalis</i>.....	73
5.3.1	Einfluss der Messposition und des Triebalters auf das Auftreten von Ultraschallemissionen.....	73
5.3.2	Diskussion der Ergebnisse bei <i>Asparagus officinalis</i>	77
6	ABSCHLIEßENDE UND ZUSAMMENFASSENDE DISKUSSION.....	79
7	ZUSAMMENFASSUNG	83
8	SUMMARY	87

Abkürzungsverzeichnis

*	signifikant ($\alpha < 0,05$)
**	hoch signifikant ($\alpha < 0,01$)
ABA	Abscisinsäure
dB	Dezibel
h	Stunde
hPa	Hektopascal
kHz	Kilohertz
MPa	Megapascal
n	Stichprobenumfang (Anzahl)
r	Korrelationskoeffizient
R ²	Bestimmtheitsmaß
UAE, AE	Ultraschallemission (ultrasonic acoustic emission)
USV-Gerät	Unterbrechungsfreies Stromversorgung-Gerät

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Überblick gängiger Methoden zur Messung von Wasserstress an Pflanzen...	7
Tab. 2: Überblick der in der Dissertation bearbeiteten Fragestellungen.....	18
Tab. 3: Übersicht über die durchgeführten Untersuchungen.....	22
Tab. 4: Übersicht der in den Austrocknungsversuchen erfassten Parameter des Wasserhaushaltes und dessen Messzeitpunkte.....	23
Tab. 5: Versuchsnummer und Versuchszeitraum der durchgeführten Experimente.	24
Tab. 6: Durchgeführte Maßnahmen und deren Zielsetzungen zur Verminderung von Fehlmessungen.....	26
Tab. 7: Boniturskala für die Feststellung von Welkeerscheinungen.	28
Tab. 8: Übersicht der Versuchsbedingungen im Gewächshaus.....	29
Tab. 9: Korrelationskoeffizienten und Signifikanzniveaus für den linearen Zusammenhang zwischen der Ultraschallemission und dem Bodenwasserpotential der untersuchten Rosenpflanzen.....	42
Tab. 10: Korrelationskoeffizienten und Signifikanzniveaus für den linearen Zusammenhang der Signalrate der Ultraschallemission mit dem mittäglichen Blattwasserpotential der untersuchten Rosenpflanzen.....	47
Tab. 11: Ultraschallsignalraten (Signale pro Tag) von <i>Rosa hybrida</i> bei beginnender Laubblattwelke (Boniturnote 3).....	48
Tab. 12: Korrelationskoeffizienten und Signifikanzniveaus für den linearen Zusammenhang zwischen der Ultraschallemission und dem Bodenwasserpotential der untersuchten Fliederpflanzen.....	64
Tab. 13: Korrelationskoeffizienten und Signifikanzniveaus für den linearen Zusammenhang der Signalrate der Ultraschallemission mit dem mittäglichen Blattwasserpotential der untersuchten Fliederpflanzen.	68
Tab. 14: Ultraschallsignalraten (Signale pro Tag) von <i>Syringa vulgaris</i> bei beginnender Laubblattwelke (Boniturnote 3).....	69

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: fünf-jährige Versuchspflanze <i>Rosa hybrida</i> Sorte 'First Red' mit Bodenfeuchte-sensoren.....	19
Abb. 2: <i>Syringa vulgaris</i> 'Mme Lemoine' mit Bodenfeuchtesensoren und Holzstab zur Befestigung der Ultraschallsensoren.....	20
Abb. 3: <i>Asparagus officinalis</i> 'Gijnlim'. Die Holzstäbe dienen zur Befestigung der Ultraschallsensoren.....	21
Abb. 4: Schematische Darstellung der Versuchsdurchführung	23
Abb. 5: Links: Ultraschallgerät AMSY4 mit Vorverstärker und Multiplexer MUX 1 mit 16 Kanälen. Rechts: Ultraschallsensor mit Aluminiumhalterung und Befestigung mittels Gummiband am Versuchsobjekt.	25
Abb. 6: Boniturschema zur Charakterisierung der Welkeintensität am Beispiel von <i>Syringa vulgaris</i>	28
Abb. 7: Ultraschallsignallrate (AE-Signallrate) von verschiedenen Organen von <i>Rosa hybrida</i> während eines Austrocknungsversuches. Die Hell-Dunkelphasen sind am oberen Abbildungsrand grafisch dargestellt (schwarze Balken: Dunkelphase).	31
Abb. 8: Ultraschallsignallrate (AE-Signallrate) von <i>Rosa hybrida</i> bei unterschiedlichen Entwicklungsstadien des Triebes (4, 6 und 8 Wochen alt) während eines Austrocknungsversuches. Die Hell-Dunkelphasen sind am oberen Abbildungsrand grafisch dargestellt (schwarze Balken: Dunkelphase).	33
Abb. 9: Verlauf der Ultraschallsignallrate von <i>Rosa hybrida</i> und der Strahlung im Tagesgang bei guter Wasserversorgung des Substrates.....	34
Abb. 10: Verlauf der Ultraschallsignallrate von <i>Rosa hybrida</i> und der Strahlung im Tagesgang bei Wassermangel.....	35
Abb. 11: Ultraschallereignisse und ihre Amplitude im Tagesgang. A) Ultraschallsignale an jungem Trieb einer ausreichend bewässerten Rosenpflanze. B) Ultraschallsignale an jungem Trieb einer Rosenpflanze unter Wassermangel.	37
Abb. 12: Ultraschallsignallraten an jungen Trieben von bewässerten und unbewässerten Rosenpflanzen aus 5 Versuchen. Daten zeigen Mittelwerte mit Standardabweichungen (n= 3 bzw. 4).	38
Abb. 13: Ultraschallsignallraten von <i>Rosa hybrida</i> und Bodenwasserpotential während eines Austrocknungsversuches (Daten zeigen Mittelwerte mit Standardabweichungen von 2 Wdh.). A) Pflanze 1, B) Pflanze 2, C) Pflanze 3.....	40
Abb. 14: Ultraschallsignallraten von <i>Rosa hybrida</i> in Abhängigkeit vom Bodenwasserpotential (Daten zeigen Mittelwerte von 2 Trieben pro Pflanze). A) Pflanze 1, B) Pflanze 2, C) Pflanze 3.....	41
Abb. 15: Ultraschallsignallrate und mittägliches Blattwasserpotential von <i>Rosa hybrida</i> während eines Austrocknungsversuches (Daten zeigen Mittelwerte mit Standardabweichungen von 2 Trieben pro Pflanze). A) Pflanze 1, B) Pflanze 2, C) Pflanze 3.	44

Abb. 16: Ultraschallsignalraten von <i>Rosa hybrida</i> in Abhängigkeit von mittäglichem Blattwasserpotential (Daten zeigen Mittelwerte von 2 Trieben pro Pflanze). A) Pflanze 1, B) Pflanze 2, C) Pflanze 3.....	46
Abb. 17: Ultraschallsignalrate (AE-Signalrate) von verschiedenen Organen von <i>Syringa vulgaris</i> während eines Austrocknungsversuches. Die Hell-Dunkelphasen sind am oberen Abbildungsrand grafisch dargestellt (schwarze Balken: Dunkelphase).	56
Abb. 18: Verlauf der Ultraschallsignalrate von <i>Syringa vulgaris</i> und der Strahlung im Tagesgang bei guter Wasserversorgung des Substrates.....	57
Abb. 19: Verlauf der Ultraschallsignalrate von <i>Syringa vulgaris</i> und der Strahlung im Tagesgang bei Wassermangel.....	58
Abb. 20: Ultraschallereignisse und ihre Amplitude im Tagesgang. A) Ultraschallsignale an jungem Trieb einer ausreichend bewässerten Fliederpflanze. B) Ultraschallsignale an jungem Trieb einer Fliederpflanze unter Wassermangel.	59
Abb. 21: Ultraschallsignalraten an jungen Trieben von bewässerten und unbewässerten Fliederpflanzen aus 3 Versuchen. Daten zeigen Mittelwerte mit Standardabweichungen (n= 3).....	60
Abb. 22: Ultraschallsignalraten von <i>Syringa vulgaris</i> und Bodenwasserpotential während eines Austrocknungsversuches. A) Pflanze 1, B) Pflanze 2, C) Pflanze 3.....	62
Abb. 23: Ultraschallsignalraten von <i>Syringa vulgaris</i> in Abhängigkeit vom Bodenwasserpotential. A) Pflanze 1, B) Pflanze 2, C) Pflanze 3.....	63
Abb. 24: Ultraschallsignalrate und mittägliches Triebwasserpotential von <i>Syringa vulgaris</i> während eines Austrocknungsversuches (Daten zeigen Mittelwerte mit Standardabweichungen von 2 Trieben pro Pflanze). A) Pflanze 1, B) Pflanze 2, C) Pflanze 3.	66
Abb. 25: Ultraschallsignalraten von <i>Syringa vulgaris</i> in Abhängigkeit von mittäglichem Triebwasserpotential (Daten zeigen Mittelwerte von 2 Trieben pro Pflanze). A) Pflanze 1, B) Pflanze 2, C) Pflanze 3.	67
Abb. 26: Kavitationsprofile von <i>Asparagus officinalis</i> mit unterschiedlich alten Trieben während eines Austrocknungsversuches (2004). A) Ultraschallsignale an 7 Tage altem Trieb. B) Ultraschallsignale an 153 Tage altem Trieb. Hell-Dunkelphasen sind am oberen Abbildungsrand grafisch dargestellt (schwarze Balken: Dunkelphasen).	74
Abb. 27: Kavitationsprofile von <i>Asparagus officinalis</i> mit unterschiedlich alten Trieben während eines Austrocknungsversuches (2005). A) Ultraschallsignale an 6 Tage altem Trieb. B) Ultraschallsignale an 161 Tage altem Trieb. Hell-Dunkelphasen sind am oberen Abbildungsrand grafisch dargestellt (schwarze Balken: Dunkelphasen)	75

1 Einleitung

Die Verfügbarkeit von Wasser stellt eine elementare Voraussetzung dar, um biochemische Prozesse in lebenden Organismen zu ermöglichen. Wasser ist nicht nur Lösungsmittel, Substrat oder Produkt in biochemischen Reaktionen des Stoffwechsels, sondern auch Transportmittel. Weltweit gesehen ist die Wasserknappheit ein gravierendes Problem, welches durch globale Klimaveränderungen, Bevölkerungswachstum und industriellen Aufschwung zukünftig noch verstärkt werden wird. Es wundert daher nicht, dass ein effizienter und zielorientierter Umgang mit der Ressource Wasser derzeit ein hohes Interesse in Wissenschaft und Gesellschaft besitzt.

Ertrags- und Qualitätskomponenten landwirtschaftlicher und gartenbaulicher Produkte werden in hohem Maße von der Wasserversorgung beeinflusst. Eine künstliche Bewässerung zur Ertragssicherung und zur Qualitätsverbesserung ist daher im Intensivanbau mittlerweile Standard (HARTMANN et al., 1988; PASCHOLD, 2006, 2007; SCHULZ, 2004). Generell führen eine Unter- sowie eine Überversorgung mit Wasser sowohl zu einem gehemmten Pflanzenwachstum (MINGEAU et al., 1994) als auch zu Mindererträgen (SAEED und EL-NADI, 1997; MOUHOUCHE et al., 1998).

Zeitpunkt und Dauer der Bewässerung orientieren sich dabei überwiegend an der Bodenfeuchte, an meteorologischen Informationen und/oder einer Verknüpfung dieser indirekten Parameter. Daneben wird versucht die Pflanze in den Regelprozess mit einzubeziehen. Das einfachste Verfahren ist hierbei die Erfassung von Welkesymptomen, die allerdings zu spät auftreten, um eine optimale Pflanzenentwicklung zu gewährleisten. Daraus entsteht die Notwendigkeit Frühindikatoren bzw. Wasserstress-Signale zu identifizieren, die den Wasserhaushalt der Pflanzen charakterisieren. Hierzu zählen u. a. die Bestimmung des Wasserpotentials, Saftstrommessungen, Messungen des Gaswechsels und hormoneller Veränderungen. Diese in der physiologischen Forschung eingesetzten Methoden haben sich allerdings aufgrund des hohen Messaufwandes in der gartenbaulichen Praxis bislang nicht durchgesetzt.

Die Kavitationsmessung mittels Ultraschalltechnik ist eine weitere in der Pflanzenphysiologie eingesetzte direkte Methode, um Wasserstress an Pflanzen zu erkennen. Hierbei handelt es sich um ein nicht destruktives Verfahren, das passive Schallemissionen in den Xylemgefäßen infolge von Wasserstress misst. Diese

Methode ist automatisierbar, zerstörungsfrei und kann zeitgleich an mehreren Objekten durchgeführt werden.

Es liegt umfangreiche Literatur über die Anwendung der Ultraschalltechnik in der stressphysiologischen Forschung vor, insbesondere bei Forstgehölzen. Dabei ist festzustellen, dass es nur wenige Arbeiten gibt, die sich mit dem Einsatz der Ultraschalltechnik bei gartenbaulich relevanten Kulturen auseinandersetzen.

Diese Dissertation soll einen Beitrag zur Schließung dieser Wissenslücke leisten und befasst sich mit der Eignung von Kavitationsmessungen mittels Ultraschalltechnik zur Untersuchung des Wasserhaushaltes von gärtnerischen Kulturpflanzen.

2 Stand des Wissens

2.1 Wasserstress-Signale von Pflanzen

2.1.1 Überblick über Wasserstress-Reaktionen von Pflanzen

Die Reaktion von Pflanzen auf Wassermangel erfolgt in mehreren Stufen (SITTE et al., 2002). Am Anfang dieser Reaktionskaskade stehen hormonelle Signale, gefolgt von hydraulischen Signalen, stomatärer Leitfähigkeit, Blatttemperatur, Blattwelke und Wachstumsbeeinträchtigungen. Dabei ist die Abgrenzung zwischen Signalgeber und Reaktion nicht immer eindeutig möglich.

Vor allem dem Hormon Abscisinsäure (ABA) kommt hier eine große Bedeutung zu. Es ist nachgewiesen und allgemein akzeptiert, dass die Akkumulation und Freisetzung von ABA als chemisches Signal zum Schließen der Stomata führt (BLACKMAN und DAVIES, 1985; ZHANG et al., 1987; PASSIOURRA, 1988; JONES, 1992; COMSTOCK, 2002; DESIKAN et al., 2003). Bereits bei mildem oder mäßigem Wasserstress wird ABA in der Wurzelspitze produziert und über das Xylem in die Blätter geleitet, wo auf diese Weise Wasserabgabe und Wachstum kontrolliert werden können (ZHANG et al., 1987).

In den relativ wenigen Studien über chemische Signale während des Wasserstresses wurde festgestellt, dass neben ABA auch andere Phytohormone beteiligt sind, die entweder isoliert oder in Verbindung mit ABA wirken können. Vor allem Auxine (COX et al., 1985) und Cytokinine (POSPISILOVA, 2003) können die ABA-Wirkung auf die Stomataweiten partiell oder ganz kompensieren. Da Cytokinine hauptsächlich in den Wurzeln synthetisiert werden, wird ihr verringerter Transport in die oberirdischen Pflanzenteile als hormonelles Trockenstresssignal angesehen. Beispielsweise konnte bei Reben in „Split-Root Experimenten“ gleichzeitig mit einer ABA-Zunahme im Xylem, eine Cytokininabnahme in der Wurzel festgestellt werden, die zu einer Reduzierung der stomatären Leitfähigkeit führte (STOLL et al., 2000). Des Weiteren vermindert eine steigende Cytokininkonzentration im Xylem die Stomatasensitivität für ABA und fördert damit die Stomataöffnung (POSPISILOVA et al., 2000; WILKINSON und DAVIES, 2002).

Ebenso ist bei Wassermangel die Zunahme der ABA-Konzentration im Xylemsaft des Sprosses mit dem Anstieg des dort herrschenden pH-Wertes verbunden (WILKINSON und DAVIES, 1997; MEINZER et al., 1991; THOMPSON et al., 1997).

So konnte festgestellt werden, dass das Zusammenspiel von pH-Wert und ABA-Gehalt für die unter Wassermangel deutliche Stomataverengung verantwortlich ist.

In der neueren Literatur setzt sich zunehmend die Vorstellung durch, dass neben den biochemischen Stress-Signalen offensichtlich auch hydraulische Signale in Form von Kavitationen in einem frühen Stadium von Wasserstress auftreten. Es ist bekannt, dass solche Kavitationen beim Abreißen der Wassersäulen in den Leitelementen durch das Erreichen spezifischer Schwellenwerte des Wasserpotentials entstehen. Darüber hinaus kommt es zu einer Abnahme der hydraulischen Leitfähigkeit im Xylem (SALLEO et al., 2000, 2001; SPERRY, 2000; NARDINI et al., 2001). Infolge der Änderung der Effektivität des Wasserleitungssystems kommt es nach Ansicht von LO GULLO und SALLEO (1991) zu einem Schließen der Stomata und einer sinkenden Transpirationsrate (JONES und SUTHERLAND, 1991). Daher können Kavitationen als Wasserstress-Signale angesehen werden. Ein Überblick über den Einfluss der Kavitationen als erstes hydraulisches Signal auf den Stomataschluss ist bei SALLEO et al. (2000) zu finden.

Die letzte Stufe in einer langen Reaktionskette bei Wasserstress sind morphologische Veränderungen der Pflanzen. Diese rollen ihre Blätter ein, wenn sie wegen Wassermangel zu welken drohen, um die Oberfläche zu begrenzen und damit die Transpiration zu reduzieren. In der Praxis wird das Welken der Blätter immer wieder als Stressindikator herangezogen (KRAMER, 1988) und ist für Steuerungszwecke der Bewässerung im extensiven Gartenbau nach wie vor verbreitet.

Inwieweit jedoch bei Wasserstress die hormonellen Signale und auch die Änderungen im Xylemsaft als Indikatoren für den praktischen Gartenbau in Frage kommen, ist wegen der aufwändigen Analytik fraglich.

Es ist daher das Ziel der vorliegenden Studie, die während dem Wasserstress auftretenden Kavitationen als hydraulische Signale mit Hilfe der Ultraschalltechnik zu untersuchen. Im nachfolgenden Kapitel soll zunächst eine kurze Übersicht über die am meisten verwendeten Ansätze zur Untersuchung des Wasserhaushaltes von Pflanzen gegeben werden. Dabei ist festzuhalten, dass die Ultraschallmessung als vielversprechende Möglichkeit anzusehen ist, um zerstörungsfreie und kontinuierliche Untersuchungen an Pflanzen durchzuführen.

2.1.2 Kavitationen als Wasserstress-Signale

Kavitation ist ein physikalischer Begriff und beschreibt den Übergang des Wassers von der flüssigen in die gasförmige Phase (CHOAT et al., 2003; KIKUTA, 2007). Kavitationen treten in Wasserleitungsbahnen bei starkem Unterdruck auf und sind anfänglich lokal eng begrenzte, kleine Wasserdampfbläschen innerhalb einzelner Zellen („Kavitationskeimbildung“). Eine Ausdehnung der Gasbläschen auf das ganze Gefäßvolumen mit nachfolgendem Lufteintritt wird als Embolie bezeichnet (TYREE, 1999). Zahlreiche Arbeiten mit sehr unterschiedlichen methodischen Ansätzen nennen die „Air-seeding-Hypothese“ (ZIMMERMANN, 1983) als den entscheidenden Mechanismus für die Entstehung und Verbreitung von Kavitationen und Embolien im Xylem der Pflanzen (CROMBIE et al., 1985a; POCKMAN et al., 1995, SALLEO et al., 1992; SPERRY et al., 1996; SPERRY und TYREE, 1988, 1990). Gemäß der Air-seeding-Hypothese wird Luft aus einem benachbarten, bereits luftgefüllten Gefäß, über die Tüpfelporen in das noch wassergefüllte Gefäß hinübergezogen. Der kritische Wert für den Lufteintritt ist abhängig vom Druckunterschied zwischen Atmosphäre und Xylem; nach OERTLI (1993) bei Tüpfelöffnungen mit einem Durchmesser von 2 μm ab 0,15 MPa. Dabei kann auch eine Degradation von Tüpfelmembranen bei Alterungsprozessen eine Rolle spielen (SPERRY et al., 1991), und bei Koniferen ebenfalls die Flexibilität der Tüpfelmembranen (SPERRY und TYREE, 1990).

Weitere mögliche Mechanismen zur Entstehung und Verbreitung von Kavitationen, neben der Air-seeding-Hypothese, sind heterogene Luftkeimbildungen an hydrophoben Spalten der Gefäßwand oder eine homogene Luftkeimbildung, die durch die Freisetzung von im Wasser gelösten Gasen möglich ist (PICKARD, 1981; HÖLTTÄ, 2005).

Embolisierte Gefäße behindern den Wassertransport und sind für den kontinuierlichen Wasserstrom daher problematisch. Durch Embolien wird die hydraulische Leitfähigkeit des Gefäßsystems verringert, der Unterdruck weiter verstärkt und es kann zu einer Kettenreaktion kommen. Diese sogenannte „runaway-Emboliebildung“ führt schließlich zur Unterbrechung des Wassertransportes im betroffenen System (TYREE und SPERRY, 1988, 1989a).

Es gibt mehrere Ursachen von Kavitationen im Xylem. Sie können nach ihrer Entstehung unterschieden werden (TYREE und SPERRY, 1989). Zum Einen treten Kavitationen infolge einer Störung der Wasserbilanz auf. Übersteigt die Transpiration

die Wasseraufnahme, sinkt das Wasserpotential im Xylem. Als Folge der Unterschreitung eines Schwellenwertes des Wasserpotentials entstehen Kavitationen (JACKSON et al., 1995; HACKE und SAUTER, 1995; 1996; NARDINI und SALLEO, 2000; HENDRIKS et al., 2005). Zum Anderen kommt es im Winter nach Einfrieren und nachfolgendem Wiederauftauen zu Kavitationen (SPERRY, 1993; SPERRY et al., 1988; 1994; SPARKS et al., 2001, VILALTA und POCKMAN, 2002). Zudem wurden auch an abgeschnittenen Pflanzenteilen, wie z.B. bei Schnittblumen und Stecklingen, Embolien und Kavitationen nachgewiesen. Mit dem Abschneiden embolisieren die angeschnittenen Xylemgefäße sofort. Nachfolgend embolisieren die nachgelagerten Xylemgefäße („secondary gas embolism“), da die Wassernachfuhr unterbrochen ist und die Pflanze erst mit Verzögerung die Transpiration reduzieren kann.

2.2 Messungen von Wasserstress-Signalen an Pflanzen

2.2.1 Übersicht über gängige Methoden zur Charakterisierung des Wasserhaushaltes

In der stressphysiologischen Forschung gibt es zurzeit viele Ansätze, die sich mit dem Einsatz unterschiedlicher experimenteller Verfahren zur Quantifizierung des Pflanzenwasserhaushaltes befassen. Eine Auswahl von Indikatoren und Methoden zur Messung von Wasserstress an Pflanzen, die eine Aussicht auf praktischen Einsatz zur Bewässerungsteuerung haben, ist in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tab. 1: Überblick gängiger Methoden zur Messung von Wasserstress an Pflanzen.

Indikator	Methode	invasiv	Quelle
Blattwasserpotential Stammwasserpotential	- Scholander Druckkammer - Psychrometrie	ja ja	SCHOLANDER et al. (1974)
Kavitation	- Ultraschalltechnik	nein	TYREE und DIXON (1983)
Stomatäre Leitfähigkeit	- Gas-Wechselmessanlage	nein	TURNER (1990)
Saftfluss	- Kompensationsmethode - Wärmeausgleichstechnik	ja	GRANIER (1985, 1987)
Durchmesseränderung	- Dendrometrie	ja	HERZOG et al. (1995)
Blatt- bzw. Bestandstemperatur	- Infrarot-Thermometrie bzw. Wärmebild	nein ja	STANGHELLINI et al. (1994)

Wasserpotentialmessungen

In transpirierenden Pflanzen steht der Wasserfaden im Xylem in einem Wasserpotentialgradienten zwischen dem Wurzelraum und dem Luftraum. Dadurch entwickelt sich eine starke Saugspannung, die sich mit dem in den Geweben der Blätter entwickelten Wasserpotential im Gleichgewicht befindet. Wird ein Blatt oder ein Zweig von einer Pflanze abgeschnitten, muss sich die „Xylemspannung“ entspannen und der Meniskus des Xylemsaftes zieht sich in die Gefäße zurück. Zur Messung des Wasserpotentials wird nach SCHOLANDER et al. (1965) das zu untersuchende Pflanzenteil luftdicht in ein Druckgefäß mit der Schnittstelle nach außen eingespannt und der Druck im Gefäß durch Druckluftzufuhr so lange erhöht bis Xylemwasser an der Schnittfläche erscheint. Der aufzubringende Druck bis zum Austritt von Wasser

aus den Xylemgefäßen entspricht dem Gleichgewichtsdruck bzw. dem Wasserpotential des Xylems unter Vernachlässigung des osmotischen Potentials (WILLERT et al., 1995).

Mit Hilfe der Druckkammer kann das Xylemwasserpotential relativ einfach und zuverlässig von ganzen Pflanzen, Zweigen oder Blättern bestimmt werden. Das Verfahren ist in der Literatur vielfach dokumentiert und bei vielen verschiedenen Pflanzenarten eingesetzt worden (HOPMANS, 1974). Allerdings gibt es auch Autoren, die die mit Hilfe dieser Technik gemessenen niedrigen Unterdrucke als unphysiologisch einstufen und stattdessen eine Messsondentechnik eingeführt haben, bei der der Unterdruck in Xylemzellen direkt ermittelt wird (BALLING et al., 1988).

Die Messung des Wasserpotentials nach Scholander eignet sich gleichermaßen gut für den Labor- und den Freiland Einsatz. Die Druckkammer funktioniert ohne elektronische Bauteile und ist deshalb wenig stör anfällig und sehr verlässlich. Sie ist außerdem noch vergleichsweise preisgünstig in der Anschaffung. Allerdings ist diese Methode zwar destruktiv und sehr aufwändig, wird aber als Standardmethode für direkte Messungen des Wasserstatus in Pflanzen (McBURNEY, 1992) propagiert und wurde bereits sehr früh für mehrere Pflanzenarten (HOPMANS, 1974) beschrieben.

Messungen der stomatären Leitfähigkeit

Die stomatäre Leitfähigkeit für Wasserdampf bzw. CO₂ gilt als Maß für den mittleren Öffnungsgrad der vorhandenen Stomata. Änderungen der stomatären Leitfähigkeit zeigen damit Spaltöffnungsbewegungen an, die bei Änderungen im Wasserhaushalt auftreten. Eingesetzt werden Porometer, in denen nur Teile eines Blattes eingespannt werden (LÖSCH et al., 1992) bis hin zu großen Küvettensystemen, in denen ganze Blätter oder kurze Zweige untersucht werden (KÖRNER und MAYR, 1980).

Messfehler können dabei vor allem durch Kondensation von Wasser in der Probenkammer und in den Schlauchsystemen entstehen. Neben der Klimaregulation in der Kammer gelten auch die meist punktuell erfolgende Messung und die Störung der laminaren Grenzschicht als problematisch. Die Arbeit von TURNER (1990) diskutiert potentielle Fehlerquellen porometrischer Messmethoden ausführlich.

Saftflussmessungen

Ein weiterer Parameter zur Charakterisierung des Wasserhaushaltes ist die Stärke bzw. die Geschwindigkeit des Saftstroms. Als Antrieb wirkt der Transpirationssog.

Zwei Methoden werden zur Saftflussmessung angewandt: die Methode der thermischen Wärmebilanz (THB) und die Methode der Wärmepulsgeschwindigkeiten (HPV). Im ersten Fall wird eine konstante Wärmequelle am Pflanzenstängel angebracht. Mit Hilfe von Thermometern wird die Temperatur des Stängels vor und nach der Quelle gemessen. Aus der Temperaturdifferenz wird die Wärmebilanz des Stängels abgeleitet. Dadurch wird die Intensität des Verdunstungsverlustes (Transpiration) der Pflanze festgestellt. Vorteilhaft an dieser Methode ist, dass die Transpiration vom Sensor nicht beeinflusst wird (WEIBEL und BOERSMA, 1995).

Im zweiten Fall werden eine Wärmequelle und ein Thermosensor über der Quelle am Stängel angebracht. Gemessen wird die Zeit, in der der Wärmeimpuls den Thermosensor erreicht. Die Geschwindigkeit des Wärmetransportes korreliert eng mit dem atmosphärischen Verdunstungsanspruch und dem Wasserstatus der Pflanze (SWANSON, 1994; LANGENSIEPEN, 1995).

Kontinuierliche Messungen der Saftflussrate sind ein guter Stressindikator, da der Saftfluss sensibel auf die stomatäre Leitfähigkeit, Transpiration und Verdunstungspotenzial reagiert (MISRA und SANDS, 1992). Nachteilig an dieser Methode ist die Anpassung des Sensors, der nicht für alle Stängelgrößen oder Pflanzenarten geeignet ist (SWANSON, 1994; RIVIERE et al., 1999). Eine ständig gute Anpassung des Sensors am Stängel ist erforderlich (EHRET et al., 2001).

Zur Quantifizierung des Wasserstresses müssen pflanzenartspezifische Schwellenwerte (GINESTAR et al., 1998a; 1998b; GIORIO und GIORIO, 2003) bestimmt werden.

Messungen der Bestandstemperatur (Thermographie)

Infrarot-Thermometrie und Thermographie basieren auf der Feststellung, dass die Änderung der Blatttemperatur mit der stomatären Leitfähigkeit korreliert (FUCHS, 1990). Die Quantifizierung des Wasserstresses erfolgt über Referenztemperaturen von nicht gestressten und nicht transpirierenden Blättern. Ein direkter, berührungsloser und messtechnisch relativ einfacher Weg zur Erfassung der Blatttemperatur an Pflanzen ist die Fernerkundungsmethode (Remote Sensing Method). Diese erlaubt die Erstellung von artspezifischen Kennzahlen (z.B. crop water stress index, IDSO et al., 1981). Die Thermografie wird in der Literatur als einfache und störungsarme Methode zur Charakterisierung des Wasserhaushaltes dargestellt.

Durchmesseränderungen

Dimensionsänderungen von Pflanzenorganen sind Ergebnisse des Wachstums und der Wassergehaltsänderung im Pflanzenkörper und werden mittels eines Dendrometers gemessen.

In Bezug auf Messungen des radialen Zuwachses stellt sich das Problem der variierenden kambialen Aktivität am Stamm, sogar in derselben Messhöhe, insbesondere bei Bäumen. Eine sorgfältige Auswahl des Messbereichs ist daher unerlässlich. Sollen der radiale Zuwachs oder in erster Linie das Quellen und Schwinden von Bäumen untersucht werden, so werden häufig Punktdendrometer aufgrund ihrer höheren Messgenauigkeit bevorzugt (vgl. HERZOG et al., 1995; WRONSKI et al., 1985; ZWEIFEL, 1999). Eine andere Möglichkeit der kontinuierlichen, hochaufgelösten Messung der Radialveränderungen stellt die Verwendung von Banddendrometern dar. Diese sind insbesondere in der Lage das Dickenwachstum zu erfassen, da sie den gesamten Umfang der Stämme einbeziehen (vgl. VOGEL, 1994; TARDIF et al., 2001). Die Interpretation von Messdaten ist problematisch, da die Ergebnisse stark von klimatischen Bedingungen beeinflusst werden.

Kavitationen

Bei Störungen der Wasserbilanz bilden sich in den Xylemgefäßen kleine Gasbläschen, wodurch eine lokale Blockade der Wasserleitung bewirkt wird. Die dabei entstehenden Kavitationen sind damit ein früher Indikator für Wasserstress in der Pflanze und können mit Hilfe der Ultraschalltechnik registriert werden.

Das Überwachen des Pflanzenwasserhaushaltes findet durch Sensoren statt, die direkt an den Pflanzenorganen angebracht werden. Diese liefern Signale über den Wasserstatus in den Wasserleitungsbahnen (TYREE und DIXON, 1983).

Der große Vorteil der Ultraschalltechnik ist, dass die Messungen zerstörungsfrei, automatisch und gleichzeitig mit einer Vielzahl von Objekten durchgeführt werden können. Sie wurde oft bei Gehölzen eingesetzt (LO GULLO und SALLEO, 1991; JACKSON et al., 1995; HACKE und SAUTER, 1996; KIKUTA, 2007; MAYR et al., 2007) und wurde bei landwirtschaftlichen und gärtnerischen Kulturen praktisch kaum bearbeitet (BORMANN, 2004). Die vorliegende Arbeit soll diese Lücke schließen und konzentriert sich auf die Eignung der Ultraschallmessungen zur Quantifizierung des Wasserstresses an verschiedenen gärtnerischen Kulturpflanzen, die bislang in der Literatur noch nicht berücksichtigt wurden. Zudem wird geprüft inwieweit diese Methode zur Bewässerungssteuerung geeignet ist. Im folgenden Kapitel soll ein

kurzer Literaturüberblick zu der Entstehung und den Messungen von Kavitationen gegeben werden.

2.2.2 Einsatz der Ultraschalltechnik zur Messung von Kavitationen

Schallsignale („Clicks“) an Pflanzen wurden 1963 erstmalig an abgeschnittenen Rizinusblättern und bei sich öffnenden Farn-Sporangien aufgezeichnet (MILBURN und JOHNSON, 1966). Als Ursache wurden Kavitationen in den Leitungsbahnen angenommen, da die Signale in Beziehung zum Wasserverlust standen.

Weitere Arbeiten an verschiedenen Pflanzenarten führten zu der Vorstellung, dass diese so genannten „Clicks“ durch Vibrationen der Zellwände nach Kavitationsereignissen entstehen (MILBURN 1973a, b; MILBURN und MCLAUGHLIN 1974, SHINFENG et al., 2008b). Allerdings sollen nach MILBURN (1973a) nur „laute Clicks“ mit Kavitationen in Verbindung gebracht werden können. Als Ursache für die Vibration der Zellwände wird eine schlagartige Entspannung des unter negativem Druck stehenden Xylemsaftes angesehen (VOGT, 1998).

Eine deutliche Verbesserung dieser Technik konnte durch Messungen im Ultraschallbereich (50 bis 1000 kHz) erzielt werden (TYREE und DIXON, 1983; TYREE et al., 1984a, b). Im Gegensatz zu Schallmessungen im hörbaren Bereich sind Ultraschallmessungen weitgehend störungsfrei, da Umweltgeräusche in diesem Frequenzbereich normalerweise nicht vorkommen. Auch die Tatsache, dass im Ultraschallbereich deutlich mehr Signale als im hörbaren Frequenzbereichen gemessen wurden, führte zu einer deutlichen Zunahme der Ultraschalluntersuchungen (TYREE und DIXON, 1983; TYREE et al., 1984; SANDFORD und GRACE, 1985; JONES und PENA, 1986; PENA und GRACE, 1986; SALLEO und LO GULLO, 1986).

Weitere Hinweise auf den Zusammenhang zwischen Ultraschallsignalen und dem Auftreten von Kavitationen und Embolien finden sich bei M.A. DIXON et al. (1988), BORGHETTI et al. (1989), LO GULLO und SALLEO (1991), RANASINGHE und MILBURN (1995) und HACKE und SAUTER (1995, 1996). In diesen Arbeiten wurde gezeigt, dass eine enge Beziehung zwischen dem Anstieg der akustischen Emissionen und dem Verlust der hydraulischen Leitfähigkeit besteht. Auch die Beobachtung, dass Ultraschallsignale nur bei Abnahme des Wasserpotentials auftreten, nicht jedoch bei erneutem Anstieg, lassen auf einen engen Zusammenhang zwischen dem Wassertransport und den Ultraschallsignalen schließen (TYREE et al. 1984a, CROMBIE und al., 1985b).

Die meisten Ultraschalluntersuchungen wurden an Stämmen und Stielen durchgeführt (KAVANAGH, 1992; HACKE und SAUTER, 1995; JACKSON et al., 1998; BORGHETTI et al., 1990; HACKE et al., 2000; NARDINI et al., 2001; PERKS et al., 2004; HENDRIKS und SPINAROVA 2003, 2005). Kavitationen treten auch in Blättern (KIKUTA et al., 1997; NARDINI et al., 2001; SALLEO et al., 2001; GULLO et al., 2002), Blattadern (KIKUTA et al., 1997; NARDINI et al., 2001; LO GULLO et al., 2003) und Zweigen (LO GULLO und SALLEO, 1991; PERKS et al., 2004; KIKUTA et al., 2003) auf. Auch in Wurzeln wurden Kavitationen nachgewiesen. Mehrere Untersuchungen wiesen eine höhere Sensibilität des Wurzelxylems im Vergleich zum Stamm- und Zweigxylem nach. Unter Trockenstressbedingungen kann der Xylemdruck in den Wurzeln abfallen und damit die Kavitationsrate ansteigen, während im Stamm bzw. in den Zweigen noch keine Kavitationen auftreten (SPERRY und SALIENDRA, 1994; ALDER et al., 1996; KOLB und SPERRY, 1999; HACKE et al., 2000). Auch nach SPERRY und SALIENDRA (1994) und FROUX et al. (2005) treten Embolien in den Wurzeln früher auf als in oberirdischen Pflanzenteilen. Dies wird in Analogie zu elektrischen Stromkreisen als eine Art „Sicherung“ bei der Wasseraufnahme durch Wurzeln interpretiert, bei der Teile des Wurzelsystems die Leitfähigkeit verlieren, wenn der Boden zu stark austrocknet.

2.2.3 Einsatz der Ultraschalltechnik in der stressphysiologischen Forschung

Identifizierung von wasserstresstoleranten Genotypen

Eine große Bedeutung hat die Ultraschalltechnik bei der Identifizierung von wasserstresstoleranten Genotypen in der Pflanzenphysiologie gewonnen. Hierzu werden Ultraschallsignale als Funktion des Wasserpotentials verwendet, um sogenannte Empfindlichkeitskurven ("vulnerability-curves") zu erstellen (KIKUTA, 2007, OGAYA und PEÑUELAS, 2007). Aus diesen Kurven kann die Empfindlichkeit ganzer Pflanzen oder einzelner Pflanzenteile gegenüber Kavitationen abgeleitet werden, wobei es signifikante Unterschiede in den Schwellenwerten des Wasserpotentials gibt, bei denen eine erhöhte Ultraschallrate auftritt (COCHARD, 1992; HACKE und SAUTER, 1995, 1996; HACKE et al., 2000; SALLEO et al., 2000; JOHNSON et al., 2009). Je niedriger diese Schwellenwerte sind, desto wasserstresstoleranter ist die Pflanze bzw. das Organ. Ein Überblick über die unterschiedlichen Kavitationsschwellenwerte bei Gehölzpflanzen gibt LÖSCH (2001, Seite 199-200); die Wasserpotentialwerte liegen zwischen -0,5 MPa und -4,5 MPa.

SPINAROVA und HENDRIKS (2005) nutzen die Ultraschalltechnik, um wasserstress-tolerante Rosengenotypen zu identifizieren. Dazu wurde in De- und Rehydrierungsexperimenten bei verschiedenen Rosensorten in der Nacherntephase die Transpirationskontrolle mit Hilfe von Kavitationsprofilen charakterisiert. Demnach kann die Wasserstress-Toleranz von verschiedenen Schnittrosensorten anhand von Kavitationsprofilen gut charakterisiert werden.

Weiterhin wurde versucht, durch die Interpretation der Kavitationsprofile und anderer Parameter die Haltbarkeit von Schnittrosen zu prognostizieren (HENDRIKS et al. 2002, HENDRIKS et al., 2005). Hierbei wurden Kavitationsprofile in De- und Rehydrierungsexperimenten erstellt und daraus Rückschlüsse auf die Stomatafunktion und das Rehydrierungsverhalten gezogen. Es hat sich herausgestellt, dass diese Methode aufgrund des relativ hohen Zeitaufwands von etwa 24 Stunden für Prognosezwecke noch nicht praktisch einsetzbar ist.

Des Weiteren wurde die Ultraschallemission bei Schnittrosen in der Nacherntephase als Indikator der Wasserstressintensität geprüft. Die absolute Hitzanzahl konnte nicht mit der Wasserstressintensität direkt korreliert werden. (HENDRIKS und SPINAROVA, 2005).

2.2.4 Ansätze zum Einsatz der Ultraschalltechnik für Steuerungszwecke im Pflanzenbau

Für praktische Anwendungen besitzt die Ultraschalltechnik außerhalb der Pflanzen-Stressphysiologie und Materialprüftechnik nur geringe Bedeutung und ist weitestgehend noch in der Entwicklungsphase.

Bewässerungsteuerung

Es existieren nur wenige Arbeiten, die sich mit dem Einsatz der Ultraschalltechnik zur Bewässerungsteuerung von gärtnerischen Kulturpflanzen befassen. Unter der Annahme, dass Kavitationen bei allen Pflanzenarten auftreten, könnte diese Methode universell eingesetzt werden. Vorteilhaft wäre weiterhin, dass die Ultraschalltechnik zerstörungsfrei und kontinuierliche Messungen direkt an Pflanzen ermöglicht (JONES, 1990; SHIFENG et al., 2008a). Versuchsergebnisse bei Brokkoli (BORMANN et al., 2001; BORMANN und LIEBIG, 2002) und Tomaten (QIU et al., 2002) lassen den Schluss zu, dass eine Beziehung zwischen der Ultraschallemission und der Transpiration der Pflanzen besteht.

Einige Autoren beschreiben bereits den erfolgreichen Einsatz der Ultraschalltechnik zur Bewässerung von Weinreben (JACKSON und GRACE, 1996) und Tomaten

(EHRET et al., 2001). Ein vorgegebener, artspezifischer Schwellenwert der Kavitationsrate zeigt nach diesen Untersuchungen den optimalen Bewässerungszeitpunkt an.

Allerdings zeigen weiterführende Untersuchungen von AKASAKA et al. (2002) und SHIFENG et al. (2004), dass die Kavitationsrate als alleiniger Indikator nicht ausreichend ist, um ein Bewässerungskonzept zu entwickeln, da die UAE-Signalrate von Umgebungsfaktoren stark beeinflusst werden kann. Aus diesem Grund wird von diesen Autoren vorgeschlagen, ein Modell zu entwickeln, welches die akustischen Signalaraten mit anderen Messmethoden kombiniert. Klimatische Faktoren müssten beispielsweise mit erfasst und integriert werden.

SHIFENG et al. (2003, 2004, 2008a) entwickelten ein Modell basierend auf der akustischen Signalrate und der Transpirationsrate, um die Bewässerung bei Tomaten zu steuern. Im Gegensatz zu bisherigen Ansätzen beschreiben diese Autoren die ausbleibende Ultraschallemission bei Trockenstress und zusätzlich als neuen Ansatz die Änderung der Ultraschallfrequenz als Indikator für die Einschaltung der Bewässerung.

JONES (2004) untersuchte die Anwendung der Ultraschalltechnik ebenfalls zur Bewässerungssteuerung. Jedoch wird vom Autor bemängelt, dass durch dieses Verfahren nur sehr starker Wasserstress angezeigt wird.

Klimasteuerung

In Japan wurde ein Klimasteuerungskonzept für Gewächshäuser basierend auf der Ultraschalltechnik entwickelt. Dabei wird mittels der Kavitationsrate die Schattierung bei zu hoher Einstrahlung gesteuert. Dadurch wird die Evapotranspiration reduziert und damit Wasserstress in der Pflanze gemindert und das Pflanzenwachstum optimiert (JACKSON und GRACE, 1996).

2.2.5 Kritische Betrachtung der Ultraschalltechnik und Kenntnislücken beim Einsatz

Es ist nachgewiesen und allgemein akzeptiert, dass Kavitationen Störungen des Wasserhaushaltes darstellen und mittels Ultraschalltechnik gemessen und aufgezeichnet werden können. Die Methode ist in der pflanzenphysiologischen Forschung weit verbreitet und es liegt umfangreiche Literatur, insbesondere zur Charakterisierung des Wasserhaushaltes von Forstgehölzen vor. Im Gegensatz dazu gibt es nur wenige Arbeiten, die sich mit dem Einsatz der Ultraschalltechnik bei gartenbaulich relevanten Kulturen auseinandersetzen. Insbesondere bei krautigen Pflanzen sind die Informationen zur Ultraschallmessung sehr beschränkt. Richtungsweisend in diesem Zusammenhang waren Arbeiten von BORMANN und LIEBIG (2002).

Inwieweit die unterschiedlichen Messpositionen an der Pflanze, das Entwicklungsstadium sowie die Einstrahlung als Einflussfaktoren die Messergebnisse beeinflussen, ist nur ansatzweise geklärt.

Ein quantitativer Zusammenhang zwischen Ultraschallemission und Intensität des Wasserstress ist in der vorliegenden Literatur ebenfalls nicht ausreichend beschrieben. Problematisch hierbei ist, dass die absolute Anzahl der UAE-Signale bereits durch rein technische Faktoren beeinflusst werden kann. So ist bekannt, dass die Sensorbefestigung (SANFORD und GRACE, 1985; JACKSON und GRACE, 1996) und die Kontaktfläche des Sensors (OKUSHIMA et al., 1998; EHRET et al., 2001) die Signalrate beeinflussen kann. Im Zusammenhang mit einer Quantifizierung muss ebenfalls die Tatsache kritisch betrachtet werden, dass Kavitationen prinzipiell in Leitungsbahnen, in Fasern und sogar in lebenden Grundgewebezellen (Parenchymazellen) auftreten können (RITMAN und MILBURN, 1988, 1991; TYREE und SPERRY, 1989). Arbeiten von SANFORD und GRACE (1985), die bei Nadelholzstämmen während einer Dehydrierung eine höhere Kavitationsanzahl als vorhandene Tracheiden ermittelten, bestätigen diese Ergebnisse. Die Interpretation von Ultraschalldaten wird unter anderem auch durch das begrenzte Kavitationspotential (Anzahl an kavitierbaren Zellen) und die Auflösung von Kavitationsereignissen erschwert. Wie aus Austrocknungs- bzw. Dehydrierungsversuchen bekannt ist, steigt die Ultraschallemission mit zunehmendem Wasserstress, fällt dann aber trotz weiter sinkendem Wasserpotential in der Pflanze wieder ab (QIU et al., 2002; BORMANN, 2004; SPINAROVA et al.,

2007). Als Grund wird die sukzessive Verringerung des Kavitationspotentials durch bereits embolisierte Gefäße angeführt. Zusätzlich existieren Hinweise, dass sich Ultraschallsignale auch in Energie oder Frequenz unterscheiden können (SANDFORD und ANMUT, 1985; TYREE und SPERRY, 1989). Daraus muss gefolgert werden, dass auch Signale bei entsprechend hoher Energie und Frequenz gemessen werden, die eigentlich außerhalb des Messbereiches des Sensors liegen (KIKUTA et al., 1997).

Durch eine Optimierung der methodischen Aspekte, unter besonderer Berücksichtigung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse, sollte die Voraussetzung geschaffen werden, weitere Einsatzmöglichkeiten im praktischen Gartenbau zu ermöglichen.

3 Fragestellung

Die vorliegende Arbeit versteht sich als Teilprojekt im Rahmen des Forschungsschwerpunktes „Wasserstress-Signale“, welcher seit 2002 an der Forschungsanstalt Geisenheim etabliert und anhand von Ziergehölzen, Spargel, Schnittblumen und Weinreben bearbeitet wird. In Rahmen dieses Teilprojektes wurde das Ziel verfolgt, die Ultraschalltechnik auf ihre Eignung zur Charakterisierung von Wasserstress und die Einsatzmöglichkeit zur Bewässerungssteuerung an gärtnerischen Kulturpflanzen zu überprüfen. Untersucht wurden sowohl Gehölze (Rosen und Flieder) als auch krautige Pflanzen (Spargel).

Inhaltlich gliedert sich die Arbeit in zwei Teile. Der erste Teil befasst sich mit den Untersuchungen der Ultraschallmessungen an Rosen und Flieder. Hierzu wurden methodische Aspekte, mögliche Einflussfaktoren, sowie die Zusammenhänge zwischen Ultraschallemission und Bodewasserpotential bzw. Wasserpotential in der Pflanze studiert. Besonderer Wert wird dabei auf die Einzelpflanzenstreuung und die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse gelegt.

Im zweiten Teil dieser Dissertation wird der Frage nachgegangen, ob diese Technik auch bei nur wenig verholzten, gärtnerischen Kulturen eingesetzt werden kann. Ausgewählt für diese Untersuchungen wurde Spargel aufgrund seiner großen Bedeutung in der deutschen Gemüseproduktion und der bei dieser Kultur bekannten starken Beeinflussung des Ertrages und der Qualität vom Wasserhaushalt.

Zur Prüfung, ob mittels Ultraschalltechnik eine präzise Charakterisierung des Wasserstressses an gärtnerischen Kulturpflanzen möglich ist, wurden sukzessiv für jede Modellkultur die in Tabelle 2 dargestellten Fragestellungen bearbeitet.

Tab. 2: Überblick der in der Dissertation bearbeiteten Fragestellungen.

Methodische Aspekte	<ol style="list-style-type: none"> 1. Gibt es Unterschiede bezüglich der Ultraschallemission an verschiedenen Pflanzenorganen (Blattstiel und Stängel)? 2. Welche sind geeignete Messorte für die Ultraschallemission (alte oder junge Triebe)?
Messung bei verschiedenen Arten	<ol style="list-style-type: none"> 1. Können Kavitationen auch an gärtnerischen Kulturpflanzen mittels Ultraschalltechnik gemessen werden (Rosen, Flieder, Spargel)? 2. Kommen Ultraschallsignale auch an krautigen Kulturpflanzen vor?
Zusammenhang zwischen Wasserversorgung und Auftreten von Ultraschallsignalen	<ol style="list-style-type: none"> 1. Besteht ein Zusammenhang zwischen der Ultraschallemission und dem Wasserangebot des Bodens? 2. Besteht ein Zusammenhang zwischen der Ultraschallemission und der Wasserversorgung in der Pflanze?
Anwendungsperspektiven	<ol style="list-style-type: none"> 1. Bestehen Aussichten die Ultraschallmessung an Pflanzen zu optimieren? 2. Ist die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse für praktische Anwendungen hoch genug? 3. Können Schwellenwerte der UAE-Signalrate bestimmt werden, die als Maßstab für die Bewässerungssteuerung verwendet werden können?

Die zur Beantwortung dieser Fragen postulierten Arbeitshypothesen werden in den einzelnen Kapiteln bearbeitet.

4 Material und Methoden

4.1 Pflanzliches Versuchsmaterial

4.1.1 *Rosa hybrida*

Als Prüfobjekt bei *Rosa hybrida* (L.) wurde die Sorte 'First Red' verwendet. (Abb. 1). Die dunkelrot blühende Sorte 'First Red' ist eine großblumige Schnittrosensorte, die weltweit sowohl im Gewächshaus als auch bei entsprechenden Klimaverhältnissen im Freiland angebaut wird. Seit mehreren Jahren befindet sich diese Sorte in der Top Ten Liste der holländischen Blumenversteigerungen, was die große wirtschaftliche Bedeutung dieser Schnittrosensorte belegt.

Die Kultur erfolgte im Freiland in 10 L Containern mit Einheitserde Typ 1 (Einheitserdewerk Stangenberg GmbH, Hameln). Die Bewässerung und Düngung wurde praxisüblich durchgeführt. Zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung befanden sich die Pflanzen im 5. Standjahr.



Abb. 1: fünf-jährige Versuchspflanze *Rosa hybrida* Sorte 'First Red' mit Bodenfeuchtesensoren.

4.1.2 *Syringa vulgaris*

Syringa vulgaris (L.), der „Gemeine Flieder“, ist ein großwüchsiger, Ausläufer treibender Strauch meist bis 6 m Höhe und 5 m breit, mit stark duftenden Blüten und aufrechten, vereinigten Rispen. Die zur Untersuchungen verwendete Sorte 'Mme Lemoine' ist bereits seit 1890 in Kultur. Sowohl in Deutschland als auch weltweit ist diese Sorte im Anbau Standard und zeichnet sich durch reinweiße Blüten mit dicht gefüllten Rispen aus. Neben der Verwendung als Ziergehölz ist diese Sorte nach wie vor von zentraler Bedeutung im Treibhanbau zur Produktion von Blütenrispen (WARDA, 1998).

Die Anzucht der Versuchspflanzen fand im Jahr 2000 im Freiland statt. Die Fliederpflanzen wurden in 10L Containern mit 60% Ackerboden und 40% Substrat kultiviert (Abb. 2). Die Bewässerung und Düngung wurde praxisüblich durchgeführt.



Abb. 2: *Syringa vulgaris* 'Mme Lemoine' mit Bodenfeuchtesensoren und Holzstab zur Befestigung der Ultraschallsensoren.

4.1.3 *Asparagus officinalis*

Spargel (*Asparagus officinalis* L.) ist eine mehrjährige Staude, die mit ihrem Rhizom und den fleischigen Speicherwurzeln überwintert. Im Frühjahr werden die treibenden Sprosse geerntet und verzehrt. Nach einer etwa achtwöchigen Ernte treibt das Kraut aus, um erneut Reservestoffe für das kommende Jahr in die Speicherwurzeln einzulagern.

Es wurde Spargel der Sorte 'Gijnlim' verwendet (Abb. 3). Die Pflanzung fand am 29.03.2004 bzw. 30.03.2005 in 15 L Gefäßen im Sandboden statt. Die Bewässerung und Düngung wurde praxisüblich durchgeführt. Die Anzucht erfolgte im Gewächshaus der FA Geisenheim unter natürlichen Klimabedingungen.



Abb. 3: *Asparagus officinalis* 'Gijnlim'. Die Holzstäbe dienen zur Befestigung der Ultraschallsensoren.

4.2 Versuchsdurchführung

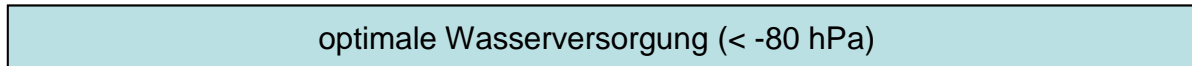
Im ersten Schritt der Versuchsdurchführung erfolgten methodische Untersuchungen, die Fragen zur Messposition, zum Einfluss des Triebalters und der Einstrahlung auf die Ultraschallemissionen bearbeiten. Nachfolgend wurden die Zusammenhänge zwischen Bodenwassergehalt, dem Trieb- bzw. Blattwasserpotential und dem Auftreten von Kavitationen in Austrocknungsversuchen studiert. Darüber hinaus wurde versucht Kavitationsschwellenwerte bei beginnender Welke zu ermitteln. In der folgenden Tabelle 3 findet sich eine Übersicht der im Rahmen der Dissertation durchgeführten Experimente.

Tab. 3: Übersicht über die durchgeführten Untersuchungen.

<p>Methodische Untersuchungen</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Einfluss der Messposition auf das Auftreten von Ultraschallemissionen. 2. Einfluss des Triebalters auf das Auftreten von Ultraschallemissionen. 3. Effekte der Einstrahlung auf das Auftreten von Ultraschallemissionen.
<p>Untersuchung zum Einfluss des Wasserangebotes</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Simultane Messungen von Kavitationen und Wasserpotential im Boden bzw. in der Pflanze im Rahmen von Austrocknungsversuchen. 2. Ermittlung von Kavitationsschwellenwerten bei beginnender Welke.

Für die Untersuchungen wurden jeweils drei bis fünf einheitliche Pflanzen aus einem größeren Bestand ausgewählt. Diese wurden einen Tag vor Versuchsbeginn auf volle Wassersättigung des Substrates bewässert. Im Versuchszeitraum erfolgte bei der Kontrolle eine optimale Wasserversorgung (< -80 hPa). Bei der Variante „Stress“ wurde die Bewässerung eingestellt, um sukzessiv Trockenstress zu erzeugen. Nachdem deutliche Welkeerscheinungen (Boniturnote 5) bei der Variante „Stress“ auftraten, wurden diese Pflanzen wieder auf volle Wassersättigung bewässert (Abb. 4). Zeitpunkt einer Bewässerung war am späten Nachmittag und wurde mit handelsüblichen Gießkannen durchgeführt.

Kontrolle:



Pflanze 3-5:

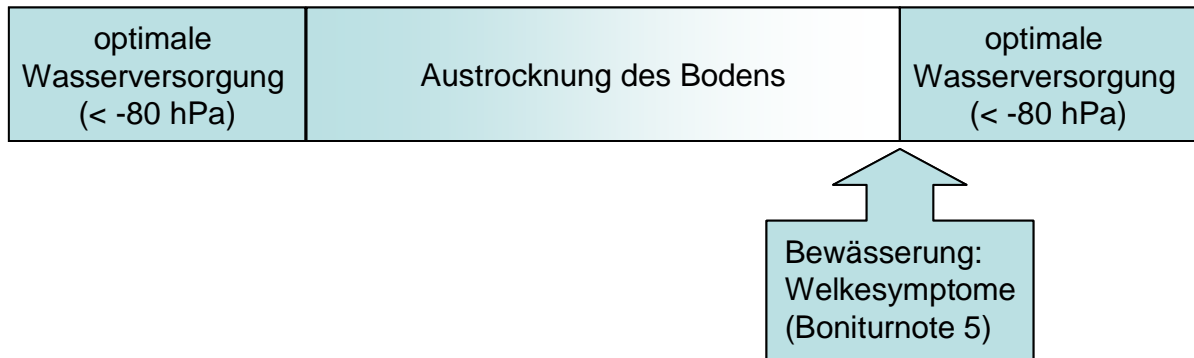


Abb. 4: Schematische Darstellung der Versuchsdurchführung

Neben den Ultraschallmessungen wurden an den gleichen Prüfobjekten in jeder Versuchsreihe Bodenwasserpotential, Trieb- bzw. Blattwasserpotential sowie Welkesymptome erfasst. Die jeweiligen Messtermine sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tab. 4: Übersicht der in den Austrocknungsversuchen erfassten Parameter des Wasserhaushaltes und dessen Messzeitpunkte.

Parameter	Termin
Kavitationen (Ultraschalltechnik)	kontinuierliche Messung (alle 4 Sekunden)
Bodenwasserpotential (Tensiometer)	Rosen und Flieder: frühmorgentliche und mittägliche Ablesung an zwei Tensiometern je Topf (n=3-5) Spargel: kontinuierliche Messungen
Trieb- bzw. Blattwasserpotential (Scholander-Druckkammer)	Rosen: mittägliches Blattwasserpotential Flieder: mittägliches Triebwasserpotential
Bonitur (Welkeerscheinungen)	mittägliche Bonitur der Gesamtpflanze

Die jeweiligen Versuche erstreckten sich über einen Zeitraum von 7 bis 14 Tagen und wurden mehrfach wiederholt (Tab. 5).

Tab. 5: Versuchsnummer und Versuchszeitraum der durchgeführten Experimente.

Rosen		Flieder		Spargel	
Versuch	Zeitraum	Versuch	Zeitraum	Versuch	Zeitraum
1/2004	22.09.04 bis 30.09.04	1/2004	28.04.04 bis 09.05.04	1/2004	28.07.04 bis 04.08.04
2/2004	24.09.04 bis 30.10.04	2/2004	12.05.04 bis 19.05.04	2/2004	06.09.04 bis 14.09.04
3/2004	22.10.04 bis 30.10.04	3/2004	12.05.04 bis 23.05.04	3/2004	28.07.04 bis 04.08.04
1/2005	02.04.05 bis 14.04.05	1/2005	26.05.05 bis 02.06.05	1/2005	15.08.05 bis 25.08.05
2/2005	20.04.05 bis 25.04.05	2/2005	08.06.05 bis 10.06.05	2/2005	13.09.05 bis 21.09.05

4.3 Messmethoden

Der Aufbau, die verschiedenen Versuchsanordnungen sowie die eingesetzten Messgeräte und Sensoren werden nachfolgend beschrieben.

4.3.1 Durchführung von Ultraschallmessungen

Die Ultraschallmessungen wurden mit einem oder mit zwei AMSY4 2-Kanal Ultraschallemissionsmessgeräten der Firma Vallen-Systeme GmbH (Iking) durchgeführt. Mit Hilfe eines Multiplexers (MUX1) können bis zu acht Sensoren pro Messkanal angeschlossen werden. Die Sensoren registrieren vier Sekunden UAE-Signale zyklisch aufeinanderfolgend.

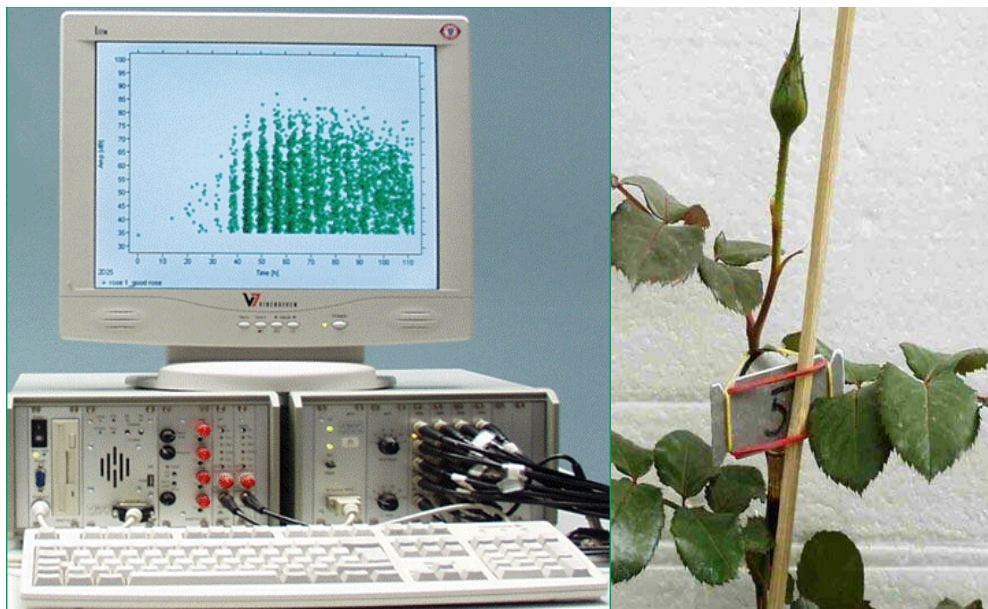


Abb. 5: Links: Ultraschallgerät AMSY4 mit Vorverstärker und Multiplexer MUX 1 mit 16 Kanälen.

Rechts: Ultraschallsensor mit Aluminiumhalterung und Befestigung mittels Gummiband am Versuchsobjekt.

Die Ultraschallsensoren (Typ VE 150-M) werden über einen Vorverstärker an die Messkanäle der Technik angeschlossen und messen in einem Messbereich zwischen 100 kHz bis 450 kHz. Die Ultraschallsensoren funktionieren nach dem piezoelektrischen Prinzip, indem eine mechanische Schwingung in eine elektrische Schwingung umgewandelt wird. Die piezokeramischen Sensoren wurden mit ihrer Rückseite auf Halterungen aus Aluminium aufgeklebt und mit Gummis an den Pflanzen befestigt, so dass die Sensorenköpfe plan auflagen. Ein dünn aufgetragenes Silikon-Fett (Baysilone-Paste mittelviskos; Bayer AG, Leverkusen)

sollte die störungsfreie Schallübertragung sicherstellen. Bei krautigem oder zu schwachem Prüfmaterial war es notwendig, die Sensoren mit der Alurückseite an Holzstäbchen zu fixieren. In Vorversuchen wurden eine Reihe von Faktoren ermittelt, die zu Fehlmessungen führen können. Die durchgeführten Maßnahmen und deren Zielsetzungen zur Verminderung von Fehlmessungen sind in der Tabelle 6 dargestellt.

Tab. 6: Durchgeführte Maßnahmen und deren Zielsetzungen zur Verminderung von Fehlmessungen.

Maßnahme	Zielsetzung
Vorabprüfung der Messumgebung	Vorabprüfung auf Hintergrundgeräusche: Auswahl von Gewächshauslaboren mit geringen hintergrundgeräuschverursachenden elektrischen Einrichtungen
Sensortestung vor Messbeginn	Definierte Schallemission mittels Bruch einer Bleistiftmine 0,3 mm
Blindmessungen	Parallele Blindmessungen zur Ermittlung der Hintergrundgeräusche
Amplitudenfilter	Begrenzung der registrierten Signalen über Schwellenwert $\geq 32,8$ dB
Frequenzfilter	Begrenzung des nominalen Messbereichs der Sensoren zwischen 100 kHz bis 450 kHz
USV-Gerät	Unterbrechungsfreie Stromversorgung
Trenntransformator	Vermeidung von Spannungsschwankungen

4.3.2 Blatt-, Wurzel- und Stammwasserpotentialmessungen

Die Bestimmung des Wasserpotentials von Trieben, Wurzeln und Blättern erfolgte mit der Druckkammermethode nach SCHOLANDER et al. (1965). Eingesetzt wurde ein Gerät SKPM 1400/ 40 der Firma Skye Instruments Ltd. Kurz vor dem Abtrennen der Prüfobjekte wurden diese eingetütet (Polyethylen-Tüten), um Wasserverlust durch Transpiration und ein damit verbundenes Absinken des Wasserpotentials zwischen Abtrennzeitpunkt und Messzeitpunkt zu verhindern (TURNER, 1988). Alle Prüfobjekte wurden mit einem scharfen Messer bzw. einer Rasierklinge abgetrennt und sofort in die Scholander-Druckkammer eingesetzt. Mit Hilfe einer Lupe wurde unter langsamer Druckerhöhung der Zeitpunkt des Feuchtwerdens der Schnittfläche

ermittelt. Die Druckerhöhung lag bei maximal 0,02 MPa/Sek. Zwischen der Abtrennung der Probe und dem Anfang der Messung verstrichen ca. 40-60 Sek. Das Wasserpotential wurde aufgrund der geringen Streuung nur zweimal pro Variante bestimmt. Dadurch verringerte sich die Gesamtdauer aller Messungen und eine gute Vergleichbarkeit der Varianten war durch zeitnahe Messungen gegeben.

4.3.3 Bodenwasserpotentialmessungen

Das Bodenwasserpotential wurde mit Hilfe von Tensiometer ermittelt. Tensiometer bestehen aus einem keramischen, porösen Tonkörper, der über ein Plexiglasrohr vakuumdicht verschlossen wird. Das Plexiglasrohr ist mit Leitungswasser gefüllt und für Wasser und Ionen durchlässig. Je nach Wassergehalt des Bodens entsteht im Inneren ein mehr oder weniger starker Unterdruck. Tensiometer sind für einen Messbereich <-800 hPa geeignet.

In jeden Container wurde ein 15 cm und 25 cm langer Tensiometer 24 Stunden vor Versuchsstart installiert. Um ein möglichst störungsfreies Einbringen der Tensiometer in den Boden zu gewährleisten, musste teilweise ein Loch vorgebohrt werden. Durch Einschlämmen der Tensiometer wurde ein guter Bodenkontakt erzielt.

Die Messung der Bodenwasserspannung erfolgte mindestens zweimal pro Tag mit einem Einstich-Manometer von Hand. Das Messergebnis wurde entsprechend den Tensiometerlängen korrigiert und nachfolgend arithmetisch gemittelt. Die Tensiometer wurden nach Bedarf regelmäßig nachgefüllt.

4.3.4 Welkebonituren

Die Welkeerscheinungen an den jungen Trieben bzw. Blättern wurden täglich bonitiert. Zum Abschätzen der Befallsstärke wurden für die Welkenphasen Bildskalen erstellt und beschrieben, um die Präzision und Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu verbessern. Bonitiert wurden die jungen Triebe bzw. Blätter, die am empfindlichsten bei Wasserstress reagierten.

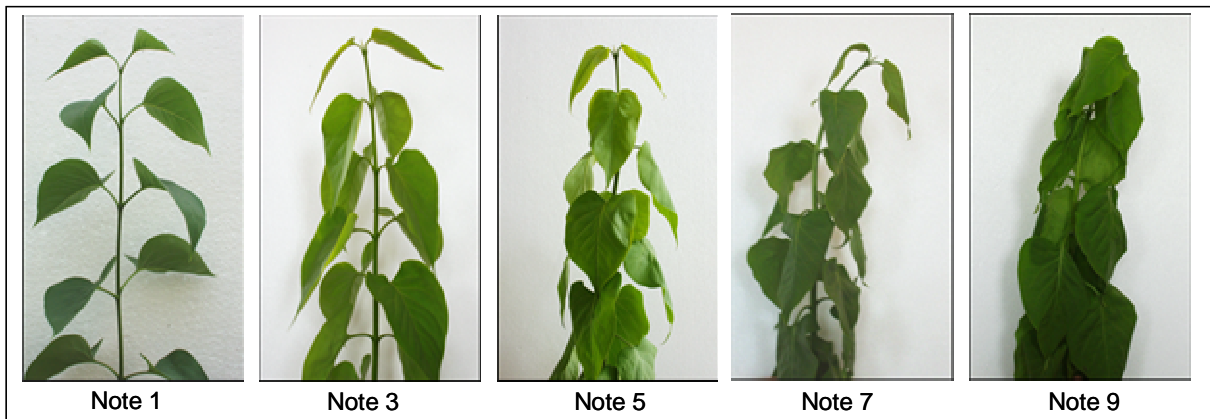


Abb. 6: Boniturschema zur Charakterisierung der Welkeintensität am Beispiel von *Syringa vulgaris*

In der folgenden Tabelle sind die Noten für die Boniturskala im Bereich von 1 (keine Welkesymptome) bis 9 (starke Welkesymptome) beschrieben (Tab. 7).

Tab. 7: Boniturskala für die Feststellung von Welkeerscheinungen.

1	Keine Welkesymptome	Keine Welkesymptome; Trieb voll turgeszent
3	geringe Welkesymptome	Beginnende Welke und leichte Rollung der Blätter
5	mittlere Welkesymptome	Turgorverlust, Blätter welk und deutlich herabhängend
7	starke Welkesymptome	Blätter stark herabhängend, ausgeprägte Einrollung
9	sehr starke Welkesymptome	Blätter stark herabhängend, ausgeprägte Einrollung Neigung der Triebspitze > 45°

4.4 Versuchsumgebung

Die Versuche wurden überwiegend im Frühjahr und Herbst unter natürlichen Lichtbedingungen in Gewächshäusern unter den nachfolgend aufgeführten Rahmenbedingungen durchgeführt (Tab. 8). Dadurch wurde eine Beeinflussung durch Niederschläge ausgeschlossen und die tatsächlichen Klimabedingungen entsprachen überwiegend der Regeleinstellung.

Tab. 8: Übersicht der Versuchsbedingungen im Gewächshaus.

Klimafaktor	Rahmenbedingungen
Licht	Normgewächshaus: Einfachverglasung Natürliche Einstrahlung Schattierschirm: Deaktiviert
Temperatur	Heiztemperatur: Tag: 20°C; Nacht: 18°C Lüftungstemperatur: Tag: 22°C; Nacht: 20°C
Luftfeuchtigkeit	nicht geregelt

4.5 Statistische Auswertung

Die statistischen Auswertungen erfolgten mit Microsoft® Excel 2002. Zur Charakterisierung der annähernd normal verteilten Ergebnisse wurden die statistischen Kennwerte Mittelwert, Standardabweichung und Varianz verwendet. Im Falle der Korrelationen wurde der quadrierte Korrelationskoeffizient R^2 als Bestimmtheitsmaß angegeben, der den Grad der Abhängigkeit zwischen beiden Variablen am besten beschreibt. Um die festgestellten Korrelationen statistisch absichern zu können, wurde bei nicht normal verteilten Variablen der Korrelationskoeffizient nach RASCH et al. (1973; aus MUNZERT, 1992) als verteilungsunabhängiges Abhängigkeitsmaß auf Signifikanz getestet. Die Signifikanzen der Zusammenhänge wurden standardmäßig zum Signifikanzniveau $\alpha=0,05$ (*) und 0,01 (**) überprüft.

5 Ergebnisse

5.1 Ultraschalluntersuchungen an *Rosa hybrida*

5.1.1 Einfluss der Messposition auf das Auftreten von Ultraschallemissionen

Aus der Literatur ist bekannt, dass die Ultraschallrate neben der Intensität des Wasserstresses auch von Alter und Art der Organe abhängt. Um Signalorte mit hoher Auflösung zu identifizieren, wurden die Messungen an Sprossbasis, Blattstiel und Pedunkel durchgeführt. Die Untersuchungen erfolgten wie bereits im Kapitel 4.2 beschrieben im Rahmen eines mehrtägigen Austrocknungsversuches.

In der nachfolgenden Abbildung 7 sind die UAE-Signalraten an den drei untersuchten Messpositionen während der Austrocknung des Substrates dargestellt. Es wurden erhebliche Unterschiede in den Kavitationsprofilen der geprüften Messpositionen während eines Austrocknungsversuches festgestellt. Erkennbar ist, dass nur am jungen Trieb (Pedunkel) eine hohe UAE-Signalrate sowie eine deutlich ausgeprägte Tag-Nacht-Rhythmik auftraten.

Demgegenüber blieben die Ultraschallsignalraten an der Sprossbasis und am Blattstiel trotz zunehmender Bodenaustrocknung auf gleich niedrigem Niveau und ohne erkennbare Tag-Nacht-Rhythmik. Die niedrigen Ultraschallemissionen an Sprossbasis und Blattstielen wurden in wiederholten Austrocknungsversuchen bestätigt. Zusätzlich unbefriedigend an diesem Ergebnis ist, dass sich die UAE-Signalrate trotz sinkendem Bodenwassergehalt nicht nennenswert verändert hat. Aus diesen Gründen wurden diese Messorte für weitere Ultraschallmessungen ausgeschlossen und lediglich junge Triebe (Pedunkel) berücksichtigt.

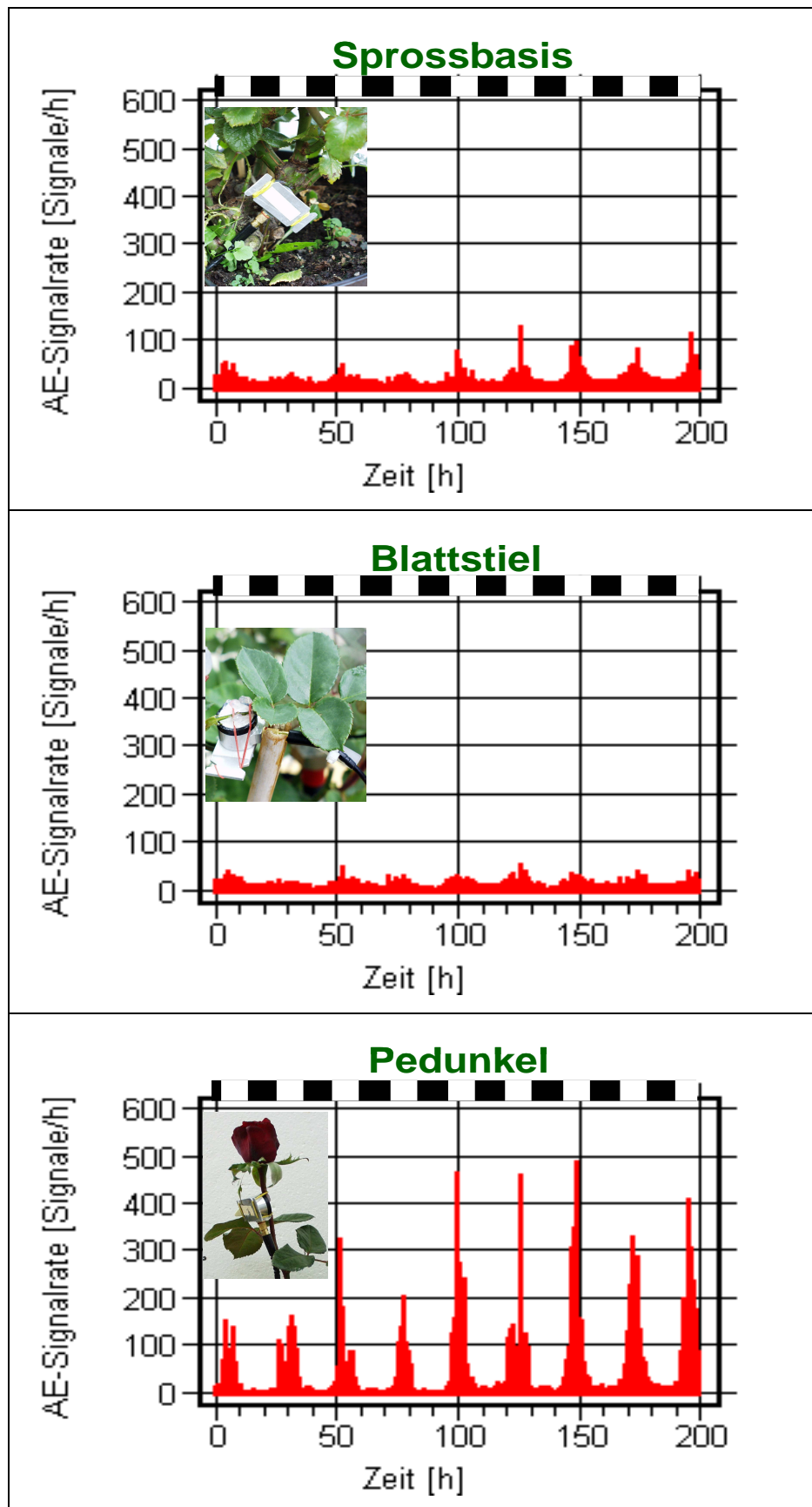


Abb. 7: Ultraschallsignalrate (AE-Signalrate) von verschiedenen Organen von *Rosa hybrida* während eines Austrocknungsversuches. Die Hell-Dunkelphasen sind am oberen Abbildungsrand grafisch dargestellt (schwarze Balken: Dunkelphase).

5.1.2 Einfluss des Entwicklungsstadiums des Triebes auf das Auftreten von Ultraschallemissionen

Es ist davon auszugehen, dass sich während des 10-tägigen Versuchszeitraums neben der Bodenfeuchte auch die Morphologie des jungen Triebes verändert. Um genauer zu überprüfen, ob Unterschiede bezüglich der Ultraschallsignallrate an Trieben mit unterschiedlichem Entwicklungsstadium bestehen, wurde die Ultraschallemission in weiteren Versuchen zeitgleich mit Trieben unterschiedlichen Alters durchgeführt. Hierzu wurden Triebe im Alter von ca. vier Wochen (rötliche Blätter, Knospe geschlossen), ca. sechs Wochen (Petalen sichtbar, geöffnete Sepalen) und ca. acht Wochen (Petalen und Sepalen geöffnet, erntereif) herangezogen.

In den nachfolgenden Darstellungen der Ultraschallemission von drei jungen Trieben mit unterschiedlichen Entwicklungsstadien während eines Austrocknungsversuches ist zu sehen, dass sich die Kavitationsprofile deutlich unterscheiden (Abb. 8). Beim Vergleich der drei Triebe ist festzustellen, dass der ca. vier Wochen alte Trieb deutlich weniger Kavitationen aufwies als Triebe in einem späteren Entwicklungsstadium. Weiterhin ist in diesem Triebalter keine Tag-Nacht-Rhythmik feststellbar. Die absolute UAE-Signallrate, sowohl während der Nachtphase als auch während der Tagphase, veränderte sich im Versuchszeitraum kaum.

Im Gegensatz dazu wurde an den sechs bzw. acht Wochen alten Trieben eine deutliche Tag-Nacht-Rhythmik der Ultraschallemission ermittelt. Bei dem ca. sechs Wochen alten Trieb blieb die Ultraschallsignallrate am ersten Tag niedrig mit kaum erkennbarer Tag-Nacht-Rhythmik. Nach 30 Stunden erhöhte sich die UAE-Signallrate tagsüber deutlich, was eine ausgeprägte Tag-Nacht-Rhythmik zur Folge hatte. Mit zunehmender Bodenaustrocknung erhöhte sich die UAE-Signallrate während der Nachtphasen. Der ca. acht Wochen alte Trieb zeigte dagegen schon am ersten Versuchstag eine ausgeprägte Tag-Nacht-Rhythmik der Ultraschallsignallrate. Allerdings kann nach ungefähr 85 Stunden ein Rückgang der Ultraschallemission beobachtet werden. Dieser Rückgang steht in keinem Zusammenhang zur Bodenfeuchte. Die Signallraten während der Nacht veränderten sich nur im geringen Umfang.

Die Untersuchungen zur Identifizierung von geeigneten Messorten lassen erkennen, dass nur Triebe in einem Entwicklungsstadium von ca. sechs Wochen hohe Signallraten aufweisen und einen Zusammenhang zur Bodenfeuchte zeigen.

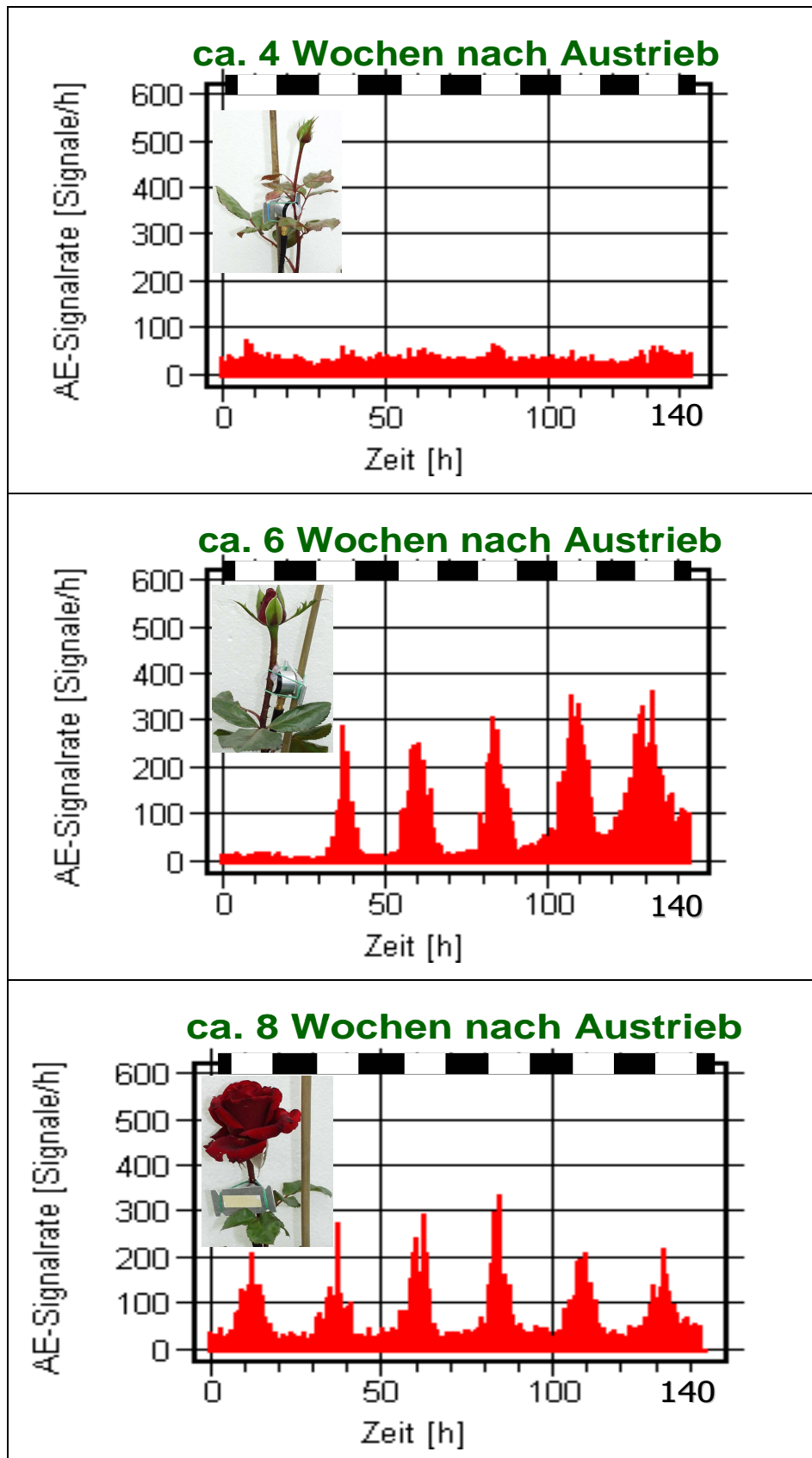


Abb. 8: Ultraschallsignallrate (AE-Signallrate) von *Rosa hybrida* bei unterschiedlichen Entwicklungsstadien des Triebes (4, 6 und 8 Wochen alt) während eines Austrocknungsversuches. Die Hell-Dunkelphasen sind am oberen Abbindegrnd grafisch dargestellt (schwarze Balken: Dunkelphase).

5.1.3 Ultraschallemissionen im Tagesgang

Die großen Tag-Nachtamplituden der Ultraschallemission lassen erkennen, dass die Einstrahlung einen erheblichen Einfluss auf die Ultraschallemission nimmt. Zur Prüfung des Einstrahlungseffektes wurde deshalb die Ultraschallemission im Tagesgang parallel zur Einstrahlung bei Pflanzen mit guter Wasserversorgung ermittelt.

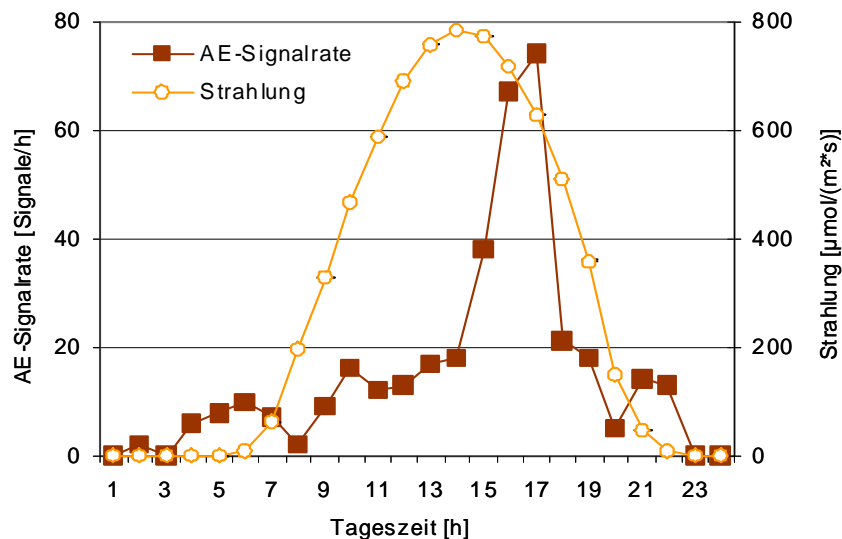


Abb. 9: Verlauf der Ultraschallsignalrate von *Rosa hybrida* und der Strahlung im Tagesgang bei guter Wasserversorgung des Substrates.

Abbildung 9 zeigt exemplarisch, dass die Ultraschallemission bei guter Wasserversorgung der Pflanze im Tagesverlauf anfänglich trotz zunehmender Einstrahlung nur wenig ansteigt. Erst am Nachmittag, d.h. ca. drei Stunden nach der maximalen Einstrahlung tritt ein starker UAE-Peak auf. Nachfolgend sinkt die UAE-Signalrate stark ab und erreicht am Abend und in der Nachtphase wieder das geringe Ausgangsniveau. Grundsätzlich anders verhalten sich die Ultraschallraten bei Wassermangel (Abb. 10).

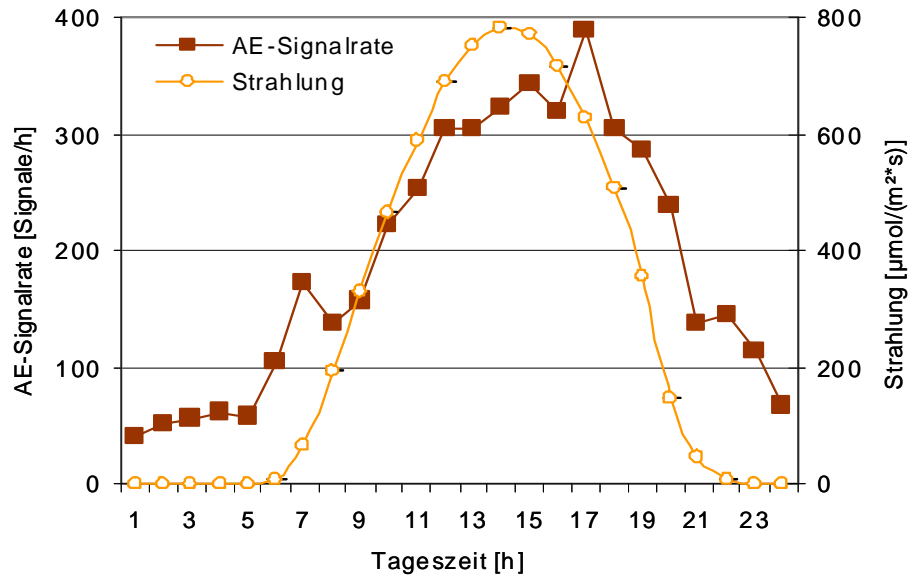


Abb. 10: Verlauf der Ultraschallsignalrate von *Rosa hybrida* und der Strahlung im Tagesgang bei Wassermangel.

Hier steigen die UAE-Signalraten bereits am Vormittag und analog zur steigenden Einstrahlung deutlich an. Das Maximum wurde ebenfalls in den späten Nachmittagsstunden ermittelt. Mit Abnahme der Einstrahlung ging hier, wenn auch nicht so zügig wie bei der bewässerten Variante, die UAE-Signalrate ebenfalls zurück. Im Gegensatz zu den bewässerten Pflanzen konnte in den unbewässerten Varianten auch in der Nacht eine deutlich erhöhte UAE-Signalrate registriert werden. Auffällig war, dass die beiden Varianten sich wesentlich in den absoluten UAE-Signalraten unterscheiden. So wurde bei der bewässerten Pflanze im Tagesverlauf jeweils nur etwa 1/5 der Schallemission im Vergleich zur gestressten Pflanze gemessen.

Im Rahmen der methodischen Vorarbeiten hat sich ergeben, dass die Ultraschallemission an unterschiedlichen Pflanzenorganen nicht in gleicher Qualität vorkommt, d. h. dass die UAE-Signalraten nicht an allen geprüften Pflanzenpositionen auftraten. Die höchsten UAE-Signalraten wurden an jungen Trieben gemessen. Allerdings hat sich in weiterführenden Versuchen gezeigt, dass auch der Entwicklungsgrad des jungen Triebes die Messergebnisse beeinflusst. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass sich dabei auch die Einstrahlung als besonders wesentlich herausgestellt hat.

5.1.4 Einfluss der Wasserversorgung auf das Auftreten von Ultraschallemissionen

Nach Prüfung der möglichen Einflussfaktoren wird im nachfolgenden Kapitel der Zusammenhang zwischen Ultraschallemission und Wasserangebot behandelt. Um zu prüfen, ob ein Zusammenhang zwischen UAE-Signalrate und Wasserangebot im Substrat besteht, wurde bei bewässerten und unbewässerten Pflanzen die Ultraschallemission registriert.

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Ultraschallemissionen von jungen Trieben (ca. sechs Wochen alt, Petalen sichtbar und geöffnete Sepalen) einer täglich bewässerten (Abb. 11A) und einer unter Wassermangel (Abb. 11B) befindlichen Containerrose während eines Tag-Nacht-Zyklus dargestellt. Das Bodenwasserpotential der nicht gestressten Rosen betrug zum Messtermin ca. -50 hPa, das der gestressten Rosen ca. -500 hPa. Jeder Punkt in der Abbildung 11 repräsentiert ein Schallereignis.

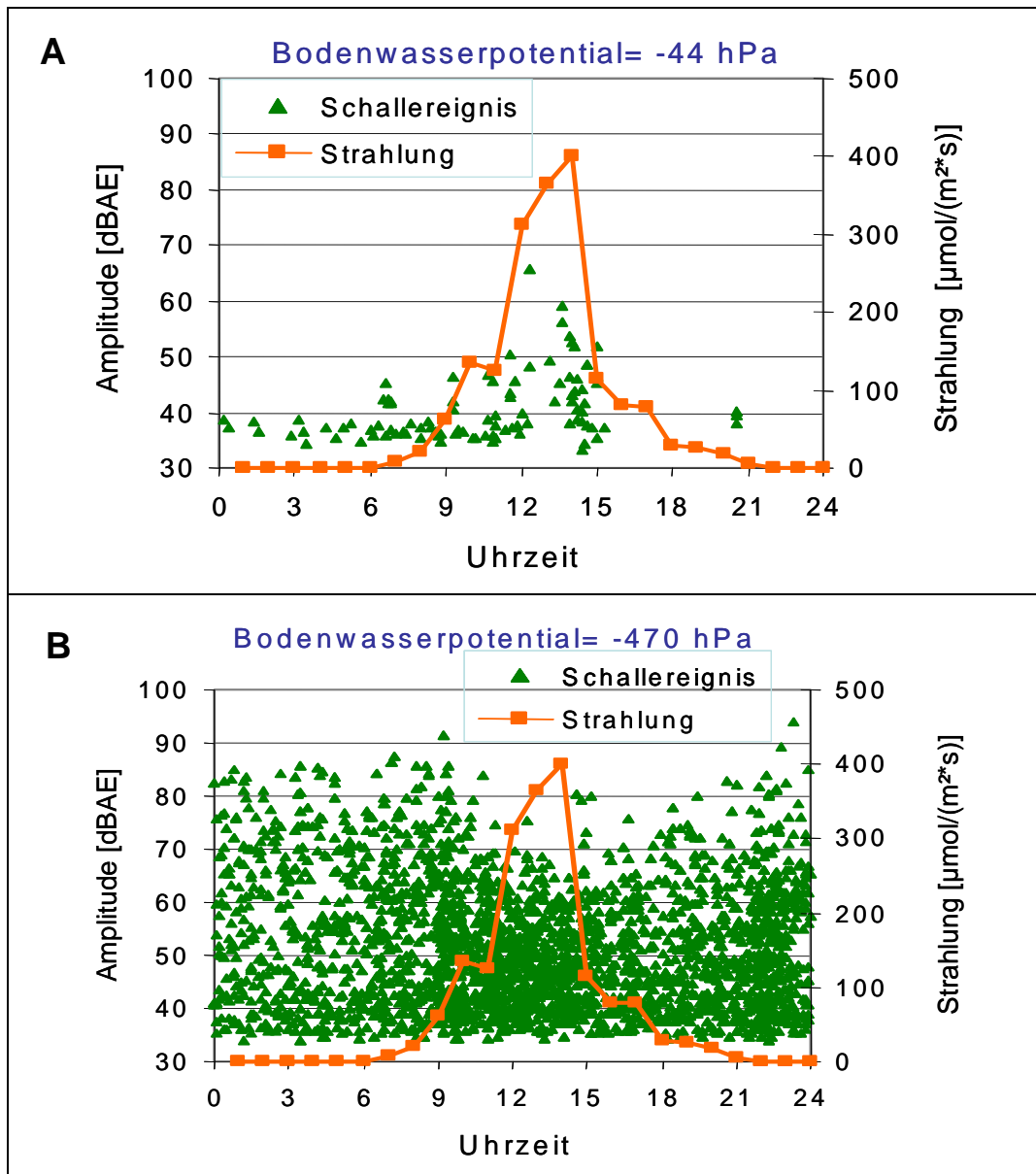


Abb. 11: Ultraschallereignisse und ihre Amplitude im Tagesgang.

A) Ultraschallsignale an jungem Trieb einer ausreichend bewässerten Rosenpflanze.

B) Ultraschallsignale an jungem Trieb einer Rosenpflanze unter Wassermangel.

Wie aus der Abbildung 11 zu entnehmen ist, traten bei den täglich bewässerten Versuchspflanzen (Abb. 11A) nur sehr wenige Ultraschallsignale auf. Demgegenüber konnten bei der Versuchspflanze unter Wassermangel eine Vielzahl von Ultraschallsignalen registriert werden (Abb. 11B). Dieser Unterschied ist sowohl während des Tages als auch während der Nachtphase sehr deutlich. Ein weiterer deutlicher Unterschied ist in der Amplitude der beiden Versuchsvarianten erkennbar. So zeigt die unter Wassermangel befindliche Pflanze ein Amplitudenspektrum bis 90dB, während die bewässerte Pflanze nur eine Amplitude bis etwa 60 dB aufwies.

Um statistisch signifikante Unterschiede der UAE-Signalraten zwischen bewässerten und unbewässerten Pflanzen zu identifizieren, wurden Mittelwerte und Standardabweichungen von den pro Tag aufsummierten UAE-Signalraten bewässerter und unbewässerter Versuchspflanzen errechnet. Dazu wurden die Bodenwasserpotentiale in die Klassen 0 bis -100 hPa (bewässerten Pflanzen) und -400 bis -500 hPa (unbewässerten Pflanzen) unterteilt.

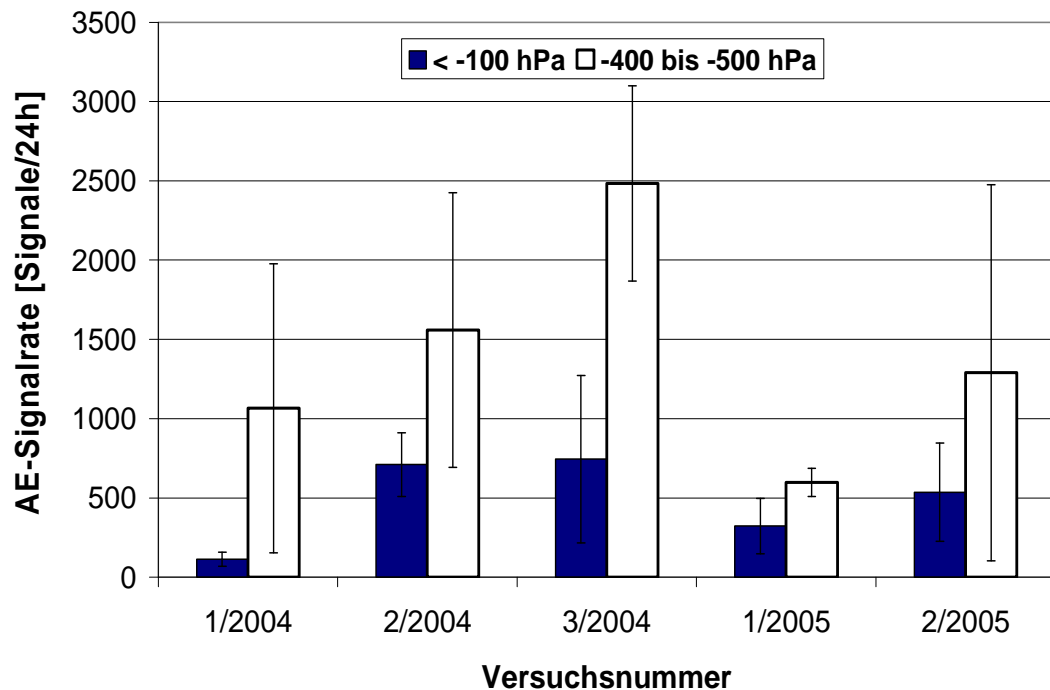


Abb. 12: Ultraschallsignalraten an jungen Trieben von bewässerten und unbewässerten Rosenpflanzen aus 5 Versuchen. Daten zeigen Mittelwerte mit Standardabweichungen (n= 3 bzw. 4).

Der Abbildung 12 ist zu entnehmen, dass bei Pflanzen unter Wassermangel (-400 bis -500 hPa) deutlich höhere Ultraschallemissionsraten im Vergleich zu bewässerten Pflanzen (bis -100 hPa) gemessen wurden. Allerdings zeigt sich auch, dass die absoluten UAE-Signalraten zwischen den einzelnen Versuchen stark voneinander abweichen. So erreichte die UAE-Signalrate bei bewässerten Pflanzen im dritten Versuchsdurchgang (Versuchsnummer 3/2004) mit 740 Ultraschallsignalen pro Tag annähernd die sechsfach gemessene Ultraschallsignalrate wie im ersten Versuch (Versuchsnummer 1/2004). Weiterhin ist aus den großen Standardabweichungen zu folgern, dass die UAE-Signalraten auch zwischen den Versuchspflanzen erheblich streuen.

Nachdem gezeigt werden konnte, dass sich die Anzahl der Ultraschallsignale zwischen bewässerten und unbewässerten Pflanzen unterscheiden (Abb. 12), soll nachfolgend überprüft werden, ob auch ein quantitativer Zusammenhang zwischen

UAE-Signalrate und Bodenwasserpotential über die gesamte Versuchsdauer feststellbar ist. Dazu wurden im Rahmen von Austrocknungsversuchen kontinuierlich die UAE-Signalraten pro Tag an jungen Trieben von Containerrosen sowie das Bodenwasserpotential über mehrere Tage registriert. Als deutliche Welkesymptome sichtbar (Boniturnote 5) waren, wurden die Pflanzen bewässert und nachfolgend noch bis zu vier Tagen weiter beobachtet.

Wie in der folgenden Abbildung 13 ersichtlich, ist in den ersten vier Tagen nach Beginn des Austrocknungsversuches nur eine geringe Absenkung des Bodenwasserpotentials aufgetreten. Nachfolgend nahm das Bodenwasserpotential innerhalb von fünf Tagen bis auf -600 hPa bis -800 hPa ab. Zu diesem Zeitpunkt wurden an allen Pflanzen Welkesymptome sichtbar. Durch die nachfolgende Bewässerung am neunten Tag wurde das Ausgangsniveau des Bodenwasserpotentials wieder erreicht.

Die UAE-Signalraten der jungen Triebe bei Pflanze 1 und Pflanze 2 verliefen nahezu parallel zum Bodenwasserpotential. Bis zum vierten Versuchstag kam es bei allen Pflanzen zu keiner nennenswerten Veränderung der UAE-Signalrate. Nachfolgend stieg die UAE-Signalrate bei Pflanze 1 und 2 parallel zum Bodenwasserpotential an. Anders verhielt sich die Pflanze 3. Trotz Abnahme des Bodenwasserpotentials, stieg die UAE-Signalrate nur unwesentlich an. Nach erfolgter Bewässerung sank die Ultraschallemission wieder deutlich ab, jedoch trat ein verzögerter Rückgang der UAE-Signalrate im Vergleich zum Bodenwasserpotential bei allen drei untersuchten Pflanzen auf. Weiterhin auffallend waren die großen Streuungen der UAE-Signalrate zwischen den Wiederholungen innerhalb einer Pflanze.

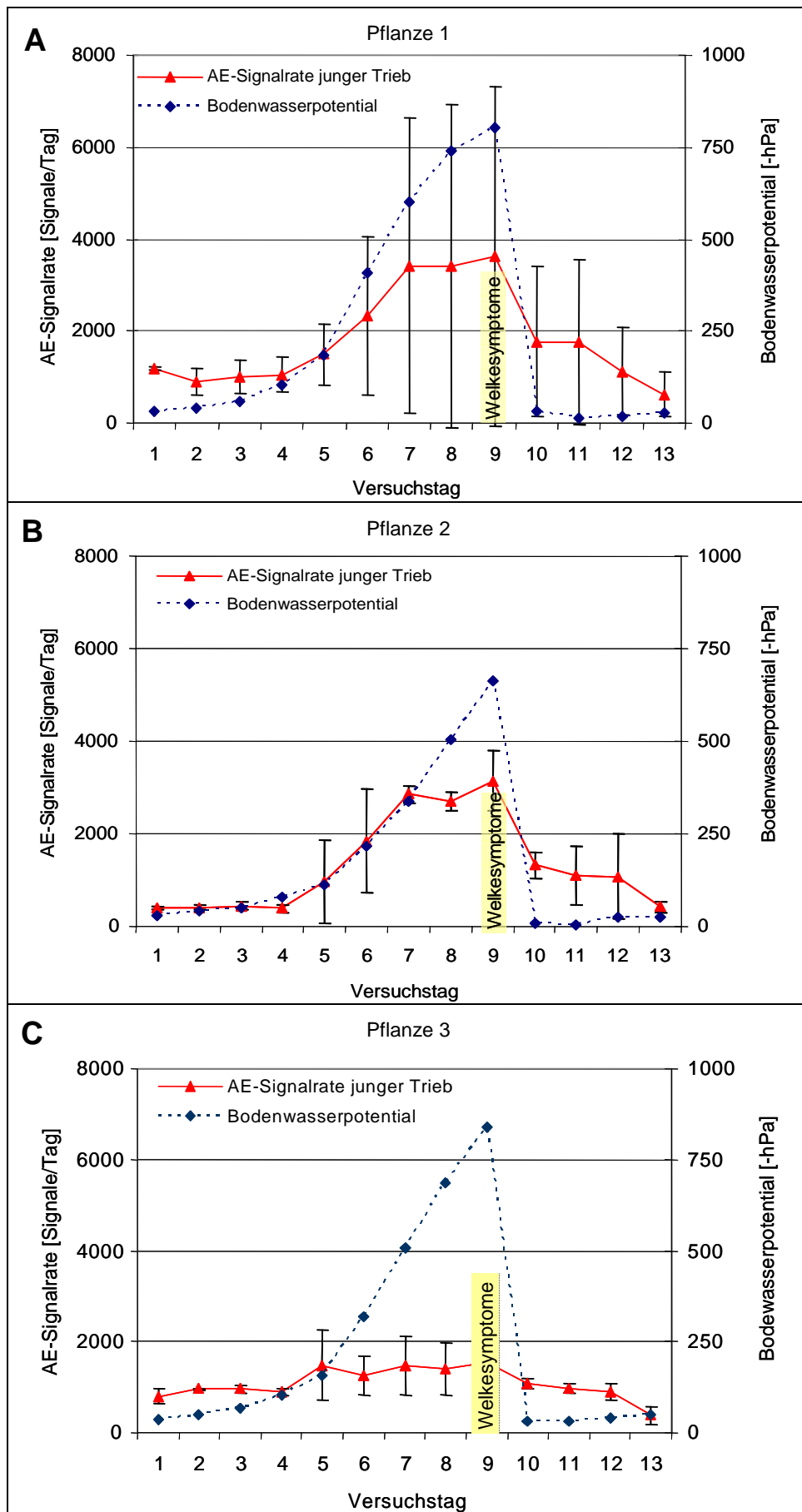


Abb. 13: Ultraschallsignalraten von *Rosa hybrida* und Bodenwasserpotential während eines Austrocknungsversuches (Daten zeigen Mittelwerte mit Standardabweichungen von 2 Wdh.). A) Pflanze 1, B) Pflanze 2, C) Pflanze 3.

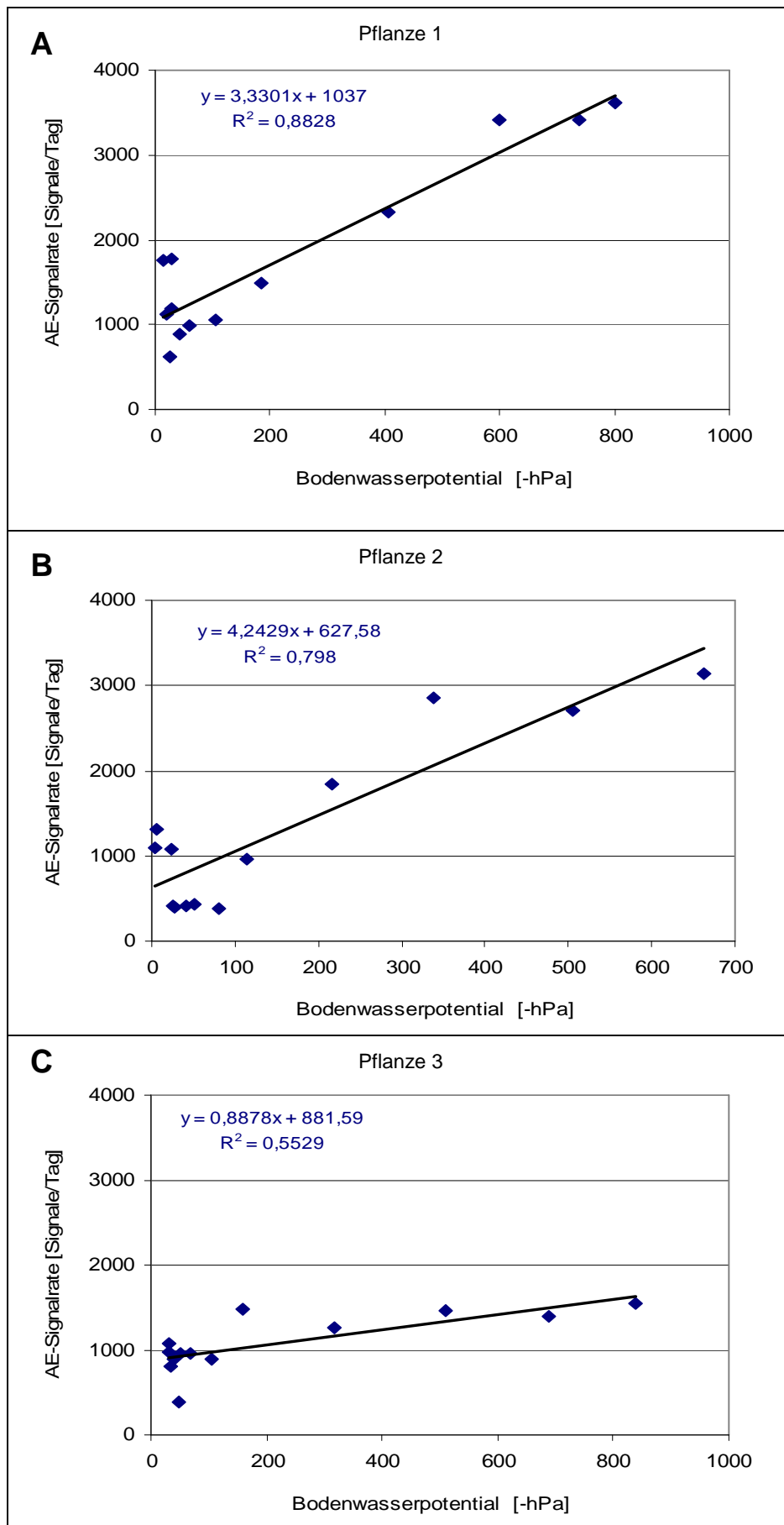


Abb. 14: Ultraschallsignalraten von *Rosa hybrida* in Abhängigkeit vom Bodenwasserpotential (Daten zeigen Mittelwerte von 2 Trieben pro Pflanze). A) Pflanze 1, B) Pflanze 2, C) Pflanze 3.

Die Korrelationsanalysen der Datensätze bestätigen den Zusammenhang zwischen der UAE-Signalrate und dem Bodenwasserpotential und zeigen eine enge, lineare Korrelation (Abb. 14). Auffallend ist allerdings die Unschärfe der Beziehung bei hohem Wasserangebot. Ursache hierfür ist wahrscheinlich der verzögerte Rückgang der UAE-Signalrate nach Bewässerung. Die Anwendung nicht linearer Funktionen erbrachte keine plausiblen Verbesserungen der Zusammenhänge. Die beschriebenen Untersuchungen wurden mehrfach wiederholt und nachfolgend ebenfalls einer statistischen Analyse unterzogen. In der folgenden Tabelle 9 sind die Korrelationskoeffizienten und Signifikanzniveaus für den linearen Zusammenhang zwischen den UAE-Signalraten und den Bodenwasserpotentialen zusammenfassend dargestellt.

Tab. 9: Korrelationskoeffizienten und Signifikanzniveaus für den linearen Zusammenhang zwischen der Ultraschallemission und dem Bodenwasserpotential der untersuchten Rosenpflanzen.

Versuch	Pflanze 1	Pflanze 2	Pflanze 3	Pflanze 4
1/2004 AW=9	Tr. 1: 0,805** Tr. 2: 0,936**	Tr. 1: 0,890**	Tr. 1: 0,837** Tr. 2: 0,743*	-
2/2004 AW=13	Tr. 1: 0,924** Tr. 2: 0,715**	Tr. 1: 0,621* Tr. 2: 0,737**	Tr. 1: 0,845** Tr. 2: 0,819*	-
3/2004 AW=9	Tr. 1: 0,911**	Tr. 1: 0,929**	Tr. 1: 0,962**	Tr. 1: 0,970**
1/2005 AW=13	Tr. 1: 0,158 Tr. 2: 0,341	Tr. 1: 0,07 Tr. 2: 0,02	Tr. 1: 0,220 Tr. 2: 0,128	Tr. 1: 0,242 Tr. 2: 0,151
2/2005 AW=6	Tr. 1: 0,709	Tr. 1: 0,916** Tr. 2: 0,918**	Tr. 1: 0,268 Tr. 2: 0,701	Tr. 1: 0,619 Tr. 2: 0,286
AW = Anzahl der Wertepaare; Tr. 1 = Trieb 1; Tr. 2 = Trieb 2 * = α 5%; ** = α 1%				

Aus der Tabelle 9 ist zu entnehmen, dass in den meisten der durchgeführten Experimente ein enger Zusammenhang zwischen UAE-Signalrate und Bodenwasserpotential gegeben war. Lediglich die Experimente 1/2005 und 2/2005 weichen von dem generellen Trend ab.

5.1.5 Zusammenhang zwischen dem Wasserpotential der Versuchspflanzen und dem Auftreten von Ultraschallemissionen

Im Kapitel 5.1.4 wurde gezeigt, dass in einer Reihe von Versuchen keine befriedigende Beziehung zwischen Bodenwasserpotential und UAE-Signalrate bestand. Dies muss nicht zwangsläufig gegen die Ultraschalltechnik sprechen, da Pflanzen über effiziente Regelmechanismen verfügen, um Wasserstresssituationen zu überdauern.

Unter Berücksichtigung dieses Regelpotentials von Pflanzen kann deshalb vermutet werden, dass zwischen der UAE-Signalrate und dem Wasserpotential in der Pflanze eine deutlich bessere Beziehung besteht als zum Bodenwasserpotential. Um dieser Annahme nachzugehen wurden im Rahmen der Austrocknungsversuche daher das mittägliche Blattwasserpotential und die UAE-Signalrate an Containerrosen studiert.

Wie aus der nachfolgenden Abbildung 15 ersichtlich, ist in den ersten vier bis fünf Tagen nach Beginn des Austrocknungsversuches bei allen drei Pflanzen nur eine geringe Abnahme des Blattwasserpotentials zu beobachten. Nachfolgend nahm das Blattwasserpotential bis auf etwa -2,2 MPa bei den Pflanzen 1 und 3 und bis auf etwa -1,6 MPa bei der Pflanze 2 ab. Zu diesem Zeitpunkt wurden auch Welkesymptome sichtbar. Durch die nachfolgende Bewässerung am neunten Tag stieg das Blattwasserpotential wieder an, allerdings wurde das Ausgangsniveau bei den Pflanzen 1 und 3 erst mit einer Verzögerung von vier Tagen wieder erreicht. Bei Pflanze 2 wurde das Ausgangsniveau des Blattwasserpotentials nicht mehr erreicht. Bemerkenswert ist zudem die überwiegend geringe Streuung der Blattwasserpotentiale in den einzelnen Wiederholungen einer Pflanze und zwischen den Pflanzen.

Der Verlauf der UAE-Signalrate und der Verlauf des Blattwasserpotentials sind bei Pflanze 1 und 2 vergleichbar. Bis zum vierten Versuchstag wurde kaum eine Veränderung der UAE-Signalrate beobachtet. Mit deutlichem Absinken der Wasserpotentialwerte kam es zum Anstieg der UAE-Signalrate, wobei diese Zunahme bei den drei geprüften Pflanzen unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Nach Bewässerung sank die UAE-Signalrate wieder ab, wobei auch hier das Ausgangsniveau erst mit vier Tagen Verzögerung erreicht wurde.

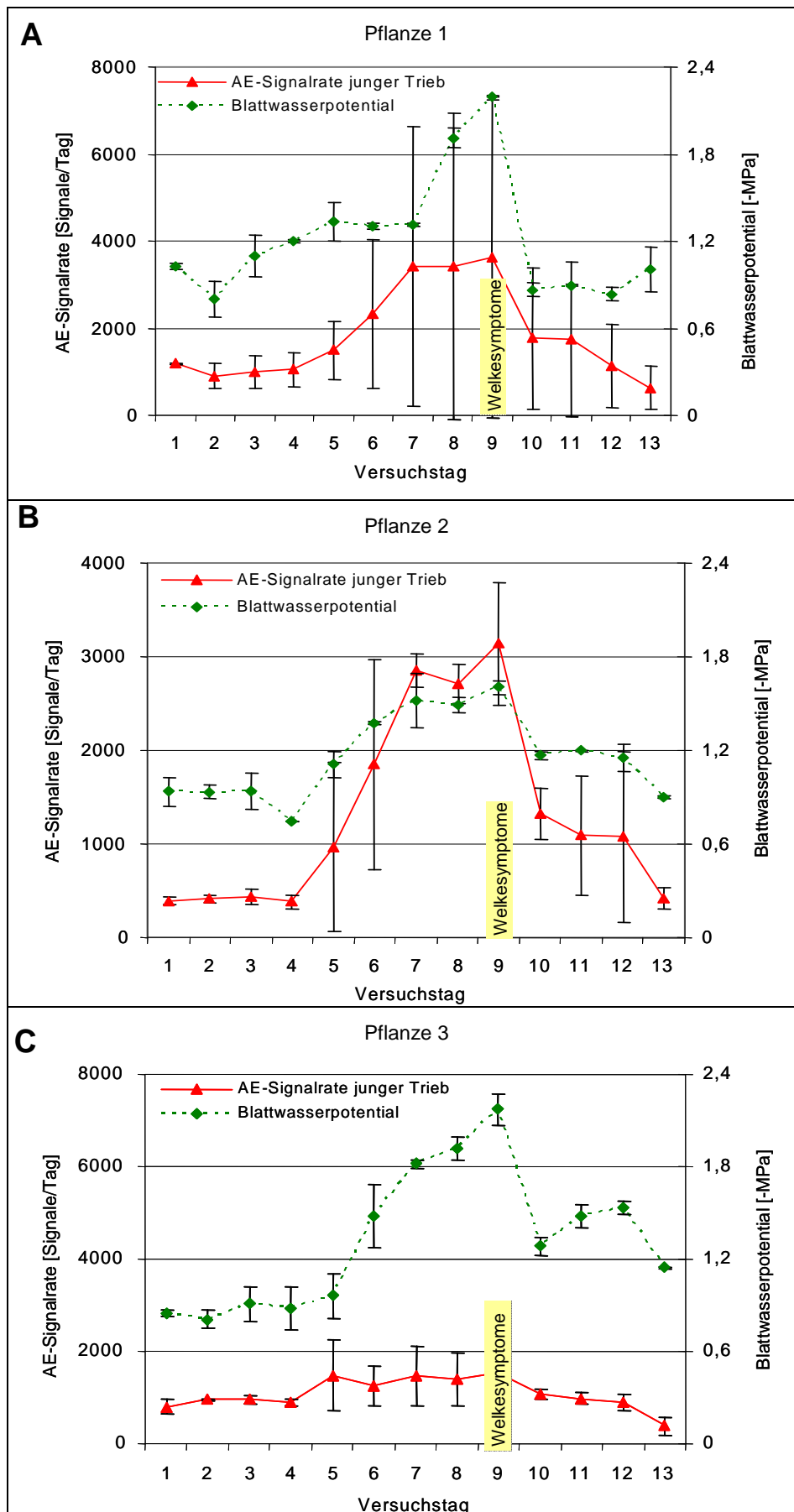


Abb. 15: Ultraschallsignalrate und mittägliches Blattwasserpotential von *Rosa hybrida* während eines Austrocknungsversuches (Daten zeigen Mittelwerte mit Standardabweichungen von 2 Trieben pro Pflanze). A) Pflanze 1, B) Pflanze 2, C) Pflanze 3.

Die aus dem Datensatz der Abbildung 15 durchgeführten Korrelationsanalysen lassen erkennen, dass sehr unterschiedliche Zusammenhänge zwischen Blattwasserpotential und UAE-Signalrate bestehen (Abb. 16). Es ist festzustellen, dass bei allen Pflanzen die UAE-Signalrate mit sinkendem Blattwasserpotential ansteigt. Die Korrelation wird jedoch nicht bei allen Pflanzen gleich scharf abgebildet. Während bei Pflanze 1 und 2 eine signifikante Korrelation zwischen den beiden Größen besteht, zeigt Pflanze 3 aufgrund allgemein niedriger UAE-Signalrate nur eine schwache Beziehung.

Die Annahme in der Einleitung dieses Kapitels, dass mittels Blattwasserpotential als direkte Messung der Stressintensität eine bessere Beziehung zur UAE-Signalrate hergestellt werden kann als zum Bodenwasserpotential, kann nicht bestätigt werden.

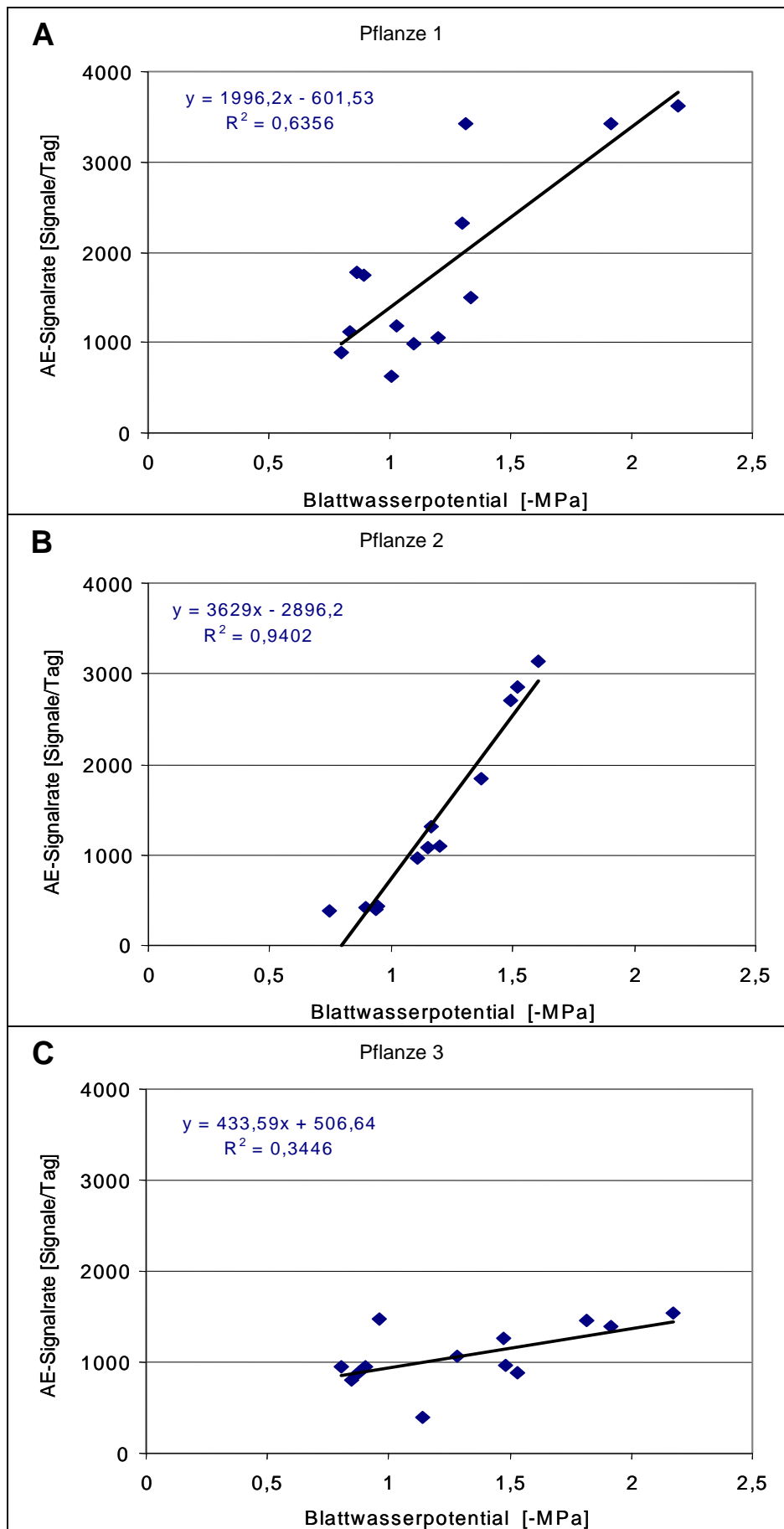


Abb. 16: Ultraschallsignalraten von *Rosa hybrida* in Abhängigkeit von mittäglichem Blattwasserpotential (Daten zeigen Mittelwerte von 2 Trieben pro Pflanze).
A) Pflanze 1, B) Pflanze 2, C) Pflanze 3.

Zur weiteren statistischen Analyse wurden die Korrelationskoeffizienten und Signifikanzniveaus, die für die linearen Zusammenhänge zwischen der UAE-Signalrate pro Tag und dem mittäglichen Blattwasserpotential der Pflanze berechnet und nachfolgend in Tabelle 10 dargestellt. Die Tabelle umfasst dabei Daten aus vier Versuchsnummern mit je drei Einzelpflanzen.

Tab. 10: Korrelationskoeffizienten und Signifikanzniveaus für den linearen Zusammenhang der Signalrate der Ultraschallemission mit dem mittäglichen Blattwasserpotential der untersuchten Rosenpflanzen.

Versuch	Pflanze 1	Pflanze 2	Pflanze 3	Pflanze 4
1/2004 AW=9	Tr. 1: 0,788* Tr. 2: 0,886**	Tr. 1: 0,922**	Tr. 1: 0,904** Tr. 2: 0,934**	-
2/2004 AW=13	Tr. 1: 0,779** Tr. 2: 0,625*	Tr. 1: 0,443 Tr. 2: 0,595*	Tr. 1: 0,900** Tr. 2: 0,904**	-
1/2005 AW=13	Tr. 1: 0,147 Tr. 2: 0,258	Tr. 1: 0,017 Tr. 2: 0,200	Tr. 1: 0,215 Tr. 2: 0,242	Tr. 1: 0,325 Tr. 2: 0,297
2/2005 AW=6	Tr. 1: 0,785	Tr. 1: 0,928** Tr. 2: 0,893**	Tr. 1: 0,146 Tr. 2: 0,737	Tr. 1: 0,712 Tr. 2: 0,924**
AW = Anzahl der Wertepaare; Tr. 1 = Trieb 1; Tr. 2 = Trieb 2 * = α 5%; ** = α 1%				

Aus der Tabelle 10 wird ebenfalls deutlich, dass bei einer Reihe der durchgeführten Versuche kein enger Zusammenhang zwischen Blattwasserpotential und UAE-Signalrate besteht.

Welkesymptome sind sichtbarer Ausdruck einer starken Abnahme des Wasserpotentials in der Pflanze. Deshalb kann das Auftreten von Welkesymptomen als sicherer Indikator für Wasserstress herangezogen werden. Die Daten wurden deshalb überprüft, ob ein systematischer Kavitationsschwellenwert zum Zeitpunkt beginnender Laubwelke existiert. Dies würde einen praktischen Einsatz zur Bewässerungssteuerung ermöglichen. Als Prüfparameter wurden deshalb die absoluten UAE-Signalrate pro Tag von jungen Trieben am Tag bei beginnender Laubwelke (Boniturnote 3) herangezogen. Die Daten sind in Tabelle 11 aufgeführt.

Tab. 11: Ultraschallsignalraten (Signale pro Tag) von *Rosa hybrida* bei beginnender Laubblattwelke (Boniturnote 3).

Containerrose		Versuch 1/2004	Versuch 2/2004	Versuch 3/2004	Versuch 1/2005	Versuch 2/2005
I	Trieb 1	1695	1006	2321	889	2091
	Trieb 2	465	6238	-	-	-
II	Trieb 1	2269	1067	3726	1278	2757
	Trieb 2	-	-	-	940	2881
III	Trieb 1	242	2681	3166	484	130
	Trieb 2	1282	3596	-	593	260
IV	Trieb 1	-	-	-	653	286
	Trieb 2	-	-	-	519	418

Die Ergebnisse zeigen, dass die UAE-Signalrate sowohl zwischen Pflanzen als auch zwischen Trieben der gleichen Pflanze sehr stark voneinander abweichen. Es wurde ein Spektrum von 130 bis 6238 UAE Signale pro Tag ermittelt.

Hieraus kann gefolgert werden, dass die kumulativen UAE-Signalraten keine Information über die Intensität des Wasserstress liefern.

5.1.6 Diskussion der Ergebnisse bei *Rosa hybrida*

Methodische Aspekte

Im vorhergehenden Kapitel wurde gezeigt, dass junge Rosentriebe unter Trockenstressbedingungen die höchste Signalrate aufwiesen und typische Tag-Nacht-Rhythmen zeigten. An der Sprossbasis sowie an Blattstielen wurden nur wenige Signale registriert und die Tag-Nachtperiodizität war nur schwach ausgeprägt. Die Ergebnisse stehen im Einklang mit Untersuchungen von SPINAROVA und HENDRIKS (2005) an Schnittrosen. Auch hier wurde bei Trockenstress die höchste Signalrate in der Nähe der Blütenknospe, also an vergleichsweise jungen Triebteilen, ermittelt. Untersuchungen an anderen Pflanzenarten weisen die Blattstiele als besonders kavitationsanfällige Organe aus. Beispiele hierfür finden sich bei *Juglans regia* und manchen *Quercus* Arten (COCHARD et al., 1992; TYREE et al., 1993), weiterhin bei *Populus balsamifera* und *Alnus glutinosa* (HACKE und SAUTER, 1996) sowie bei *Rhaphis excelsa* und *Laurus nobilis* (SPERRY, 1986; SALLEO et al., 2000). Auch bei der krautigen Art *Brassica oleracea* L. wurden in einer Untersuchung von Bormann (2004) die Blattstiele als besonders kavitationsanfällige Zonen identifiziert.

Der in der Literatur mehrfach belegte Zusammenhang zwischen der Zahl der mikroskopisch bestimmbar, kavitationsfähigen Tracheiden und der UAE-Signalrate (TYREE et al., 1984b; SANDFORD und GRACE, 1985; COCHARD, 1992) lässt die Vermutung zu, dass junge Triebteile und Blattstiele entweder eine besonders hohe Zahl an Tracheiden (ROSNER et al., 2006; 2009) oder aber besonders kavitationsanfällige Gefäße besitzen. Belege hierfür liegen nicht vor.

Die in den eigenen Untersuchungen beobachtete niedrige Zahl an Schallemissionen bei Rosen-Blattstielen kann mit der geringen Kontaktfläche Blattstiel/Sensor in Verbindung gebracht werden. Unterstützt wird diese Annahme durch Untersuchungen von KAVANAGH (1992), der die an Seitentrieben von Schierlings-Jungpflanzen im Vergleich zur Sprossbasis beobachtete geringere Signalrate mit der unterschiedlich großen Kontaktfläche erklärt.

Neben der Anzahl und Kavitationsanfälligkeit der Xylemgefäße können auch geometrische Faktoren und Dämpfungseffekte die Signalrate beeinflussen. Hinweise hierauf finden sich bei TYREE und SPERRY (1998b) und KIKUTA (2007), die eine starke Dämpfung der Signale durch das Rindengewebe beschreiben. Dieser

Sachverhalt ist möglicherweise verantwortlich dafür, dass an der Stängelbasis von Rosen nur wenige Ultraschallsignale registriert wurden.

Neben der Messposition konnten auch morphologische Entwicklungen des Stängels während des Wachstumsprozesses als signalbeeinflussender Faktor identifiziert werden. Wie Ultraschallmessungen an vier, sechs und acht Wochen alten Rosentrieben belegen, nimmt mit dem Alter beziehungsweise dem Entwicklungsstadium die Signalrate bei Trockenstress deutlich zu (Abb. 8). Da bei vielen krautigen Pflanzen auch unter Trockenstress keine Ultraschallsignale auftreten (SCHMID et al., 2007), wird angenommen, dass der mit dem Alter zunehmende Lignifizierungsgrad des Stängels hierfür verantwortlich oder hieran beteiligt ist. Die Zunahme des Ligningehaltes im Pedunkel von Rosenstängeln mit dem Alter ist unter anderem von CHABBERT et. al. (1993) belegt. Da die Mechanismen der Schallentstehung bei Trockenstress bis heute nicht vollständig aufgeklärt sind, kann man allerdings über den Effekt des Lignifizierungsgrades nur spekulieren.

Aus den vorliegenden Ergebnissen muss man folgern, dass die Signalrate in hohem Maße durch die Messposition beeinflusst wird und einer starken Veränderung im Wachstumsverlauf unterliegt. Hinzu kommt, dass die Zusammenhänge artspezifisch sind und offensichtlich auch durch die Kontaktfläche beeinflusst werden. Der Eichaufwand zur Interpretation von Schallereignissen an Rosenstielen ist daher als hoch einzustufen.

Ultraschallsignale und Wasserhaushalt

Nach Klärung der methodischen Aspekte sollen nun die Zusammenhänge zwischen dem Wasserhaushalt und dem Auftreten von Ultraschallsignalen erörtert werden. Besonders auffällig an den dargestellten Kavitationsprofilen ist die ausgeprägte Tag-Nacht-Rhythmik. Entsprechende Profile mit einem starken Anstieg der Kavitationsrate am Tage und einem deutlichen Abfall in der Nacht sind unter anderem auch für Schnittrosen (SPINAROVA et. al., 2007), für Brokkoli Pflanzen (BORMANN et. al., 2001, 2002) und für Pfirsiche in Containern (ASAKA et al., 2002) beschrieben. Als Ursache hierfür werden Störungen der Wasserbilanz durch Transpirationsbelastung und damit eine Überschreitung der Kavitationsschwelle in den Xylemgefäßen angesehen. Untersuchungen im Tagesgang von bewässerten und unbewässerten Rosen unterstützen diese Vorstellung. Wie in den Abbildungen 9 und 10 gezeigt, steigen die Signalraten bei beiden Varianten mit zunehmender Einstrahlung an, wobei der Anstieg bei der unbewässerten Variante viel früher beginnt und viel stärker ausfällt als bei der bewässerten Variante. Typisch für Rosen

unter Trockenstress war nicht nur die wesentlich höhere Signalrate am Tage, sondern auch eine beachtliche Zahl von Signalen in der Dunkelphase. Ähnliche Beobachtungen liegen auch für Schnittrosen (SPINAROVA et al., 2006), Brokkoli (BORMANN et al., 2002) und auch für Mais (TYREE et al., 1986) vor. Hieraus kann man schließen, dass Pflanzen unter starkem Wasserstress auch während der Nacht nur bedingt in der Lage sind, den Wasserhaushalt wieder auszugleichen.

In allen mit Rosen durchgeführten Untersuchungen war festzustellen, dass Pflanzen unter Wasserstress höhere Signalaraten aufweisen als ohne Wasserstress (Abb. 11A und 11B). Dieser qualitative Zusammenhang ist in der Literatur für viele Pflanzen beschrieben. Beispielhaft sollen hierfür Untersuchungen an Kiefern in Containern (PENA und GRACE, 1986; IKEDA und OHTSU, 1992), an Fichte (BORGHETTI et al., 1989), an Johannesbrotbäumen (LO GULLO und SALLEO, 1991) und an Flaschenbäumen erwähnt werden (SALLEO und GULLO, 1986).

Die Untersuchungen mit Containerrosen haben jedoch auch gezeigt, dass die Anzahl der Signale pro Tag zwischen den einzelnen Experimenten und auch zwischen den Einzelpflanzen innerhalb eines Experimentes stark variierten. Als Ursache hierfür kommen unterschiedlich starke Stressbedingungen bei den einzelnen Pflanzen oder aber die bereits beschriebene methodischen Effekte in Frage.

Ultraschallsignale und Bodenwasserpotential

Hinweise auch auf einen quantitativen Zusammenhang zwischen dem Wasserhaushalt der Pflanzen und der Signalrate lassen sich aus dem in Kapitel 5.1.4 beschriebenen Austrocknungsversuchen entnehmen. Aus den dargestellten Abbildungen (Abb. 13) wird deutlich, dass die Ultraschallrate bei Absinken des Bodenwasserpotentials ansteigt bzw. nach einer Bewässerung erneut abfällt. Diese Ergebnisse stehen im Einklang mit Beobachtungen bei *Picea abies* (BORGHETTI et al., 1989), *Picea sitchensis* und *Pinus sylvestris* L. (JACKSON et al., 1995), *Lycopersicum esculentum* Mill (QIU et al., 2002), *Malus domestica* Borkh. (JONES und PENA, 1986) und *Ceratonia siliqua* L. (LO GULLO und SALLEO, 1991). Auch hier wird über ähnliche Kurvenverläufe der Ultraschallemission in Austrocknungsversuchen berichtet. Bei einer genaueren Betrachtung der Kurvenverläufe fallen jedoch eine Reihe von Abweichungen zwischen der Ultraschallrate und dem Bodenwasserpotential auf. Einerseits treten bereits zu Beginn des Austrocknungsversuches trotz guter Wasserversorgung nennenswerte Schallereignisse auf, der Anstieg des Bodenwasserpotentials und der Ultraschallrate fallen zeitlich nicht zusammen und auch nach der Bewässerung bleibt eine gewisse

Signalrate erhalten. Hinzu kommt eine starke Streuung der Messwerte und bei einer der drei dargestellten Pflanzen bleibt der Anstieg der Signalrate mit abnehmendem Bodenwasserpotential weitgehend aus. Die beschriebenen Abweichungen der Kurvenverläufe werden auch durch die im Ergebnisteil vorgestellten Korrelationsanalysen dokumentiert.

Die beobachteten Ultraschallsignale zu Versuchsbeginn lassen sich möglicherweise damit erklären, dass Containerrosen ihren Wasserhaushalt bei hoher Einstrahlung trotz ausreichendem Wasservorrat im Substrat nicht vollständig ausgleichen können und damit Kavitationsereignisse auftreten. Auch der verzögerte Anstieg der Signalrate bei Bodenaustrocknung kann bedingt mit dem Einfluss der Stomata erklärt werden. Hierbei wird unterstellt, dass eine moderate Austrocknung des Bodens von der Pflanze beherrscht wird und somit der Anstieg der Signalrate erst zeitverzögert auftritt. Diese Aufrechterhaltung der Wasserbilanz funktioniert allerdings nur solange ein bestimmter Blattwasserpotential-Schwellenwert nicht unterschritten wird (WULLSCHLEGER et al., 1998).

Nach Bewässerung sank die UAE-Signalrate bei den untersuchten Containerrosen zwar wieder ab, jedoch wurde das Ausgangsniveau erst nach mehreren Tagen erreicht. Von *Ceratonia siliqua* L. (SALLEO und LO GULLO, 1989a) wird dagegen über einen wesentlich rascheren Rückgang der Signalraten nach Wiederbewässerung berichtet. Als Erklärung für den raschen Rückgang wird von den Autoren angenommen, dass die Xylemgefäße möglicherweise nur kavitiert waren und somit das kritische Wasserpotential rasch wieder ausgeglichen werden konnte. Im Vergleich dazu ist die Auffüllung embolisierter Xylemelemente offensichtlich wesentlich schwieriger (MC CULLY et al., 1998) und damit auch zeitaufwendiger. Demzufolge wird angenommen, dass die Xylemgefäße bei den untersuchten Rosen embolisiert waren und die Wiederauffüllung einen langen Zeitraum in Anspruch genommen hat.

Auffallend an den Ultraschallsignalen sind auch die großen Streuungen zwischen den Versuchspflanzen und an den verschiedenen Positionen einer Pflanze. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Ultraschallmessungen im Gewächshaus unter natürlichen Lichtbedingungen durchgeführt wurden. Obwohl bei der Triebauswahl darauf geachtet wurde, dass die Lichtexposition der Messtriebe möglichst gleich war, lassen sich unterschiedliche Transpirationsbelastungen und damit eine unterschiedliche Kavitationsgefährdung nicht ausschließen. Eine weitere mögliche Variationsursache ist der lange Austrocknungszeitraum von neun Tagen. Es ist

anzunehmen, dass auch morphologische Veränderungen der jungen Triebe die Signalrate beeinflusst haben. Daneben kann man spekulieren, dass das Wurzelsystem unterschiedlich mit Wasser versorgt war und somit die dazugehörigen Sprosssteile ebenfalls einen unterschiedlichen Wasserversorgungszustand aufwiesen (McCARTHY et al., 2000; P. DOS SANTOS et al., 2003, TOIT et al., 2003).

Ultraschallsignale und Blattwasserpotential

Unterstellt man, dass die aufgezeichneten Ultraschallsignale Ausdruck für Störungen der Wasserbilanz in den Pflanzen sind, kann man vermuten, dass zwischen der Ultraschallrate und dem Blattwasserpotential eine bessere Beziehung bestehen muss als zum Bodenwasserpotential. Anders ausgedrückt: Unter Berücksichtigung des Regelpotentials der Stomata kann vermutet werden, dass zwischen der UAE-Signalrate und dem Wasserpotential in der Pflanze eine bessere Beziehung besteht als zum Bodenwasserpotential. Zur Testung dieser Hypothese wurde das mittägliche Wasserpotential verwendet (SIDDIQUE et al., 2000; BOGART, 2000; NAOR, 2000; NAOR und COHEN, 2003; GIRONA et al., 2006). Das frühmorgendliche Wasserpotential (engl. predawn) spiegelt dagegen das im Wurzelraum herrschende Bodenwasserpotential wieder (HAVRANEK, 1980; TYREE, 1999).

Die in Kapitel 5.1.5 beschriebenen Untersuchungen zeigen, dass in den ersten vier bis sechs Tagen nach Beginn des Austrocknungsversuches bei allen drei Pflanzen nur eine geringe Abnahme des Blattwasserpotentials auftritt (Abb. 15). Diese Beobachtungen stehen in Übereinstimmung mit den Studien von RASCHI et al. (1990) bei Auberginen im Container. In dieser Arbeit wurde gezeigt, dass die Pflanzen, solange sie ausreichend mit Wasser versorgt sind, keine nennenswerten Änderungen des Wasserpotentials aufweisen.

Im weiteren Versuchsverlauf nahm das Blattwasserpotential der im Versuch befindlichen Rosen auf etwa -2,2 MPa bei den Pflanzen 1 und 2 und bis auf etwa -1,6 MPa bei der Pflanze 3 ab. Zu diesem Zeitpunkt wurden auch die ersten Welkesymptome sichtbar. Die bei Rosen gemessenen Blattwasserpotentiale bei Trockenstress bewegen sich in ähnlicher Größenordnung wie Messungen an Apfelbäumen in Containern (JONES und PENA, 1986). Das unterschiedlich starke Absinken des Wasserpotentials im Versuchszeitraum ist vermutlich auf die Blattfläche zurückzuführen. Rose 3 mit der geringsten Abnahme des Wasserpotentials wies auch die mit Abstand die geringste Blattfläche auf.

Nach Bewässerung der Pflanzen stieg das mittägliche Blattwasserpotential zwar wieder an, verblieb aber auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau. Dies bedeutet,

dass die Pflanzen infolge hoher Einstrahlung in den Mittagstunden den Wasserhaushalt trotz Bewässerung nicht ausgleichen konnten.

Beim Vergleich des mittäglichen Blattwasserpotentials mit der UAE-Signalrate (durchschnittliche Signalrate/Tag) lassen sich bei Pflanze 1 und 3 gewisse Übereinstimmungen in den Kurvenverläufen feststellen. In den ersten vier Tagen des Austrocknungsversuches bleiben Blattwasserpotential und UAE-Signalrate auf ähnlichem Niveau, steigen danach deutlich an und fallen nach Bewässerung wieder ab. Das Auftreten von Welkesymptomen korrespondiert mit den niedrigsten Blattwasserpotentialen und den höchsten Signalraten. Die zu beobachtenden Unterschiede in den Kurvenverläufen dürften unter Berücksichtigung der zum Teil sehr hohen Standardabweichungen vermutlich zufälliger Natur sein. Anders verhält sich dagegen Pflanze 2, bei der die Signalrate trotz starken Absinkens des Wasserpotentials auf relativ niedrigem Niveau verbleibt. Derartige Phänomene wurden bei Ultraschallmessungen gelegentlich beobachtet, ohne dass hierfür nachvollziehbare Erklärungen gefunden werden. Die in diesem Zusammenhang durchgeführten Korrelationsanalysen unter Einbeziehung weiterer Untersuchungen geben ein ähnliches Bild. Bei einer Reihe von Testpflanzen lässt sich ein zum Teil enger Zusammenhang zwischen den beiden Stressparametern feststellen, bei anderen Pflanzen ist dagegen kein Zusammenhang zu erkennen.

Die Vorstellung, dass Ultraschallsignale erst bei Unterschreitung eines bestimmten Wasserpotential-Schwellenwertes auftreten, ist in der Literatur mehrfach zu finden (TYREE und DIXON, 1986; LO GULLO und SALLEO, 1991; 1992; WILLIAMSON und MILBURN, 1995; HACKE und SAUTER, 1996). Im vorgestellten Versuch mit Containerrosen trat der deutliche Anstieg der UAE-Signalrate bei einem Blattwasserpotential von etwa -0,8 und -1,2 MPa auf. Dieses Ergebnis deckt sich mit Beobachtungen von TYREE und DIXON (1983) an *Thuja occidentalis* L. und JONES und PENA (1986) an Apfelbäumen. Auch sie stellten eine deutliche Zunahme der UAE-Signalrate bei einem Wasserpotential von etwa -1 MPa fest. Im Gegensatz hierzu beschreiben VAN DOORN und SUIRO (1996) bei verschiedenen Rosensorten Blattwasserpotential-Schwellenwerte für einen starken Anstieg der Ultraschallsignale von -1,7 MPa für die Sorte 'Cara Mia', -2,9 MPa für 'Madelon' und -3,8 MPa für 'Sonja'.

Reproduzierbarkeit der Daten

Bei der Betrachtung der Zusammenhänge zwischen UAE-Signalrate und Bodenwasserpotential bzw. Blattwasserpotential ist festzustellen, dass sich die Ergebnisse zwischen den Jahren sehr unterscheiden.

Ähnliche Unterschiede der UAE-Signalrate zwischen den Jahren sind aus der Literatur bislang nicht bekannt. Sowohl im Jahr 2004 als auch im Jahr 2005 wurden die Versuche in den Monaten April bis Mai durchgeführt. Aufgrund der vergleichbaren Klimabedingungen in den beiden Jahren, ist in diesem Fall der Einfluss einer höheren Einstrahlung auf das Ergebnis auszuschließen. Weiterhin war die Versuchsdurchführung in den beiden Versuchsjahren hinsichtlich methodischer Aspekte identisch.

5.2 Ultraschalluntersuchungen an *Syringa vulgaris*

5.2.1 Einfluss der Messposition auf das Auftreten von Ultraschallemissionen

Um den geeigneten Messort für die Ultraschallmessungen bei Containerfliedern zu finden, wurden ähnliche Untersuchungen wie bei Rosen durchgeführt. Der Vergleich der Ultraschallemission an Sprossbasis, Blattstiel, einjährigem Trieb und diesjährigem Trieb ergab, dass ebenso bei Containerflieder ein Positionseffekt vorhanden ist.

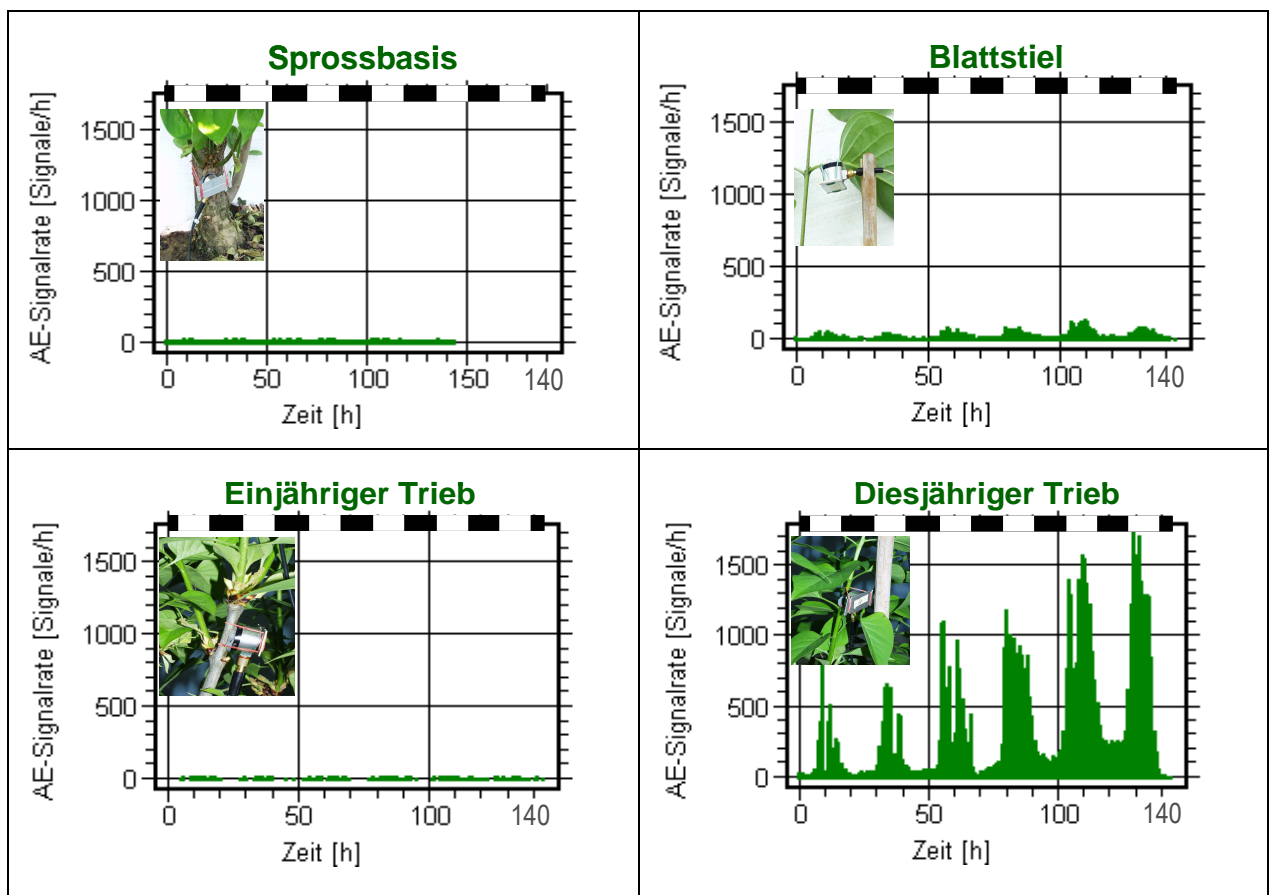


Abb. 17: Ultraschallsignalrate (AE-Signalrate) von verschiedenen Organen von *Syringa vulgaris* während eines Austrocknungsversuches. Die Hell-Dunkelphasen sind am oberen Abbildungsrand grafisch dargestellt (schwarze Balken: Dunkelphase).

Bei der Gegenüberstellung der vier Messpositionen (Abb. 17) ist festzustellen, dass an der Sprossbasis, Blattstiel und einjährigem Trieb nur sehr niedrige UAE-Signalraten registriert wurden. Weiterhin ist zu beobachten, dass keine Tag-Nacht-Rhythmik an diesen Organen erkennbar ist. Die absoluten UAE-Signalraten, sowohl während der Nachtphase als auch während der Tagphase blieben fast auf einem konstanten niedrigen Niveau.

Demgegenüber konnten an diesjährigen Trieben nennenswerte UAE-Signalaraten von Beginn des Austrocknungsversuches festgestellt werden. Auch hier steigt die Tagesultraschallemission wieder mit Dauer der Austrocknung an und zeigt eine typische Tagesperiodizität. Weiterhin ist zu beobachten, dass solange kein ausgeprägter Wasserstress der Pflanze vorliegt, sich die Pflanze während der Nacht erholen kann und die Ultraschallsignalarate bis zum Belichtungsbeginn am nächsten Tag wieder zurückgeht. Später ist mit Dauer der Austrocknung auch ein Anstieg der Nachtkavitationsrate zu beobachten.

In Gegenteil zu den Containerrosen spielte der Reifegrad von jungen, diesjährigen Trieben von Fliederpflanzen keine bedeutende Rolle. Durch die bessere Homogenität der Prüfobjekte waren bei den jungen Trieben von Containerfliederpflanzen keine weiteren Untersuchungen notwendig.

5.2.2 Ultraschallemissionen im Tagesgang

Im Kapitel 5.1.3 wurde gezeigt, dass der Verlauf der UAE-Signalarate von Containerrosen bei guter Wasserversorgung und beim Wassermangel im Tagesgang durch die Einstrahlung unterschiedlich beeinflusst wird. Analog wurden die Versuche auch bei Containerflieder durchgeführt. Aufgezeichnet wurde die UAE-Signalarate pro Stunde und dann parallel zur Einstrahlung dargestellt.

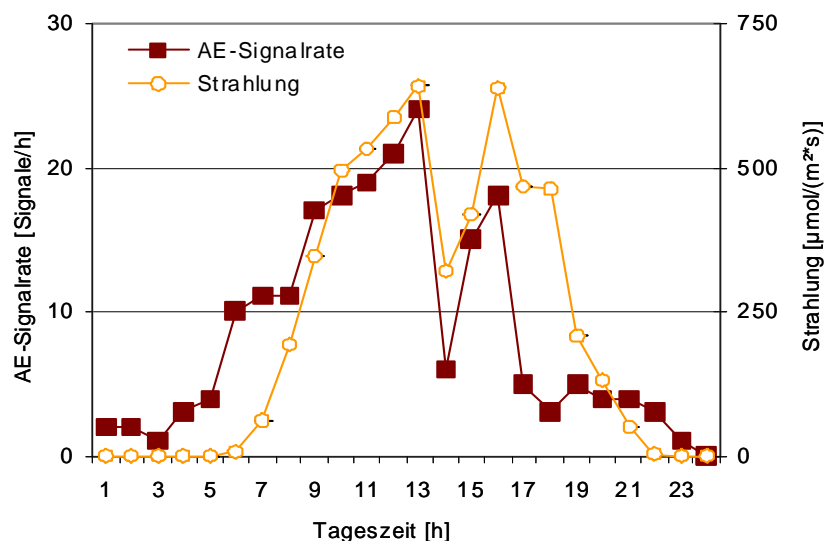


Abb. 18: Verlauf der Ultraschallsignalarate von *Syringa vulgaris* und der Strahlung im Tagesgang bei guter Wasserversorgung des Substrates.

Aus der Abbildung 18 lässt sich ableiten, dass die UAE-Signalarate bei Containerflieder bei guter Wasserversorgung parallel zur Strahlung verläuft. Ähnlich wie bei Containerrosen konnte in der Nachtphase nur eine geringe

Ultraschallemission beobachtet werden. Tagsüber kommt es zu einer Zunahme der UAE-Signalrate. Selbst kurzfristige Veränderungen in der Strahlung spiegeln sich bei Containerflieder in den Änderungen der UAE-Signalrate wieder (z.B. um 14 Uhr). Auffällig ist dabei die geringe Ultraschallemission, die bei der höchsten Einstrahlung nur 30 Signale pro Stunde erreichte.

Der Einfluss der Einstrahlung auf die UAE-Signalrate von unter Wassermangel ausgesetzten Containerflieder im Tagesgang wird in Abbildung 19 dargestellt.

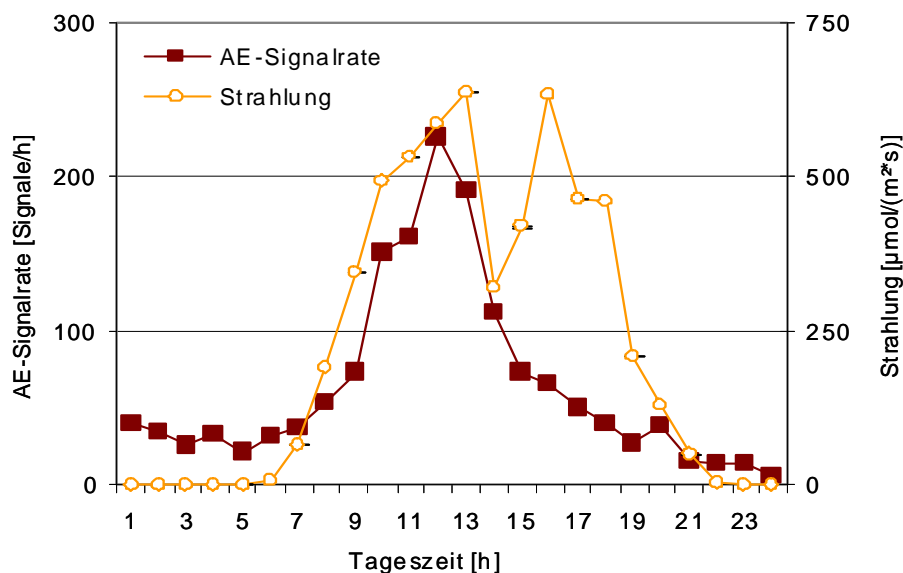


Abb. 19: Verlauf der Ultraschallsignalrate von *Syringa vulgaris* und der Strahlung im Tagesgang bei Wassermangel.

Im Gegensatz zu den täglich bewässerten Containerrosen, folgte die UAE-Signalrate von unbewässerten Versuchspflanzen nur teilweise der Strahlung. Hierbei wurde auch eine hohe Ultraschallemission in Dunkelheit gemessen. In der Lichtphase führt die zunehmende Einstrahlung zu einer Erhöhung der Ultraschallemission. Allerdings wurde ab 14:00 Uhr trotz Anstieg der Einstrahlung ein Rückgang der UAE-Signalrate beobachtet.

Auffallend war, genau wie bei Containerrosen, dass die beiden Varianten sich erheblich in den absoluten UAE-Signalaraten unterscheiden. So wurde bei dem unter Wassermangel stehenden Containerflieder eine 10-fache höhere Ultraschallemission im Vergleich zu der bewässerten Variante registriert.

5.2.3 Einfluss der Wasserversorgung auf das Auftreten von Ultraschallemissionen

Um der Frage nachzugehen, ob bei *Syringa vulgaris* ein Zusammenhang zwischen Ultraschallemissionsrate und Wasserangebot im Substrat existiert, wurde bei bewässerten und unbewässerten Pflanzen die Ultraschallemission registriert.

In den Abbildungen 20A und 20B sind die Ultraschallemissionen von diesjährigen Trieben eines täglich bewässerten und eines unter Wassermangel leidenden Containerflieders im Tagesgang dargestellt. Das Bodenwasserpotential der nicht gestressten Fliederpflanzen betrug zum Messtermin ca. -50 hPa, der gestressten Fliederpflanzen ca. -700 hPa.

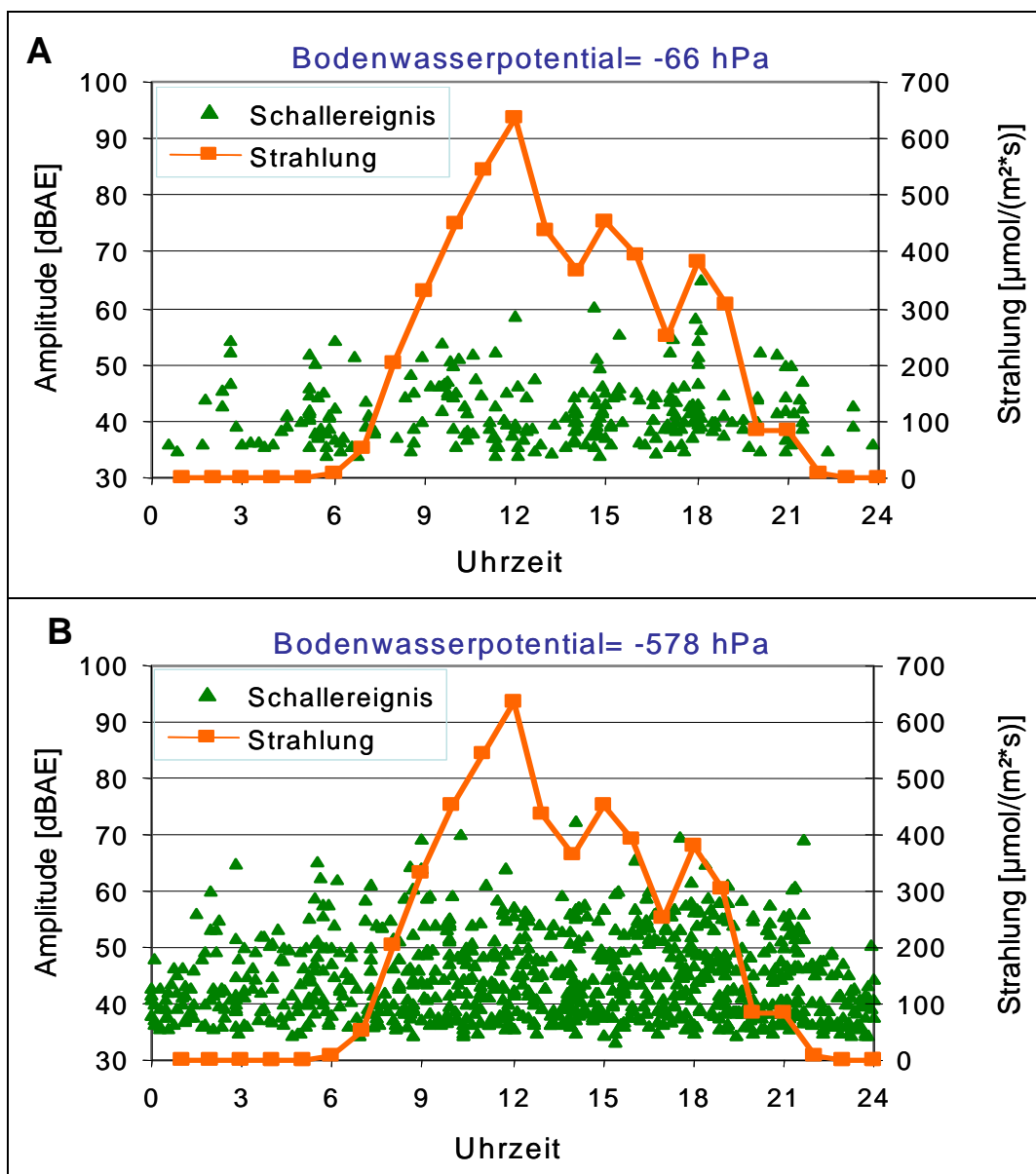


Abb. 20: Ultraschallereignisse und ihre Amplitude im Tagesgang.

- A) Ultraschallsignale an jungem Trieb einer ausreichend bewässerten Fliederpflanze.
 B) Ultraschallsignale an jungem Trieb einer Fliederpflanze unter Wassermangel.

In Bezug auf das Wasserangebot wurden bei Containerflieder ähnliche Ergebnisse wie bei Containerrosen erzielt. So wurden an jungen Trieben von täglich bewässerten Versuchspflanzen nur wenige Ultraschallsignale registriert (Abb. 20A). Dagegen traten bei den unbewässerten Containerfliedern deutlich mehr Ultraschallsignale auf (Abb. 20B). Zu Beginn des Tageslichtes stieg die Ultraschallemission von den bewässerten Versuchspflanzen (Abb. 20A) bis zum späten Nachmittag. Während der Nacht wurde nur eine geringe Signalrate gemessen. Dagegen wiesen die Versuchspflanzen unter Wassermangel sowohl während der Dunkelheit als auch tagsüber eine deutlich höhere Ultraschallemission und zudem Signale mit höherer Intensität auf.

Eine statistische Bewertung der Ultraschallemission von bewässerten und unbewässerten Containerfliedern ist in Abbildung 21 dargestellt. Auch hierzu wurden die Bodenwasserpotentiale in die Klassen bis -100 hPa (bewässerten Pflanzen) und -500 bis -600 hPa (unbewässerten Pflanzen) eingeordnet.

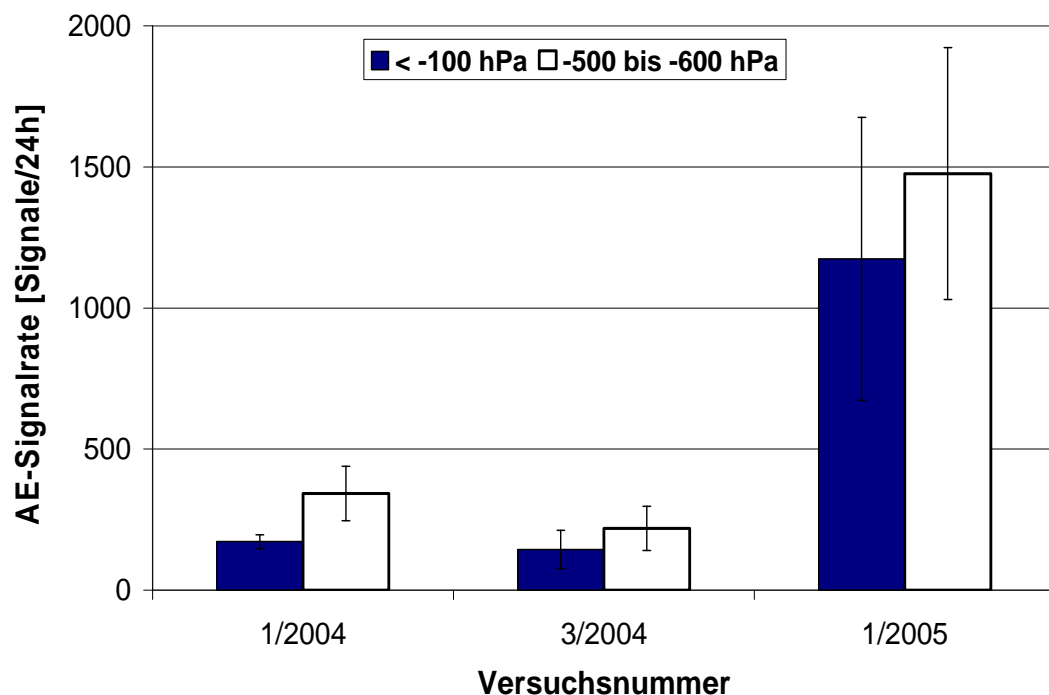


Abb. 21: Ultraschallsignalraten an jungen Trieben von bewässerten und unbewässerten Fliederpflanzen aus 3 Versuchen. Daten zeigen Mittelwerte mit Standardabweichungen (n= 3).

Im Gegensatz zu den Containerrosen vermittelt Abbildung 21 das Ergebnis, dass sich die UAE-Signalraten zwischen bewässerten (bis -100 hPa) und unter Trockenstress (-500 bis -600 hPa) stehenden Fliederpflanzen nur sehr gering unterscheiden. Die bekannte Streuung der UAE-Signalrate pro Tag zwischen den Versuchsdurchgängen ist auch hier zu beobachten. Während die UAE-Signalrate

von bewässerten Containerfliedern im ersten bzw. zweiten Versuchsdurchgang (1/2004 und 3/2004) ungefähr bei 100 UAE-Signalrate pro Tag lag, erreichte die Ultraschallemission in der dritten Versuch (1/2005) ca. 1200 UAE Signalrate pro Tag. Die Prüfung eines quantitativen Zusammenhanges zwischen UAE-Signalrate und Bodenwasserpotential wurde nach dem gleichen Versuchsmuster wie bei Containerrosen durchgeführt. Hierzu wurden in Austrocknungsversuchen kontinuierlich die Ultraschallsignalrate pro 24 Stunden an diesjährigen Trieben von Containerflieder und Bodenwasserpotential über mehrere Tage registriert. Nach deutlich sichtbaren Welkesymptomen (Boniturnote 5) wurden die Pflanzen bewässert und nachfolgend noch bis zu drei Tagen weiter beobachtet.

Aus Abbildung 22 lässt sich ableiten, dass eine deutliche Unterscheidung im Verlauf der Bodenwasserpotentialkurve zwischen Containerrosen und Containerfliedern existiert. Während bei den Containerrosen erst ab dem fünften Tag nach Beginn des Austrocknungsversuches eine deutliche Absenkung des Bodenwasserpotentials zu beobachten war, sank dies bei Containerfliedern schon ab dem zweiten Tag. Auffällig ist dabei, dass die Abnahme des Bodenwasserpotentials monoton steigend bis auf ca. -650 hPa verlief. Infolge der sichtbaren Welkesymptomen am neunten Versuchstag wurden die Pflanzen bewässert und dadurch nahm das Bodenwasserpotential rasch wieder zu. Am zehnten Tag wurden bei allen drei untersuchten Pflanzen die Ausgangswerte des Bodenwasserpotentials erneut erreicht. Die UAE-Signalraten von allen drei Versuchspflanzen verliefen parallel zum Bodenwasserpotential. Allerdings verhielten sie sich bezüglich auf dem Anstieg unterschiedlich. Während bei den Pflanzen 1 und 3 eine Zunahme der UAE-Signalrate ab dem fünften Tag zu beobachten war, stieg dies bei Pflanze 2 erst nach sechs Tagen ab Versuchsbeginn. Infolge der Bewässerung am Tag neun ging die Ultraschallemission zurück und das Ausgangsniveau wurde beinahe am nächsten Tag von allen drei Pflanzen erreicht. Auffallend hier ist die UAE-Signalrate der Versuchspflanzen 2 und 3, die bei Beginn des Experimentes leicht höher als in den nachfolgenden Tagen war.

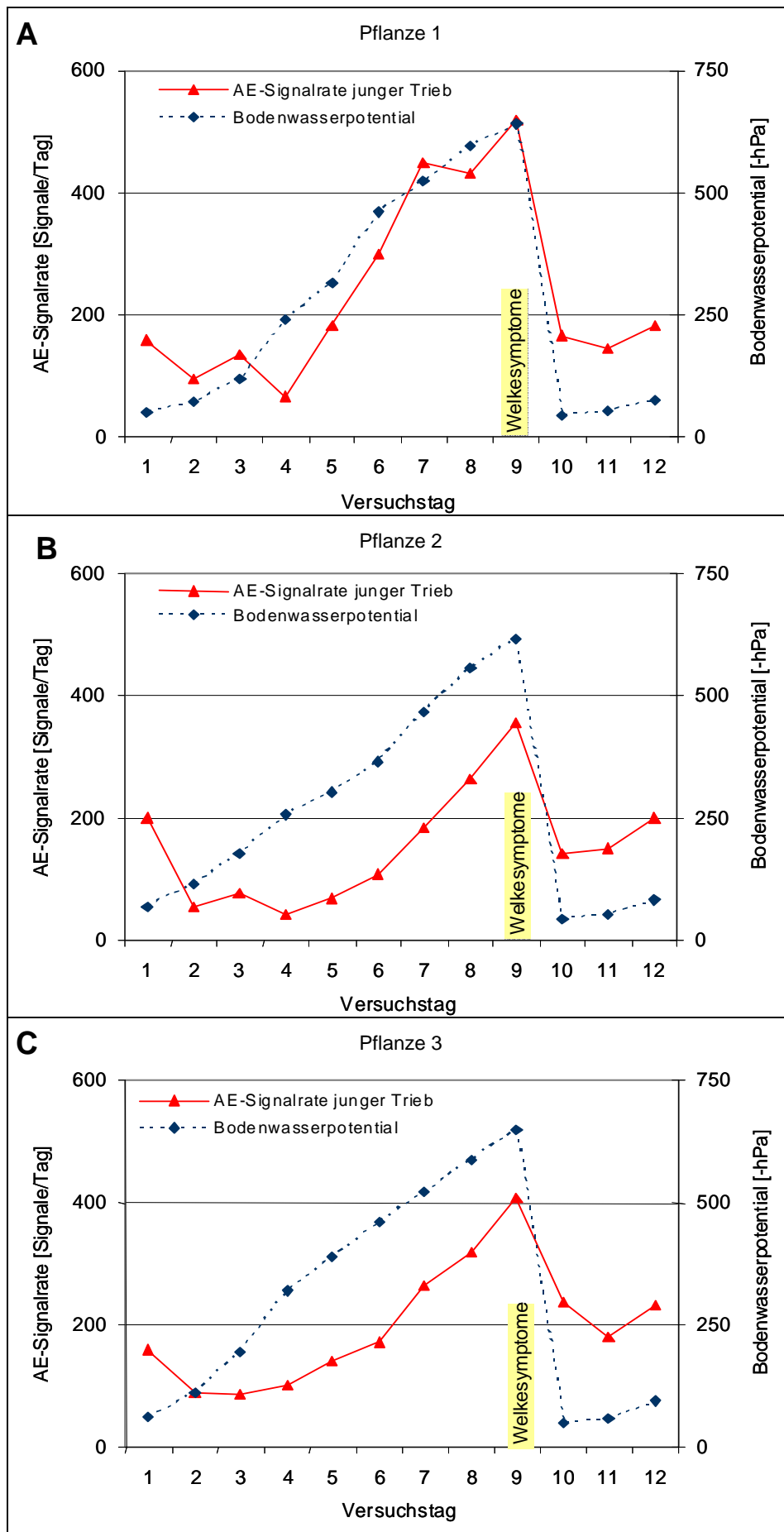


Abb. 22: Ultraschallsignalraten von *Syringa vulgaris* und Bodenwasserpotential während eines Austrocknungsversuches. A) Pflanze 1, B) Pflanze 2, C) Pflanze 3.

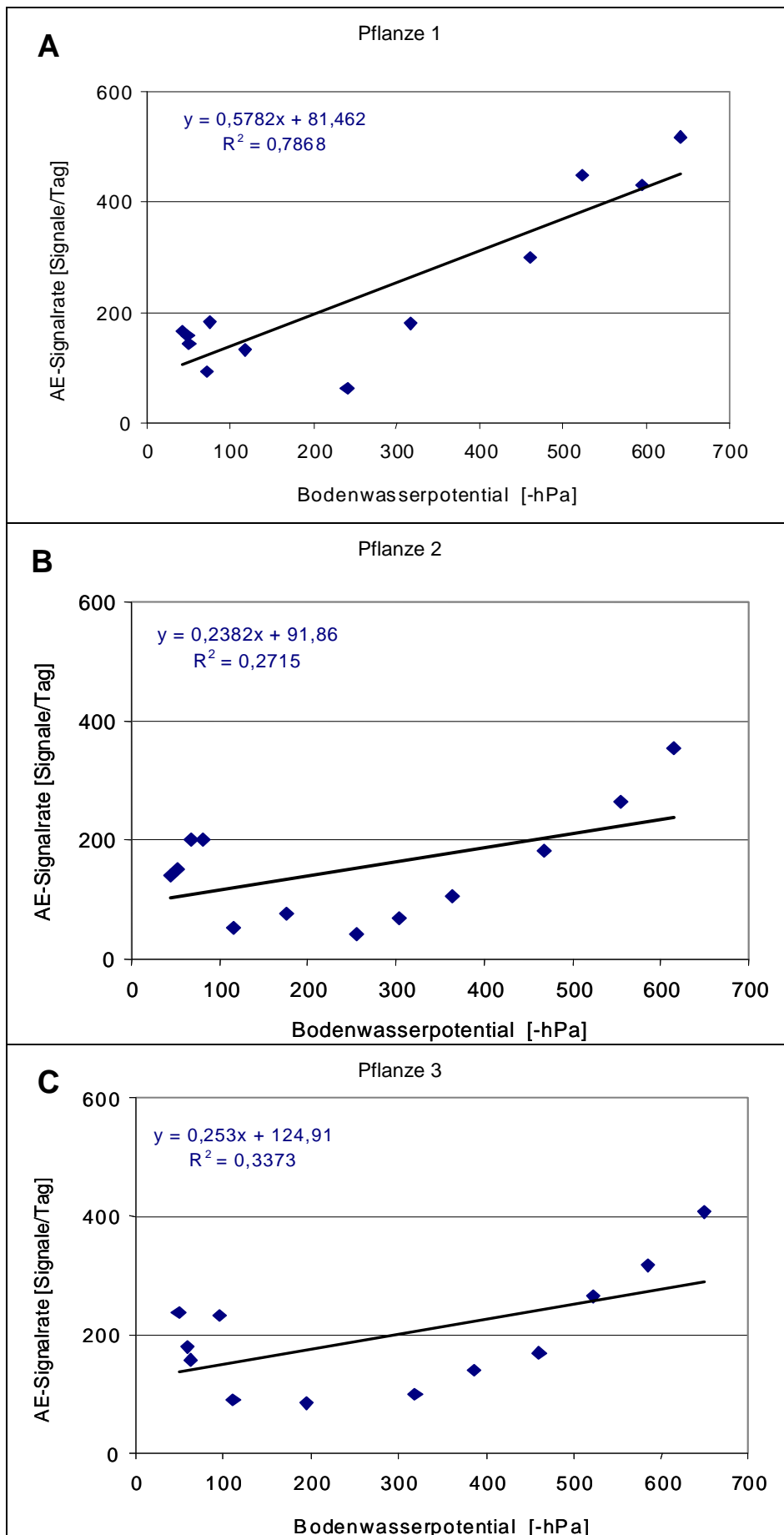


Abb. 23: Ultraschallsignalraten von *Syringa vulgaris* in Abhängigkeit vom Bodenwasserpotential. A) Pflanze 1, B) Pflanze 2, C) Pflanze 3.

Für die Beziehung zwischen UAE-Signallraten und Bodenwasserpotentialen bei Containerflieder ergab sich wie bei Containerrosen ein linearer Zusammenhang (Abb. 23). Aus Abbildung 23 geht ebenfalls hervor, dass nur an Pflanze 1 eine hoch signifikante Korrelation zwischen den beiden Größen besteht. Weiterhin auffallend sind die Unterschiede zwischen den Versuchspflanzen auch in der Steigung der Funktion.

In Tabelle 12 sind die Korrelationskoeffizienten und Signifikanzniveaus für den linearen Zusammenhang zwischen den pro Tag gemessenen UAE-Signallraten und den täglich ermittelten Bodenwasserpotentialen zusammenfassend dargestellt.

Tab. 12: Korrelationskoeffizienten und Signifikanzniveaus für den linearen Zusammenhang zwischen der Ultraschallemission und dem Bodenwasserpotential der untersuchten Fliederpflanzen.

Versuch	Pflanze 1	Pflanze 2	Pflanze 3
1/2004 AW=12	Tr. 1: 0,887**	Tr. 1: 0,521	Tr. 1: 0,580*
2/2004 AW=8	Tr. 1: 0,962**	Tr. 1: 0,963**	Tr. 1: 0,810*
3/2004 AW=12	Tr.1: 0,865**	Tr. 1: 0,442	Tr. 1: 0,437
1/2005 AW=8	Tr. 1: 0,743* Tr. 2: 0,806*	Tr. 1: 0,433 Tr. 2: 0,707*	-
AW = Anzahl der Wertepaare; Tr. 1 = Trieb 1; Tr. 2 = Trieb 2 * = α 5%; ** = α 1%			

Wie aus Tabelle 14 zu entnehmen ist, fiel die Korrelationen zwischen den UAE-Signallraten und Bodenwasserpotentialen in beiden Jahren unterschiedlich aus. Im Jahr 2004 wurden gute Übereinstimmungen der Messwerte nur in ca. 45% der Fälle erzielt. Hier erreichten die Korrelationskoeffizienten hohe Werte von 0,96. Hingegen zeichnet sich das Jahr 2005 nur durch schwache Korrelationen aus.

5.2.4 Zusammenhang zwischen dem Wasserpotential der Versuchspflanzen und dem Auftreten von Ultraschallemissionen

Die erwartete Korrelation der UAE-Signalrate und dem Triebwasserpotential wurde bei Containerflieder analog zu Containerrosen geprüft. Auch hierzu wurde parallel zu den Ultraschallmessungen während der Austrocknungsversuche über mehrere Tage das mittägliche Triebwasserpotential ermittelt.

Abbildung 24 zeigt die an den Containerfliedern gemessenen Triebwasserpotentiale und die parallel aufgezeichneten UAE-Signalraten pro Tag.

Abbildung 24 stellt die an den Containerfliedern gemessenen Triebwasserpotentiale den parallel aufgezeichneten UAE-Signalraten pro Tag grafisch gegenüber.

Es ist festzustellen, dass ähnlich wie bei Containerrosen in den ersten vier Tagen nach Beginn des Austrocknungsversuches bei allen drei Pflanzen nur eine geringe Abnahme des Triebwasserpotentials zu beobachten ist. Weiterhin konnte ab dem fünften Tag eine Abnahme des Triebwasserpotentials bis auf etwa -3,3 MPa bei allen drei Pflanzen gemessen werden. Infolge der Bewässerung am neunten Tag nahm das Triebwasserpotential bei allen drei Pflanzen wieder zu und am nächsten Tag wurde das Ausgangsniveau bei allen drei Pflanzen erreicht. Ebenso wie bei Containerrosen ist nur eine geringe Streuung der Triebwasserpotentiale in den einzelnen Wiederholungen einer Pflanze und zwischen den Pflanzen zu erkennen.

Beim Vergleich der Verläufe der UAE-Signalrate und Triebwasserpotentiale kann festgestellt werden, dass bei allen drei Pflanzen die Kurvenverläufe nahezu identisch waren. Auch hierzu konnten bis zum fünften Versuchstag keine nennenswerten Veränderungen der UAE-Signalrate beobachtet werden. Allerdings auffällig dabei war die hohe UAE-Signalrate der Pflanze 2 am ersten Tag im Vergleich zu den folgenden Tagen. Weiterhin wurde mit der Abnahme der Triebwasserpotentialwerte eine Zunahme der Ultraschallemission festgestellt. Eine Abnahme der UAE-Signalrate bis zum Ausgangsniveau konnte schon am nächsten Tag nach der Bewässerung beobachtet werden.

Ähnlich wie bei Containerrosen ergab sich für die Beziehung zwischen der UAE-Signalrate pro Tag und mittäglichem Triebwasserpotential eine lineare Abhängigkeit (Abb. 25).

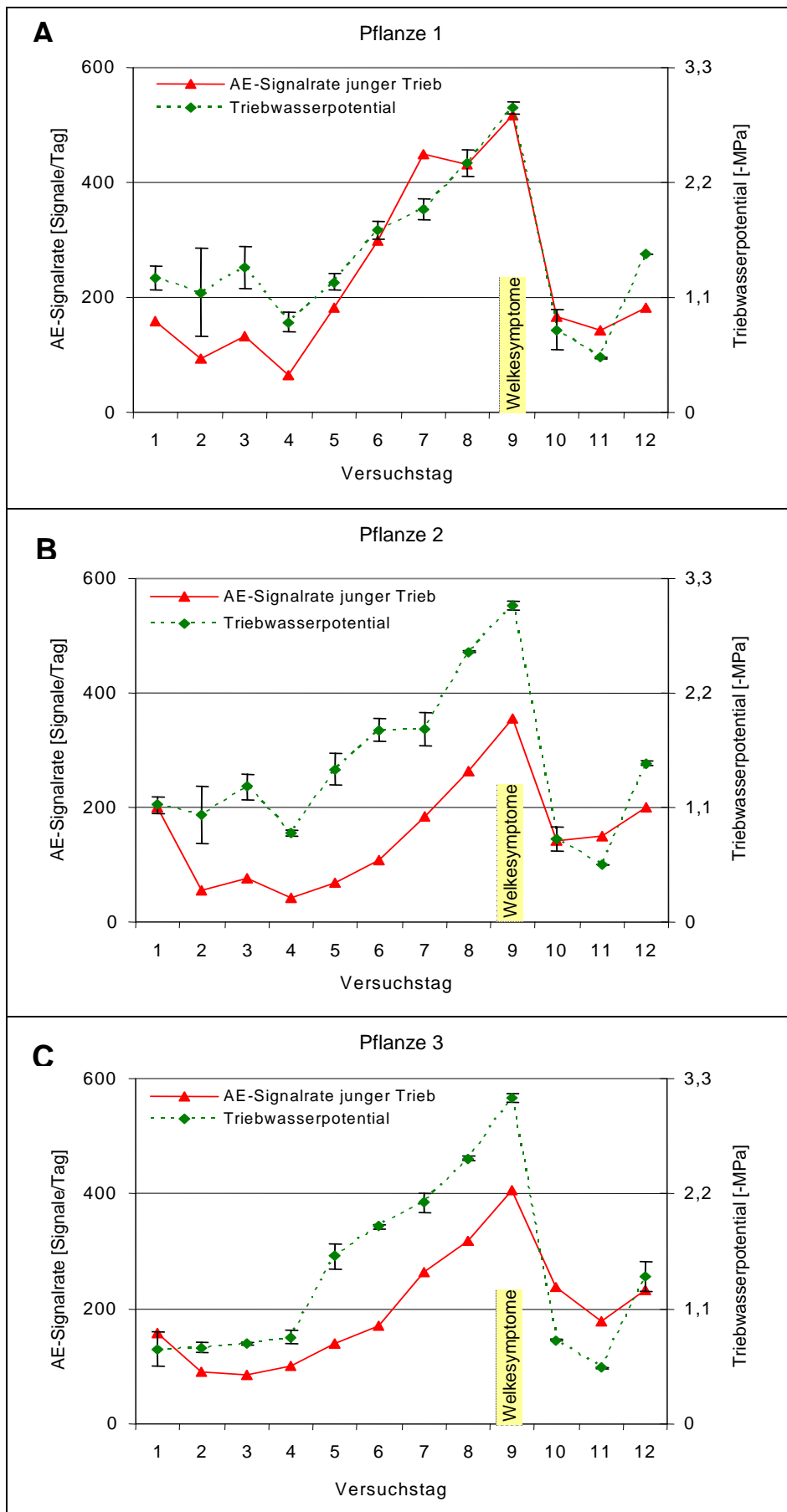


Abb. 24: Ultraschallsignalrate und mittägliches Triebwasserpotential von *Syringa vulgaris* während eines Austrocknungsversuches (Daten zeigen Mittelwerte mit Standardabweichungen von 2 Trieben pro Pflanze). A) Pflanze 1, B) Pflanze 2, C) Pflanze 3.

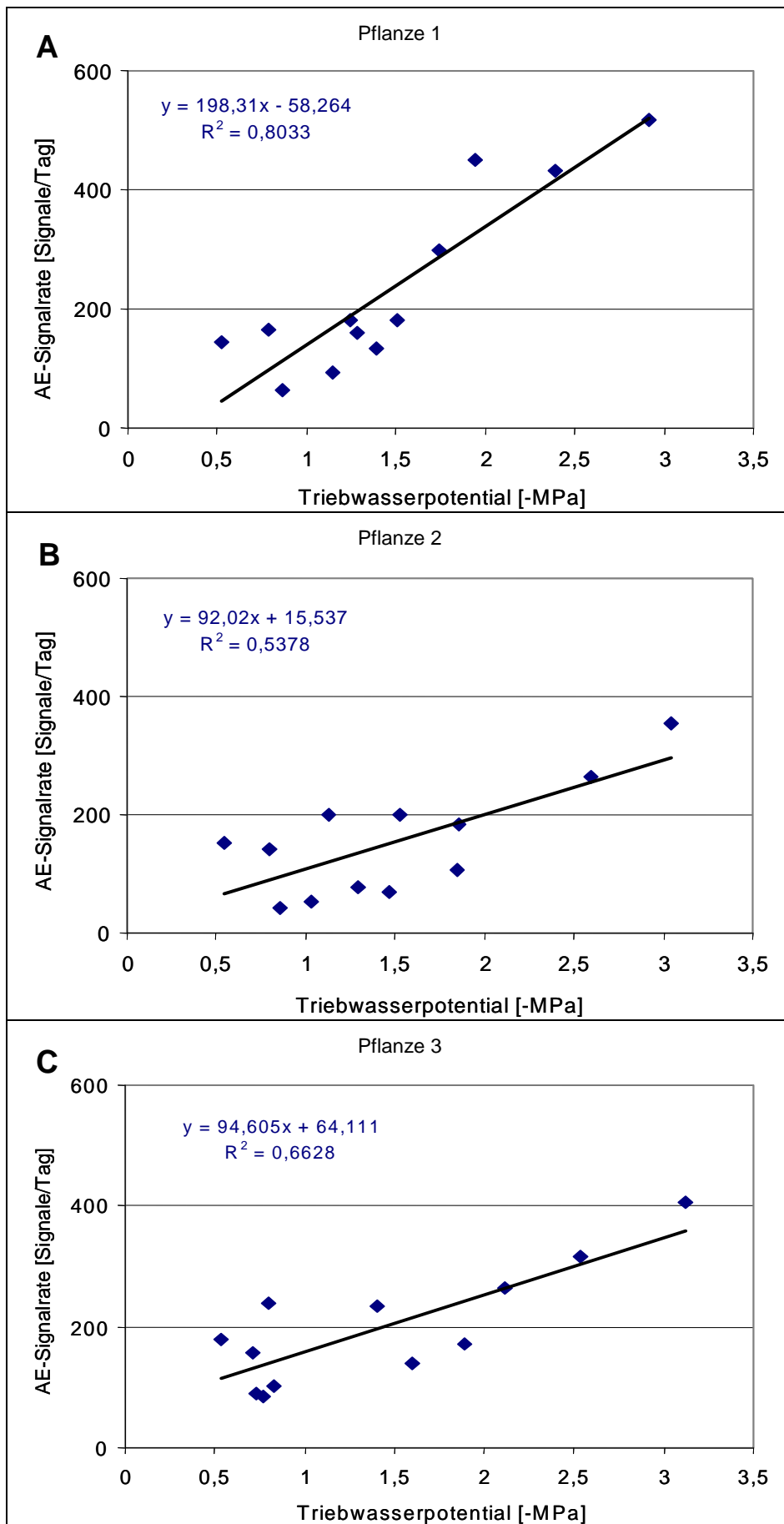


Abb. 25: Ultraschallsignalraten von *Syringa vulgaris* in Abhängigkeit von mittäglichem Triebwasserpotential (Daten zeigen Mittelwerte von 2 Trieben pro Pflanze).
A) Pflanze 1, B) Pflanze 2, C) Pflanze 3.

Wie aus Abbildung 25 zu entnehmen ist, besteht auch bei Containerflieder eine signifikante Korrelation zwischen beiden Größen ($\alpha = 0,01$). Bei allen drei untersuchten Containerpflanzen steigt die Ultraschallemission mit sinkendem Triebwasserpotential an.

In Tabelle 13 sind die Korrelationskoeffizienten des Zusammenhanges zwischen der Ultraschallrate und dem Blattwasserpotential an jungen Trieben für die einzelnen Versuche dargestellt.

Tab. 13: Korrelationskoeffizienten und Signifikanzniveaus für den linearen Zusammenhang der Signalrate der Ultraschallemission mit dem mittäglichen Blattwasserpotential der untersuchten Fliederpflanzen.

Versuch	Pflanze 1	Pflanze 2	Pflanze 3
1/2004 AW=9	Tr. 1: 0,896**	Tr. 1: 0,733**	Tr. 1: 0,814**
2/2004 AW=8	Tr. 1: 0,963**	Tr. 1: 0,756*	Tr. 1: 0,676
3/2004 AW=12	Tr. 1: 0,955**	Tr. 1: 0,316	Tr. 1: 0,681*
1/2005 AW=8	Tr. 1: 0,663 Tr. 2: 0,733*	Tr. 1: 0,293 Tr. 2: 0,639	-
AW = Anzahl der Wertepaare; Tr. 1 = Trieb 1; Tr. 2 = Trieb 2 * = α 5%; ** = α 1%			

Es ist festzustellen, dass in den meisten Versuchen eine signifikante Korrelation zwischen Triebwasserpotential und UAE-Signalrate besteht. Große Unterschiede ergeben sich bei der Betrachtung der einzelnen Messjahre. So konnte im Jahr 2005 mit einer Ausnahme keine Beziehung zwischen den beiden Größen gemessen werden.

Ähnlich wie bei Containerrosen wurden bei Containerflieder die Schwellenwerte der UAE-Signalrate pro Tag von jungen Trieben bei beginnender Laubwelke (Boniturnote 3) ermittelt und in der Tabelle 14 eingetragen.

Tab. 14: Ultraschallsignalraten (Signale pro Tag) von *Syringa vulgaris* bei beginnender Laubblattwelke (Boniturnote 3).

Fliederpflanze		Versuch 1/2004	Versuch 2/2004	Versuch 3/2004	Versuch 1/2005
I	Trieb 1	518	18169	521	4187
	Trieb 2	-	-	-	1161
II	Trieb 1	354	18296	350	1531
	Trieb 2	-	-	-	1902
III	Trieb 1	407	13234	437	-
	Trieb 2	-	-	-	-

Es ist festzustellen, dass ähnlich wie bei Containerrosen die UAE-Signalrate sowohl zwischen den Pflanzen als auch zwischen den Trieben der gleichen Pflanze sehr stark voneinander streuen. Auffallend abweichend hiervon ist der Versuch 2/2004 mit einer ca. 50-fachen höheren UAE-Signalrate im Vergleich zu den anderen Versuchen.

5.2.5 Diskussion der Ergebnisse bei *Syringa vulgaris*

Methodische Aspekte

Die Ultraschalluntersuchungen an Containerflieder führten zu ähnlichen Ergebnissen wie bei Containerrosen. Auch hier wurde sowohl die höchste UAE-Signalrate als auch die typische Tag-Nacht-Rhythmik an jungen, diesjährigen Trieben beobachtet. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass an Sprossbasis, Blattstiel und einjährigem Trieb nur sehr niedrige UAE-Signalraten registriert wurden. Ebenso war an diesen Organen keine Tag-Nacht-Rhythmik erkennbar. Mögliche Erklärungen hierfür wie die Kontaktfläche Pflanzenorgan/ Sensor (KAVANAGH, 1992), Dämpfungseffekte des Pflanzengewebes (TYREE und SPERRY, 1998b; KIKUTA, 2007) und das morphologische Entwicklungsstadium wurden für Rosen im Kapitel 5.1.6 bereits ausführlich diskutiert (SPERRY, 1986; CHABBERT et. al., 1993).

Ultraschallsignale und Wasserhaushalt

Auch bei weiterführenden Untersuchungen der Ultraschallemission an mehreren diesjährigen Trieben der Containerfliederpflanzen wurde deutlich, dass das Muster der auftretenden Kavitationsprofile von Containerflieder sehr den Mustern der Kavitationsprofile von Containerrosen gleicht. Unter den beschriebenen Versuchsbedingungen zeigten die Containerflieder die typische Tag-Nacht-Rhythmik mit der erwarteten starken Zunahme der UAE-Signalrate während des Tages sowie einen starken Abstieg in der Nacht (ASAKA et al., 2002; BORMANN et. al., 2001, 2002; SPINAROVA et. al., 2007). Diese spezifische Tag-Nacht-Periodizität ist vermutlich auf die Stomatafunktion zurückzuführen. Mit zunehmendem Trockenstress konnte bei Flieder, ähnlich wie bei Rosen, eine erhöhte Ultraschallemission auch während der Nacht ermittelt werden. Dies deckt sich mit Untersuchungen bei Mais, Brokkoli und Schnittrosen in der Nacherntephase (TYREE et al., 1986; BORMANN et al., 2002; SPINAROVA et. al., 2006).

Eine genaue Betrachtung der Ultraschallemission im Tagesgang von bewässerten und unbewässerten Pflanzen gibt deutliche Hinweise auf den Wasserversorgungszustand der untersuchten Pflanzen. Wie aus den Abbildungen 18 und 19 zu entnehmen ist, steigen die UAE-Signalraten bei beiden Varianten mit zunehmender Einstrahlung, wobei der Anstieg bei der unbewässerten Variante viel stärker ausfällt als bei der bewässerten Variante. Der abrupte Rückgang der UAE-Signalrate gegen Mittag bei der unbewässerten Variante ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass Pflanzen als Schutzmechanismus gegenüber zu starkem

Wasserstress ihre Stomata auch während des Tages schließen können. Dadurch werden stomatäre Transpirationsverluste, die nicht über eine Erhöhung der Wasseraufnahme ausgeglichen werden können, verhindert (SPERRY, 1995). Einem damit verbundenen weiteren Absinken des Wasserpotentials wird so entgegengewirkt. Als weitere mögliche Ursache für das Phänomen der ausbleibenden Ultraschallemission bei starkem Trockenstress wird angenommen, dass die Xylemgefäße schon vollständig embolisiert waren. Eine erneute Kavitation wäre damit ausgeschlossen und die Kavitationsrate sinkt (BORMANN, 2004).

Aus der Betrachtung der UAE-Signalrate pro Tag von bewässerten und unbewässerten Fliederpflanzen (Abb. 21) ist grundlegend festzustellen, dass die unter Wasserstress stehenden Pflanzen eine höhere UAE-Signalrate aufweisen, was mit der bestehenden Literatur übereinstimmt (PENA und GRACE, 1986; SALLEO und GULLO, 1986; BORGHETTI et al., 1989; LO GULLO und SALLEO, 1991; IKEDA und OHTSU, 1992). Allerdings zeigt der Vergleich der Ergebnisse zwischen den Versuchsreihen große Unterschiede. Hier fällt vor allem das Experiment 1/2005 mit einer ca. 7-fachen höheren UAE-Signalrate pro Tag auf.

Ultraschallsignale und Bodenwasserpotential

Die Untersuchung der Ultraschallemission an Containerflieder während Austrocknungsversuchen zeigte das gleiche Muster wie bei Containerrosen: die UAE-Signalrate stieg mit abnehmendem Bodenwasserpotential und sank nach einer Bewässerung wieder ab. Dabei ist wichtig festzustellen, dass auch bei Containerflieder nennenswerte Abweichungen der Kurvenverläufe zwischen der UAE-Signalrate und Bodenwasserpotential zu beobachten waren. Auch hier wurden schon in den ersten Versuchstagen, trotz guter Wasserversorgung, bemerkenswerte Ultraschallsignale registriert. Eine fehlende Anpassung an die Versuchsbedingungen kann die erhöhte UAE-Signalrate am ersten Versuchstag nicht erklären, da vor Versuchsbeginn alle Pflanzen akklimatisiert wurden.

Auffällig war das Verhalten der Ultraschallemission bei Containerflieder nach einer Bewässerung. Während die hohe UAE-Signalrate bei Containerrosen auch nach einer Bewässerung für mehrere Tage erhalten blieb, fiel die UAE-Signalrate bei Containerflieder nach einer Bewässerung innerhalb 24 Stunden wieder annähernd auf das Ausgangsniveau ab. Es könnte vermutet werden, dass die Xylemzellen bei Flieder nur kavitiert waren, was eine schnelle Auffüllung der Xylemelemente ermöglichte (SALLEO und LO GULLO, 1989). Andererseits wäre es möglich dass bei Flieder eine Wiederbefüllung der embolisierten Xylemgefäße auch tagsüber bei

aktiver Transpiration stattfinden kann. CANNY (1997) stellte anhand von mikroskopischen Untersuchungen an gefrorenen Blattstielen von *Helianthus annuus* fest, dass bereits vormittags 40 % der Xylemgefäße embolisiert waren, dennoch war nachmittags trotz vorhandener Transpiration die Menge an embolisierten Xylemelementen auf 4 % reduziert.

Weiterhin auffällig ist, dass die UAE-Signalrate sowohl bei Containerflieder als auch bei Containerrosen große Streuungen zwischen den Versuchspflanzen und an den verschiedenen Positionen einer Pflanze aufwies. Mögliche Erklärungen hierfür wurden in Kapitel 5.1.6 diskutiert.

Ultraschallsignale und Triebwasserpotential

Es war zunächst erwartet worden, dass ein besserer Zusammenhang zwischen der Ultraschallemission und dem Wasserpotential in der Pflanze als zum Bodenwasserpotential besteht.

Die dargestellten Ergebnisse belegen, dass das Triebwasserpotential mit zunehmendem Trockenstress bis auf etwa -3 MPa sinkt. Diese Abnahme ist allerdings ähnlich wie bei Containerrosen erst ab dem fünften Tag zu beobachten und stimmt mit den Ergebnissen von JIA et al. (2006) an Weizen überein. Gleichzeitig ist auch eine Zunahme der UAE-Signalrate festzustellen. Der spätere Anstieg der Ultraschallemission kann vermutlich durch die Unterschreitung eines bestimmten Wasserpotential-Schwellenwertes erklärt werden, der bei allen drei Pflanzen bei ca. -1 MPa liegt. Nach einer Bewässerung nahm das Triebwasserpotential wieder zu und erreichte schon am nächsten Tag das Ausgangsniveau vor Versuchsbeginn. Dies deutet darauf hin, dass die Pflanzen in der Lage waren ihre Wasserbilanz wieder auszugleichen.

Fasst man die in diesen Versuchen gewonnenen Erkenntnisse zusammen, so ergibt sich die Schlussfolgerung, dass der Zusammenhang zwischen der UAE-Signalrate und dem Wasserpotential in der Pflanze kein besserer Indikator für den Wasserstatus der Pflanze ist, als der Vergleich von UAE-Signalrate und Bodenwasserpotential.

Reproduzierbarkeit der Daten

Ähnlich wie bei Containerrosen wurden auch bei Containerflieder Unterschiede zwischen den Versuchsjahren hinsichtlich der Zusammenhänge zwischen UAE-Signalrate und Bodenwasserpotential bzw. Triebwasserpotential festgestellt. Jedoch konnten hierfür keine Erklärungen gefunden werden.

5.3 Ultraschalluntersuchungen an *Asparagus officinalis*

5.3.1 Einfluss der Messposition und des Triebalters auf das Auftreten von Ultraschallemissionen

Analog zu Rosen und Flieder wurden auch beim Spargel Ultraschallmessungen an verschiedenen alten Trieben durchgeführt, um geeignete Signalorte mit einer hohen Auflösung zu identifizieren. Hierfür wurden "junge Triebe" (7 Tage alt, ohne Seitentriebe und Phylokladien) und "alte Triebe" (153 Tage alt, voll entwickelt) gewählt.

Die Messungen wurden wie bereits zuvor beschrieben im Rahmen eines mehrtägigen Austrocknungsversuches durchgeführt. Anders als bei Rosen und Flieder mussten die Spargelgefäße auf Grund der großen Biomasse allerdings im Versuchszeitraum bewässert werden. Der Bewässerungstermin ist aus dem starken Absinken des Bodenwasserpotentials zu ersehen (Abb. 26 und 27).

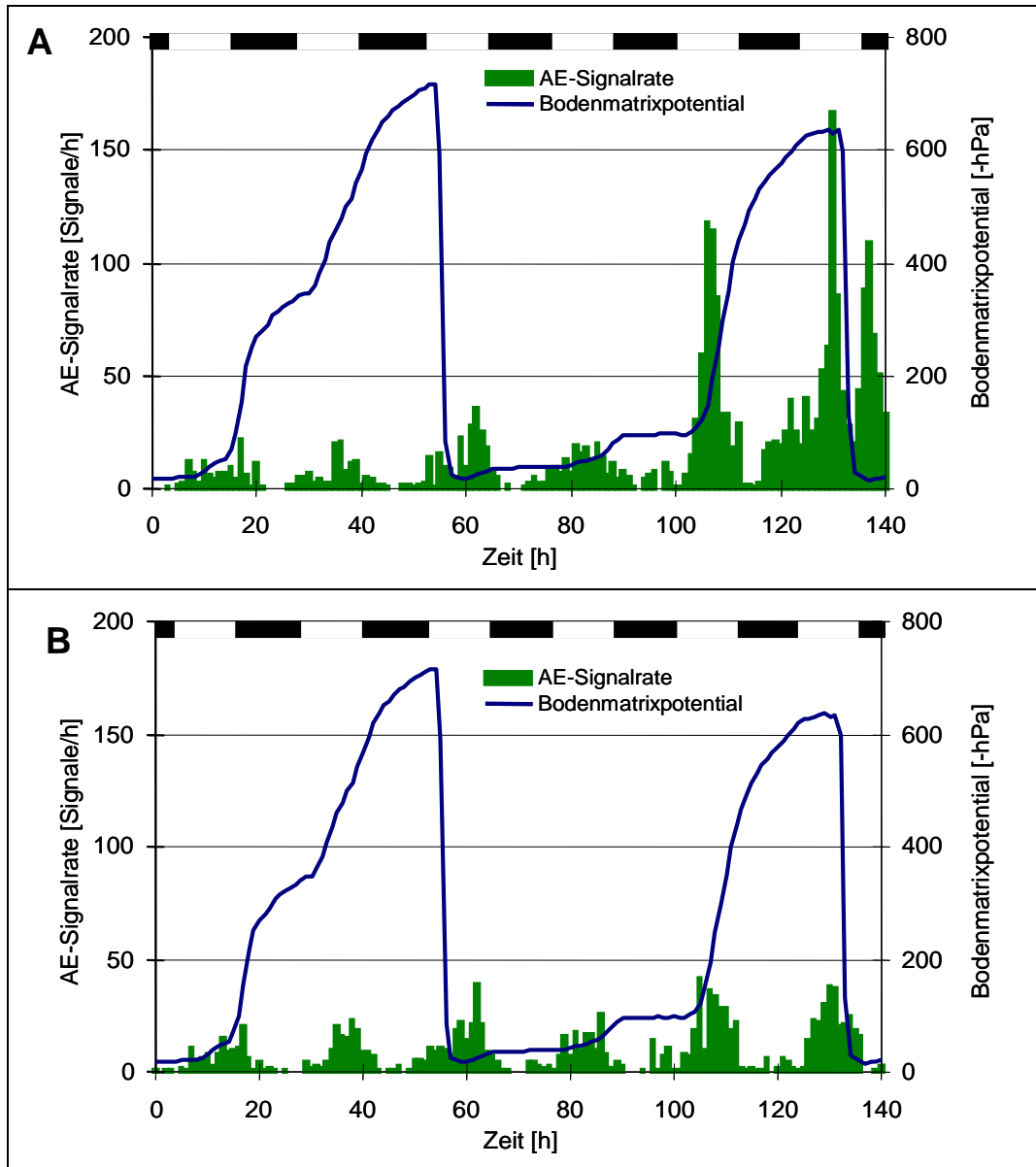


Abb. 26: Kavitationsprofile von *Asparagus officinalis* mit unterschiedlich alten Trieben während eines Austrocknungsversuches (2004). A) Ultraschallsignale an 7 Tage altem Trieb. B) Ultraschallsignale an 153 Tage altem Trieb. Hell-Dunkelphasen sind am oberen Abbildungsrand grafisch dargestellt (schwarze Balken: Dunkelphasen).

Aus Abbildung 26 ist zu entnehmen, dass die Gefäße rasch austrockneten und bereits innerhalb von zwei Tagen Bodenwasserpotentiale von etwa -600 hPa (Bewässerungsschwellenwerte) erreichten. Ein Zusammenhang zwischen dem Bodenwassergehalt und den Ultraschallsignalen ist dagegen in diesen Untersuchungen nicht zu beobachten. Trotz starker Austrocknung des Bodens konnte bei den alten Trieben kein Anstieg und bei den jungen Trieben nur in einem Fall ein Anstieg der UAE-Signalrate bei Trockenstress festgestellt werden.

Eine Wiederholung dieser Untersuchungen in 2005 ergab ein anderes Bild. Die jungen Triebe wiesen in diesen Untersuchungen eine nur sehr geringe und nicht mit der Bodenfeuchte korrespondierende Ultraschallrate auf.

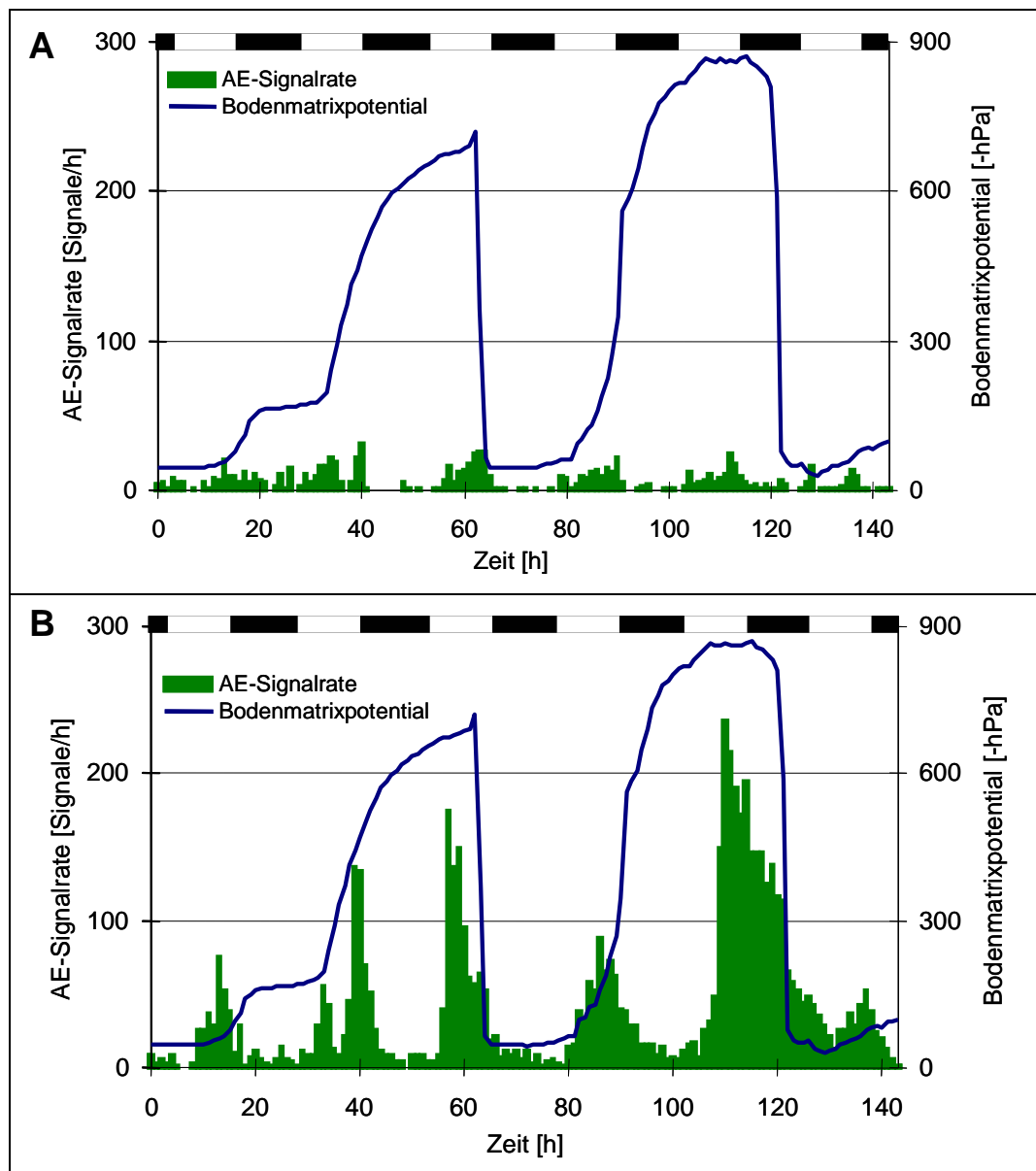


Abb. 27: Kavitationsprofile von *Asparagus officinalis* mit unterschiedlich alten Trieben während eines Austrocknungsversuches (2005). A) Ultraschallsignale an 6 Tage altem Trieb. B) Ultraschallsignale an 161 Tage altem Trieb. Hell-Dunkelphasen sind am oberen Abbildungsrand grafisch dargestellt (schwarze Balken: Dunkelphasen)

Im Gegensatz zu 2004 konnte bei den älteren Trieben ein leichter Anstieg der Ultraschallemission im Austrocknungsprozess und eine Abnahme der Signalrate nach Bewässerung festgestellt werden (Abb. 27). Nachfolgende Wiederholungen bestätigten diese Beobachtungen nur etwa in der Hälfte der Fälle.

Ein Vergleich der Abbildungen 26 und 27 zeigt die Widersprüche der beiden Versuchsjahre. Während 2004 vor allem an jungen Trieben nennenswerte und zum

Teil auch plausible Signalraten gemessen werden konnten, traten im Versuchsjahr 2005 die meisten Ultraschallemissionen an älteren Trieben auf. Neben der Problematik geeignete Messorte aufzufinden, ist in den meisten Spargeluntersuchungen auch nur ein schwacher und zudem nur gelegentlich auftretender Zusammenhang zwischen dem Bodenwassergehalt und der Ultraschallrate festzustellen. Dies gilt insbesondere für die Versuchsergebnisse im Versuchsjahr 2005. In vielen Fällen zeigten die Triebe bereits starke Welkesymptome ohne dass ein nennenswerter Anstieg der Ultraschallrate zu beobachten war. Aus diesen Gründen wurden die Untersuchungen an Spargel ab 2006 aufgegeben.

5.3.2 Diskussion der Ergebnisse bei *Asparagus officinalis*

Methodische Aspekte

Bei dem Vergleich von unterschiedlichen Pflanzenorganen bei Rosen und Flieder wurde in den Kapiteln 5.1.2 und 5.2.1 festgestellt, dass die jungen Triebe in Austrocknungsversuchen die höchste UAE-Signalrate aufwiesen und typische Tag-Nacht-Rhythmen zeigten. An Sprossbasis, Blattstiel und älteren Trieben wurde nur eine geringe Ultraschallemission registriert und die Tag-Nacht-Periodizität war schwach oder gar nicht vorhanden. Aus diesen Gründen wurden junge Triebe als optimaler Messort für die Ultraschallemission an Rosen und Flieder angesehen, um frühzeitig die Beeinträchtigung der Wasserversorgung der Pflanzen anzuzeigen.

Die Ermittlung eines geeigneten Messortes für die Ultraschallmessungen an Containerspargel ergab ein anderes Bild. Im Jahr 2004 haben die Ultraschallmessungen bei Spargel gezeigt, dass trotz zunehmender Austrocknung des Bodens bei den alten Trieben kein Anstieg und bei den jungen Trieben nur in wenigen Fällen eine Zunahme der UAE-Signalrate bei Trockenstress festgestellt werden konnte. Sehr auffällig dabei war, dass ein deutlicher Anstieg der UAE-Signalrate an jungen Trieben erst nach wenigen Minuten vor oder während des Sichtbarwerdens von Welkesymptomen auftrat. Diese Beobachtungen wurden auch in parallel durchgeführten Untersuchungen eines anderen Projektes bestätigt (MAYER, pers. Mitteilung). Die Ursache hierfür ist unklar. Spargel gehört zu der Klasse der Monokotyledonen und weist daher eine grundlegend andere Xylemanatomie als Dikotyledonen auf. In der aktuellen Literatur gibt es keine Untersuchungen, die eine unterschiedliche Anatomie des Spargelxylems als Grund für die fehlende Ultraschallemission beschreiben. Neben der Xylemanatomie könnte der nicht ausreichende Lignifizierungsgrad des Triebes als beeinflussender Faktor für die Ultraschallmessungen angesehen werden. Ähnliche Befunde wurden auch bei anderen krautigen Pflanzen (SCHMID et al., 2007) und in Vorversuchen mit Stecklingen von Geranien nachgewiesen. Es wäre auch denkbar, dass die kurz vor oder während der sichtbaren Welkesymptome auftretenden Ultraschallemissionen in Zusammenhang mit Änderungen des Xylemdurchmessers stehen. HÖLTTÄ et al. (2005) stellten bei den Untersuchungen an Ästen und Stämmen von *Pinus sylvestris* L. fest, dass die Ultraschallemission hauptsächlich während einer Abnahme des Xylemdurchmessers stattgefunden hat.

Wiederholungen der Ultraschallmessungen im Jahr 2005 bei Spargel konnten die Ergebnisse aus dem Jahr 2004 nicht bestätigen. Besonders auffällig an den dargestellten Kavitationsprofilen ist der Anstieg der Ultraschallemission im Austrocknungsprozess bei älteren Trieben. Nachfolgende Wiederholungen bestätigten diese Beobachtungen nur etwa in der Hälfte der Fälle. Für die beobachteten sehr widersprüchlichen Ergebnisse beim Spargel konnten allerdings keine weiteren Erklärungen gefunden werden. Es wäre naheliegend anzunehmen, dass die bei sichtbaren Welkesymptomen gemessenen Signale nicht im Zusammenhang mit dem Wasserzustand der untersuchten Pflanzenorgane stehen. Es wird angenommen, dass die Ultraschallemissionen durch mechanische Degradierungen des Faser- und Gefäßgewebes verursacht wurde. Über ähnliche Befunde berichten HENDRIKS et al. (2005) bei Schnittrosen. Auch hier wurden am Ende des Vaselebens erhöhte Ultraschallemissionen gemessen, die nicht in Zusammenhang mit dem Wasserhaushalt der Rosen stehen und somit nicht auf Kavitationen zurückzuführen sind.

Zentrales Ergebnis von vielen Ultraschalluntersuchungen bei Containerspargel in den Versuchsjahren 2004 und 2005 ist, dass keine geeigneten Messorte für die Ultraschallmessung identifiziert werden konnten. Auch die Tatsache, dass ein Anstieg der Ultraschallemission bei zunehmender Bodenaustrocknung nur bedingt vorkam, führte zur Entscheidung weitere Ultraschalluntersuchungen an Spargel aufzugeben.

6 Abschließende und zusammenfassende Diskussion

Die Bewässerungssteuerung erfolgt derzeit überwiegend anhand von Messungen des Bodenwasservorrates und meteorologischen Daten, die die Transpirationsbelastung der Pflanze abschätzen. Unberücksichtigt bleibt allerdings hierbei das Potenzial von Pflanzen, sich auf Trockenstress einzustellen und temporäre Stresssituationen ohne Ertrags- oder Qualitätseinbußen zu überstehen. Dieses Potenzial variiert bekanntermaßen zwischen den Pflanzenarten und auch zwischen den Genotypen. Es erscheint daher naheliegend, das Potenzial der Pflanzen in intelligente Bewässerungs-Regelstrategien einzubeziehen. Voraussetzung hierfür ist, dass der Wasserbedarf der Pflanzen zerstörungsfrei und automatisch erfasst werden kann.

Als ein kritischer Schwellenwert für die Bewässerung wird in der Literatur der Kavitationsschwellenwert beschrieben (QIU et al., 2002; SHIFENG, 2003; 2004; 2008). Kavitationen werden dabei als Vorstufen von Embolien angesehen, die den Wassertransport im Xylem massiv beeinträchtigen können. Wie aus vielen Arbeiten in der Literatur zu entnehmen ist, kann dieser Schwellenwert bei Gehölzen mit Hilfe der Ultraschalltechnik erfasst werden. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Frage, ob und inwieweit die Ultraschalltechnik geeignet ist, physiologisch kritische Trockenstresssituationen auch bei gartenbaulich relevanten Kulturen zu erfassen. Als Modellkulturen dienten Rosen, Flieder und Spargel in Container.

In diesem Zusammenhang wurden folgende Fragen geprüft:

1. Liefern die Ultraschalldaten andere/bessere Informationen über den Wasserhaushalt der Testpflanzen als das Bodenwasserpotential oder Wasserpotential in der Pflanze?
2. Ist die Ultraschalltechnik bei allen geprüften Modellpflanzen einzusetzen und/oder was sind die Gründe für eine nur begrenzte Anwendbarkeit?
3. Welche Faktoren nehmen Einfluss auf die Ultraschallemission und inwieweit können sie durch eine Standardisierung der Messbedingungen berücksichtigt werden?
4. Gibt es derzeit Perspektiven, die Bewässerungssteuerung gärtnerischer Kulturen mit Hilfe der Ultraschalltechnik zu optimieren?

Die durchgeführten Ultraschallmessungen während Austrocknungsversuchen zeigten bei Containerrosen und -flieder im Jahr 2004 in der Regel signifikante Zusammenhänge zwischen UAE-Signalrate und Bodenwasserpotential bzw.

Wasserpotential der Pflanzen. Mit abnehmendem Bodenwasserpotential war ein Absinken des Wasserpotentials in der Pflanze und damit verbunden eine Zunahme der Ultraschallemission zu beobachten. Ähnliche Ergebnisse wurden mehrmals in der Literatur beschrieben (BORGHETTI et al., 1990; IKEDA und OHTSU, 1992; KAVANAGH, 1992; JACKSON et al., 1995; VAN DOORN und SUIRO, 1996; AKASAKA et al., 2002). Dabei ergab sich das grundsätzliche Problem, dass eine deutliche Einzelpflanzenstreuung sowohl zwischen den Pflanzen als auch zwischen den Wiederholungen an einer Pflanze existierte. Die Korrelationsanalysen zwischen den Ultraschallemission und Bodenwasserpotential bzw. Wasserpotential in der Pflanze im Jahr 2005 zeigten, dass mit je einer Ausnahme bei Rosen und Flieder kein Zusammenhang zwischen den Parametern beobachtet werden konnte. Die Erkenntnis, dass sowohl eine große Streuung der Messergebnisse als auch unterschiedliche Ergebnisse zwischen den Versuchsjahren zu beobachten waren, führte zur Schlussfolgerung, dass die UAE-Signalrate kein besserer Indikator für Wasserstress ist als das Bodenwasserpotential oder das Wasserpotential in der Pflanze. Auch die Erwartung, dass unter der Berücksichtigung des Einflusses des Regelpotentials der Stomata auf die Wasserbilanz in der Pflanze eine engere Korrelation zwischen der Ultraschallemission und dem Wasserpotential in der Pflanze als zum Bodenwasserpotential besteht, wurde nicht bestätigt.

Um eine genauere Einsatzmöglichkeit der Ultraschalltechnik zur Bewässerungsteuerung zu testen, wurde die absolute UAE-Signalrate/Tag bei beginnender Laubwelke als Prüfparameter herangezogen. In der Literatur besteht die Vorstellung, dass anhand von Schwellenwerten der Ultraschallemission der Zeitpunkt für die Bewässerung bestimmt werden kann. Während SHIFENG et al. (2003; 2004; 2008) die Ultraschallmessungen in einem Klimamodell integrierten, um die Bewässerung bei Tomaten in Gewächshaus zu steuern, wird sogar die ausbleibende Ultraschallemission bei hohem Wassermangel als Möglichkeit für die Bewässerungsteuerung angesehen (BORMANN, 2004). Die unterschiedlichen absoluten UAE-Signalraten, sowohl zwischen Pflanzen als auch zwischen Trieben der gleichen Pflanze, machen deutlich, dass aus der absoluten Anzahl an Signalen nur bedingt Rückschlüsse auf die Wasserstress-Intensität gezogen werden können. Aus den Untersuchungen kann somit gefolgert werden, dass die Ultraschalltechnik allein, zumindest bei diesen drei untersuchten Pflanzenarten für praktische Anwendungen zur Optimierung der Bewässerungssteuerung nicht geeignet erscheint.

Vor dem Hintergrund der unterschiedlichen Anatomie der untersuchten Pflanzenarten war es notwendig, geeignete Messorte an der Pflanze zu finden, die aussagekräftige Informationen über den Wasserstatus der Pflanze liefern. Untersucht wurden verschiedene Pflanzenteile (Sprossbasis, Blattstiel, junger Trieb) in Austrocknungsversuchen. Unter den beschriebenen Testbedingungen zeigten nur junge Rosen- und Fliedertriebe den erwarteten starken Anstieg der UAE-Signalrate sowie die typische Tag-Nacht-Rhythmik der Ultraschallemission. Im Gegensatz hierzu konnten bei Spargel keine geeigneten Messorte identifiziert werden und die Ergebnisse waren in den beiden Versuchsjahren widersprüchlich. Während im Jahr 2004 an den jungen Spargeltrieben plausible UAE-Signalrate registriert wurden, traten im Versuchsjahr 2005 nennenswerte Ultraschallemissionen an älteren Trieben auf. Die Tatsache, dass Ultraschallsignale nur bei Organen mit einem bestimmten physiologischen Alter auftreten, könnte auf die Lignifizierung zurückgeführt werden (CHABBERT et al., 1993). Allerdings ist unbekannt inwieweit der Lignifizierungsgrad für die Schallentstehung wichtig ist. Weiterhin ist bekannt, dass bei vielen krautigen Pflanzen unter Trockenstress wenige (MILBURN und McLAUGHLIN, 1974; QUI et al., 2001; eigene Vorversuche bei *Pelargonium zonale*) oder gar keine Ultraschallsignale auftreten (SCHMID et al., 2007).

Die beobachtete Tag-Nacht-Rhythmik der Ultraschallemission macht weitere Versuche erforderlich, um den Einfluss der Einstrahlung auf die Ultraschallemission zu überprüfen. Die dargestellten Kavitationsprofile mit einer typischen Tag-Nacht-Rhythmik deuten darauf hin, dass die Wasserbilanz durch Transpirationsbelastung stark beeinflusst wird. Vor allem die erhöhten Ultraschallemissionen bei Rosen und Flieder auch während der Nacht können auf eine gestörte Wasserbilanz in der Pflanze und damit eine Überschreitung der Kavitationsschwelle in den Xylemgefäßen zurückgeführt werden. Ähnliche Ergebnisse sind unter anderem auch bei Schnittrosen (SPINAROVA et al., 2006), Brokkoli (BORMANN, 2004) und Gingko (MURAKAMI et al., 2007) beschrieben.

Eine Zwischenbilanz der bisherigen vorgestellten Ergebnisse zeigt, dass die Ultraschallmessung sowohl von der Morphologie der Pflanze als auch von klimatischen Bedingungen beeinflusst wird. Daher scheint eine Standardisierung der Messbedingungen schwierig.

Betrachtet man die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit, so kommt man zu dem Schluss, dass die Ultraschalltechnik wichtige Hinweise über den Wasserhaushalt an Containerrosen und -flieder liefert. Eine Korrelation zwischen der Ultraschallemission

und Bodenwasserpotential konnte allerdings bei Spargel zu spät oder gar nicht beobachtet werden, so dass die Ultraschallmessungen an Spargel als nicht geeignet eingestuft werden, um Wasserstress direkt an der Pflanze sensibel anzuzeigen. Schwellenwerte der Ultraschallemissionen, die zur Bewässerungssteuerung notwendig wären, konnten auch bei Rosen und Flieder nicht identifiziert werden. Schwachstellen sind die bislang nicht quantifizierbaren Einflussfaktoren, eine große Einzelpflanzenstreuung, ein hoher technischer Aufwand und das Auftreten von Störgeräuschen. Auch die Tatsache, dass die Ultraschallmessung derzeit kein besserer Indikator als das Bodenwasserpotential ist, bestätigt deutlich diese Beurteilung. Damit reichen die Informationen für praktische Anwendungen wie zum Beispiel für die Bewässerungssteuerung nach derzeitigem Wissensstand nicht aus, sind aber dennoch als ein Teilaspekt zur Charakterisierung des Wasserhaushaltes der Pflanze zu beurteilen.

Die gesamten Untersuchungen zur Eignung der Ultraschallmessungen für die Beurteilung des Wasserhaushaltes von gärtnerischen Pflanzen wurden ausschließlich im Gewächshaus an Gefäßpflanzen durchgeführt. Weiterführend wäre zu prüfen, ob durch Ultraschallmessungen bei Pflanzen im Freiland ein besserer Zusammenhang zwischen der UAE-Signalrate und Bodenwasserpotential beobachtet werden kann. Beispielweise wäre denkbar, dass eine langsamere Austrocknung des Bodens und ein ausreichender Wurzelraum bei Spargelpflanzen zu anderen Ergebnissen der Ultraschallmessungen führen könnten.

7 Zusammenfassung

Wassermangel in vielen Regionen der Erde, Anpassungszwänge an die prognostizierten Klimaänderungen und stark gestiegene Ansprüche an die Ertragssicherheit und Nahrungsmittelqualität sind nur einige Gründe dafür, dass die Wasserversorgung von Kulturpflanzen erneut in den Fokus der Agrarwissenschaften gerückt ist. Aktuelle Themen in diesem Zusammenhang sind die Züchtung trockenstresstoleranter Genotypen, die Entwicklung wassersparender Bewässerungssysteme und die Optimierung der Bewässerungsstrategien.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, Wasserstress-Signale an gärtnerischen Kulturpflanzen aufzuspüren und damit Voraussetzungen für eine pflanzenbasierende Bewässerungsstrategie zu entwickeln.

Die Untersuchungen nutzten die Erkenntnis, dass Pflanzen auf Wasserstress mit Kavitationen im Xylemsystem reagieren, die mit Hilfe der Ultraschalltechnik registriert werden können. Im Gegensatz zur Messung des Wasserpotentials handelt es sich bei der Kavitationsmessung um eine nicht invasive und leicht automatisierbare Methode. Allerdings liegen in der Literatur nur wenige Kenntnisse über Einsatzmöglichkeiten bei gärtnerischen Kulturen vor. Die Anwendbarkeit zur Bewässerungssteuerung ist bislang nur bei Weinreben und Tomaten geprüft worden. Vor diesem Hintergrund waren eine Reihe von methodischen Voruntersuchungen notwendig, um grundsätzliche Fragen zur Messtechnik und zur Messmethodik zu klären. Für die Untersuchungen wurden mit *Asparagus officinalis*, *Rosa hybrida* und *Syringa vulgaris* drei Modellkulturen verwendet, für die am Versuchsstandort umfangreiche experimentelle und kulturtechnische Erfahrungen vorlagen. Eine Ausdehnung auf krautige Pflanzenarten wurde im Versuchverlauf wieder aufgegeben, da die Entstehung von Ultraschallsignalen offensichtlich an das Vorhandensein von Holzfasern im Xylem geknüpft ist. Die Untersuchungen wurden mit Pflanzen in Containern durchgeführt, um eine bessere Differenzierung des Wasserangebotes zu erzeugen.

Für die Ultraschallmessungen wurde das Schallemissionsmessgerät AMSY4 der Firma Vallen-Systeme mit einem Multiplexer vom Typ (MUX1) eingesetzt, das Schallaufzeichnungen von insgesamt 16 Objekten ermöglicht. Die verwendeten Ultraschallsensoren mit Vorverstärker arbeiten nach dem piezoelektrischen Prinzip, bei dem mechanische Schwingungen in elektrische Schwingungen umgewandelt werden. Als optimaler Messbereich für pflanzenphysiologische Untersuchungen hat

sich der Bereich von 100 kHz bis 400 kHz ergeben. Für die anfänglich aufgetretenen umfangreichen Störgeräusche konnten elektrische Antriebe, eine in der Nähe gelegene Bahnlinie und offensichtlich auch Hochdruckentladungslampen identifiziert werden. Die Messstandorte sollten sich demzufolge in ausreichender Entfernung von derartigen oder ähnlichen Störquellen befinden.

Voruntersuchungen zum geeigneten Messort (Organ) ergaben, dass die UAE-Signallrate in hohem Maße durch die Messposition und damit durch das Alter der Triebe definiert wird. Sowohl bei Flieder als auch bei Rosen konnten die meisten Schallereignisse an jungen Trieben registriert werden. An der Triebbasis bzw. an stark verholzten Trieben wurden deutlich weniger Signale registriert. Auch Blattstiele eignen sich nicht für die Überwachung, vermutlich auf Grund der geringen Kontaktfläche zwischen Blattstiel und Sensor. Bei den ebenfalls geprüften Spargeltrieben ist das Auffinden eines geeigneten Messortes unter anderem wegen der allgemein geringen Schallrate und der in den zwei Versuchsjahren stark unterschiedlichen Ergebnisse nicht gelungen.

Messungen im Tagesgang zeigten bei Pflanzen unter moderatem Wasserstress einen deutlichen Anstieg der Signallrate bis in die Nachmittagsstunden, einen nachfolgenden Rückgang und eine nur geringe Signallrate in der Nacht. Dieser Verlauf unterstützt die Vorstellung von einem engen Zusammenhang zwischen dem transpirationsbedingten Wasserstress (Absinken des Wasserpotenzials in den Xylemgefäßen) und dem Auftreten von Kavitationen. Für den bei Flieder beobachteten früheren Rückgang der Schallrate im Tagesgang kommen als Ursachen unter anderem ein besseres Stomatamanagement oder ein geringeres Kavitationspotenzial (weniger Xylemzellen mit Kavitationsneigung) in Frage. Eine Aufklärung des verantwortlichen Mechanismus konnte allerdings im Rahmen dieser Dissertation nicht vorgenommen werden.

Der Zusammenhang zwischen dem Wasserangebot im Boden und dem Auftreten von Ultraschallereignissen wurde im Rahmen von Austrocknungsversuchen studiert. Die dabei aufgezeichneten Kavitationsprofile zeigten bei den meisten Objekten einen deutlichen Anstieg der Schallereignisse im Austrocknungsverlauf und ein rasches Absinken nach Bewässerung. Zwischen der Anzahl an Schallereignissen und dem Bodenwasserpotential bestand eine signifikante statistische Beziehung. Auffallend bei diesen Untersuchungen war allerdings die starke Streuung der absoluten Signallraten in den einzelnen Versuchen und zwischen den Wiederholungen eines Versuches. In einem späten Stadium des Austrocknungsversuches wurden zum

Beispiel bei einigen Fliederpflanzen bis zu 1000 Signale pro 24 Stunden beobachtet, bei anderen Pflanzen dagegen nur 100. Messgeometrische Faktoren wie z.B. die unterschiedliche Auflagefläche auf den Sensoren oder Positionseffekte können derartige Unterschiede vermutlich nicht erklären.

Die im Rahmen der Austrocknungsversuche ebenfalls durchgeführten Messungen des Stamm- und/oder Blattwasserpotentials zeigten ähnliche Verläufe wie die des Bodenwasserpotentials und der täglichen Signalraten. In den ersten drei bis vier Tagen des Austrocknungsversuches verharrten die Trieb- oder Blattwasserpotentiale der Versuchspflanzen auf niedrigem Niveau, um nachfolgend stark anzusteigen und nach Welke und eingeleiteter Bewässerung wieder rasch abzufallen. Bei etwa 50% der Prüfprodukte bestand ein enger statistischer Zusammenhang zwischen dem Stamm-/Blattwasserpotenzial und der täglichen Signalrate. Entgegen den Erwartungen war diese Beziehung allerdings nicht enger als die zwischen dem Bodenwasserpotential und der Signalrate.

Bei den ebenfalls untersuchten Spargelpflanzen konnte kein Zusammenhang zwischen der Wasserversorgung der Pflanzen und der Ultraschallsignalrate festgestellt werden. Die Signalraten waren entweder sehr niedrig, traten gelegentlich erst bei beginnender Welke auf oder waren zwischen den beiden Versuchsjahren stark unterschiedlich. Eine Ursache für das gegenüber Rosen und Flieder deutlich abweichende Verhalten der Spargelpflanzen konnte nicht identifiziert werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die kavitationsbedingten Ultraschallsignale bei Flieder und Rosen eng mit den eingeführten Wasserhaushaltsparametern Bodenwasserpotential und Stammwasserpotential korrespondieren. Wegen ihres nicht invasiven Charakters und der leichten Automatisierbarkeit erschließt die Ultraschallmessung somit neue Möglichkeiten zur Charakterisierung des Wasserhaushaltes sowie der sie beeinflussenden Parameter. Zur Optimierung der Bewässerungssteuerung gärtnerischer Kulturen erscheint diese Methode derzeit jedoch noch nicht geeignet. Gründe hierfür sind einerseits die nicht erklärbaren, starken Unterschiede der absoluten Signalraten zwischen den einzelnen Messjahren und Messobjekten und die starke Abhängigkeit der Signalrate von der Messposition, dem morphologischen Status des Messortes und Umweltbedingungen wie Tageszeit, Einstrahlung usw.

Wegen dieser Abhängigkeiten von externen und internen Faktoren ist es im Rahmen dieser Dissertation auch nicht gelungen, Signalschwellenwerte für geeignete Bewässerungszeitpunkte zu ermitteln. Konzepte, die Bewässerung an den Zeitpunkt

des starken Anstiegs der Ultraschall-Signalrate zu knüpfen, eliminieren zwar das Problem der Bewertung von absoluten Signalraten, aber sie liefern keine Vorteile gegenüber der eingeführten und zudem wesentlich kostenextensiveren Messung des Bodenwasserpotentials.

8 Summary

Water shortage in many areas of the world, necessity for adaption to predicted climatic changes and strongly enhanced requirements with regards to yield security and food quality are some of the reasons why water supply of agricultural crops are again in the focus of agricultural science. Current topics in this context are the breeding of drought tolerant genotypes, the development of water-saving irrigation systems and the optimization of irrigation strategies.

The objective of this thesis was to detect water stress-related signals of horticultural crops and to develop the basic requirements of crop-based irrigation strategies.

The experiments used the knowledge that crops react to water stress with cavitation in the xylem system which can be detected by means of ultra sound techniques. In contrast to measurements of plant water potential, cavitation analysis is a non-invasive and easily automated method. However, only little information is available about its use in horticultural crops. Up to this time, applications for management of irrigation have been demonstrated only for grape-vine and tomato.

Consequently, a series of methodological experiments were initiated to clarify basic questions with regards to measurement techniques and methods. The experiments were carried out on three model crops (*Asparagus officinalis*, *Rosa hybrida* and *Syringa vulgaris*) for which extensive experimental and technical data was already available in the research station. An extension of the experiments to herbaceous plants was abandoned after it became clear that the generation of ultra-sound signals is apparently linked to the presence of wood fibres in the xylem. In order to generate a better differentiation of soil water availability, the experiments were conducted in containers.

Ultrasonic acoustic emission (UAE) was measured with a digital two channel acoustic emission device (AMSY4, Vallen-Systeme GmbH, Iking, Germany), which allows sound recordings of up to 16 objects. The ultra sound sensors with pre-amplifiers used were based on the piezoceramic principle transforming mechanical into electrical oscillations. The optimal metering range for plant-physiological examinations was between 100 kHz and 400 kHz. Identified sources of initial signal interference were electric motors, a nearby electrified railway track and high-voltage lamps. Therefore, the measurement sites should be located at a sufficient distance from such sources of possible interference.

Initial experiments with regards to the optimal positioning of sensors for conducting the measurements demonstrated that the ultrasound acoustic emission rate is affected to a high degree by the position/part of the plant and by the age of the shoot. At the stem base and in heavily lignified shoots, respectively, significantly fewer signals were recorded. Petioles are sub-optimal for monitoring, probably due to the small contact area between petiole and sensor. Due to a generally low sound rate and erratic results with asparagus shoots over a two-year period, it was not possible to determine a suitable position for conducting the ultrasonic acoustic emission monitoring.

Measurements over a 24-hour period showed that with plants under moderate water stress, there was an increase in the signal rate until the afternoon hours, followed by a decrease thereafter and only low signal rates during the night. This distribution supports the concept that there is a close link between the transpiration-related water stress (reduction of water potential in the xylem) and the occurrence of cavitation. The earlier decline of UAE signal-rate in *Syringa vulgaris* over a 24-hour period is likely due to, among other factors, a better stomata management or a reduced cavitation potential (less xylem tissue with cavitation susceptibility). A clarification of the underlying mechanism, however, was not within the scope of this work.

A correlation between the water availability in the soil and the occurrence of ultrasound emission was studied by means of dehydration experiments. The recorded cavitation profiles showed for most of the objects, a clear increase in sound events during the dehydration process and a quick decrease following irrigation. There was a statistically significant relationship between the number of sound events and the soil water potential. However, the strong variation in absolute signal rates between individual trials and between the replications of an individual trial was remarkable. For example, during the late stage of a dehydration trial with *Syringa vulgaris* up to 1000 signals per 24 hours were recorded, with other plants, however, only 100 signals. Geometrical factors such as different contact area of the sensors or position effects are possible explanations of such differences.

The measurements of the stem and/or leaf water potentials that were taken during the dehydration trials demonstrated characteristics similar to the measurements of the soil water potential and the associated daily acoustic signal rates. During the first 3-4 days of the dehydration trials, the shoot and leaf water potentials of the test plants initially remained at a low level and strongly increased thereafter, but quickly

descended after wilting and application of irrigation. In about 50% of the tested objects, there was a strong statistical relationship between the stem-/leaf-water potential and the daily signal rate. However, against all expectations, this relationship was not closer than that between soil water potential and the signal rate.

With the tested asparagus plants, no relationship between water supply of the plants and the ultra sound signal rate was observed. Either the signal rate was very low, or occurred only sporadically upon initiation of wilting or was very different between the two trial years. Reasons for the deviation in behaviour of the asparagus plants relative to that of rose and lilac could not be identified.

In summary, it can be concluded that the cavitation-related ultra sound signals with *Syringa vulgaris* and *Rosa hybrida* closely correspond with the introduced water balance parameters soil water potential and the stem water potential. Due to its non-invasive character and the easy automatisation potential, the ultra sound method opens new possibilities to characterize the water balance and those parameters influencing it.

However, from a today's perspective, this method does not seem qualified to optimize irrigation management in ornamental plant culture. All reasons thereto are not clear but include strong differences of absolute signal rates between the individual trial years and the trial objects, the strong dependency of signal rates from measurement position, from the morphological status of measured objects and from environmental conditions such as time of day, radiation etc.

Due to the dependencies from external and internal factors, it was not possible to determine absolute thresholds for ultrasound acoustic emission to enable irrigation timings. The concept of linking irrigation with the moment of strong increase of ultra sound signals may eliminate the problem to determine absolute signal rates but does not provide an advantage in comparison with the established and substantially less costly measurements of the soil water potential.

Literaturverzeichnis

- Akasaka, S.; Imai, S.; Okushima, L.; Sase, S., Qui, G. Y. (2002): Effects of Environmental Factors on Acoustic Emissions (AEs) in Peach Trees. *Acta Horticulturae*, 592, 439-443
- Alder, N. N.; Sperry, J.S.; Pockman, W. T. (1996): Root and stem xylem embolism, stomatal conductance, and leaf turgor in *Acer grandidentatum* populations along a soil moisture gradient. *Oecologia*, 105, 293-301
- Balling, A., Zimmermann, U., Büchner, K.-H., Lange, O.L. (1988): Direct measurements of negative pressure in artificial-biological systems. *Naturwissenschaften*, 75, 409-411
- Blackman, P.G.; Davies W.J. (1985): Root to shoot communication in maize plants of the effects of soil drying. *Journal of Experimental Botany*, 36, 39-48
- Bogart, K. (2000): Measuring wine grape status using a pressure chamber. <http://pmsinstrument.com/Kay%20Bogart%20Article%2001132005.pdf>
- Borghetti, M.; Raschi A.; Grace J. (1989): Ultrasound emission after cycles of water stress in *Picea abies*. *Tree Physiology*, 5, 229-37
- Borghetti, M.; Pisante, M.; Lambardi, M.; Raschi, A. (1990): Water relations and ultrasonic acoustic emissions in chestnut seedlings. *Acta Horticulturae*, 278, 129-136
- Bormann, M. W.; Ernst, M. K.; Liebig, H-P. (2001): Concurrent non-destructive measurement of ultrasound acoustic emission and transpiration on broccoli (*Brassica oleracea* L. convar. *botrytis* var. *italica* Plenck) to indicate water stress. *Acta Horticulturae*, 75, 173-177
- Bormann, M. W.; Liebig, H-P. (2002): Ultrasonic acoustic emission of broccoli (*Brassica oleracea* L. convar. *botrytis* var. *italica* Plenck) to indicate water stress. *Acta Horticulturae*, 593, 25-32
- Bormann, M. W. (2004): Akustische Methoden zur Untersuchung der Wasserversorgung bei Gemüsepflanzen. Dissertation, Universität Hohenheim
- Canny, M. J. (1997): Vessel contents during transpiration - embolisms and refilling. *American Journal of Botany*, 84, 9, 1223-1230
- Chabbert, B.; Monties, B.; Zieslin, N.; Ben-Zaken, R. (1993): Lignin content and composition of rose flower peduncles differing by their resistance to bending. *Plant Physiology and Biochemistry*, 31, 2, 241-247
- Choat, B.; Ball, M.; Luly, J.; Holtum J. (2003): Pit membrane porosity and water stress-induced cavitation in four co-existing dry rainforest tree species. *Plant Physiology*, 131, 41-48
- Cochard, H. (1992): Vulnerability of several conifers to air embolism. *Tree Physiology*, 11, 73-83
- Cochard, H.; Bréda, N.; Granier, A.; Aussenac, G. (1992): Vulnerability to air embolism of three european oak species (*Quercus petraea* (Matt) Liebl, *Q. pubescens* Willd, *Q robur* L). *Annales des Sciences Forestières*, 49, 225-233
- Comstock, J.P. (2002): Hydraulic and chemical signalling in the control of stomatal conductance and transpiration. *Journal of Experimental Botany*, 53, 195-200

- Cox, R.C.; Snaith, P.J.; Mansfield, T.A., (1985): The significance of natural and synthetic auxins in the control of stomatal movements. *Acta Horticulturae*, 171, 247-254
- Crombie, D. S.; Hipkins M. F.; Milburn, J. A. (1985a): Gas penetration of pit membranes in the xylem of *Rhododendron* as the cause of acoustically detectable sap cavitation. *Australian Journal of Plant Physiology*, 12, 445-453
- Crombie, D. S.; Milburn, J. A.; Hipkins M. F. (1985b): Maximum sustainable xylem sap tensions in *Rhododendron* and other species. *Planta*, 163, 109-118
- Desikan, R., Cheung, M.-K., Bright, J., Henson, D., Hancock, J.T. & Neill, S.J. (2004): ABA, hydrogen peroxide and nitric oxide signalling in stomatal guard cells. *Journal of Experimental Botany*, 55, 205-212
- Dixon, M. A.; Butt, J. A.; Murr, D. P.; Tsujita, M. J. (1988): Water relations of cut greenhouse roses: the relationships between stem water potential, hydraulic conductance and cavitation. *Scientia Horticulturae*, 36,109-118
- Ehret, D.L.; Lau, A.; Lin, W.; Bittman, S.; Shelford, T. (2001): Automated monitoring of greenhouse crops. *Agronomie: Agriculture and Environment*, 21, 4, 403-414
- Froux, F.; Ducrey, M.; Dreyer, E.; Huc, R. (2005): Vulnerability to embolism differs in roots and shoots and among three Mediterranean conifers: consequences for stomatal regulation of water loss? *Trees*, 19, 2, 137-144
- Fuchs, M. (1990): Infrared measurement of canopy temperature and detection of plant water stress. *Theoretical and Applied Climatology*, 42, 253-261
- Ginestar, C.; Eastham, J.; Gray, S.; Iland, P. (1998a): Use of sap-flow sensors to schedule vineyard irrigation. I. Effects of post-veraison water deficits on water relations, vine growth, and yield of Shiraz grapevines. *American Journal of Enology and Viticulture*, 49, 413-420
- Ginestar, C.; Eastham, J.; Gray S.; Iland, P. (1998b): Use of sap-flow sensors to schedule vineyard irrigation. II. Effects of post-veraison water deficits on composition of Shiraz grapes. *American Journal of Enology and Viticulture*, 49, 421-428
- Giorio, P.; Giorio, G. (2003): Sap flow of several olive trees estimated with the heat-pulse technique by continuous monitoring of a single gauge. *Environmental and Experimental Botany*, 49, 9-20
- Girona, J.; Mata, M.; J. del Campo; Arbonés, A.; Bartra, E.; Marsal, J. (2006): The use of midday leaf water potential for scheduling deficit irrigation in vineyards. *Irrigation Science*, 24, 2, 115-127
- Hacke, U.; Sauter, J. J. (1995): Vulnerability of xylem to embolism in relation to leaf water potential and stomatal conductance in *Fagus sylvatica* f. *purpurea* and *Populus balsamifera*. *Journal of Experimental Botany*, 46, 9, 1177-1183
- Hacke, U.; Sauter, J. J. (1996): Drought-induced xylem dysfunction in petioles, branches and roots of *Populus balsamifera* L. and *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn. *Plant Physiology*, 111, 413-417
- Hacke, U.; Sperry, J., S.; Pitterman J. (2000): Drought experience and cavitation resistance in six shrubs from the Great Basin, Utah. *Basic and Applied Ecology*, 1, 1, 31-41
- Hartmann, H. D.; Zengerle, K. H.; Brückner, U.; Cuck, H. (1988): Einfluss der Bewässerung auf den Ertrag von Blumenkohl. *Gemüse*, 24, 58-62

- Hauser, S. (2003): Dynamik hochaufgelöster radialer Schaftveränderungen und des Dickenwachstums bei Buchen (*Fagus sylvatica* L.) der Schwäbischen Alb unter dem Einfluss von Witterung und Bewirtschaftung. Dissertation, Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
- Havranek, W. M. (1980): Das Boden-Wasserpotential-bestimmbar durch Messung des Dammerungs-Wasserpotentials von Jungfichten? *Flora*, 169, 32-37
- Hendriks, L.; Spinarova, S.; Bormann, M. (2005): Acoustic emission profiles of cut roses as a prognosis for component vase life. *Acta Horticulturae*, 669, 35-41
- Hendriks, L.; Spinarova, S. (2007): Water stress signals of cut roses during postharvest process. *Acta Horticulturae*, 751, 415-22
- Herzog, K.M.; Häsler, R.; Thum, R. (1995): Diurnal changes in the radius of a subalpine Norway spruce stem: their relation to the sap flow and their use to estimate transpiration. *Trees*, 10, 94-101
- Hölttä, T.; Vesala, T.; Nikinmaa, E.; Peramaki, M.; Siivola, E.; Mencuccini, M. (2005): Field measurements of ultrasonic acoustic emissions and stem diameter variations. New insight into the relationship between xylem tensions and embolism. *Tree Physiology*, 25, 237-243
- Idso, S.B.; Jackson, R.D.; Pinter, P.J., Jr.; Reginato, R.J.; Hatfield, J L. (1981): Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 24, 45-55
- Ikeda, T.; Ohtsu, M. (1992): Detection of xylem cavitation in field-grown pine trees using the acoustic emission technique. *Ecological Research*, 7, 3, 391-395
- Jackson, G. E.; Irvine, J.; Grace, J. (1995): Xylem cavitation in Scots pine and Sitka spruce saplings during water stress. *Tree Physiology*, 15, 783-790
- Jackson, G. E.; Irvine, J.; Grace, J. (1995): Xylem cavitation in two mature Scots pine forests growing in a wet and a dry area of Britain. *Plant, Cell and Environment*, 18, 1411-1418
- Jackson, G. E.; Grace, J. (1996): Field measurements of xylem cavitation: are acoustic emissions useful? *Journal of Experimental Botany*, 47, 11, 1643-1650
- Jia, X.-l.; Zhang, L.-h.; Ma, R.-k.; Wang, Z.-l.; Zhang, Q.-g.; Yao, Y.-r. (2006): Ultrasonic acoustic emissions from leaf xylem of potted wheat subject to a soil drought and rewatering cycle. *Agricultural Sciences in China*, 5, 5, 346-355
- Johnson, D. M.; Meinzer F. C.; Woodruff D. R.; McCulloh (2009): Leaf xylem embolism, detected acoustically and by cryo-SEM, corresponds to decreases in leaf hydraulic conductance in four evergreen species. *Plant, Cell and Environment*, 32, 828-836
- Jones, H.G.; Peña, J. (1986): Relationships between water stress and ultrasound emission in apple (*Malus domestica* Borkh.). *Journal of Experimental Botany*, 37, 1245-1254
- Jones, H.G. (1990): Plant water relation and implications for irrigation scheduling. *Acta Horticulturae*, 278, 67-76
- Jones, H.G.; Sutherland, R. A. (1991): Stomatal control of xylem embolism. *Plant Cell Environment*, 14, 607-612
- Jones, H. G. (1992): *Plants and microclimate*. Cambridge University Press, Cambridge, UK

- Jones, H. G. (2004): Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany*, 55, 407, 2427-2436
- Kavanagh, K. L. (1992): Xylem cavitation: an indication of moisture stress in newly planted western hemlock seedlings. *Proceedings, Intermountain Forest Nursery Association*, 12-16
<http://www.fcnanet.org/proceedings/1991/kavanagh.pdf>
- Kikuta, S. B.; Lo Gullo, M. A.; Nardini, A.; Richter, H.; Salleo, S. (1997): Ultrasound acoustic emissions from dehydrating leaves of deciduous and evergreen trees. *Plant, Cell and Environment*, 20, 1381-1390
- Kikuta, S. B.; Hietz, P.; Richter, H. (2003): Vulnerability curves from conifer sapwood sections exposed over solutions with known water potentials. *Journal of Experimental Botany*, 54, 2149-2155
- Kikuta, S. B. (2007): Ultraschallemissionen als Nachweis von Kavitationsereignissen in Pflanzen. 16. Kolloquium Schallemission 2007: Vortrag 13
<http://www.ndt.net/article/dgzfp-ae-2007/Inhalt/v13.pdf> (persönliche Mitteilung)
- Kolb, K. J.; Sperry, J. S. (1999): Transport constraints on water use by the Great Basin shrub, *Artemisia tridentata*. *Plant Cell Environment*, 22, 925-935
- Körner Ch.; Mayr, R. (1980): Stomatal behaviour in alpine plant communities between 600 and 2600 metres above sea level. In: Grace J, Ford ED, Jarvis PG (eds) *Plants and their atmospheric environment*. Blackwell, Oxford
- Kramer, P. J. (1988): Measurement of Plant Water Status: Historical Perspectives and Current Concerns. *Irrigation Science*, 9, 4, 275-287
- Lo Gullo, M. A; Salleo, S. (1991): Three different methods for measuring xylem cavitation and embolism: a comparison. *Annual Botany*, 67, 417-424
- Lo Gullo, M. A; Salleo, S. (1992): Water storage in the wood and xylem cavitation in 1-year-old twigs of *Populus deltoides* Bartr. *Plant, Cell and Environment*, 15, 431-438
- Lösch, R.; Jensen, C. R.; Andersen, M. N. (1992): Diurnal courses and factorial dependencies of leaf conductance and transpiration of differently potassium fertilized and watered field grown barley plants. *Plant and soil*, 140, 2, 205-224
- Lösch, R. (2001): *Wasserhaushalt der Pflanzen*. Quelle und Meyer, Wiebelsheim, Deutschland
- Mayer, N. (2004). Unveröffentlichte Daten
- Mayr, S.; Zublasing, V.; Kikuta, S. (2007): Ultraschallemissionen bei Gefrier-Tau-Vorgängen in Koniferenholz. Kolloquium Schallemission 2007: Vortrag 11
<http://www.ndt.net/article/dgzfp-ae-2007/Inhalt/v11.pdf> (persönliche Mitteilung)
- McBurney, T. (1992): The relationship between leaf thickness and plant water potential. *Journal of Experimental Botany*, 43, 3, 327-335
- McCarthy, M.G.; Loveys, B.R.; Dry, P.R.; Stoll, M. (2000): Regulated Deficit Irrigation and Partial Rootzone Drying as Irrigation Management Techniques for Grapevines. *Water Reports 22*. Rome: FAO
- McCully, M. E.; Huang, C. X.; Ling, L. E. C. (1998): Daily embolism and refilling of xylem vessels in the roots of field-grown maize. *New Phytologist*, 138, 2, 327-342

- Meinzer, F.C.; Grantz, D.A.; Smit, B. (1991): Root signals mediate coordination of stomatal and hydraulic conductance in growing sugarcane. *Australian Journal of Plant Physiology*, 18, 4, 329-338
- Milburn, J. A.; Johnson RPC (1966): Conduction of sap. II. Detection of vibrations produced by sap cavitation in *Ricinus* xylem. *Planta*, 69, 43-50
- Milburn, J. A. (1973a): Cavitation in *Ricinus* by acoustic detection: induction in excised leaves by various factors. *Planta*, 110, 253-265
- Milburn, J. A. (1973b): Cavitation studies on whole *Ricinus* plants by acoustic detection. *Planta*, 112, 333-342
- Milburn, J. A.; McLaughlin, M. E. (1974): Studies of cavitation in isolated vascular bundles and whole leaves of *Plantago major* L. *New Phytologist*, 73, 861-871
- Mingeau, M.; Ameglio, T.; Pons, B.; Rousseau, P. (1994): Effects of water stress on development growth and yield of hazelnut trees. *Acta Horticulturae*, 351, 305-314
- Misra, R. K.; Sands, R. (1992): A comparison of sap flux and water relations of leaves of various isolated trees with special reference to foundation movement in clay soil. *Plant and soil*, 140, 2, 269-278
- Mouhouche, B.; Rudget, F.; Delecolle, R. (1998): Effects of water stress applied at different phenological phase on yield components of dwarf bean. *Agronomie*, 18, 197-205
- Munzert, M. (1992): Einführung in das pflanzenbauliche Versuchswesen. Blackwell Wissenschafts-Verlag, Parey
- Naor, A. (2000): Midday stem water potential as a plant water stress indicator for irrigation scheduling in fruit trees. *Acta Horticulturae*, 537, 447-454
- Naor, A.; Cohen, S. (2003): Sensitivity and variability of maximum trunk shrinkage, midday stem water potential, and transpiration rate in response to withholding irrigation from field-grown apple trees. *HortScience*, 38, 4, 547-551
- Nardini, A.; Salleo, S. (2000): Limitation of stomatal conductance by hydraulic traits: sensing or preventing xylem cavitation? *Trees*, 15, 1, 14-24
- Nardini, A.; Tyree, M.T.; Salleo, S. (2001): Xylem cavitation in the leaf of *Prunus laurocerasus* L. and its impact on leaf hydraulics. *Plant Physiology*, 125, 1700-1709
- Oertli, J. J. (1993): Der Saftaufstieg in Bäumen. *Vierteljahresschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich*, 183, 3, 169-190
- Ogaya, R.; Peñuelas, J. (2007): Seasonal ultrasonic acoustic emissions of *Quercus ilex* L. trees in a Mediterranean forest. *Acta Physiologiae Plantarum*, 29, 5, 407-410
- Okushima, L.; Sase, S.; Ohtani, T., Shimojyo, M; Higo, Y. (1998): Plant measurement by acoustic emission sensor. *Acta Horticulturae*, 421, 241-248
- Paschold, P.-J. (2006): Aktuelles vom Internationalen Bewässerungssymposium 2006 in Australien, Vortrag (persönliche Mitteilung)
- Paschold, P.-J. (2007): Damit das Wasser für morgen reicht. *Gemüse*, 2, 4-5
- Paschold, P.-J. (2007): Bewässerungssteuerung - Bestimmen des Zeitpunktes und optimaler Gabenhöhe der Zusatzwassergaben. *Landwirtschaft und Landschaftspflege in Thüringen*, 6, 21-24

- Passioura, J.B. (1988): Root signals control leaf expansion in wheat seedlings growing in drying soil. *Australian Journal of Plant Physiology*, 15, 687-693
- Peña, J.; Grace, J. (1986): Water relations and ultrasound emissions of *Pinus sylvestris* L. before, during and after a period of water stress. *New Phytologist*, 103, 515-524
- Perks, M. P.; Irvine, J.; Grace, J. (2004): Xylem acoustic signals from mature *Pinus sylvestris* during an extended drought. *Annals of Forest Science*, 61, 1-8
- Pickard, W. F. (1981): The Ascent of Sap in Plants. *Progress in Biophysics and molecular Biology*, 37, 181-229
- Pockman, W. T.; Sperry, J. S.; O'Leary, J. W. (1995): Sustained and significant negative water pressure in xylem. *Nature*, 378, 715-716
- Pospíšilová, J. (2003): Interaction of cytokinins and abscisic acid during regulation of stomatal opening in bean leaves. *Photosynthetica*, 41, 49-56
- Pospíšilová, J.; Synkova H.; Rulcová J. (2000): Cytokinins and water stress. *Biologia Plantarum*, 43, 3, 321-328
- Qiu, G. Y.; Okushima, L.; Sase, S.; Lee, I.-B. (2002): Acoustic Emissions in Tomato Plants under Water Stress Conditions. *Japanese Agricultural Research Quarterly*, 36, 103-109
- Ranasinghe, M. S.; Milburn, J. A. (1995): Xylem conduction and cavitation in *Hevea brasiliensis*. *Journal of Experimental Botany*, 46, 11, 1693-1700
- Ritman, K. T.; Milburn, J. A. (1988): Acoustic emissions from plants: ultrasonic and audible compared. *Journal of Experimental Botany*, 39, 1237-1248
- Ritman, K. T.; Milburn, J. A. (1991): Monitoring of ultrasonic and audible emissions from plants with or without vessels. *Journal of Experimental Botany*, 42, 123-130
- Rosner, S.; Klein, A.; Wimmer, R.; Karlsson B. (2006): Extraction of features from ultrasound acoustic emissions: a tool to assess the hydraulic vulnerability of Norway spruce trunkwood? *New Phytologist*, 171, 105-116
- Rosner, S.; Karlsson B.; Konnerth J.; Hansmann, C. (2009): Shrinkage processes in standard-size Norway spruce wood specimens with different vulnerability to cavitation. *Tree Physiology*, 29, 11, 1419-1431
- Saeed, I. A. M.; El-Nadi, A., H. (1997): Irrigation effects on the growth, yield, and water use efficiency of alfalfa. In: *Irrigation Science 17*. Springer Verlag, Berlin, Deutschland, 63-68
- Salleo, S.; Lo Gullo M. A. (1986): Xylem cavitation in nodes and internodes of whole *Chorisia insignis* H.B. et K. Plants subjected to water stress: relations between xylem conduit size and cavitation. *Annals of Botany*, 58, 431-441
- Salleo, S.; Lo Gullo M. A. (1989a): Different aspects of cavitation resistance in *Ceratonia siliqua*, a drought-avoiding Mediterranean tree. *Annals of Botany*, 64, 325-336
- Salleo, S.; Hinckley, T. M.; Kikuta, S. B.; Lo Gullo, M. A.; Weilgony, P.; Yoon, T.-M.; Richter, H. (1992): A method for inducing xylem emboli in situ experiments with a field grown tree. *Plant, Cell and Environment*, 15, 491-497
- Salleo, S.; Nardini, A.; Pitt, F., Lo Gullo, M. A. (2000): Xylem cavitation and hydraulic control of stomatal conductance in laurel (*Laurus nobilis* L.). *Plant Cell and Environment*, 23, 71-79

- Salleo, S.; Lo Gullo, M. A.; Raimondo, F.; Nardini, A. (2001): Vulnerability to cavitation of leaf minor veins: any impact on leaf gas exchange? *Plant, Cell and Environment*, 24, 851-859
- Sandford, A. P.; Grace, J. (1985): The measurement and interpretation of ultrasound from woody stems. *Journal of Experimental Botany*, 36, 298-311
- Santos, T. P. d.; Lopes, C. M.; Rodrigues, M. L.; R. de Souza, C.; Maroco, J. P.; Pereira, J. S.; Silva, J. R.; Chaves, M. M. (2003): Partial rootzone drying: effects on growth and fruit quality of field-grown grapevines (*Vitis vinifera*). *Functional Plant Biology*, 30, 6, 663-671
- Schmid, E. A., Spinarova, S., Hendriks, L.: Messungen von Wasserstress-Signalen an Zierpflanzen mit Hilfe von Ultraschalltechnik BDGL- Poster anlässlich der DGG-Tagung in Erfurt 2007
- Scholander, P. F.; Hammel, H. T.; Bradstreet, E. D., Hemmingsen E. A. (1965): Sap pressure in vascular plants. *Science*, 148, 339-46
- Schultz, H. R. (2004): Möglichkeiten und Ergebnisse der Bewässerung in Steillagen. Vortrag beim Steillagenforum in Bernkastel-Kues (persönliche Mitteilung)
- Shifeng, Y.; Pei L.; Okushima, L.; Sase, S.; Qiu, G. (2003): Automatic and precise irrigation system based on estimation of water stress in tomato. American Society of Agricultural and Biological Engineers
- Shifeng, Y.; Pei, L.; Okushima L.; Sase S. (2004): Precision irrigation system based on detection of crop water stress with acoustic emission technique. Information Acquisition Proceedings. International Conference on Environmental Science and Information Application Technology, 444-447
- Shifeng, Y.; Ye, Y.; Jiankai, L., Xiuqing, W. (2008a): Non-destructive measurement on crop water stress based on microcomputer. American Society of Agricultural and Biological Engineers
- Shifeng, Y.; Xiuqing, W.; Jimin, Z.; Jianying, G. (2008b): Crop water stress measurement system based on acoustical emission technology. International Conference on Environmental Science and Information Application Technology, 411-415
- Siddique, M. R. B.; Hamid, A.; Islam, M. S. (2000): Drought stress effects on water relations of wheat. *Botany Academia Sinica*, 41, 35-39
- Sitte P.; Weiler E. W.; Kadereit J. W.; Bresinsky A.; Körner C. (2002): Strassburger, Lehrbuch der Botanik. 35. Auflage. Heidelberg, Berlin. (Spektrum, Akad Verlag)
- Sparks, J. P.; Campbell, G. S.; Black, R. A. (2001): Water content, hydraulic conductivity, and ice formation in winter stems of *Pinus contorta*: a TDR case study. *Oecologia*, 127, 468-475
- Sperry, J. S. (1986): Relationship of xylem embolism to xylem pressure potential, stomatal closure, and shoot morphology in the palm *Rhapis excelsa*. *Plant Physiology*, 80, 110-116
- Sperry, J. S.; Tyree, M.T. (1988): Mechanism of water-stress induced embolism. *Plant Physiology*, 88, 581-587
- Sperry, J. S.; Donnelly, J. R.; Tyree, M. T (1988): Seasonal occurrence of xylem embolism in sugar maple (*Acer saccharum*). *American Journal of Botany*, 75, 8, 1212-1218

- Sperry, J. S.; Nichols, K. L.; Sullivan, J. E. M.; Eastlack, S. E. (1988): Xylem embolism in ring-porous, diffuse-porous, and coniferous trees of northern Utah and interior Alaska. *Ecology*, 75, 6, 1736-1752
- Sperry, J. S.; Tyree, M. T.; Donnelly, J. R. (1988): Vulnerability of xylem to embolism in a mangrove vs. an inland species of Rhizophoraceae. *Physiologia Plantarum*, 74, 276-283
- Sperry, J. S.; Tyree, M. T. (1990): Water-stress-induced xylem embolism in three species of conifers. *Plant Cell and Environment*, 13, 427-436
- Sperry, J.S.; Perry, A. H.; Sullivan, J. E. M. (1991): Pit membrane degradation and air-embolism formation in aging xylem vessels of *Populus tremuloides* Michx. *Journal of Experimental Botany*, 42, 1399-1406
- Sperry, J.S. (1993): Winter embolism and spring recovery in *Betula cordifolia*, *Fagus grandifolia*, *Abies balsamifera*, and *Picea rubens*. In: water transport in plants under climatic stress. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 86-98
- Sperry, J. S.; Saliendra, N. Z. (1994): Intra- and inter-plant variation in xylem cavitation in *Betula occidentalis*. *Plant Cell Environment*, 16, 279-288
- Sperry, J. S.; Nichols, K. L.; Sullivan, J. E. M.; Eastlack, S. E. (1994): Xylem embolism in ring-porous, diffuse-porous, and coniferous trees of northern Utah and interior Alaska. *Ecology*, 75, 1736-1752
- Sperry, J. S. (1995): Limitations on stem water transport and their consequences. In Gartner, B. L.: *Plant Stems: Physiology and Functional Morphology*. Academic Press, San Diego, CA, S, 105-124
- Sperry J. S. (2000): Hydraulic constraints on plant gas exchange. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2831, 1-11
- Spinarova, S.; Hendriks, L. (2005): Factors influencing acoustic emission profiles of cut roses. *Acta Horticulturae*, 669, 63-70
- Spinarova, S.; Hendriks, L. (2007): Post-harvest water stress tolerance of various rose cultivars: screening and characterisation. *Acta Horticulturae*, 751, 423-430
- Stoll M.; Loveys B.; Dry P. (2000): Hormonal changes induced by partial rootzone drying of irrigated grapevine. *Journal of Experimental Botany*, 51, 1627-1634
- Swanson, R.H. (1994): Significant historical developments in thermal methods for measuring sap flow in trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 72: 113-132
- Tardif, J.; Flannigan, M.; Bergeron, Y. (2001): An analysis of the daily radial activity of 7 boreal tree species, northwestern Quebec. *Environmental Monitoring and Assessment*, 67, 141-160
- Thompson, D. S.; Wilkinson, S.; Bacon, M. A.; Davies, W.J. (1997): Multiple signals and mechanisms that regulate leaf growth and stomatal behaviour during water deficit. *Physiologia Plantarum*, 100, 2, 303-313
- Toit, P. G.; Dry, P. R.; Loveys, B. R. (2003): A preliminary investigation on partial rootzone drying (PRD) effects on grapevine performance, nitrogen assimilation and berry composition. *South African Journal for Enology and Viticulture*, 24, 2, 43
- Turner, N. C. (1988): Measurement of plant water status by the pressure chamber technique. *Irrigation Science*, 9, 4, 289-308

- Tyree, M. T.; Dixon M. A. (1983): Cavitation Events in *Thuja occidentalis* L.? Ultrasonic acoustic emissions from the sapwood can be measured. *Plant Physiology*, 72, 1094-1099
- Tyree, M. T.; Dixon, M. A.; Thompson, R. G. (1984a): Ultrasonic acoustic emissions from the sapwood of *Thuja occidentalis* measured inside a pressure bomb. *Plant Physiology*, 74, 1046-1049
- Tyree, M.T., Dixon, M.A., Tyree, E.L. & Johnston, R. (1984b): Ultrasonic acoustic emissions from the sapwood of cedar and hemlock: An examination of three hypothesis regarding cavitation. *Plant Physiology*, 75, 988-992
- Tyree, M. T.; Fiscus, E. L.; Wullschlegel, S. D.; Dixon M. A. (1986): Detection of xylem cavitation in corn under field conditions. *Plant Physiology*, 75, 988-992
- Tyree, M. T.; Dixon M. A. (1986): Water stress induced cavitation and embolism in some woody plants. *Plant Physiology*, 66, 397-405
- Tyree, M. T.; Sperry, J. S. (1988): Do woody plants operate near the point of catastrophic xylem dysfunction caused by dynamic water stress? Answers from a model. *Plant Physiology*, 88, 574-580
- Tyree, M. T.; Sperry, J. S. (1989a): Vulnerability of Xylem to Cavitation and Embolism. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 40, 19-36
- Tyree, M. T.; Sperry, J. S. (1989b): Characterization and propagation of acoustic emission signals in woody plants: towards an improved acoustic emission counter. *Plant, Cell and Environment*, 12, 4, 371-382
- Tyree, M. T.; Cochard, H.; Cruiziat, P.; Sinclair, B.; Ameglio, T. (1993): Drought-induced leaf shedding in walnut: evidence for vulnerability segmentation. *Plant, Cell and Environment*, 16, 7, 879-882
- Tyree, M. T. (1999): The forgotten component of plant water potential: A reply - tissue pressures are not additive in the way M. J. Canny suggests. *Plant Biology*, 1, 6, 598-601
- Martinez-Vilalta, J.; Pockman, W. T. (2002): The vulnerability to freezing-induced xylem cavitation of *Larrea tridentata* in the Chihuahuan desert. *American Journal of Botany*, 89, 12, 1916-1924.
- Weibel, F. P.; Boersma, K. (1995): An improved stem heat balance method using analog heat control. *Agricultural and Forest Meteorology*, 75, 191-208
- Van Doorn, W. G.; Suiro, V. (1996): Relationship between cavitation and water uptake in rose stems. *Physiologia Plantarum*, 96, 305-311
- Vogel, M. (1994): Automatische Radialzuwachsfeinmessung in einem Fichtenaltbestand und Möglichkeiten der Interpretation kurzfristiger Schwankungen der Zuwachsmesswerte. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*, 165, 2, 34-40
- Vogt, U K. (1998): Strukturell-funktionelle Koordination von Wasserleitung und Transpiration als Grundlage des hydroökologischen Konstitutionstyps bei Kräutern, Stauden und Sträuchern. Dissertation, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf
- Warda, H.-D. (1998): Das große Buch der Garten- und Landschaftsgehölze. Bruns Pflanzen Export GmbH. Bad Zwischenahn

- Wilkinson, S.; Davies W.J. (1997): Xylem sap pH increase: a drought signal received at the apoplastic face of the guard cell that involves the suppression of saturable abscisic acid uptake by the epidermal symplast. *Plant Physiology*, 113, 559-573
- Wilkinson, S.; Davies W.J. (2002): ABA-based chemical signalling: the co-ordination of responses to stress in plant. *Plant Cell and Environment*, 25, 195-212
- Willert v., D. J., Matyssek R., Herppich W. (1995): *Experimentelle Pflanzenökologie - Grundlagen und Anwendungen*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 38-42
- Williamson, V. G.; Milburn, J. A. (1995): Cavitation events in cut stems kept in water: implications for cut flower senescence. *Scientia Horticulturae*, 64, 219-232
- Wronski, E.B.; Holmes, J.W.; Turner, N.C. (1985): Phase a amplitude relations between transpiration, water potential and stem shrinkage. *Plant Cell and Environment*, 8, 613-622
- Wullschlegel, S. D.; Meinzer, F.C; Vertessy, R. A. (1998): A critique of whole-plant water use studies in trees. *Tree Physiology*, 18, 499-512
- Zhang J, Schurr U; Davies W. J. (1987): Control of stomatal behaviour by abscisic acid which apparently originates in roots. *Journal of Experimental Botany*, 38, 1174-1181
- Zimmermann, M. H. (1983): *Xylem structure and ascent of sap*. Berlin, Germany: Springer
- Zweifel, R. (1999): *The rhythm of trees - water storage dynamics in subalpine Norway spruce*. Ph.D. Thesis No. 13391, Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich

**Der Lebenslauf wurde aus der elektronischen
Version der Arbeit entfernt.**

**The curriculum vitae was removed from the
electronic version of the paper.**

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Ludger Hendriks, Fachgebiet Zierpflanzenbau der Forschungsanstalt Geisenheim für die Überlassung des Themas und des Arbeitsplatzes und für die gute Betreuung. Seine ständige Diskussionsbereitschaft brachte für die Bearbeitung des Themas immer neue Anregungen. Außerdem möchte ich mich für seinen Einsatz zur Sicherung der finanziellen Unterstützung bedanken.

Ganz herzlich bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Dr. h.c. Wolfgang Friedt, Fachbereich Agrarwissenschaften, Ökotropologie und Umweltmanagement der Justus-Liebig-Universität Gießen, für die Übernahme des Koreferates, für die gute Betreuung und für die Ermöglichung an einer deutschen Universität zu promovieren.

Danken möchte auch allen Mitarbeitern des FG Zierpflanzenbau der FA Geisenheim, insbesondere Herrn Prof. Dr. Volker Behrens der mich stets mit wissenschaftlichem Rat unterstützte. Diesbezüglich danken möchte ich auch Herrn Prof. Dr. Jürgen Paschold, Fachgebiet Gemüsebau, FA Geisenheim.

Daneben gilt Herrn Nobert Mayer mein Dank für die Unterstützung bei den Untersuchungen an *Asparagus officinalis* und seine vielen spontanen Hilfestellungen bei Computerproblemen.

Herrn Prof. Dr. Andreas Schmid, Laboratory of Chemical Biotechnology, Technische Universität Dortmund, möchte ich mich ganz besonders für seine gewissenhafte Durchsicht des Manuskriptes, die zahlreiche Anregungen und die aufmunternden Worte bedanken.

Herrn Dr. Michael M. Bormann, Universität Hohenheim, möchte für die „technische“ Betreuung danken.

Familie Dr. Hoffmann danke ich für das Korrekturlesen der Arbeit.

Mein spezieller Dank gilt Herrn Dr. Hermann Plätzen und seiner Familie für die Begleitung und Förderung meines beruflichen Werdegangs.

Mein Dank gilt nicht zuletzt meinem Doktorandenkollegen und Ehemann, der mich die ganze Zeit unterstützte und mir zu jeder Zeit mit Rat und Tat zur Seite stand und mir somit die notwendige Ruhe und Sicherheit für die Erstellung dieser Arbeit gab. Weiterhin danke ich meiner Cousine Liliana Dobri für ihre Motivierung und vielseitige Unterstützung.

„Ich erkläre: Ich habe die vorgelegte Dissertation selbständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe und nur mit den Hilfen angefertigt, die ich in der Dissertation angegeben habe. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten Schriften entnommen sind, und alle Angaben, die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Bei den von mir durchgeführten und in der Dissertation erwähnten Untersuchungen habe ich die Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis, wie sie in der „Satzung der Justus-Liebig-Universität Gießen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis“ niedergelegt sind, eingehalten.“